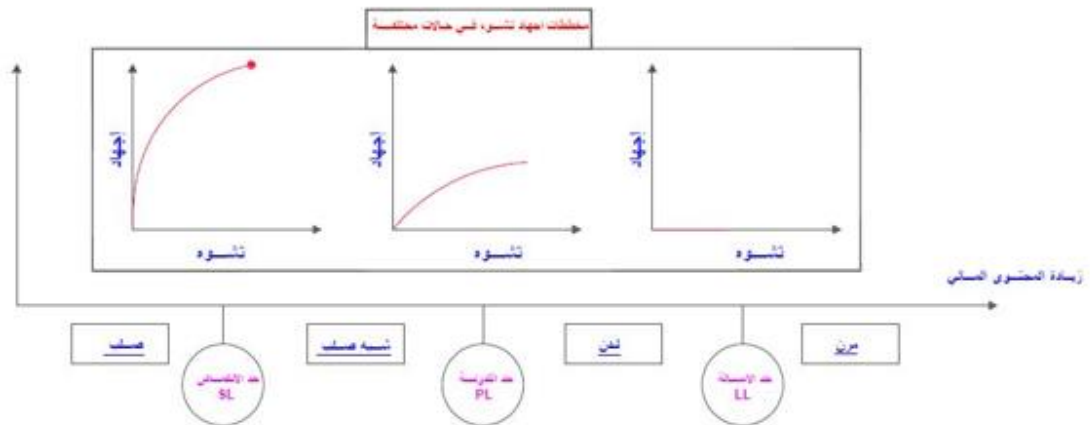


4 الفصل الرابع: اللدونة وبنية التربة

1.4 مقدمة

إن وجود فلزات الغضار في الترب الحبيبية الناعمة يساعد في تشكيل التربة وتؤمن هذه الفلزات زيادة في تلاحق الذرات مع بعضها البعض من خلال وجود بعض الرطوبة. هذا التلاحق يكون بسبب خاصية نسميها التماسك. إن خاصية التماسك هذه سببها الماء المتصل المحيط بحبيبات الغضار. في أوائل عام 1900، طور العالم السويدي أتربرغ (**Atterberg**) نظرية لوصف قوام الترب الحبيبية الناعمة عند تغيير محتوى الرطوبة فيها. ومن خلال البحث وجد أنه بحال كان محتوى الرطوبة في التربة منخفض جداً تتصرف التربة كأنها جسم صلب، وعندما يكون محتوى الرطوبة في التربة عالي جداً تتصرف التربة والماء كأنهما سائل. بالتالي وبناءً على محتوى الرطوبة يمكن تقسيم سلوك جسم التربة إلى أربع حالات أساسية: حالة صلبة، حالة شبه صلبة، حالة لدنة، وحالة سائلة كما في الشكل (1.4).



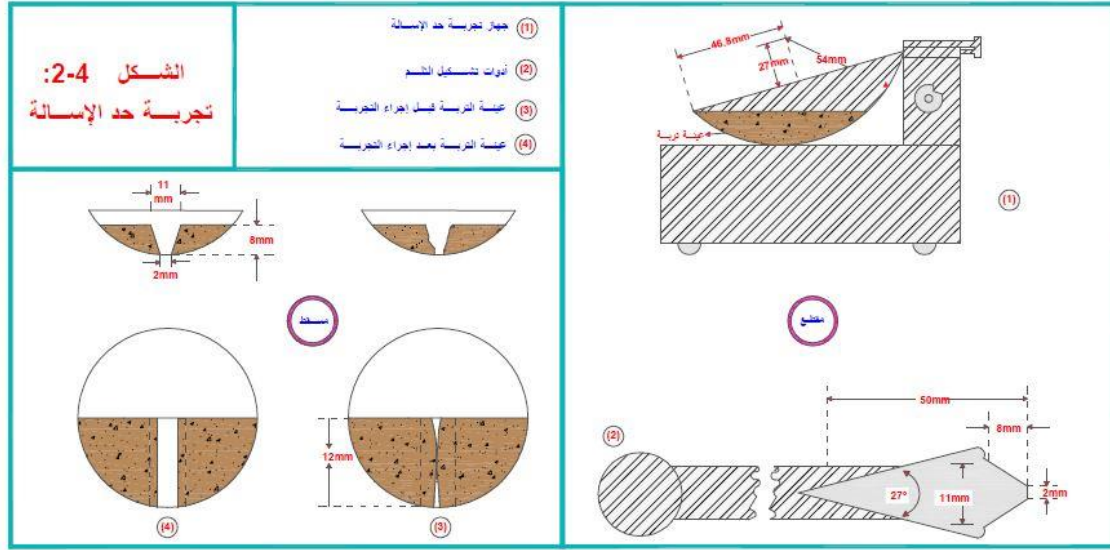
الشكل (1.4): حدود أتربرغ

إن محتوى الرطوبة مقدراً بالنسبة المئوية عند التحول من الحالة الصلبة للحالة شبه الصلبة يعرف بحد الانكماش. أما محتوى الرطوبة عند التحول من الحالة شبه الصلبة للحالة اللدنة يعرف بحد اللدونة ومحتوى الرطوبة التي يغير حالتها من الحالة اللدنة إلى الحالة السائلة يعرف بحد السيولة. وهذه الحدود تعرف بأنها حدود أتبرغ.

يناقش هذا الفصل العمليات اللازمة لتحديد حدود أتبرغ. كما سيتم مناقشة بنية التربة والمتغيرات الجيوتكنيكية مثل معامل النشاط ومعامل السيولة والمتعلقين بحدود أتبرغ.

2.4 حد السيولة (LL)

يظهر الشكل (2.4 a) مخطط توضيحي (واجهة جانبية) لجهاز حد السيولة. يتألف هذا الجهاز من قدر نحاسي وأساس مطاطي قاسي حيث يمكن أن يسقط القدر النحاسي على الأساس المطاطي بواسطة عتلة تدار عن طريق ذراع تدوير. للقيام بتجربة حد السيولة لا بد من وضع التربة بالقدر. ثم يتم قطع منتصف التربة بأداة تحديد قياسية (الشكل 2.4 b). من خلال استخدام ذراع التدوير يتم رفع وإسقاط القدر من ارتفاع (0.394 in) 10 mm. إن محتوى الرطوبة مقدراً بالنسبة المئوية اللازمة لإغلاق المسافة بين طرفي التربة (والذي تم تشكيله في بداية التجربة) في الوعاء وقدرها 12.7 mm على طولة التحديد (انظر الشكل 2.4 c و 2.4 d) بعد 25 ضربة يعرف بحد السيولة. تجريبياً، من الصعب التحكم بمحتوى الرطوبة للوصول إلى إغلاق المسافة المقدره 12.7 مم المطلوبة (0.5 in) في التربة الموجودة بالقدر عند 25 ضربة، لذلك لابد من إجراء 3 تجارب على الأقل لنفس التربة مع محتوى رطوبة مختلف لكل تجربة، ويحسب لكل تجربة عدد الضربات N المطلوبة لتحقيق الالتحام بين طرفي التربة وعدد الضربات غالباً ما يكون محصور ما بين 15 و 35 ضربة.



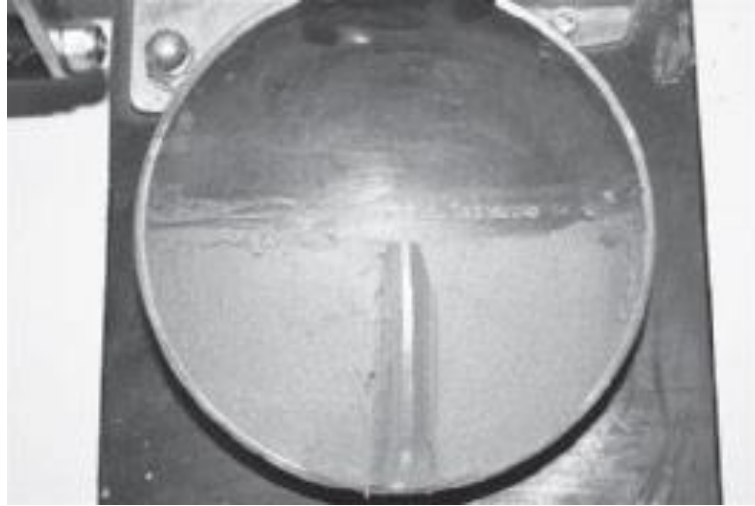
الشكل (2.4): تجربة حد السيولة

الشكل (3.4) يظهر جهاز تحديد حد السيولة وأداة التخديد. الشكل (4.4) يظهر صور لقدر التربة المستخدم في تجربة حد السيولة قبل وبعد التجربة.

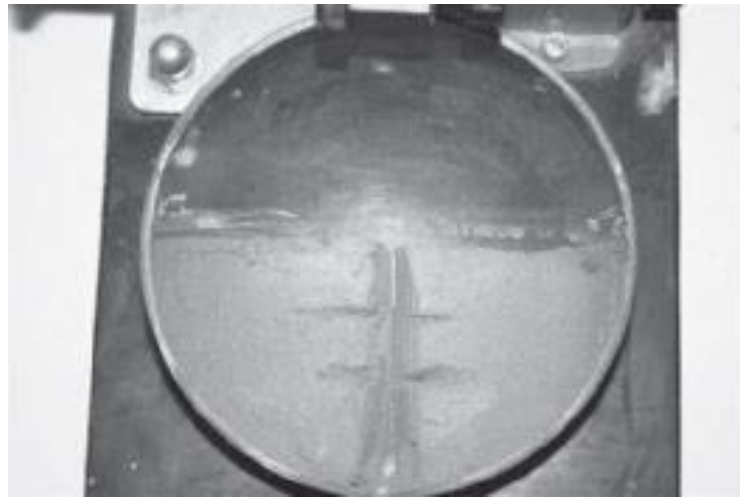


الشكل (3.4): تجربة حد السيولة

Liquid limit test device and grooving tools (Courtesy of ELE International)



(a) قبل التجربة

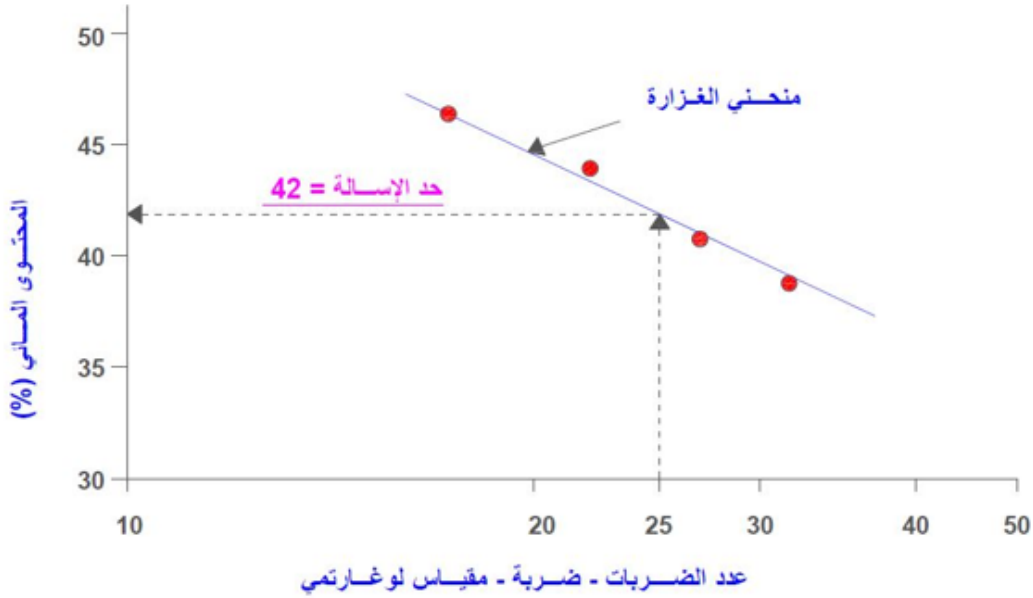


(b) بعد التجربة

الشكل (4.4): صورة لكيفية قياس حد السيولة

(Courtesy of Braja M.Das · Henderson Nevada)

إن محتوى الرطوبة في التربة كنسبة مئوية وعدد الضربات الموافقة، تمّ رسمها على ورقة مخططة بشكل نصف لوغاريتمي كما هو مبين في الشكل (5.4).



الشكل (5.4): الخط البياني لحد السيولة من خلال التجربة على السيلت الغضاري

العلاقة بين محتوى الرطوبة ولوغاريتم N هي تقريباً خط مستقيم. يسمى هذا الخط بمنحني التصريف أو منحني الغزارة. من خلال هذا المخطط، يمكننا القول أن محتوى الرطوبة الموافق لعدد ضربات $N=25$ المحددة من خلال منحني التصريف أو منحني الغزارة تعطي حد السيولة للتربة. أما ميل منحني التصريف يعرف بمعامل التصريف ويمكن كتابته بالشكل :

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log \left(\frac{N_2}{N_1} \right)} \quad (1.4)$$

حيث I_F : معامل التصريف.

w_1 = محتوى الرطوبة للتربة بالنسبة المئوية الموافقة لعدد ضربات N_1 .

w_2 = محتوى الرطوبة للتربة بالنسبة المئوية الموافقة لعدد ضربات N_2 .

من الممكن أن تعطي w_1 و w_2 قيم موجبة حتى عندما يكون ميل منحني التصريف سالب. لذلك معادلة منحني التصريف يمكن كتابتها بالعلاقة العامة كالتالي:

$$w = -I_F \log N + C \quad (2.4)$$

حيث C = ثابت.

من مئات التجارب تم تحديد حد السيولة من خلال معادلة تجريبية قدمتها:

U.S. Army Corps of Engineers (1949) at the Waterways Experiment Station in Vicksburg, Mississippi.

وهي بالشكل التالي:

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan\beta} \quad (3.4)$$

حيث :

N = عدد الضربات ضمن جهاز تحديد حد السيولة عند التحام مسافة 12.7 مم (0.5 in).

w_N : محتوى الرطوبة الموافق.

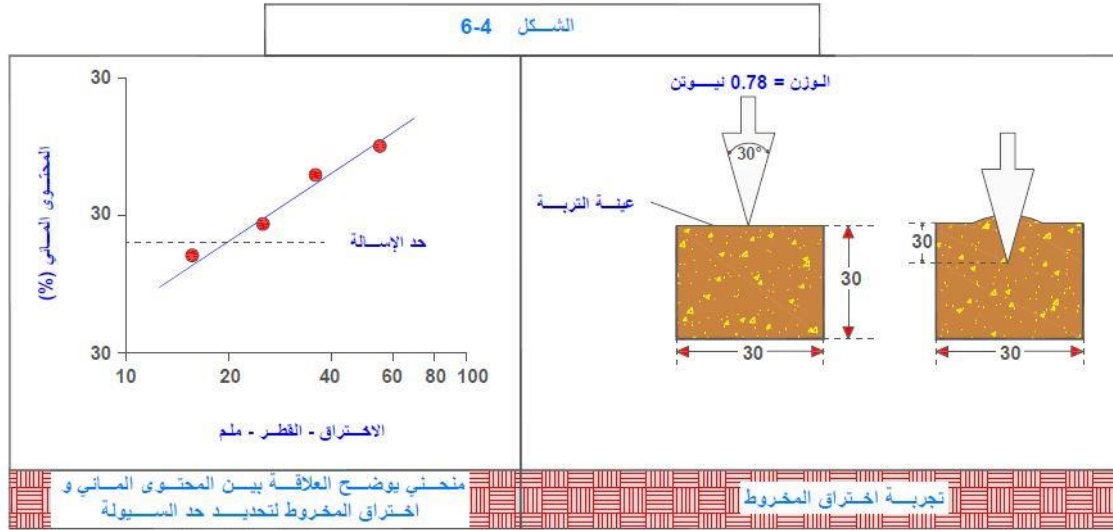
$\tan\beta = 0.121$ (ولكن انتبه أن $\tan\beta$ لا تساوي 0.121 لكل أنواع الترب).

المعادلة (3.4) عادة تعطي قيم جيدة من أجل عدد ضربات بين 20 إلى 30 ضربة. من أجل التجارب المخبرية الروتينية يمكن استخدامها لتحديد حد السيولة عندما يتم إجراء اختبار واحد على التربة. هذه العملية عادة يشار لها بنظرية النقطة الواحدة وتم اعتمادها من قبل ASTM من خلال D-4313. السبب في ذلك، يكمن في أن نظرية النقطة الواحدة تعطي نتائج جيدة بسبب أن تغير محتوى الرطوبة عند عدد ضربات بين 20 و30 ضربة يكون صغيراً.

نظرية أخرى مشهورة في أوروبا وآسيا لتحديد حد السيولة هي نظرية سقوط المخروط (British Standard-BS1377). في هذه التجربة يعرف حد السيولة بأنه محتوى الرطوبة عندما يخترق مخروط بزاوية ميل رأس 30 درجة ووزنه 0.78 N (80 gf) مسافة قدرها $d=20$ mm خلال 5 ثواني عندما يتم السماح له بالسقوط من مكان عند نقطة التقاءه مع سطح التربة (الشكل 6.4 a). نظراً لصعوبة تحديد حد السيولة من تجربة واحدة يتم عمل أربعة تجارب أو أكثر عند محتوى رطوبة متغير لكل تجربة وذلك لتحديد مسافة اختراق المخروط d . يمكن رسم مخطط نصف لوغاريتمي لتغير محتوى الرطوبة الموافق لمسافة الاختراق d . تعطي نتائج التجربة خط مستقيم. إن محتوى الرطوبة الموافق لمسافة اختراق $d = 20$ mm والمحدد من هذا المخطط هي حد السيولة (الشكل 6.4 b). وبهذه الحالة، من الشكل (6.4 b)، نحدد معامل التصريف كالتالي:

$$I_{FC} = \frac{w_2(\%) - w_1(\%)}{\log d_2 - \log d_1} \quad (4.4)$$

حيث : على التوالي w_1 و w_2 = محتوى الرطوبة عند مسافة اختراق d_1 و d_2 .



الشكل (6.4): نظرية سقوط المخروط (British Standard—BS1377)

3.4 حد اللدونة

يعرف حد اللدونة بأنه محتوى الرطوبة بالنسبة المئوية عندما تتشقق التربة أثناء تشكيل خيط بقطر 4.2 مم (1/8 in). حد اللدونة هو أدنى حد بمرحلة التربة اللدنة. تجربة تحديد حد اللدونة تعتبر تجربة بسيطة وتتم بتكرار تشكيل لفائف من كتلة تربة لها شكل القطع الناقص بين اليدين أو على صفيحة زجاجية (الشكل 7.4). تجربة حد اللدونة توجد في النظام المعتمد من قبل ASTM D-4318.



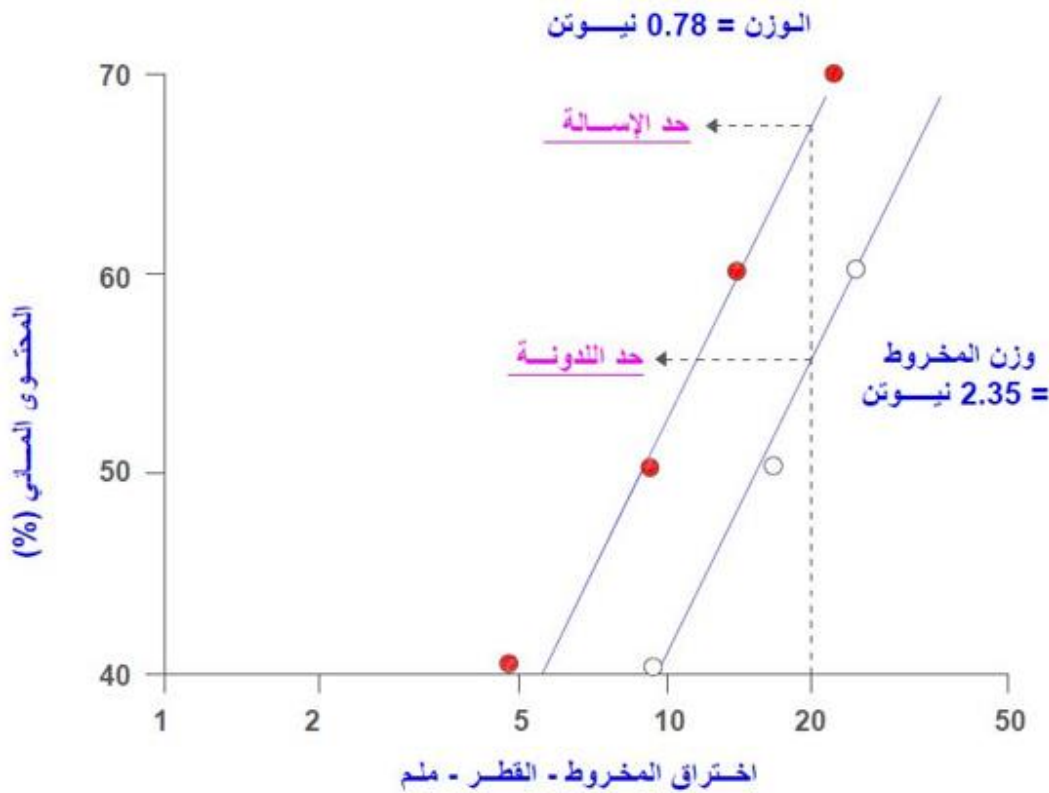
الشكل (7.4): الفتائل لقياس حد اللدونة

(Courtesy of Braja M. Das · Henderson · Nevada)

وكما في تحديد حد السيولة. يمكن استخدام نظرية إسقاط المخروط لتحديد حد اللدونة. ويمكن تحقيق ذلك من خلال استخدام مخروط مشابه بالأبعاد ولكن بوزن 2.35 N (240 gf). يتم عمل ثلاث أو أربع تجارب عند محتوى رطوبة متغير، ومسافة الاختراق الموافقة (d) يتم تحديدها لكل تجربة. إن محتوى الرطوبة الموافق لمسافة اختراق $d = 20 \text{ mm}$ هي حد اللدونة. الشكل (8.4) يظهر عملية تحديد حد السيولة واللدونة لتربة كامبريدج الصلصالية الغضارية التي قام بها السيدان : Worth and Wood في العام (1978).

قرينة اللدونة (PI) هي بالتعريف، الفرق بين حد السيولة وحد اللدونة للتربة:

$$PI = LL - PL \quad (5.4)$$



الشكل (8.4) : حد السيولة وحد اللدونة للغضار

Liquid and plastic limits for Cambridge Gault clay determined by fall cone test

الجدول (1.4) يظهر مجالات تغير حد السيولة، حد اللدونة والنشاط (الفقرة 6.4) لبعض الفلزات الغضارية (Skempton، Mithchell ، 1976 ، 1953).

الجدول (1.4): قيم حد السيولة، حد اللدونة والنشاط لبعض منرالات الغضار

Mineral	Liquid limit, LL	Plastic limit, PL	Activity, A
Kaolinite	35–100	20–40	0.3–0.5
Illite	60–120	35–60	0.5–1.2
Montmorillonite	100–900	50–100	1.5–7.0
Halloysite (hydrated)	50–70	40–60	0.1–0.2
Halloysite (dehydrated)	40–55	30–45	0.4–0.6
Attapulgite	150–250	100–125	0.4–1.3
Allophane	200–250	120–150	0.4–1.3

في العام 1949 صنف Burmister التربة بحسب قيم قرينة اللدونة بشكل نوعي كالتالي:

قرينة اللدونة (PI)	تصنيف التربة
0	غير لدنة
1 – 5	شبه لدنة
5 – 10	منخفضة اللدونة
10 – 20	متوسطة اللدونة
20 – 40	عالية اللدونة
> 40	لدنة جداً

إن قرينة اللدونة للتربة تعتبر عامل هام في تصنيف الترب الحبيبية الناعمة. وهي عنصر أساسي في مخطط كزاغراندي لللدونة (المشروح في الفقرة 4.7)، ويعتبر هذا العامل من أساسيات التصنيف في نظام التصنيف العالمي الموحد (انظر الفصل الخامس).

وللمعلومات النظرية والاطلاع فقط وللباحثين، نعرض ما درسه Sridharan et al، في العام (1999) والذي أظهر أن قرينة اللدونة يمكن أن ترتبط مع معامل التصريف المأخوذ من تجارب تحديد حد السيولة (الفقرة 2.4). وبناءً على هذه الدراسة قدموا الترابط التالي:

$$PI(\%) = 4.12I_F(\%) \quad (6.4)$$

$$PI(\%) = 0.74I_{FC}(\%) \quad (7.4)$$

وفي دراسة حديثة قدمها Polidori (2007) والتي تضمنت ستة ترب لا عضوية مع خليط من نواعم السيليكا والرمل، أظهرت النتائج أن قرينة اللدونة يمكن أن يكون لها الترابط التالي المبين بالعلاقة:

$$PL = 0.04(LL) + 0.26(CF) + 10 \quad (8.4)$$

$$PI = 0.96(LL) - 0.26(CF) - 10 \quad (9.4)$$

حيث CF = حزيئات الغضار ($< 2 \mu m$) بالنسبة المئوية. النتائج التجريبية أظهرت أيضاً أن العلاقة السابقة تكون صحيحة من أجل CF مساوي أو أصغر من 30%.

4.4 حد الانكماش

تتكشف التربة عند انخفاض محتوى رطوبتها تدريجياً. ومع استمرار انخفاض الرطوبة تتشأ حالة من التوازن في حجم التربة. حالة التوازن هذه تعني أن أي نقصان إضافي في الرطوبة يوافق عدم نقصان في حجم التربة (الشكل 9.4). إن محتوى الرطوبة بالنسبة المئوية والموافق لعدم نقصان حجم التربة يعرف بحد الانكماش.

تجارب حد الانكماش وفق نظام (ASTM - الملحق D-427) تتم في المخبر باستخدام صحن بورسلان بقطر 44 mm (1.75 in) وارتفاع حوالي 12.7 mm (0.5 in). داخل الصحن يكون مغطى بالفازلين ويتم ملؤه بالكامل بالتربة الرطبة. ويتم إزالة التربة الزائدة الموجودة على حواف الصحن لتعطي حواف مستقيمة. يتم تسجيل كتلة التربة الرطبة الموجودة داخل الصحن. ثم يتم تجفيف الصحن وبداخله التربة في الفرن. بعد ذلك، نقوم بتحديد حجم عينة التربة المجففة من خلال انزياح الزئبق الموضوع. ولأن التعامل مع الزئبق قد يكون كارثياً، تم وضع طريقة أخرى للاختبار وفق النورم ASTM D-4943 وتتم من خلال تغميس عينة التربة المجففة بالفرن بشمع مذاب، ثم يتم تبريد الغلاف الشمعي للعينة، ويتم تحديد حجمها من خلال غمرها بالماء.

وبالإشارة للشكل (9.4) يمكن تحديد حد الانكماش كالتالي:

$$SL = w_i(\%) - \Delta w(\%) \quad (10.4)$$

حيث w_i = الرطوبة الأولية عندما يتم وضع التربة في صحن حد الانكماش.

Δw = التغيير في محتوى الرطوبة (وهو التغيير ما بين محتوى الرطوبة الأولية ومحتوى الرطوبة عند حد الانكماش).

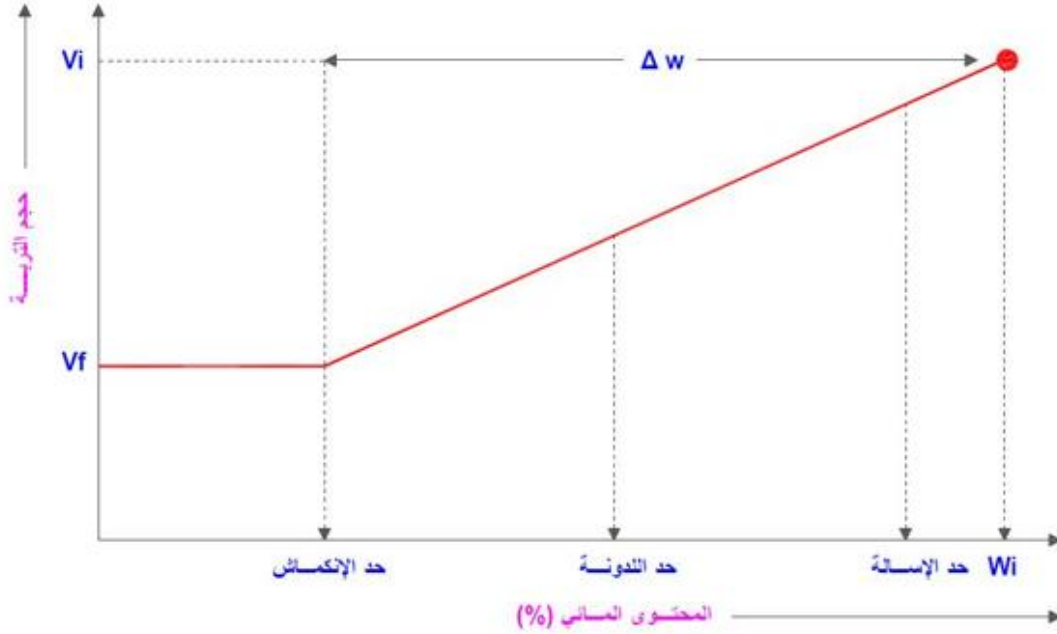
وبالتالي:

$$w_i(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (11.4)$$

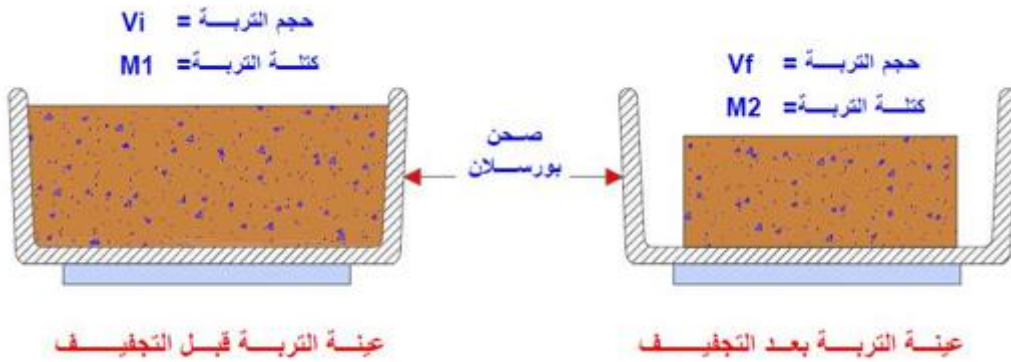
حيث:

M_1 = كتلة التربة الرطبة في الصحن عند بداية التجربة (g).

M_2 = كتلة التربة الجافة (g) (انظر الشكل 10.4).



الشكل (9.4): تعريف حد الإنكماش



الشكل (10.4): تجربة حد الإنكماش

وأيضاً:

$$\Delta w(\%) = \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{M_2} \times 100 \quad (12.4)$$

حيث:

V_i = الحجم البدائي للعينة الرطبة (والتي هي داخل الصحن cm^3).

V_f = حجم العينة المجففة بالفرن cm^3 .

$$\rho_w = \text{كثافة الماء (g/cm}^3\text{)}.$$

وأخيراً، بجمع المعادلات (10.4)، (11.4)، (12.4) يصبح لدينا العلاقة التالية:

$$SL = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right) (100) - \left(\frac{V_i - V_f}{M_2} \right) (\rho_w)(100) \quad (13.4)$$

يمكن تحديد متغير آخر من تجربة حد الانكماش وهو نسبة الانكماش والتي هي بالتعريف النسبة بين تغير حجم التربة كنسبة مئوية من الحجم الجاف للتربة على التغير في محتوى الرطوبة الموافق ونعبر عن ذلك بالمعادلة:

$$SR = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V_f} \right)}{\left(\frac{\Delta M}{M_2} \right)} = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V_f} \right)}{\left(\frac{\Delta V \rho_w}{M_2} \right)} = \frac{M_2}{V_f \rho_w} \quad (14.4)$$

حيث:

$$\Delta V = \text{التغيير في الحجم.}$$

$$\Delta M = \text{التغير في الكتلة الرطبة الموافق.}$$

ويمكن أيضاً إثبات أن قيم الوزن النوعي النسبي للتربة تعطى بالعلاقة:

$$G_s = \frac{1}{\frac{1}{SR} - \left(\frac{SL}{100} \right)} \quad (15.4)$$

حيث G_s = الوزن النوعي النسبي للجزيئات الصلبة.

والجدول التالي يوضح حد الانكماش لبعض فلزات الغضارية حسب (Michell,1976):

الفلز	حد الإنكماش
المونتموريللونيت	15 - 8.5
إيليت	17 - 15
كاولينيت	29 - 25

مثال 1.4:

أجريت تجربة حد الانكماش على تربة، وكانت النتائج كالتالي:

- الحجم البدائي لعينة التربة بالحالة المشبعة 24.6 cm^3 .
- الحجم النهائي لعينة التربة بالحالة الجافة 15.9 cm^3 .
- الكتلة البدائية بالحالة المشبعة 44.0 g .
- الكتلة النهائية بالحالة الجافة 30.1 g .

المطلوب: حساب حد الانكماش للتربة.

الحل:

$$SL = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right) (100) - \left(\frac{V_i - V_f}{M_2} \right) (\rho_w)(100)$$

$$M_1 = 44.0 \text{ g}$$

$$V_i = 24.6 \text{ cm}^3$$

$$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$M_2 = 30.1 \text{ g}$$

$$V_f = 15.9 \text{ cm}^3$$

$$SL = \left(\frac{44.0 - 30.1}{30.1} \right) (100) - \left(\frac{24.6 - 15.9}{30.1} \right) (1)(100)$$

$$SL = 46.18 - 28.9 = 17.28 \%$$

5.4 قرينة السيولة وقرينة القوام

يمكن تحديد القوام لتربة متماسكة بحالتها الطبيعية باستخدام نسبة تسمى قرينة السيولة وتعطى من خلال العلاقة التالية:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \quad (16.4)$$

حيث: w = محتوى الرطوبة الطبيعي للتربة.

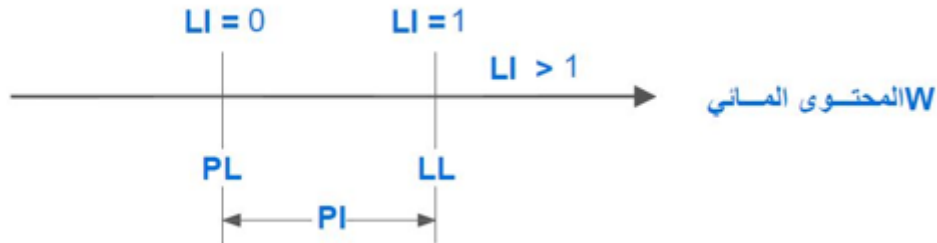
يمكن أن يكون محتوى الرطوبة بالحالة الطبيعية لعينة غضارية حساسية أكبر من حد السيولة في هذه الحالة (الشكل 11.4).

$$LI > 1$$

هذه التربة عندما توضع ضمن قالب، يمكن أن تتحول إلى الشكل اللزج لتسهيل مثل السائل. إن رواسب التربة والتي تكون (عالية سبق الانضغاط) يمكن أن يكون محتوى الرطوبة لها أقل من حد اللدونة وفي هذه الحالة (الشكل 11.4)، يمكننا استخدام عامل آخر لأغراض هندسية هو قرينة القوام (CI) والتي يمكن تعريفها كالتالي:

$$CI = \frac{LL - w}{LL - PI} \quad (17.4)$$

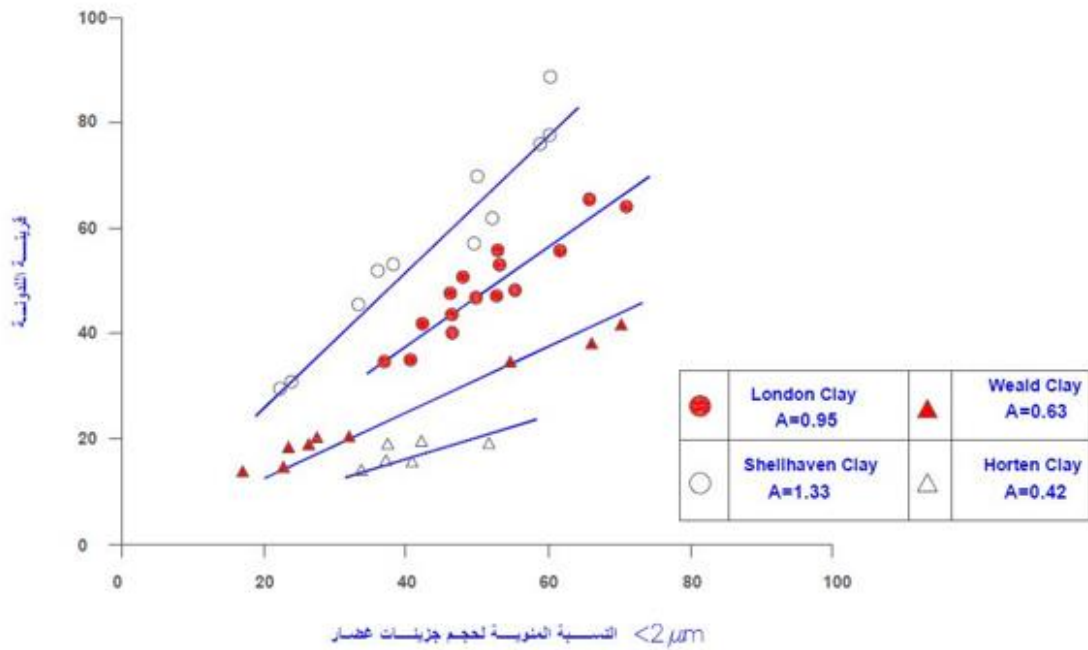
حيث w = محتوى الرطوبة الطبيعي. وعندما تساوي w حد السيولة تصبح قرينة القوام تساوي الصفر، وعندما تكون $w = PI$ نجد أن $CI = 1$.



الشكل (11.4): حدود السيولة على محور الرطوبة

6.4 النشاط

لأن اللدونة سببها الماء المتصل الموجود حول حبيبات التربة يمكن التنبؤ بأن نوع فلزات الغضار وكمياتها الجزئية بالتربة سوف تؤثر على حدود اللدونة والسيولة. استنتج العالم Skempton في العام (1953) أن قرينة اللدونة لتربة يمكن أن تزداد بشكل خطي مع زيادة نسبة جزيئات الغضار (نسبة النواع الأصغر من $2 \mu\text{m}$ وزناً) كما ما هو موضح في الشكل 12.4.



الشكل (12.4): النشاط حسب :

(Based on Skempton · 1953)

إن العلاقة بين PI وحجم جزيئات الغضار للترب الغضارية المختلفة تم رسمها بخطوط منفصلة، والسبب في ذلك يعود للفرق في خواص اللدونة المختلفة للفلزات الغضارية المختلفة. وبناءً على هذه النتائج عرف Skempton حداً يسمى بالنشاط وهو بالتعريف ميل الخط الذي يحدد العلاقة ما بين PI ونسبة النواع الأصغر من $2 \mu\text{m}$.

يمكن تعريف النشاط إذاً بالعلاقة التالية:

$$A = \frac{PI}{\left(\text{نسبة نواعم الغضار الأصغر من 2 ميكرون} \right)} \quad (18.4)$$

حيث $A =$ النشاط.

يستخدم النشاط عادة كعامل لتحديد إمكانية الانتفاخ للترب الغضارية. قيم مختلفة للنشاط ولعدة فلزات غضارية معطاة سابقاً في الجدول (1.4).

درس كل من Seed, Woodward, and Lundgren في العام (1964) خواص اللدونة لعدة تربة محضرة ومكونة من خليط رمل وغضار. واستنتجوا أنه على الرغم من العلاقة بين قرينة اللدونة ونسبة النواعم هي خطية (كما أظهرها Skempton) قد لا تمر دائماً من مبدأ الإحداثيات. وهذا ما يظهره الشكل (13.4) والشكل (14.4)، لذلك فإن النشاط يمكن إعادة تعريفه بالتالي:

$$A = \frac{PI}{\left(C' - \text{نسبة النواعم الغضار الأصغر من 2 ميكرون} \right)} \quad (19.4)$$

حيث C' هي ثابت من أجل تربة معطاة .

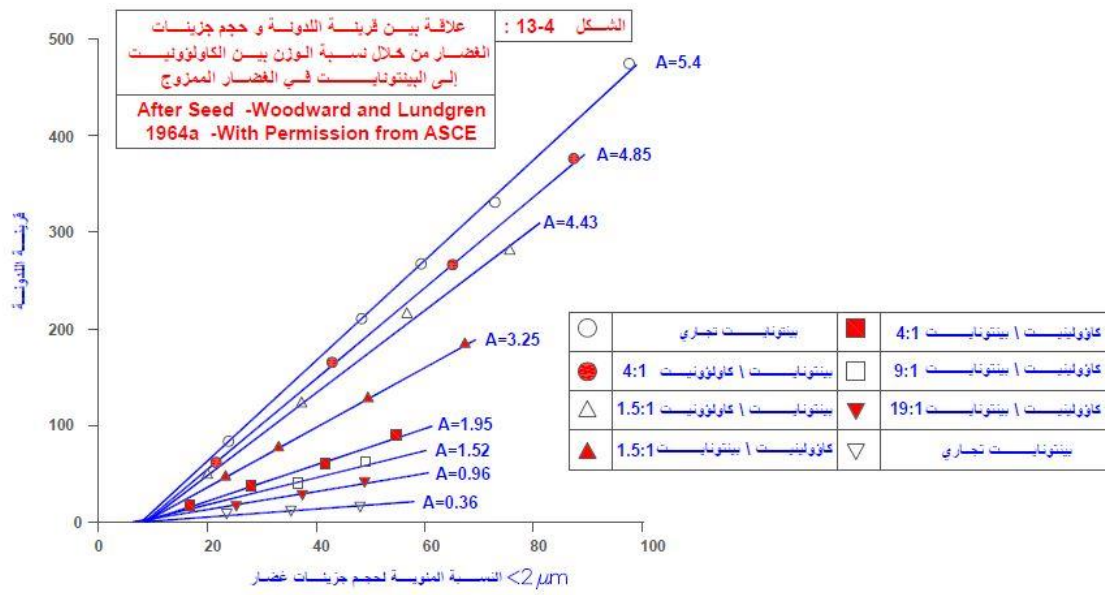
من أجل نتائج التجارب الموضحة بالشكل 13.4 و 14.4 فإن قيمة $C' = 9$.

وفي أعمال لاحقة قام نفس الباحثين Seed, Woodward, and Lundgren في العام (1964) بإظهار أن العلاقة بين قرينة اللدونة ونسبة النواعم الموجودة في التربة والتي يمكن التعبير عنها بخطين مستقيمين وهذا ما يظهره تقريباً الشكل (15.4)، حيث أنه ومن أجل الترب التي تكون فيها جزيئات الغضار أكثر من 40% فإن الخط المستقيم يمكن أن يمر من المبدأ عند استمراريته.

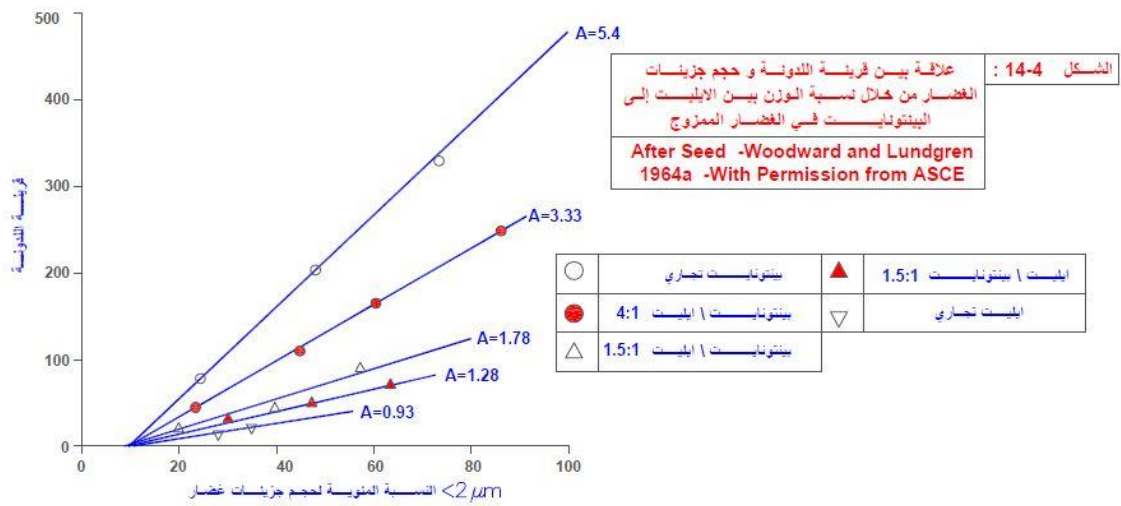
وبناءً على المعادلتين (8.4) و(9.4) أعطى Polidori (2007) علاقة تجريبية للنشاط (من أجل CF أكبر أو يساوي 30%) هي كالتالي:

$$A = \frac{0.96(LL) - 0.26(CF) - 10}{CF} \quad (20.4)$$

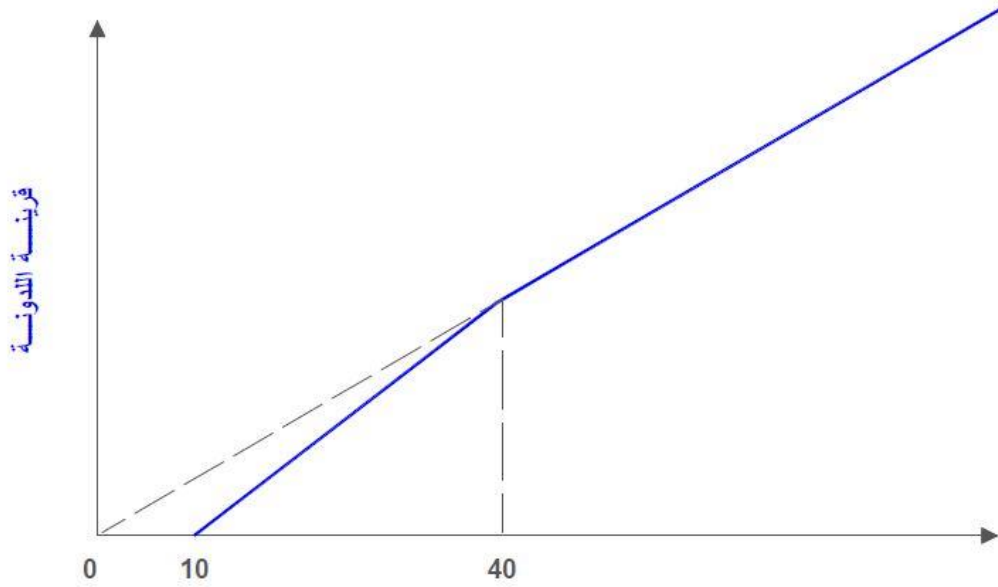
حيث CF هي نسبة النواعم ($< 2\mu\text{m}$).



الشكل (13.4): العلاقة ما بين حد اللدونة وأبعاد حبيبات الغضار ونوعية التركيب المنرالي له



الشكل (14.4): العلاقة ما بين حد اللدونة وأبعاد حبيبات الغضار ونوعية التركيب المنرالي للغضار



$< 2 \mu m$ النسبة المنوية لحجم جزينات غضار

الشكل 15-4 : علاقة بسيطة بين قربنة اللدونة و حجم جزينات الغضار من خلال نسبة الوزن

**After Seed -Woodward and Lundgren
1964b -With Permission from ASCE**

الشكل (15.4): العلاقة ما بين حد اللدونة ونسبة ابعاد حبيبات الغضار وزناً

7.4 مخطط اللدونة

حد اللدونة وحد السيولة يمكن تحديدها من خلال تجارب مخبرية بسيطة ما يؤمن لنا معلومات عن طبيعة الترب المتماسكة. استخدم المهندسون هذه التجارب بشكل كبير من أجل الربط بين المتغيرات الفيزيائية للترب المختلفة، وأستخدمت أيضاً من أجل تعريف التربة.

درس السيد كزاغراندني (Casagrande) في العام (1932) العلاقة بين قربنة اللدونة وحد السيولة من أجل الترب الطبيعية المختلفة وقدم مخطط سماه مخطط اللدونة والذي تم توضيحه بالشكل (16.4). العنصر الهام في هذا المخطط هو المستقيم A-Line التجريبي والذي يعطى بالعلاقة:

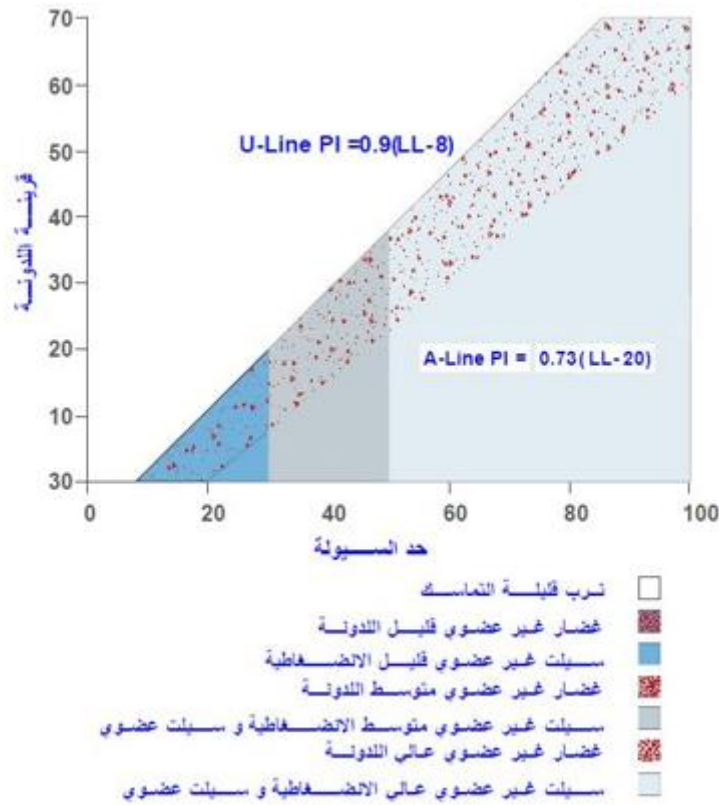
$$PI=0.73(LL-20)$$

يفصل هذا الخط (A-Line) بين الترب الغضارية اللاعضوية والترب اللاعضوية السلتية. الترب العضوية السلتية يتم رسمها في نفس المنطقة (أسفل الخط A-Line وقيمة حد السيولة لها LL أكبر من 50%).

إن المعلومات التي يعطيها مخطط اللدونة لها أهمية كبيرة وهي أساس التصنيف للترب الحبيبية الناعمة في نظام التصنيف الموحد العالمي (انظر الفصل 5).

لاحظ أن هناك خط اسمه U-Line يتوضع أعلى الخط السابق A-Line. حيث أن هذا الخط (U-Line) هو تقريباً الحد الأعلى للعلاقة بين قرينة اللدونة وحد السيولة من أجل أي نوع تربة نعرفه إلى الآن. إن معادلة هذا الخط (U-Line) يمكن أن نوصفها كالتالي:

$$PI = 0.9(LL - 8) \quad (21.4)$$



الشكل (16.4): مخطط كزاغراندني لللدونة Casagrande (1932)

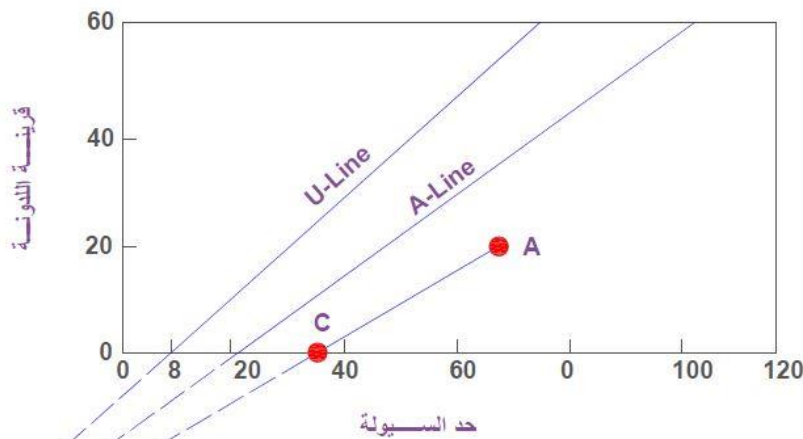
هناك استخدام آخر لخط (A-Line) وخط (U-Line). اقترحه العالم كزاغراندني وهو أن حد الانكماش لتربة يمكن تحديده تقريباً إذا تم معرفة قرينة اللدونة وحد السيولة (انظر Holtz and Kovacs, 1981). ويمكن أن يتم ذلك وفقاً للشكل (17.4) :

a. نرسم العلاقة بين قرينة اللدونة وحد السيولة لعينة تربة ونوقع النقطة A في الشكل (4.17).

b. نمدد الخط A-Line ليتلاقى مع امتداد الخط U-Line في النقطة B قرينة لدونتها وحد

السيولة لها $LL = -43.5$ and $PI = -46.4$

نرسم خط يربط النقطتين A و B ليقطع المحور الأفقي لحد السيولة في نقطة C وهذه النقطة هي حد الانكماش للتربة.



الشكل 4-17: تعريف الانكماش من مخطط اللدونة
Adapted from Holtz and Kovacs 1981

B $LL = -43.5$
 $PI = -46.5$

الشكل (17.4): استنتاج حد الانكماش من خلال معرفة حد السيولة وحد اللدونة

8.4 بنية التربة

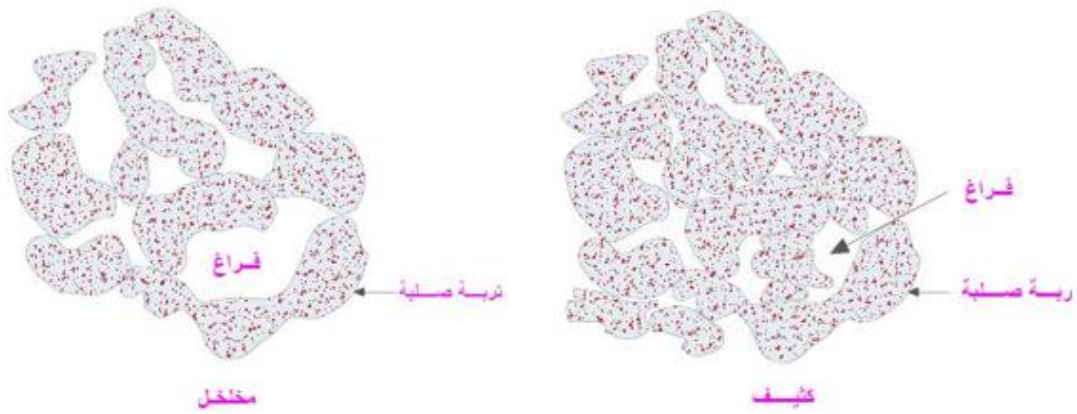
يمكننا أن نعرف بنية التربة بأنها التوزيع الهندسي لحبيبات التربة بين بعضها البعض. ومن بين العديد من العوامل التي تؤثر على بنية التربة: الشكل، الحجم، المكونات الفلزية لحبيبات التربة وطبيعة مكونات الماء في التربة. عموماً، يمكن أن توجد التربة ضمن مجموعتين من البنية: بنية متماسكة وبنية لا متماسكة. البنية الموجودة في التربة في كل مجموعة سوف يتم شرحها لاحقاً.

1.8.4 بنية الترب اللامتماسكة

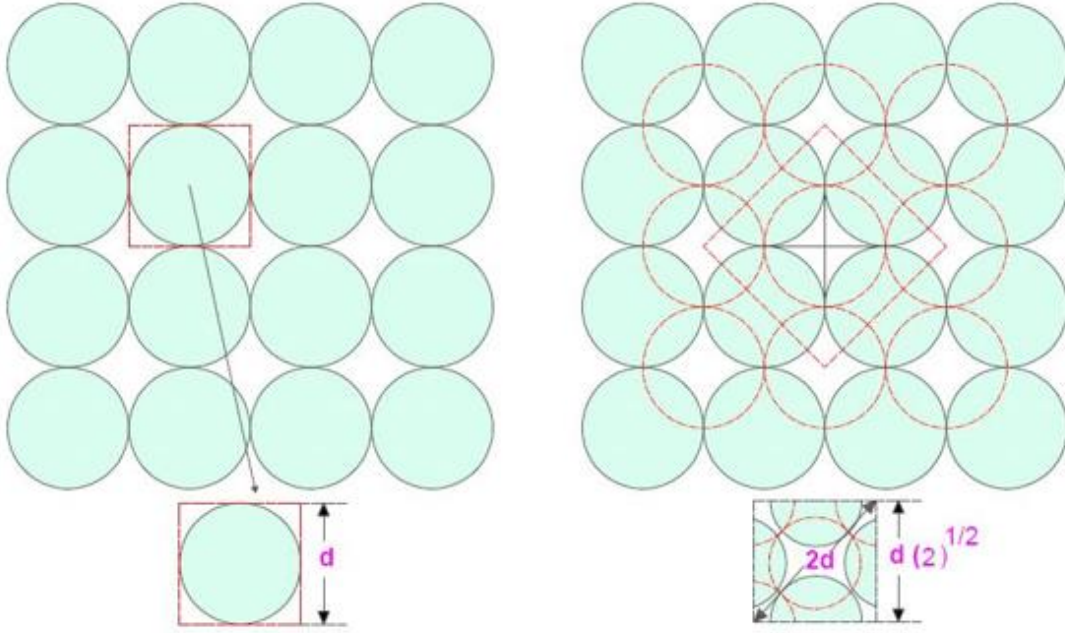
إن البنية الموجودة في الترب اللامتماسكة يمكن أن تقسم إلى مجموعتين رئيسيتين:

- بنية وحيدة الحبيبات.
- بنية على شكل خلايا نحل.

في البنية وحيدة الحبيبات، نجد أن حبيبات الترب تكون في حالة مستقرة، أي أن كل حبيبة تتصل مع الحبيبة المحيطة بها وتكون بحالة استقرار. يؤثر توزيع شكل وحجم الحبيبات ومكانها الموضعي على كثافة هيكل التربة (الشكل 18.4). لذلك يتكون مجال كبير من معاملات المسامية. ولفهم أكبر لتغير معاملات المسامية التي يسببه التموضع النسبي للحبيبات، سوف نعتبر أن شكل هيكل التربة موافق لشكل الكرة الموضح بالشكل (19.4).



الشكل (18.4): شكل هيكل التربة: (a) مخلخل، (b) متراص



توضع مخلخل جدا

توضع كثيف جدا

الشكل (19.4): هيكل التربة: (a) حالة تربة ذات هيكل مفكك، (b) حالة هيكل كثيف جداً

الشكل (a 19.4) يظهر حالة تربة ذات هيكل مفكك. وفي حال عزلنا مكعب قياسه من كل جانب d والذي يساوي قطر كل كرة كما في الشكل، يمكن أن يحسب معامل المسامية كالتالي:

$$e = \frac{V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s}$$

حيث:

$$d^3 = \text{حجم المكعب} = V$$

$$d^3 = \text{حجم الكرة (الصلبة) داخل المكعب} = V_s$$

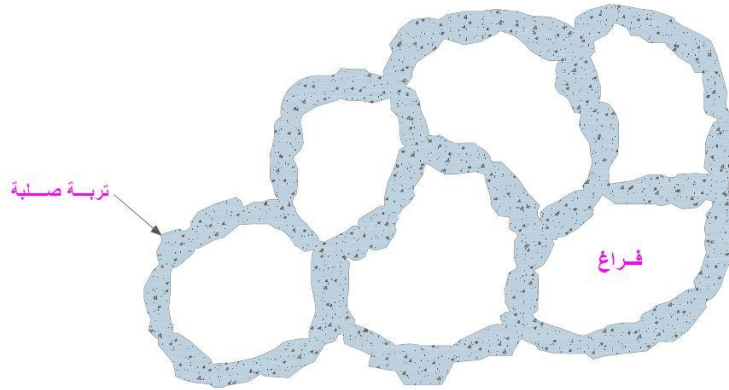
ومع ملاحظة أن $V = d^3$ وأن $V_s = \pi d^3/6$ وبالتالي:

$$e = \frac{d^3 - \left(\frac{\pi d^3}{6}\right)}{\left(\frac{\pi d^3}{6}\right)} = 0.91$$

وبشكل مشابه، ومن الشكل (b 19.4) يظهر حالة هيكل كثيف جداً. الشكل (b 19.4) يظهر أيضاً مكعب معزول، حيث كل جانب قياسه $d\sqrt{2}$. يمكن أيضاً أن نظهر أنه في هذه الحالة $e = 0.35$.

إن شكل ذرات التربة الحقيقية تختلف عن شكل الحبيبات التي تم اعتبارها ذات شكل كروي وهي تختلف عن ذرات التربة الحقيقية بالشكل والحجم. لهذا الأمر نجد أنه من الممكن أن تشغل حبيبات التربة ذات الحجم الأقل الفراغات المتشكلة ما بين الحبيبات الأكبر، الأمر الذي يسبب تناقص معامل المسامية مقارنة مع فرضية أن الذرات هي عبارة عن كرات متساوية. على كل، إن عدم انتظام شكل الحبيبات عادة يعطي زيادة في قيم معامل المسامية في الترب. ونتيجة لما سبق، فإن معاملات المسامية التي نصادفها في الترب الحقيقية لها تقريباً نفس قيم المجالات التي استنتجناها بحال كون فرضية الكرات المتساوية.

من أجل بيئة خلايا النحل (الشكل 20.4)، نجد أنه بحال الترب الرملية الناعمة والترب السلتية تكون هناك قناطر صغيرة مع سلاسل الحبيبات. والترب التي لها بنية خلايا النحل لها معاملات مسامية كبيرة ويمكن أن تحمل حمل ستاتيكي عادي. على كل حال وتحت حمل ثقيل وعندما تخضع إلى حمولات صادمة فإن البنية تتحطم ونتيجة لذلك تعطي هذه الترب قيم هبوط كبيرة.



الشكل 20-4 : هيكل حبيبات مليء

الشكل (20.4): هيكل التربة (خلايا النحل)

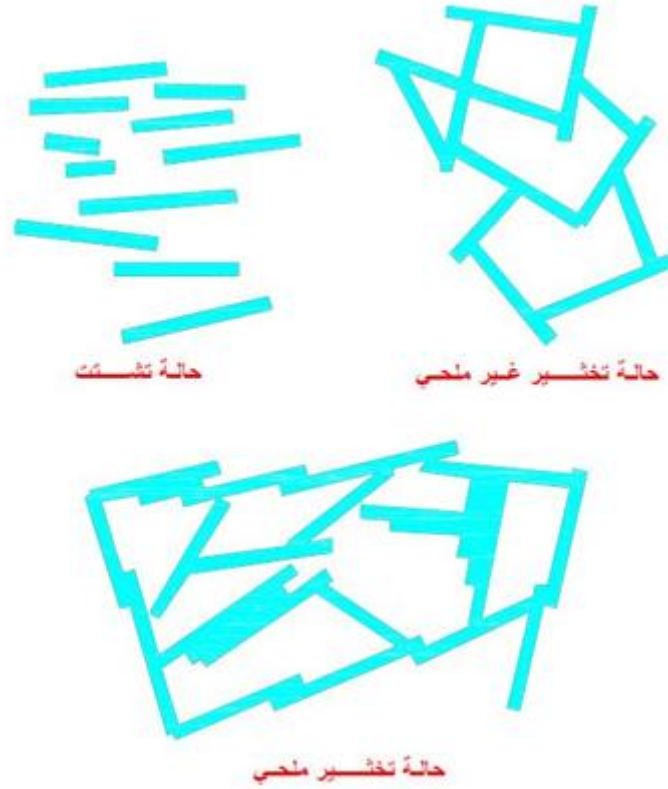
2.8.4 البنية في الترب المتماسكة

لفهم أفضل للبنية الأساسية لهذه الترب نحتاج أن نعرف أنواع القوى الموجودة بين حبيبات الغضار المعلقة في الماء. في الفصل الثاني ناقشنا الشحنة السالبة على سطح حبيبات الغضار والطبقتين

المزدوجتين المحيطة بكل حبيبة. عندما تقترب حبتين من الغضار معلقتين مع بعضهما فإن إمكانية تداخل الطبقات المزدوجة تنتج تنافر بين هذه الحبيبات. وفي نفس الوقت، يحصل قوى تجاذب بين جزيئات التربة والتي سببها قوى فاندرفالس والتي لا علاقة لها بخواص الماء. تزداد قوى التجاذب والتنافر مع نقصان المسافة بين الجزيئات، ولكن بنسب مختلفة. عندما تكون المسافات بين الجزيئات صغيرة جداً فإن قوى التجاذب تكون أكبر من قوى التنافر. وهذه القوى ومفهومها تعالجها نظرية الغرويات.

إن حقيقة تركيز الشحنات الموجبة الموجودة على حواف الحبيبات الغضارية تم مناقشته بالفصل الثاني. إذا كانت حبيبات الغضار قريبة جداً من بعضها فإن الشحنات الموجبة لجوانب الحبيبات سوف تنجذب إلى وجوه الحبيبات المشحونة بشحنات سالبة. سوف نعتبر أن سلوك الغضار معلق مخفف. عندما يوضع الغضار في الماء بشكل أولي فإن حبيبات الغضار تدفع بعضها البعض. وهذا التنافر يظهر بسبب فراغات الحبيبات الداخلية. قوى التنافر بين الحبيبات أكبر من قوى التجاذب (قوى فاندرفالس). حيث أن قوى الجاذبية على كل حبيبة تكون مهمة. لذلك فإن حبيبات الغضار ممكن أن تترسب بسرعات صغيرة جداً أو تبقى معلقة. وتحت حركة بروانية (حركة متعرجة للحبيبات الغروية في المعلق)، الرواسب التي تشكلت نتيجة ترسب الحبيبات المنفصلة لها بيئة مشتتة وكل الحبيبات تدور بشكل أكبر أو موازي لبعضها البعض (الشكل 21.4 a).

إذا تشتت حبيبات الغضار بشكل أولي في الماء واقتربت من بعضها البعض خلال الحركة العشوائية في المعلق، ممكن أن تتجمع وتؤدي إلى تشكل كتل ظاهرة مع اتصال وجه لحافة، وفي هذه الظاهرة تتماسك الحبيبات مع بعضها البعض نتيجة التجاذب الإلكتروني للشحنات الموجبة للحواف مع الشحنات السالبة للسطوح. وهذا التجمع يسمى باللباد. عندما تصبح الكتلة المتلبدة كبيرة فإنها تترسب تحت قوى الجاذبية. الراسب المتشكل بهذا الشكل له بيئة صوفية (الشكل 21.4 b)، عندما يضاف الملح إلى معلق الماء والغضار المشتت فإن الأيونات تميل إلى إضعاف الطبقة المزدوجة المحيطة بالحبيبات. وهذا الإضعاف يقلل من التنافر بين الحبيبات الداخلية عندها تنجذب حبيبات الغضار من بعضها البعض لتشكل كتل متلبدة وتترسب. البيئة الصوفية للرواسب المشكلة تظهر في الشكل (21.4 c). في البنى الصوفية المترسبة في حالة النوع الملحي فإن الحبيبات تميل بشكل كبير لتصبح تقريباً متوازية وذلك بسبب قوى فاندرفالس.



الشكل (21.4): هيكل التربة الرسوبية

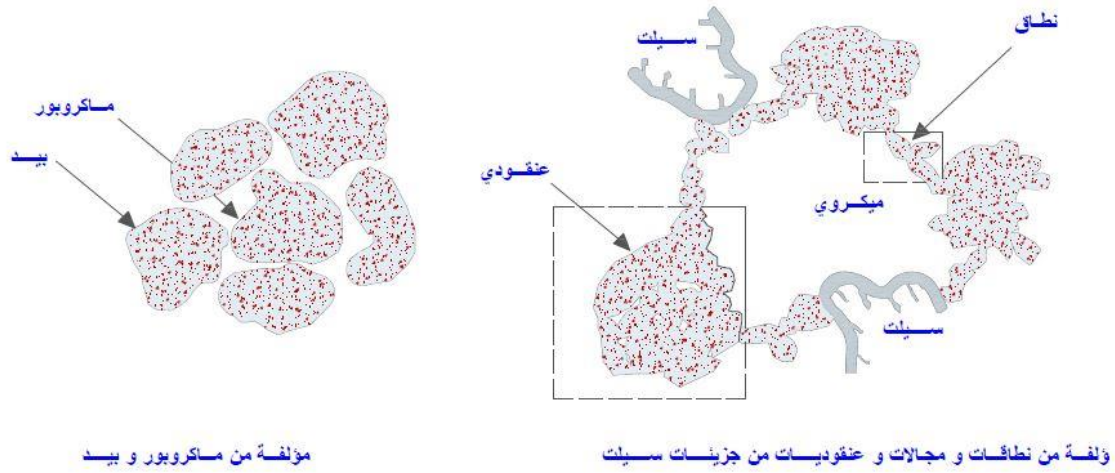
بنية الغضار الحاوي على بنى صوفية تكون خفيفة الوزن ولها معامل مسامية كبير، وهناك مثال عن هذه البنية وهي رواسب الغضار المتشكلة في البحر حيث البنية الصوفية كبيرة. أما رواسب الطمي المتشكلة من ماء الأنهار لها بنية متوسطة بين المشتتة والصوفية. أما طمي فلزات الغضار النقي تكون نادرة في الطبيعة. وعندما تحوي التربة على 50% أو أكبر من الحبيبات ذات القطر 0.002 مم، تسمى عادة بالتراب الغضارية.

هناك دراسات استخدم بها الميكروسكوب الالكتروني والتي قام بها كلاً من السادة :

Collins and McGown، 1974; Pusch, 1978; Yong and Sheeran، 1973

هذه الدراسات أظهرت أن حبيبات الغضار تميل لتصبح كتل أو لبّاد لواحدات ميكروسكوبية صغيرة. وتسمى هذه الواحدات بالمجالات Domains. ثم يتم تجميع المجالات على شكل مجموعات Groups وتسمى بعدها بالـ Clusters والتي ممكن أن ترى تحت مجهر خفيف والتي تجمع لتكون Peds، إن مجموعات (peds) لها بنية مكروية بعقد وفراغات. الشكل (22.4 a)

يظهر توزع (Peds) والمسامات المكروية. أما توزع (Domains) وتوزع (Clusters) مع حجم حبيبات السلت موضع في الشكل (22.4 b).



الشكل 22-4 : هيكلية التربة

الشكل (22.4): هيكل التربة:

(a) توزع (Peds) والمسامات المكروية.

(b) توزع (Domains) وتوزع (Clusters) مع حجم حبيبات السلت.

من المناقشة السابقة يمكن أن نرى أن بنية الترب المتماسكة معقدة جداً. البنى الميكروسكوبية لها تأثير كبير على تصرف الترب من وجهة نظر هندسية. الجدول (2.4) يلخص البنى الميكروسكوبية للترب الغضارية:

الجدول (2.4): هيكلية التربة الغضارية

Item	Remarks
Dispersed structures	Formed by settlement of individual clay particles; more or less parallel orientation (see Figure 4.21a)
Flocculent structures	Formed by settlement of flocs of clay particles (see Figures 4.21b and 4.21c)
Domains	Aggregated or flocculated submicroscopic units of clay particles
Clusters	Domains group to form clusters; can be seen under light microscope
Peds	Clusters group to form peds; can be seen without microscope

9.4 ملخص

ناقش هذا الفصل مكونين أساسيين في دراسة ميكانيك التربة وهما:

(a) لدونة التربة والمواضيع الموافقة لذلك ذكرت بالفقرات (الفقرات 2.4 وحتى 7.4).

(b) بنية التربة نوقشت بالفقرة 8.4.

كما وتمت مناقشة تجارب حد السيولة واللدونة والانكماش للترب الحبيبية الناعمة والتي هي مؤشرات لحالة لدونة للتربة. وقمنا بحساب الفرق بين حد السيولة واللدونة وسميناه بقرينة اللدونة. إن حد السيولة وقرينة اللدونة ضرورية لحساب المتغيرات اللازمة لتصنيف الترب ناعمة التدرج الحبي. درست بنية الترب اللامتماسكة ويمكن أن تكون وحيدة أو على شكل خلايا النحل. أما بنية خلايا النحل للتربة، موجودة في الترب السلتية والرملية عادة. في حين أننا نجد البنية الميكروسكوبية للترب الغضارية يمكن أن تكون مقسمة بشكل واسع إلى مجموعات مثل البنية المشتتة والبنية الملبدة (Domains) و(Clusters) و(Peds).

10.4 مسائل غير محلولة

1. المبين في الجدول هو نتائج تجارب حد السيولة لتربة محددة. ومع العلم أن حد اللدونة للتربة هو $PL = 12.2\%$. المطلوب:

عدد الضربات (N)	الرطوبة (%)
16	36.5
20	34.1
28	27

(a) ارسم مخطط التصريف أو الغزارة واستنتج حد السيولة للتربة.

(b) ما هي قرينة اللدونة للتربة.

2. المطلوب تحديد قرينة السيولة للتربة المشروحة في المسألة 1 إذا كانت $w_{in situ} = 31\%$.

3. التالي هي نتائج تجارب حد السيولة. ومع العلم أن حد اللدونة للتربة هو $PL = 18.7\%$.
المطلوب:

عدد الضربات (N)	الرطوبة (%)
15	42
20	40.8
28	39.1

(a) ارسم مخطط التصريف أو الغزارة واستنتج حد السيولة.

(b) ما هي قرينة اللدونة للتربة.

4. بالإشارة للمسألة الثالثة، المطلوب تحديد قرينة السيولة للتربة في حال كانت الرطوبة الطبيعية 26% .

5. لدينا تربة مشبعة لها الخواص التالية:

- الحجم البدائي $(V_i) = 19.65 \text{ cm}^3$ والحجم النهائي $(V_f) = 13.5 \text{ cm}^3$ ،
- كتلة التربة الرطبة $(M_1) = 36 \text{ g}$ ، وكتلة التربة الجافة هي $(M_2) = 25 \text{ g}$ ،

المطلوب تحديد حد الانكماش ونسبة الانكماش.

6. كرر المسألة السابقة باستخدام التالي:

$$(V_i) = 24.6 \text{ cm}^3 \text{ والحجم النهائي } (V_f) = 15.9 \text{ cm}^3$$

$$\text{كتلة التربة الرطبة } (M_1) = 44 \text{ g} \text{، وكتلة التربة الجافة هي } (M_2) = 30.1 \text{ g}.$$

11.4 المراجع

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007). *Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4, Vol. 04.08, West Conshohocken, Pa. BS:1377 (1990).
2. *British Standard Methods of Tests for Soil for Engineering Purposes*, Part 2, BSI, London.
3. BURMISTER, D. M. (1949). "Principles and Techniques of Soil Identification," *Proceedings*, Annual Highway Research Board Meeting, National Research Council, Washington, D.C., Vol. 29, 402–434.
4. CASAGRANDE, A. (1932). "Research of Atterberg Limits of Soils," *Public Roads*, Vol. 13, No. 8, 121–136.
5. COLLINS, K., and MCGOWN, A. (1974). "The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils," *Geotechnique*, Vol. 24, No. 2, 223–254.
6. HOLTZ, R. D., and KOVACS, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- LAMBE, T. W. (1958). "The Structure of Compacted Clay," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 85, No. SM2, 1654-1 to 1654-35.
7. MITCHELL, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*, Wiley, New York.
8. POLIDORI, E. (2007). "Relationship between Atterberg Limits and Clay Contents," *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 5, 887–896.
9. PUSCH, R. (1978). "General Report on Physico-Chemical Processes Which Affect Soil Structure and Vice Versa," *Proceedings*, International Symposium on Soil Structure, Gothenburg, Sweden, Appendix, 33.
10. SEED, H. B., WOODWARD, R. J., and LUNDGREN, R. (1964a). "Clay Mineralogical Aspects of Atterberg Limits," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 90, No. SM4, 107–131.
11. SEED, H. B., WOODWARD, R. J., and LUNDGREN, R. (1964b). "Fundamental Aspects of the Atterberg Limits," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 90, No. SM6, 75–105.

12. SKEMPTON, A. W. (1953). "The Colloidal Activity of Clays," *Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol. 1, 57–61.
13. SRIDHARAN, A., NAGARAJ, H. B., and PRAKASH, K. (1999). "Determination of the Plasticity Index from Flow Index," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 22, No. 2, 175–181.
14. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1949). *Technical Memo 3-286*, U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
15. WROTH, C. P., and WOOD, D. M. (1978). "The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 2, 137–145.
16. YONG, R. N., and SHEERAN, D. E. (1973). "Fabric Unit Interaction and Soil Behavior.