

A Numerical Study of The Subgrade Reaction in Cohesive Soils Using Plate Loading Tests (PLTs)

Dr. Mounzer Omran Alzawi*
Zeina Nidal Zghaybi**

(Received 26 / 11 / 2017. Accepted 30 / 4 / 2018)

□ ABSTRACT □

A numerical simulation of plate loading test using finite element method (FEM) and Plaxis 2D in order to investigate the effective parameters on the modulus of subgrade reaction .Some real plate loading test are numerically modeled and calibrated using two types of material models: mohr-coulomb MC and hardening soil HS.The obtained results from MC are better than those obtained from HS, so material model MC is adopted to generate plate load settlement curves, for a group of soil classified by DIN –Code.The results shows that for the same soil parameters the modulus of subgrade reaction is decreased as the side dimension of plate is increased and as the plasticity of soil is increased then the modulus of subgrade reaction is decreased . Depending on the obtained results a relationship is suggested to calculate the modulus of subgrade reaction in cohesive soil. Then a comparison is made between the suggested relation and (Selvadurai, Meyerhof & baike, Kloppe & Glock) relations ,which shows a good coincidence.

Key words: Plate Loading Test - The Modulus Of Subgrade Reaction-Plaxis 2D

* Professor ,Department Of Geotechnical Engineering Tishreen University, Lattakia , Syria.

**Postgraduate Student ,Department Of Geotechnical Engineering Tishreen University,Lattakia , Syria

دراسة عددية لمعامل الاستناد المرن في الترب المتماسكة باستخدام تجارب صفائح التحميل

الدكتور منذر عمران الزاوي*

زينة نضال زغبيني**

تاريخ الإيداع 26 / 11 / 2017. قُبِلَ للنشر في 30 / 4 / 2018

□ ملخص □

يتناول هذا البحث دراسة لأهم البارامترات المؤثرة على قيمة معامل الاستناد المرن، وذلك من خلال النمذجة العددية لتجارب صفائح التحميل باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) وبرنامج (Plaxis 2D)، حيث تمت نمذجة بعض التجارب الحقلية الحقيقية وتبين نتيجة معايرة النماذج على تجارب حقيقية أن موديل موركولومب MC يعبر عن السلوك الإجهادي-التشوهي للتربة بشكل أفضل من موديل تصلب التربة HS، حيث تتقارب منحنيات التحميل الحاسوبية الناتجة بشكل أفضل مع المنحني الحقيقي وبناء عليه تم اعتماد موديل موركولومب في توليد النماذج الحاسوبية المدروسة من أجل مجموعة من الترب المتماسكة المصنفة حسب الكود الألماني وفقاً لدليل السيولة. أظهرت المنحنيات التي درست تغيير معامل الاستناد المرن أنه ومن أجل نفس التربة فإن قيمة معامل الاستناد المرن تقل بازدياد قطر الصفيحة، كما أنه بازدياد لدونة التربة تقل قيمة هذا المعامل. بناء على النتائج تم اقتراح علاقة رياضية لحساب معامل الاستناد المرن لحالة الترب المتماسكة (C, Φ)، أعطت هذه العلاقة توافقاً مقبولاً مع الأبحاث السابقة في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: معامل الاستناد المرن - تجارب صفائح التحميل - Plaxis 2D

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

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

مقدمة:

يعتبر معامل الاستناد المرن K_s (معامل رد فعل التربة) من البارامترات المهمة في مجال ميكانيك التربة نظراً لاستخدامه في تقييم انزياح التربة تحت شروط التحميل ، واستخدامه في حل كثير من المسائل الجيوتكنيكية لاسيما الأساسات المرنة والأوتاد المحملة جانبياً .

هناك عدة بحوث نذكر منها (Terzaghi(1955), Vesic(1961), Biot(1937) درست كيفية إيجاد هذا المعامل وقد بينت أن تعيين قيمة هذا المعامل ليست بالأمر اليسير لأنه يتعلق بعدة عوامل مثل:

- المواصفات الفيزيائية والميكانيكية للتربة
- نوع الأساس وشكله وأبعاده
- الإجهادات المطبقة
- التشوهات المطبقة

إن أهم التجارب المستخدمة لإيجاد قيمة معامل الاستناد المرن هي تجربة صفائح التحميل الحقلية PLT التي تعتبر من أكثر التجارب مصداقية نظراً لأنها تعتمد على تحميل التربة في الموقع مباشرة وفي ظروف التربة الحقيقية رغم محدودية هذه التجربة من ناحية أقطار الصفائح المستخدمة والحمولات المطبقة وبالتالي فإن النتائج إذا أُريد استخدام أقطار أكبر في التحميل تبقى بحاجة إلى تعديل ، أما تطبيق هذه التجربة على أساس بالأبعاد الحقيقية حقلياً فهو يخرج عن مجال التجربة ويصبح ضمن نطاق تجارب تحميل الأساسات حقلياً .

حالياً ومع توفر البرامج الحاسوبية القادرة على نمذجة المسائل الجيوتكنيكية أصبح بالإمكان اجراء النمذجة العددية لهذه التجربة بالعدد المرغوب منها وتحليل النتائج ودراستها وذلك بهدف التوصل إلى صيغة مقبولة لحساب معامل الاستناد المرن ، وتقديم إضافة جديدة إلى الأبحاث الأخرى في هذا المجال والمقارنة بها .

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث بشكل أساس الى دراسة أهم العوامل المؤثرة على قيمة معامل الاستناد المرن K_s المستقرأ من عدد كبير من منحنيات تجربة صفائح التحميل (σ, S) ، وذلك عبر إجراء النمذجة العددية لهذه التجربة بطريقة العناصر المنتهية - برنامج (plaxis 2D) على التربة المتماسكة (C, Φ) .

وقد درست تغيرات معامل الاستناد المرن مع تغير قطر صفيحة تجربة التحميل ولدونة التربة ، كذلك مع باقي البارامترات المستخرجة من منحنيات التجربة مثل : نسبة معامل التشوه الأولي إلى معامل التشوه الثانوي Ev_2/Ev_1 وغيرها ، ويهدف البحث الى تقديم نتائج إضافية للبحث العلمي وبنك المعلومات واستنباط علاقات مبسطة لحساب K_s تعتمد على نتائج النمذجة يمكن استخدامها في حال عدم توفر إمكانية لإجراء تجربة صفائح التحميل.

تجارب صفائح التحميل:

تعريفها:

هي تجربة حقلية تنفذ بتطبيق حمولات بشكل متزايد على سطح التربة باستخدام صفيحة تحميل بقطر يتراوح من 30-70 cm وقياس الهبوطات المقابلة ليتم رسم منحنى (حمولة-هبوط) الموافق ، ويتم من خلال هذا المنحنى تحديد :

• الحمولة الحدية والهبوط المقابل .

• المعاملات K_s , E_v

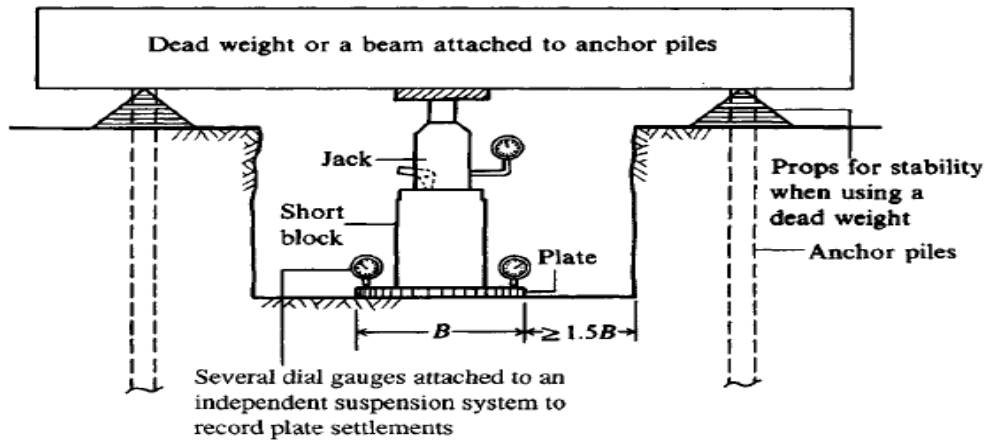
• متانة التربة من خلال النسبة E_{v2}/E_{v1}

حسب (Bowels,1998) فإن تجارب صفائح التحميل كانت لتعطي نتائج مباشرة لو أنها تتم على أساسات بأبعاد حقيقية ، حيث أن قياسات الصفائح تكون عادة صغيرة لاستقراء النتائج للأساسات الفعلية التي يمكن أن تكون أبعادها عادة من 1.5 وحتى 4 أو $5m^2$.

الأدوات الأساسية للتجربة :

يحدد نظام (ASTM D1194-94,1994) الأدوات الأساسية لتجربة صفائح التحميل PLT وفق الآتي:

1. منصات التحميل تتحمل الحمولة الإجمالية المطبقة عليها مع تأمين رد الفعل المكافئ للحمولة.
 2. مكبس ميكانيكي أو هيدروليكي ذو استطاعة تحميل كافية تصل الى 50 ton(440kn) .
 3. أجهزة لقياس الضغط المطبق من قبل المكبس يجب أن تكون قادرة على تسجيل الحمولة بخطأ لا يتجاوز % ± 2 من زيادة الحمولة المستعملة .
 4. صفائح تحميل - ثلاث صفائح تحميل دائرية فولاذية بسماكة لا تقل عن (25 mm) وتتراوح بالقطر من (305 to 762mm) تشمل القطر الأدنى والأقصى أو صفائح تحميل فولاذية مربعة بمساحة مكافئة.
 5. أجهزة تسجيل الهبوط قادرة على قياس هبوط صفائح الاختبار بدقة (0.25 mm) على الأقل.
- يمكن لأجهزة الاختبار أن تكون مختلفة من كود الى آخر وهي عموماً تعتمد على ظروف العمل ، ومتطلبات الاختبار ، والأدوات المتاحة ، ويبين الشكل (1) جهازاً نموذجياً لإجراء اختبار التحميل PLT التقليدية (Bowels,1998):



الشكل (1) - الشكل النموذجي لتجربة صفائح التحميل

التعريف بمعامل الاستناد المرين K_s :

قام Winkler بتمثيل التربة تحت سطح التحميل بوصفها نوابض مرنة و منفصلة متطابقة ولكن مستقلة عن بعضها، بتباعدات قريبة جداً، وإن النسبة بين إجهاد التماس P ، في أي نقطة معطاة ، وبين الهبوط y الناتج عنها في تلك النقطة ، هي ما يعرف بمعامل الاستناد المرين K_s (Dutta & Roy .2002) .

نشرت بعض الابحاث السابقة التي أعطت قيماً عن K_s ، وكان من المفروض أن يكون لهذا المعامل قيم محددة لكل نوع تربة معين لكن وجد أن هذا الافتراض تقريبي وأن المسألة أعقد من ذلك .

درس (Terzaghi ,1955) العوامل المؤثرة على معامل الاستناد المرين في أطروحة شاملة وأثبت أن K_s يتوقف على مرونة التربة ويتعلق أيضاً بشكل مخطط التحميل وشكل وأبعاد الصفيحة المحملة (الأساس) ، وقد جرى فيما بعد تعديل استنتاجات Terzaghi واقترح الباحثون علاقات عديدة منها ماهو تجريبي ومنها ماهو مستخرج أصلاً من علاقات نظرية المرونة.

طرائق قياس معامل الاستناد المرين K_s :

A. طرائق تجريبية مخبرية وحقلية:

✓ تجربة الانضغاطية (الأومتر)

✓ تجربة ثلاثي المحاور.

✓ تجربة تحميل كاليفورنيا (CBR)

✓ تجارب صفائح التحميل (PLT)

B. طرائق تحليلية حسابية :

يرد في الجدول (1) بعض من أهم العلاقات المقترحة لحساب معامل الاستناد المرين (J.Sadrekarami & M.Akbad,2009)

حيث سيتم خلال هذا البحث المقارنة بين العلاقات الواردة في الجدول ونتائج البحث.

الجدول(1):أهم العلاقات المقترحة لحساب معامل الاستناد المرين

No.	Investigator	Suggested expression
1	Biot	$k_z = \frac{0.95 E_s}{B(1 - \nu_s^2)} \left[\frac{B^4 E_s}{(1 - \nu_s^2) EI} \right]^{0.108}$
2	Terzaghi	For sands $k_z = k_{z1} \left(\frac{B+1}{2B} \right)^2$ For clays $k_z = k_{z1} \frac{1}{B}$
3	Vlassov	$k_z = \frac{E_s(1 - \nu_s)}{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} \left(\frac{\mu}{2B} \right)$
4	Vesic	$k_z = \frac{0.65 E_s}{B(1 - \nu_s^2)} \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI}}$
5	Meyerhof and Baika	$k_z = \frac{E_s}{B(1 - \nu_s^2)}$
6	Kloppe and Glock	$k_z = \frac{2E_s}{B(1 + \nu_s)}$
7	Selvadurai	$k_z = \frac{0.65}{B} \cdot \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$
8	---	$k_z = \frac{E_s}{B'(1 - \nu_s^2) m I_s I_F}$

3 - طرائق جدولية:

يمكن أخذ قيم معامل الاستناد المرن K_s بالاعتماد على الجداول الجاهزة التقريبية . (Bowels,1998) ، وتبقى هذه الجداول عامة جداً وتقريبية .

طريقة حساب معاملات المرونة من تجربة صفائح التحميل وفق DIN 18134 :

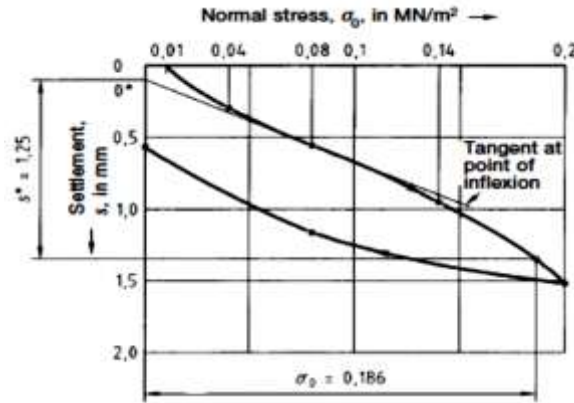
• حساب معامل الاستناد المرن K_s :

يعرف النظام DIN 18134 معامل الاستناد المرن بأنه البارامتر المعبر عن رد الفعل للتربة تحت سطح التحميل.

يتم حسابه من منحنى (حمولة - هبوط) بوحدة MN/m^3 من الإجهاد الناظمي الموافق لهبوط وسطي مساوٍ إلى $1.25mm$ وذلك لحالة قطر صفيحة ($D=762mm$)، كما يبين الشكل (2). (DIN 18134,2001).

$$(9) \quad k_s = \frac{\sigma_0}{s} = \frac{\sigma_0}{0.00125} \quad MN/m^3$$

وأما في حال استخدام أقطار أخرى لصفيحة التحميل فإن قيمة الهبوط التي سوف تعتمد في هذا البحث لحساب معامل الاستناد K_s تؤخذ بالتناسب مع الحالة النظامية التي قطر الصفيحة فيها $D=762mm$ وفق الكود الألماني .



الشكل 2 - تحديد معامل الاستناد المرن وفق DIN 18134

• حساب معاملي التشوه الأولي والثانوي Ev_1 , Ev_2 :

يعرف النظام DIN 18134 معامل التشوه Ev على أنه البارامتر المعبر عن الخواص التشوهية للتربة. معامل التشوه الأولي Ev_1 يتم تحديده من ميل المماس بين النقطتين $0.3\sigma_{max}$ و $0.7\sigma_{max}$ لحلقة التحميل الأولى. الشكل (3) معامل التشوه الثانوي Ev_2 يتم تحديده من ميل المماس بين النقطتين $0.3\sigma_{max}$ و $0.7\sigma_{max}$ لحلقة التحميل الثانية (إعادة التحميل). الشكل (3) رياضياً يتم تحديد معامل التشوه وفقاً للعلاقة التالية:

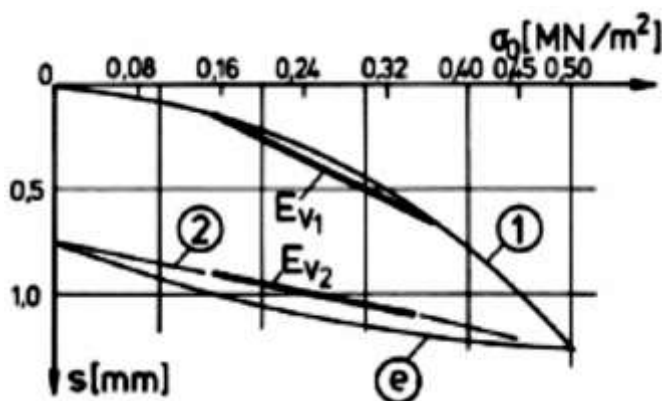
$$(10) \quad E_V = 1.5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0max}} \quad MN/m^2$$

r - نصف قطر صفيحة التحميل (mm)

σ_{0max} - الإجهاد الناظمي الأعظمي الوسطي (MN/m^2)

a_1, a_2 - عوامل واحدتها ($mm/MN^2/m^4$)، يتم حسابها بطريقة التريبعات الصغرى. (DIN

18134,2001)



الشكل (3): تحديد معاملي التشوه Ev_1, Ev_2 وفق DIN 18134

دراسات التحليل العددي السابقة باستخدام الـ FEM:

درس (M. Janbaz, 2008) تأثير أبعاد الأساس على معامل الاستناد المرن في الترب المتماسكة وذلك بطريقة العناصر المنتهية والتحليل الفراغي ثلاثي الأبعاد، إن التربة المستخدمة في هذه الدراسة تملك تماسك ($17kPa$)، وزاوية احتكاك داخلي (26°).

أظهرت الدراسة أنه بزيادة بعد الأساس تقل قيمة معامل الاستناد المرن K_s ، اعتماداً على النتائج الإحصائية تم الوصول لعلاقة رياضية لحساب قيمة هذا المعامل بدلالة عرض الأساس:

$$K_s = 5004 (B)^{-0.73} \quad (11)$$

وأجرى (S.R.Ziaei & M.Janbaz, 2009) نمذجة عددية لتجارب صفائح التحميل PLT باستخدام طريقة العناصر المنتهية والتحليل ثلاثي الأبعاد (Plaxis 3D) للتحقق من تأثير شكل الأساس وعمق التأسيس على قيمة معامل الاستناد المرن K_s ، وقد أظهرت النتائج مايلي:

1. من أجل نفس عرض الأساس فإن قيم معامل الاستناد المرن للأساس المربع أعطت أكبر قيم في حين أقل قيم كانت للأساس الشريطي فبزيادة مساحة التحميل يزداد الهبوط وبالتالي تقل قيمة معامل الاستناد المرن.
2. بزيادة عمق التأسيس تزداد قيمة هذا المعامل حيث يقل الهبوط مع العمق.

قام (J.Sadrekarami & M.Akbazad, 2009) بإجراء دراسة تحليلية مقارنة للطرق المستخدمة في تحديد معامل الاستناد المرن K_s ، وذلك لحالة حصيرة متوضعة على تربة مارل في منطقة تبريز-إيران، حيث قارن منحنيات الهبوط البعد عن الحافة الناتجة عن تحديد قيمة معامل الاستناد المرن من خلال النمذجة العددية بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج Plaxis 7.2 مع المنحنيات الناتجة من خلال حساب معامل الاستناد المرن باستخدام العلاقات المقترحة من قبل (Biot, Vesic.) بينت النتائج أن علاقة Vesic هي العلاقة التي تتنبأ بالهبوط الأقرب للواقع لمارل مأخوذ من منطقة تبريز.

درس (A.Marto et al,2012) تأثير أبعاد الأساس على معامل الاستناد المرن بحالة الترب الرملية باستخدام طريقة العناصر المنتهية وبرنامج (Plaxis.8.2) للتحقق من صلاحية علاقة ترزاكي في حساب هذا المعامل، وأظهرت النتائج : 1 - أنه بحال وجود المياه تقل قيمة معامل الاستناد المرن مقارنة بالحالة الجافة 2 - يقل هذا التأثير من أجل الأساسات ذات الأبعاد الكبيرة ، وبمقارنة النتائج العددية في كلتا الحالتين مع القيم التي تعطىها علاقة ترزاكي فقد تبين أن هذه العلاقة تعطي قيمة أقل لمعامل رد فعل الترب المرن K_s مقارنة بقيم النتائج العددية فضلاً عن أنها أصلاً أهملت تأثير المياه الجوفية إذا وجدت .

نستدل مما سبق أن العوامل المؤثرة على قيمة معامل الاستناد المرن كثيرة ومتنوعة فالدراسات العددية في الأبحاث المنشورة السابقة لم تكن شاملة من ناحية دراسة مجالات أوسع لنفس نوع التربة كما أنها أغفلت دور الإجهادات المطبقة على قيمة معامل الاستناد المرن ، كما أن العلاقات المقترحة في المراجع لحساب K_s كثيرة لكن لايمكن تعميمها على كل أنواع الترب وأشكال الأساسات وأنواعها .

طرائق البحث ومواده:

اعتمد هذا البحث على المنهج التحليلي والمقارنة ، حيث تم اتباع التسلسل التالي في العمل :
A. المرحلة الأولى المعيارية - تمت نمذجة مجموعة من تجارب التحميل الحقلية الحقيقية باستخدام برنامج PLAXIS-2D وفق طريق التحميل المتبعة في الكود الألماني DIN 18134 حيث قورنت من أجل معيارية البرنامج منحنيات التجارب الحقيقية مع منحنيات النمذجة العددية واختير قانون المادة الأنسب .

B. المرحلة الثانية - أجري نمذجة عدد كبير من التجارب باستخدام البرنامج بعد اعتماد شروط التطابق الأفضل في المرحلة الأولى (قانون المادة الأنسب) بين النمذجة والواقع ، ودرست التغيرات البارامترية لأهم المؤثرات على قيم K_s بما يخدم هدف البحث عن طريق توليد عدد كبير من تجارب التحميل باستخدام البرنامج من أجل الحالات المختلفة .

C. المرحلة الثالثة - أجري تحليل موضوعي منطقي لنتائج المرحلة الثانية السابقة بهدف استنباط علاقات مبسطة يمكن استخدامها لحساب K_s بدلالة البارامترات المؤثرة عليه المستخرجة من منحنيات التجربة المحصول عليها بالحساب العددي ، ثم مقارنة النتائج المتوصل إليها مع نتائج الأبحاث السابقة المشابهة في هذا المجال .

وقد استخدم في هذا البحث برنامج plaxis 2D v.86 نظراً لسهولة التعامل معه ولاحتمائه على عدد من قوانين المادة المتطورة التي تعبر بدقة عن السلوك الإجهادي _ التشوهي الخطي واللاخطي في التربة ، إضافة الى إمكانية دراسة الفعل المتبادل بين المنشأ والتربة في هذا البرنامج نظراً إلى أنه يستخدم فكرة عناصر التماس بين التربة والأساس (Interfaces Elements) ، أخذاً بالحسبان نوعية المادة (تربة - صفيحة) وخشونة سطح التماس (Plaxis. 2005)

قمنا أيضاً بتصميم برنامج مصغر في بيئة الإكسل Excel لتقييم منحنيات التجارب العددية المحصول عليها بالبرنامج سميناه (PLT) يقوم بحساب معاملات المرنة الخاصة بتجارب التحميل (مثل - معامل الاستناد المرن K_s ، ومعامل التشوه الأولي Ev_1 ومعامل التشوه الثانوي Ev_2) بحسب الكود الألماني DIN 18134 .

النتائج والمناقشة:

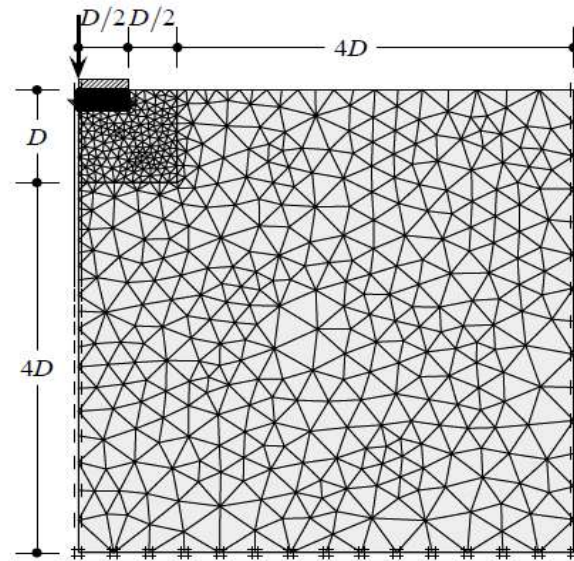
A. معايرة برنامج Plaxis المستخدم:

من أجل معايرة البرنامج المستخدم واختيار قانون المادة الأصلح تم نمذجة عدد من تجارب التحميل الحقلية الحقيقية للمقارنة بين نتائج الحساب العددي للبرنامج المستخدم مع نتائج التجربة الحقلية الحقيقية ، ومن أجل هذه الغاية كررنا النمذجة العددية باستخدام موديلات مادة مختلفة مثل موديل (Mohr-Coulomb: MC-Model)، وموديل (Hardening Soil Model: HS-Model) بهدف اختيار الموديل الأكثر ملائمة لاعتماده في النمذجة وقد تمت المعايرة من أجل أقطار مختلفة لصفحة التحميل لضمان موثوقية العمل .

اعتمدت حدود النموذج المستخدم في التحميل كما هو مبين في (الشكل 4) الذي يأخذ بالحسبان حالة التناظر المحوري (Axisymmetry) بافتراض أن الصفحة المحملة دائرية الشكل ، وقد اختيرت عناصر التقسيم مثلثية ب 15 عقدة ، كما استخدم العنصر الخطي plate لتمثيل الصفحة ، وافترض وجود عناصر تماس (interface) بين أجزاء الصفحة وأجزاء التربة التي هي على تماس معها من أجل رصد التماس والتأثير المتبادل بين التربة وصفحة التحميل .

حملت النماذج العددية بتطبيق إجهادات شاقولية محددة على الصفحة وفق تعليمات التحميل المتبعة في الكود الألماني ، وقيست الهبوطات المقابلة .

جرب النموذج على موديلين للمادة تعمل عليهما بيئة البرنامج هما 1- موديل مور كولومب MC ، و 2 - موديل تصلب التربة HS .



الشكل (4) - الموديل العددي باستخدام برنامج Plaxis

قمنا بمعايرة البرنامج على تجربتين حقيقيتين :

• التجربة الأولى A - أجراها (Consoli et all,1998) في شمال البرازيل لتربة غضارية

موصفاتا مبينة على (الجدول 3) .

- التجربة الثانية B - أجريت في جزيرة قاسم (Qeshm) في إيران لتربة غضار سيلتي (Naeini et all,2015) ، مواصفاتها مبينة على (الجدول 4) .

يبين الجدول (2) مواصفات الصفائح المستخدمة في التحميل التي سوف يتم إدخالها في البرنامج .

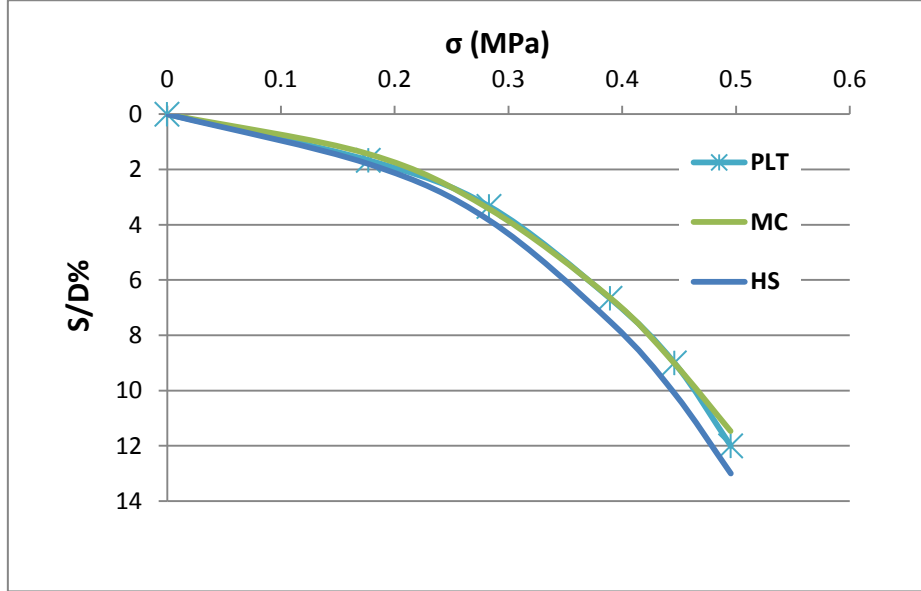
الجدول (2) - مواصفات الصفائح

البارامتر	القيم العددية			الوحدة
	D=300mm	D=450mm	D=600mm	
d	0.025	0.04	0.05	m
v	0.3	0.3	0.3	-
E.A	$1.9 \cdot 10^7$	$3.4 \cdot 10^7$	$7.6 \cdot 10^7$	Kn/m
E.I	1000	3950	6000	Kn.m ² /m
R _{INTER}	0.6	0.6	0.6	-

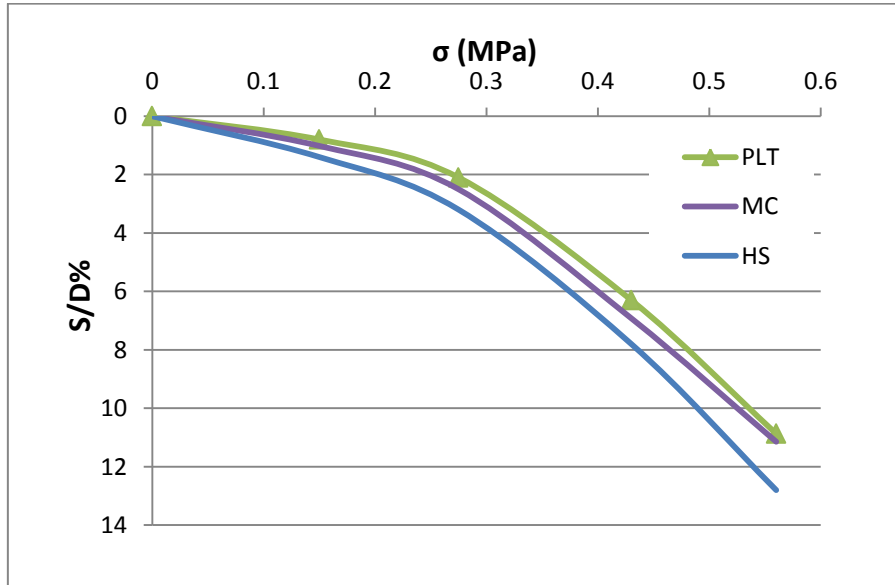
الجدول (3): معاملات قانون المادة (HS-Model) ، (MC- Model) للتجربة A

البارامتر	القيمة	البارامتر	القيمة
(MC- Model)			
γ_{unsat}	17.7 KN/m ³	ϕ	26°
γ_{sat}	19 KN/m ³	c	17KN/m ²
E_{ref}	10000 KN/m ²	R _{INTER}	0.6
(HS- Model)			
γ_{unsat}	17.7 KN/m ³	ϕ	26°
γ_{sat}	19 KN/m ³	c	17KN/m ²
E_{50}^{ref}	19300 KN/m ²	R _{INTER}	0.6
E_{oed}^{ref}	19300 KN/m ²	m(power)	0.6
E_{ur}^{ref}	57900 KN/m ²	p _{ref}	100 KN/m ²

بالبرنامج مع منحنيات التجارب الحقيقية (PLT) والشكلان (6) و (7) يوضحان النتائج المستخلصة لكلا التجريبتين المذكورتين .



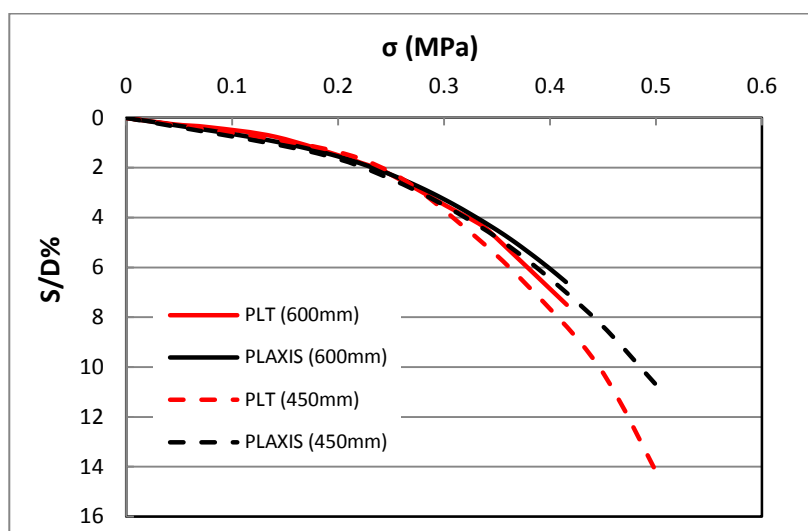
الشكل (6) - مقارنة بين نتائج النمذجة (MC,HS) ونتائج التجربة الحقيقية (PLT) لحالة صفيحة تحميل بقطر 300mm - التجربة (A)



الشكل (7) - مقارنة بين نتائج النمذجة (MC,HS) ونتائج التجربة الحقيقية (PLT) لحالة صفيحة تحميل بقطر 300mm - التجربة (B)

يتبين من الشكلين السابقين أن موديل MC يعطي تقارباً مع نتائج التجارب الحقلية الحقيقية أكثر من موديل HS ويعبر بشكل أدق عن السلوك الحقيقي للتربة ، لذلك تم اعتماده في توليد النماذج الحاسوبية المدروسة والدراسة البارامترية في هذا البحث .

قمنا بعد ذلك بمعايرة السلوك الإجهادي - التشوهي للتربة مع تغيير قطر الصفيحة وذلك من خلال نمذجة التجارب الحقلية التي أجراها (Consoli et all,1998) على قطرين إضافيين من الصفائح هما (450-600mm) ، باستخدام موديل (MC-Model). الشكل (8)



الشكل (8): مقارنة بين نتائج التجارب الحقلية (PLT) والتحليلية (برنامج Plaxis) لحالة صفيحة التحميل بقطر 450 و 600 مم - التجربة (A)

نستنتج مما سبق أن الموديل المقترح MC باستخدام برنامج plaxis 2D يعكس تقارب مقبول مع النتائج المرجعية للتجربة الحقلية من أجل جميع حالات الأقطار وبالتالي يمكن استخدامه لإجراء الدراسة البارامترية لأهم العوامل المؤثرة على قيمة معامل الاستناد المرن لحالة التربة المتماسكة (C, Φ) .

B. التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) وبرنامج Plaxis:

اعتمد التحليل العددي على تقييم تجارب التحميل المجرأة حاسوبياً ببرنامج PLAXIS-2D والتي بلغ عددها 108 تجربة استناداً الى موديل المادة المقترح ، وبحيث تكون طريقة التحميل وسياق التجربة متوافقين مع تعليمات الكود الألماني DIN 18134 ، واختير عدد التجارب المجرأة حاسوبياً بحيث يكون كافياً لإتمام دراسة تغيرات البارامترات المختلفة وتأثيرها على قيم معامل الاستناد المرن K_s .

أ - مواصفات التربة المدروسة :

استخدمت في التحليل العددي مواصفات التربة المتماسكة التي صنفت وفق الكود الألماني DIN-18196 بحسب مجالات دليل السيولة إلى ثلاث زمر : 1- تربة ضعيفة اللدونة $WL < 35\%$ - 2 تربة متوسطة اللدونة $35\% < WL < 50\%$ - 3 تربة عالية اللدونة $WL > 50\%$ ، حيث WL - حد السيولة . يبين الجدول (5) مجالات تغير مواصفات التربة لكل زمرة ، وحدد مواصفات التربة المتماسكة تقريباً ضمن هذه المجالات الثلاثة ، وقد قمنا

بتغيير مواصفات التربة كلها بشكل متجانس ضمن حدود المجالات المذكورة . (الترب من 1 الى 6) للترب ضعيفة اللدونة ، و (الترب من 7 الى 12) للترب المتوسطة اللدونة ، و (الترب من 13 الى 18) للترب عالية اللدونة .

الجدول (5): مواصفات الترب المدروسة

مجالات الترب	Φ	C (kPa)	Es (MPa)	γ (kN/m ³)	v	k (m/s)
WL<35%	25-30	0-15	15-20	20	0.35	$2*10^{-9}$ - 10^{-7}
35%<WL<50%	22.5-27.5	5-20	10-15	19.5	0.35	10^{-10} - $5*10^{-8}$
WL>50%	20-25	5-25	5-10	18.5	0.35	10^{-11} - 10^{-9}

وقد أجريت الحسابات على صفائح تحميل بأقطار (300 , 450 , 600, 762 , 1000 , 1200 mm) بمعدل 18 نموذجاً حاسوبياً لكل قطر .

ب. الدراسة البارامترية :

في النموذج الحاسوبي للتجربة تم التحميل بـ 6 خطوات تحميل بتزايدات متساوية تقريباً حتى الوصول إلى الإجهادات التي تنهار عندها التربة ثم إزالة الحمولة تدريجياً حتى إزالة كافة الحمولات ، ومن ثم إعادة التحميل من جديد حتى المرحلة ما قبل الأخيرة من التحميل الأولي ورسم منحنى الحمولة الهبوط لكل نموذج ، وحساب قيم المعاملات المرنة (معامل الاستناد المرن ،معاملتي التشوه الأولي والثانوي) وفقاً لطريقة الكود الألماني DIN 18134 من كل منحن وبعد ذلك قمنا بإجراء الدراسة البارامترية وفق التالي :

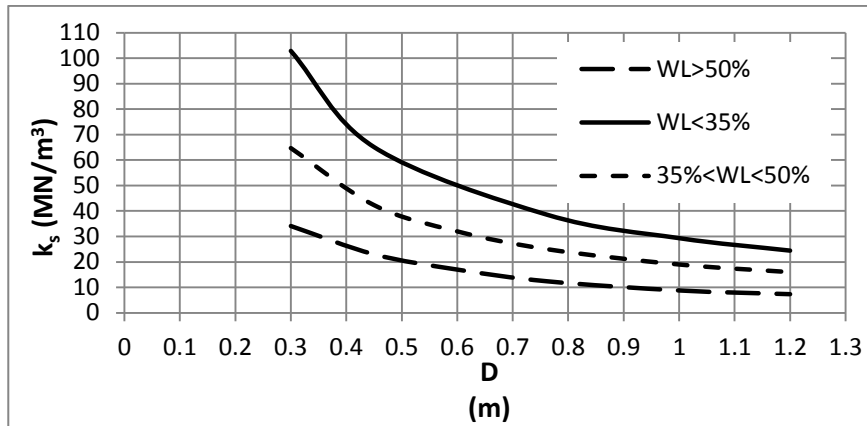
أولاً - تأثير قطر الصفيحة D على معامل الاستناد المرن K_s :

أظهرت النتائج أن قطر صفيحة التحميل يؤثر بشكل واضح على قيمة معامل الاستناد المرن ، حيث تقل قيمة هذا المعامل بازدياد قطر الصفيحة وذلك لجميع حالات الترب المدروسة، حددت العلاقة الرياضية الخاصة بكل منحنى من منحنيات الترب المدروسة، بالحل المشترك لهذه المعادلات توصلنا إلى العلاقة التقريبية التي تربط بين قطر الصفيحة المحملة D وبين معامل الاستناد المرن K_s

$$K_s = \frac{a}{D} \quad (12)$$

حيث - a - ثابت تختلف قيمته باختلاف مواصفات التربة .

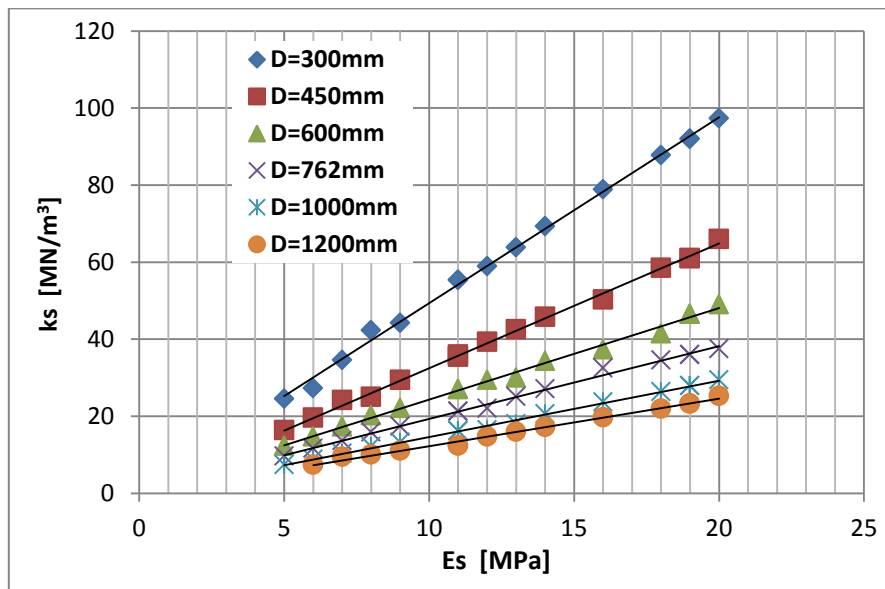
يبين الشكل (9) مثال للعلاقة بين معامل الاستناد المرن وقطر الصفيحة وذلك من أجل نموذج من كل زمرة.



الشكل 9 - تأثير قطر الصفيحة D على معامل الاستناد المرن K_s من أجل نموذج من كل زمرة.

ثانياً- تأثير معامل مرونة التربة E_s على معامل الاستناد المرن K_s :

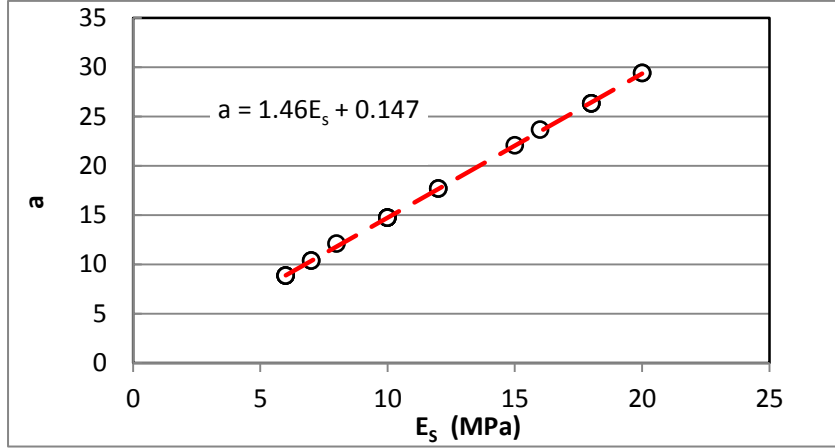
يبين الشكل (10) وجود علاقة واضحة لمعامل الاستناد المرن مع معامل المرونة الخاص لكل تربة.



الشكل 10 - تأثير معامل المرونة E_s على معامل الاستناد المرن K_s لكل حالات الترب المدروسة

من أجل الوصول إلى علاقة شاملة تربط معامل الاستناد المرن K_s مع البارامترات المؤثرة عليه (قطر

الصفيحة، معامل المرونة)، قمنا بدراسة العلاقة بين الثابت a و معامل المرونة E_s للتربة :

الشكل 11 - العلاقة بين معامل المرونة E_s والثابت a

تم استنباط علاقة خطية تعطي قيمة الثابت a بدلالة معامل المرونة:

$$a = 1,46 \times E_s + 0,147$$

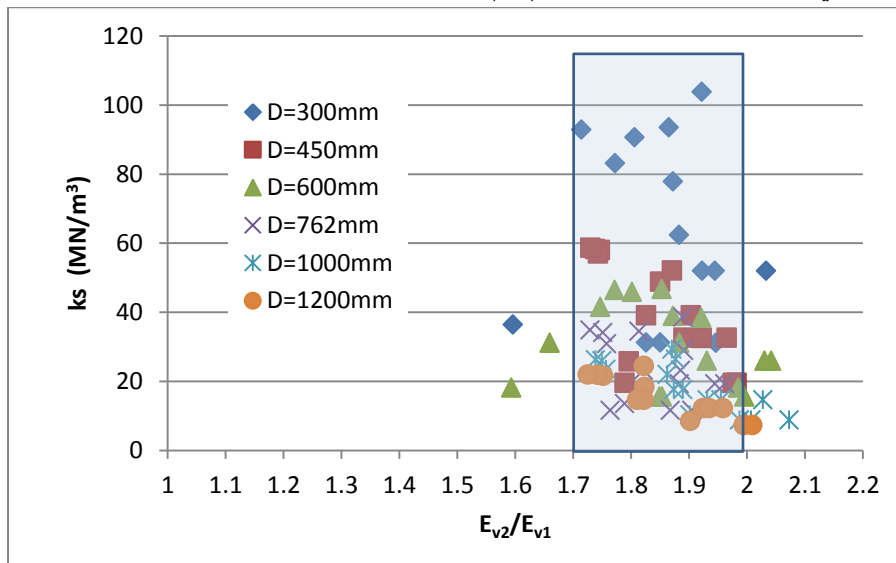
و بتعويض قيمة الثابت a في المعادلة (12) ، نصل إلى المعادلة النهائية المقترحة لحساب معامل الاستناد المرن.

$$(13) \quad K_s = \frac{1,46 \times E_s + 0,147}{D}$$

حيث - E_s - معامل المرونة، D - قطر الصفيحة

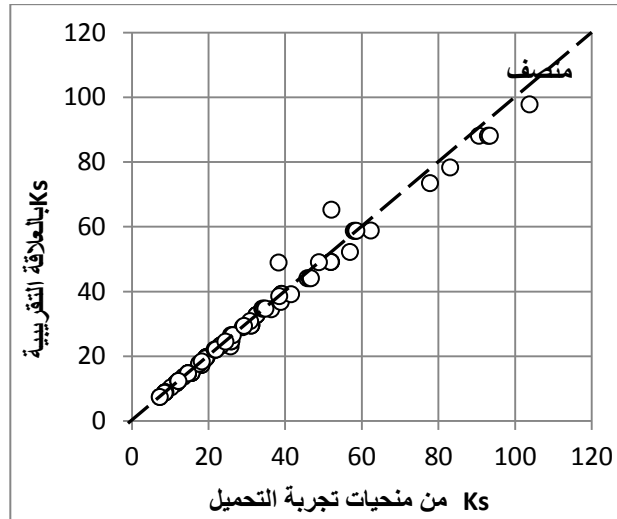
ثانياً - تأثير النسبة E_{v2}/E_{v1} على معامل الاستناد المرن K_s :

رسمت العلاقة بين معامل الاستناد المرن والنسبة بين معاملي التشوه الأولي والتشوه الثانوي E_{v2}/E_{v1} لجميع التربة ولجميع أقطار الصفائح في كل الحالات ، وجدنا أن القيم تتركز في المجال [1.7-2] ، وهذا المجال يضم جميع حالات التربة المدروسة في هذا البحث كما يبين الشكل (12)

الشكل (12) - العلاقة بين معامل الاستناد المرن K_s وبين النسبة E_{v2}/E_{v1}

3. تحليل نتائج البحث

من أجل التأكد من دقة العلاقة المقترحة (13) لحساب معامل الاستناد المرن، قمنا بمقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها من التجربة مع القيمة الحسابية من العلاقة الرياضية، ويبين الشكل (13) أن العلاقة الحسابية المقترحة أعطت نتائج مقبولة حيث انطبقت أغلب النقاط على منتصف الربع الأول.



الشكل (13) - العلاقة بين قيم التجربة والقيم المحسوبة

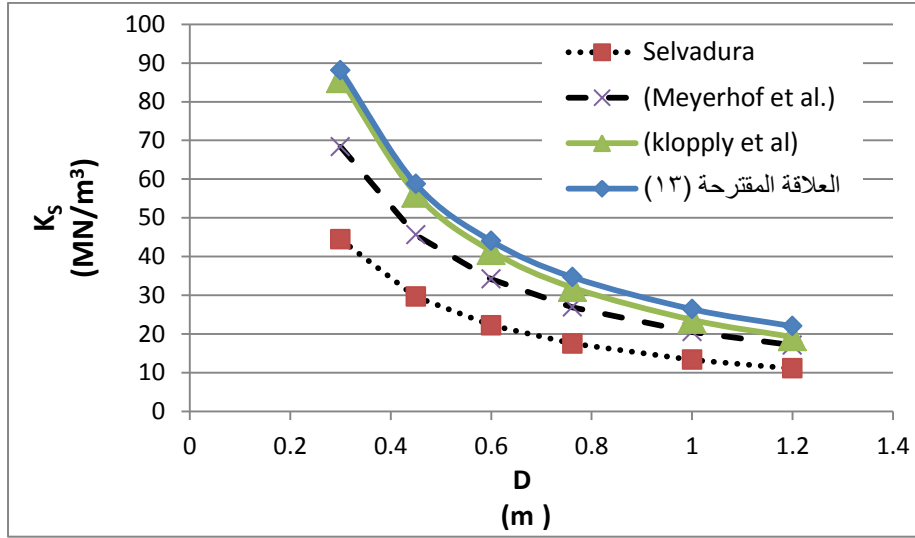
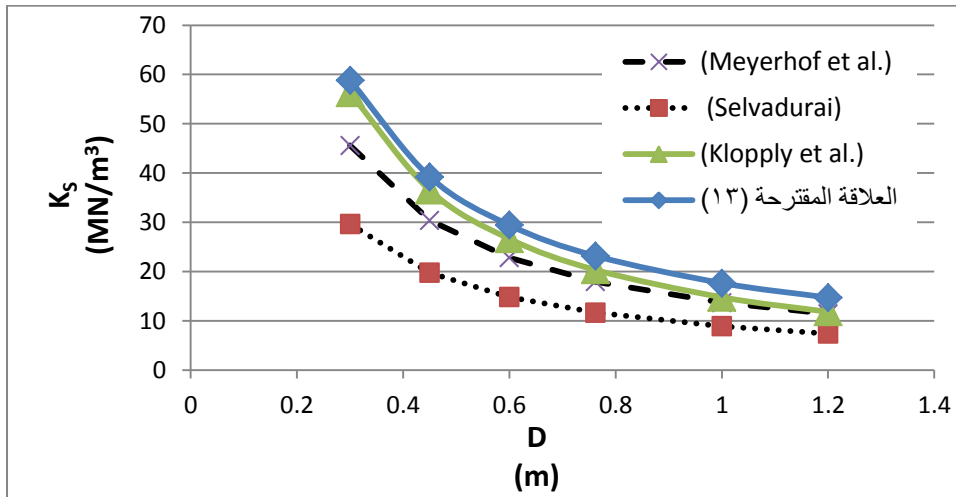
بمقارنة قيم معامل الاستناد المرن الناتجة من تطبيق العلاقة المقترحة (13) مع القيم المحسوبة من منحنى التحميل الحقلي للتجارب التي أجراها (Consoli et all, 1998) من أجل أقطار للصفحة (300, 450, 600) مم (الشكلان 6 و 8)، وجدنا أن العلاقة المقترحة أعطت نتائج متوافقة مع القيم المحسوبة من المنحنيات الحقلية كما يبين الجدول (6):

الجدول (6): مقارنة بين قيم معامل الاستناد المرن

(المحسوب من العلاقة المقترحة - المحسوب من المنحنى الحقلي) - تجارب (Consoli et all, 1998)

قيم معامل الاستناد المرن المحسوب من المنحنى الحقلي (MN/m^3)	قيم معامل الاستناد المرن المحسوب من العلاقة المقترحة (MN/m^3)	قطر الصفحة (mm)
70.51	49.157	300
47.43	32.77	450
30.71	24.58	600

أظهرت العلاقة المقترحة أيضاً تقارباً مع النتائج التي توصل إليها بعض الباحثين في الدراسات المرجعية (الجدول (1)) ومنهم على سبيل المثال العلاقات (5, 6, 7) للباحثين (Selvadurai ; Kloppe & Glock ; Meyerhof & baiki) ويظهر (الشكلان 14 و 15) المقارنة من أجل التربة منخفضة اللدونة ومتوسطة اللدونة .

الشكل (14) - مقارنة قيم K_s المحسوبة وفق العلاقة المقترحة والعلاقات من الجدول (1) (الترب منخفضة اللدونة)الشكل (15) - مقارنة قيم K_s المحسوبة وفق العلاقة المقترحة والعلاقات من الجدول (1) (الترب متوسطة اللدونة)

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات

- تتعلق قيمة معامل الاستناد المرن لحالة الترب المتماسكة بأبعاد صفيحة التحميل وقوام التربة (اللدونة) ، حيث أنه ومن أجل نفس التربة فإن قيمة معامل الاستناد المرن تقل بازدياد قطر الصفيحة ، كما أنه بازدياد لدونة التربة تقل قيمة هذا المعامل.
- إن النسبة بين معاملي التشوه الأولي والثانوي Ev_2/Ev_1 تتركز ضمن المجال [1.7-2] من أجل مختلف حالات الترب المدروسة وأقطار صفائح التحميل.
- يمكن الاعتماد على العلاقة (13) التقريبية في حساب قيم معامل الاستناد المرن K_s في حالات الترب المتماسكة التي تقع بارامترات (E_s, C, ϕ) ضمن الحدود الواردة في الجدول (5)، وهذا ما يجعل

الاستغناء عن اجراء تجارب تحميل في بعض الحالات ممكنا كما قد يخفف من عدد تجارب صفائح التحميل الحقلية المطلوبة في حالات اخرى .

• تتقارب نتائج العلاقة المقترحة(13) بشكل كبير مع علاقة Kloppe & Glock مما يدل على أنها

تتسجم مع نتائج الابحاث السابقة على الترب المتماسكة اكثر من علاقتي Selvadurai, Meyerhof & baike

التوصيات:

• مواصلة إجراء اختبارات تحميل إضافية في الترب المتماسكة وإعادة نمذجتها وتقييمها من أجل

تحسين العلاقة المقترحة بحيث تشمل مجال أوسع من الترب المتماسكة وأقطار أكبر للصفحة.

• تحديد المزيد من البارامترات المؤثرة على قيمة معامل الاستناد المرن وإجراء دراسة حول تأثير

تغيراتها على قيمة هذا المعامل.

• تجميع المعلومات والاستمرار في محاولة تطوير البحث وتعميمه ليشمل الترب الغضارية المشبعة

وعلى الرغم من تعقيد هذه المسألة وارتباطها بكثير من البارامترات إلا أنها تبقى مكملة لبحثنا هذا.

• بالاستناد إلى الدراسة النظرية والتحليلية ، ومع كثرة وتنوع العلاقات المستخدمة لحساب معامل

الاستناد المرن وجدنا أنه غالباً ما يكون هناك علاقة مناسبة أكثر من أخرى وذلك حسب نوع التربة وشكل

الأساس ونوعه ، مما يستدعي العمل على تحديد مجال استخدام كل علاقة.

المراجع

1. A.Mato, et al. ,”*Foundation Size Effect on Modulus of Subgrade Reaction on Sady Soils*” EJGE,vol. 17,2012
2. ASTM D1194-94,Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings:American Society for Testing Materials, USA ,1994.
3. Biot, M. A. (1937).”*Bending of Infinite Beams on an Elastic Foundations*” . J.Appl. Mech. Trans . Am.Soc Mech.Eng .,59:A1-7.
4. Bowles, J.E, 1998, *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill International Editions, 6th ed
5. DIN 18134: *Determination of deformation and strength characteristic of soil by plate loading test*, Deutsche Norm September 2001
6. DIN-18196:Earthworks And Foundations_Soil Classification For Civil Engineering
7. Dutta, S. C. and R. Roy (2002) “*A Critical Review on Idealization and Modeling for Interaction among Soil–Foundation-Structure System*,” Computers and Structures, 80:1579-1594
8. J. Sadrekarimi M. Akbarzad .” *Comparative Study of Methods of Determination of Coefficient of Subgrade Reaction*”. EJGE Vol. 14, Bund. E
9. M.Janbaz ,”*Foundation Size Effect on Modulus of Subgrade Reaction In Clayey Soils*”, EJGE, vol. 13,2008
10. Nilo C .Consoli, F.schnaid (1998) Interpretation of plate load tests on residual soil site 1998.ASCE.September.pp. 857-867
11. PLAXIS. 2005. “*Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*”, Version 8.2, P.O. Box 572, 2600 AN Delft, The Netherlands

12. S.Naeini & E.Taherabadi,"*Numerical And Theoretical Study of Plate Load Test to Define Coefficient of Subgrade Reaction*",Journal of Geotechnical and Transportation Engineering,Vol 1-2,2015
13. S.R.Ziaei & M.Janbaz , "*Effective Parameters on Modulus of Subgrade Reaction in Clayey Soils* ", Journal of Applied Sciences .vol.9(22), 4006-4012.2009.
14. Terzaghi,K.V.,(1955),"*Evaluation of coefficient of subgrade reaction*", Geotechnique , Vol. 5, No.4,pp 297-326.
15. Vesic ,A. B. (1961) "*Beams On Elastic Subgrade And Winklers Hypothesis*," Proc. 5thInt .Conf. on Soil Mechanic and Foundation Engineering ,Paris :845-850.