

دراسة تجريبية لمعامل رد فعل التربة باستخدام تجربة الأدومتر

م. زينب أسعد*

د. م محمد النصار**

الملخص

يُحدّد معامل رد فعل التربة بعدة طرائق تجريبية حقلية ومخبرية وقد تم في هذا البحث اعتماد تجربة الانضغاط (الأدومتر) لتحديد قيمة معامل رد فعل التربة ودراسة تحولاته والعوامل المؤثرة فيه ضمن حلقة الأدومتر. حيث دُرست ثلاثة أنواع من التربة الغضارية المنضغطة طبيعياً والمختلفة في قابلية الانضغاط. وقد أظهرت تجارب الانضغاط المنفذة أن منحنى العلاقة بين معامل رد فعل التربة ومعامل المسامية (كذلك منحنى العلاقة بين هذا المعامل والضغط المطبق وعلاقته مع الهبوط) يتناقص في البداية إلى قيمة معينة، ثم يتزايد؛ ويعود ذلك إلى أنه في بداية تجربة الانضغاط يكون الهبوط الناتج صغيراً أو مهملًا ما دام الضغط المطبق أقل أو قريب من تماسك العينة (الناجم عن الضغط الطبيعي الذي تعرضت له العينة في الموقع) وعندما يتجاوز الضغط المطبق متانة الترابط يبدأ الهبوط بالتزايد، ومن ثم تبدأ قيمة k_s بالتزايد مرة أخرى ويستمر هذا التزايد مع تزايد الضغط. أظهرت المنحنيات التي درست تغيير معامل رد فعل التربة أن قيمة هذا المعامل في تجربة الأدومتر متغيرة وغير ثابتة. كما تبين أنه بزيادة لدونة التربة تتناقص قيمة معامل رد فعل التربة. لدى دراسة انضغاطية التربة الغضارية مع الزمن لعينة واحدة من كل موقع من المواقع المعتمدة في الدراسة عند خطوة تحميل محددة، ظهر أن قيمة معامل رد فعل التربة عند تطبيق حمل جديد تتغير تغيراً كبيراً مع الزمن خاصة في بداية التحميل، وتستقر هذه القيمة عند استقرار الهبوط وتلاشي الضغط المسامي.

الكلمات المفتاحية: معامل رد فعل التربة، الأدومتر، انضغاط، منضغطة طبيعياً، عينات سليمة.

* قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

** قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

1. مقدمة

تقوم الأساسات بوظيفة نقل الأحمال من المنشأة إلى تربة التأسيس ضمن شروط الأمان والكلفة، وبحيث لا تتشأ هبوطات غير مسموح بها، ويجب أن يكون الأساس قادراً على تحمل الإجهادات والتشوهات الحاصلة بشكل اقتصادي وأمين، وتقسّم طرائق تصميم الأساسات إلى طريقتين:

- **الطريقة التقليدية (الصلدة):** تفترض أن للأساس صلادة مطلقة بحيث يهبط الأساس بكامله بشكل متساوٍ وبحيث لا يؤثر هبوطه في توزيع ضغط رد فعل التربة. وبشكل عام تعطي الطريقة الصلدة نتائج تقع في جانب الأمان فضلاً عن أنها بسيطة؛ لذلك فقد انتشر استخدامها في الحياة العملية، إلا أن هنالك بعض الحالات التي يؤدي فيها استخدام الطريقة الصلدة إلى الحصول على قيم أصغر للقوى الداخلية مقارنةً بالقيم الفعلية، ومن ثمّ احتمال الإساءة إلى أمان المنشأة، لذلك فإن معرفة توزيع ضغط التماس الفعلي بين الأساسات وتربة التأسيس هي من المتطلبات الرئيسية للتصميم.

- **الطريقة المرنة:** إن طبيعة استناد المنشأة إلى التربة هي مسألة غير مقررة سكونياً، وتصل درجات عدم التقرير إلى اللانهاية ومن الصعب جداً معرفة التوزيع الحقيقي للإجهادات تحت سطح الاستناد، ولا بدّ من اللجوء إلى الملاحظات والقياسات التجريبية لتحديد المنحى الرياضي العام لشكل هذا التوزيع، ومن المفيد معرفته أن منحى توزيع الإجهادات مرتبط بعوامل عدة منها مرونة وشكل قاعدة الاستناد ومرونة التربة فضلاً عن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لوسط التربة بطبقاتها المختلفة.

لذلك تم اللجوء إلى نمذجة السلوك المرن للتربة إذ تحلّ المسألة إنشائياً، وهناك مجموعة من النظريات التي تختلف في فرضياتها الأساسية وخاصة في التعامل مع

التشوهات الجانبية وفي الإجهادات المماسية المتعامدة مع الإجهادات الناظرية على سطح القص أو الانهيار، ولعل أهم النظريات:

- نظرية التشوهات المرنة الموضعية.

- نظرية التشوهات المرنة المستوية (الكلية).

تتطلب هذه النظريات من فرضية Westergaard التي تقبل بتمثيل التربة تحت سطح التحميل بمجموعة من النوابض المرنة المستقلة عن بعضها بعضاً وتفرض وجود ترابط خطي بين التشوهات والإجهادات المتولدة في التربة التي يمكن التعبير عنها بالعلاقة:

$$P_{(x,z)} = k_s \cdot S_{(x,z)}$$

إذ إن:

$P_{(x,z)}$: إجهادات التماس.

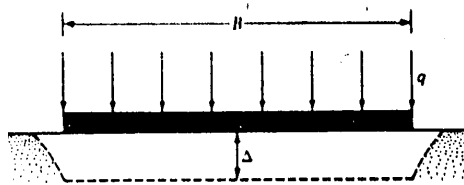
K_s : ثابت العلاقة بين القوى والتشوهات ويعرف بمعامل رد فعل التربة.

$S_{(x,z)}$: التشوهات الحاصلة تحت سطح الاستناد باتجاه Y.

ويعرف معامل رد فعل التربة وفقاً لما يأتي:

إذا تعرض أساس إلى حمولة بوحدة المساحة مساوية لـ (p) فإنه سوف يعاني هبوطاً مقداره (S)، ومن ثمّ يعرف معامل رد فعل التربة بالعلاقة^[2]:

$$K_s = \frac{p}{S}$$



K_s - "Modulus Of Subgrade Reaction"

الشكل (1) معامل رد فعل التربة

هناك عدة بحوث نذكر منها Biot (1937), Terzaghi (1955), Vesic (1961), US Navy (1982) دراست كيفية إيجاد هذا المعامل وبينت أن تعيين هذا المعامل ليس بالأمر اليسير لأنه يتعلق بعدة عوامل مثل:

- المواصفات الفيزيائية والميكانيكية للتربة.

- نوع الأساس وحجمه وشكله وأبعاده.

- منسوب التأسيس.

- الإجهادات المطبقة.

1-1-1 - طرائق قياس معامل رد فعل التربة^[4].

1-1-1 - طرائق تجريبية مخبرية وحقلية:

- تجربة الانضغاطية (الأدومتر).

- تجربة ثلاثي المحاور.

- تجربة تحميل كاليفورنيا CBR

- تجارب صفائح التحميل (حقلية).

1-1-2 - طرائق تحليلية لحساب معامل رد فعل التربة:

- دستور ترزاكي:

أظهرت دراسة قدمت من قبل ترزاكي أن قيمة

معامل رد فعل التربة تتناقص مع عرض الأساس، وإذا

قمنا بإجراء تجربة حقلية باستخدام صفائح مربعة فإن قيم

k لأساس أبعاده (B×B) يمكن أن يحسب بالعلاقة الآتية:

$$K_S \text{ (kN/m}^3\text{)} = K_{0.3} \left(\frac{B+0.3}{2B} \right)^2 \quad \text{تربة رملية}$$

$$K_S \text{ (kN/m}^3\text{)} = K_{0.3} \left(\frac{0.3}{B} \right) \quad \text{تربة غضارية}$$

$K_{0.3}$: معامل رد فعل التربة للصفحة التي أبعادها

$$(0.3\text{m} \times 0.3\text{m}).$$

K_S : معامل رد فعل التربة للأساسات التي أبعادها

$$(B \times B).$$

- طريقة بولسن:

اقترح بولسن حساب معامل رد فعل التربة بطريقة

تقريبية من قدرة تحمل التربة الأمينة وفق العلاقة الآتية:

$$K_S \text{ (kN/m}^3\text{)} = 40 q_a$$

$$q_a = q_{ult} / F_s \quad \text{إذ:}$$

F_s : معامل الأمان لهبوط قدره 2.5 سنتيمتراً، أمّا لو كان

الهبوط 0.6 أو 1.25 أو 1.9 سم فإن الرقم 40 يصبح

160، 120، 80 على التوالي.

qult: قدرة تحمل التربة الحدية.

- دستور kögler et Scheidig:

$$K_s = \frac{E_{od}}{Z}$$

E_{od} : معامل التشوه الخطي الأودومتري.

Z: سماكة الطبقة القابلة للانضغاط.

1-1-3 - طرائق جدولية^[1]:

يتم إيجاد قيمة معامل رد فعل التربة بالاعتماد على

الجدول.

2- الدراسة التجريبية

هدفت الدراسة التجريبية إلى تعيين قيمة معامل رد فعل

التربة باستخدام تجربة الانضغاط، وقد اختيرت ثلاثة

مواقع للتربة الغضارية على النحو الآتي:

- الموقع الأول في مدينة نوى: تربة غضارية

ضعيفة اللدونة.

- الموقع الثاني في مدينة مزيريب: تربة غضارية

متوسطة اللدونة.

- الموقع الثالث في قرية الشجرة: تربة غضارية

عالية اللدونة.

2-1-1 - مراحل الدراسة التجريبية:

أُجريت الدراسة التجريبية وفق المراحل الآتية:

2-1-1-1 - تنفيذ سبر جيوتكنيكي واحد بعمق 10 أمتار

في كل موقع من المواقع المذكورة.

2-1-1-2 - استخراج عينات سليمة بمعدل عينة 2m،

ومن ثمّ دُرِسَتْ 5 عينات في كل موقع وسُمِّيتْ

العينات وفق الجدول الآتي:

رقم العينة	a	b	c	d	e
العمق (m)	2	4	6	8	10

2-1-3 - إجراء تجارب الخواص الفيزيائية الأساسية

والمصنفة (الوزن الحجمي - والوزن النوعي -

والرطوبة - وحدود أتربرغ).

4-1-2- إجراء تجارب القص المباشر (سريع - عينات مشبعة).

5-1-2- إجراء تجارب الإنضغاطية.

6-1-2- دراسة العلاقات بين المتحولات الآتية:

- معامل المسامية والضغط المطبق مع رسم

$$e = f(p) \text{ المنحنى}$$

- معامل المسامية ولوغاريتم الضغط مع رسم

$$e = f(\log p) \text{ المنحنى}$$

- معامل رد فعل التربة والضغط المطبق مع رسم

$$k_s = f(p) \text{ المنحنى}$$

- معامل رد فعل التربة ومعامل المسامية مع رسم

$$k_s = f(e) \text{ المنحنى}$$

- معامل رد فعل التربة والهبوط مع رسم المنحنى

$$k_s = f(s)$$

- الضغط المطبق p والهبوط S مع رسم المنحنى

$$S = f(P)$$

إذ إنَّ

e: معامل المسامية.

P: الضغط المطبق.

S: الهبوط.

Ks: معامل رد فعل التربة.

7-1-2- تحليل نتائج العينات ودراستها في كل موقع

من المواقع الثلاثة، ومن ثم دراسة نتائج كل موقع

على حدة.

8-1-2- دراسة تغيّر معامل رد فعل التربة مع الزمن

لعينة واحدة من كل موقع، وهي العينة a على عمق

2 m، وكذلك دراسة العلاقات بين المتحولات الآتية:

- معامل رد فعل التربة والزمن مع رسم منحنى

$$k_s = f(t) \text{ العلاقة}$$

- معامل رد فعل التربة والهبوط مع رسم منحنى

$$kS = f(s) \text{ العلاقة}$$

- الهبوط والزمن مع رسم منحنى العلاقة s = f(t)

- تحليل النتائج.

2-2- نتائج الدراسة التجريبية:

أُجريت الدراسة التجريبية في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق، وكانت الترب المدروسة مختلفة القابلية للانضغاط وحُدّد ذلك من خلال حساب النسبة $y = \frac{C_c}{1 + e_0}$ والاعتماد على التصنيف

الآتي [13]:

التربة غير قابلة للانضغاط. $y \leq 0.015$

التربة قليلة الانضغاط. $0.015 < y \leq 0.05$

التربة متوسطة الانضغاط $0.05 < y \leq 0.2$

التربة عالية الانضغاط. $y > 0.2$

1-2-2- نتائج تجارب الخواص الفيزيائية:

يلخص الجداول (1)، (2)، (3) الخواص الفيزيائية

للعينات المدروسة في المواقع الثلاثة:

- التربة ضعيفة اللدونة:

الجدول (1)

No	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_0	w	P_0 (t/m ²)
a	20.67	27	16.95	0.593	0.220	3.8
b	20.78	27	17.12	0.577	0.214	7.8
c	20.86	27	17.24	0.566	0.21	11.7
d	20.88	27	17.29	0.562	0.208	15.6
e	20.92	27	17.34	0.557	0.206	19.6

إذ إنَّ:

γ الوزن الحجمي.

γ_s الوزن النوعي.

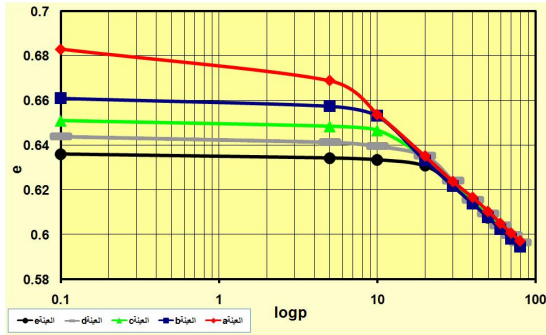
γ_d الوزن الحجمي الجاف.

e_0 معامل المسامية الابتدائي.

W الرطوبة.

P_0 الضغط الطبيعي.

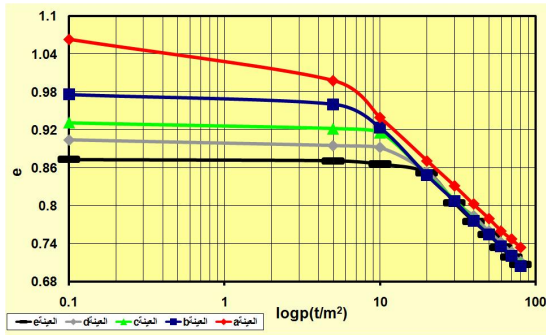
- التربة متوسطة اللدونة:



الشكل (3)

تبيّن نتيجة الحساب أن قرينة الانضغاط الوسطية للعينات في الموقع ($c_c=0.11$) وصنّفت قابلية التربة للانضغاط بأنها تربة متوسطة الانضغاط ($y = 0.07$)

- التربة عالية اللدونة:



الشكل (4)

تبيّن في الحساب أن قرينة الانضغاط الوسطية للعينات في الموقع ($c_c=0.48$) وصنّفت قابلية التربة للانضغاط بأنها تربة عالية الانضغاط ($y = 0.25$).

3- دراسة العلاقة بين معامل رد فعل التربة ومعامل المسامية

توضّح الأشكال (4)، (5)، (6) منحنيات العلاقة بين معامل رد فعل التربة ومعامل المسامية للعينات الخمس المدروسة في المواقع الثلاثة.

- التربة متوسطة اللدونة:

الجدول (2)

No	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_0	ω	P_0 (t/m ²)
a	20.16	27.1	16.1	0.683	0.252	3.5
b	20.24	27	16.26	0.661	0.245	7.5
c	20.24	26.9	16.3	0.651	0.242	11.12
d	20.27	26.9	16.36	0.644	0.239	14.8
e	20.4	27	16.5	0.636	0.236	18.48

- التربة عالية اللدونة:

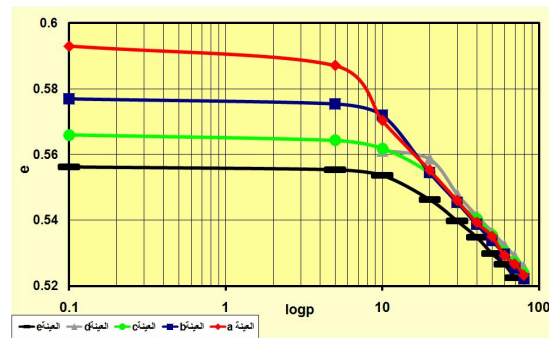
الجدول (3)

No	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_0	ω	P_0 (t/m ²)
a	18.28	27.1	13.13	1.063	0.392	2.94
b	18.71	27.2	13.76	0.976	0.359	5.96
c	18.8	27	13.98	0.931	0.345	9.06
d	18.93	27	14.18	0.904	0.335	12.2
e	19.13	27.1	14.47	0.873	0.322	15.36

2-2-2- نتائج تجارب الانضغاط:

يوضّح الأشكال (1)، (2)، (3) منحنيات الانضغاط للعينات المدروسة في كل موقع من المواقع الثلاثة مرسومة بإحداثيات نصف لوغاريتمية.

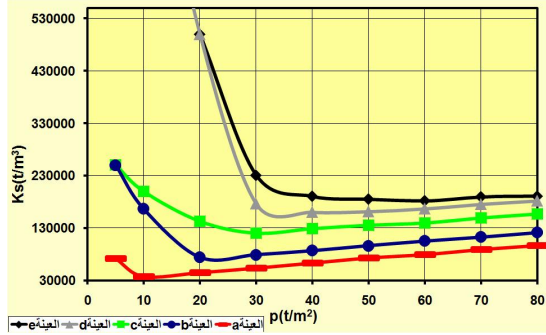
- التربة ضعيفة اللدونة:



الشكل (2)

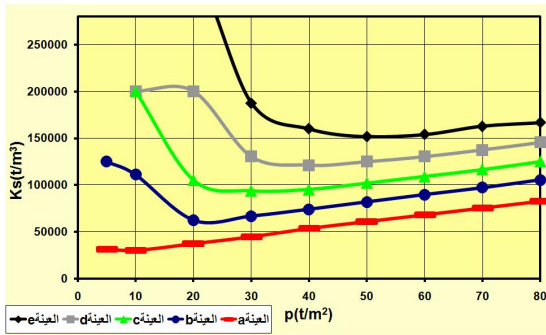
تبيّن نتيجة الحساب أن قرينة الانضغاط الوسطية للعينات في الموقع ($c_c=0.054$) وصنّفت قابلية التربة للانضغاط وفق النسبة المذكورة أعلاه ($y = 0.037$) بأنها تربة قليلة الانضغاط.

تبيّن الأشكال (7)، (8)، (9) منحنيات العلاقة بين معامل رد فعل التربة والضغط المطبق للعينات الخمس المدروسة في كلٍّ من المواقع الثلاثة:
- التربة ضعيفة اللدونة:



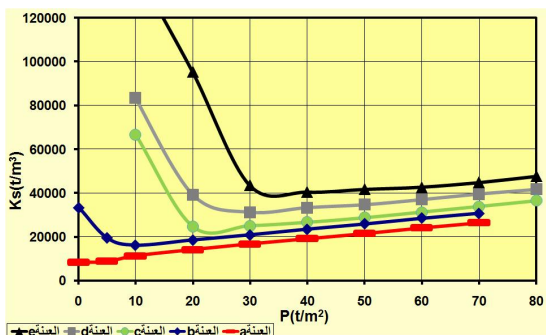
الشكل (8)

- التربة متوسطة اللدونة:



الشكل (9)

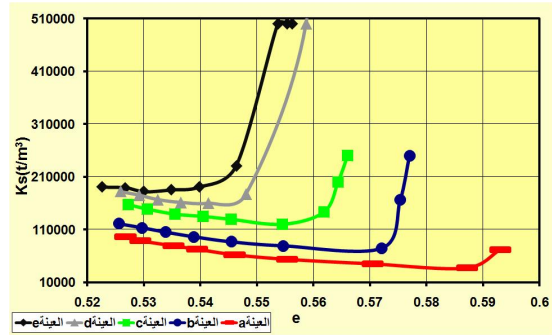
- التربة عالية اللدونة:



الشكل (10)

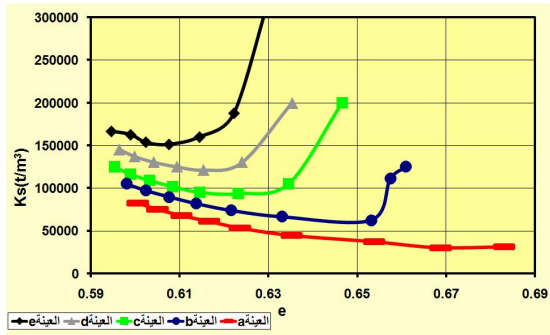
لوحظ أيضاً عند دراسة منحنى العلاقة بين معامل رد فعل التربة والضغط المطبق أنه يظهر تناقص في البداية حتى قيمة دنيا، ثم يعود للزيادة كما ظهر لدينا في العلاقة بين معامل رد فعل التربة ومعامل المسامية.

- التربة ضعيفة اللدونة:



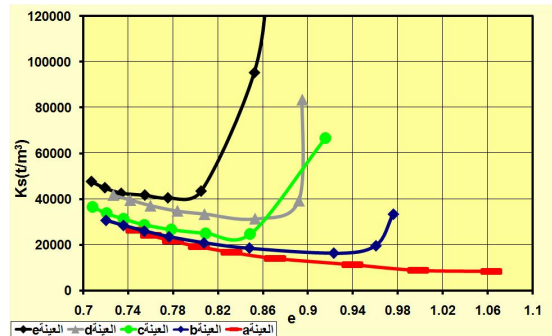
الشكل (5)

- التربة متوسطة اللدونة:



الشكل (6)

- التربة عالية اللدونة:



الشكل (7)

أظهرت التجارب المخبرية المنفذة للعينات كلها في المواقع المدروسة أن منحنى العلاقة (ks-e) ينخفض حتى وصوله إلى قيمة دنيا، ومن ثم يعود للزيادة (ويزداد ظهور الجزء المتناقص بتزايد تماسك العينة الابتدائي).

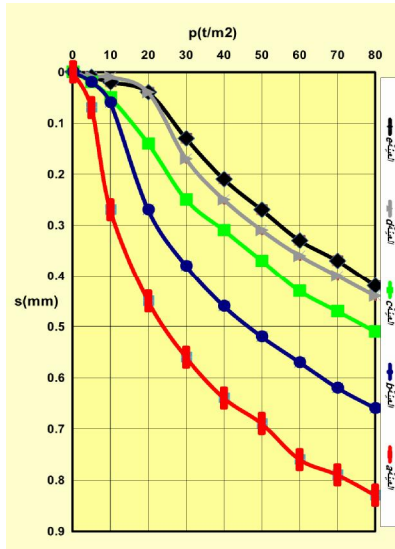
4- دراسة العلاقة بين معامل رد فعل التربة والضغط المطبق

وصوله إلى قيمة دنيا، ثم يعود للتزايد كما ظهر لدينا في منحنى العلاقة بين معامل رد فعل التربة وكل من معامل المسامية، الضغط المطبق.

6- دراسة العلاقة بين الضغط المطبق والهبوط:

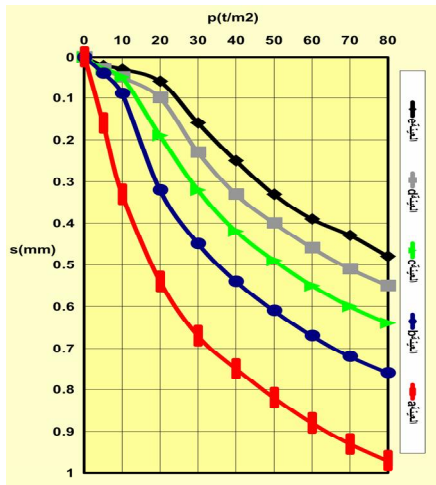
توضح الأشكال (13)، (14)، (15) منحنيات العلاقة بين الضغط المطبق والهبوط الناتج للعينات المدروسة في المواقع الثلاثة.

- التربة ضعيفة اللدونة:



الشكل (14)

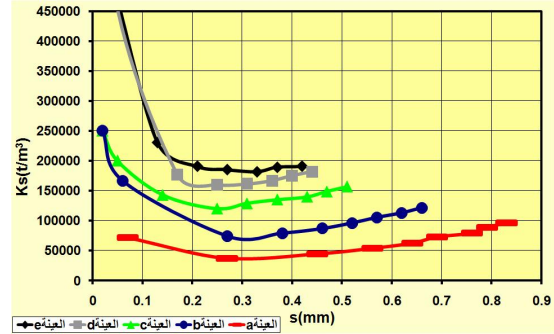
- التربة متوسطة اللدونة:



الشكل (15)

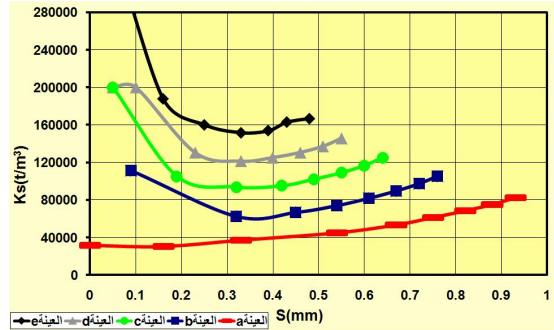
5- دراسة العلاقة بين معامل رد فعل التربة والهبوط توضح الأشكال (10)، (11)، (12) منحنيات العلاقة بين معامل رد فعل التربة والهبوط الناتج للعينات المدروسة في المواقع الثلاثة.

- التربة ضعيفة اللدونة:



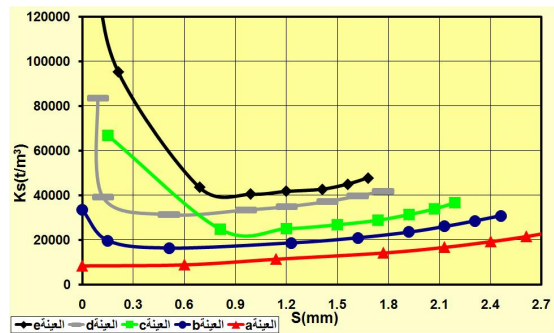
الشكل (11)

- التربة متوسطة اللدونة:



الشكل (12)

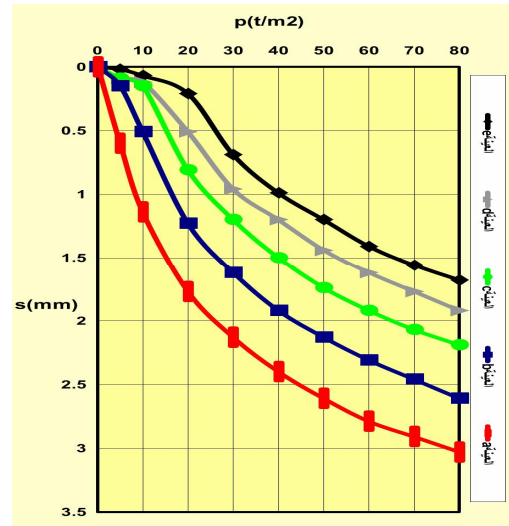
- التربة عالية اللدونة:



الشكل (13)

لوحظ عند دراسة منحنى العلاقة بين معامل رد فعل التربة والهبوط الناتج أنه يظهر تناقص في البداية حتى

- التربة عالية اللدونة:

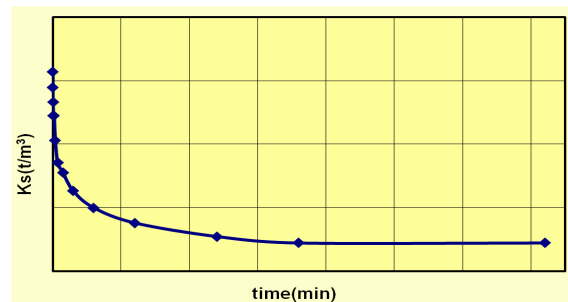


الشكل (16)

تبيّن المنحنيات السابقة وجود مجال خطي صغير لمنحنى العلاقة بين الضغط المطبق والهبوط، ويزداد هذا المجال بازدياد تماسك العينة.

7- دراسة انضغاطية التربة الغضارية مع الزمن:

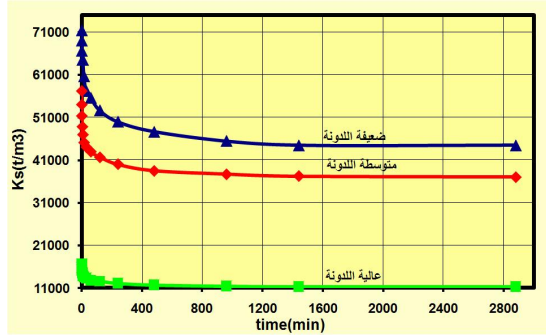
درست انضغاطية التربة مع الزمن للعينة (a) التي تقع على عمق (2m) من كل موقع، وذلك عند خطوة التحميل (1 → 2kg/cm²) ويظهر الشكل (16) منحنى العلاقة بين معامل رد فعل التربة والزمن لإحدى العينات.



الشكل (17)

من الواضح أن قيمة معامل رد فعل التربة عند تطبيق حمل جديد تتغير تغيراً كبيراً مع الزمن خاصة في بداية التحميل وتستقر هذه القيمة عند استقرار الهبوط وتلاشي الضغط المسامي.

يبين الشكل (17) منحنى العلاقة بين معامل رد فعل التربة والزمن للعينات الثلاث في المواقع المدروسة.



الشكل (18)

8- نتائج البحث

- أظهرت دراسة العلاقة بين معامل رد فعل التربة والمسامية، وكذلك دراسة علاقته مع الضغط المطبق وعلاقته مع الهبوط أظهرت أن منحنى العلاقة لكل منها يتناقص في البداية إلى قيمة معينة ثم يتزايد. ويعود ذلك إلى أنه في بداية تجربة الانضغاط يكون الهبوط الناتج صغيراً أو مهملاً ما دام الضغط المطبق أقل أو قريباً من ضغط التشديد المسبق الذي تعرضت له العينات المدروسة، وعندما يتجاوز الضغط المطبق متانة الترابط يبدأ الهبوط بالتزايد، ومن ثم تبدأ قيمة K_s بالتزايد مرة أخرى، ويستمر هذا التزايد مع تزايد الضغط.
- بيّنت المنحنيات التي درست تغير معامل رد فعل التربة أن قيمة هذا المعامل في تجربة الأومتر متغيرة وغير ثابتة. كما تبين أنه بازدياد لدونة التربة تتناقص قيمة معامل رد فعل التربة.
- إنّ العلاقة بين الضغط المطبق والهبوط الناجم عنه هي علاقة غير خطية، كما أظهرت التجارب المخبرية المنفذة، ولكن يمكن اعتبار أن العلاقة خطية في بداية التحميل وضمن مجال صغير للإجهادات، ويزداد هذا المجال بزيادة تماسك التربة الغضارية.

المراجع:

- 1- سيمفو ليدي ي . أ - التصميمات الهندسية على أساس مرن - دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع.
- 2- براجا. م. داس، ترجمة م لمى وفائي - هندسة الأساسات - شعاع للنشر والعلوم.
- 3- تسيتوفيج ن، بريزانتسيف ف، د. الماتوف ب، إ بيليف. م - القواعد والأساسات - دار مير.
- 4- عبد الفتاح القصيبي - ميكانيك التربة - دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع.
- 5- Terzaghi , k , peck , R.B. 1955, Soil Mechanics in Eng. Practice.
- 6- Daloglu, A.T., vallabhan C.V.G., 2000, values of k for slab on winkler foundation, J. Geotechnical and Geoenviromental Engineering.
- 7- Terzaghi, K.V., 1955, Evaluation of coefficient of subgrade reaction, Geotechnique.
- 8- Stavridis, L.T., 2000, Simplified analysis of layered soil-structure interaction , J. Struct. Eng.
- 9- Hicher, PY., 1996, Elastic properties of soils, J. Eng. Mech. ASCE.
- 10- Bowles, J.E, 1998, Foundation Analysis and Deign, McGrow-Hill International Editions, 6th ed.
- 11- Vesic A.B., 1961, Beams on elastic subgrade and Winkler's hypothesis, Proc. 5th. Int. Conf. Soil Mech.
- 12- Elachachi et al, 2004, Computers and Geotechnics.
- 13- Foundations et ouvrages en terre par Gerard Philipponnat et Bertrand Hubert, p91, Troisieme tirage 2002, EDITION EYROLLES.