

دراسة مخبرية وعدديّة لقدرة تحمّل التربة لأساس سطحي مستمر متوضّع على تربة متعدّدة الطبقات

الدكتور مالك توفيق حسن¹

ولاء حلوم²

(تاريخ الإيداع 27 / 3 / 2018. قبل للنشر في 10 / 9 / 2018)

□ ملخص □

إنّ التربة في الطبيعية تتوضّع غالباً على شكل طبقات، حيث أنه يمكن بشكل عام افتراض أنّ التربة ضمن كل طبقة متجانسة، ولكن للطبقات المتجاورة تكون خواص التربة ومقاومتها مختلفة. في حال توضّع أساس على سطح تربة متعدّدة الطبقات وكانت الطبقة العليا ذات سماكة كبيرة نسبياً مقارنةً بعرض الأساس، عندها يمكن حساب قدرة تحمّل التربة بشكل مقبول اعتماداً على الطرق النظرية لقدرة تحمّل التربة. ولكن في حال كانت السماكة صغيرة نسبياً مقارنةً بعرض الأساس، فإنّه لن يكون من المناسب استخدام الطرق النظرية التقليدية. تمّ في هذا البحث محاولة حساب قدرة تحمّل التربة والهبوط لأساس يخضع لحمولة مركزية شاقولية ومرتكز على تربة متعدّدة الطبقات وذلك من خلال نماذج مخبرية لأساس دائري متوضّع على تربة مكوّنة من عدّة طبقات و كذلك من خلال استخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) لحساب قدرة تحمّل التربة لأساس مستمر على تربة مكوّنة من طبقة واحدة وتربة مكوّنة من طبقتين (رمل و غضار)، ومن أجل دراسة تأثير عوامل متعدّدة على قدرة تحمّل التربة تمّ استخدام برنامج (PLAXIS V.8.6)، حيث تمّ نمذجة سلوك التربة المرن - اللدن من خلال قانون مور-كولومب (MC). من أجل حالة التربة المتجانسة أعطت مقارنة نتائج التجارب المخبرية مع نتائج التحليل العددي ونتائج العلاقة النظرية تقارباً مقبولاً. ومن أجل حالة نموذج تربة مكوّنة من طبقتين (طبقة ضعيفة من غضار طري فوق طبقة قوية من رمل مرتص) تمّ إجراء دراسة متغيرات وأظهرت نتائج البحث أنّ قدرة تحمّل التربة تتناقص مع زيادة سماكة الطبقة الغضارية في حين أنّ الهبوط يزداد. وهناك عمق حرج لا يكون بعده تأثير للطبقة القويّة (الرمل) على قدرة تحمّل التربة وشكل مؤشر الانهيار.

الكلمات المفتاحية: قدرة تحمّل التربة الحدية - أساس مستمر - FEM - برنامج Plaxis - تربة متعدّدة الطبقات

¹ أستاذ مساعد - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين - اللاذقية - سورية

² طالبة ماجستير - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Numerical Analysis and Model tests of the Bearing Capacity of shallow Strip Footing resting on Multi-layered Soils

Dr. Malek Tawfik Hasan^{*}
Walaa Halloum^{**}

(Received 27 / 3 / 2018. Accepted 10 / 9 / 2018)

□ ABSTRACT □

Naturally occurring soils are often deposited in layers. Within each layer the soil may, typically, be assumed to be homogeneous, although the strength properties of adjacent layers are generally quite different. If a foundation is placed on the surface of a layered soil for which the thickness of the top layer is large compared with the width of the foundation, then realistic estimates of the bearing capacity may be obtained using conventional bearing capacity theory. However, this approach may not be appropriate, if the thickness of the top layer is not large compared to width of the footing.

In present investigation attempt has been made to study the bearing capacity and settlement characteristics of footings subjected to central vertical load and resting on layered soil with the help of model tests and with the application of finite element method (FEM) to calculate bearing capacity of a strip footing on one-layer and two-layer soil (Sand and Clay). To investigate the effect of various parameters on soil bearing Capacity a commercial finite element software, PLAXIS, has been used. Soil profile contains two soil types including sand and clay. Soil behavior is represented by the elasto-plastic Mohr-coulomb (MC) -model. For a one-layer case, the bearing capacity also is calculated which has a good agreement with theoretical equations. For a layered soil, soft-over strong soil, parametric study was carried out. It is concluded that the bearing capacity of footing decreases as the height of clayey soil increases whilst the displacement under footing increases. There is a critical depth where the stronger bottom layer does not affect ultimate bearing capacity and failure mechanism of footing.

Keywords: Bearing capacity- FEM -PLAXIS- strip footing- layered soils

^{*} Associate Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

^{**} Master Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

مقدمة:

إنّ التربة في الطبيعية تتوضع على شكل طبقات، فهي غالباً غير متجانسة. لهذا السبب يعتبر حساب قدرة التحمل لتربة التأسيس المتعددة الطبقات من أهم المشاكل وأكثرها تعقيداً في مجال الهندسة الجيوتكنيكية وقد كانت مجال دراسة العديد من الأبحاث والدراسات مؤخراً، كما أنه يوجد عدّة طرق لحساب قدرة تحمل التربة المتعددة الطبقات في المراجع العلمية وأبرزها وأكثرها استخداماً (بولز - مايرهوف هانا- الطريقة نصف البيانية) [1,5,6,12]، لكن لا يوجد طريقة أو معادلة عامّة قادرة على إعطاء قدرة تحمل التربة لجميع أنواع الترب وجميع الحالات بدقة جيدة. في هذا البحث سيتم دراسة قدرة تحمل التربة لأساس مرتكز على تربة متعدّدة الطبقات باستخدام النماذج المخبرية وطرق التحليل العدديّة (FEM)، بالإضافة إلى إجراء دراسة متغيّرات لأهم العوامل المؤثرة على قدرة التحمل.

أهمية البحث وأهدافه:

إنّ حساب قدرة تحمل التربة من المسائل الجيوتكنيكية الأساسية التي تتطلب دقّة لما لها من تأثير على تحديد طريقة التأسيس وتصميم الأساسات وبالتالي على أمان المنشآت وكلفتها الاقتصادية، حيث أنّ الوضع الطبيعي للتربة أن تكون متعدّدة الطبقات ونادراً ما تكون متجانسة وإنّ عدم حساب قدرة تحمل التربة باعتبار تعدّد الطبقات يمكن أن يؤدي إلى تقدير خاطئ لقدرة تحمل التربة ويمكن أن ينجم عن ذلك أضرار مختلفة في المنشآت، حيث أنّ الحساب الصحيح والدقيق لقدرة تحمل التربة يؤدي إلى تصميم أمين واقتصادي للمنشآت، ويقلل من إمكانية حدوث التشققات والتصدعات للمنشآت ومنه يقلل من أعمال الصيانة والترميم وبالتالي الكلفة. يهدف هذا البحث إلى دراسة قدرة تحمل التربة لأساس مرتكز على تربة متعدّدة الطبقات من خلال دراسة تجريبية على نموذج مخبري و نمذجة عددية بطريقة الـ FEM، وإجراء دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على قدرة تحمل التربة لأساس على تربة متعدّدة الطبقات، بالإضافة إلى تسليط الضوء على أهمية الموضوع في الحياة العملية.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث على المنهج التجريبي والتحليلي المقارن حيث تمّ إتباع المراحل التالية لإنجازه:

- 1- برنامج التجارب المخبرية: تمّ إجراء التجارب المخبرية على المواد المستخدمة في النماذج المخبرية (الرمل والغضار)، ثمّ أجريت سلسلة تجارب على النموذج المخبري لأساس دائري متوضع على تربة مكونة من طبقة واحدة وتربة مكونة من طبقتين (غضار و رمل).
- 2- النمذجة بطريقة العناصر المنتهية: معايرة النموذج العددي ببرنامج الـ PLAXIS مع نتائج التجارب المخبرية و الطرق النظرية والنصف تجريبية المستخدمة في الحياة العملية.
- 3- إجراء دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة:
 - دراسة تأثير سماكة الطبقة الأولى تحت الأساس (H_1/B).
 - دراسة تأثير ترتيب الطبقات أسفل الأساس (طبقة رمل فوق طبقة غضار أو بالعكس).

تم تحديد قيمة المعامل (BCR) الذي يعبر عن الزيادة أو النقصان في قدرة تحمل التربة لحالة تربة مكونة من طبقتين بالمقارنة مع تربة متجانسة، وهو يساوي نسبة قدرة تحمل التربة المكونة من طبقتين إلى قدرة تحمل التربة المكونة من

$$\frac{S}{B} = 10\%$$

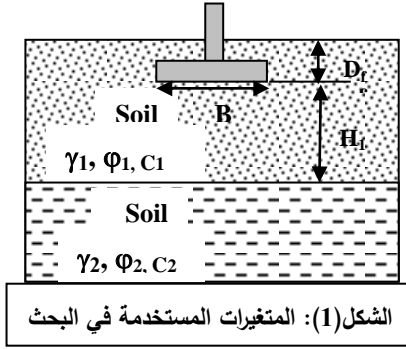
(S: هيوط التربة أسفل الأساس، B: عرض الأساس) كما يلي:

$$\text{BCR} = \text{Bearing Capacity Ratio} = \frac{q_m}{q_2} = \frac{q(\text{multi-layers soil})}{q_2(\text{one layer soil})}$$

q_m : قدرة تحمل التربة المكونة من طبقتين

q_2 : قدرة تحمل التربة المكونة من طبقة واحدة (الطبقة الثانية).

اذ استخدمت في هذا البحث عدّة متغيرات لتحديد قيمة هذا المعامل أهمها: H_1 : سماكة الطبقة العليا تحت الأساس، B: عرض الأساس.



الدراسات المرجعية

معظم الأبحاث القديمة تناولت حساب قدرة تحمل التربة المتجانسة، ولاحقاً قُدمت أبحاث عديدة حول التربة غير المتجانسة [2,7,8,9,13,14] ولا زالت الأبحاث مستمرة حتى الآن. وأكثر الطرق استخداماً في الحياة العملية هي:

- طريقة مايرهوف-هانا تعالج حالة التربة المكونة من طبقتين حيث قُدم (Meyerhof and Hanna, 1978) دراسة لحساب قدرة تحمل التربة لأساس عرضه (B) منقذ على تربة مكونة من طبقتين: الأولى سماكتها (H) تحت منسوب التأسيس والثانية سماكتها كبيرة. تفترض هذه الدراسة أنه في حال كانت سماكة الطبقة العليا H صغيرة بالمقارنة مع عرض الأساس B يحدث انهيار بالقص الثاقب في الطبقة العليا وانهيار بالقص العام في الطبقة السفلى [5,6].

1- حالة تربة أولى غضارية قوية ($\phi_{u1}=0, C_{u1}>0$) يليها تربة غضارية ضعيفة ($\phi_{u1}=0, C_{u1}/C_{u2}>1$): في هذه الحالة إذا كانت النسبة (H/B):

H/B كبيرة نسبياً نستخدم خواص الطبقة العليا لحساب قدرة التحمل (q_{ult1}).

H/B صغيرة نسبياً تحسب قدرة التحمل من خواص الطبقة الثانية بعد إضافة حد بالمقاومة على القص الثاقب للطبقة الأولى لتصبح معادلة قدرة تحمل التربة المعدلة:

$$q_{ult} = q_{ult2} + \left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(\frac{2H \cdot c_{u1}}{B}\right) - \gamma_1 \cdot H \leq q_{ult1}$$

حيث: q_{ult1} - قدرة تحمل التربة الحدية للطبقة العليا تحسب بأحد الطرق المعروفة

q_{ult2} - قدرة تحمل التربة الحدية للطبقة السفلى تحسب بأحد الطرق المعروفة

2- حالة تربة أولى رملية ($\phi>0, C=0$) يليها تربة ثانية غضارية ($\phi_{u2}=0, C_{u2}>0$): في هذه الحالة إذا كانت النسبة (H/B):

H/B كبيرة نسبياً: نستخدم خواص الطبقة العليا لحساب قدرة التحمل (q_{ult1})

H/B صغيرة نسبياً: تحسب قدرة التحمل من خواص الطبقة الثانية بعد إضافة حد بالمقاومة على القص الثاقب للطبقة الأولى لتصبح معادلة قدرة تحمل التربة المعدلة:

$$q_{ult} = q_{ult2} + \gamma_1 \cdot H^2 \left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \left(\frac{K_s \cdot \tan \phi_1}{B}\right) - \gamma_1 \cdot H \leq q_{ult1}$$

حيث: q_{ult1} - قدرة تحمل التربة الحدية للطبقة العليا تحسب بأحد الطرق المعروفة

q_{ult2} - قدرة تحمل التربة الحدية للطبقة السفلى تحسب بأحد الطرق المعروفة KS-معامل يؤخذ من المخططات.

- أما طريقة (Bowels, 1998) فهي تعالج حالة التربة المكوّنة من عدّة طبقات مهما كانت الحالات لكن هذه الطريقة تأخذ بعين الاعتبار الخواص المكافئة كما يلي:

$$\tan \varphi_{av} = \frac{H_1 \cdot \tan \varphi_1 + (d_{max} - H_1) \cdot \tan \varphi_2}{d_{max}}$$

$$C_{av} = \frac{H_1 \cdot c_1 + (d_{max} - H_1) \cdot c_2}{d_{max}}$$

$$\gamma_{av} = \frac{H_1 \cdot \gamma_1 + (d_{max} - H_1) \cdot \gamma_2}{d_{max}}$$

وذلك بحسب السماكة وهذه مشكلة لأن خط الانزلاق ليس شاقولي وبالتالي هذه الطريقة تعطي نتائج غير دقيقة نتيجة الخطأ في حساب طول خط الانزلاق [1].

- الطريقة نصف البيانية (الكود الألماني والكود العربي الموحد) (UAC, 2002) تعتبر طريقة دقيقة وتعطي نتائج مقبولة، لكن هذه الطريقة معقّدة لأننا نرسم موشور الانهيار تحت الأساس ونجد طول خط الانزلاق في كل طبقة ثم نعدّل خواص التربة للطبقة المكافئة حسب طول خط الانزلاق [12].

(Mosadegh and Nikraz, 2015) درسا قدرة تحمل التربة لأساس متوضع على تربة مكوّنة من طبقة واحدة أو طبقتين باستخدام طريقة العناصر المنتهية، وقد تمّ استخدام برنامج الـABAQUS، وأوجدا أنّه في حالة التربة المتجانسة فإنّ خواص التربة كزاوية التوسع الحجمي و K_0 لها تأثير قيم على انهيار التربة أسفل الأساس و في حال التربة متعددة الطبقات يوجد تأثير لسماكة الطبقات وخواص التربة على قدرة تحمل التربة وألية انهيار التربة أسفل الأساس [10].

النتائج والمناقشة

1 برنامج التجارب المخبرية (Experimental model Tests):

1-1 التجارب على المواد: تمّ إجراء التجارب المخبرية على التربة المستخدمة في النموذج المخبري وهي عبارة عن تربة رملية وترب غضارية وأهم النتائج المخبرية يمكن تلخيصها في الجداول (1) و(2).

الجدول (1) مواصفات الغضار المستخدم في النماذج المخبرية

التجربة	البيان	الرمز	القيمة
تجربة الوزن النوعي	الوزن النوعي	G	2.72
تجربة بروكتور	الكثافة	ρ_d	1.65g/cm3
تجربة التحليل الحبي	نواعم/ رمل/ بحص	Gravel/Sand/Fines	0%/44.8%/55.2%
تجربة الانضغاطية (التشديد)	معامل المرونة الأودومتري	E_{oed}	4.3 Mpa
تجربة الضغط المحوري البسيط	المقاومة غير المحصورة على الضغط	q_{u1}	82 Kpa
	التماسك غير المصرف	$C_{U1} = q_{U1}/2$	41 Kpa
	معامل المرونة	E_{50}	2.8 Mpa
تجربة حد السيولة واللدونة	حد السيولة	L_L	42.1%
	حد اللدونة	P_L	22.98%

الجدول (2) - مواصفات الرمل المستخدم

التجربة	البيان	الرمز	القيمة
تجربة الوزن النوعي	الوزن النوعي	G	2.65
تجربة التحليل الحبي	نواعم/ رمل/ حصص	Gravel/Sand/Fines	0%/96.7%/3.3%
تجربة الانضغاطية (التشديد)	معامل المرونة الأودومتري	Eoed	39Mpa
تجربة القص البسيط	التماسك زاوية الاحتكاك	C ϕ	0 Kpa 36°



الشكل (2) النموذج المخبري

تجربة الطاولة الرجاجة	الكثافة الجافة الأصغرية	$\rho_{d_{min}}$	1.54 g/cm ³
	الكثافة الجافة الأعظمية	$\rho_{d_{max}}$	1.9 g/cm ³
	كثافة الاختبار	ρ	1.76 g/cm ³
	الكثافة النسبية	Dr	65%

1-2 نماذج التجريبية (Model Tests):

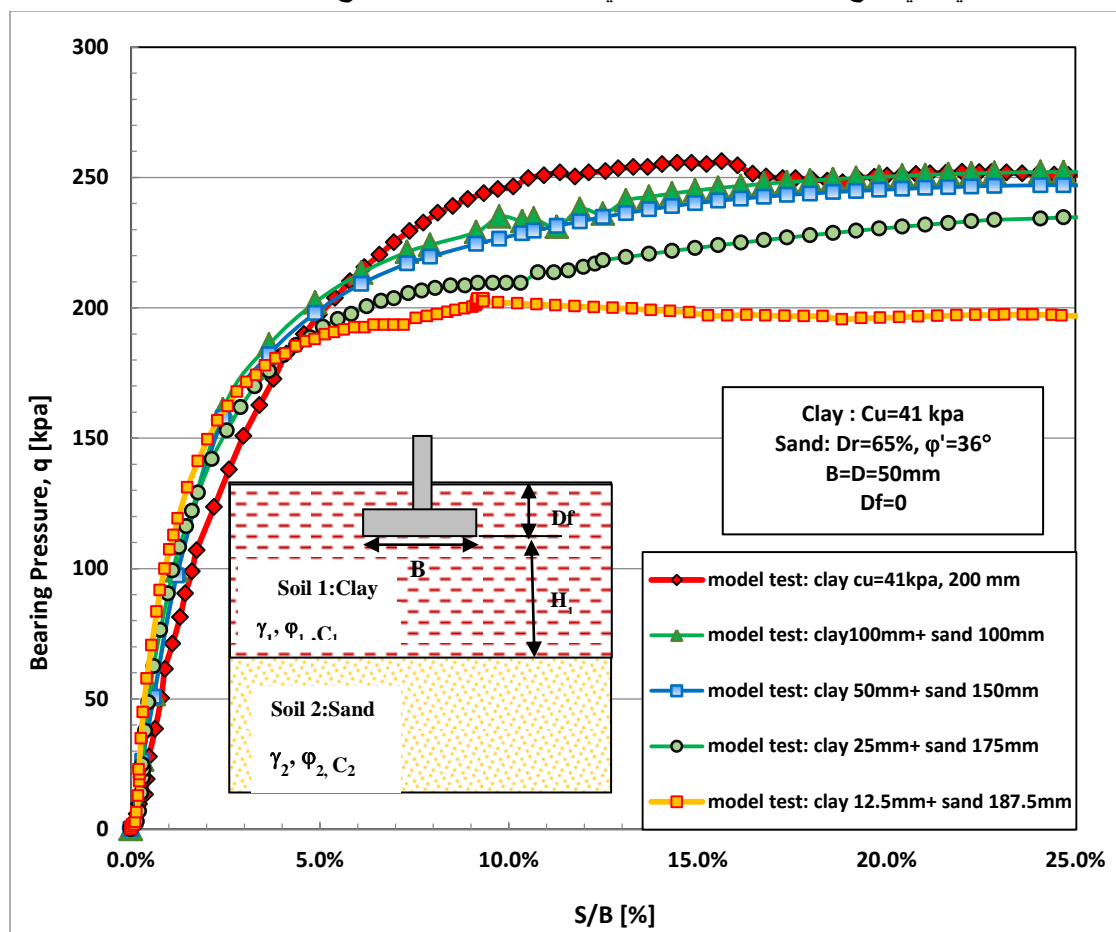
ال قالب المخبري عبارة عن أسطوانة معدنية أبعادها: $D=28\text{cm}$, $H=23\text{cm}$ وأساس معدني دائري أبعاده: $H=2.5\text{cm}$ ارتفاع، $D=5\text{cm}$ قطر) حيث يتم تطبيق تشوهات مستمرة بسرعة 1mm/min ويتم قياس الانتقالات والحمولة بشكل رقمي عبر حاسب موصول بالجهاز كما هو موضَّح بالشكل (2). و تم إجراء عدد من التجارب المخبرية (إجمالي 5 تجارب) موضحة في الجدول (3) في مخبر ميكانيك التربة - بكلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين.

الجدول (3) برنامج التجارب المخبرية

Test N	Material	Dimension	Soil properties	No. of layers
A ₀	Homogeneous clay	$H_{clay}=4B$	$G=2.72$, $\gamma=19.4 \text{ kN/m}^3$, $C_u=41 \text{ kN/m}^2$	1
A ₁	Top/down: Clay +Sand	$H_{clay}=0.25B$ $H_{sand}=3.75B$	Clay: $G=2.72$, $\gamma=19.4 \text{ kN/m}^3$, $C_u=41 \text{ kN/m}^2$ Sand: $Dr=65\%$, $\gamma_d=17.6 \text{ kN/m}^3$, $\phi=36^\circ$	2
A ₂	Top/down: Clay +Sand	$H_{clay}=0.5B$ $H_{sand}=3.5B$	Clay: $G=2.72$, $\gamma=19.4 \text{ kN/m}^3$, $C_u=41 \text{ kN/m}^2$ Sand: $Dr=65\%$, $\gamma_d=17.6 \text{ kN/m}^3$, $\phi=36^\circ$	2
A ₃	Top/down: Clay +Sand	$H_{clay}=B$ $H_{sand}=3B$	Clay: $G=2.72$, $\gamma=19.4 \text{ kN/m}^3$, $C_u=41 \text{ kN/m}^2$ Sand: $Dr=65\%$, $\gamma_d=17.6 \text{ kN/m}^3$, $\phi=36^\circ$	2
A ₄	Top/down: Clay+ Sand	$H_{clay}=2B$ $H_{sand}=2B$	Clay: $G=2.72$, $\gamma=19.4 \text{ kN/m}^3$, $C_u=41 \text{ kN/m}^2$ Sand: $Dr=65\%$, $\gamma_d=17.6 \text{ kN/m}^3$, $\phi=36^\circ$	2

2-5 نتائج التجارب على النماذج المخبرية:

يتم تمثيل النتائج من خلال رسم المنحني بين الحمل المطبق والهبوط النسبي (اللابعدي) (S/B) وذلك لإلغاء تأثير أبعاد النموذج على النتائج وأهمها قطر الأساس، ويبين الشكل (3) نتائج النموذج المخبري حيث يوضح الشكل أن أكبر قدرة تحمل يبديها الموديل A₀ حالة التربة الغضارية المتجانسة حيث (H_c=4B) ويلبها الموديلين A₃, A₄ حيث (H_c=2B) ويلبها الموديل A₂ حيث (H_c=0.5B) وأخفض قيمة يبديها الموديل A₁ حيث (H_c=0.25B) وتفسر بأن قيمة التماسك للغضار هي التي ترفع من قدرة تحمل التربة في الموديلين A₃, A₄ لتصبح قريبة من حالة الغضار المتجانس.



الشكل (3) نتائج التجارب على النموذج المخبري

التحليل العددي بطريقة الـ FEM (Numerical Analysis):

1 البرنامج المستخدم (FE- Program):

البرنامج المستخدم هو PLAXIS, V.8.6، وهو برنامج يستخدم طريقة العناصر المحددة من أجل التحليل الثنائي الأبعاد (2D) للمنشآت والمسائل الهندسية الجيوتكنيكية، تم استخدامه في هذه الدراسة لأنه يمكننا من استخدام عدد كبير من قوانين المادة الأساسية والمتطورة لنمذجة السلوك الاجهادي - التشوهي الخطي واللاخطي للتربة، إضافة لإمكانية دراسة الفعل المتبادل بين المنشأ والتربة من خلال عناصر تماس خاصة (Plaxis, 2005) [11].

2 معايرة النموذج العددي (FE-Model Calibration):

تمّ نمذجة الموديل المخبري بطريقة الـ FEM باستخدام برنامج PLAXIS, V.8.6 حيث قمنا باختيار أبعاد النموذج الخارجي بنفس أبعاد النموذج المخبري وتمّ اعتبار حالة تناظر محوري (حالة الأساس دائري) وتمّ نمذجة سلوك التربة من خلال قانون مور كولومب MC. ووضعت الشروط الطرفية مشابهة لظروف التجربة إذ تكون جوانب الموديل تسمح بالهبوط الشاقولي فقط، ويكون كذلك أسفل الموديل ممنوع من الحركة كما هو موضّح في الشكل (5). وقد تمّ نمذجة الأساس بصفته عنصراً صلباً مكافئاً لهبوط منتظم مفروض، أمّا الحمولات السطحية المستخدمة في النمذجة فتعبّر عن حمولات مكافئة للإجهاد الناتج عن التربة عند منسوب التأسيس.

تمّ تمثيل النتائج برسم المنحني البياني الذي يبيّن العلاقة بين الإجهاد المطبق والهبوط النسبي (الهبوط اللابعدى) (S/B) ومقارنته مع المنحني ذاته المستنتج من التجارب المخبرية والمبيّن في الشكل (4). وكذلك تمّ التحقق من نتائج التجارب بمقارنتها مع العلاقات النظرية، حيث أنّه حسب مايرهوف (Meyerhof, 1951) تحسب قدرة تحمل التربة الحديثة لحالة أساس دائري بقطر (B=5cm) يخضع لحمولة شاقولية مركزية منفذ فوق تربة غضارية بتماسك (Cu=41kpa) و (Df=0) [4].

$$q_{ult} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c$$

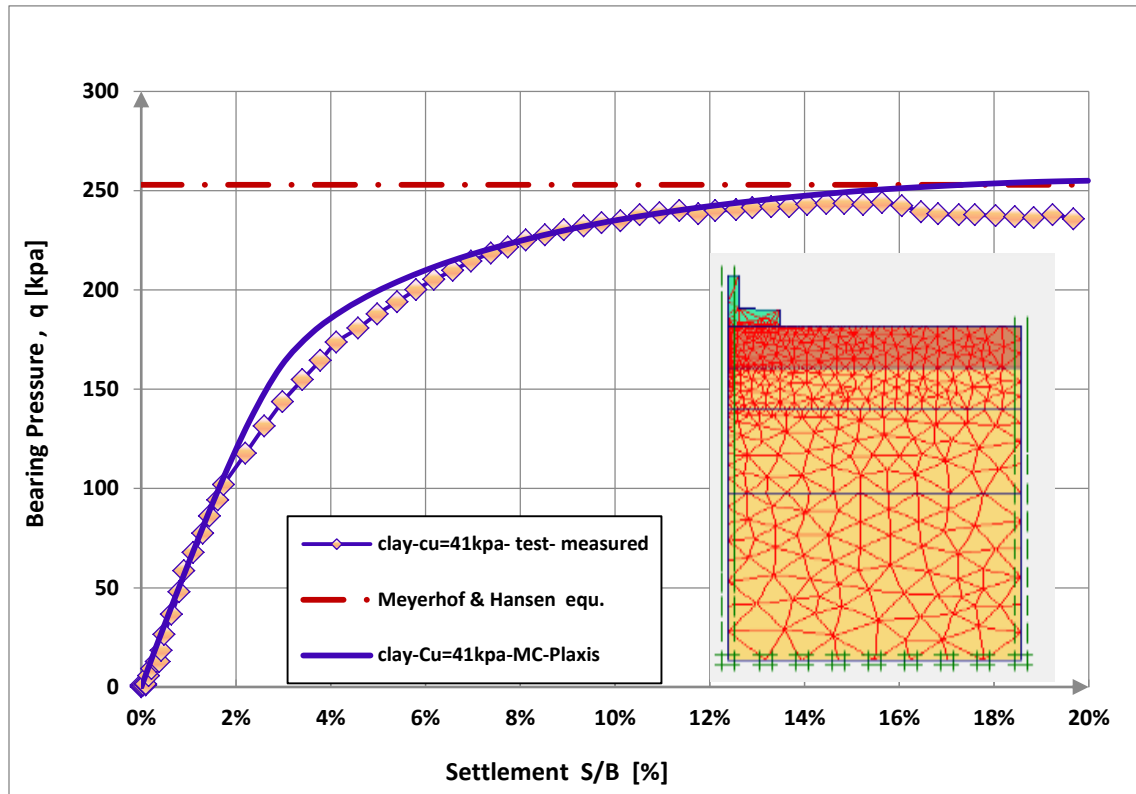
$$s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L} = 1.2, \quad d_c = i_c = 1, \quad N_c = 5.14 \Rightarrow q_{ult} = 41 \cdot 5.14 \cdot 1.2 = 253kpa$$

و كذلك حسب (Hansen, 1970) نحصل على قدرة تحمل التربة الحديثة كما يلي [3]:

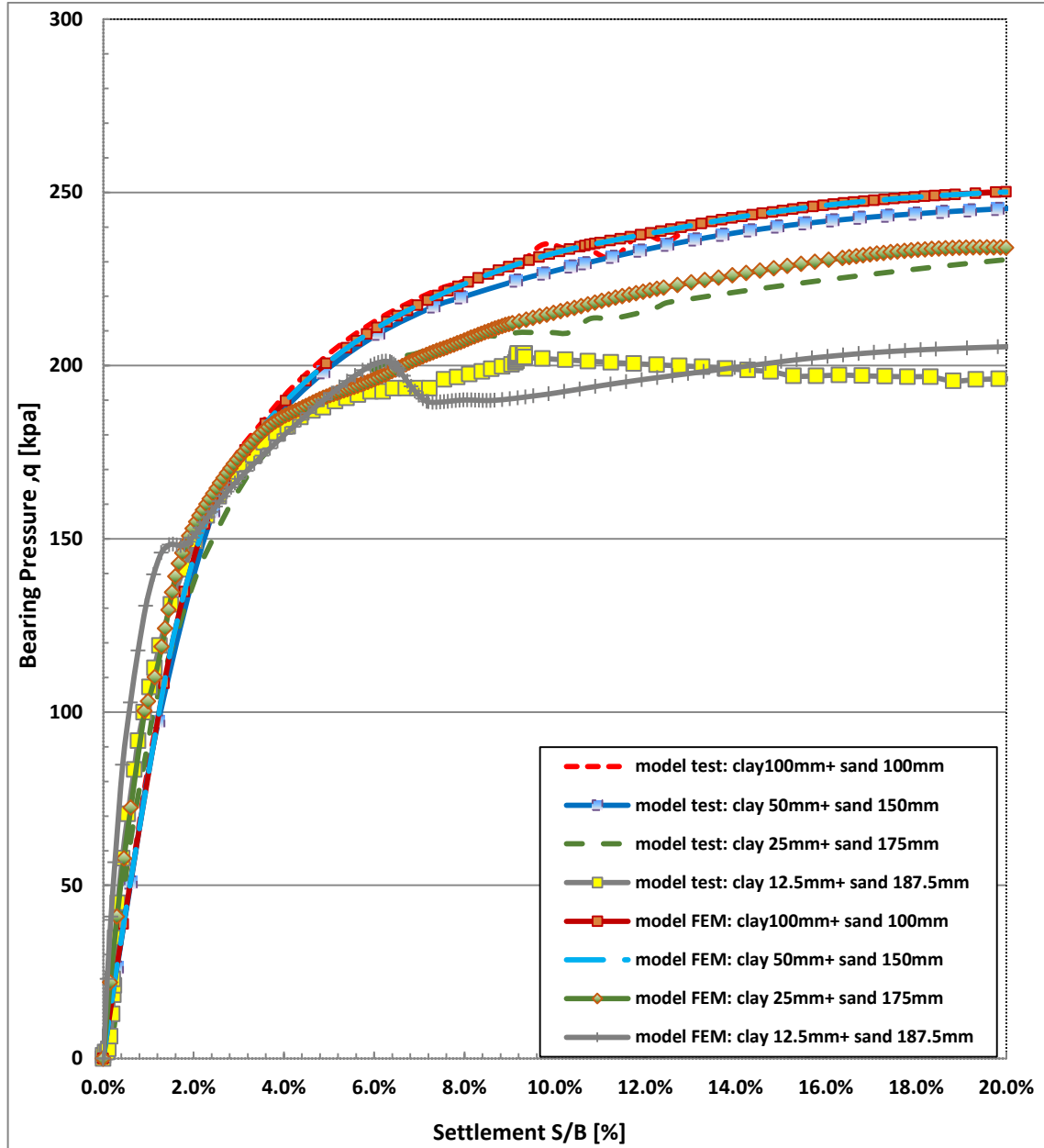
$$q_{ult} = 5.14 \cdot c_u \cdot (1 + s'_c + d'_c - i'_c - g'_c - b'_c) + \gamma_1 \cdot D_f \quad s'_c = 0.2 \frac{B}{L} = 0.2, \quad d'_c = 0, D_f = 0$$

$$q_{ult} = 5.14 \cdot 41 \cdot 1.2 = 253kpa$$

و هذه النتيجة متوافقة نسبياً مع نتائج التجارب المخبرية ونتائج التحليل العددي الشكل (4)، كذلك من خلال مقارنة نتائج الموديل المخبري لحالة تربة غضارية يليها رمل مع نتائج النموذج العددي نلاحظ توافقاً مقبولاً بين النتائج، كما هو موضّح في الشكل (5).



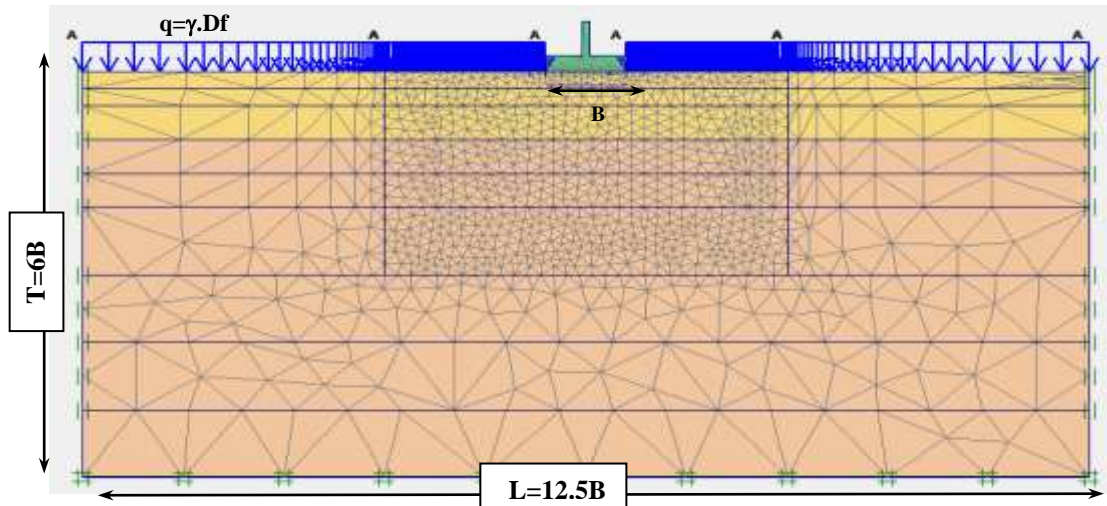
الشكل (4): مقارنة بين نتائج النموذج المخبري و الطرق التحليلية و نتائج التحليل العددي بطريقة FEM من أجل تربة غضارية متجانسة



الشكل (5): مقارنة بين نتائج النموذج المخبري ونتائج التحليل العددي بطريقة FEM من أجل تربة غضارية يليها رمل

3 النمذجة العددية و الدراسة البارامترية (FE-Modeling & Parametric study):

من أجل إجراء دراسة بارامترية تم إعداد نموذج رياضي لحالة أساس مستمر بعرض (B=2 m) متوضع على تربة مكونة من طبقتين وذلك باعتبار الحالة التشوهية - المستوية (Plane strain) واستخدمت شبكة العناصر المنتهية (FE-Mesh) الموضحة في الشكل (6) والمكونة من /1309/ عنصر مثلثي بـ 15 عقدة للعنصر الواحد. تم اختيار أبعاد النموذج (L=12.5B, T=6B) بحيث لا تؤثر الشروط الطرفية على دقة النتائج، وتم نمذجة السلوك الاجهادي - التشوهي للتربة باستخدام موديل مور - كولومب (جدول 4/). وقد تم نمذجة الأساس بصفته عنصراً صلباً مكافئاً لهبوط منتظم مفروض، أما الحمولة الموزعة بانتظام فتمثل ضغط التربة الطبيعي فوق منسوب التأسيس والذي يوافق عمق تأسيس قدره (Df=B).



الشكل (6): النموذج العددي (FE-Models)

الجدول (4) بارامترات قانون المادة المستخدم (MC-Model)

Clay41			
γ_{unsat}	19.4 KN/m ³	ϕ	0°
γ_{sat}	21 KN/m ³	ψ	0°
E_{ref}	2800 KN/m ²	ν_{nu}	0.34
C_{ref}	41 KN/m ²	R_{INTER}	0.8
Sand35%			
γ_{unsat}	16.4 KN/m ³	ϕ	32°
γ_{sat}	19.6 KN/m ³	ψ	2°
E_{ref}	21000 KN/m ²	ν_{nu}	0.32
C_{ref}	1 KN/m ²	R_{INTER}	0.8
Sand65%			
γ_{unsat}	17.6 KN/m ³	ϕ	36°
γ_{sat}	20 KN/m ³	ψ	6°
E_{ref}	39000 KN/m ²	ν_{nu}	0.29
C_{ref}	1 KN/m ²	R_{INTER}	0.8
Sand85%			
γ_{unsat}	18.4 KN/m ³	ϕ	38°
γ_{sat}	20.4 KN/m ³	ψ	8°
E_{ref}	51000 KN/m ²	ν_{nu}	0.27
C_{ref}	1 KN/m ²	R_{INTER}	0.8

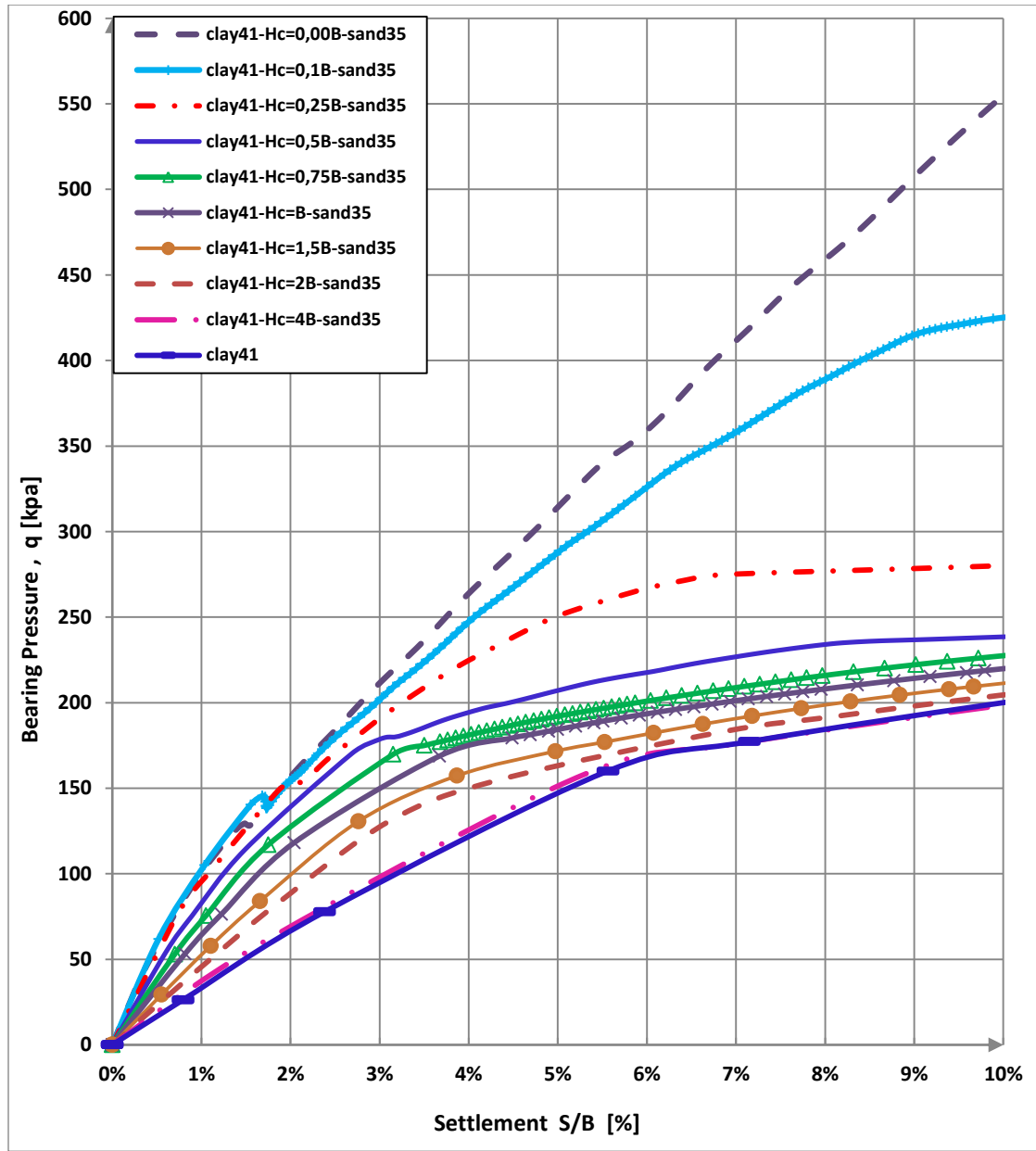
حيث تمّ دراسة الحالات التالية

- الحالة الأولى: الطبقة العلوية غضارية طرية والطبقة السفلية رملية: تمّ دراسة ثلاثة حالات
- 1: الطبقة العلوية غضارية طرية ($Cu=41Kpa$) والطبقة السفلية رملية ضعيفة التراص ($Dr=35\%$)
- 2: الطبقة العلوية غضارية طرية ($Cu=41Kpa$) والطبقة السفلية رملية مرتصّة ($Dr=65\%$)
- 3: الطبقة العلوية غضارية طرية ($Cu=41Kpa$) والطبقة السفلية رملية عالية التراص ($Dr=85\%$)

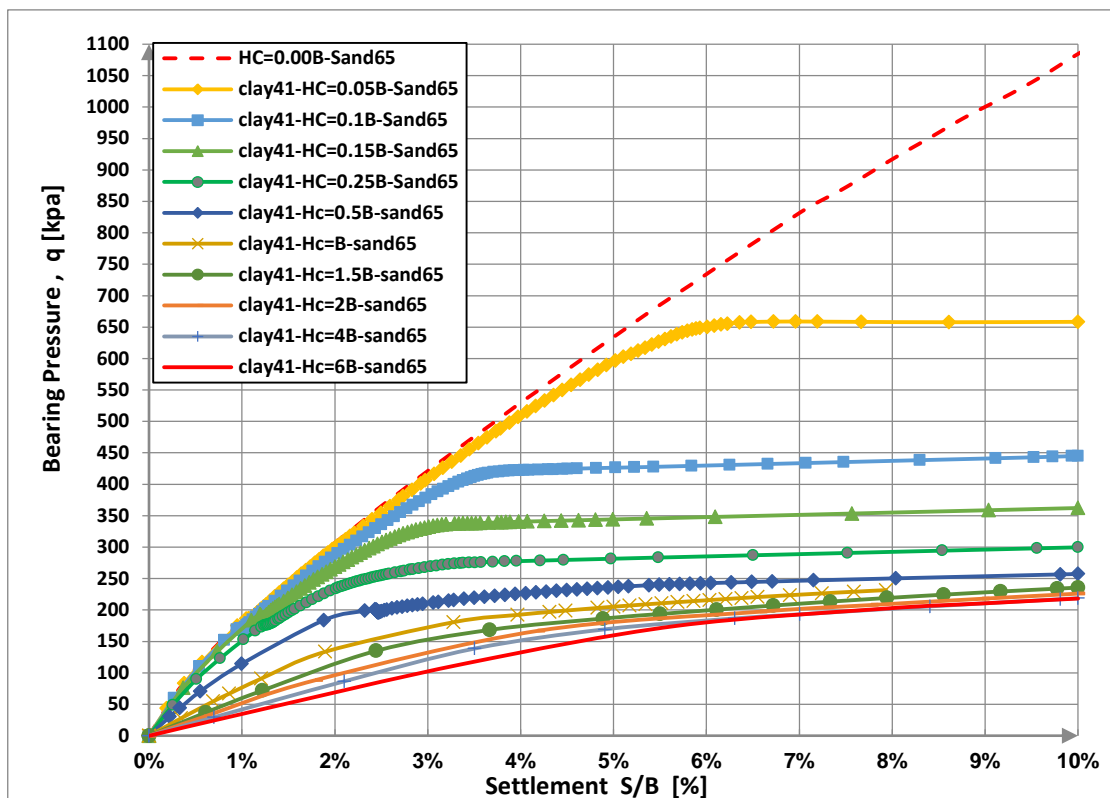
بدايةً تمّ تحليل النموذج العددي الأول الذي يمثل نموذج الأساس على الغضار الطري (Model-1)، ثم أجري تحليل عددي لنماذج تربة مكوّنة من طبقتين: الطبقة العليا غضارية طرية والسفلى رملية مع دراسة بارامترية من أجل سماكات مختلفة للطبقة العليا ($H_c/B=0,0.05,0.1,0.15,0.25,0.5,1,1.5,2,4,6$). ورسمت النتائج بشكل منحنيات تمثل العلاقة بين الإجهاد المطبق والهبوط النسبي (S/B) وذلك لإلغاء تأثير المقياس (Scale effect)، وتظهر النتائج في الأشكال (7)، (8)، (9) انخفاض قدرة تحمل التربة لحالة تربة مكوّنة من طبقتين (العليا غضارية طرية و السفلى رملية) مقارنةً بقدرة تحمل التربة المتجانسة (رملية) وذلك بزيادة سماكة الطبقة العليا الغضارية الطرية، وتمّ توضيح تأثير سماكة الطبقة العليا الضعيفة من خلال النسبة (H_{clay}/B) على انخفاض معامل قدرة تحمل التربة ($BCR=q_m/q_{sand}$) كما هو موضّح في الشكل (10)، الذي يبيّن أنّه من أجل حالة الطبقة العلوية غضارية ($Cu=41Kpa$) والطبقة السفلية رملية ضعيفة التراص ($Dr=35\%$) فإنّ وجود طبقة غضارية ضعيفة التّحمل تحت منسوب التأسيس بسماكة صغيرة قدرها ($0.1B$) يمكن أن يسبّب انخفاض في قدرة تحمل التربة بمقدار 50% ($BCR=0.5$) مقارنةً بحالة التأسيس مباشرةً على التربة الرملية، ومن أجل سماكة للطبقة الغضارية قدرها ($H_{clay} \geq B/2$) تتخفّض قدرة تحمل التربة بمقدار 60% ($BCR=0.43$) لتصل إلى قدرة تحمل تربة أصغريرة ($BCR_{min} \approx 0.37$) عند سماكة ($H_{clay} = 1.5B$).

ومن أجل حالة الطبقة العلوية غضارية ($Cu=41Kpa$) والطبقة السفلية رملية مرتصّة ($Dr=65\%$) فإنّ وجود طبقة غضارية ضعيفة التّحمل تحت منسوب التأسيس و لو بسماكة صغيرة قدرها 5% من عرض الأساس يسبب انخفاض في قدرة تحمل التربة بمقدار 40% ($BCR=0.6$) مقارنةً بحالة التأسيس مباشرةً على التربة الرملية القويّة نسبياً، كما يبيّن أنّه من أجل سماكة للطبقة الغضارية قدرها ($H_{clay} \geq B/2$) تتخفّض قدرة تحمل التربة بمقدار 4 أضعاف تقريباً ($BCR=0.24$) لتصل إلى قدرة تحمل تربة أصغريرة ($BCR_{min} \approx 0.2$) عند سماكة ($H_{clay} = 1.5B$) بعد هذه السماكة يكون هناك تأثير صغير مهمل للطبقة الرملية القويّة على قدرة تحمل التربة وعلى آلية الانهيار.

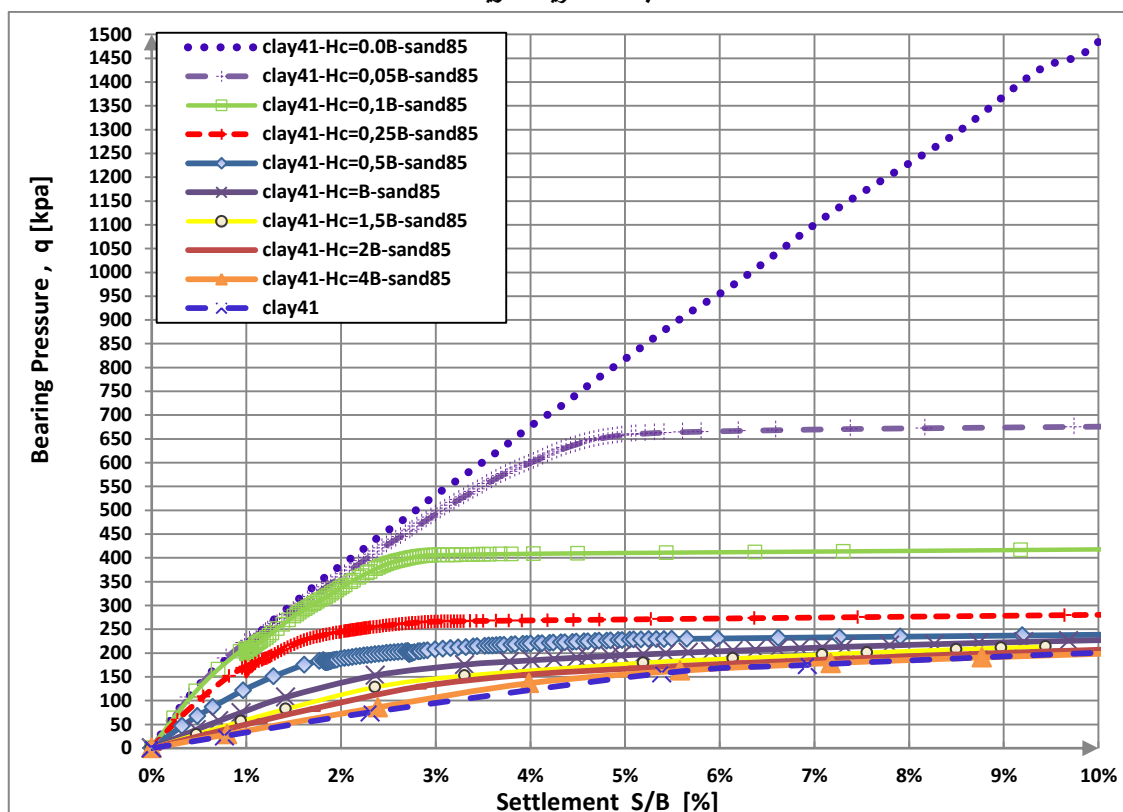
ومن أجل حالة الطبقة العلوية غضارية ($Cu=41Kpa$) والطبقة السفلية رملية عالية التراص ($Dr=85\%$) فإنّ وجود طبقة غضارية ضعيفة التّحمل تحت منسوب التأسيس بسماكة صغيرة قدرها ($0.05B$) يسبب انخفاض كبير في قدرة تحمل التربة بمقدار 54% ($BCR=0.46$) مقارنةً بحالة التأسيس مباشرةً على التربة الرملية القويّة كما أنّه من أجل سماكة للطبقة الغضارية قدرها ($0.1B$) تتخفّض قدرة تحمل التربة بمقدار 70% تقريباً مقارنةً بحالة التأسيس مباشرةً على التربة الرملية القويّة حيث ($BCR=0.28$) ومن أجل سماكة للطبقة الغضارية قدرها ($H_{clay} \geq B/2$) تتخفّض قدرة تحمل التربة بمقدار 86% لتصل إلى قدرة تحمل تربة أصغريرة ($BCR_{min} = 0.135$) عند سماكة ($H_{clay} = 1.5B$). ويمكن تفسير هذه النتيجة بحدوث انهيار للتربة ضمن الطبقة العليا الضعيفة بشكل مماس تقريباً للطبقة الرملية القويّة الشكل (11) وبعد السماكة ($H_{clay} = 1.5B$) فإنّ الانهيار يحدث بشكل كامل ضمن الطبقة العلوية ولا يعود هناك تأثير قيم للطبقة السفلية على قدرة التّحمل وعلى آلية الانهيار.



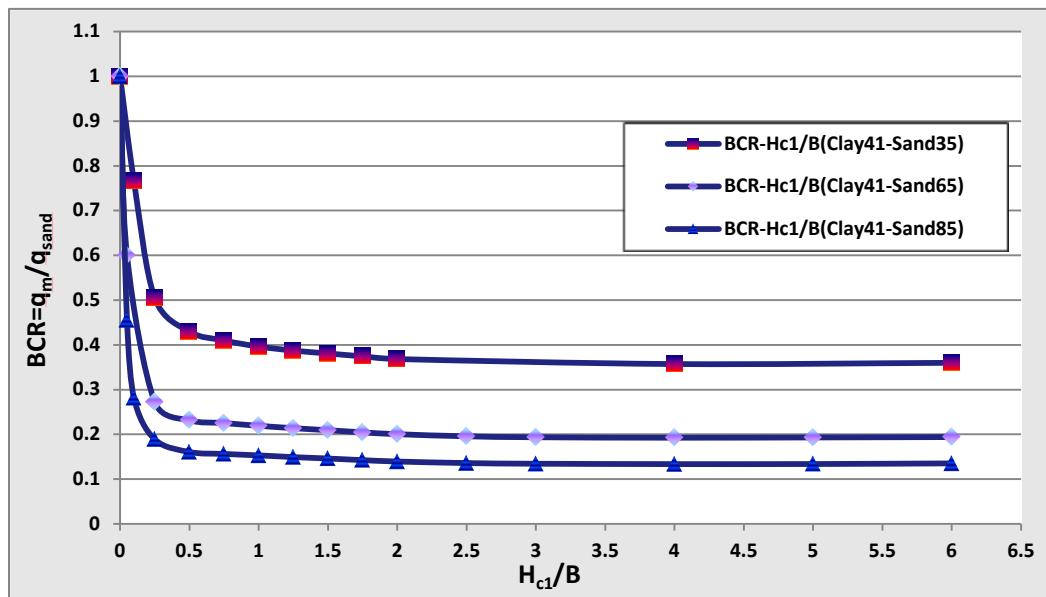
الشكل (7): منحنى الاجهاد- الهبوط لحالة تربة غضارية طرية ($c_u=41\text{Kpa}$) يليها رمل ضعيف الارتصاص ($Dr=35\%$)، من أجل سماكات مختلفة للطبقة الغضارية العلوية



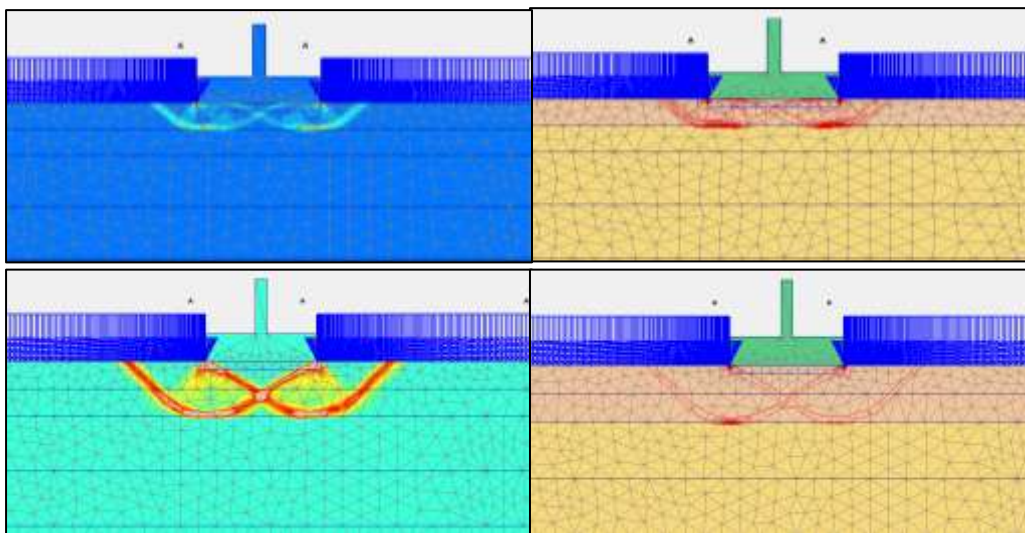
الشكل (8): منحنى الاجهاد- الهبوط لحالة تربة غضارية طرية ($c_u=41\text{Kpa}$) يليها رمل مرتص ($D_r=65\%$)، من أجل سماكات مختلفة للطبقة الغضارية العلوية



الشكل (9): منحنى الاجهاد- الهبوط لحالة تربة غضارية طرية ($C_u=41\text{Kpa}$) يليها رمل عالي الارتصاص ($D_r=85\%$)، من أجل سماكات مختلفة للطبقة الغضارية العلوية



الشكل (10): تأثير سماكة الطبقة الغضارية على انخفاض قدرة تحمل التربة المتعددة الطبقات (غضار يليه رمل)



الشكل (11): شكل موشور الانهيار ضمن الطبقة الغضارية العليا الطرية بشكل مماس للطبقة الرملية المرتصة: من أجل حالة $(H_{clay}=B)$ ومن أجل حالة $(H_{clay}=0.5B)$

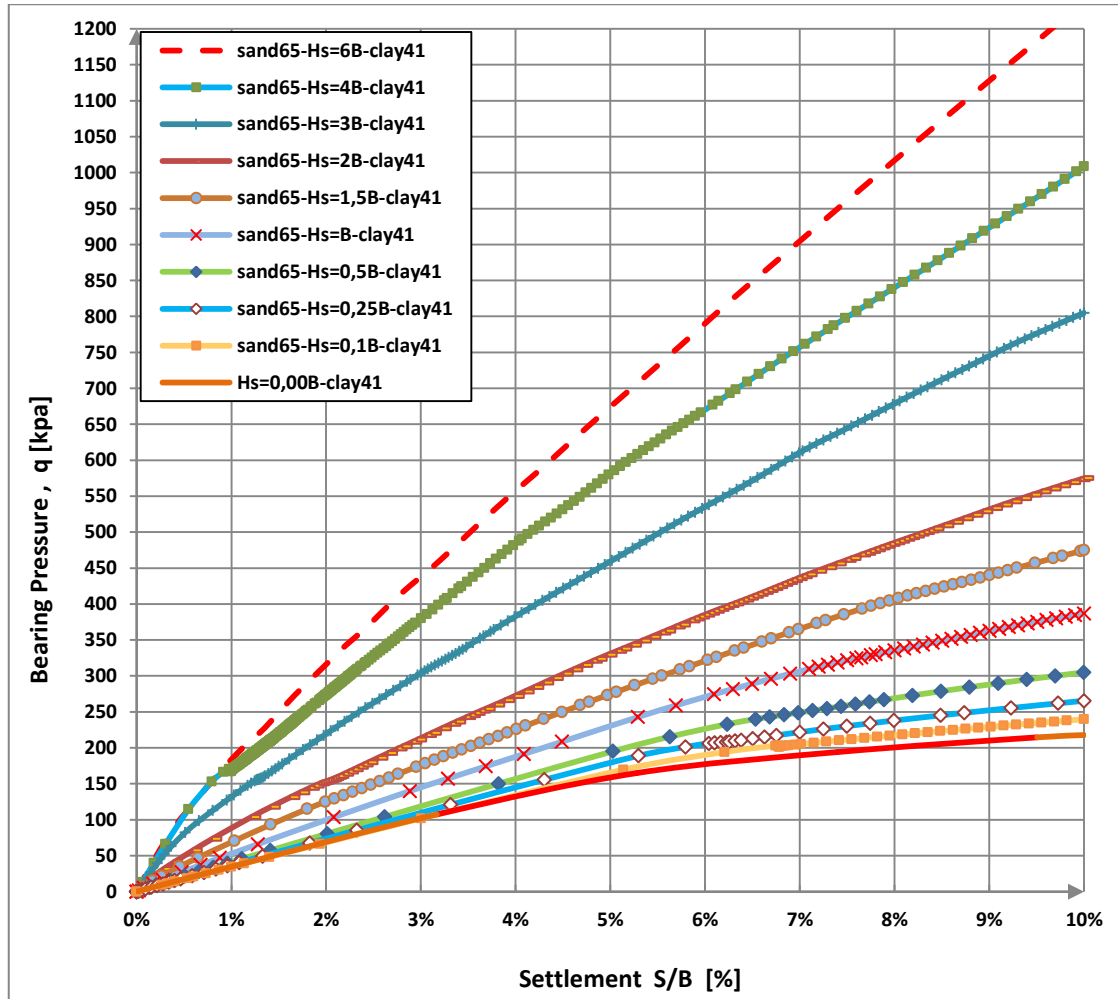
• الحالة الثانية: الطبقة العلوية رملية والطبقة السفلية غضارية طرية: تم دراسة حالتين

1: الطبقة العلوية رمل مرتص ($Dr=65\%$) والطبقة السفلية غضارية طرية ($Cu=41Kpa$)

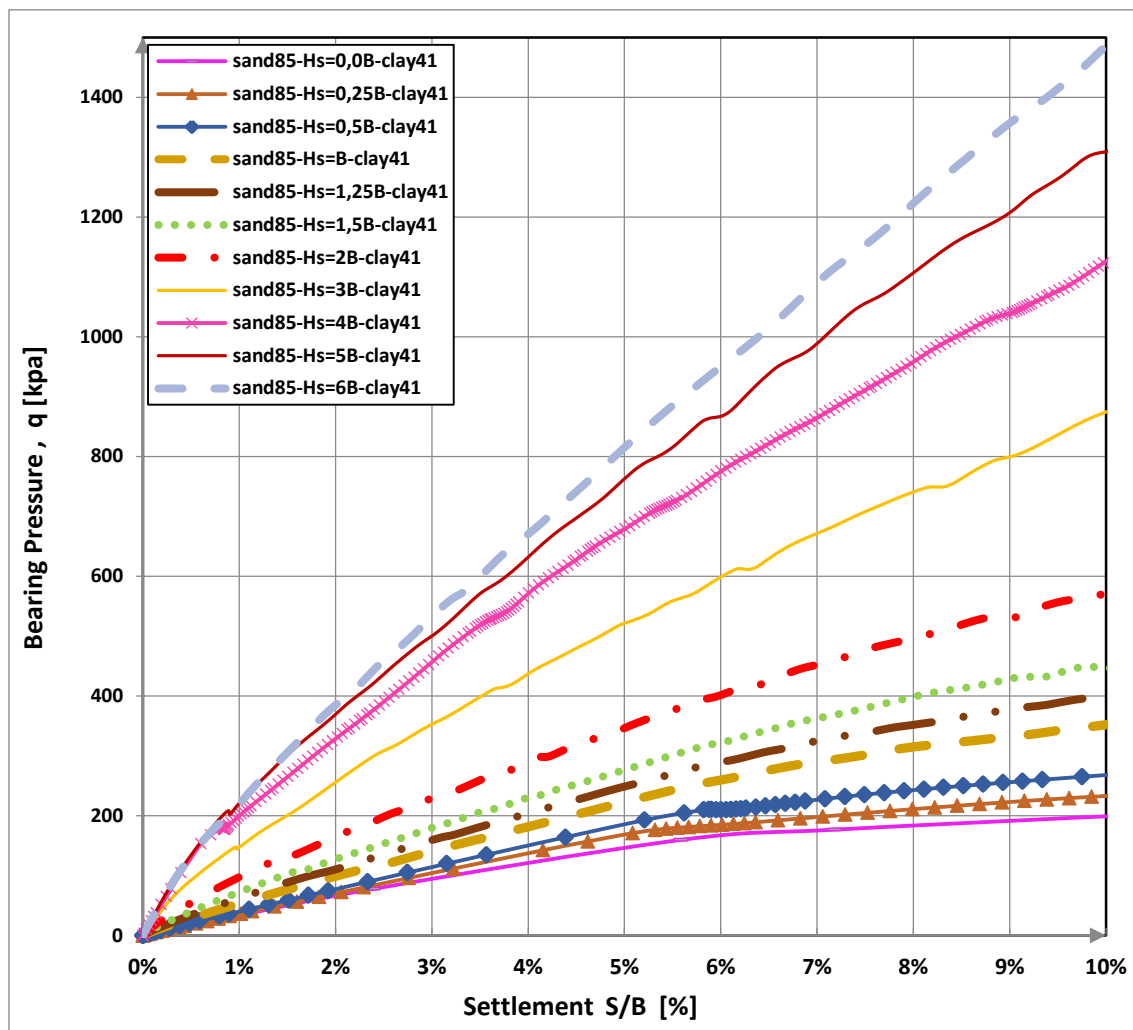
2: الطبقة العلوية رمل عالي التراص ($Dr=85\%$) والطبقة السفلية غضارية طرية ($Cu=41Kpa$)

بداية تم تحليل النموذج العددي الأول الذي يمثل نموذج الأساس على الغضار الطرية، ثم أجري تحليل عددي لنماذج تربة مكونة من طبقتين: الطبقة العليا رملية مرتصة والسفلى غضارية طرية مع دراسة بارامترية من أجل سماكات مختلفة للطبقة العليا الرملية ($H_{sand}/B=0,0.1,0.25,0.5,1,1.5,2,3,4,6$).

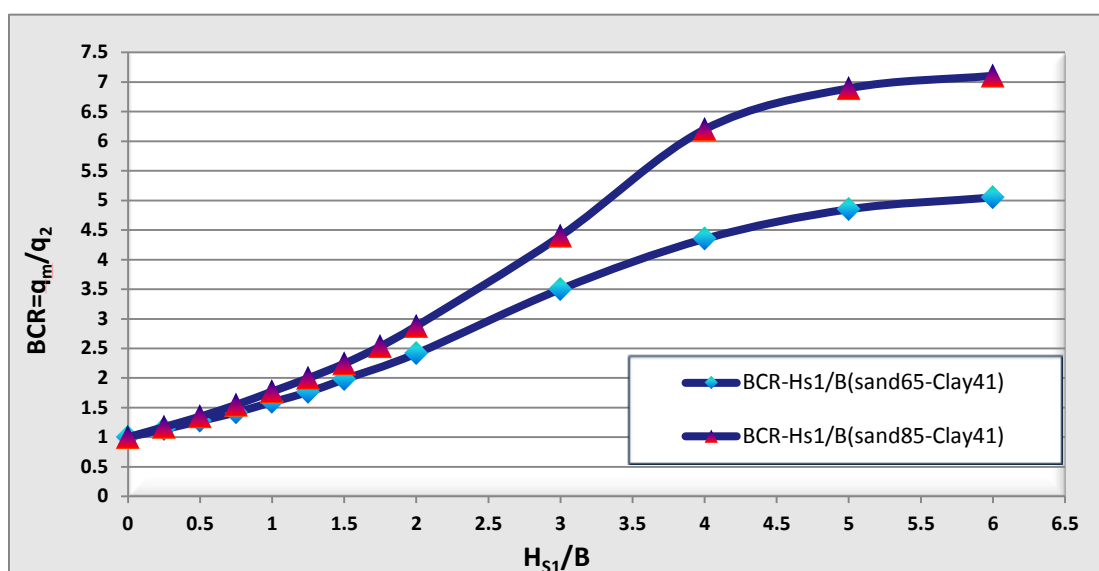
ورسمت النتائج بشكل منحنيات تمثّل العلاقة بين الإجهاد المطبق والهبوط النسبي (S/B) و ذلك لإلغاء تأثير المقياس (Scale effect). وتظهر النتائج في الأشكال (12) و(13) ازدياد قدرة تحمل التربة لحالة تربة مكوّنة من طبقتين (العليا رملية قويّة والسفلى غضارية طرية) مقارنةً بقدرة تحمل التربة المتجانسة (غضارية) ذلك بزيادة سماكة الطبقة العليا القويّة. وتمّ توضيح تأثير سماكة الطبقة العليا من خلال النسبة (H_{sand}/B) على ارتفاع معامل قدرة تحمل التربة ($BCR=q_m/q_{clay}$) كما هو موضّح في الشكل (14)، حيث أنّه من أجل حالة رمل ($Dr=65\%$) يليه غضار ($Cu=41Kpa$) يبيّن أنّ ازدياد سماكة الطبقة الرملية القويّة التحمّل يسبب ازدياد خطّي لقدرة تحمل التربة حتّى سماكة ($H_{sand}\cong 3B$) مقارنةً بحالة التأسيس مباشرةً على التربة الغضارية الطرية حيث يمكن تعليل النتيجة بحدوث انهيار بالقص الثاقب للتربة ضمن الطبقة العليا الرملية متبوعاً بانهيار موضعي ضمن الطبقة السفلية الطرية كما هو موضّح في الشكل (15) وعند سماكة ($H_{sand} = 5B$) تصل الزيادة في قدرة التحمّل حتّى ($BCR_{max}\cong 5$) ويفسر عدم ازدياد قدرة تحمل التربة بعد هذه السماكة بحدوث الانهيار بالقص العام للتربة ضمن الطبقة العليا القوية بشكل كامل، ومن أجل حالة رمل ($Dr=85\%$) يليه غضار ($Cu=41Kpa$) تبيّن أنّه بزيادة سماكة الطبقة العلوية الرملية تزداد قدرة تحمل التربة بشكل خطّي حتّى سماكة ($H_{sand}\cong 3.5B$) وتستمر هذه الزيادة حتّى تصل إلى ($BCR_{max}\cong 7.5$) عند سماكة ($H_{sand}=5B$) وبعد هذه السماكة لا يكون هناك تأثير للطبقة السفلية على قدرة التحمّل وآلية الانهيار.



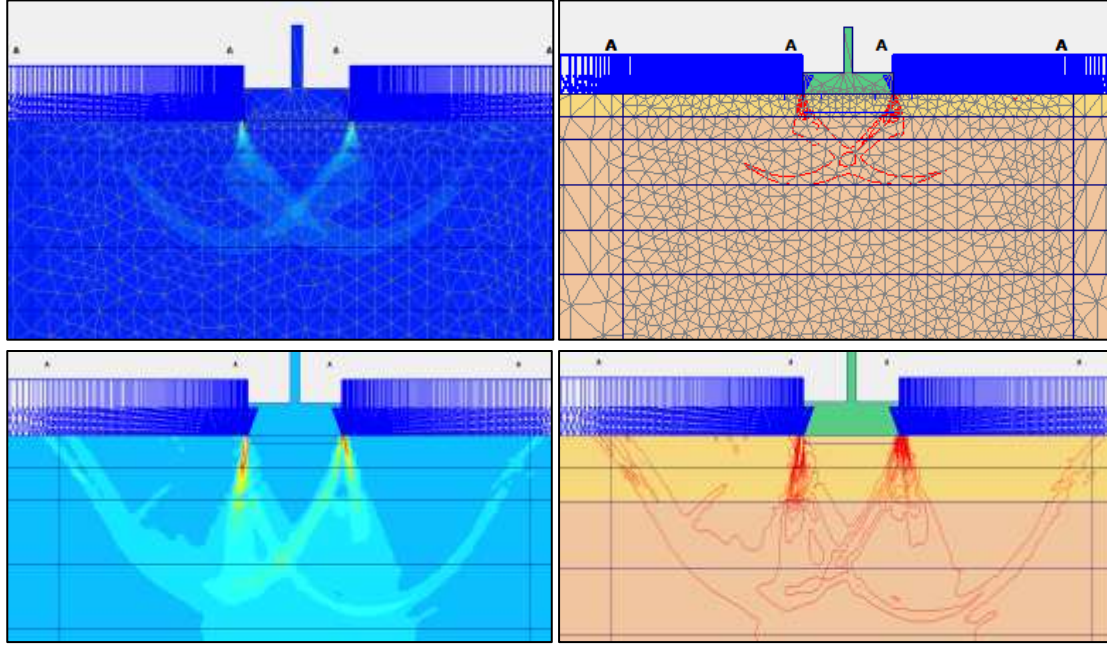
الشكل (12): منحنى الإجهاد-الهبوط لحالة تربة رملية مرتصة ($Dr=65\%$) يليها غضار طري ، بسماكات مختلفة للطبقة الرملية



الشكل (13): منحني الاجهاد-الهبوط لحالة تربة رملية عالية التراص ($Dr=85\%$) يليها غضار طري ، بسماكات مختلفة للطبقة الرملية



الشكل (14): تأثير سماكة الطبقة الرملية على ازدياد قدرة تحمل التربة المتعددة الطبقات (رمل يليه غضار)



الشكل (15): شكل سطوح الانهيار في التربة المتعددة الطبقات: طبقة رملية مرتصة يليها غضار طري

الاستنتاجات والتوصيات

من خلال نتائج الدراسة العددية ودراسة المتغيرات تمّ التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات يمكن تلخيص أهمها بما يلي:

1. أعطى التحليل العددي بطريقة الـ FEM - برنامج PLAXIS - لدراسة أساس سطحي مستمر على تربة متعددة الطبقات نتائج مقبولة مقارنة مع نتائج التجارب والقياسات المخبرية وكذلك مع العلاقات النظرية التقليدية، حيث أنّ النموذج العددي يعكس السلوك الاجهادي - التشوهي للتربة بدقة مقبولة.
2. في حالة تربة تأسيس متعددة الطبقات، مكوّنة من طبقة غضارية طرية يليها طبقة رملية، تنخفض قدرة تحمل التربة بزيادة سماكة الطبقة الغضارية الطرية لتتوقف عن الانخفاض من أجل سماكة للطبقة العلوية مقدارها ($H_c=1.5B$) بسبب حدوث الانهيار بشكل كامل ضمن الطبقة العلوية، ويمكن الاستفادة عملياً من هذه النتيجة في ضرورة المحافظة على التربة تحت منسوب التأسيس مباشرة أو تعميق منسوب التأسيس حتى الطبقة القوية أو استبدال الطبقة الضعيفة القليلة السماكة. كما أنه من الضروري التحقق من سماكة طبقة التأسيس الجيدة من خلال التحريات بأعماق مناسبة، إذ لا يكفي الوصول حتى الطبقة الجيدة و التأسيس عليها.
3. في حالة تربة تأسيس متعددة الطبقات، مكوّنة من طبقة رملية يليها طبقة غضارية طرية، تزداد قدرة تحمل التربة بزيادة سماكة الطبقة الرملية لتصل إلى قيمة أعظمية عند سماكة للطبقة العلوية مقدارها ($H_s=5B$) بعد هذه السماكة لا يكون هناك زيادة فعّالة في قدرة تحمل التربة المتعددة الطبقات. ويمكن الاستفادة عملياً من هذه النتيجة في تحسين قدرة تحمل التربة باستبدال الغضار الضعيف المقاومة أسفل الأساس بوسادة تأسيس رملية، وتصميم هذه الوسادة بشكل مناسب للحالة المدروسة.

التوصيات:

1. يوصى مستقبلاً بإجراء دراسات تجريبية على نماذج بأبعاد حقيقية، وتوسيع مجال الدراسة من حيث دراسة تأثير تغيير خواص تربة التأسيس وترتيب هذه الطبقات: مثل تربة غضارية عالية التماسك (قاسية) يليها تربة غضارية ضعيفة التماسك (طرية) وبالعكس.
2. يوصى مستقبلاً بإجراء المزيد من الدراسات المقارنة مع الأنواع الأخرى من الأساسات مثل الأساسات المنفردة: المربعة والمستطيلة والدائرية.
3. يمكن الاستفادة من نتائج هذا البحث والأبحاث المستقبلية في هذا المجال بهدف استخدامها في الدراسات والمشاريع الهندسية.

المراجع :

- [1].BOWLES, J. E. "*Foundation Analysis and Design*". 6th. ed., McGraw-Hill International Editions, (1998).
- [2].HANNA, A. M. & MEYERHOF, G. G. "*Design Charts for Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Sand Overlying Soft Clay*". Candian Geotechnical Journal, Vol. 17, n.2, (1980), pp.300-303.
- [3]. HANSEN, J. B. "*A revised and extended formula for bearing capacity*". Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, In: Bulletin No. 28, (1970), pp. 5-11.
- [4]. MEYERHOF, G. G. "*The ultimate bearing capacity of foundations.*"Geotechnique. 2 (4), (1951), pp. 301-332.
- [5].MEYERHOF, G. G.& HANNA, A. M. "*Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay*". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, (1978), pp. 223-229.
- [6].MEYERHOF, G. G. & HANNA, A. M. "*Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soils Under Inclined Load*". Candian Geotechnical Journal. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 116, n. 12, (1978), pp. 1902-1906.
- [7].KENNY, M. J. & ADRAWES, K. Z. "*The Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Soft Clay*". Geotechnique, Vol. 47, n. 2, (1997), pp. 339-345.
- [8].CARLOS A. Farah. "*Ultimate bearing capacity of shallow foundation on layered soil*". Concordia University, Montreal, Quebec, CANADA, (2004).
- [9].MISRI, G. & LAMAN, MA . "*Modern Approach to Estimate Bearing Capacity of layered soils*". Periodica polytechnic civil engineering, 61(3), (2017), pp. 434-446.
- [10].MOSADEGH & NIKRAZ. " *Bearing Capacity Evaluation of Footing on a Layered-Soil using ABAQUS*". Journal of the Earth Science & Climatic Change, 6: 264, (2015).
- [11].PLAXIS. *Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses-User's Manual, Version 8.2-8.6*, Delft, The Netherlands, (2005).
- [12].UAC. *Unified Arabic Code for soil mechanics and Foundations*. (2002),Part 2- 6.
- [13].VERMA, S. K., JAIN, P. K., KUMAR, R. "*Prediction of Bearing Capacity of Granular Layered Soils by Plate Load Test*". International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. II (III), (2013), pp. 142-149.
- [14].ZIAIE, R. M., RASHIDIAN, V., IZADI, E. *Evaluation on Bearing Capacity of Ring Foundations on two-Layered Soil*. World Academy of Science, Engineering and Technology. 6, (2012), pp. 1108-1112.