مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (39) العدد (2) 2017
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (39) No. (2) 2017

دراسة تأثير نسبة المواد الناعمة على السلوكية الانضغاطية للترب الرملية

الدكتور منذر عمران الزاوي*
الدكتور صفوان عبد الله **
عمار نجيب النمر***

(تاريخ الإيداع 27 / 11 / 2016. قُبِل للنشر في 19/ 3 / 2017)

□ ملخّص □

تتأثر سلوكية التشديد في الترب الرملية غير الصافية بشكل كبير بنسبة المواد الناعمة التي تدخل فيها وتتبدل تبعا لذلك بارامترات التشديد، ومن أجل دراسة هذه الظاهرة تم مخبريا تشكيل مجموعة من عينات الترب المختلطة(رمل مضاف اليه نسب مختلفة من المواد الناعمة السيلتية)، وأجريت عليها تجارب التشديد لدراسة تأثير تغير نسب الخلط على تشديد هذه العينات، وقد بينت نتائج الاختبارات المجراة أن نسبة المواد الناعمة المضافة إذا كانت ضمن مجال معين اصطلح على تسميته **بالمجال الانتقالي** لا تكون التربة المختلطة فقط منخفضة الانضغاطية بل يتحسن تماسكها لأن المواد الناعمة عند نسبة معينة تملأ الفراغات بالكامل وهو ما يبرهن ان الترب المفككة اذا كانت فيها نسبة المواد الناعمة قريبة من المجال الانتقالي فان انضغاطيتها لن تزيد ، كما بينت النتائج ان المجال الانتقالي المثالي للمواد الناعمة هي في حدود 10%–15% وهذا يتوافق مع العديد من الأبحاث المجراة في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: رمل سيلتي، مواد ناعمة، محتوى المواد الناعمة، التشديد، الانضغاط، نسبة الفراغ الحبيبية.

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

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (39) العدد (2) 2017
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (39) No. (2) 2017

Study the Effect of the Percentage of Fines on the Compressibility Behavior of Sandy Soils

Dr. Mounzer Omran Alzawi*
Dr. Safwan Abdallah**
Ammar Njeeb Alnmr***

(Received 27 / 11 / 2016. Accepted 19 / 3 / 2017)

□ ABSTRACT □

Consolidation behavior of pure sandy soil is significantly affected by the percentage content of fine materials, which controls the parameters of Consolidation. In order to study this phenomenon, it was formed a set of mixed soil samples at laboratory (by adding to the sand, different percentages of fine materials), and then consolidation tests were carried out to study the effect of changing the mixing percentage. The results of tests have demonstrated that the percentage of fines additives if they are within a limited range has been termed transitional range, at which mixed soil not only has a low compressibility but also an improvement in its cohesion is occurred. Because the fine material at a certain percentage completely fills the spaces which proves that if the percentage of fine material in the cohesionless soil close to the transition percentage, the compressibility will not increase. The results also showed that the ideal transition range for fine materials are in the range of 10% -15%, and those values are in a good agreement with many of the researches that were conducted in this domain.

Key words: Silty sand, fines, fines content, oedometer, compression, intergranular void ratio.

* **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 at Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria .**

مقدمة

غالبا مانصادف المواد الناعمة في أعمال التربة. يتم تعريف محتوى المواد الناعمة كنسبة مئوية وزنية لأبعاد الجزيئات الأقل من (0.074mm,ASTM) المارة من المنخل 200، أو أقل من 0.063mmحسب المعايير البريطانية.لذلك يمكن أن يتضمن مصطلح المواد الناعمة كلا من السيلت والغضار.

إن معظم الترب المتواجدة في الطبيعة لا تتواجد بشكل صاف بل مختلطة أي إنها حاوية على نسب متفاوتة من السيلت أو الغضار أو السيلت والغضار معا، ويمكن تصنيف المواد الناعمة استنادا إلى مخطط حدود أتربرغ وهي طريقة التصنيف المعتمدة في نظام التصنيف الموحد للترب USCS.

من المعروف أن احتواء الترب المفككة على نسب من المواد الناعمة هو مسألة من مسائل الهندسة الجيوتكنيكية التي ينبغي أن تولى مزيدا من الدراسة والاهتمام إذ إن المواد الناعمة في التربة تزيد بالتأكيد انضغاطية التربة وتزيد ميلها إلى الزحف ، وغالبا ما يفترض أن المقاومة ، والمتانة ، والناقلية الهيدروليكية وتسيُّل التربة تتناقص مع زيادة نسبة المواد الناعمة في التربة [10](Mitchell, 1993)، لذلك تسعى اغلب التوصيات العلمية في المشاريع الجيوتكنيكية العملية إلى تحديد النسبة المقبولة للمواد الناعمة التي لا ينبغي ان يتم تجاوزها في التربة .

دُرست البارامترات المؤثرة على السلوك الميكانيكي للترب الرملية مثل الكثافة النسبية، ودرجة الاشباع، وطريقة تحضير العينة، والنسبة فوق المشددة OCR بإسهاب من قبل[12](Naeini and Baziar, 2004) ، (Della et al, 2009)[4] ، [17](Sharafi and Baziar, 2010) ، [3](Belkhatir et al, 2012)، كما درس من قبل [6](Keneth lupogo, 2013) التركيب المنرالوجي للنواعم و حجم وشكل الحبيبات .

بحث [5](Fukue et al ,1986) سلوك التشديد في خليط من الرمل والغضار، واستنتج أن الانضغاطية تتناقص بشكل كبير إذا وصلت نسبة الفراغ الحبيبية الى قيمة معينة تسمى **عتبة نسبة الفراغ** وهذه القيمة أكبر بقليل من نسبة الفراغ الأعظمية للرمل المستخدم بالخلائط واستنتج أن قيمة هذه العتبة في دراسته تقع ضمن المجال (1.25–1.4). حيث تصبح الحبيبات الرملية عند هذه العتبة على تماس مع بعضها البعض وبالتالي تنشأ مقاومة الاحتكاك لذلك فإن الخليط عند هذه العتبة سيملك انضغاطية منخفضة ومقاومة عالية لأن مقاومة الاحتكاك والتماسك ستكون كبيرة.

وقد أورد[5](Fukue et al, 1986) مزايا استخدام خلائط الرمل الغضاري من أجل استصلاح السدود بشرط تشكيل الخليط المناسب (الذي تصبح فيه نسبة الفراغ الحبيبية مساوية لعتبة نسبة الفراغ)، والذي يتمتع بالمزايا التالية:

1) التماسك الذي يقلل من احتمال تسيل التربة.
2) الانضغاطية المنخفضة كما في الرمال أو الحصويات الناعمة

3) يمكن استخدام الترب الرسوبية الناعمة(sediments) في الخلائط.

4) يمكن من أجل الاستصلاح استخدام ترب تحتوي على كميات معينة من الغضار إذا توفرت فيها المعايير المطلوبة.

درس [11](Monkul et al, 2007)السلوكية الانضغاطية للرمل الغضاري ونسبة المواد الناعمة الانتقالية، وخلص إلى أن سلوكية الانضغاط للرمل الغضاري يمكن تحديدها بجهاز الأدومتر عبر الاستفادة مما يسمى **نسبة الفراغ الحبيبية** بدلا من نسبة الفراغ العامة. تبقى الحبيبات الخشنة تحت إجهاد مطبق محدد سلفا وفي شروط أولية معينة مهيمنة على سلوك التشديد وحيد الاتجاه للرمل الغضاري حتى تصبح نسبة المواد الناعمة(غضار الكاؤولينيت) في التربة المختلطة مساوية الى نسبة المواد الناعمة الانتقالية وهي تتراوحبين 19٪ –34٪ حيث تكون الانضغاطية منخفضة ومقاومة القص مرتفعة،وعندما تتجاوز هذه النسبة تبدأ المواد الناعمة بالتحكم في سلوكية العملية التشديدية في الخليط. وبيّنوا أن نسبة المواد الناعمة الانتقالية مستقلة عن نسبة الفراغ الأصغرية. وتعتبر امثال هذه الدراسات رائدة في بحث سلوكية تشديد خلائط الرمل والغضار واستخدام النتائج في اعادة تقييمها وتصنيفها.

ان تقييم الحالة الاولية للتربة مهم جدا من أجل دراسة السلوك الميكانيكي للتربة، وهناك عدة امكانيات تحدد بموجبها الحالة الأولية للتربة الحبيبية، لكن البارامترات الشائعة أكثر من غيرها هي:

- ✓ نسبة الفراغ الحبيبية (e_s) intergranular void ratio : $e_s = (e + fc)/(1 - fc)$
- ✓ نسبة الفراغ للمواد الناعمة (e_f) interfine void ratio: $e_f = e/fc$
- ✓ نسبةالفراغالعامة (e) global void ratio : $e = Vv/Vs = (\gamma_s/\gamma_d) - 1$
- ✓ الكثافة النسبية (Dr) relative density : $D_r = (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})$

حيث fc نسبة المواد الناعمة – Vv حجم الفراغ – Vs الحجم الصلب – γ_s الوزن الحجمي الصلب – γ_d الوزن الحجمي الجاف – e_{max} نسبة الفراغ الأعظمية – e_{min} نسبة الفراغ الأصغرية.

ان نسبة الفراغ والكثافة النسبية معروفان عموما أما بالنسبة لنسبة الفراغ الحبيبية ونسبة الفراغ للمواد الناعمة تكون خاصة للترب التي تحوي على نسبة من المواد الناعمة (ترب مختلطة).

كما اعتمد[10](Mitchell, 1993) مفهوم **نسبة الفراغ الهيكلية** (the skeleton void ratio) لتحديد محتوى الغضار غير النشط في التربة وكانت الفكرة الأساسية اعتبار الغضار غير النشط كفراغات ضمن التربة، أما([19]Thevanayagam et al, 2000) فقد اقترح امكانية استخدام **نسبة الفراغ الحبيبية** لدراسة سلوك التربة التي تحتوي على جزيئات خشنة وناعمة.

يستند كلاً من البارامترين نسبة الفراغ الحبيبية ونسبة الفراغ الهيكلية إلى نفس المفاهيم (Monkul et al, 2007[11]; Rahman et al, 2008[14]) ، وتحسب هذه البارامترات بمعاملة نسبة المواد الناعمة وكأنها فراغات في التربة لأنها تعد **مالئة** للفراغات بين الحبيبات الخشنة.

تتراوح عتبة المواد الناعمة (TFC Threshold Fines Content) بحسب [13](Ni et al, 2004)بين 20–30٪، ويقتصر استخدام مفهوم نسبة الفراغ الحبيبية على الترب التي تحتوي نسبة مواد ناعمة أقل من نسبة العتبة المذكورة أعلاه(**نسبة ما تحت العتبة**) ، بينما اقترح استخدام ما يسمى نسبة الفراغ بين المواد الناعمة (e_f) للترب التي نسبة المواد الناعمة فيها بين 30–100٪ أكبر من نسبة العتبة المذكورة أعلاه (**نسبة ما فوق العتبة**) لأنها الأكثر تمثيلا لكي يمكن بها معايرة خواص التربة الغضارية أو السيلتية.

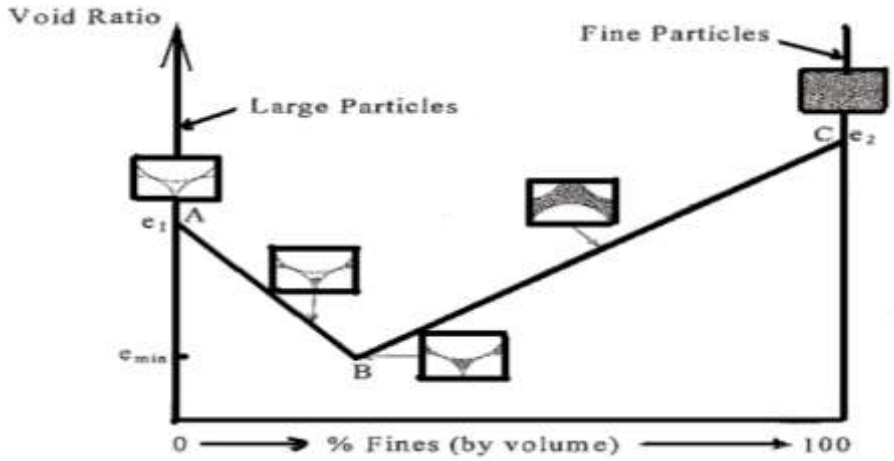
يمثل مفهوم نسبة الفراغ الحبيبية أفضل مؤشر يمكن التعبير من خلاله عن توصيف التربة الرملية بحسب [19](Thevanayagam et al, 2000):

$$e_s = (e + fc)/(1 - fc) \qquad (1)$$

حيث– e – نسبة الفراغ العامة.

fc– نسبة المواد الناعمة.

يبين الشكل(1) تغير نسبة الفراغ بزيادة محتوى المواد الناعمة(السيلتية)، ويميز بين ثلاث مناطق في خلائـط الرمل–السيلت، فعندما يكون محتوى السيلت من 10 إلى20٪(المنطقة الاولى) يكون سلوك الرمل هو السلوك المهيمن على الخليط أما عندما تكون نسبة السيلت بين 25٪ و45٪ (المنطقة الثانية) فإن جزيئات السيلت في هذه الحالة تملأ الفراغات بين حبيبات الرمال الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض نسبة الفراغ بشكل كبير حيث لا الرمل ولا السيلت يمكن أن يؤديا دورها أو يسلكا نفس سلوكهما كما لو أنهما صافيان غير مخلوطين. المنطقة الثالثة هي عندما تكون نسبة السيلت في الخليط أعلى من النسبة في المنطقة الثانية ويكون سلوك السيلت هو السلوك المهيمن على الخليط [2](Bahadori, 2008).



الشكل (1) تمثيل تخطيطي لخليط الرمل و السيلت (Lade and Yamamuro ,1998)

اشتغل [19](Thevanayagam and Mohan, 2000) على رمل الكوارتز بنسب مختلفة من المواد الناعمة اللدنة التي أضافها إليه، وتبين أن نسبة المواد الناعمة في الخليط بين 20٪ و30٪ هي التي تحدد عملية الانتقال بين سلوكي نوعي التربة(التربة الخشنة والتربة الناعمة)، أما من أجل محتوى مواد ناعمة بحدود 20٪ أو أقل تهيمن الحبيبات الخشنة على الانضغاطية في حين من أجل نسبة مواد ناعمة بدءاً من 30٪ فما فوق فإن المواد الناعمة تهيمن على سلوكية الخليط.

قام [6](Keneth Lupogo, 2013) بتجربة التشديد وحيد المحور وحدد نسبة النواعم الانتقالية التي تحقق أقل انضغاطية واعتبرها ضمن المجال من (15 – 30)% وهي نسبة تحقق درجة إملاء الفراغات القصوى كما ناقش Keneth Lupogo نظرية إملاء الجزيئات لكن بحثه كان حول الرمل الخشن منقطع التدرج الحبي أما بحثنا فهو عن الرمل الناعم المنتظم التدرج الحبي.

ومن خلال دراسة وتقييم المراجع المختلفة والمقارنة بين نتائجها خلصنا إلى:

- إن الدراسات التي أجريت على الترب المختلطة من أجل دراسة سلوك التشديد فيها بدلالة نسبة المواد الناعمة فيها هي دراسات قليلة العدد عموما وليست مرضية حتى الآن مما يستلزم اجراء المزيد من الاختبارات والمقارنات.
- أغلب الدراسات المتوفرة في المراجع أجريت على الترب المختلطة الحاوية على المواد الناعمة الغضارية ولا يتوفر الكثير من المراجع عن هذه الترب إذا كان المحتوى الناعم فيها هو السيلت.
- لم تتفق أغلب المراجع على نوع موحد للترب ولا على نتائج معينة متطابقة واهتمت كل دراسة بنوع التربة المأخوذة من منطقة العينات لكن تراكم الدراسات في هذا المجال سوف يجعل تشكيل قاعدة معطيات عن هذا الموضوع ممكناً.
- معظم الدراسات لم تأخذ بالحسبان دور الاجهاد المطبق على تحديد قيمة النسبة الحرجة في الخليط.
- كما أن معظم الدراسات لم تركز على دراسة سلوك تشديد الترب المختلطة بشكل ممنهج فأغفلت العديد من البارامترات المهمة كالانضغاط الثانوي ومعامل التشديد.

وقد حاولنا قدر الإمكان في هذا البحث ترميم بعض النقاط المهمة المذكورة أعلاه التي أغفلتها الدراسات المرجعية. حيث تم التوصل لنتائج هذا البحث بعد تشكيل عينات كثيرة بالنسب المختلفة وبرطوبات أولية مختلفة بحيث وصل عدد اختبارات التشديد المجراه إلى 30 اختباراً انتقينا منها ما يظهر السلوك بشكل واضح وهي للاختبارات المجراة برطوبات قريبة من رطوبة الاشباع.

عرض المسألة المدروسة

إن وجود نسب من المواد الناعمة في التربة الرملية سيزيد بالتأكيد من انضغاطية التربة المختلطة أيا كان نوع الرمل وأيا كان نوع المواد الناعمة، لكن تغير السلوكية الانضغاطية لهذه التربة المختلطة وعلاقته بنسبة المادة الناعمة التي تدخل في التربة لم تبحث بشكل مرض الى الآن ولم تتم دراستها مخبريا بصورة وافية (Monkul et al, 2007)[11]. وإن العوامل الرئيسية التي تتحكم في تأثير المواد الناعمة على سلوكية انضغاطية الرمال المختلطة لا تزال غير مفهومة تماما لذلك فإن المسألة التي ينبغي حلها والسؤال الذي يجب الاجابة عنه هو "ما هي النسبة الحرجة للمواد الناعمة السيلتية التي تجعل انضغاطية الترب الرملية المختلطة أقل ما يمكن؟"، وبناء على ذلك تم دراسة تغير محتوى التربة المختلطة من المواد الناعمة على سلوكية التشديد آخذين بالحسبان قدر الإمكان النواحي التي لم تتم دراستها في المراجع العلمية بشكل واف.

أهمية البحث وأهدافه

كان من المتعارف عليه لاسيما في اغلب المشاريع الجيوتكنيكية لاسيما مشاريع تحسين التربة واستصلاحها تحديد عتبة أو نسبة قصوى للمواد الناعمة لا تتجاوز 10٪ اذ كان يعتقد أن هذه النسبة المحددة سلفا لن تجعل انضغاطية التربة كبيرة، وقد تبين لنا من خلال البحث كما سوف يأتي أن هذه العتبة اختيرت بشكل غير دقيق واعتباطي. حيث تذكر المراجع العلمية أن ثمة مجالاً لنسبة المواد الناعمة في التربة المختلطة يبقى فيه معامل مساميتها الأعظمي أو الأصغري في حدوده الدنيا وإن الحد الأعلى من هذا المجال غالباً ما يكون أكبر من 10٪ ويسمى هذا المجال بالمجال الانتقالي. ويهدف البحث إلى التأكد من النتيجة المذكورة أعلاه وإثبات أن الخليط عند محتوى من المواد الناعمة ضمن المجال الانتقالي ستكون فيه الانضغاطية في حدها الأدنى وبالتالي إمكانية استخدامها في أعمال تحسين التربة والردميات الطرقية المحسنة.

يهدف هذا البحث الى البحث في السلوكية الانضغاطية للتربة الرملية المختلطة (رمل + سيلت) بشكل ممنهج ودقيق اعتماداً على مفهوم نسبة الفراغ الحبيبية ودورها في تحديد نسبة المواد الناعمة الانتقالية التي عندها تكون الانضغاطية أقل ما يمكن وتمييزا لها أطلق عليها في هذا البحث **المجال الانتقالي** بالإضافة إلى دراسة تغير بارامترات التشديد المعروفة (Eoed–Cc–Cα–Cr–Cv) بدلالة تغير نسبة المواد الناعمة، ونظرا لتعذر تأمين عينات من التربة المختلطة السليمة بالنسب المرغوبة فقد تم تشكيل هذه العينات مخبريا بشكل قريب من الواقع وفق النسب التي اعتمدناها في البحث و قد أجريت عليها اختبارات الادومتر إضافة للاختبارات الأخرى المرافقة في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية –جامعة تشرين.

طرائق البحث ومواده

منهج البحث هو منهج تجريبي مقارن حيث شكلت عينات متجانسة مشبعة من الخلائط بنسب مختلفة من المواد الناعمة المخلوطة بالتربة الرملية واجريت عليها تجارب التشديد.

✓ بالنسبة الى **التربة الرملية**– أخذت من موقع صنوبر جبلة وهي عبارة عن رمل بحري ناعم تم غسله للتأكد من خلوه من المواد الناعمة والحصول على رمل صاف تماما

✓ **التربة الناعمة**– أحضرت من موقع السكن الشبابي في اللاذقية وتم غسلها على المنخل N200 لفصلها عن المواد الخشنة العالقة بها وتم التحقق من أنها غير منتفخة.

حضرت خلائط الرمل – السيلت على أساس الوزن الجاف، وقد خلطت التربة بنسب مختلفة من المواد الناعمة 5–10–15–20–25–30–35–45% وأجريت عليها التجارب المخبرية التالية:

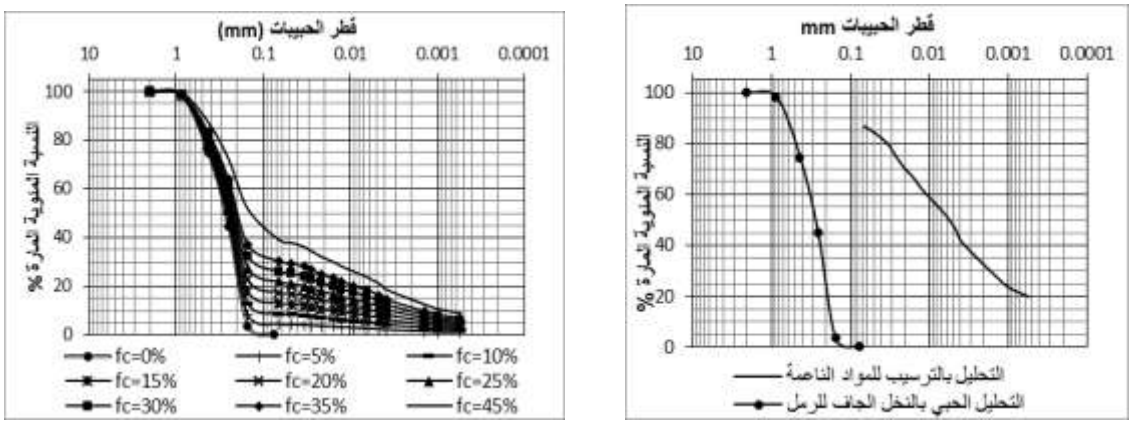
1. **التحليل الحبي**– أجريت التجارب (وفقا للمواصفة ASTM D422–63)، وفق اسلوب النخل الجاف للرمل الناعم، أما المواد الناعمة فقد أستخدم من اجلها اختبار الترسيب بالهايدرومتر (جدول 1) ومنحنيات التدرج الحبي مبينة بالشكل (2)

2. **الوزن النوعي**– أجريت التجربة على الخلائط وفق المواصفة (ASTM D854–98)– عُرضت النتائج في الجدول (1)

الجدول (1) بارامترات التحليل الحبي والوزن النوعي للخلائط

نسبة المواد الناعمة المضافة[%]	الوزن النوعي	معامل التجانس C_u	معامل الانحناء C_z
رمل صافي	2.65	1.72	0.79
5	2.6520	1.88	0.83
10	2.6540	4.00	1.60
15	2.6560	18.71	7.21
20	2.6575	59.83	24.73
25	2.6593	74.29	35.60
30	2.6610	119.05	10.71
35	2.6630	167.83	9.47
45	2.6660	363.64	1.27

سيلت صافي	2.6860	110.00	2.63



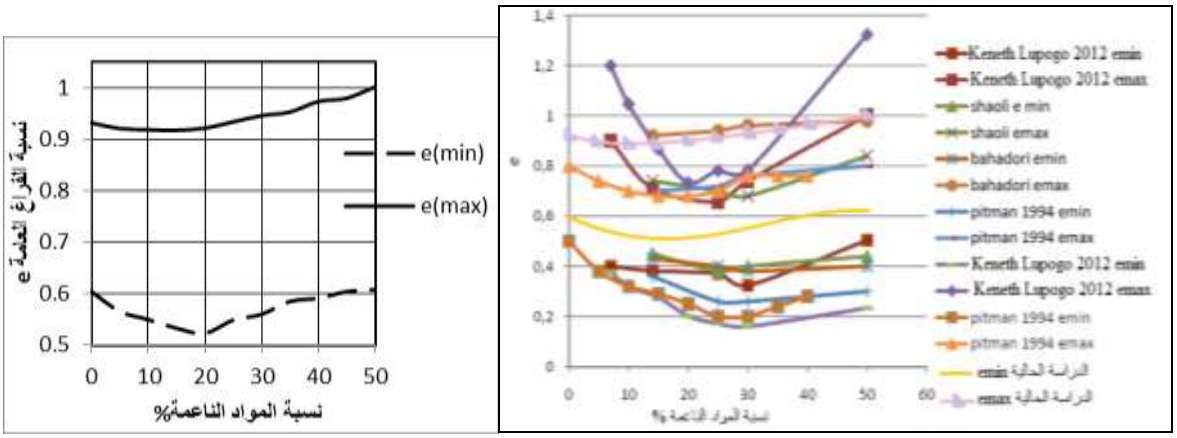
(a) (b)

الشكل(2) –(a) التدرج الحبي للمواد المختبرة , (b) التدرج الحبي للخلائط المركبة

3. **حدود اتربرغ– أجريت** التجارب على السيلت الصافي (وفقا للمواصفة ASTM D4318–98)، وتبين أن دليل لدونته 26٪ وحد سيولته57٪، وعند تحميل هذه القيم في مخطط اتربيرغ لوحظ أن نقطة التقاطع أخفض بقليل من A–line والى اليمين من خط حد السيولة، وتصنيفها هو تربة سيلتية عالية اللدونة

4. **نسبة الفراغ العظمى**– وفقا للمواصفة (ASTM D4254–00) فقد تمت إهالة التربة وهي جافة بالراحة وبهدوء في قالب بحجم 2825cm3 ثلاث مرات وحسبت النسبة واعتمد متوسط النتائج و ذلك لكل نسبة من نسب الخلط للمواد الناعمة السيلتية.

5. **نسبة الفراغ الصغرى**– باستخدام تجربة طاولة الارتجاج حيث بعد أن أهيل الخليط في القالب، وضع على الطاولة الرجاجة بعد تحميل القالب بوزن محدد وتركت الطاولة تهتز لمدة 2 دقيقة على الأقل حتى أصبح ارتفاع سطح التربة في القالب ثابتا لا يتغير ويبين الشكل (3) تغير نسبة الفراغ العامة (معامل المسامية) الأعظمية والأصغرية بزيادة نسبة المواد الناعمة.



(b) (a)

الشكل(3) –(a) : منحنيات العلاقة بين معامل المسامية ونسبة المواد الناعمة المستخدمة في هذه الدراسة ، (b) : مقارنة نسب الفراغ الأعظمية والأصغرية المنشورة من أبحاث سابقة لخلائط التربة مع الدراسة الحالية.

اختبارات الأدومتر–بدايةً حضرت خلائط الرمل – السيلت على أساس الوزن الجاف حيث جفف الرمل والسيلت بداية في الفرن ثم اخرج وتم لكل نسبة مواد ناعمة إيجاد الوزن المطلوب من السيلت والرمل وتم الخلط يدويا بشكل جاف حتى أصبح متجانساً ثم جرت اضافة نسبة المياه المطلوبة وتركت منقوعة لمدة 24ساعة، بعد انقضاء هذه الفترة خلطت مرة أخرى لمدة 15 دقيقة وبذلك تحقق التجانس المرضي المطلوب للعينات قدر الامكان.

ثم وضعت عينة التربة المعدة(يبين الشكل (4) صور لبعض العينات المركبة المعدة) في حلقة التشديد المعدنية (ارتفاع 20ملم / قطر 71.4ملم) مع بعض التشحيم لجوانب الحلقة من أجل تقليل الاحتكاك بين جوانب الحلقة وعينة التربة الموضوعة ضمنها كما وضعت أوراق الترشيح في أعلى وأسفل عينة التربة لمنع التربة الناعمة من الدخول الى فراغات الحجارة المسامية ، وغليت الحجارة المسامية مرة واحدة في الماء للتأكد من طرد الهواء واشباعها الكامل بالماء، و خلال الاختبارات أبقيت الحجارة المسامية منقوعة في الماء المقطر لضمان تشبعها الدائم بالمياه، وقد كانت اختبرت عينات الخلائط بكثافة نسبية 50% و برطوبة أولية 24% قريبة من رطوبة الاشباع وقبل بدء التحميل تركت العينات لمدة 24ساعة ضمن حوض التجربة المملوء بالماء المقطر لضمان اشباعها قدر الإمكان، وطبقت الإجهادات الشاقولية وفق التسلسل التالي:

0.25 – 0.50 – 1 – 2 – 4 – 6 – 8– 6 – 4– 6– 8– 12 كغ/سم2

ثبت الضغط الرأسي خلال التجربة لمدة 24 ساعة، لضمان الحصول على بيانات الانضغاط الثانوي للتربة الرملية المختبرة.

كان عدد تجارب التشديد المجراة 30 تجربة استخدمنا منها في البحث نتائج تسع تجارب كانت فيها العينات أفضل ما يمكن من ناحية تشكيلها وإمكانية إظهارها لسلوك التربة بشكل واضح. الجدول(**2**).

الجدول (2) العينات المستخدمة في تجربة الأدومتر

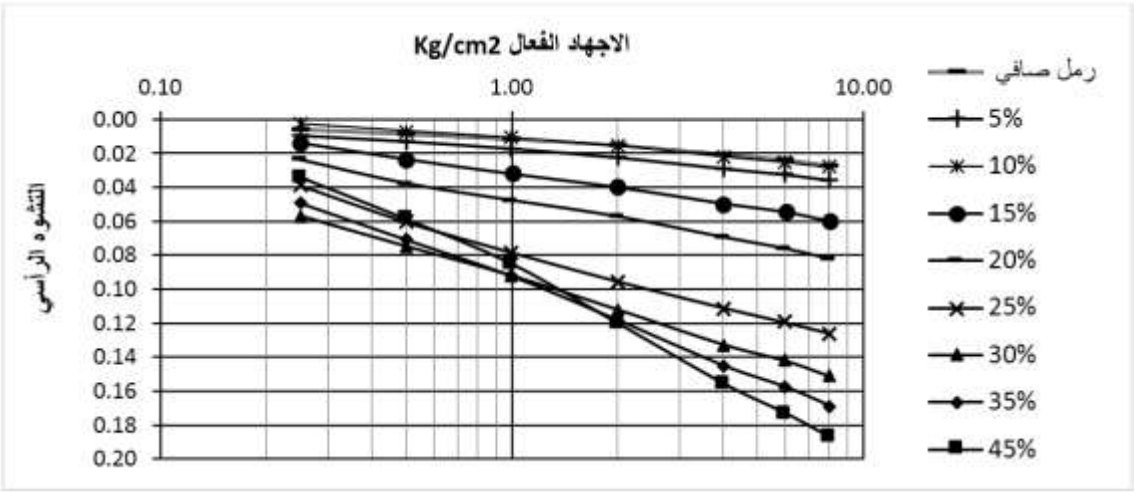
رمز العينة	نسبة الخلط %	e_{max}	e_{min}	رطوبة العينة [%]	الوزن الحجمي الجاف [gr/cm^3]	e_0	الكثافة النسبية %
S1	0	0.931	0.604	24	1.499	0.768	50
S2	5	0.920	0.566	24	1.521	0.743	50
S3	10	0.918	0.550	24	1.531	0.734	50
S4	15	0.917	0.533	24	1.540	0.725	50
S5	20	0.921	0.524	24	1.543	0.722	50
S6	25	0.933	0.549	24	1.527	0.741	50
S7	30	0.945	0.560	24	1.518	0.753	50
S8	35	0.952	0.585	24	1.506	0.769	50
S9	45	0.979	0.604	24	1.488	0.791	50

الشكل (4) – نماذج لبعض العينات المركبة المشكلة مخبريا

النتائج والمناقشة

أولاً–العلاقة بين الاجهاد الفعال والتشوهات الرأسية

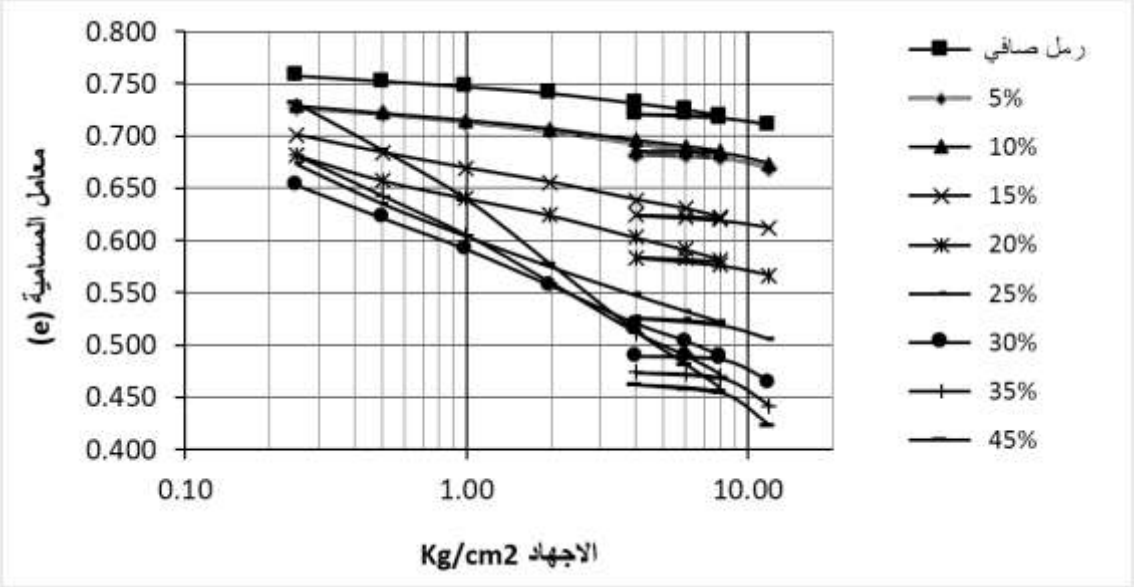
يبين الشكل (5) العلاقة بين إجهاد التشديد الفعال وبين التشوه الرأسي للعينات المختبرة بحسب نسب المواد الناعمة المضافة، ويبدو أن شدة ميل خط الانضغاط تزيد مع زيادة محتوى المواد الناعمة المضافة.



الشكل (5)– منحنيات العلاقة بين الاجهاد الفعال والتشوه الشاقولي بدلالة نسب الخلط المختلفة

ثانياً- العلاقة بين نسبة الفراغ العامة (معامل المسامية) والإجهاد الفعال الرأسي

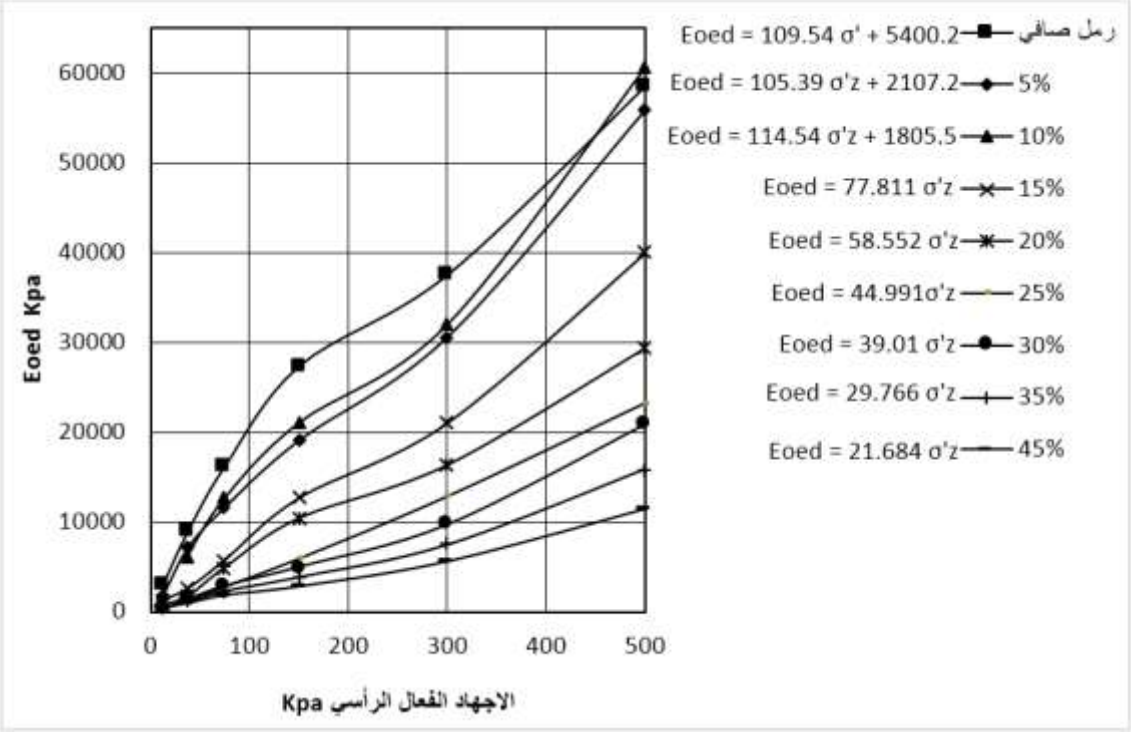
يبين الشكل (6) العلاقة بين معامل المسامية و الإجهاد الفعال الشاقولي حيث تُلاحظ زيادة في انحدار خط الانضغاط بزيادة نسبة المواد الناعمة.



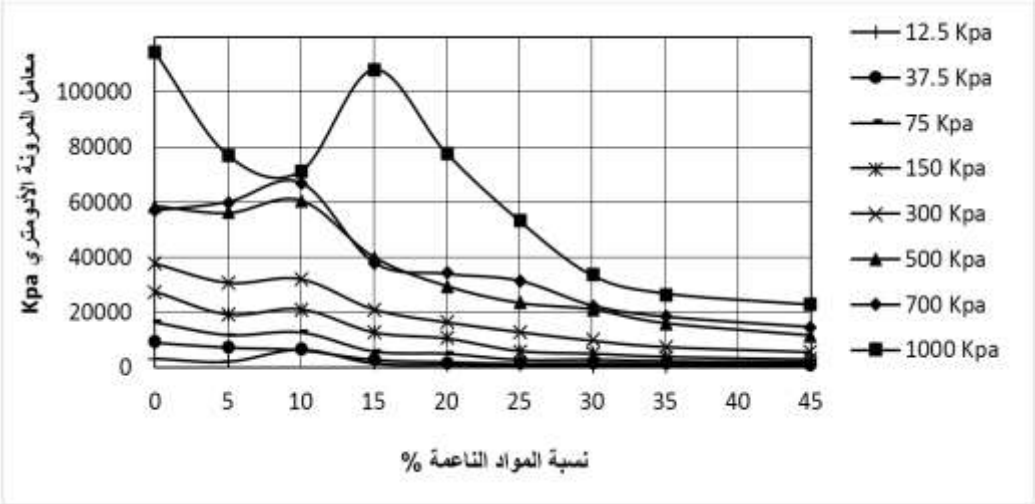
الشكل (6)- العلاقة بين الاجهاد الفعال و معامل المسامية لنسب الخلط المختلفة

ثالثاً- القساوة الادومترية (معامل التشوه الادومتري) Eoed :

الشكل(7) يبين العلاقة بين القساوة الادومترية وإجهاد التشديد الفعال الشاقولي وقد تبين مثلما كان متوقعا أن القساوة الادومترية تزداد بزيادة الإجهاد الفعال الرأسي كما يحوي الشكل معادلة أفضل مستقيم للعلاقة بين معامل المرونة الأدومتري و الإجهاد الشاقولي الفعال لكل نسبة مواد ناعمة مضافة.



الشكل (7) العلاقة بين معامل المرونة الأدومتري والاجهاد الفعال الرأسي لنسب االخلط المختلفة.



الشكل (8) العلاقة بين معامل المرونة الأدومتري ونسبة المواد الناعمة لإجهادات شاقوليه مختلفة

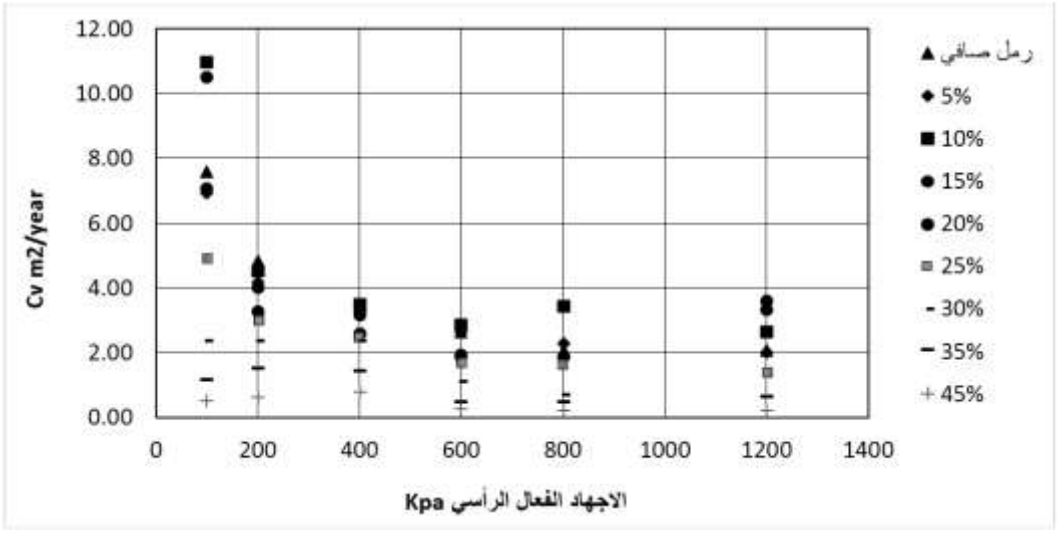
الشكل(8) يمثل العلاقة بين معامل المرونة الأدومتري ومحتويات المواد الناعمة لمختلف الإجهادات الفعالة الرأسية. نلاحظ انخفاض في القساوة الادومترية حتى الوصول لنسبة 5-10% حسب مستوى الإجهاد المطبق ويرجح السبب في أن المواد الناعمة قللت من الاحتكاك بين حبات الرمل وسهلت من انزلاقها ودورانها، ثم عادت الصلابة للارتفاع حتى النسبة 10-15% بحسب الإجهاد المطبق (ظهرت الذروة عند نسبة 10%ما عدا للمنحني الأخير فقد ظهرت عند نسبة 15% و رغم أن المنحني الأخير يبدو شاذا عن المنحنيات الأخرى إلا أن هناك انتقال تدريجي في الذروة بين 10% و 15% بزيادة الإجهاد المطبق غير واضحة في الشكل و قد أثبتنا ذلك ضمن سياق البحث فيما بعد أنظر الشكل (16)) ويرجح السبب أن المواد الناعمة ملأت كامل الفراغات بين حبات الرمل وبالتالي أعطت

انضغاطية أقل وصلابة أكبر، ثم تعود الصلابة للانخفاض بعد النسبة 10–15% حيث يبدأ سلوك المواد الناعمة بالسيطرة على سلوك انضغاطية الخليط.

رابعاً– معامل التشديد (Cv)

الشكل(9) يبين العلاقة بين معامل التشديد Cv وبين إجهاد التشديد الفعال الرأسي حيث يتناقص معامل التشديد مع زيادة الإجهاد الفعال الرأسي بحدة من أجل نسبة خلط منخفضة حتى الإجهاد $4Kg/cm^2$ تقريبا ويصبح التناقص طفيفاً بعد هذا الإجهاد حيث من أجل الإجهادات المنخفضة حجم الفراغات المملوءة بالمياه تكون كبيرة (معامل نفاذية كبير) و بالتالي سرعة خروج المياه تكون كبيرة و الزمن اللازم لحصول درجة تشديد 90% يكون صغيراً وبالتالي معامل التشديد يكون كبيراً و مع زيادة الإجهاد الفعال حجم الفراغات يقل(معامل نفاذية أصغر) و بالتالي سرعة خروج المياه تصبح أصغر و الزمن اللازم لحصول درجة تشديد 90% يصبح أكبر وبالتالي معامل التشديد يكون أصغر.

ان حركة الجزيئات الناعمة داخل نسيج التربة قد تسد أو تفتح الفراغات بين الحبيبات المترابطة ويؤثر ذلك على نتائج التشديد [10](Mitchell, 1993).



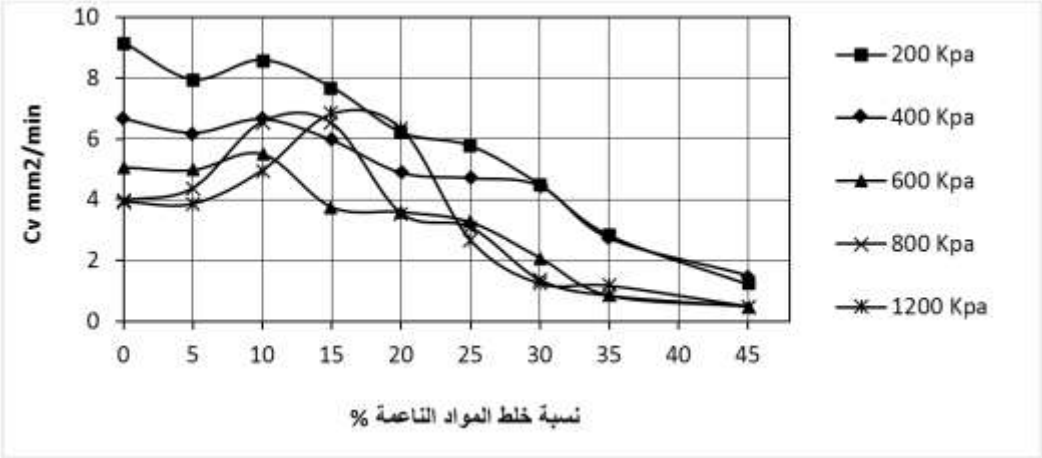
الشكل (9) العلاقة بين Cv و الإجهاد الفعال الشاقولي لنسب الخلط المختلفة

تتراوح قيم معاملات التشديد لدراستنا لمراحل التحميل بين: 0.25–11m2/year وهي توافق القيم الواردة في الجدول (3) .

جدول (3) القيم النموذجية لـ Cv للترب المختلطة.

الباحث	نوع التربة (soil type)	Cv (m2/year)
Wong et al (2008)	Non segregated sand tailings with fines contents 15% to 40 %	0.02–1000
Vermeulent (2001)	Gold tailings Silt sand	210–1200
Qui and sego (2001)	Mining tailings Silt sand	0.310–104

يمكن ملاحظة تأثير المواد الناعمة على معامل التشديد في الشكل (10) . معامل التشديد يزداد بزيادة المواد الناعمة ويصل لأعلى قيمة عند نسبة تتراوح بين 10-15% بحسب الإجهاد المطبق ثم يعود للانخفاض من جديد بعد هذه النسبة و يبدو في المنحنيات انزياح بالذروة من النسبة 10% إلى 15% عند قيمة إجهاد مساوية لـ $1200kN/m^2$.

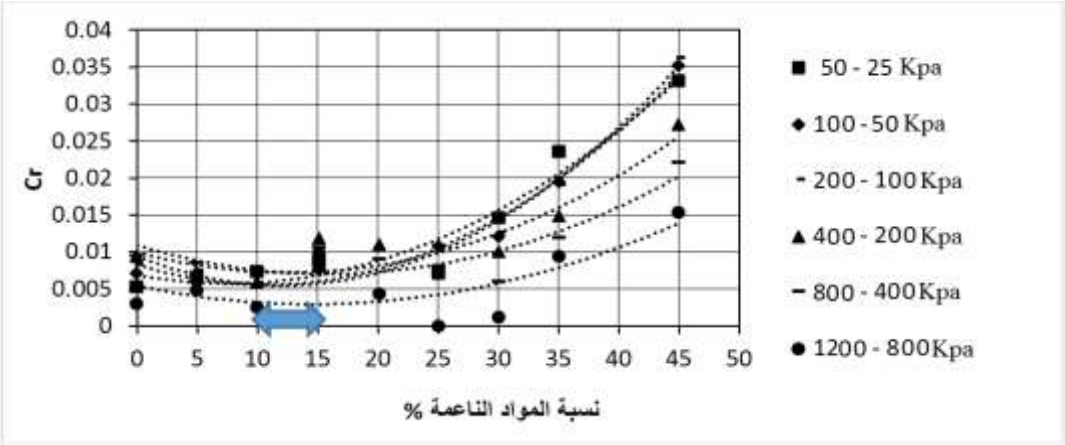


الشكل (10) العلاقة بين معامل التشديد Cv و نسبة المواد الناعمة

خامساً- قرينة إعادة الانضغاطية (Cr)

يبين الشكل(11) العلاقة بين Cr ومحتويات المواد الناعمة عند الكثافة النسبية 50%.

تتناقص قيم Cr مع زيادة محتوى المواد الناعمة حتى تصل إلى 10-15٪ بحسب مجال الإجهاد المطبق ومن ثم تزداد Cr بزيادة محتوى المواد الناعمة.

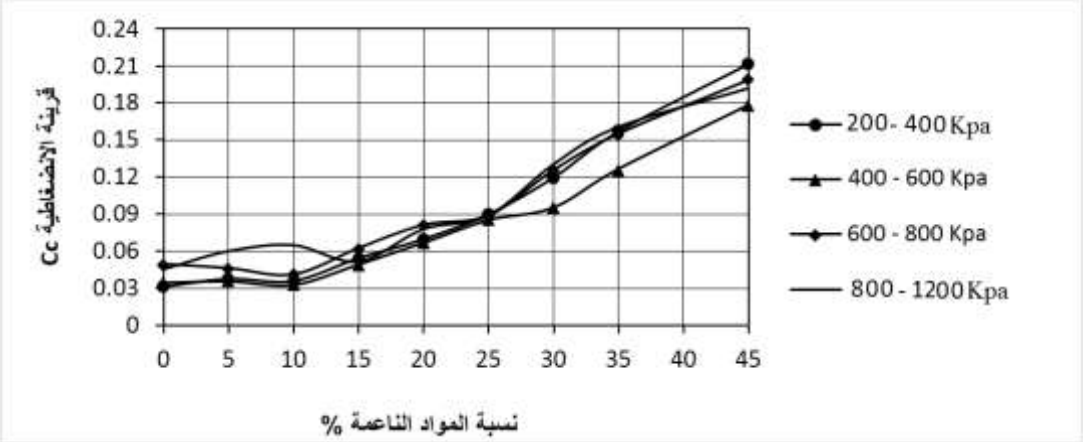


الشكل (11) العلاقة بين قرينة إعادة الانضغاطية ومحتوى المواد الناعمة

سادساً – قرينة الانضغاطية (Cc) :

تراوحت قيم قرينة الانضغاطية في دراستنا للإجهادات الفعالة المختلفة بين 0.211-0.018 . وأن قيم قرينة الانضغاطية للرمل السيلتي المقاسة موافقة لنتائج [9](Mesri and Vardhanabhuti ,2009) كما أن هذه النتائج متطابقة بشكل جيد إلى حد ما مع تلك التي حصل عليها[11](Monkul et al ,2007) .

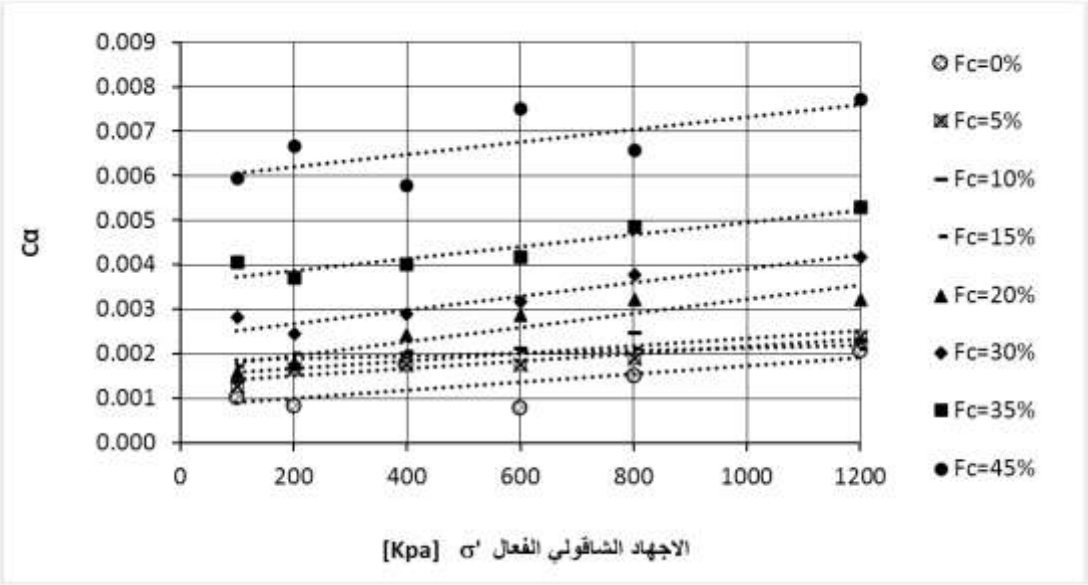
يبين الشكل(12) زيادة في قرينة الانضغاطية حتى الوصول لنسبة 5-10% حسب مستوى الاجهاد المطبق ويرجح السبب في ان المواد الناعمة قللت من الاحتكاك بين حبات الرمل وسهلت من انزلاقها ودورانها، ثم عادت قرينة الانضغاطية للانخفاض حتى النسبة 10-15% بحسب الاجهاد المطبق(أي بزيادة الاجهاد تزداد نسبة المواد الناعمة التي تحقق الانضغاطية الأقل أي أن هناك انتقال تدريجي لأخفض قيمة لقرينة الانضغاطية بين النسبتين 10-15% بزيادة الاجهاد المطبق غير واضحة بالشكل لكن اثبتنا ذلك ضمن سياق البحث انظر الشكل (16)) ثم تتزايد من أجل نسب أعلى من المواد الناعمة.



الشكل (12) العلاقة بين نسبة المواد الناعمة وقرينة الانضغاطية لكثافة نسبية 50% .

سابعاً: عامل الانضغاط الثانوي (Cα)

الشكل (13) العلاقة بين معامل الانضغاط والاجهاد الفعال الرأسي، وبينت النتائج التي تم الحصول عليها من أجل نسب مختلفة من المواد الناعمة المضافة أن الانضغاط الثانوي يتغير مع الإجهاد الفعال فتزداد Cα مع زيادة الاجهاد الفعال.



الشكل (13) العلاقة بين الاجهاد الشاقولي الفعال و Cα

تتراوح قيم Cα الناتجة في هذا البحث تحت قيم اجهادات مختلفة من 0.0008–0.0077 ، ويُستدل بمقارنة هذه القيمة مع تصنيف[7](Mesri,1973) أن الانضغاط الثانوي في التربة المختبرة منخفض لمتوسط.

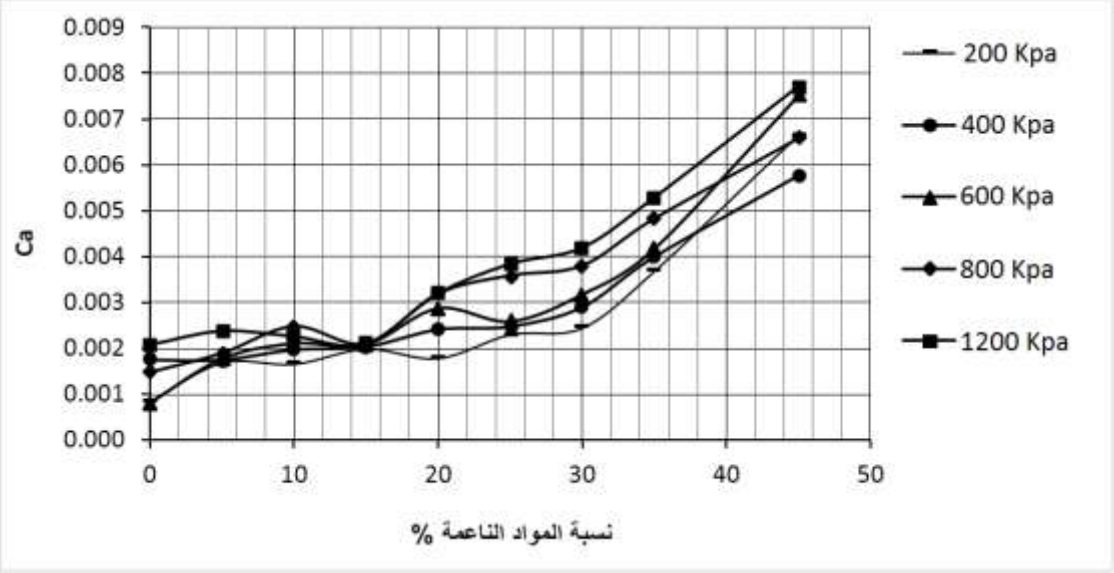
حدد [1](Al Shamrani ,1998) قيم Cα لتربة السبخة في حدود 0.0015–0.003 وهي تتوافق مع القيم التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة حتى النسبة 30% حيث تراوحت Cα بين0.0008–0.00338 .

إن قيم Cα/Cc لعينات التربة المختبرة هي في حدود 0.0235–0.0646، وقد وجد (Mesri and Castro , 1987)[8] في بحثه أن قيم Cα/Cc لمعظم أنواع التربة تقع ضمن نطاق ضيق من 0.01 لـ 0.07 وهذا ما يؤكد النتيجة التي توصلنا إليها.

حيث قيمة Cα تم الحصول عليها من الجزء المستقيم من منحني e–logt مباشرة بعد الانتهاء من التشديد الأولي والتحول إلى التشديد الثانوي، أما قيمة Cc فقد تم الحصول عليها من القيمة التي تقابل نفس مقدار الحمل في منحنى e –log σv.

يوضح الشكل (14) العلاقة بين محتويات المواد الناعمة ومعامل الانضغاط الثانوي Cα للإجهادات الفعالة الرأسية المختلفة، حيث تبين أن Cα يتزايد ببطء أو يكون ثابتا تقريبا مع زيادة محتوى المواد الناعمة حتى نصل إلى النسبة 15٪ تقريبا، وبعدها تغدو الزيادة ملحوظة.

وهي مقاربة للنتيجة التي توصل اليها [6](Keneth lupogo,2012) الذي حدد هذه النسبة 25%، ويعود السبب في رأينا إلى اختلاف التدرج الحبي للخلائط التي عمل عليها الباحث عن التربة التي قمنا بالعمل عليها في هذا البحث لكن النتيجة العلمية متشابهة.



الشكل (14) العلاقة بين معامل الانضغاطية الثانوي ومحتوى المواد الناعمة للإجهادات المختلفة

– تفسير النتائج

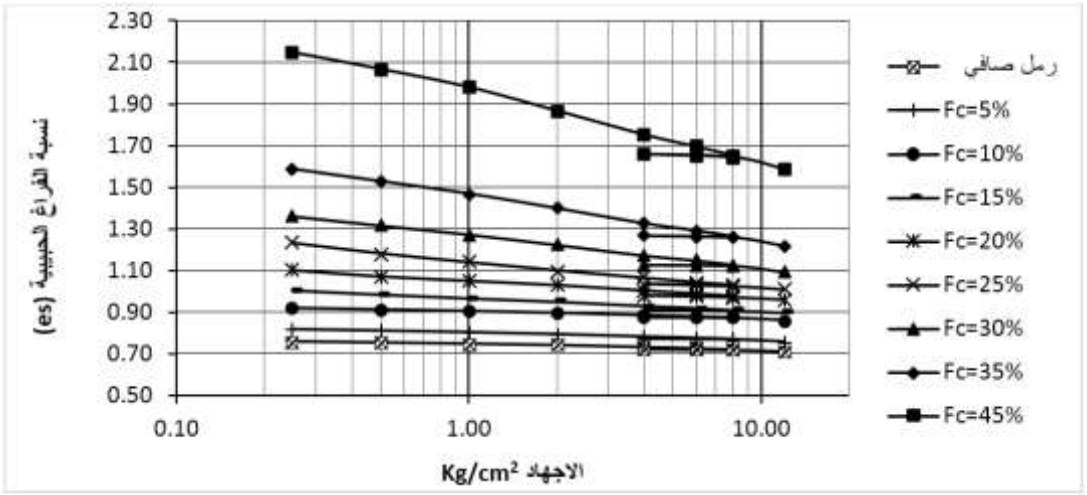
أ –التفسير باستخدام مفهوم نسبة الفراغ الحبيبية e_s

إن مفهوم نسبة الفراغ الحبيبية هو نسبة الفراغ للتربة الخليطة مع اعتبار **المواد الناعمة كفراغات**، وبناء عليه يمكن تصور تأثير المواد الناعمة على انضغاطية خليط الرمل–السيلت، ووفق هذا المفهوم فإن التماس بين الحبيبات الخشنة يمكن أن يبدأ مباشرة عندما تصبح نسبة الفراغ الحبيبية مساوية إلى نسبة الفراغ العظمى للرمل.

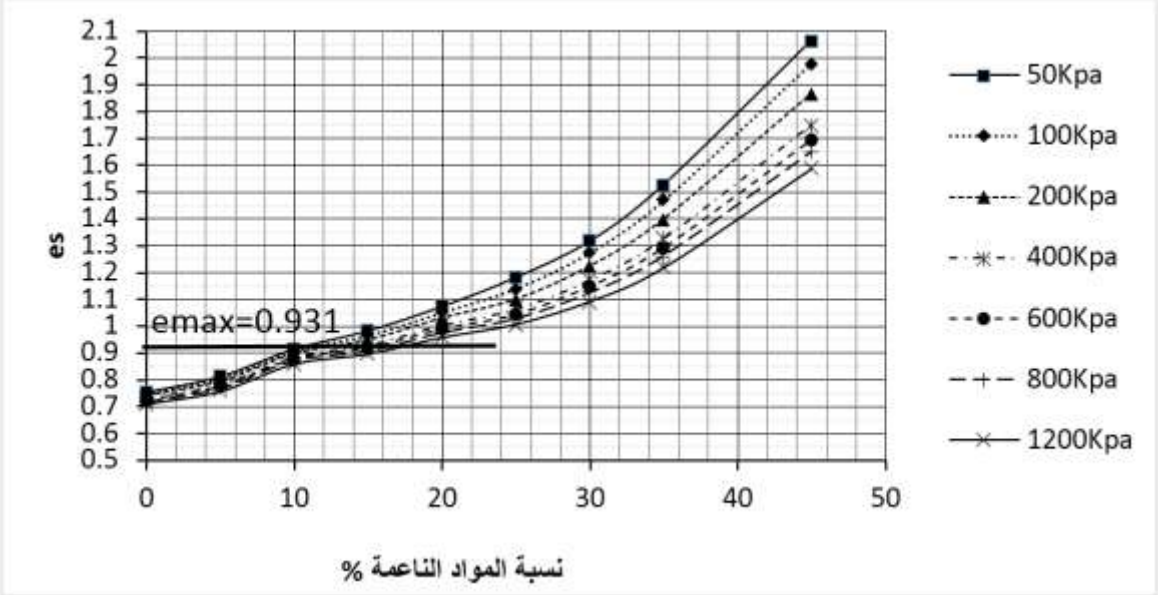
يظهر الشكل(15) التباين في نسبة الفراغ الحبيبية مع الإجهاد الفعال الرأسي، وهذه المنحنيات لها سمات مماثلة للمنحنيات المرسومة بين معامل المسامية واجهاد التشديد الفعال $e-\sigma'$، ومع أن المنحنيات تغير في موضعها عند استخدام مفهوم نسبة الفراغ الحبيبية إلّا أن طبيعة تشوه العينة تبقى هي نفسها.

قدم [11](Monkul and Ozden ,2007) مفهوما هاما عن تحول نسبة المواد الناعمة المضافة التي يحدث عندها الاتصال بين الحبيبات حيث افترضا وفق هذا المفهوم أن ارتباط الحبيبات الخشنة يمكن أن يبدأ مباشرة عندما تصبح نسبة الفراغ بين حبيبات للخليط مساوية إلى نسبة الفراغ الأعظمية الحبيبية (للرمل).

وكما نرى من الشكل (16) خط نسبة الفراغ الأعظمية للرمل يقاطع المنحنيات عند النسبة بين 10 إلى 15٪، وهذا يشير إلى أن التماس بين الحبيبات الخشنة تحت للإجهادات المطبقة يحدث عند محتوى مواد ناعمة بين 10 إلى 15٪ وهذا يثبت أن نسبة المواد الناعمة التي تحقق الانضغاطية الأقل تزداد بزيادة الإجهاد المطبق.



الشكل (15) العلاقة بين نسبة الفراغ الحبيبية والاجهاد الفعال الرأسي



الشكل (16) العلاقة بين نسبة الفراغ الحبيبية ومحتوى المواد الناعمة

ب –التفسير باستخدام مفهوم دليل الانضغاط الحبيبي (Cc–s)

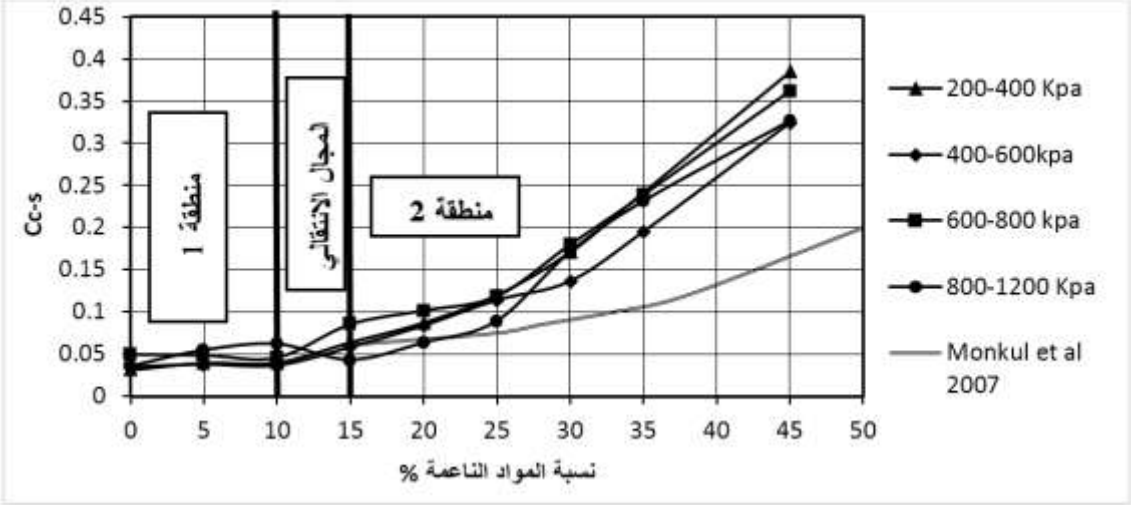
استخدم مفهوم دليل الانضغاط الحبيبي (Cc–s) المقترح من قبل [11](Monkul and Odzen, 2007) في تفسير النتائج، وتكمن أهمية هذا المفهوم في فهم وتصور الخصائص الانضغاطية لخليط الرمل–السيلت.

إن تعريف Cc–s يشابه تعريف دليل الانضغاط Cc ويعرف بأنه انخفاض نسبة الفراغ الحبيبية مع تزايد الإجهاد الفعال كما في المعادلة(2):

$$Cc–s = \Delta e_s / \Delta \log \sigma' \qquad (2)$$

يبين الشكل(17) العلاقة بين Cc–s ومحتوى المواد الناعمة ويبدو أن هذا المنحني له نفس المسار الذي يتبعه المنحني بين Cc ونسبة المواد الناعمة لكن العلاقة بين Cc–s ونسبة المواد الناعمة تظهر بوضوح تأثير المواد الناعمة المضافة على سلوكية الانضغاطية في العينات ، فالترب المختلطة ذات نسب المواد الناعمة الأقل من 10% (منطقة 1) تكون فيها قيمة Cc–s ثابتة أو تزداد بشكل طفيف حيث المواد الناعمة تكون بين الفراغات الرملية أو على تماس معها (مما يسهل انزلاق حبات الرمل) و عند تطبيق الحمولة تميل المواد الناعمة في مناطق التماس للتحرك و ملء الفراغات بين حبات الرمل لتصل إلى أخفض القيم ضمن مجال نسبة النواعم بين 10% و 15٪ (المجال الانتقالي) أنظر الشكل (17) بحسب مجال الإجهاد حيث في هذه المنطقة يملأ السيلت كامل الفراغات الموجودة بين حبيبات الرمل ، لكن تزداد Cc–s عندما تصبح قيمة المواد الناعمة المضافة فوق 15%(منطقة 2) حيث تصبح حبيبات الرمل أكثر تبعثرا بزيادة المواد الناعمة وتصبح حبيبات الرمل غير متماسة مما يؤدي إلى زيادة الانضغاطية.

قد تختلف قيم Cc–s بين الترب المختلفة تبعا لاختلاف وطبيعة ومنيرالات وأبعاد حبيبات الخلائط المجربة لكن على العموم تبقى ثمة الثلاثة مجالات (المجالات الثلاث المذكورة آنفا) لا تتغير مهما كان نوع الخليط.



الشكل (17) العلاقة بين Cc-s ونسبة المواد الناعمة

الاستنتاجات والتوصيات

بالاستناد إلى الدراسة النظرية و التجريبية للبحث خلص البحث إلى الاستنتاجات التالية:

1 ـ إن انضغاطية الترب المختلطة (رمل + سيلت) تعتمد على مدى درجة إملاء الجزيئات الناعمة لفراغات التربة الرملية كما تعتمد على مجال إجهاد التشديد المطبق. وتكون درجة الإملاء بحسب الإجهاد المطبق أعلى ما يمكن عندما تكون نسبة المواد الناعمة في التربة بين 10-15٪حيث كانت معاملات المسامية العظمى عند نسبة مواد ناعمة 10% والصغرى عند نسبة مواد ناعمة 20% هي اقل ما يمكن ، فتمتلئ الفراغات تماما بالجزيئات الناعمة مما يؤدي إلى انضغاطية منخفضة لخليط التربة .

2 ـ تتناقص قيم قرينة إعادة الانضغاطية Cr مع زيادة نسبة المواد الناعمة المضافة حتى نسبة من 10 لـ 15٪ بحسب الإجهاد المطبق، وبعدها تتزايد مع زيادة نسبة المواد الناعمة المضافة إلى التربة الرملية.

3 ـ يتزايد معامل التشديد Cv مع زيادة نسبة المواد الناعمة المضافة حتى يبلغ قيمته القصوى (الذروة) عندما تكون نسبة المواد الناعمة المضافة من 10 لـ 15٪ بحسب الإجهاد المطبق، ومن ثم تنخفض قيمة معامل التشديد مع زيادة نسبة المواد الناعمة أي زيادة نشاط السلوك التشديدي في التربة المختلطة بعد هذه النسب.

4 ـ معامل الانضغاط الثانوي $C\alpha$ يتزايد ببطء أو يكون ثابتا تقريبا مع زيادة محتوى المواد الناعمة حتى نصل إلى النسبة 15٪ تقريبا، وبعدها تغدو الزيادة ملحوظة.

5 ـ قيم النسبة **$C\alpha/Cc$** للخلائط المستخدمة هي في حدود 0.0235-0.0646 وهي تتوافق مع نتائج كثير من الأبحاث العلمية المجراة في هذا المجال .

6 ـ تتأثر النسبة الانتقالية بالتوزع الحبي للتربة المركبة فمن أجل التدرجات الحبيبية المنتظمة تكون المنطقة الانتقالية على مجال صغير 10-15 % بحسب مجال الاجهادبينما يتراوح المجال بين 15-30% من أجل التدرجات الحبية المتقطعة للترب المختلطة.

كما خلصنا الى التوصيات النهائية التالية المتعلقة بالبحث:

☒ لابد من أجل التوسع في البحث من اجراء مزيد من الأبحاث لدراسة تأثير بنية التربة وخشونتها واختلاف أبعاد الحبيبات على الانضغاطية وعلى قيمة النسبة الانتقالية.

☒ إجراء مزيد من التجارب الإضافية للترب المختلطة بين النسبتين 10–15% (المجال الانتقالي) وذلك لتبيان انتقال موقع النسبة الحرجة بدلالة الإجهاد المطبق للمنحنيات بشكل واضح والتي تتحرك ضمن هذا المجال.

☒ يمكن استخدام فكرة البحث في تعديل تحسين الترب المختلطة التي تكون فيها نسبة المواد الناعمة أقل من المجال الانتقالي لزيادتها وجعل الانضغاطية أقل ما يمكن كما يمكن أيضا استخدام فكرة البحث في ردم الترب المختلطة ذات المجال الانتقالي في الردميات الطرقية والساحات بسبب انخفاض انضغاطيتها.

☒ ثمة ضرورة لتحسين تقنية تحضير العينات في تجربة الأدومتر بحيث يمكن قياس ارتفاع العينة بدقة والحصول على عينة مشبعة تماما واجراء القياسات بشكل أدق ،والتحكم بالكثافة النسبية للعينة، وضرورة إيجاد أسلوب أفضل للتأكد من عدم وجود فقاعات في العينة بعد تشكيلها كذلك تجريب طرائق أخرى أكثر تطوراً من أجل تشكيل العينات مخبريا.

☒ ضرورة تعميم البحث ليشمل أنواعا أخرى من التربة الناعمة لخلطها بالترب الرملية المستخدمة مثل الترب السيلتية الكوارتزية والترب الناعمة الغضارية اللدنة ومقارنة النتائج المستحصل عليها مع نتائج هذا البحث.

المراجع:

1. ALSHAMRANI, M. A. *Application of Cα/Cc concept to secondary compression of sabkha*. Can Geotech,VOL.**35**, 1998, 15-26

2. BAHADORI,H.;ABBAS,G.;TOWHATA,I. *Effect of non-plastic silt on the anisotropic behavior of sand.* Soils Found,VOL.48, 2008, 531-545.

3. BELKHATIR,M.;ARAB,A.;DELLA,N.;MISSOUM,H.;SCHANZ,T.*Experiment al Study of Undrained Shear Strength of Silty Sand: Effect of Fines and Gradation*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol.30, 2012, 1103–1118.

4. DELLA,N.;ARAB,A.;BELKHATIR,M.;MISSOUM,H.*Identification of the behavior of the Chlef sand to static liquefaction*. J. Comp. RendusMe´canique (CRAS) , Vol. 337, 2009, 282–290.

5. FUKUE,M.;OKUSA,S.;NAKAMURA,T.*Consolidation of sand-clay mixtures. Consolidation of soils*, ASTM Special technical Publication 892, R.N Yong and F.C Townsend, 1986, 627-641.

6. LUPOGO,K. *Effect of fines mineralogy on the oedometric compressional behavior of sandy soils*. Journal of Civil Engineering and Construction Technology . Vol. 4(7), 2013, 232-238.

7. MESRI, G. *Coefficient of secondary compression.* Proceedings of the ASCE – Soil Mechanics and Foundations Division, **99**(SM1),1973, 123-137.

8. MESRI, G.; A. CASTRO. *Cα/Cc Concept and Ko during Secondary Compression*.ASCE J. Geotechnical Engineering, 113:3, 1987, 230-247.

9. MESRI, G ;VARDHANABHUTI, B. *Compression of granular materials*. Can Geotech ,2009, 369-392.

10. MITCHELL,J. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, Inc New York, 1993.

11. MONKUL,M;OZDEN,G.*Compressional behaviour of clayey sand and transition fines content*. Eng. Geol, Vol 89, 2007, 195-205.

12. NAEINI,SA;BAZIAR,MH.*Effect of fines content on steady state strength of mixed and layered samples of a sand*. Soil Dyn. Earthq. Eng,Vol24, 2004, 181-187.

13. NI,Q;TAN,T;DASARI,G;HIGHT,D.*Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils*. Geotechnique, Vol 54, 2004, 561-569.

14. RAHMAN,M;LO,S;GNANENDRAN,C.*On equivalent granular void ratio and steady state behaviour of loose sand with fines*. Can. Geotechn. J, Vol 45, 2008, 1439-1456.

15. RAHMAN,M;ROBERT,LO.*Effects of fines and fines type on undrained behaviour of sandy soils under critical state soil mechanics framework*. In World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.,2011, 403-408. Available at: http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814365161_0050

16. RAHMAN,M;LO,SR.*The prediction of equivalent granular steady state line of loose sand with fines*. Geomech. Geoeng, Vol 3(3), 2008b, 179-190.

17. SHARAFI,H;BAZIAR,MH.*A laboratory study on the liquefaction resistance of Firouzkooh silty sands using hollow torsional system*. EJGE, Vol15, 2010, 973–982.

18. THEVANAYAGAM,S; SHENTHAN,T; MOHAN,S; LIANG,J.*Undrained fragility of clean sands, silty sands and sandy silts*. J. Geotechn. Geoenviron. Eng,Vol128, 2002, 849-859.

19. THEVANAYAGAM,S; MOHAN,S.*Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands*. Geotechnique, Vol 50(1), 2000, 1–23.

20. YANG,S;SANDVEN,R;GRANDE,L.*Steady-state lines of sand-silt mixture*. Can. Geotech. J, Vol 43, 2006, 1213-1219.