فحص المحتوى المائي (ω_o) (Natural Moister Content)

التعريف

المحتوى المائي : هو النسبة المئوية لوزن الماء الموجود في التربة إلى الوزن الجاف للمواد الصلبة ويرمز له (ω_o) . وهي تعبر عن كمية الماء الغير مرتبط الموجود في عينة التربة المراد فحصها. توجد عدة طرق لقياس رطوبة التربة منها الطرق المباشرة التي تجرى بالمختبر وطرق غير مباشرة كالمقاومة الكهربائية.

الغرض من الفحص

تحديد المحتوى المائي للتربة

الاجهزة و الادوات

1) وعاء معدني او جفنه خزفية
2) فرن تجفيف تصل حرارته الى 105 -110 °C
3) ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm

طريقة العمل

1) توزن الجفنة فارغة على الميزان الحساس ونسجل وزنها (W_1).
2) توضع عينة التربة في الجفنة ونسجل وزنها (W_2) ويمثل وزن الجفنة مع التربة الرطبة.
3) تجفيف العينة في فرن درجة حرارته 110° C لمدة 24 ساعة لضمان ثبات الوزن للعينة.
4) بعد ذلك تستخرج العينة من الفرن و نقوم بتسجيل وزنها (W_3) ويمثل وزن الجفنة مع العينة الجافة.
5) تكرر الخطوات السابقة لثلاث عينات في جدول وتؤخذ قيمة المعدل لنسب الرطوبة المحسوبة.

الحسابات

يطبق القانون

$$\omega_o(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} * 100$$

حيث :

W_w = وزن الماء في العينة = $W_2 - W_3$

W_s= وزن الذرات الصلبة في العينة = $W_3 - W_1$

النتائج

رقم العينة	1	2	3
وزن الجفنة فارغة gm (W_1)	14.31	22.20	13.90
وزن العينة الرطبة مع الجفنة gm (W_2)	35.81	47.80	28.80
وزن العينة الجافة مع الجفنة gm (W_3)	30.61	40.60	25.70
وزن العينة جافة gm (W_S)	16.30	18.40	11.80
وزن الماء في العينة gm (W_w)	5.20	7.20	3.10
نسبة الرطوبة % (W_o)	31.90	39.10	26.30
معدل نسبة الرطوبة %	32.40		

المناقشة(مثال فقط)

إن نسبة الرطوبة قيمة متغيرة حسب الظروف المتوفرة في المختبر فهي تقل بارتفاع درجة الحرارة، لذا فالتباين في أوزان الماء يرجع لاختلاف درجة الحرارة بين العينات، وكون وزن الماء محسوب من الفرق بين وزن العينة رطبة ووزنها جافة فربما كان السبب من فرن التجفيف لأن الفرن المستخدم غير مزود بمروحة لطرد الرطوبة الداخلية فيه، وهذا يؤدي إلى خطأ في حساب الوزن الجاف للعينة. من جهة اخرى فإن الميزان هو الأداة الأكثر استخداماً في هذه التجربة لذا فهو المصدر الأكبر للأخطاء فعدم دقته واستخدام أكثر من ميزان في فحص واحد سوف تؤدي في النهاية إلى خطأ في حساب الرطوبة، ولكن يمكن اعتبار معدل الرطوبة مقبول كونه متقارب مع التجارب الأخرى وضمن الحد المعقول نسبياً.

فحص الوزن النوعي (G_s) (Specific Gravity)

التعريف

الوزن النوعي: نسبة وزن حجم معين من الذرات الصلبة (للتربة) الى وزن نفس الحجم من الماء المقطر في 20 °C

الغرض من الفحص

ايجاد الوزن النوعي لحبيبات التربة الناعمة والمتوسطة الخشونة والخشنة المارة من غربيل قياس 2 mm

الاجهزة و الادوات

1. دورق زجاجي حجمه 500 مل او 250 مل.
2. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.0001 gm
3. مجفف (Desiccator) لوضع العينة بعد اخراجها من الفرن (حتى لا تمتص رطوبة اثناء التبريد)
4. فرن تجفيف يعطي 110 °C
5. سخان كهربائي أو مضخة تفريغ هواء Vacuum Pressure أو حمام مائي Water Path .
6. غربيل قياس 2 mm
7. قمع زجاجي
8. ملعقة , محرار يقرا لغاية 0.01 °C

معايرة الدورق

1. يجفف الدورق بدرجة حرارة 110 °C ثم تترك ليبرد ويوزن وليكن W_1
2. يملا الدورق بالماء المقطر لحد اشارة الحجم تماما و يؤخذ الوزن وليكن W4 و الحرارة ولتكن Ti
3. يطبق القانون الاتي:

$$(W_4)_{at\,Tx} = \frac{\gamma_{w(Tx)}}{\gamma_{w(Ti)}}\left((W_4)_{at\,Ti} - W_1\right) + W_1$$

حيث

W_1 وزن الدورق فارغ

W_4 وزن الدورق + الماء المقطر مملوء

$\gamma_{w(Tx)}$ كثافة الماء المقطر عند Tx

$\gamma_{w(Ti)}$ كثافة الماء المقطر عند Ti

طريقة العمل (طريقة فحص الG_s)

1. تؤخذ عينة من التربة المجففة بحدود ال100 غرام وتوضع في الدورق ثم يوزن الدورق والعينة معا وليكن W_2.
2. تضاف كمية كافية من الماء المقطر حتى عنق الدورق او الى النصف تقريبا ومن ثم يوضع في الحمام المائي او في مفرغة الهواء لمدة 20 دقيقة وذلك لطرد الهواء المحبوس بين حبيبات العينة و التي تسبب خطا بالفحص. ثم يستخرج الدورق ويترك ليبرد (يصبح بحرارة المختبر) و يجفف من الخارج.
3. بعد التأكد من جفاف الدورق من الخارج يكمل الحجم بالماء المقطر الى اشارة الحجم و يوزن الدورق مع التربة مع الماء معا وليكن W_3.
4. تقاس درجة الحرارة و لتكن Tx.

الحسابات

يطبق القانون الاتي:

$$G'_s = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_1 - W_3 + W_{4\,at\,Tx}}$$

حيث :

G'_s الوزن النوعي عند درجة الحراره Tx

W_2 وزن الدورق + التربة الجافة

W_3 وزن الدورق + التربة + الماء المقطر

W_4 وزن الدورق + الماء المقطر بعد المعايرة عند درجة الحرارة Tx

المطلوب :

حساب الوزن النوعي عند ال 20 م.

$$G_s = G'_s * K$$

حيث :

G_s الوزن النوعي عند درجة الحراره 20 م.

G'_s الوزن النوعي عند درجة الحراره Tx

K معامل تصحيح درجة الحرارة

Temperature (°C)	Distilled water specific gravity	Correction factor K
18	0.99862	1.0004
19	0.99843	1.0002
20	0.99823	1.0000
21	0.99802	0.9998
22	0.9978	0.9996
23	0.99757	0.9993
24	0.99733	0.9991
25	0.99708	0.9988
26	0.99682	0.9986
27	0.99655	0.9983
28	0.99627	0.998
29	0.99598	0.9977
30	0.99568	0.9974
31	0.99537	0.9971
32	0.99505	0.9968

النتائج

رقم الدورق	1	2	3
وزن الدورق فارغ gm (W_1)	101.230	101.430	102.930
وزن الدورق و التربة الجافة gm (W_2)	174.500	214.440	387.000
وزن الدورق و التربة و الماء gm (W_3)	395.520	418.420	796.430
وزن الدورق و الماء gm $(W4)_{at\ Ti}$	350.117	348.000	620.767
درجة حرارة الماء Ti	24.0	24.0	22.0
درجة حرارة الفحص (W_3) Tx	19.0	19.0	18.0
وزن الدورق و الماء gm $(W4)_{at\ Tx}$	350.064	347.952	620.667
الوزن النوعي G'_s	2.65	2.67	2.64
الوزن النوعي المصحح (عند 20 °م) G_s	2.66	2.68	2.65
معدل الوزن النوعي المصحح G_s	2.66		

فحص حدود القوام أو حدود اتربرك (Atterberg Limits)(LL , PL , SL)

التعريف

حدود أتربرك : هي نسب الرطوبة التي تتغير فيها عينة التربة من الحالة الصلبة إلى الحالة شبه الصلبة ومن ثم إلى الحالة اللدنة ثم إلى الحالة السائلة.

الغرض من الفحص

إن الغرض من هذا الفحص هو ايجاد قيم LL , PL , SL و التي يستفاد منها في تصنيف التربة الناعمة وتحديد معظم صفاتها العامة وانضغاطيتها.

الاجهزة و الادوات

1. جهاز كازكراندي: هو جهاز ميكانيكي يتكون من صحن نحاسي بقطر حوالي 54 ملم و مجهز بعتلة لرفع الصحن بمقدار ثابت (10ملم) ليسقط على ارضية من المطاط القاسي مثبتة على ارجل مطاطية والجهاز يعمل اما يدويا أو كهربائيا.
2. أداة استحداث الشق: أله مطابقة للمواصفات من حيث الابعاد القياسية وقد يتصل بها جزء خاص للمعايرة يكون عادة متصل باداه لاستحداث الشق.
3. أوعية تجفيف لقياس المحتوى المائي للعينات من الألمنيوم
4. فرن تجفيف درجة حرارة (110 درجة مئوية) لتجفيف العينات.
5. ميزان حساس يقرأ لغاية 0. 01 gm
6. قطعة زجاجية لخلط النموذج و سكينة المزج

حد السيولة (Liquid Limit) : وهو نسبة الرطوبة في التربة عندما تنتقل من السلوك اللدن إلى السلوك السائل، وتعرف بحسب أتربرك بأنها نسبة الرطوبة المقابل لعدد ضربات مقدارها 25 ضربة و اللازمة لسد شق قياسي مصنوع بطريقة قياسية عرضه 3 ملم.

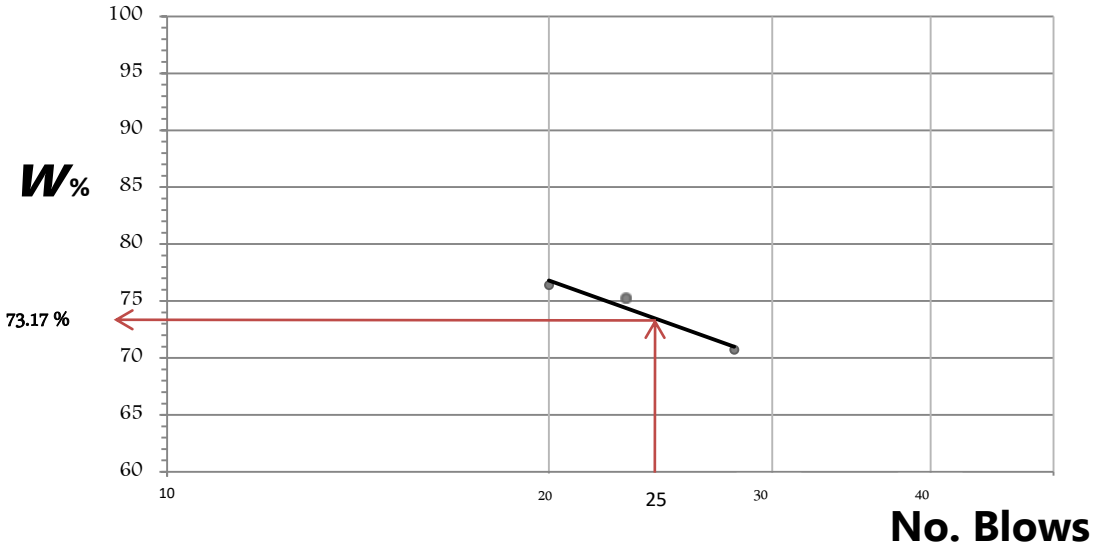
طريقة العمل

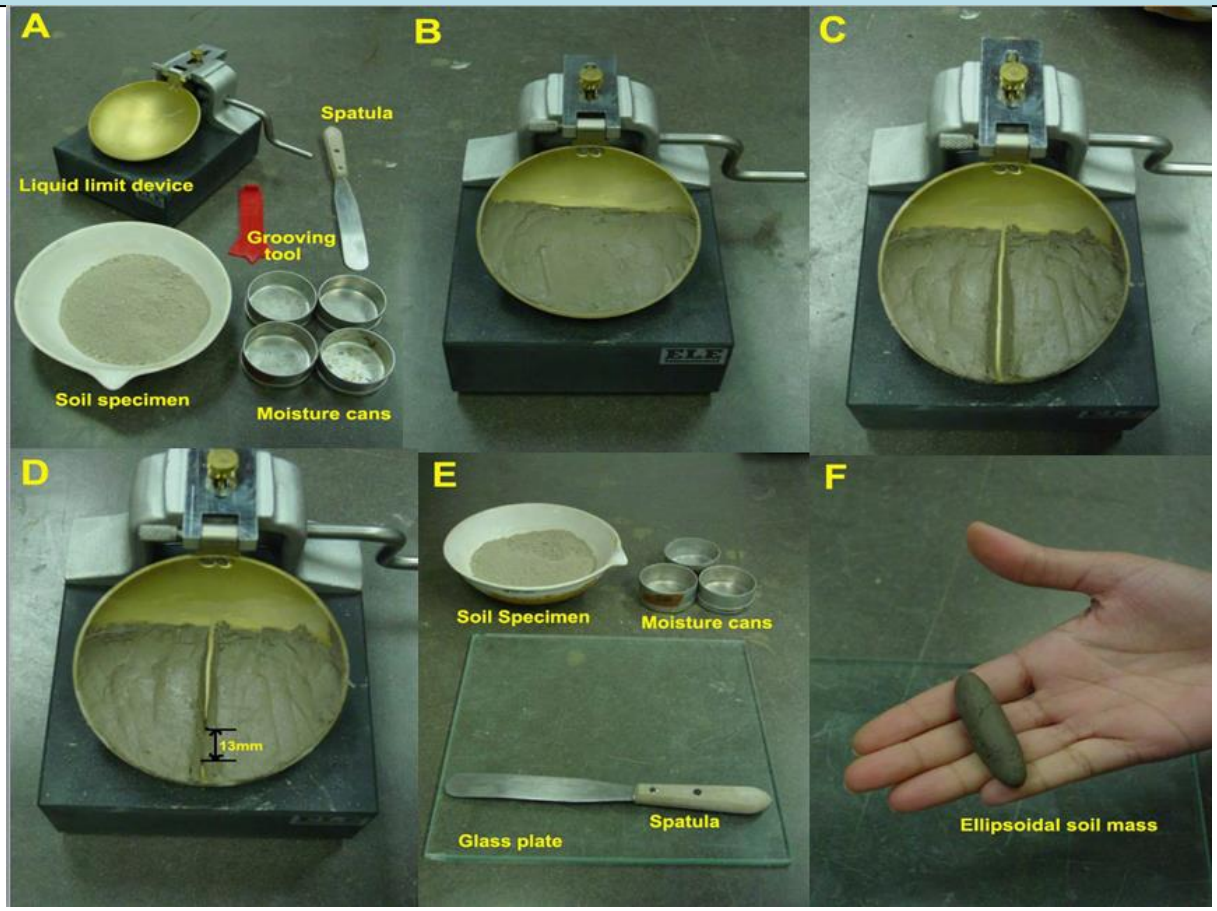
1. نجفف العينة ثم نفتتها وننخل منها كمية كافية على المنخل رقم 40.
2. نضيف الماء للتربة وتعجن ثم نضع كمية منها في صحن الجهاز وتسوى بالسكين المخصصة لذلك.
3. يعمل شق في التربة الموجودة في صحن الجهاز بواسطة الة استحداث الشق بحيث يجب أن تكون سمك التربة 13 mm.

4. يدور الجهاز بسرعة دورتين بالثانية، ولكن يجب أن تكون المسافة بين قاع الصحن وقاعدة الجهاز 1 cm.
5. عندما تبدأ التربة بالسيلان نحو الشق حتى يلتحم الشق بمقدار 1 cm ونسجل عدد الضربات بحيث يجب أن تكون عدد الضربات ما بين (15 – 35) ضربة.
6. نأخذ كمية من التربة من منطقة التحام الشق ونزنها وهي رطبة (وزن رطب) ثم نجففها بالفرن لمدة 24 ساعة ثم نزنها مرة وهي جافه (وزن جاف).
7. يكرر الفحص ثلاث مرات على 3 عينات على الأقل وتسجل النتائج.

الحسابات و النتائج

رقم الفحص	1	2	3
وزن اناء التجفيف فارغ gm (W_1)	15.6	14.8	14.3
وزن الدورق و التربة الرطبة gm (W_2)	29.1	21.8	27
وزن الدورق و التربة الجافة gm (W_3)	23.3	18.9	21.5
المحتوى المائي w %	75.32	70.73	76.39
عدد الضربات (اللازمة لغلق الشق)	23	28	20
حد السيولة (LL)	73.17		





حد اللدونة (Plasticity Limit): وهو نسبة الرطوبة في التربة عندما تنتقل من السلوك الجاف إلى السلوك اللدن، وتعرف بحسب أتربرك بأنها نسبة الرطوبة التي تبدأ عندها فتائل من التربة بقطر 3 mm بالتشقق.

طريقة العمل:

1. نأخذ عينة رطبة من التربة المارة من المنخل رقم 40 بحيث تكون على شكل عجينة يسهل التحكم بها ونجعلها بشكل كرة براحة اليد.
2. نضع الكرة على لوح زجاجي ونبدأ بصنع فتائل براحة اليد حتى تصبح هذه الفتائل بقطر 3 mm ثم نعود ونحولها إلى كرات مرة أخرى ونصنع منها فتائل.
3. نكرر العملية الأخيرة حتى نحصل على تشققات في الفتيلة ذات القطر 3 mm.
4. نأخذ الفتائل المتشققة ونزنها وهي رطبة ثم نجففها بالفرن مدة 24 ساعة ثم نزنها وهي جافة ونسجل النتائج.

النتائج

رقم العينة	1	2	3
وزن الجفنة فارغة gm (W_1)	13.9	14.9	13.9
وزن العينة الرطبة مع الجفنة gm (W_2)	18	21	16.6
وزن العينة الجافة مع الجفنة gm (W_3)	16.8	19.2	15.8
وزن العينة جافة gm (W_S)	2.9	4.3	1.9
وزن الماء في العينة gm (W_w)	1.2	1.8	0.8
حد اللدونة % (PL)	41.38	41.86	42.11
معدل نسبة الرطوبة %	41.78		

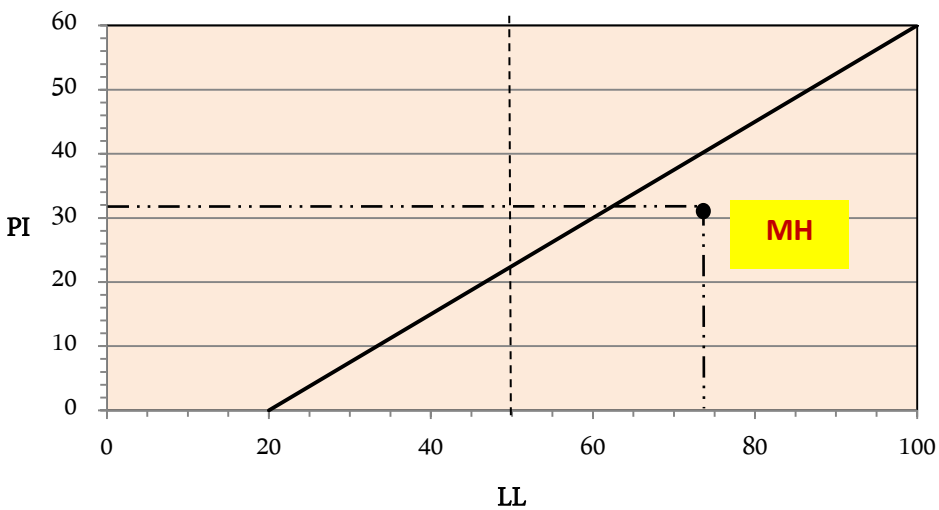
$$PL(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

بعد ايجاد حدي اللدونة والسيولة للتربة حيث حد السيولة (LL = 73.17) وحد اللدونة (PL = 41.78)، نستطيع الآن إيجاد مؤشر اللدونة (PI) للتربة ونحدد نوع التربة من مخطط اللدونة:

$$PI = LL - PL$$

$$PI = 73.17 - 41.78 = 31.39$$

مخطط اللدونة



فحص التدرج الحبيبي: (Grain Size Distribution)

الطريقة الميكانيكية: Sieve Analysis

التعريف

التحليل المنخلي: هي عملية تحديد النسب المئوية لوزن الحبات تبعاً لأبعادها وتفيدنا أيضاً بإعطاء فكرة تقريبية عن بعض الخواص الفيزيائية والميكانيكية للتربة مثل معرفة حركة المياه في التربة و معرفة متانتها ضد الانضغاط والتي تتناقص بازدياد أقطار الحبات المكونة للتربة.

الغرض من الفحص

تحديد وتصنيف التربة الذي يحدد مدى خشونتها التي تتراوح من الخشن جداً إلى الناعم جداً وتسمى على الترتيب (جلمود , حصى , رمل , غرين , طين) حيث يفصل المنخل رقم 200 بين التربة الناعمة (الغرين و الطين) والتربة الخشنة (الجلمود و الحصى و الرمل)، وأيضاً إمكانية استخدام التربة في الطرق والسدود والمطارات وغيرها من المنشآت،

الاجهزة و الادوات

1. ميزان ذو حساسية 0.1 غرام.
2. مجموعة المناخل القياسية مع غطاء ووعاء كما في الجدول الاتي
3. فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110± 5 . ° م
4. هزاز ميكانيكي. (Mechanical Shaker)
5. أوعية معدنية (Metal Trays) تستخدم للتجفيف.
6. فرشاة ذات أسنان نحاسية ناعمة.

رقم المنخل	قطر الفتحة (ملم)
#4	4.75
#6	3.35
#8	2.36
#12	1.68
#16	1.18
#20	0.850
#30	0.600
#40	0.425
#50	0.300
#60	0.250
#80	0.180
#100	0.150
#140	0.106
#200	0.075
#270	0.053
pan	-

طريقة العمل

1. تجفف العينة في الفرن لمدة 24 ساعة و إذا كانت التربة تحتوي على مواد عضوية أو جبس فتجفف بدرجة 60°م
2. نزن العينة كاملة قبل نخلها ونسجل الوزن W_s بحيث تكون بحدود 1000 gm.
3. ترتب المناخل ذات الأرقام التالية (4 , 10 , 20 , 40 , 60 , 100 ,140, 200) تنازلياً بحيث يكون المنخل ذو الفتحة الأكبر في الأعلى.
4. نضع العينة على منخل في الأعلى وتغطى بالغطاء.
5. تهز المناخل يدوياً أو باستخدام الهزاز الميكانيكي لمدة تتراوح من 5 إلى 10 دقائق.
6. توزن الكمية المتبقية على كل منخل من المناخل W_r.
7. تجمع الأوزان المتبقية على كل المناخل ونسجل الوزن التراكمي W_c.
8. تحسب النسبة المئوية العابرة من كل المناخل P.P. (Percentage Passing).

الحسابات والنتائج:

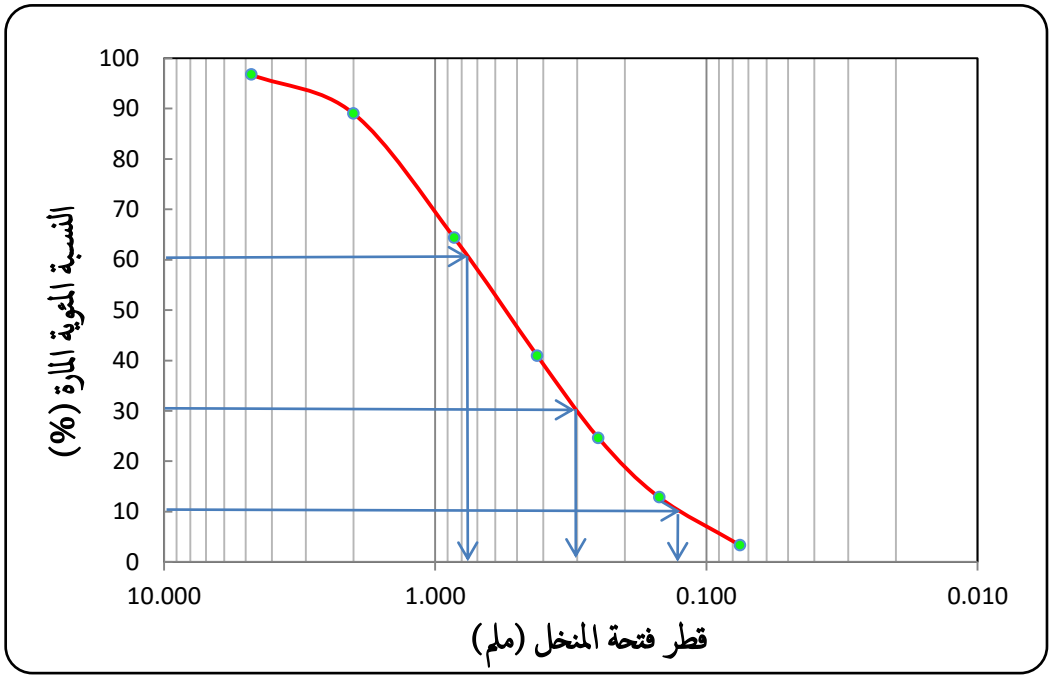
1. يحسب النسبة المئوية المتبقية على كل منخل وكما يلي: $\% \, retaind = \frac{W_r}{W_s} * 100\%$
2. يحسب النسبة المئوية المتراكم على كل منخل وكما يلي: $\% \, accumulated = \frac{\Sigma W_c}{W_s} * 100\%$
3. يحسب النسبة المئوية المارة من كل منخل: $\% \, passing = 100 - \% \, accumulated$
4. ترسم النتائج على ورق نصف لوغاريتمي بين قطر فتحات المناخل (ملم) ونسبة المئوية المارة المقابلة لها:

رقم المنخل	قطر فتحة المنخل mm	الوزن المتبقي gm	النسبة المئوية المتبقية %	النسبة المئوية المتراكمة %	النسبة المئوية المارة %
#4	4.750	33	3.3	3.3	96.7
#10	2.000	77	7.7	11	89
#20	0.850	247	24.7	35.7	64.3
#40	0.420	234	23.4	59.1	40.9
#60	0.250	163	16.3	75.4	24.6
#100	0.149	118	11.8	87.2	12.8
#200	0.075	95	9.5	96.7	3.3
Pan	-	33	3.3	100	0

ملاحظة: إن وزن التربة بعد الغربلة ممكن ان يتغير عن الوزن قبل الغربلة و على سبيل المثال بفرض أن وزن التربة قبل الغربلة هو 1000 gm واصبح وزنها بعد الغربلة هو 975 gm. فان نسبة الفقدان بالوزن يجب ان تكون اقل من 2% و اذا تجاوز الفقدان 2% فيتم توزيع النقصان بالوزن على جميع المناخل بالتساوي.

$$\%Loss = \frac{1000-975}{1000} * 100 = 2.5\%$$

نجد أن قيمة الفقدان هي 2.5% وهو فرق كبير لا يمكن تجاهله لذلك يتم توزيعه (ال25 غرام المفقودة) على جميع الغرابيل المستخدمة بالفحص.



بعد ذلك يحسب قيمة كل من معامل الانتظام (Cu) ومعامل التقوس (Cc) وكما يلي.

$D_{10\%} =$ 0.135mm

$D_{30\%} =$ 0.30mm

$D_{60\%} =$ 0.75mm

$$C_u = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} = \frac{0.75}{0.135} = 5.55$$

$$C_c = \frac{{D_{30\%}}^2}{D_{10\%} * D_{60\%}} = \frac{0.3^2}{0.135 * 0.75} = 0.88$$

وبالنظر إلى القيم المحسوبة نجد أن معامل الانتظام غير مستوفي الشرط و معامل الانحناء ايضا غير يستوفي الشرط لذا تعتبر التربة رملية (العابر من منخل 4# أكبر من (50%)) ضعيفة التدرج.

فحص التدرج الحبيبي: (Grain Size Distribution)

طريقة المكثاف (الترسيب): Hydrometer Analysis (Sedimentation)

التعريف

المكثاف أو الهيدرومتر : وهو جهاز يستخدم لقياس الكثافة النوعية للسوائل، ويتكون المكثاف من زجاج اسطواني ينتهي ببصلة (انتفاخ بصلي) ملئ بالرصاص ذو نصل مدرج . يعتمد فحص المكثاف على تطبيق قانون ستوك حيث ان قانون ستوكس يحدد الأسس النظرية لحساب العلاقة بين سرعة الترسيب قطر الحبيبة و بمعرفة مسافة الهبوط والزمن اللازم لهبوطها يمكن حساب قطر الجزيئات.

الغرض من الفحص

يستفاد منه لحساب قيمة الاقطار المكافئة و نسبها المئوية لحبيبات التربة الاصغر من 0.075 mm والتي لا يمكن اجراء التحليل المنخلي عليها .

الهيدروميتر المستخدم

الهيدروميتر المستخدم بالفحص ممكن ان يكون احد النوعين:

ت	النوع	التدريجة	المدى	الوظيفة	الطول mm
1	H151	0.001	0.995 to 1.038	قياس الوزن النوعي للعالق	280
2	H152	1	-5 to 60	قياس التركيز في العالق (gm/l) (كثافة)	280

الاجهزة و الادوات

1) هيدرومتر من النوع المبين بالشكل المجاور المستخدم لقياس كثافة محلول الماء –التربة والذي يراعى أن تكون مادة الرصاص في بصلة الهيدروميتر يجب أن تكون هذه المادة مثبتة بمادة لاصقة بداخل البصلة ولا تتأثر بالحرارة حتى 80 درجة ويجب ان يكون معايراً ليقرأ التدريجة 1.000 في الماء بدرجة حرارة 20 °م. عندما يكون H151 و يقرأ التدريجة 0 في الماء بدرجة حرارة° 20 م.
2) بيكر سعة 250 سم. 3
3) أسطوانة مدرجة سعة 1000 سم.
4) محرار سعة 100 °م
5) مازجة و ساعة توقيت

طريقة العمل

1) نزن 50 gm من التربة المارة من المنخل 200# ونضعها في الخلاط.
2) نضيف العامل المفرق(مادة هيكسا ميتا فوسفات الصوديوم لجعل الجزيئات مبعثرة) بمقدار(5 gm) و (250 ml) من الماء إلى الخلاط.
3) يشغل الخلاط لخلط المحلول لمدة دقيقة ثم نسكبه في الاسطوانة المدرجة سعة 1000 سم^3.
4) سعة 1000 سم^3 ويكمل الى هذا الحجم بالضبط بالماء المقطر.
5) بعد ان يكمل الماء للتر يغطي الأسطوانة وترج جيداً لمدة دقيقة ثم توضع على المنضدة.
6) يوضع الهيدرومتر بحذر وببطء شديد وتشغل ساعة التوقيت عند استقراره.
7) نسجل قراءات الهيدروميتر ودرجات الحرارة بعد مضي: (0.5 , 1 , 2 , 4 , 8 , 15 , 30 , 60 , 90,.....) دقيقة.
8) يتم اخذ قراءة درجة الحرارة عند اول 15 دقيقة و عند كل قراءة بعد 15 دقيقة

الحسابات

$$D(mm) = K\sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}}$$

$$K = \sqrt{\frac{30\eta}{(G_S-1)\gamma_W}}$$

$$L = 16.3 - (0.164 * R)$$

حيث:

D = القطر وتقاس — η = اللزوجة

G_s = الوزن النوعي للمادة الصلبة — γ_w = الكثافة للماء

L = مسافة الترسب (cm) — Ra = قراءة الهيدرومتر

t = الزمن

(η - γ_w - t) اللزوجة و الكثافة تتغير مع درجة الحرارة.

حيث K ثابت يؤخذ من الجداول حسب درجة الحرارة والوزن النوعي:على سبيل المثال قيمة كل من t و Gs معلومة.

t = 20 °C , Gs = 2.70 ⇒ K = 0.0134

سوف يصبح القانون

$$D = 0.0134 \left(\frac{16.3-(0.164*R)}{t} \right)^{0.5}$$

وبعد حساب قيمة R_c يطبق القانون الخاص بحساب النسبة المئوية (P') وكما يلي:

$$P' = \left(R_c * \frac{a}{W_s} \right) * 100\%$$

$$a = \frac{1.65\, G_s}{2.65(G_s-1)}$$

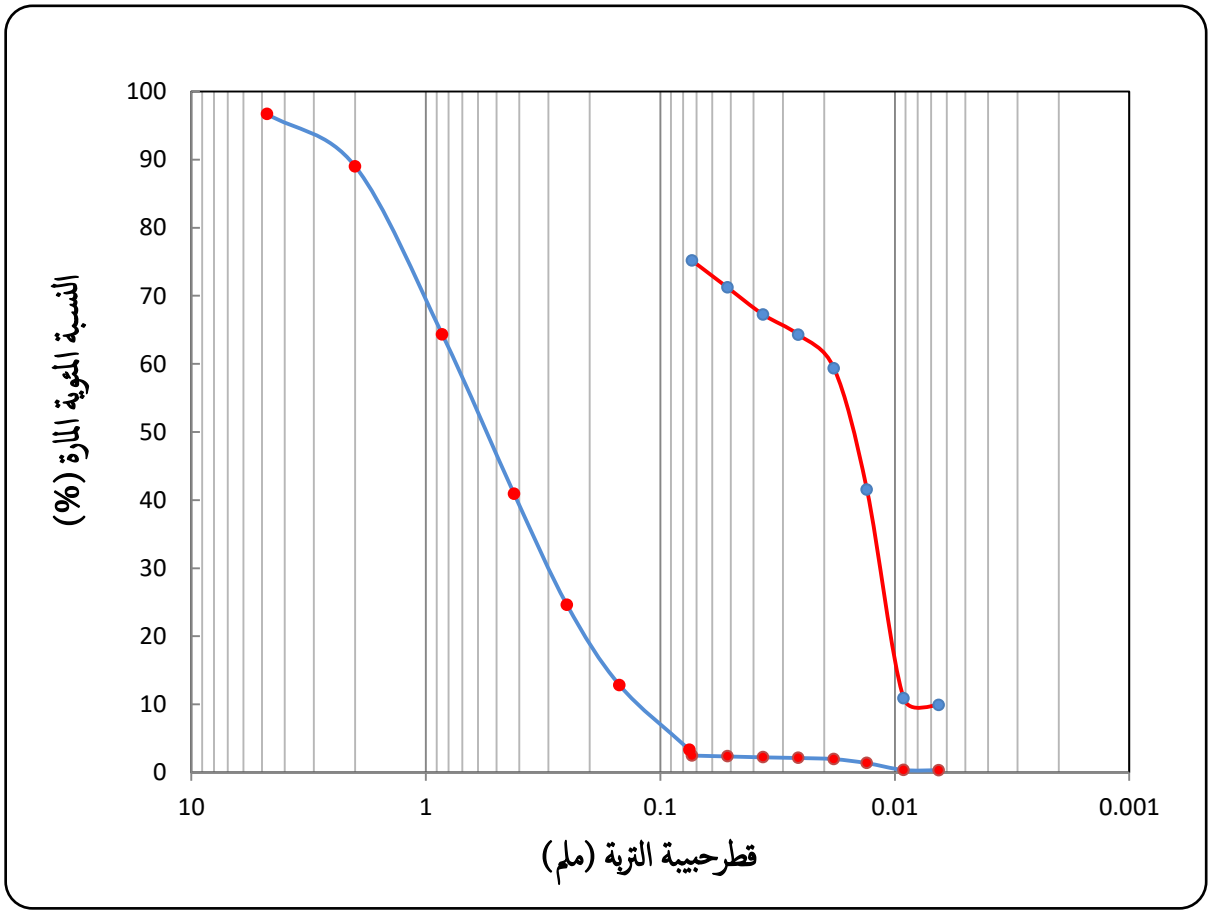
a= 0.988901

وعل افتراض ان الوزن الحبيبات الصلبة= 50 gm و النسبة المئوية العابرة من منخل #200 = 3.3%

النتائج

P %	P' %	D (mm)	L (cm)	Cm	Temp. (°C)	Hydrometer Reading (gr/l)	Time (min)
2.48	75.16	0.07313	9.1946	1	20	38	0.5
2.34	71.2	0.051618	9.5212	1	20	36	1
2.21	67.25	0.036433	9.8478	1	20	34	2
2.12	64.28	0.025727	10.09275	1	20	32.5	4
1.95	59.33	0.018151	10.501	1	20	30	8
1.37	41.53	0.013146	11.9707	1	20	21	15
0.35	10.88	0.009161	14.50185	1	20	5.5	30
0.32	9.889	0.006475	14.5835	1	20	5	60

ملاحظة: قد يستغرق الرمل أقل من ثانية بينما تستغرق حبيبة الطين عدة ساعات حتى تستقر في قاع اسطوانة الترسيب و من الممكن أن تكون صغيرة جدا بما لا يكفي ان تستقر في القاع أبداً وتبقى معلقة في السائل.



وفي حالة وجود تغيير في درجة الحرارة فأن المعامل CT سوف يدخل في حسابات النسبة المئوية للحبيبات و كذلك تتغير قيمة المعامل K

فحص الايصالية الهيدروليكية (النفاذية): Hydraulic Conductivity, (Permeability)

التعريف

الايصالية الهيدروليكية: هي قدرة التربة على السماح للماء بالجريان خلال فراغاتها.

النفاذية : هي قدرة التربة على السماح للسوائل بالجريان خلال فراغاتها. ويعبر عنها بمعامل النفاذية (K) والذي من يمكن تحديده من خلال الفحوصات المختبرية أو الحقلية، علما بأن الأخيرة تعطي تصورا اكثر دقة ووضوح عن نفاذية التربة، لأن التربة تكون في وضعها الطبيعي بعيدًا عن التأثيرات التي قد تحصل أثناء استخراج عينة التربة لفحص نفاذيتها في المختبر. و الفحوصات التي يتم إجراؤها في المختبر لتحديد نفاذية التربة هي فحصين أساسين هما: فحص النفاذية بطريقة الجهد الثابت او عمود الماء الثابت Constant head permeability test وتستخدم للتربة الخشنة الحبيبات وفحص النفاذية بطريقة الجهد المتغير او عمود الماء المتناقص Variable (Falling) head permeability test و تستخدم للتربة الناعمة الحبيبات.

الغرض من الفحص

حديد معامل النفاذية للتربة، مما يساعد في تحديد معدل تدفق المياه أسفل السدود وبالتالي يمكن حساب قوة دفع المياه على السدود (Uplift force).

فحص النفاذية بطريقة الجهد الثابت (عمود الماء الثابت)

الاجهزة و الادوات

1. اسطوانة مدرجة حجمها 500 مل او 1000 مل.
2. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm
3. جهاز قياس النفاذية القياسي
4. مفرغة هواء Vacuum Pressure.
5. ساعة توقيت
6. محرار يقرا لغاية 0.01 °C
7. مصدر ماء مستمر
8. ملعقة , مطرقة صغيرة

طريقة العمل

1. يحسب وزن التربة الواجب وضعها داخل اسطوانة الجهاز و التي يجب ان تكون بكثافة مساوية الى الكثافة الموقعية و ذلك بحساب الكثافة الموقعية و مساحة المقطع العرضي لأسطوانة الجهاز و إختيار الارتفاع الذي ستوضع

التربة عنده . من خلال هذه المعلومات يتم حساب الوزن اللازم من التربة و الذي يوضع في اسطوانة الجهاز عند الارتفاع الذي تم تحديده مسبقا و التي ستكون بنفس قيمة الكثافة الموقعية الاصلية للتربة.

2. توضع التربة المعلوم وزنها والحجر المسامي و ورقة ترشيح بحيث تكون ورقة الترشيح و الحجر المسامي من اعلى و اسفل النموذج و تكون ورقة الترشيح ملامسة للتربة لمنع انجراف التربة عند مرور الماء خلالها.
3. يغلق الجهاز و يكمل ربط الملحقات الاخرى و يربط القمع الخاص بتجهيز الماء على ارتفاع معين و يقاس ذلك الارتفاع عن فتحة خروج الماء من الجهاز.
4. يتم ربط مفرغة الهواء في فتحة خروج الماء من الجهاز لسحب الهواء من داخل النموذج .
5. يفتح مصدر الماء ويسمح للماء بالدخول الى النموذج وبعد فتح الصمام اعلى الاسطوانة و خروج الماء من الجهاز يترك الجريان لفترة قصيرة حتى ينتظم معدل الجريان .
6. خلال العملية السابقة يجب المحافظة على منسوب الماء الثابت فوق النموذج . يتم تجميع الماء باستخدام الاسطوانة المدرجة بمقدار معين من الحجم في مدة زمنية محددة و تؤخذ قراءة درجة حرارة الماء.
7. تكرر العملية السابقة من تجميع حجم ماء معين في مدة زمنية محددة و أخذ قياس الحرارة ولثلاثة مرات و يؤخذ المعدل.

ملاحظة:

يفضل ان يجمع الماء في الاسطوانة المدرجة بعد مرور الماء من النموذج بكمية ثلاثة امثال حجم الفراغات بالتربة

الحسابات

$$k_T = \frac{QL}{AH}$$

$$k_{20} = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} * k_T$$

حيث :

k_{20} النفاذية بدرجة 20م (m/sec)

k_T النفاذية بدرجة حرارة المختبر(m/sec)

μ_{20} الزوجة الحركية للماء عند درجة 20 م (kg/ m. sec)

μ_T الزوجة الحركية للماء عند درجة حرارة المختبر (kg/ m. sec)

Q حجم الماء المتجمع خلال مدة زمنية محددة (cm^3)

A مساحة المقطع العرضي لخلية جهاز النفاذية (cm^2)

H الانحدار الهيدروليكي المسبب للجريان (cm)

L طول النموذج في اسطوانة جهاز النفاذية (cm)

A
B
C
D
E
F
G
H
I

$$K = \frac{QL}{AH} \quad \text{or} \quad \frac{qL}{tAH}$$

$$A = \frac{\pi\, d^2}{4} = \frac{\pi * 6.3^2}{4} = 31.16\ cm^2$$

$$K_T = \frac{200 * 11.2}{10 * 31.16 * 50}$$

$$K_T = 1.437 * 10^{-1}\ cm/min$$

$$K_T = 2.39 * 10^{-5}\ m/s$$

$$K_{20} = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} * K_T$$

$$K_{20} = \frac{0.01111}{0.01005} * 2.39 * 10^{-5}$$

$$K_{20} = 2.64 * 10^{-5} \quad m/sec$$

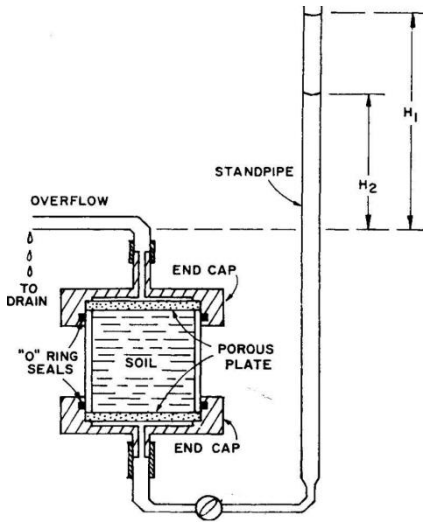
ومقدار التصريف:

$$Q = \frac{q}{t} = \frac{200}{10} = 0.333\ cm^3/s$$

النتائج

3	2	1	رقم الفحص
11	11.4	11.2	L (cm)
31.16	31.16	31.16	A (cm^2)
50	50	50	H (cm)
210	190	200	q (cm^3)
8.5	9.0	10.0	t (min)
0[illegible]22	19.0	16.0	T Centigrade
0.411	0.351	0.333	معدل التصريف cm^3/s
$2.90*10^{-5}$	$2.57*10^{-5}$	$2.39*10^{-5}$	K_T m/sec
$2.77*10^{-5}$	$2.63*10^{-5}$	$2.64*10^{-5}$	K_{20} m/sec
$2.68*10^{-5}$			معدل النفاذية المصححة للحرارة K_{20} m/sec

فحص النفاذية بطريقة الجهد المتغير (عمود الماء المتناقص)



الاجهزة و الادوات

1. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm
2. جهاز قياس النفاذية القياسي
3. مفرغة هواء Vacuum Pressure.
4. ساعة توقيت
5. محرار يقرا لغاية 0.01 °C
6. مصدر ماء

ملعقة , مطرقة صغيرة

طريقة العمل

1. توضع التربة الغير مشوشة والحجر المسامي و ورقة ترشيح بحيث تكون ورقة الترشيح و الحجر المسامي من اعلى و اسفل النموذج و تكون ورقة الترشيح ملامسة للتربة لمنع انجراف التربة عند مرور الماء خلالها.
2. حساب ارتفاع النموذج الموضوع بالقالب و مساحة المقطع العرضي لأسطوانة الجهاز و مساحة المقطع العرضي للأنبوب العمودي من الجهاز.
3. يغلق الجهاز و يكمل ربط الملحقات الاخرى و يربط القمع الخاص بتجهيز الماء على ارتفاع معين و يقاس ذلك الارتفاع عن فتحة خروج الماء من الجهاز.
4. يتم ربط مفرغة الهواء في فتحة خروج الماء من الجهاز لسحب الهواء من داخل النموذج .
5. يفتح مصدر الماء بالدخول الى النموذج وبعد فتح الصمام اعلى الاسطوانة و خروج الماء من الجهاز يترك الجريان لفترة قصيرة حتى ينتظم معدل الجريان.
6. خلال العملية السابقة يتم اخذ قراءة اولى لأنبوبة الجهاز ولتكن (h_1) مع قراءة للزمن ولتكن (t_1) و بعد فترة من الزمن و تؤخذ قراءة ثانية لأنبوبة الجهاز ولتكن (h_2) مع قراءة للزمن ولتكن (t_2).
7. تكرر العملية السابقة من قراءة ارتفاع الماء في انبوبة الجهاز و الزمن و أخذ قياس الحرارة ولثلاثة مرات.
8. تحسب النفاذية و يؤخذ المعدل.

ملاحظة :

اما ان تؤخذ قراءة الوقت المحصورة بين قراءتي ارتفاع الماء بالانبوبة او $t = t_1 - t_2$ or $t =$ ان يؤخذ الزمن بين القراءتين في الانبوبة

الحسابات

$$k = \frac{aL}{At} * \ln\frac{h_1}{h_2}$$

حيث :

k_{20} النفاذية بدرجة 20م (m/sec)

t الزمن بين القراءتين h_1 و h_2 (min)

h_1 قراءة ارتفاع الماء الاولى في انبوبة الجهاز (cm)

h_2 قراءة ارتفاع الماء الثانية في انبوبة الجهاز (cm)

a مساحة المقطع العرضي لأنبوبة الجهاز (cm^2)

A مساحة المقطع العرضي لأسطوانة الجهاز (cm^2)

L طول النموذج في اسطوانة جهاز النفاذية (cm)

النتائج

رقم الفحص	1	2	3
L (cm)	11.2	11.4	11
A (cm^2)	80.96	80.96	80.96
h_1 (cm)	65	66	74
h_2 (cm)	44	46	54
t (min)	15	14	17
T Centigrade	16	19	22
a (cm^2)	0.785	0.785	0.785
K_T m/sec	$4.71*10^{-07}$	$4.75*10^{-07}$	$3.29*10^{-07}$
K_{20} m/sec	$5.20*10^{-07}$	$4.87*10^{-07}$	$3.14*10^{-07}$
معدل النفاذية المصححة للحرارة K_{20} m/sec	$4.40*10^{-07}$		

رص التربة (علاقة الكثافة–الرطوبة): Compaction (Moisture – Density Relationship)

التعريف

الرص هو عملية إعادة ترتيب حبيبات التربة بطرد الهواء من فراغاتها حيث ينتج عن نقص حجم فراغات الهواء زيادة في الكثافة للتربة. إن استخدام الردميات الترابية في المنشآت الهندسية أمر وارد جداً مثل (الابنية, السدود، مدرجات هبوط الطائرات، الجسور)، ولكن استخدامها غالباً ما يتطلب تحسين خواصها الهندسية لذا نضطر إلى رصها ، حيث إن عملية الرص تتم باستخدام اما حادلة الأسطوانة المعدنية او حادلة الاطارات المطاطية او حادلة اضلاف الغنم او الحادلة الرجاجة الخ . في عام 1933 م قام العالم بروكتور بأبحاث حول التربة واستقرارها واستنتج بأن الكثافة الجافة للتربة تعتمد على كمية الماء في التربة خلال عملية الرص، والهدف من الرص هو تقليل الفراغات الهوائية في التربة

الغرض من الفحص

تعيين الكثافة الجافة القصوى للتربة وتعيين نسبة الرطوبة المثلى الواجب إضافتها للتربة للحصول على الكثافة القصوى، والنتيجة الطبيعية هي تحسين الخواص الهندسية حيث تزيد المقاومة للقص وتقلل الانضغاطية والنفاذية.

انواع الرص المختبري

توجد 4 أنواع رص مخبرية اخرى وهي:

1) الرص بالصدم (Impact Compaction): تمثل حقليا ماكنة الرص الديناميكي.
2) الرص الستاتيكي (Static Compaction): تمثل حقلياً الأسطوانة المعدنية أو الاطارات المطاطية.
3) الرص بالعجن (Kneading Compaction): تمثل حقلياً اضلاف الغنم.
4) الرص الهزازة (Vibratory Compaction): تمثل حقلياً الرجاجة.

و رص بروكتر يقع ضمن التصنيف الاول لانواع الرص المختبري و توجد طريقتين للرص بطريقة بروكتر. الأولى فحص بروكتر القياسي (ASTM – D698) و الثانية تسمى فحص بروكتر المعدل (ASTM – D1557) والفرق بينهما في الجدول التالي

الفحص	عدد الطبقات	عدد الضربات	مسافة السقوط للمطرقة (cm)	وزن المطرقة (kg)	قطر القالب (cm)
القياسي	3	25	30	2.5	10
المعدل	5	25	45	4.5	10

الاجهزة و الادوات

1. جهاز بروكتر للرص الميكانيكي القياسي و المعدل.
2. قالب بروكتر.
3. جهاز هيدروليكي لاخراج العينة المرصوصة من القالب.
4. اوعية لخلط التربة مع الماء .
5. سكين لتسوية سطح العينة بعد رصها.
6. اسطوانة مدرجة حجمها 500 مل او 1000 مل.
7. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm.
8. اواني تجفيف من الامنيوم
9. فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110± 5 . ° م
10. رذاذ ماء
11. مطرقة برأس مطاطي
12. مسطرة قياس

طريقة العمل

1. نجفف التربة بالهواء تؤخذ منها عينة التربة وتمرر من المنخل 4# وتؤخذ كمية بحدود (5 kg) من المار.
ونقسم لأربع أقسام.
2. يرطب كل قسم برطوبة معينة برشها بالماء وتحريكها جيداً ثم نضعها في أكياس ونغلقها جيداً ونتركها مدة 24 ساعة.
3. يوزن القالب فارغا ونؤخذ أبعاده لحساب حجمه.
4. توضع أول طبقة من التربة ونبدأ برصها بوضع المطرقة عليها وسحبها وتركها تسقط سقوطاً حراً (25 ضربة) حيث يجب توزيع الضربات على كامل سطح التربة.
5. يتم صنع شقوق في سطح التربة باستخدام السكين لكي تلتحم الطبقات مع بعضها.
6. يفتح الجزء العلوي من القالب وتزال التربة الزائدة و يسوى سطح التربة مع سطح القالب و يوزن القالب مع التربة.
7. تستخرج عينة من التربة المرصوصة في القالب بجهاز الضغط الهيدروليكي وتؤخذ منها عينة صغيرة من اتلتربة لحساب المحتوى المائي
8. تكرر الخطوات 4 و 7 على الطبقة الثانية و الثالثة و الرابعة و الخامسة (اذا افترض ان الفحص معدل)

A
Manual rammer
Graduated cylinder
Mold
Moisture cans
Soil specimen
Trowel
Straight edge
Mixing pan
B
C
D
E
F
G
6.190
H
I

الحسابات

تحسب الكثافة الرطبة

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{soil\ in\ mould}}{V_{mould}} \quad gm/cm^3$$

$$V_{mould} = 1000\ cm^3$$

$$\gamma_{wet} = \frac{1877}{1000} = 1.877 \quad gm/cm^3$$

يتم حساب المحتوى المائي للعينة ω حسب العلاقة :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100\ \%$$

$$\omega = \frac{3}{82} * 100 = 3.65\ \%$$

يتم بعد ذلك حساب الكثافة الجافة γ_d للعينة باستخدام العلاقة:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+\omega}$$

$$\gamma_d = \frac{1.877}{1+\ 0.0366} = 1.810 \quad gm/cm^3$$

حساب قيمة الكثافة المقابلة لخط الإشباع للعينة:

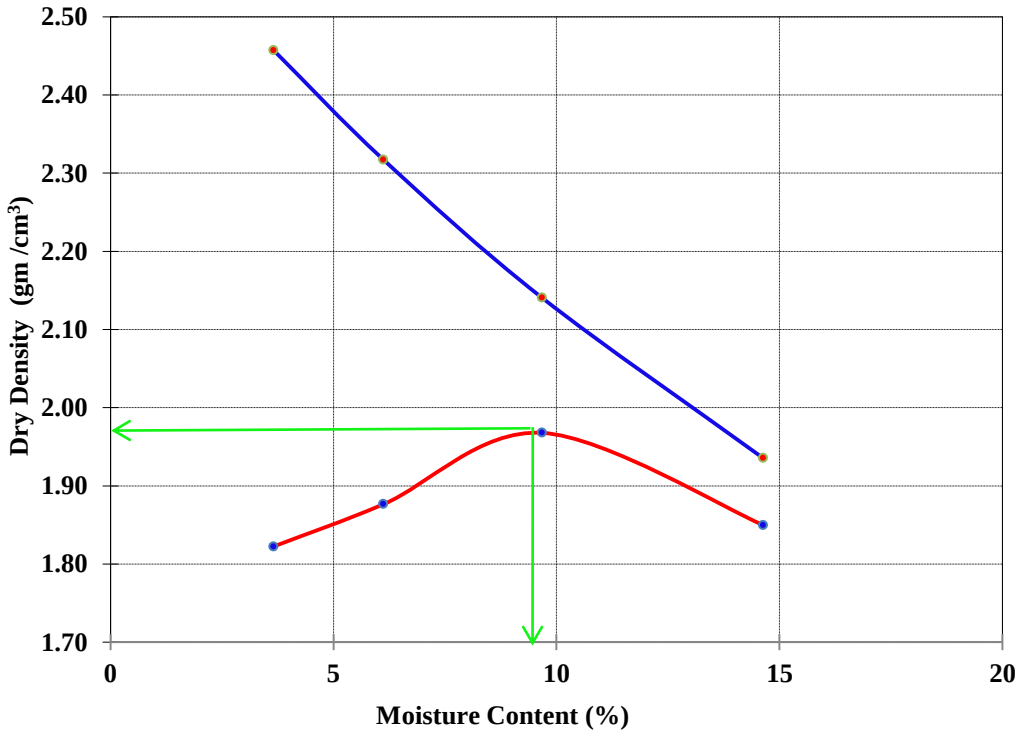
$$Zero\ Air\ Void\ \ Density = \frac{G_s * \gamma_w}{1+\ \omega * G_s} \quad gm/cm^3$$

حيث لو افترضنا ان : $\gamma_W = 1\ gm/cm^3$, $Gs = 2.7$

$$Zero\ Air\ Void\ Density = \frac{2.7\ *\ 1}{1+\ 0.0366\ *\ 2.7} = 2.457 \quad gm/cm^3$$

النتائج

رقم العينة	1	2	3	4
حجم القالب (cm^3)	1000	1000	1000	1000
وزن القالب فارغ (gm)	3984	3957	3965	3967
وزن القالب مع التربة (gm)	5871	5953	6129	6088
وزن التربة في القالب (gm)	1887	1996	2164	2121
الكثافة الرطبة (gm/cm^3)	1.887	1.996	2.164	2.121
وزن الاناء فارغ (gm)	21	16	14	21
وزن الاناء مع العينة الرطبة (gm)	106	120	116	115
وزن الاناء مع العينة الجافة (gm)	103	114	107	103
وزن الماء في العينة (gm)	3	6	9	12
وزن العينة جافة (gm)	82	98	93	82
المحتوى المائي %	3.66	6.12	9.68	14.63
الكثافة الجافة (gm/cm^3)	1.82	1.88	1.97	1.85
Zero air void density (gm/cm^3)	2.457	2.317	2.141	1.935



الكثافة الجافة العظمى هي: $\gamma_{d_{max}} = 1.99 gm/cm3$ و المحتوى المائي الامثل هو $\omega_{opt} = 9.5\ \%$

الكثافة الحقلية ونسبة الرص (Field Density and Relative Compactions)

التعريف

إن تعيين كثافة التربة في الموقع له أهمية كبيرة في الأعمال الترابية وأعمال طبقات الأساس ويمكن قياس هذه الكثافة بعدة طرق من أهمها:

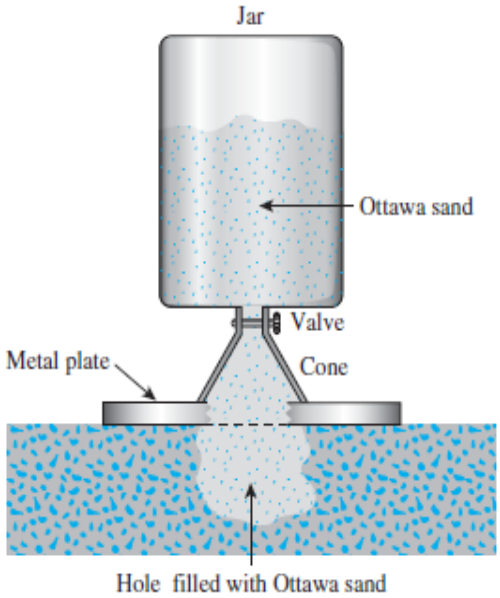
1. طريقة المخروط الرملي (Sand Cone Method).
2. طريقة الاسطوانة القاطعة (Core Cutter Method).
3. طريقة البالون المطاطية (Rubber Balloon Method).
4. طريقة الاشعاع النووي (Nuclear Method).
5. طرق اخرى متعددة مثل الازاحة بالزيت و جهاز الامواج فوق الصوتية.

الغرض من الفحص

يستفاد منها في تعيين كثافة التربة في الموقع في حالتها الطبيعية أو بعد رصها و المساعدة في إيجاد الكثافة الجافة في الموقع والتي من خلالها تحسب نسبة الرص المطلوبة و التي هي المعيار لقبول الرص الموقعي او عدم قبوله.

1. طريقة المخروط الرملي (Sand Cone Method)

الاجهزة و الادوات



1. جهاز فحص الكثافة بطريقة الازاحة بالرمل مملوء برمل اوتاوا.
2. وعاء بلاستك لجمع التربة من الحفرة و
3. اواني تجفيف من الألمنيوم
4. اسطوانة مدرجة حجمها 1000 مل
5. مسطرة حديد.
6. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm.
7. فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110± 5 . ° م
8. قلم حفر
9. مسامير تثبيت
10. مطرقة حديد
11. فرشاة بلاستيكية

طريقة العمل

1. يسوى سطح موقع الفحص و باستخدام رمل ناعم
2. توضع القاعدة الخاصة بالجهاز فوق المكان المرد حساب الكثافة عنده و تثبت القاعدة الخاصة بالجهاز باستخدام مسامير التثبيت و تحفر حفرة بقطر الثقب و يعمق الطبقة المرصوصة والذي يكون بحدود (15 -20) سم.
3. يجمع ناتج الحفر في الوعاء البلاستيكي غير المنفذ للرطوبة و يتم وزن العينة بعد استخراجها و ليكن W_{wet} و تؤخذ كمية قليلة منه لحساب المحتوى المائي للتربة.
4. يوزن المخروط الرملي و الأسطوانة و هي مملوءة بالرمل القياسي قبل اجراء الفحص و ليكن W_1 و بعد ذلك تقلب الاسطوانة مع المخروط و هي مملوءة بالرمل القياسي على القاعدة المثبتة فوق الحفرة ثم يفتح الصمام للسماح بنزول الرمل في الحفرة و تراقب حالة نزول الرمل في الاسطوانة و توقف حركة الرمل بالأسطوانة أي بعد امتلاء الحفرة و القمع يغلق الصمام.
5. تقلب الاسطوانة مع المخروط ما تبقى من الرمل القياسي و يؤخذ وزنهما و ليكن W_2

طريقة حساب كثافة الرمل القياسي

1. توزن الأسطوانة الخاصة بالجهاز و هي مملوءة بالرمل القياسي الساقط من على مسافة محددة باستخدام الاسطوانة المدرجة و يزال الرمل الزائد باستخدام المسطرة الحديدية و بدون رج الاسطوانة و ليكن W_s
2. توزن الأسطوانة الخاصة بالجهاز و هي مملوءة بالماء المقطر و ليكن W_w و تقاس درجة حرارة الماء و لتكن T

الحسابات

1. وزن الرمل الذي ملأ الحفرة = وزن الرمل الذي يملأ الاسطوانة و القمع - وزن الرمل المتبقي بالأسطوانة - وزن الرمل الذي ملأ القمع

$$W_{Sand\ in\ hole} = W_1 - W_2 - W_{cone}$$

$$W_{cone} = 1500\ gm \quad \text{Standard}$$

2. يتم تعيين كثافة الرمل القياسي المستخدم في اجراء التجربة

$$\gamma_{Sand} = \frac{W_s}{V_s}\ gm/cm^3$$

*ملاحظة : تستخرج كثافة الماء بالاعتماد على الحرارة بسبب تغير كثافته مع الحرارة

$$V_s = V_w = W_W * \gamma_w$$

3. تحسب حجم الحفرة

$$V_{hole} = V_s = \frac{W_s}{\gamma_{Sand}}\ cm^3$$

4. كثافة التربة الرطبة في الموقع

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{wet}}{V_{hole}}\ gm/cm^3$$

5. يحسب المحتوى المائي للتربة

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

6. كثافة التربة الجافة في الموقع

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+\omega} \quad gm/cm^3$$

7. تحسب نسبة الرص للتربة الحقلية

$$R.C = \frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d\,max}} 100\% \geq 95\ \%$$

النتائج

رقم النقطة	(1)
وزن التربة المستخرجة من الحفرة W_{wet}	2392
وزن الرمل القياسي و الاسطوانة و القمع قبل الفحص W_1	8984
وزن الرمل القياسي و الاسطوانة و القمع بعد الفحص W_2	5871
وزن الرمل القياسي الذي ملأ القمع	1500
وزن الاناء فارغ (gm)	21
وزن الاناء مع العينة الرطبة (gm)	106
وزن الاناء مع العينة الجافة (gm)	103
وزن الأسطوانة الخاصة بالجهاز و هي مملوءة بالرمل W_s	7842
وزن الأسطوانة الخاصة بالجهاز و هي مملوءة بالماء المقطر W_w	4649
درجة الحرارة التي تم حساب W_w عندها T	18
الكثافة الجافة العظمى(gm/cm^3)	2.509
كثافة الماء المقطر عند T=18 (gm/cm^3)	0.998623
كثافة الرمل القياسي (gm/cm^3)	1.688
المحتوى المائي %	3.66
حجم الحفرة	955.56
الكثافة الرطبة (gm/cm^3)	2.503
الكثافة الجافة (gm/cm^3)	2.414
درجة الرص %	96.2

2. طريقة الاسطوانة القاطعة (Core Cutter Method)

الاجهزة و الادوات

1.ادوات الفحص المخصصة وتشمل الاسطوانة القاطعة بارتفاع 13 سم و قطر 10 سم و الحلقة العلوية و المطرقة المخصصة و الموضحة بالصورة .

2.وعاء بلاستك لجمع التربة من الحفرة

3. اواني تجفيف من الألمنيوم

4.سكين حديد.

5.ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm.

6.فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110± 5 .0° م

7.مطرقة حديد و قلم حفر

النتائج

رقم النقطة	(1)
وزن التربة المستخرجة من الاسطوانة W_{wet}	2392
وزن الاناء فارغ (gm)	21
وزن الاناء مع العينة الرطبة (gm)	106
وزن الاناء مع العينة الجافة (gm)	103
الكثافة الجافة العظمى(gm/cm^3)	2.403
المحتوى المائي %	3.66
حجم الاسطوانة	1000
الكثافة الرطبة (gm/cm^3)	2.392
الكثافة الجافة (gm/cm^3)	2.307
درجة الرص %	96.0

3. طريقة البالونة المطاطية (Rubber Balloon Method).

الاجهزة و الادوات

1. جهاز الفحص بطريقة البالونة المطاطية وكما موضح بالصورة .
2. وعاء بلاستك لجمع التربة من الحفرة
3. اواني تجفيف من الألمنيوم
4. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm.
5. فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110± 5 .0° م
6. مطرقة حديد و قلم حفر

طريقة العمل

1. يتم حفر التربة في المكان المرد حساب الكثافة عنده و بعمق الطبقة المرصوصة مع مراعاة عدم ضياع أي جزء منها عند الحفر و يفضل ان يكون مقطع الحفر دائري الشكل.
2. يؤخذ وزن التربة المستخرجة من الحفرة و لتكن W_{wet}.
3. تؤخذ كمية قليلة منه لحساب المحتوى المائي للتربة.
4. يوضع جهاز الفحص بطريقة البالونة المطاطية و يملأ بالماء الحد اشارة حجم معينة (تؤخذ قراءه الحجم ولتكن V_1) و بعد ذلك تغلق الفتحة الخاصة بتجهيز الماء و يسلط ضغط على الماء باستخدام الكرة المطاطية اعلى الجهاز خلال هذه العملية يلاحظ نزون مستوى الماء باسطوانة الجهاز و تستمر هذه العملية لحين توقف نزول الماء يعني هذا ان البالونة المطاطية قد اخذت شكل الحفرة .
5. تؤخذ القراءة الثانية للحجم للماء داخل الاسطوانة ولتكن V_2
6. بعد اخذ القراءة الثانية يفتح الصمام و يزال ضغط الهواء و يرفع الجهاز من فوق الحفرة.

الحسابات

1. تحسب حجم الحفرة

$$V_{hole} = V_1 - V_2$$

2. كثافة التربة الرطبة في الموقع

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{wet}}{V_{hole}} \quad gm/cm^3$$

8. يحسب المحتوى المائي للتربة

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

3. كثافة التربة الجافة في الموقع

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+\omega} \quad gm/cm^3$$

4. تحسب نسبة الرص للتربة الحقلية

$$R.C = \frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d\,max}} 100\% \geq 95\ \%$$

النتائج

رقم النقطة	(1)
وزن التربة المستخرجة من الاسطوانة W_{wet}	2392
وزن الاناء فارغ (gm)	21
وزن الاناء مع العينة الرطبة (gm)	106
وزن الاناء مع العينة الجافة (gm)	103
الكثافة الجافة العظمى(gm/cm^3)	2.403
قراءة الحجم قبل الفحص V_1	1250
قراءة الحجم بعد الفحص V_2	250
المحتوى المائي %	3.66
حجم الحفرة = فرق قراءات الحجم $V_{hole} = V_1 - V_2$	1000
الكثافة الرطبة (gm/cm^3)	2.392
الكثافة الجافة (gm/cm^3)	2.307
درجة الرص %	96.0

ان لكل واحدة من هذه الطرق عيوب حيث ان الطرق الاولى و الثانية دور خطأ العامل البشري المقصود أو غير المقصود في التأثير على النتيجة بالإضافة إلى ان الطريقة الاولى و الثانية و الثالثة تستغرق مدة24 ساعة لمعرفة الكثافة الجافة ولحين الحصول على نتيجة الرطوبة. و الطريقة الثالثة لا تفضل في الترب الناعمة لأنها ممكن ان تسبب البالونة المطاطية في دفع جدار الحفرة و زيادة الحجم عن الحجم الاصلي للحفرة.

نسبة التحمل الكاليفورني (فحص ال سي بي ار): California Bearing Ratio (C. B. R. test)

التعريف

اقترح هذه الفحص الأمريكي بورتر الذي كان يعمل في قسم الطرق في هيئة كاليفورنيا للنقل بكاليفورنيا في عام 1938م. يتم في هذا الفحص قياس الحمل اللازم لاختراق مكبس ذو قطر معين وبسرعة معينة في عينة التربة عند قيم للمحتوى المائي الأمثل والكثافة الجافة العظمى ، وتحسب نسبة التحميل الكاليفورنية كنسبة بين الحمل اللازم لاختراق المكبس بمقدار 2.5 ملم و 5 ملم داخل عينة التربة وبين الحمل القياسي، وكما يعطى هذا الفحص معلومات عن مدى انتفاخ التربة ومقدار المقاومة المفقودة منها عندما تتشبع بالماء، وكما يمكن إجراء الفحص موقعيا او في المختبر.

الغرض من الفحص

الغرض من CBR لتقييم القوة الميكانيكية لطبقات التربة المستخدمة في الأسس و ما تحت الاسس للطرق. او بعبارة اخرى لتقييم سعة التحميل للتربة المستخدمة لبناء الطرق ويمكن أيضا أن تستخدم لقياس سعة التحميل للتربة تحت مهابط الطائرات. حتى يتم السيطرة على الخواص الهندسية من حيث زيادة مقاومة القص للتربة.

الاجهزة و الادوات

1. جهاز فحص نسبة التحميل الكاليفورني يعمل بسرعة 1.27 mm/sec ومزود بمكبس بقطر 4.95 cm .
2. اثقال اضافية بقطر 15.1 cm و ارتفاع 2.1 cm تمثل طبقة الاساس و الطبقة الاسفلتية وزنها منها 2.5 kg.
3. قالب الرص الخاص بالتحميل الكاليفورني بقطر 15.2 cm و ارتفاع 17.8 cm
4. قرص فاصل (Spacer disk) بقطر 15.1 cm و ارتفاع 5.1 cm .
5. فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110 ± 0. 5 °C
6. جهاز الرص الميكانيكي الخاص ببروكتر للرص القياسي و المعدل
7. جك هيدروليكي لإخراج العينة المرصوصة من القالب.
8. سكين لتسوية سطح العينة بعد رصها.
9. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm.
10. اسطوانة مدرجة حجمها 500 ml .
11. اواني تجفيف من الألمنيوم.
12. اوعية لخلط التربة مع الماء.
13. مسطرة قياس حديدية
14. منخل #4

طريقة العمل

1. تجهز عينة من التربة المارة من منخل 4# وتخلط مع المحتوى المائي الأمثل كما حدد في فحص رص بروكتر المختبري وبوزن 8 كيلو غرام على الاقل.
2. يتم اخذ وزن اسطوانة القالب مع بالقاعدة و بعد وضع القرص الفاصل و ورقة الترشيح داخل القالب و بدون الحلقة الاضافية للقالب.
3. يتم اخذ ارتفاع اسطوانة القالب بعد طرح ارتفاع القرص الفاصل و بدون الحلقة الاضافية للقالب و القطر لحساب الحجم الصافي الذي سيملأ بالتربة.
4. تربط الحلقة الاضافية و يتم رص عينة التربة حسب طريقة رص بروكتر القياسية و المعدلة و حسب الطريقة التي تم حساب الكثافة الجافة العظمى و المحتوى المائي الامثل بها. (أي اذا تم اخذ حساب الكثافة الجافة العظمى و المحتوى المائي الامثل من الفحص الرص المعدل فيتم حدل قالب مارشال بخمس طبقات و بعشر ضربات و بالمحتوى المائي الامثل و مسافة السقوط ووزن المطرقة من الطريقة المعدلة.
5. بعد اتمام الرص تفتح الحلقة الاضافية عن القالب الأسطواني ثم تزال التربة الزائدة ليتساوى سطح التربة مع سطح القالب وفي حالة وجود فجوات تضاف تربة لسدها من نفس التربة.
6. يؤخذ وزن القالب مع التربة تؤخذ عينة من التربة لتحديد المحتوى المائي.
7. توضع ورقة ترشيح على قاعدة أخرى ثم يفك القالب ويقلب مع العينة تربط القاعدة الجديدة.
8. ضع مجموعة من الأوزان بحيث لا تقل عن 4.5 كيلو غرام و التي تمثل ضغط التربة (Overburden Pressure) .
9. يتم غمر العينة تماماً بالماء لمدة 96 ساعة.
10. يربط المؤشر المدرج Dial Gauge والذي دقة قراءته 0.01 ملم ثم صفّر المقياس.
11. يسجل زمن بداية الفحص و تؤخذ القراءات بعد 12، 24، 36 ، 48 ، 72 ، 96 ساعة لتحديد مقدار الانتفاخ
12. بعد الانتهاء من تحديد مقدار الانتفاخ يستخرج القالب من الماء يترك لمدة 15 دقيقة لخروج الماء وليجف سطح التربة , ثم يحسب وزن التربة مع القالب.
13. ضع القالب في جهاز فحص التحميل الكاليفورني تحت المكبس مع الأوزان الاضافية ويصفر مؤشر الاختراق.
14. يتم تسليط الحمل بالتدريج بحيث تكون سرعة الاختراق للمكبس 1.27 ملم / دقيقة . و تؤخذ قيم الضغط لمعدل اختراق ثابت كل نصف ملم اختراق و لمقدار 12,5 ملم .
15. بعد انتهاء الفحص تؤخذ عينات من الثلث الأول والوسطي والأخير لتحديد المحتوى المائي للتربة المرصوصة.
16. تكرر العملية من النقطة رقم 1 الى النقطة رقم 15 السابقة لقالبين اخرين و بعدد ضربات مختلف فقط وهي 30 و 56 ضربة و تعاد نفس الاجراءات

الحسابات

1. يتم رسم منحنى الحمل مع الاختراق ثم سجل مقدار الحمل عند الاختراق 2.5 mm و 5.0 mm ومنها تحدد نسبة التحمل الكاليفورني و ثلاثة قوالب من خلال تطبيق المعادلة التالية بالمعادلة التالية.

$$\mathbf{CBR}\ \% = \frac{\mathbf{P}_{sample}}{\mathbf{P}_{standard}} * \mathbf{100}$$

2. يتم اختيار القيمة الاكبر ما بين نسبة التحمل الكاليفورني عند الاختراق 2.5 mm و 5.0 mm للقالب الواحد حيث

اذا كانت $CBR_{2.5mm} < CBR_{5.0mm}$ النتائج صحيحة

واذا كانت $CBR_{2.5mm} > CBR_{5.0mm}$ يعاد الفحص

واذا بقيت $CBR_{2.5mm} > CBR_{5.0mm}$ تؤخذ قيمة $CBR_{5.0mm}$

3. يتم حساب المحتوى المائي والكثافة الجافة قبل الفحص من خلال العلاقة التالية.

$$\omega = \frac{\mathbf{W_w}}{\mathbf{W_s}} * \mathbf{100}\ \%$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+\omega}$$

4. يتم رسم العلاقة ما بين الكثافة الجافة و قيم نسبة التحميل الكاليفورني لعينات القوالب الثلاث و يتم تحديد نسبة التحميل الكاليفورني للعينة كنسبة من الكثافة الجافة العظمى (قيمة C.B.R عند 95 %).

5. يتم حساب (نسبة الانتفاخ %) في العينة من خلال العلاقة التالية.

حيث

L_0 ارتفاع النموذج قبل الفحص

L_1 ارتفاع النموذج بعد الفحص

$$Swelling\ ratio = \frac{L_1 - L_0}{L_0} * 100\ \%$$

او يحسب مقدار الانتفاخ بوحدات (mm) يحسب من خلال اخذ قراءة المؤشر المدرج (الدايل كيج) قبل استخراجه من الماء بعد مضي 96 ساعة من وضعه بالماء.

النتائج

مثال (1): النتائج التالية لفحص التحميل الكاليفورني. احسب قيمة C.B.R عند 95 % من الكثافة الجافة العظمى المعدلة و التي مقدارها 2.204 غم\سم^3 مع رسم منحني علاقة الحمل- اختراق. علما ان المحتوى المائي الامثل هو8.2 % و مساحة المكبس هي 19.2 سم^3.

حدل قوالب التحميل الكاليفورني			
عدد الضربات	10	30	56
وزن القالب و النموذج(غم)	11160	11351	10950
وزن القالب (غم)	6497	6504	5941
حجم القالب (سم)^3	2124	2117	2121
وزن الاناء و التربة الرطبة (غم)	654.4	670.2	902.7
وزن الاناء و التربة الجافة (غم)	607.2	622.5	836.7
وزن الاناء فارغ (غم)	13	16	14

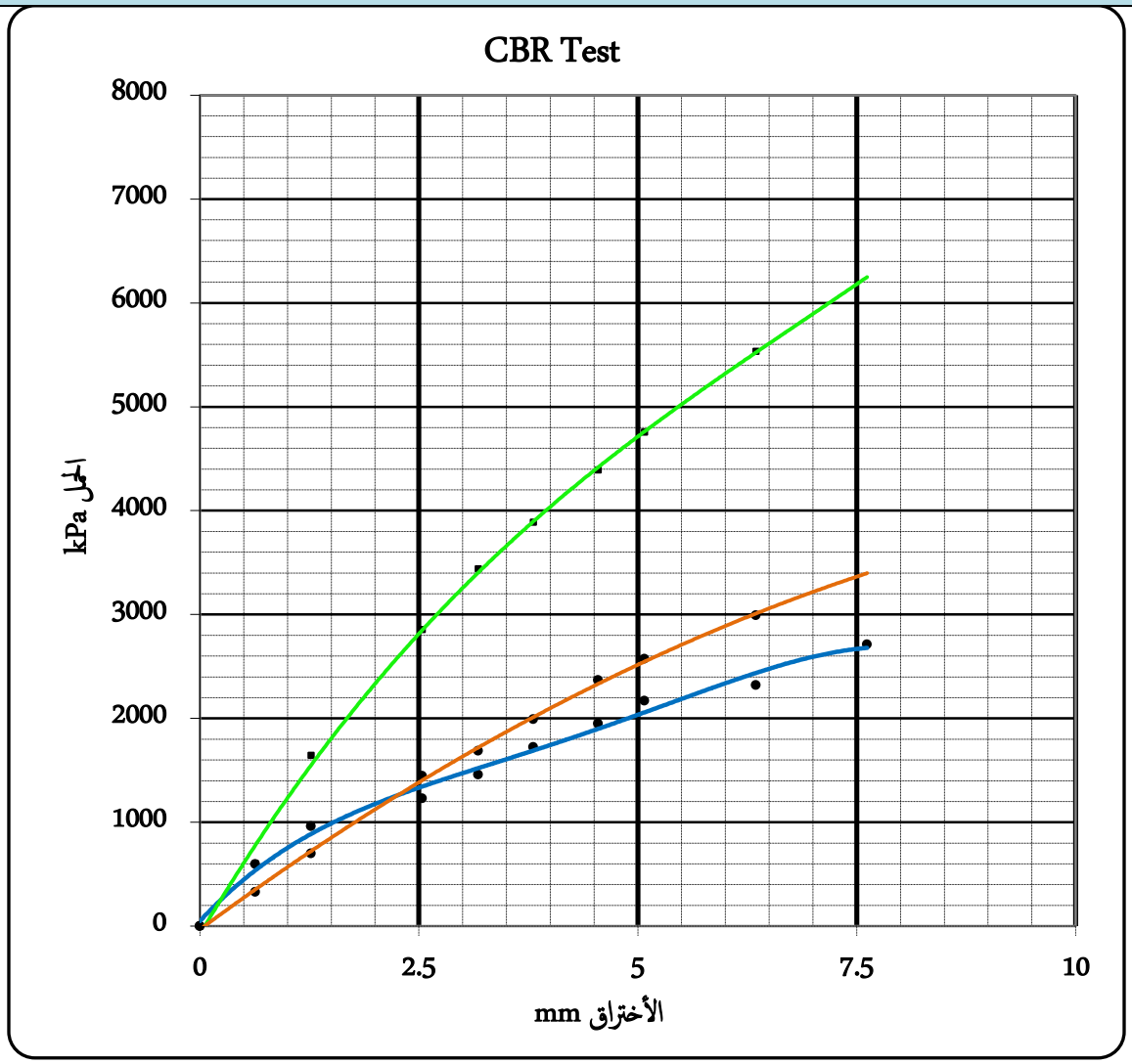
فحص الحمل - الاختراق			
عدد الضربات	10	30	56
الاختراق mm	Force kN	Force kN	Force kN
0	0.0	0.0	0.0
0.5	1.1	1.2	0.6
1.27	1.8	3.2	1.3
2.54	2.4	5.5	2.8
3.18	2.8	6.6	3.2
3.81	3.3	7.5	3.8
4.55	3.7	8.4	4.5
5.08	4.2	9.1	4.9
6.35	4.5	10.6	5.7
7.62	5.2		

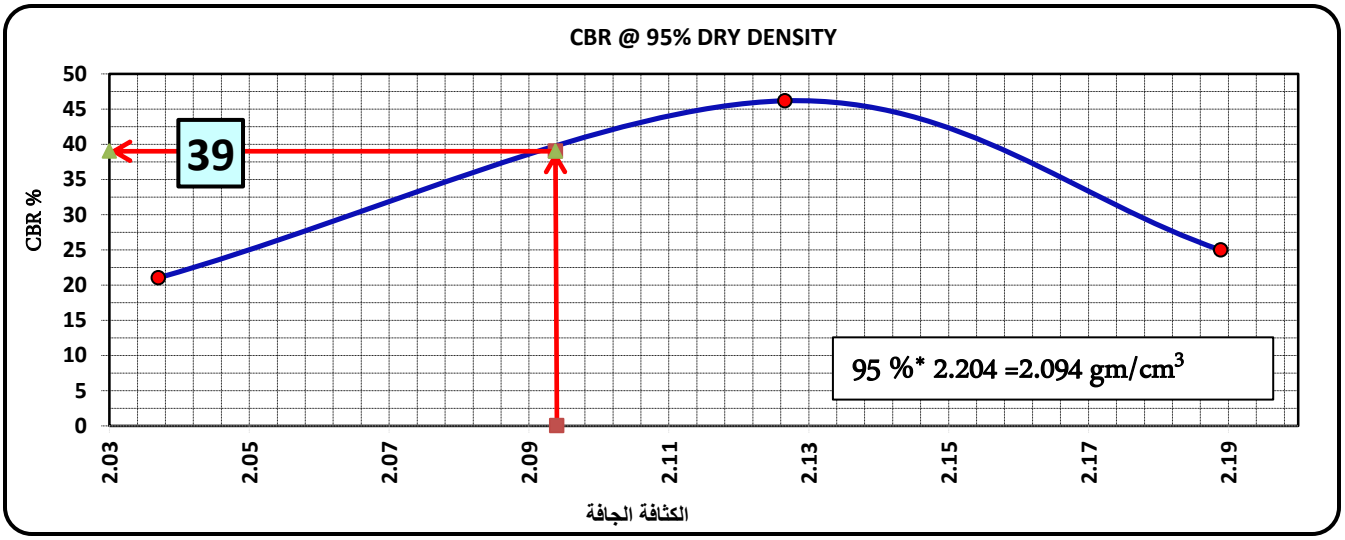
الحل:

حدل قوالب التحميل الكاليفورني			
عدد الضربات	10	30	56
المحتوى المائي	7.94	7.86	8.02
الكثافة الرطبة	2.195	2.290	2.362
الكثافة الجافة	2.034	2.123	2.186

فحص الحمل - الاختراق			
عدد الضربات	10	30	56
الاختراق mm	Load kPa	Load kPa	Load kPa
0	0	0	0
0.5	596	596	596
1.27	962	962	962
2.54	1228	1228	1228
3.18	1458	1458	1458
3.81	1724	1724	1724
4.55	1948	1948	1948
5.08	2167	2167	2167
6.35	2319	2319	2319
7.62	2710	2710	2710

نتائج فحص التحميل الكاليفورني					
عدد الضربات	10		30		56
الاختراق mm	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	5.0
الحمل القياسي kPa	6900	10300	6900	10300	6900	10300
الحمل المصحح kPa	1228	2167	2856	4756	1446	2571
CBR %	17.8	21.0	41.4	46.2	21.0	25.0
CBR $_{Max}$ %	21.0		46.2		25.0	


CBR Test
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
الحمل kPa
0
2.5
5
7.5
10
الأختراق mm


CBR @ 95% DRY DENSITY
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
CBR %
39
95 %* 2.204 =2.094 gm/cm3
2.03
2.05
2.07
2.09
2.11
2.13
2.15
2.17
2.19
الكثافة الجافة

فحص الانضمام باتجاه واحد One Dimension Consolidation(Oedometer test)

التعريف

تنقل المنشآت أحمالا على التربة إلى ناتجة عن وزنها على شكل إجهادات ينتج عن هذه الاجهادات إعادة ترتب حبيبات التربة بحيث تتقارب من بعضا أو تزاح من مكانا أي يحدث في التربة اعادة ترتيب للحبيبات عندما تتعرض التربة الناعمة والمشبعة الى زيادة في الإجهادات يحدث فيها تغيير في الحجم و يصاحب هذا التغيير خروج للماء ويكون التغيير في الحجم تدريجيا مع خروج الماء إلى ان تصل الى حالة الاتزان اي عند توقف خروج الماء, حيث بالبداية الماء هو الذي يحمل الاجهاد وبعد ذلك يتبدد الماء المسامي في الفجوات لحين الخروج من التربة و ينتقل الاجهاد تدريجيا للتربة. ان عملية الانتقال تتباطأ تدريجيا لان بزيادة الضغط المطبق على العينة يتناقص معامل النفاذية و بذلك يقل معدل خروج الماء من العينة.

الغرض

حساب قيم مؤشر الانضغاط (C_c) و معامل الانضمام (C_v) و اقصى اجهاد انضمام سابق(σ'_c) و معامل الانضغاطية (a_v) و معامل التغير الحجمي (m_v) و معامل النفاذية (k) بالاضافة الى معاملات اخرى التي يستفاد منها في حسابات الهبوط للتربة و معرفة المعدل الزمني الذي تستغرقه التربة لحدوث مقدار معين من الهبوط.

الاجهزة و الادوات

1. جهاز فحص الانضمام Consolidometer
2. فرن تجفيف (Drying oven) يصل الى 110± 5 .0° م
3. مؤشر ازاحة او دايك كيج يقرأ لغاية 0.01 mm
4. ميزان حساس يقرأ لغاية 0.01 gm.
5. مسطرة قياس حديدية او فيرنية
6. اواني تجفيف من الألمنيوم
7. سكين لقطع النماذج
8. احجار مسامية
9. ورق ترشيح
10. ساعة توقيت
11. اثقال

طريقة العمل

يتم تحديد مقدار الهبوط والوقت الذي يستغرقه نموذج التربة للهبوط و يتم ذلك بوضع عينة التربة في حلقة معدنية ووضع حجرة مسامية على اعلى وأسفل الحلقة لتسمح بمرور الماء من خلالها من ثم توضع في جهاز الانضمام

1. يتم تحميل العينة وتسجيل مقدار الهبوط الحاصل مع الوقت حتى يتوقف الهبوط وعادة يتم ذلك في خلال (24) ساعة من بداية الفحص ويتم رسم النتائج بيانيا لحساب قيمة C_v وتكررهذه العملية بمضاعفة الحمل و اخذ القراءات للهبوط وهكذا حتى يصل الى حمل اعلى من قيمة تحميل التربة من المبنى الذي سينشأ على هذه التربة ومن الرسم البياني يتم تحديد معامل الانضمام لكل مرحلة تحميل و يحسب منه معامل الانضمام و يؤخذ معدل قيم معامل الانضمام الذي يستخدم في تحديد مقدار الهبوط والوقت اللازم للحصول عليه باستخدام معادلات تحديد الهبوط.
2. ترسم العلاقة بين مقدار التحميل و نسبة الفجوات عند كل مرحلة تحميل و من خلال هذه العلاقة تحسب قيمة مؤشر الانضغاط و مؤشر الانتفاخ و مؤشر اعادة التحميل و كما في المخططات التالية.

اجراءات الفحص

1. توزن الحلقة المعدنية و ليكن W_1
2. قياس ارتفاع الحلقة و ليكن h و القطر و ليكن d
3. يحسب المحتوى المائي قبل الفحص و ليكن ω_1 و الوزن النوعي و ليكن G_s.
4. من اسطوانة شيلبي يقطع نموذج تقريبا بمقدار القطر الخارجي للحقة المعدنية و ارتفاع بحدود 5 سم وتدور الحلقة على التربة المقطوعة و لحين ان تغرس الحلقة بداخل التربة و يسوى سطح الحلقة من الجانبين مع مراعاة ان تكون السكين بوضع افقي على العينة وعدم وجود فراغات ما بين العينة و الحلقة المعدنية.
5. خذ وزن الحلقة المعدنية و النموذج بداخلها مع الصفيحة الزجاج وليكن W_2
6. تربط الحلقة المعدنية بالخلية بعناية بعد وضع الاحجار المسامية
7. توضع صفيحة التحميل فوق الحجر المسامي و تقرب ذراع التحميل حتى تمس صفيحة التحميل
8. يصفر مؤشر الازاحة فوق النموذج
9. يتم وضع الحمل الاول 0.5 kg في ذراع التحميل. بصورة انيه يسمح للذراع بالنزول و تشغل ساعة التوقيت
10. يسجل قراءات مؤشر الازاحة مع الوقت التراكمي كما في المثال.
11. تعاد الخطوة 9 و 10 لأحمال مختلفة 1 , 2 , 4 , 8 و 16 وهذه المرحلة تسمى مرحلة التحميل توضع في مرحلة ازالة الحمل 8 , 4 , 2 , 1 و 0.5 .
12. في اخر مرحلة تحميل يفتتح النموذج و يؤخذ له المحتوى المائي بعد الفحص ω_2

الحسابات و النتائج

1. لكل حمل تؤخذ ورقة نصف لوغاريتمية ترسم فيها تغيير الارتفاع مع الزمن بالدقائق لحساب معامل الانضمام C_v
2. في نهاية كل مرحلة تحميل يحسب نسبة الفجوات و ترسم العلاقة بين التغيير في نسبة الفجوات مع الاجهاد العمودي المؤثر على التربة لحساب قيم مؤشر الانضغاط (C_c) مؤشر الانتفاخ (C_s) و مؤشر اعادة الانضغاط (C_r) و اقصى اجهاد انضمام سابق (σ'_c) و معامل الانضغاطية (a_v).
3. ترسم العلاقة بين التغيير في نسبة الفجوات مع الاجهاد العمودي المؤثر على التربة لحساب قيم معامل الانضغاطية (a_v) و منه يستخرج معامل التغير الحجمي (m_v) و معامل النفاذية (k).

مثال : النتائج التالية لفحص الانضمام لتربة طينية احسب قيم كل من قيم مؤشر الانضغاط (C_c) و معامل الانضمام (C_v) و اقصى اجهاد انضمام سابق (σ'_c) و معامل الانضغاطية (a_v) و معامل التغير الحجمي (m_v) و معامل النفاذية k

Time – Settlement Results (1 unit on dial gage = 0.0001 mm)

Loading= 0.5 kg	
time	dail reading
0	0
0.1	13
0.25	18
0.5	25
1	34
2	40
4	54
8	77
15	90
30	126
60	144.5
130	160
300	162
1380	169

loading=1.0 kg	
time	dail reading
0	169
0.1	175
0.25	177
0.5	180.5
1	184
2	189.5
4	196
10	211
15	215
31	227
60	248
121	250
240	254
562	255

loading=2 kg	
time	dail reading
0	255
0.1	255.5
0.25	256
0.5	256.5
1	257
2	257.5
4	258
8	258.5
15	262.5
30	283
60	286
128	292.5
240	297
335	299
390	300
678	303
1380	303.5
1520	304

loading= 4 kg	
time	dail reading
0	313
0.06	319
0.15	328
0.3	336
1	357
2	375
4	398
8	428
15	453
30	464
60	472.5
120	479.5
290	486
395	488
1230	496

unloading=2 kg	
time	dail reading
0	496
0.1	496
0.25	496
0.5	495.5
1	495
2	494
4	493.5
8	493
15	492.5
30	492.5
70	492.5
140	492.5
215	492.5

unloading=1 kg	
time	dail reading
0	492.5
0.1	492.5
0.25	492.5
0.5	492
1	490.5
2	486.5
4	481.5
8	477.5
15	474.5
44	472.5
60	471.5
218	470.5

unloading= 0.5 kg	
time	dail reading
0	470.5
0.06	469.5
0.5	466
1	464.5
2	461.5
4	458.5
8	454
15	450.5
30	447
60	444.5
110	443.5
930	440.5

reloading=1 kg	
time	dail reading
0	440.5
0.1	440.7
0.25	441
0.5	441.2
1	441.5
2	441.6
4	441.8
8	442
15	442.1
30	442.4
60	442.4
120	442.4

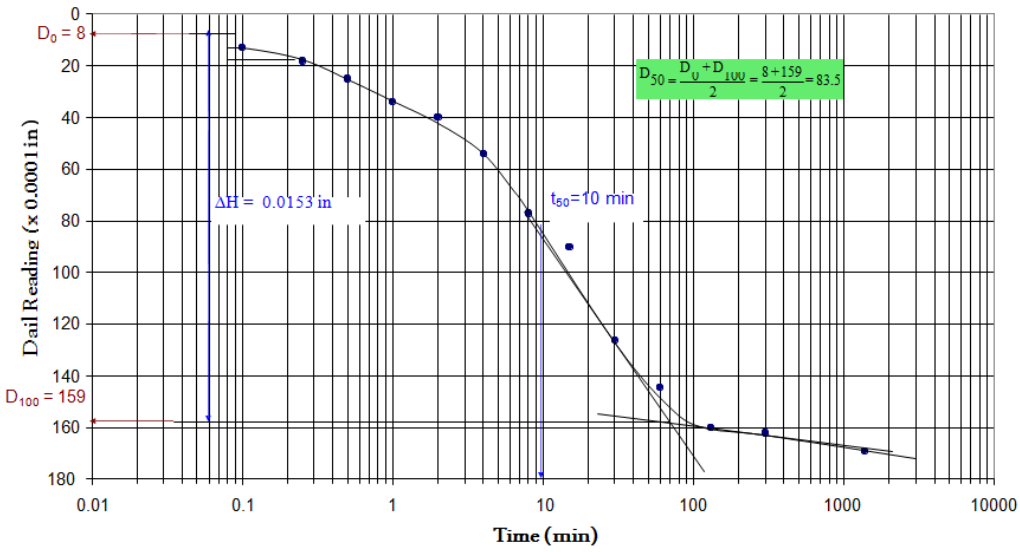
reloading=2 kg	
time	dail reading
0	442.4
0.1	442.9
0.25	443.4
0.5	444.4
1	445.1
2	445.3
4	445.4
8	445.9
15	446.3
30	446.4
60	446.5

reloading=4 kg	
time	dail reading
0	446.5
0.1	446.5
0.25	446.6
0.5	449.5
1	456.5
2	465.5
4	473.5
8	481
17	485.5
30	488
108	490.5

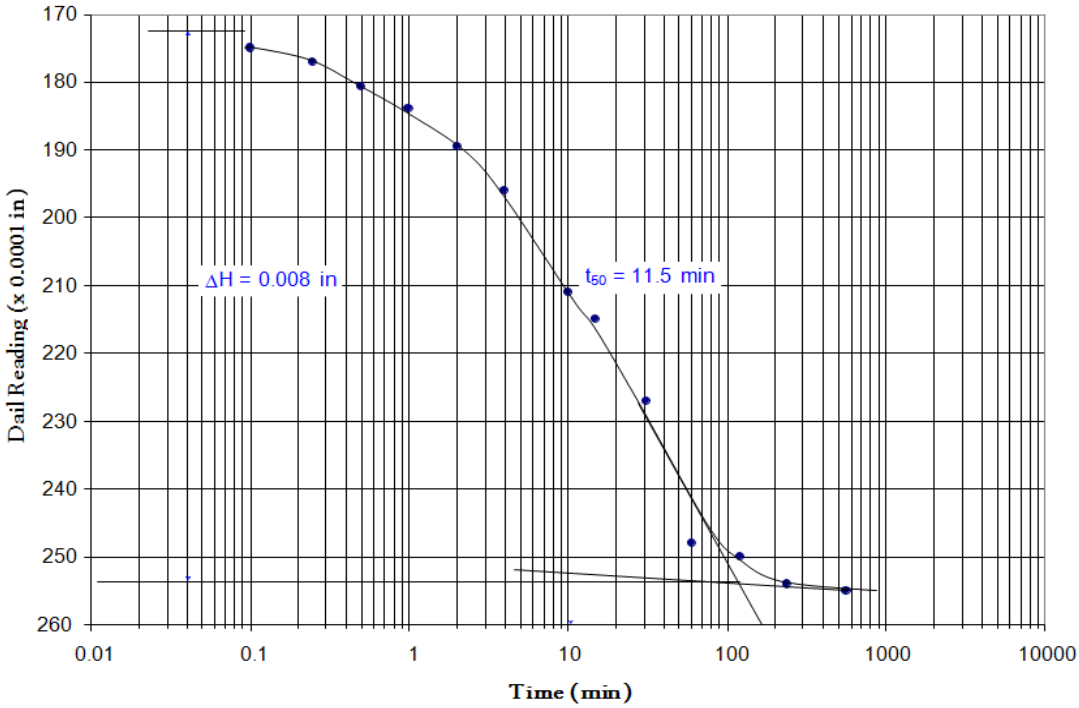
reloading=8 kg	
time	dail reading
0	500
0.1	510
0.25	518
0.5	528
1	542
2	561.5
4	580
8	604
15	619.5
30	631.8
60	640
127	642
205	651
228	652

reloading=16 kg	
time	dail reading
0	652
0.1	672
0.25	687
0.5	702
1	727
2	754
4	800.5
8	816
15	836.5
30	850
60	860
115	867

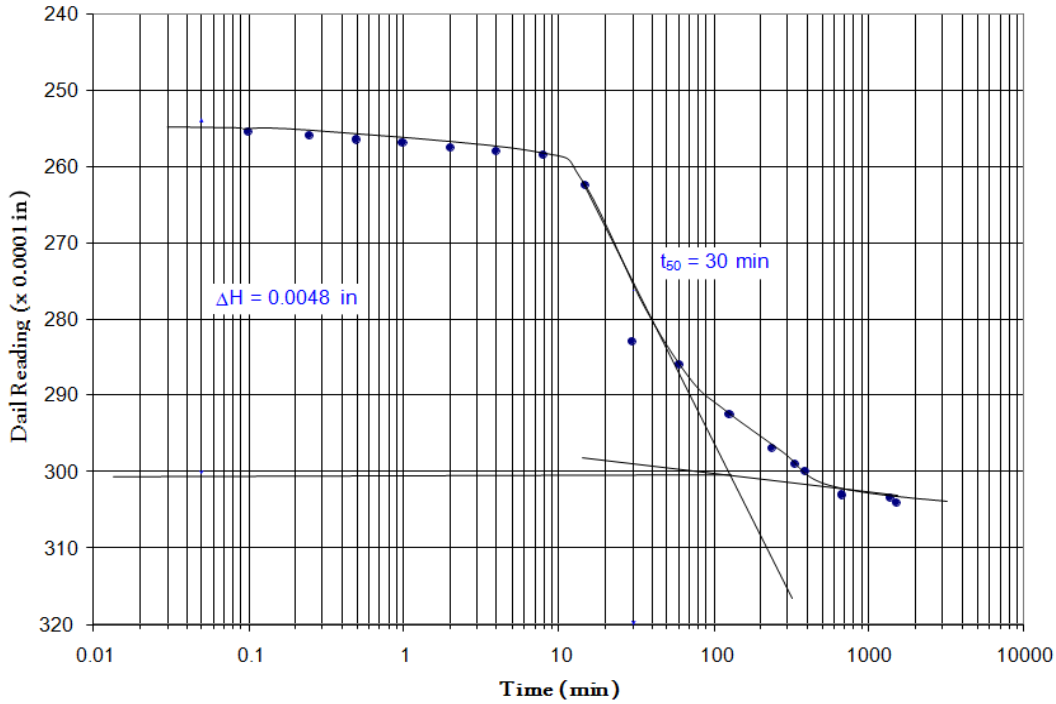
Loading = 0.5 kg

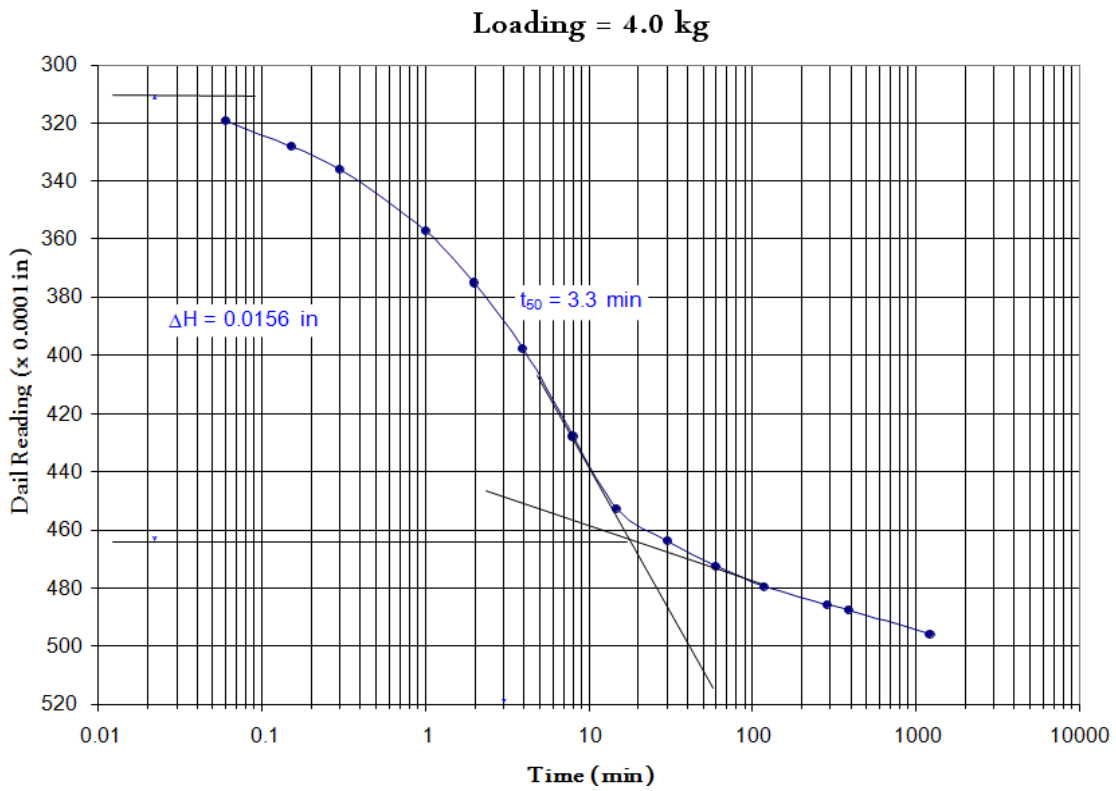


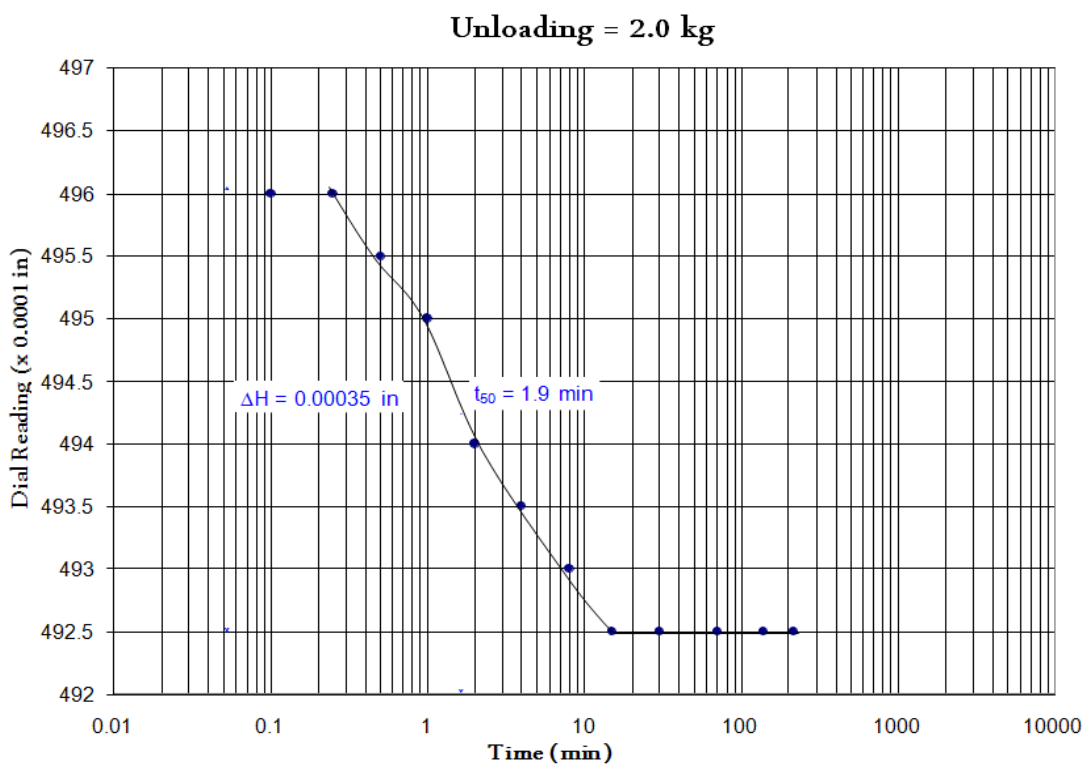
Loading = 1.0 kg

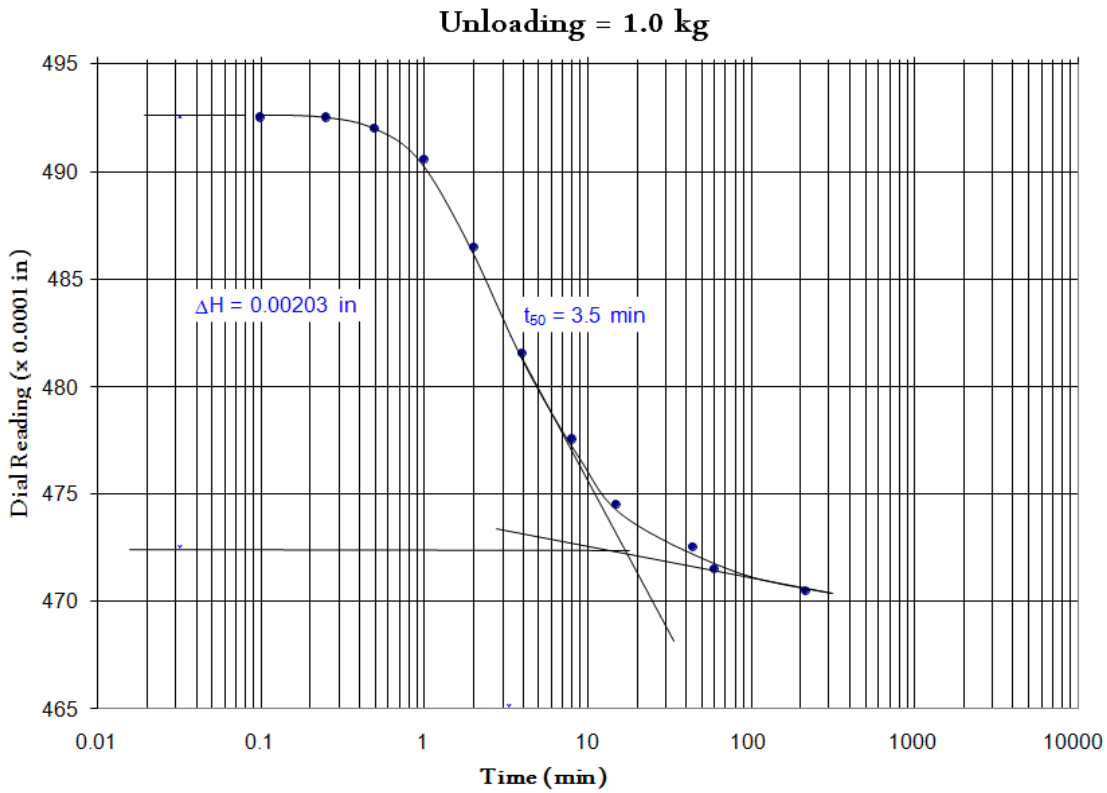


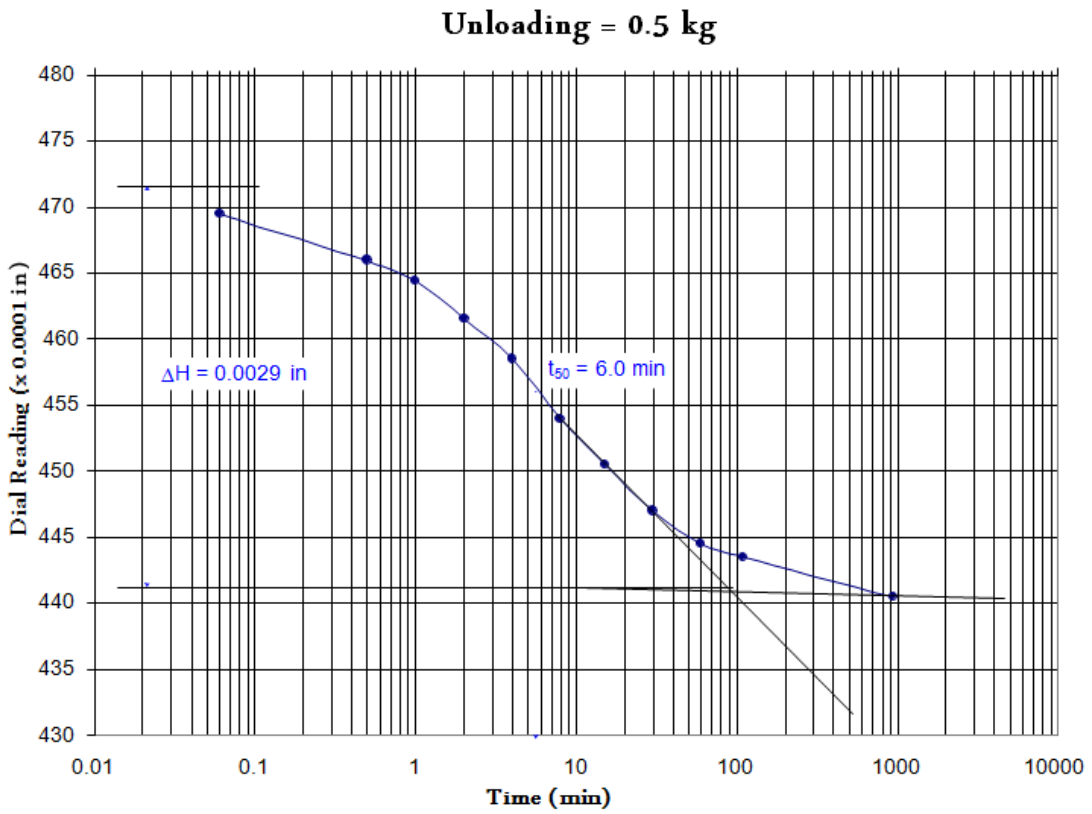
Loading = 2.0 kg

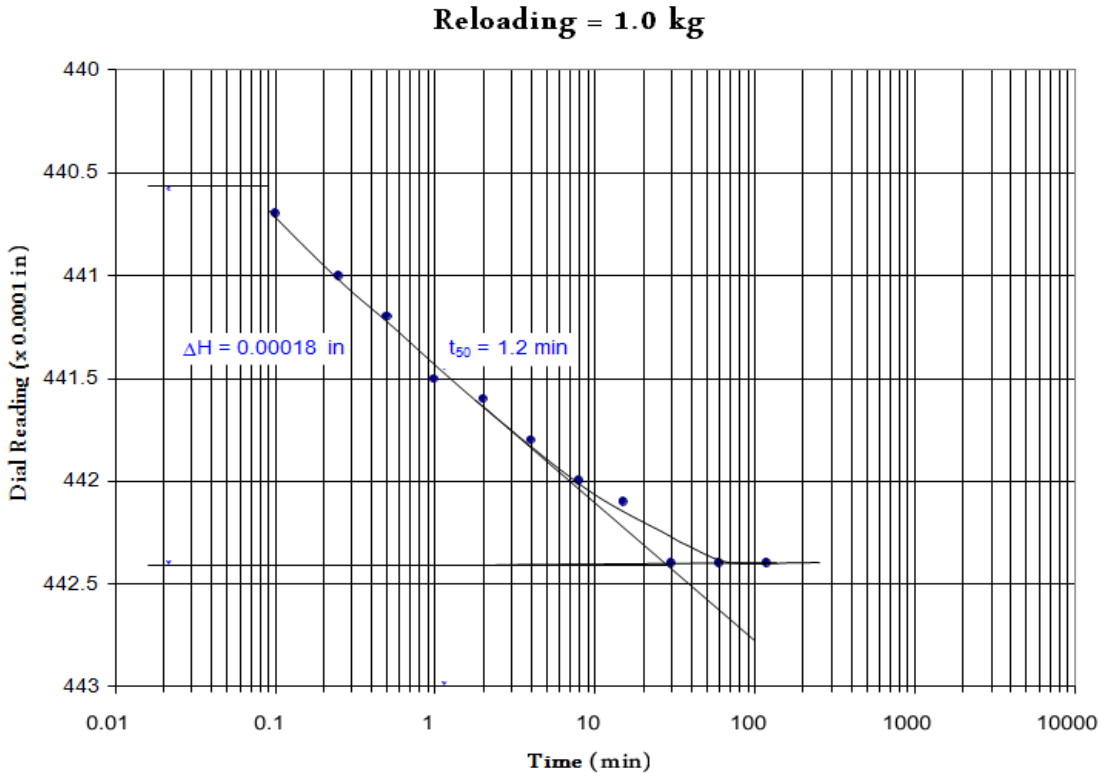


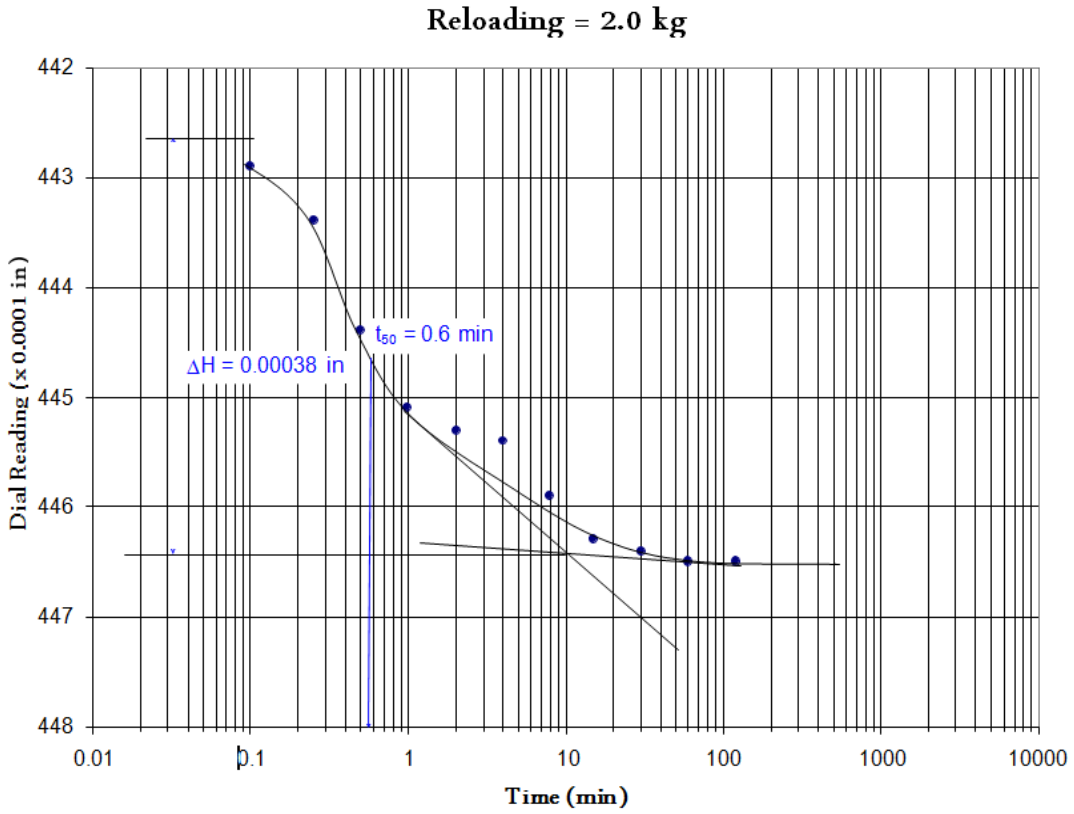

Loading = 4.0 kg
Dail Reading (x 0.0001 in)
Time (min)
ΔH = 0.0156 in
t50 = 3.3 min
300
320
340
360
380
400
420
440
460
480
500
520
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000

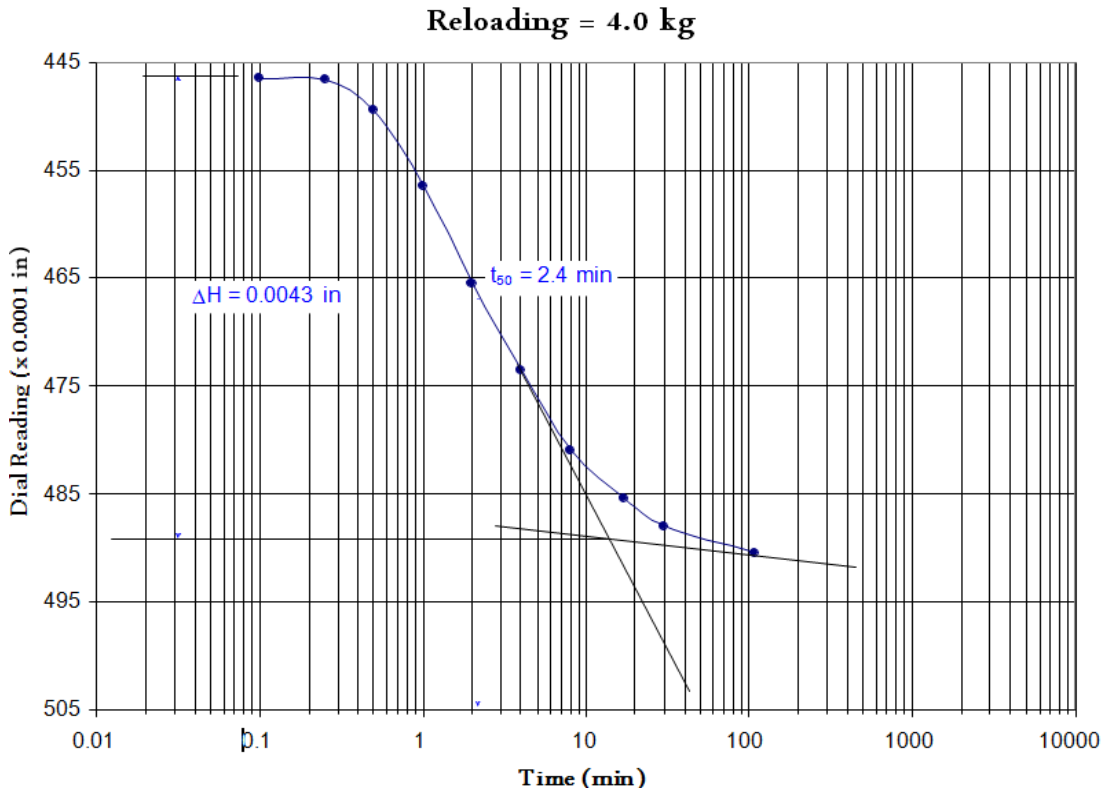

Unloading = 2.0 kg
Dial Reading (x 0.0001 in)
Time (min)
ΔH = 0.00035 in
t50 = 1.9 min
497
496.5
496
495.5
495
494.5
494
493.5
493
492.5
492
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000

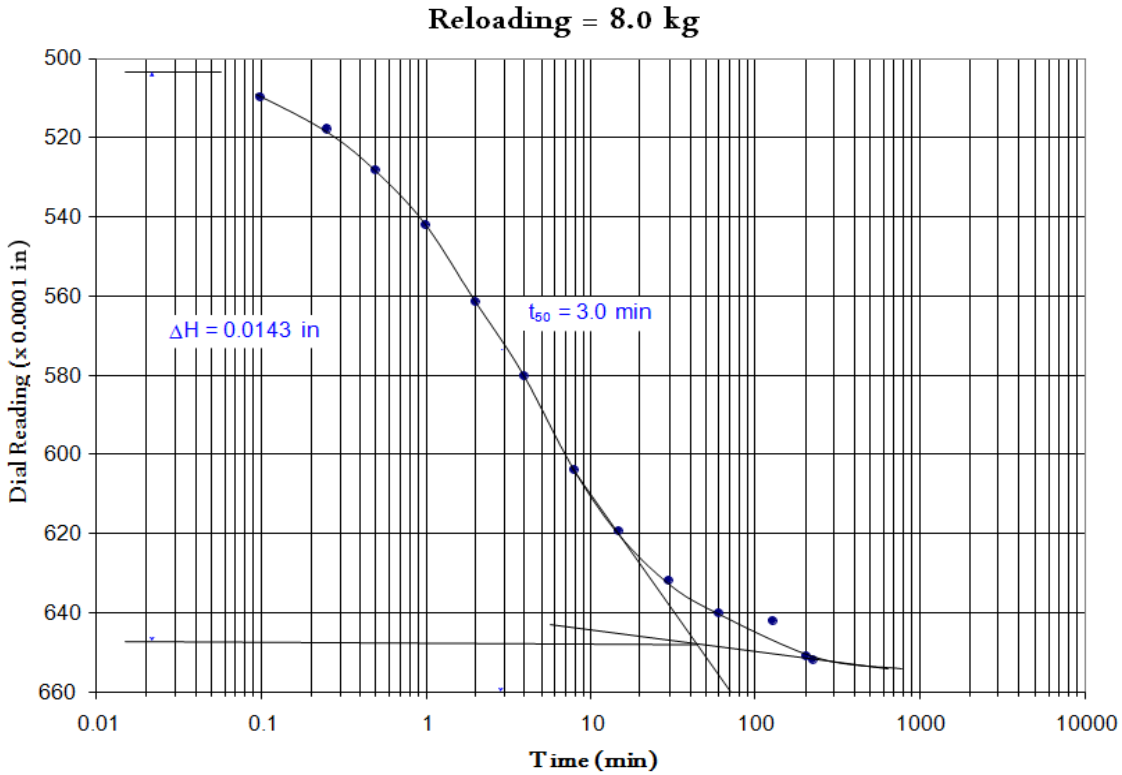

Unloading = 1.0 kg
Dial Reading (x 0.0001 in)
Time (min)
ΔH = 0.00203 in
t50 = 3.5 min
495
490
485
480
475
470
465
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000


Unloading = 0.5 kg
Dial Reading (x 0.0001 in)
Time (min)
ΔH = 0.0029 in
t50 = 6.0 min
480
475
470
465
460
455
450
445
440
435
430
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000

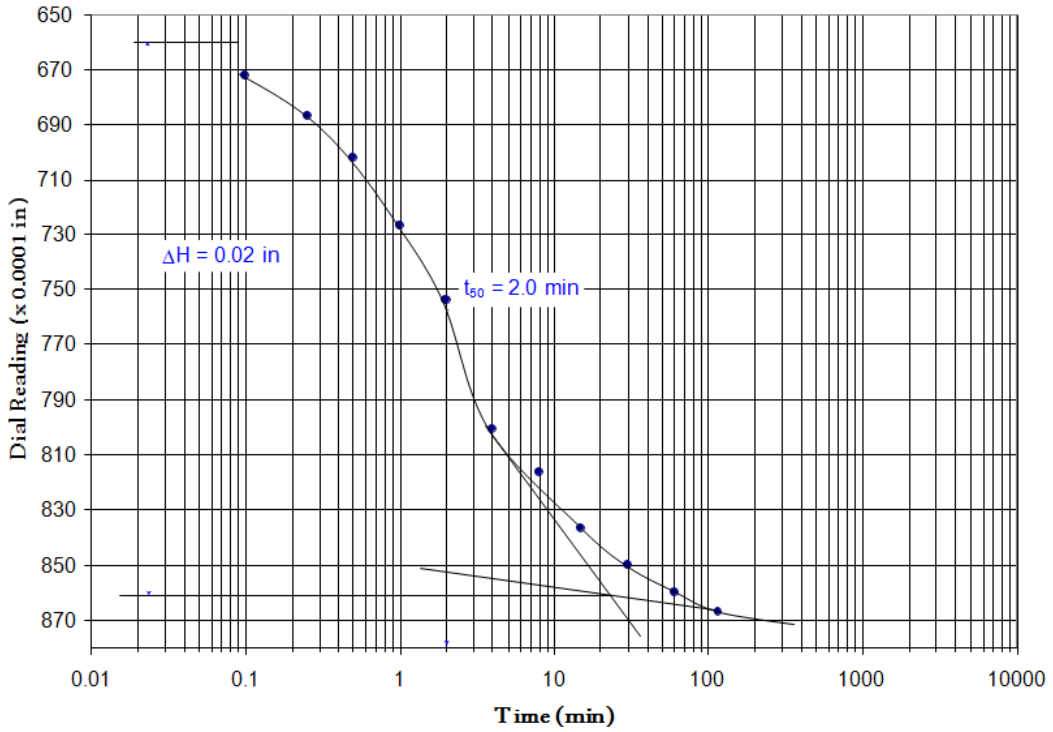
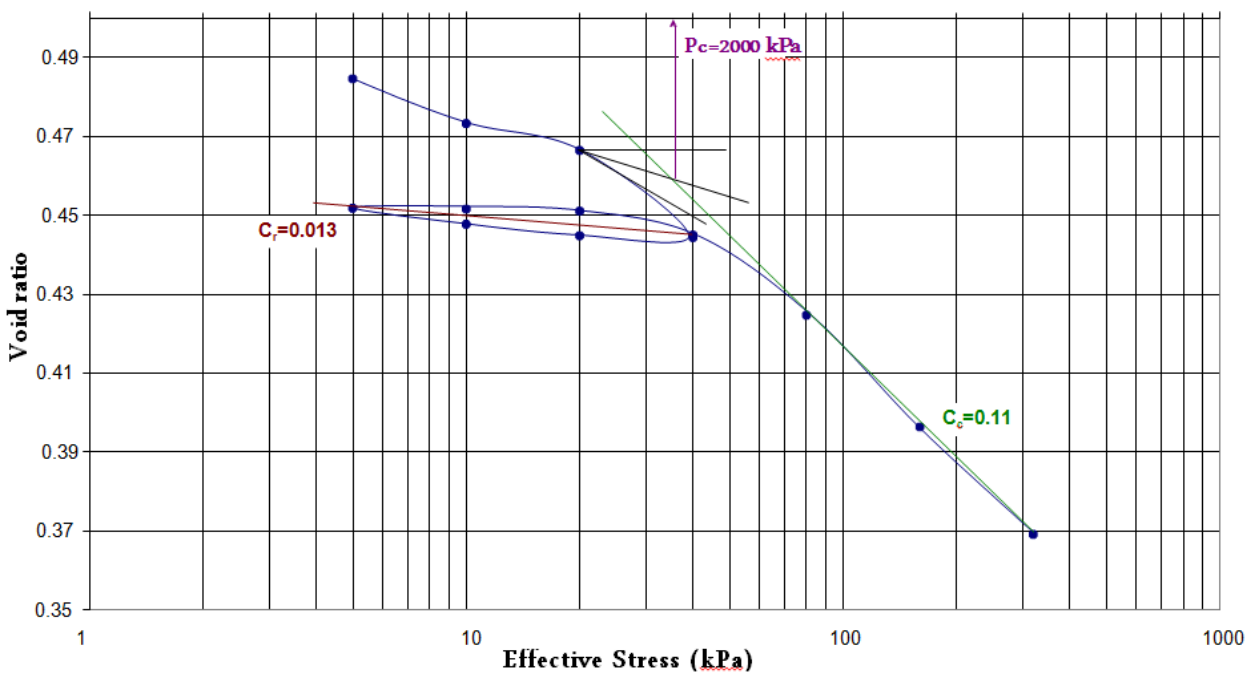

Reloading = 1.0 kg
Dial Reading (x 0.0001 in)
Time (min)
ΔH = 0.00018 in
t50 = 1.2 min
440
440.5
441
441.5
442
442.5
443
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000


Reloading = 2.0 kg
Dial Reading (x 0.0001 in)
Time (min)
ΔH = 0.00038 in
t50 = 0.6 min
442
443
444
445
446
447
448
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000


Reloading = 4.0 kg
445
455
465
475
485
495
505
Dial Reading (x 0.0001 in)
ΔH = 0.0043 in
t50 = 2.4 min
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000
Time (min)


Reloading = 8.0 kg
500
520
540
560
580
600
620
640
660
Dial Reading (x 0.0001 in)
ΔH = 0.0143 in
t50 = 3.0 min
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000
Time (min)

Reloading = 16 kg



Void ratio - Pressure