الفصل الثاني : الخواص الفيزيائية للترب وطرق تصنيفها

مقدمة

يتضمن هذا الفصل الخواص الفيزيائية الأساسية للتربة وذلك من أجل وصف وتصنيف الترب. يبين الجدول التالي الرموز والواحدات المستخدمة في هذا البحث. يرمز للطول بـ L وواحدته (m, cm, mm) وللكتلة بـ m وواحدتها (g, kg, ton) وللكتلة الحجمية بـ ρ وواحدتها (g/cm^3, kg/m^3, Ton/m^3) ولأسباب عملية نستخدم بشكل عام واحدات (g/cm^3, Ton/m^3).

المصطلح العلمي باللغة العربية	المصطلح العلمي باللغة الانكليزية	الرمز	الواحدة
كتلة الجزيئات الصلبة	Mass of Soil Solids	m_s	g
الكتلة الكلية للتربة	Total Mass of the Soil	m_t	g
كتلة الماء	Mass of water	m_w	g
الكتلة الحجمية الكلية	Volumetric Mass or total Volumetric Mass	ρ	g/cm^3
الكتلة الحجمية الجافة	Dry Volumetric Mass	ρ_d	g/cm^3
الكتلة الحجمية المغمورة	Submerged Volumetric Mass	ρ_{sub}	g/cm^3
الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة	Volumetric Mass of Solids	ρ_s	g/cm^3
الكتلة الحجمية المشبعة	Saturated Volumetric Mass	ρ_{sat}	g/cm^3
الكتلة الحجمية للماء	Volumetric Mass of Water	ρ_w	g/cm3
الوزن الحجمي الكلي	Unit weight	γ	kN/m^3
الوزن الحجمي الجاف	Dry unit Weight	γ_d	kN/m^3
الوزن الحجمي المغمور	Submerged unit Weight	γ’	kN/m^3
الوزن الحجمي للجزيئات الصلبة	Unit weight of Solids	γ_s	kN/m^3
الوزن الحجمي المشبع	Saturated unit Weight	γ_{sat}	kN/m^3
الوزن الحجمي للماء	Unit weight of Water	γ_w	kN/m^3
الحجم الكلي	Total volume of Soil	Vt	cm^3

إعداد الدكتور رامي اسطة

cm^3	V_s	Volume of Solids	حجم الجزيئات الصلبة
cm^3	V_v	Volume of Voids	حجم الفراغات
cm^3	V_w	Volume of water	حجم الماء
-	G_s	Specific Gravity of Soil Solids	الوزن النوعي للتربة
-	ρ/ρ_w	Density	الكثافة
%	S_r	Degree of Saturation	درجة الاشباع
%	n	The Porisity	المسامية
%	e	The Void Ratio	عامل المسامية
%	I_D	Relative Density	الكثافة النسبية
%	ω	Water Content	الرطوبة
-	C_u	Uniformity coefficient	عامل التجانس
-	C_z	Coefficient of Gradation	عامل الانحناء
%	L_L	Liquid Limit	حد السيولة
%	P_L	Plastic limit	حد اللدونة
%	S_L	Shrinkage Limit	حد الانكماش
%	P_I	The plasticity Index	قرينة اللدونة
%	C_I	Consistency Index	دليل القوام
%	L_I	Liquidity Index	دليل السيولة
-	-	Particle-Size Distribution Curve	منحني التدرج الحبي
-	-	Sieve Analysis Test	تجربة التحليل الحبي
%	F_{200}	Percent Finer	نسبة المار من المنخل 200
		Soil Classification	**تصنيف التربة**

الجدول 1-2 بعض الرموز والواحدات المستخدمة

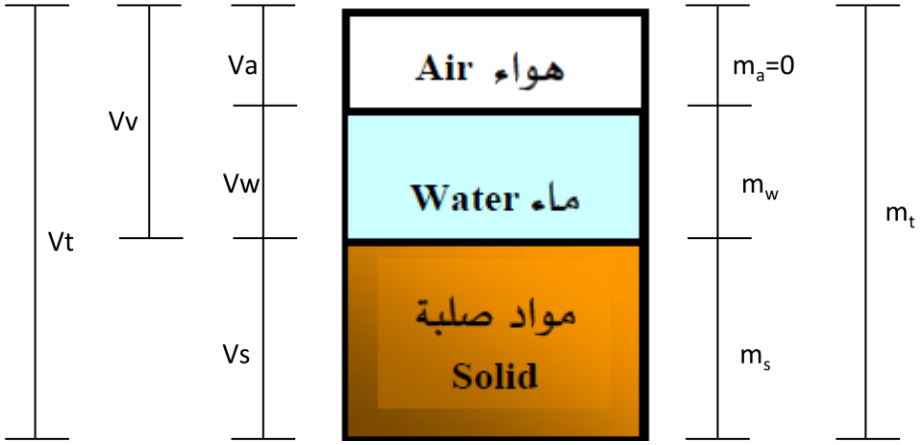
2. 1تعاريف وعلاقات الأطوار

بشكل عام, يمكن القول بأن التربة مكونة من مجموعة من الجزيئات الصلبة محاطة بالفراغات. الجزيئات الصلبة مكونة من حبيبات من معادن مختلفة، بينما الفراغات يمكن أن تكون مملوءة بالماء أو الهواء أو الاثنين معاً.

الحجم الكلي للتربة V_t يكون مساوياً لمجموع حجم الجزيئات الصلبة V_s وحجم الفراغات V_v، ويتكون حجم الفراغات V_v من مجموع حجم الماء V_w وحجم الغاز V_a.

أما الكتلة الكلية للتربة فتتكون من مجموع كتلة الجزيئات الصلبة m_s وكتلة الماء الموجود في فراغاتها m_w.

يمكن تمثيل هذه الأطوار الثلاث بالشكل 2-1 . نشير على اليسار إلى الحجم الذي يشغله كل من الأطوار الثلاث, أما على اليمين فنشير إلى الكتلة الموافقة.



الشكل 2–1: العلاقة بين الحجوم والكتل للتربة

يمكن تقسيم الخصائص الفيزيائية للتربة إلى خصائص مشتركة لجميع أنواع الترب وإلى خصائص تعود للترب الناعمة.

2. 2 الخصائص الفيزيائية المشتركة لجميع أنواع الترب

2. 2. 1 الكتل الحجمية والأوزان الحجمية

تستخدم في الجيوتكنيك عدة كتل حجمية: الكتلة الحجمية الكلية (أو الكتلة الحجمية الطبيعية) ρ, الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة ρ_s ، الكتلة الحجمية للماء ρ_w ، الكتلة الحجمية الجافة ρ_d , الكتلة الحجمية المشبعة ρ_{sat} و الكتلة الحجمية المغمورة ρ_{sub} .

من الشكل 2-1 نستطيع كتابة :

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} = \frac{m_s + m_w}{V_t} \qquad (2.1)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{Vs} \qquad (2.2)$$

$$\rho_w = \frac{m_w}{Vw} \qquad (2.3)$$

تتعلق الكتلة الحجمية الطبيعية بكمية الماء الموجودة في العينة وبالكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة. تتراوح قيم الكتلة الحجمية الكلية ρ بين $1g/cm^3$ و $2.4g/cm^3$, أما الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة ρ_s فتتراوح قيمتها لمعظم الترب بين $2.5g/cm^3$ و $2.8g/cm^3$. تتراوح قيمة ρ_s للرمل بين $2.6g/cm^3$ و $2.7g/cm^3$ ، ولمعظم الترب الغضارية بين $2.65g/cm^3$ و $2.8g/cm^3$ وذلك حسب طبيعة المينرال المسيطر , أما في حالة الترب العضوية فقيمة ρ_s تكون صغيرة وتكون عادة قريبة من $2.5g/cm^3$. بشكل عام، تغير الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة طفيف وذلك لأن العناصر المسيطرة في التربة هي الألمنيوم والسليسيوم، وأن للعنصرين أوزان ذرية متقاربة (26.98 للألمنيوم و 28.09 للسيليسيوم)، ولذلك فإن الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة لأغلب المعادن المكونة للتربة تتراوح بين 2.4 و9.2

يستخدم عادة الوزن النوعي Gs بدلاً من الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة، ويساوي الكتلة الحجمية للجزيئات الصلبة مقسومة على الكتلة الحجمية للماء، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \qquad (2-4)$$

تتغير الكتلة الحجمية للماء ρ_w بشكل طفيف حسب درجة حرارة الماء, ففي الدرجة +4 مئوية يبلغ الماء كتلته الحجمية العظمى المساوية لـ $1g/cm^3$. بشكل عام, في الجيوتكنيك يمكن اعتبار $\rho_w=1g/cm^3$

هناك أيضاً ثلاث كتل حجمية مرجعية : الكتلة الحجمية الجافة ρ_d , الكتلة الحجمية المشبعة ρ_{sat} والكتلة الحجمية المغمورة ρ_{sub} . يمكن حساب هذه الكتل الحجمية بالعلاقات التالية :

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_t} \qquad (2.5)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + m_{w(Sr=1)}}{V_t} \qquad (2.6)$$

$$\rho_{sub} = \rho_{sat} - \rho_w \qquad (2.7)$$

تمثل S_r في العلاقة درجة الاشباع، وقيمتها تساوي 1 في حالة الاشباع.

تستخدم أحياناً عبارة الكثافة وهي تشير إلى الكتلة الحجمية منسوبة إلى الكتلة الحجمية للماء, أي أن الكثافة الطبيعية تساوي $\frac{\rho}{\rho_w}$ والكثافة الجافة $\frac{\rho_d}{\rho_w}$ وهي قيم لابعدية (بدون واحدة).

غالباً ما يستخدم الوزن الحجمي بدلاً عن الكتلة الحجمية أو الكثافة، وهو يساوي وزن واحدة الحجوم للتربة، أي أنه يساوي وزن العينة مقسوماً على حجمها، ويساوي أيضاً الكتلة الحجمية مضروبة بتسارع الجاذبية الأرضية، أي أن:

$$\gamma = \rho . g = \frac{P}{V_t} = \frac{m.g}{V_t} \qquad (2.8)$$

حيث،

P تمثل وزن العينة

g تسارع الجاذبية الأرضية $g=9.81\ m/s^2$

تجدر الإشارة إلى أنه في ميكانيك التربة غالباً ما يتم الخلط بين الكتلة الحجمية والوزن الحجمي والكثافة.

نبين في الجدول 2-2القيم النموذجية لـ ρ_d , ρ_{sat} و ρ_{sub} لبعض أنواع الترب

نوع التربة	ρ_d g/cm^3	ρ_{sat} g/cm^3	ρ_{sub} g/cm^3
رمل و بحص	1.5–2.3	1.9–2.4	1–1.3
سيلت وغضار	0.6–1.8	1.4–2.1	0.4–1.1
حجر مكسر	1.5–2	1.9–2.2	0.9–1.2
تورب	0.1–0.3	1–1.1	0–0.1
غضار وسيلت عضوي	0.5–1.5	1.3–1.8	0.3–0.8

الجدول 2-2 : الكتل الحجمية لبعض أنواع الترب (Hansbo, 1975)

من أجل حساب الأوزان والكتل الحجمية فإنه يمكن مخبرياً قياس الكميات التالية: الكتلة الكلية m_t ،الحجم الكلي V_t ، كتلة الماء m_w وكتلة الجزيئات الصلبة m_s . بعد ذلك يمكن حساب المقادير الأخرى.

2. 2. 2 أبعاد الحبيبات والتدرج الحبي

منحني التدرج الحبي هو منحني يحدد النسب الوزنية لجزيئات التربة الصلبة بأبعاد أصغر من D (نسبة المار من المنخل ذي الفتحة D بدلالة البعد D). من أجل رسم منحني التدرج الحبي نلجأ إلى إجراء يدعى التحليل الحبي, حيث نقوم بهز عينة التربة ضمن سلسلة من المناخل ذات الفتحات المربعة المتناقصة تدريجياً. بمعرفة وزن العينة الكلي فإنه يمكن تحديد نسب الجزيئات المحجوزة على كل منخل عن طريق قياس وزن الجزيئات المحجوزة على كل منخل ثم يتم نسبها إلى وزن العينة الجاف الكلي ثم تحسب النسبة المارة من كل منخل (المواصفتين C-133 و D-422 من الـ ASTM والمواصفتين T27 و T88 من الـ AASHTO). يبين الجدول 2-3 أهم المناخل المستخدمة في التحليل الحبي.

رقم المنخل	4	10	20	40	60	100	200
فتحة المنخل بالمم	4.75	2	0.85	0.425	0.25	0.15	0.075

الجدول 2-3 : فتحات المناخل بحسب أرقامها

من الناحية العملية, يستحيل نخل التربة على مناخل ذات فتحات أصغر من 0.075mm لذلك نلجأ إلى التحليل الحبي بالترسيب للترب الناعمة كالسيلت والغضار. يرتكز التحليل الحبي بالترسيب على قانون ستوكس الذي يعبر عن سرعة سقوط جزيء كروي ضمن وسط لزج بدلالة قطر الجزيء. تتعلق هذه السرعة بقطر الحبيبات المنحلة ضمن الماء و بالكتلة الحجمية لجزيئات التربة وبلزوجة السائل، و تعطى بالعلاقة التالية:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_0}{1.8\eta} d^2 \qquad (2-9)$$

v سرعة السقوط cm/s

d قطر الجزيء cm

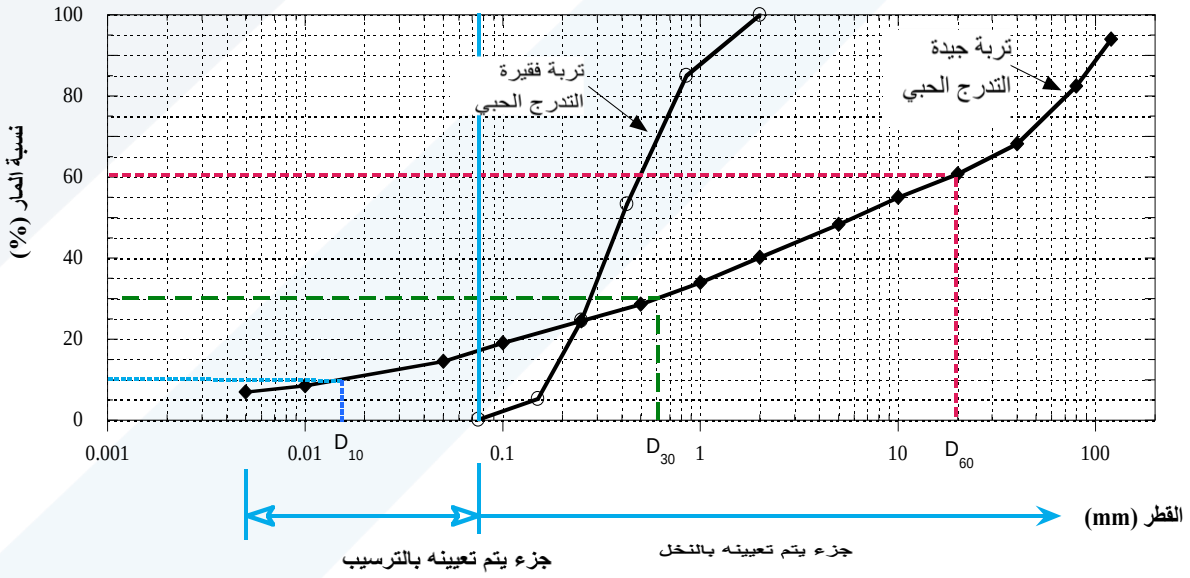
γ_0 الوزن الحجمي للسائل kN/m^3

η اللزوجة الديناميكية Pa/s

من الناحية العملية، من أجل تطبيق قانون ستوكس من المناسب استخدام محلول مبعثر للجزيئات بتركيز منخفض (حوالي 20 غرام لكل ليتر) وباستخدام جزيئات تربة ناعمة تتراوح أقطارها بين 1 ميكرون و75 ميكرون.

بحسب التجربة، قطر الجزيء يساوي قطر جزيء كروي له نفس الكتلة الحجمية ونفس سرعة السقوط.

يمكن تمثيل توزع الجزيئات بمنحني يدعى منحني التدرج الحبي , يمثل المحور الأفقي القطر المكافئ للجزيئات بمقياس لوغاريتمي و يمثل المحور الشاقولي النسب الوزنية للجزيئات المارة من المناخل (الشكل 2-2). الترب ذات التدرج الجيد هي الترب التي يكون منحني التدرج الحبي الخاص بها ممتد على عدد كبير من الأقطار وتكون هذه المنحنيات مستمرة وذات تقعر خفيف باتجاه الأعلى. بالمقابل, الترب فقيرة التدرج الحبي هي ترب تحتوي على عدد صغير من الأقطار أو قد تتكون من ترب ذات قطر وحيد ويكون ميل منحني التدرج الحبي لهذه الترب كبيراً.



الشكل 2-2: منحنيات التدرج الحبي

نهتم في ميكانيك التربة ببعض الأقطار D الموافقة لنسبة محددة على منحني التدرج الحبي . على سبيل المثال, D10 تمثل قطر الحبيبات الموافق لنسبة مار 10% وزناً وهذا يعني أن 10% من الجزيئات أقطارها أقل من D10 .

من أجل توصيف التدرج الحبي لتربة ما نستخدم عادة عاملين أساسيين : عامل التجانس Cu وعامل الانحناء Cz، حيث :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$
$$C_z = \frac{D^2_{30}}{D_{60} \cdot D_{10}} \qquad (2-10)$$

D60 تمثل قطر الحبيبات بالمم الموافق لنسبة مار 60%

D30 تمثل قطر الحبيبات بالمم الموافق لنسبة مار 30%

عندما تكون Cu أكبر من 4 للبحص وأكبر من 6 للرمل وتكون قيمة Cz محصورة بين 1 و 3 فإننا نعتبر أن التربة غير متجانسة (جيدة التدرج)

2. 2. 3 المسامية، عامل المسامية والكثافة النسبية أو دليل الكثافة والرطوبة ودرجة الاشباع

المسامية n (Porosity)

تعبر المسامية عن حجم المسامات الموجودة في العينة مأخوذة كنسبة من الحجم الكلي للعينة, ويمكن كتابة علاقتها كما يلي :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \qquad (2-11)$$

يمتد مجال القيم الممكنة للمسامية بين الصفر والواحد

عامل المسامية e (Void ratio)

يعبر عامل المسامية عن حجم المسامات الموجودة في العينة مأخوذة كنسبة من حجم الجزيئات الصلبة, ويمكن كتابة علاقته كما يلي :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (2-12)$$

يمتد مجال القيم الممكنة لعامل المسامية بين الصفر واللانهاية, أما القيم النموذجية فهي كالتالي: الرمل بين 0.4 و 1 أما الغضار فبين 0.3 و 1.5 .

من الشكل 2–1 ومن العلاقتين 12–2 و 13–2 نستطيع الاستنتاج أن :

$$n = \frac{e}{1+e} \qquad (2-13)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \qquad (2-14)$$

الكثافة النسبية أو دليل الكثافة I_D (Density index)

تعرف الكثافة النسبية بالفرق بين معامل المسامية الأعظمي ومعامل المسامية في الحالة الطبيعية للترب المفككة منسوباً إلى الفرق بين معامل المسامية الأعظمي ومعامل المسامية الأصغري، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \left[\frac{\rho_d - \rho_{d(\min)}}{\rho_{d(\max)} - \rho_{d(\min)}}\right]\frac{\rho_{d(\max)}}{\rho_d} \qquad (2-15)$$

حيث،

e_{max} و $\rho_{d(max)}$ عامل المسامية الأعظمي والكتلة الحجمية الجافة الأعظمية للتربة

e_{min} و $\rho_{d(min)}$ عامل المسامية الأصغري والكتلة الحجمية الجافة الأصغرية للتربة

e و ρ_d عامل المسامية الطبيعي والكتلة الحجمية الجافة الطبيعية للتربة

تعبر الكثافة النسبية عن حالة التربة المفككة (مخلخلة جداً أو مخلخلة أومتوسطة التراص أو متراصة أو متراصة جداً)،

وبالتالي تعبر عن امكانية هبوط التربة تحت تأثير الحمولات الخارجية فالترب المخلخلة تتعرض لهبوط كبير بينما يكون

هبوط الترب المتراصة صغير جداً. يمكن تصنيف الترب حسب كثافتها النسبية كالتالي:

الكثافة النسبية ID	0-0.15	0.15-0.35	0.35-0.65	0.65-0.85	0.85-1
حالة التربة	مخلخلة جداً	مخلخلة	متوسطة التراص	متراصة	متراصة جداً

الجدول 4-2: تصنيف الترب المفككة حسب كثافتها النسبية

الرطوبة ω (Moisture content)ودرجة الاشباع S_r (Degree of saturation)

تعرف الرطوبة بنسبة كتلة الماء في التربة إلى كتلة التربة الجافة، وتعطى بالعلاقة:

$$\omega(\%) = \frac{m_w}{m_s} * 100 \qquad (2-16)$$

w الرطوبة

m_w كتلة الماء

m_s كتلة التربة الجافة

تعبر درجة الاشباع عن نسبة حجم الفراغات المملوءة بالماء إلى حجم الفراغات الكلي الموجودة في هذه العينة, مأخوذة كنسبة مئوية, وتكتب علاقتها بالشكل التالي :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} * 100 \qquad (2-17)$$

إذا كانت التربة جافة تماماً فإن Sr=0, أما عندما تكون عينة التربة مشبعة تماماً فإن Sr=100%.

يمكن تصنيف حالة التربة بحسب درجة الاشباع كما هو مبين في الجدول (2-5)

حالة التربة	درجة الاشباع Sr (%)
جافة	0
منخفضة الرطوبة	1-25
رطبة	25-50
مرتفعة الرطوبة	50-75
مشبعة	100

الجدول 2-5: تصنيف التربة حسب درجة الاشباع

وفيما يلي العلاقات الأساسية التي تربط بين الخواص الفيزيائية المشتركة لجميع أنواع الترب

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = (1-n)G_s\ \gamma_w$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \qquad n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} . g = [(1-n)G_s + n]\gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w \qquad (2.18)$$

$$\gamma_{sub} = \rho_{sub} . g = \gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w - \gamma_w = \gamma_d - \gamma_w(1-n) = (\gamma_s - \gamma_w)(1-n)$$

$$S_r . e = \omega . G_s \Rightarrow S_r = \frac{\omega . G_s}{e}$$

2. 3 خصائص الترب الناعمة

تمتلك الترب الناعمة وخاصة الترب الغضارية خصائص مميزة مقارنة بالترب الخشنة، وتلعب هذه الخصائص دوراً هاماً في السلوك الميكانيكي لهذه الترب.

لكل جزيء غضار شحنة كهربائية سالبة على سطحه الخارجي، وبالتالي فالماء الموجود في التربة يخضع لشحنة كهربائية بالقرب من سطح جزيئات التربة ولا يعد لجزيئات الماء مواصفات الماء العادي بالقرب من سطح جزيئات التربة، وانما يدعى بالماء المتصل أو الصلب، ويكون كل جزيء تربة صلب محاطاً بغلاف خاص من الماء سماكته بحدود 5 ميكرومتر (الشكل 4-2). تأثير هذا الغلاف المائي مهمل على الترب الخشنة، أما على الترب الغضارية فتأثيره أساسي على سلوكها.

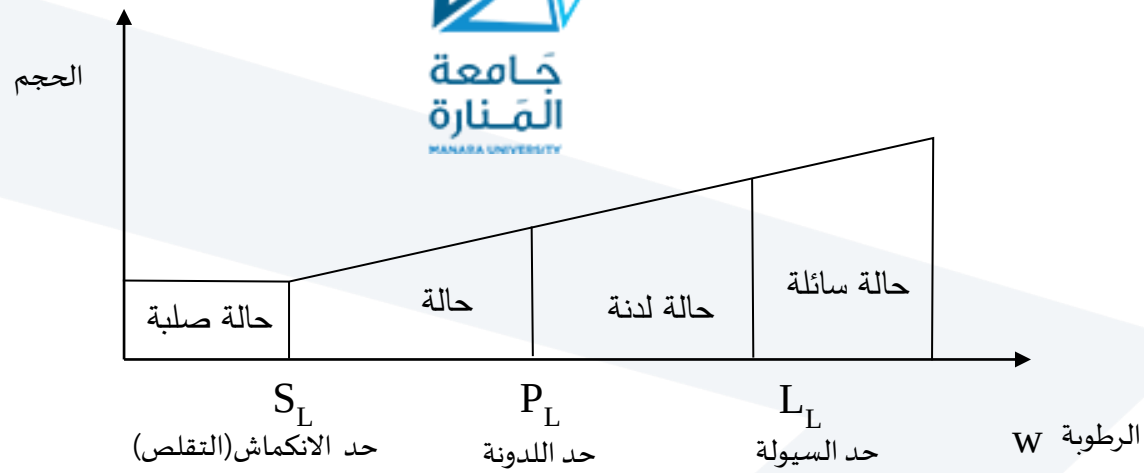
2. 3. 1 السطح النوعي (Specific surface)

يمثل السطح النوعي المساحة التي تشغلها واحدة كتلة الجزيئات الصلبة وواحدته m^2/g. إذا حسبنا السطح النوعي لتربة جزيئاتها مكونة من مكعبات طول ضلعها 1mm نلاحظ بأنها تساوي 10 أضعاف السطح النوعي فيما لو كانت جزيئات التربة مكونة من مكعبات طول ضلعها 1cm (الكتلة الحجمية للتربة متساوية في الحالتين). أي أن السطح النوعي للتربة يتناقص بزيادة أبعاد جزيئات التربة. استناداً إلى ذلك، فإن كمية الماء اللازمة لترطيب كتلة معينة من تربة مكونة من جزيئات مكعبية طول ضلعها 1mm تساوي 10 أضعاف كمية الماء اللازمة لترطيب نفس الكتلة وجزيئاتها مكونة من مكعبات طول ضلعها 1cm. انطلاقاً من هذا المبدأ فإنه يتوقع أن تزداد رطوبة التربة الطبيعية كلما زادت نعومة التربة مع ثبات بقية العوامل الأخرى.

يتراوح السطح النوعي لمينرال الكاولونايت $20\text{-}30m^2/g$ ، وهي قيمة صغيرة نسبياً، أي أن هذا المينرال لا يمتص الكثير من الماء ولا تحصل فيه تغيرات حجمية كبيرة. أما بالنسبة لمينرال المونموريونايت فيتجاوز سطحه النوعي $600m^2/g$ وهي قيمة كبيرة جداً ويمتص هذا المينرال الكثير من الماء ويتعرض لتغيرات حجمية كبيرة (انتفاخاً وهبوطاً).

2. 3. 2 حدود أتربرغ أو حدود القوام (Atterberg limits)

يتواجد الغضار على شكل كتل، حيث ترتبط كل ذرة بالذرات المجاورة بواسطة قوى التماسك الناتجة عن وجود الأغلفة المائية المحيطة بجزيئات الغضار الصلبة. يتعلق قوام الترب الغضارية الناتج برطوبة التربة. نميز بين ثلاث حالات لقوام الترب الغضارية : الحالة السائلة ، الحالة اللدنة والحالة الصلبة. حدود أتربرغ عبارة عن رطوبات تمثل حدوداً لبعض الحالات الحدية للترب الناعمة وهي حد السيولة وحد اللدونة وحد الانكماش (الشكل 3-2). في الحالة السائلة، تكون جزيئات التربة مستقلة عن بعضها البعض، وفي الحالة اللدنة تتقارب جزيئات التربة من بعضها البعض أكثر من الحالة السائلة، أما في الحالة الصلبة فتكون المسافة بين الجزيئات الصلبة أصغر ما يمكن والاحتكاك بين الجزيئات كبير (الشكل 4-2).

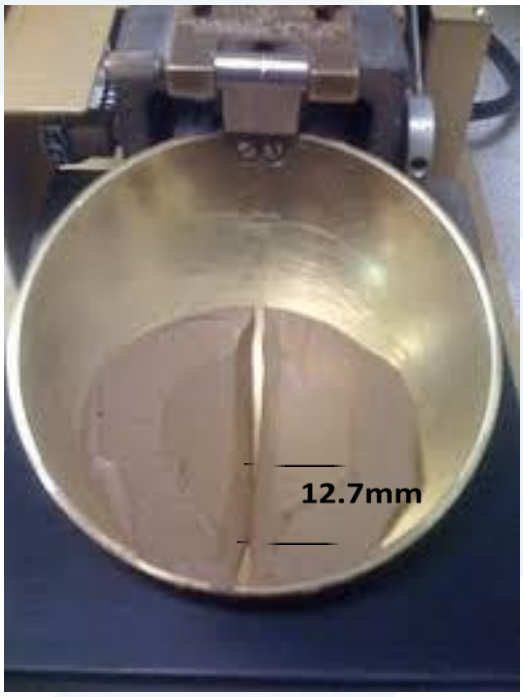


الشكل 2-3 : حالات قوام التربة وحدود أتربرغ

الشكل 2-4 : المسافات بين جزيئات التربة الغضارية عند حالات قوام التربة المختلفة

حد السيولة (Liquid limit, LL)

يعرف حد السيولة برطوبة التربة التي عند زيادتها بمقدار ضئيل تنتقل التربة من الحالة اللدنة إلى الحالة السائلة، ويمثل تجريبياً رطوبة التربة التي يلتحم عندها أسفل الشق المعمول وسط العينة بمقدار 12.7mm عند 25 ضربة بواسطة جهاز غازاغراند.



حد اللدونة (Plastic limit, PL)

يعرف حد اللدونة برطوبة التربة التي عند نقصانها بمقدار ضئيل تنتقل التربة من الحالة اللدنة إلى الحالة نصف الصلبة، ويعرف تجريبياً برطوبة الفتائل عندما تبدأ بالتشقق عند القطر 3mm ، ويعرف أحياناً برطوبة التربة التي عند صنع فتائل منها بقطر 3mm فإنها تتقطع إلى قطع بطول (1-2)cm ولا يمكن بعد ذلك صنع فتائل منها بقطر أصغر.

حد التقلص أو الانكماش (Shrinkage limit)

هو رطوبة التربة الأعظمية التي تتوقف عندها التغيرات الحجمية.

قرينة اللدونة P_I (Plasticity index)

تعبر قرينة اللدونة عن امتداد مجال اللدونة للتربة ، وتعطى بالعلاقة:

$$P_I = L_L - P_L \qquad (2-19)$$

قرينة اللدونة ذات أهمية كبيرة في الجيوتكنيك فكلما زادت قيمتها اتسع مجال اللدونة وزادت امكانية التغير الحجمي للتربة (انتفاخاً وهبوطاً). تصنف التربة حسب قرينة اللدونة وفق الجدول التالي:

قرينة اللدونة PI(%)	تصنيف التربة حسب لدونتها	نوع التربة	تماسك التربة
0-5	ليس لدناً	رمل (Sand)	غير متماسك (مفكك)
5-15	منخفض اللدونة	سيلت(Silt)	منخفض التماسك
15-40	متوسط اللدونة	غضار سيلتي(Silty clay)	متوسط التماسك
>40	عالي اللدونة	غضار(Clay)	عالي التماسك

الجدول 6-2: تصنيف التربة حسب قرينة اللدونة

دليل القوام C_I (Consistency index)

يعبر دليل القوام عن قوام التربة الذي يمكن أن يكون سائلاً أو لدناً أو صلباً، ويعطي دليل القوام بالعلاقة:

$$C_I = \frac{L_L - w}{P_I} \qquad (2-20)$$

يتغير قوام التربة حسب رطوبتها، فعندما تكون الرطوبة مساوية لحد السيولة أو أكبر منه فإن قوام التربة يكون سائلاً وقيمة دليل القوام تصبح أصغر أو تساوي الصفر. أما عندما تكون رطوبة التربة أصغر من حد السيولة ولا تقل عن حد اللدونة فإن قوام التربة يصبح لدناً وقيمة دليل القوام تكون أكبر من الصفر ولا تتجاوز الواحد. أما إذا كانت رطوبة التربة أصغر من حد اللدونة فإن قوام التربة يصبح صلباً وقيمة دليل القوام تتجاوز الواحد (الجدول 7-2).

دليل القوام	قوام التربة
$C_I \leq 0$	سائل
$0 < C_I < 1$	لدن
$C_I > 1$	نصف صلب أو صلب

الجدول 7-2: تصنيف التربة حسب دليل القوام

دليل السيولة L_I (Liquidity index)

يعرف دليل السيولة بالعلاقة التالية:

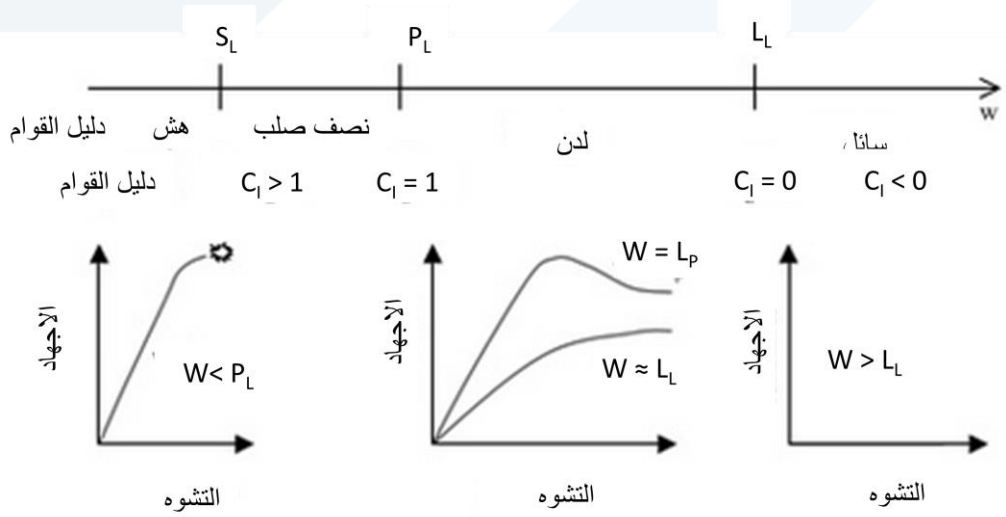
$$L_I = \frac{w - P_L}{P_I} \qquad (2-21)$$

تتناقص قيمة دليل السيولة كلما تحسن قوام التربة، فعندما يكون القوام نصف صلب تكون قيمة دليل السيولة أصغر من الصفر، وفي حالة القوام اللدن تكون قيمة دليل السيولة محصورة بين الصفر والواحد، وفي حالة القوام السائل تكون قيمة دليل السيولة أكبر من الواحد .

دليل السيولة L_I	قوام التربة
0	قاسي جداً
≤0 و 1 ≤	قاسي إلى لدن
>1	سائل

الجدول 8-2: تصنيف التربة حسب دليل السيولة

تساعد معرفة حدود أتربرغ للتربة في الحصول على معلومات هامة عن سلوك التربة (الشكل 2-5)، كما تساعد في تصنيف الترب الناعمة, ويمكن الربط بين هذه الحدود ومختلف الخواص الجيوتكنيكية للتربة.



الشكل 2-5 : العلاقة بين حدود أتربرغ وسلوك الترب الغضارية

2. 3. 3 النشاط A_c (Activity)

تم دراسة نشاط الغضار من قبل سكمبتون عام 1953، حيث اقترح العلاقة التالية لتحديد نشاط الغضار Ac:

$$A_c = \frac{P_I}{clay\ percentage} \qquad (2-21)$$

صنف سكمبتون نشاط الغضار وفقاً لـ Ac كالتالي:

Ac	نشاط الغضار
<0.75	غير نشط
0.75-1.25	متوسط النشاط
>1.25	نشط

الجدول 9-2: تصنيف نشاط الترب الغضارية حسب Ac

نشاط الغضار مؤشر على التغير الحجمي للغضار فكلما زاد نشاط الغضار كلما زاد تغيره الحجمي انتفاخاً وتقلصاً.

يبين الجدول 10-2 قيم حد السيولة وحد اللدونة والنشاط للمينرالات الغضارية الأساسية.

المنزال الغضاري	حد السيولة LL(%)	حد اللدونة PL(%)	عامل النشاط Ac
الكاولونايت	35-100	20-40	0.3-0.5
الاليت	60-120	35-60	0.5-1.2
المونموريونايت	100-900	50-100	1.5-7

الجدول 10-2 : قيم حد السيولة وحد اللدونة والنشاط للمينرالات الغضارية الأساسية (Mitchell, 1976 ; Skempton, 1953)

2. 3. 4 الحساسية (Sensitivity)

بشكل عام، عند تشكيل عينة غضارية فإن سلوكها يختلف عن سلوكها الطبيعي حتى في حال تشكيلها بنفس خواصها الطبيعية (الوزن الحجمي والرطوبة). تدعى نسبة مقاومة الضغط البسيط للعينة الطبيعية إلى مقاومة الضغط البسيط للعينة المشكلة مخبرياً بعامل حساسية الغضار، ويكتب كما يلي:

$$S_t = \frac{q_{u(\text{int act})}}{q_{u(remolded)}} \qquad (2-22)$$

$q_{u(intact)}$ تمثل مقاومة الضغط البسيط للعينة الطبيعية

$q_{u(remolded)}$ تمثل مقاومة الضغط البسيط للعينة المشكلة مخبرياً

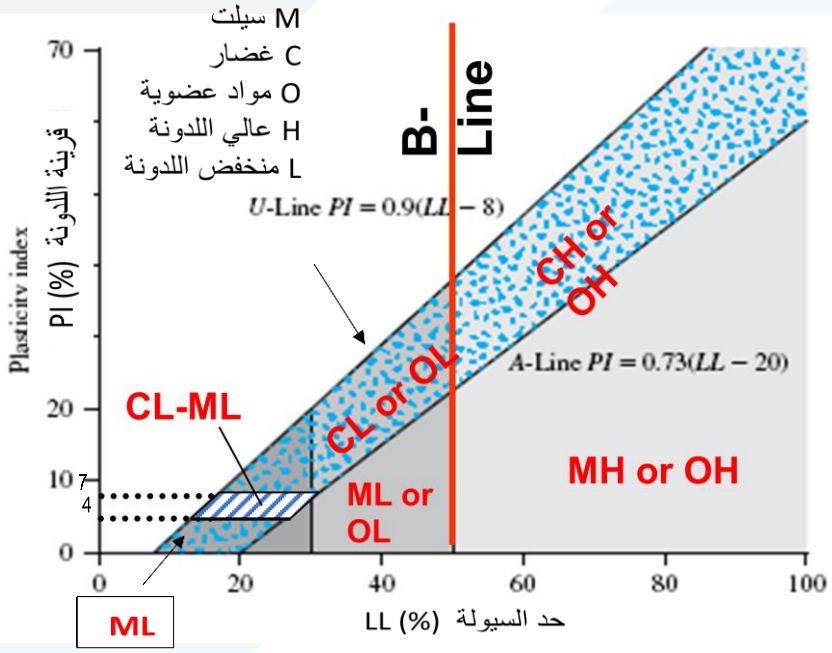
يمكن تصنيف الترب الغضارية بحسب حساسيتها كما هو مبين في الجدول 11-2

عامل الحساسية St	طبيعة الغضار من حيث الحساسية
2-4	طبيعية
4-8	حساسة
>8	عالية الحساسية

الجدول 11-2: تصنيف الترب الغضارية حسب حساسيتها

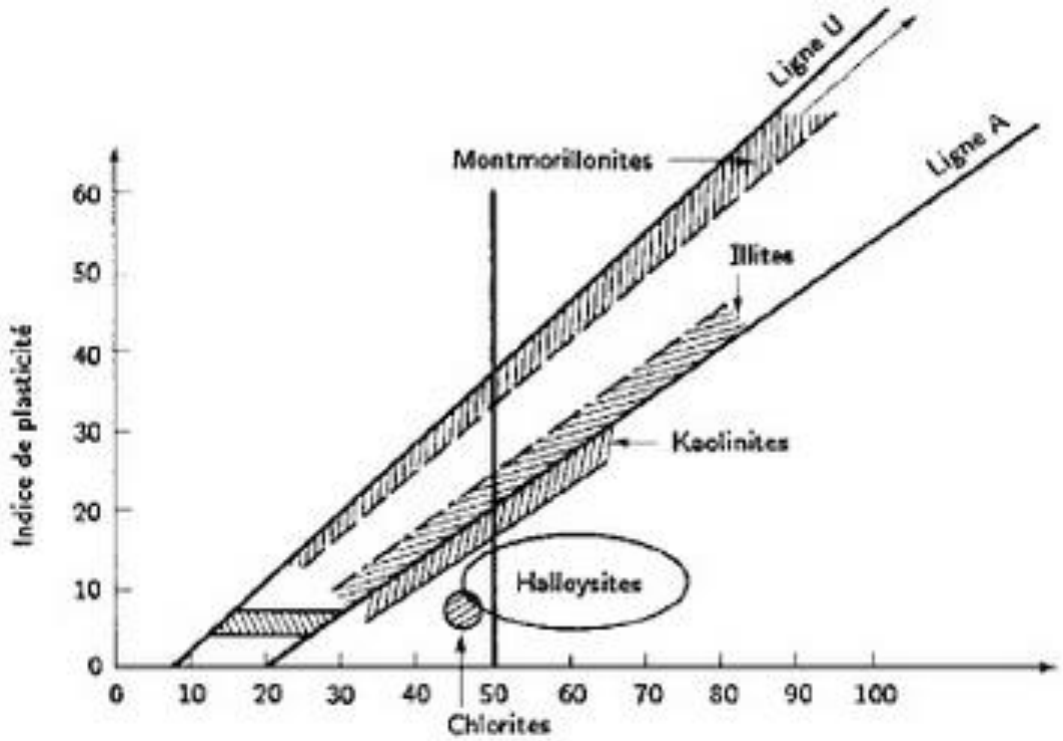
2. 3. 5مخطط اللدونة

اعتماداً على الكثير من النتائج المخبرية، قام غازاغراند عام 1932 بدراسة العلاقة بين حد السيولة وقرينة اللدونة واقترح المستقيم " A" الذي معادلته PI=0.73(LL-20) والذي يفصل السيلت عن الغضار(الشكل 6-2). قيم الغضار تقع على المستقيم A وفوقه، بينما قيم السيلت تقع تحت المستقيم A . الخط العمودي الموافق لحد السيولة 50% يفصل السيلت والغضار متوسط الانضغاطية (ضمن مجال حد السيولة من 30 حتى 50%) عن السيلت والغضار عالي الانضغاطية (حد السيولة أكبر من 50%). يوفر مخطط اللدونة معلومات هامة جداً ويتم تصنيف الترب الناعمة باستخدام هذا المخطط.



الشكل 6-2 : مخطط اللدونة (العلاقة بين حد السيولة وقرينة اللدونة)

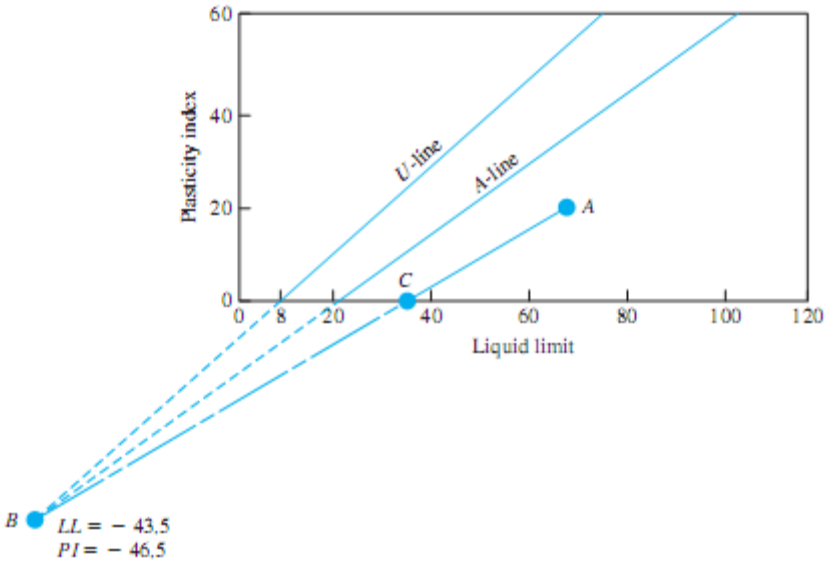
نشير إلى أن المستقيم الذي يدعى " U" والذي معادلته : PI=0.9(LL-8) ، هو تقريباً الحد الأعلى لقيم حد السيولة وقرينة اللدونة التي لم يحصل على الاطلاق (بحسب غازاغراند)أن تم تسجيل قيم أعلى منها. يوضح الشكل 2-7 موقع كل من الميرالات الغضارية الأساسية على مخطط تصنيف المواد الناعمة اعتماداً على حد السيولة وقرينة اللدونة.



الشكل 2-7 موقع كل من المينرالات الغضارية الأساسية على مخطط تصنيف المواد الناعمة اعتماداً على حد السيولة وقرينة اللدونة.

هناك استخدام آخر للمستقيم A والمستقيم U، فقد اقترح غازاغراند طريقة تقريبية لتحديد حد التقلص للتربة باستخدام هذين المستقيمين بالاضافة إلى قيم حد السيولة وقرينة اللدونة لهذه التربة. الطريقة مبينة بالشكل 2-8 وهي تتم كالتالي:

1- رسم نقطة حد السيولة - قرينة اللدونة على الشكل ولتكن النقطة A
2- تمديد المستقيمين A و U حتى يلتقيا في النقطة B ذات الاحداثيات LL=-43.5 و PI=-46.4
3- وصل النقطتين A وB فتتقاطعان مع المحور الأفقي (محور حد السيولة) في النقطة C. يمثل الاحداثي الأفقي لهذه النقطة حد التقلص المطلوب.



الشكل 8-2: الطريقة التقريبية لتحديد حد التقلص

4.2 تصنيف الترب

تصنيف الترب لا يعني فقط تحديد نوعها، فمثلاً لا يكفي أن نقول أن التربة مكونة من الرمل أو البحص أو السيلت أو الغضار أو مزيج من بعض هذه الجزيئات. في الحقيقة, تصنيف الترب يعني بالإضافة إلى تحديد نوعها تحديد مجموعة من خواص هذه التربة كاللون والرائحة وقوام الترب الناعمة ودرجة تراص الترب الخشنة.

العوامل المصنفة للتربة

يستخدم عادة التدرج الحبي وحدود أتربرغ والكثافة النسبية في تصنيف الترب:

- التدرج الحبي: يفصل المنخل 200 بين المواد الخشنة (بحص ورمل) والمواد الناعمة (سيلت وغضار) لذلك من الضروري معرفة نسبة المواد الناعمة المارة من المنخل 200 وذلك لمعرفة إن كانت التربة خشنة أم ناعمة، كما أنه يتوجب معرفة نسبة البحص (المتراكم على المنخل 4.75 مم أو 2 مم) وذلك لمعرفة إن كانت غالبية التربة الخشنة مكونة من البحص أم الرمل، وهناك طرق تصنيف تستخدم مناخل إضافية لذلك فمن الضروري إجراء تجربة التحليل الحبي من أجل التمكن من تصنيف التربة بشكل صحيح.
- حدود أتربرغ: في حالة الترب الناعمة أو عندما تكون التربة خشنة وتحتوي على نسبة كبيرة نسبياً من المواد الناعمة فيتوجب عندئذ إجراء تجربة تحديد حدود أتربرغ (حد السيولة وحد اللدونة وقرينة اللدونة) وذلك لمعرفة إن كانت التربة الناعمة غضارية أم سيلتية وأيضاً إن كانت مرتفعة أم منخفضة اللدونة.
- الكثافة النسبية: تستخدم الكثافة النسبية للترب الخشنة وهي تفيد في تحديد حالة التربة إن كانت متراصة أم متوسطة التراص أم مخلخلة.

أنظمة التصنيف متعددة، أشهرها نظام التصنيف الموحد (USCS) ونظام الـ AASHTO اللذان يستخدمان على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية, مع الإشارة إلى أن نظام التصنيف الموحد غالباً ما يستخدم في مجال الهندسة الجيوتكنيكية أما نظام الـ AASHTO فيستخدم في مجال الطرق.

2. 1. 4 نظام التصنيف الموحد (USCS)

تم وضع نظام التصنيف الموحد (USCS) عام 1948 من قبل غازاغراند من أجل بناء مهابط الطائرات, وفي عام 1952 قام غازاغراند بإجراء بعض التعديلات عليه وذلك لجعل هذا التصنيف قابل للتطبيق على السدود والأساسات والأنواع الأخرى من المنشآت المدنية. سنعرض فيما يلي نسخة الـ ASTM من التصنيف الموحد.

يتم وفق هذا النظام تصنيف الترب الخشنة كالبحص والرمل اعتماداً على أبعاد الحبيبات (التدرج الحبي)، أما الترب الناعمة كالسيلت والغضار فتصنف اعتماداً على سلوكها اللدن. أي أنه من أجل التصنيف الكامل للتربة حسب نظام التصنيف الموحد يكفي إجراء تجربة التحليل الحبي أو تجربة حدود أتربرغ أو التجربتين معاً.

يتضمن التصنيف الموحد أربع تقسيمات أساسية : الترب الخشنة (بحص ورمل) , الترب الناعمة (السيلت والغضار) , الترب العضوية والتورب.

يعرف البحص وفق هذا التصنيف بالجزيئات الصلبة التي تمر من المنخل 3 انش (75mm) وتحجز على المنخل رقم 4 (4.75mm). أما الرمل فيمر من المنخل رقم 4 ويحجز على المنخل 200 . أما السيلت فيمر من المنخل 200 و نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" تقع تحت المستقيم "A" (الشكل 10-2) . أما الغضار فيمر من المنخل 200 وإذا مثلنا نقطة قرينة اللدونة بدلالة حد السيولة على مخطط اللدونة فإن النقطة تقع على المستقيم "A" أو فوقه وقرينة لدونته أكبر من 7.

يتم تصنيف الترب وفق نظام التصنيف الموحد انطلاقاً من نسبة المار من المنخل 200 ، ففي الترب الخشنة يكون أكثر من 50% من وزن التربة الجاف محجوزاً على المنخل 200 , بينما في الترب الناعمة فإن 50% أو أكثر من وزن التربة الجاف يمر من المنخل 200.

ينتج عن هذا التصنيف رمزاً مفرداً للمجموعة التي تنتمي إليها التربة باستثناء حالتين: الحالة الأولى عندما تكون التربة خشنة ونسبة المواد الناعمة بين 5 و 12% والحالة الثانية عندما تقع نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" في المنطقة المهشرة من مخطط اللدونة. في هاتين الحالتين يستخدم ترميزاً ثنائياً مضاعفاً مثل GP-GM و CL-ML.

عندما تشير نتائج التجارب المخبرية إلى أن تصنيف التربة قريب من تصنيف مجموعة أخرى أو عندما يقع التصنيف على الحدود الفاصلة بين المجموعات فإنه يمكن استخدام رمزين مفصولين بالإشارة "/" يدعى هذا الترميز بالترميز الحدودي (Bordeline symbols). على سبيل المثال، CL/CH, GM/SM, SC/CL. الرمز الأول (اليساري) هو رمز المجموعة الناتج عن التصنيف والرمز الثاني (اليميني) هو رمز المجموعة المجاورة. هذا الترميز مفيد بشكل خاص عندما يكون حد السيولة للترب الغضارية قريباً من 50% فإنه يمكن لهذه التربة أن تملك خواص انتفاخية واستخدام الترميز الحدودي (CL/CH, CH/CL) سوف ينبه إلى احتمال الانتفاخ.

2. 1. 4. 1 تصنيف الترب الخشنة

يتم تقسيم الترب الخشنة (نسبة المار من المنخل 200 أصغر من 50%) إلى بحص (G) ورمل (S). في حالة البحص , تحجز النسبة العظمى من المواد الخشنة (المحجوزة على المنخل 200) على المنخل رقم 4 (4.75mm), بينما في حالة الرمل فإن النسبة العظمى من المواد الخشنة تمر من المنخل رقم 4.

1- يكون المحتوى الأساسي من التربة رمل إذا كان أكثر من 50% من الجزيئات المحجوزة على المنخل 200 هي رمل.

2- يكون المحتوى الأساسي من التربة بحص إذا كان 50% أو أكثر من من الجزيئات المحجوزة على المنخل 200 هي بحص .

3- إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 تساوي 12% أو أقل فإنه يتم حساب عامل التجانس Cu وعامل الانحناء Czللتربة

3. 1 تصنف التربة بحص جيد التدرج الحبي (Well graded gravel, GW) إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 أصغر من 5% وكان المكون الأساسي هو البحص ونسبة الرمل أقل من 15% وكان Cu≥4 و 1≤Cz≤3

3. 2 تصنف التربة رمل جيد التدرج الحبي (Well graded sand, SW) إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 أصغر من 5% وكان المكون الأساسي هو الرمل ونسبة البحص أقل من 15% وكان Cu≥6 و 1≤Cz≤3

3. 3 تصنف التربة بحص فقير التدرج الحبي (Poorly graded gravel, GP) إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 أصغر من 5% وكان المكون الأساسي هو البحص ونسبة الرمل أقل من 15% وكان شرطي Cu وCz (بند 3. 1) غير محققين (أو أحد الشرطين غير محقق).

3. 4 تصنف التربة رمل فقير التدرج الحبي (Poorly graded sand, SP) إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 أصغر من 5% وكان المكون الأساسي هو الرمل ونسبة البحص أقل من 15% وكان شرطي Cu وCz (بند 3. 2) غير محققين (أو أحد الشرطين غير محقق).

4- إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 أكبر من 12% يتم اعتبار التربة خشنة مع مواد ناعمة، ويجب في هذه الحالة تحديد نوع المواد الناعمة اعتماداً على مخطط اللدونة (الشكل 10-2).

4. 1 تصنف التربة بحص غضاري(Clayey Gravel, GC) أو رمل غضاري (Clayey Sand, SC) إذا كانت المواد الناعمة غضار.

4. 2 تصنف التربة بحص سيلتي(Silty Gravel, GM) أو رمل سيلتي (Silty Sand, SM) إذا كانت المواد الناعمة سيلت.

4. 3 إذا كانت المواد الناعمة غضار سيلتي (Silty Clay, CL-ML) تصنف التربة بحص سيلتي غضاري (Silty Clayey gravel) إذا كانت المواد الخشنة بحصية، أو تصنف التربة رمل سيلتي غضاري (Silty Clayey Sand, SC-SM) إذا كانت المواد الخشنة رملية.

5- إذا كانت نسبة المار من المنخل 200 بين 5 و 12% تعطى التربة تسمية مضاعفة مثل GW-GC.

5. 1 توافق أول مجموعة رموز (الرمزين اليساريين) المواد الخشنة حصوية أو رملية، جيدة أو فقيرة التدرج الحبي مع نسبة مواد ناعمة أقل من 5% ، والاحتمالات الممكنة هي (GW, GP, SW, SP) . أما المجموعة الثانية من الرموز (الرمزين اليمينيين) فتوافق المواد الخشنة حصوية أو رملية مع نسبة مواد ناعمة أكبر من 12% حيث يحدد نوع المواد الناعمة، والاحتمالات الممكنة هي (GC, GM, SC, SM) وهي تعني مع سيلت أو غضار، أي أن رمز المجموعة GW-GC يعني بحص جيد التدرج الحبي مع غضار.

5. 2 إذا كانت المواد الناعمة غضار سيلتي (Silty-Clay, CL-ML) فإن المجموعة الثانية من الرموز يجب أن تكون إما GC أو SC. على سبيل المثال، رمل فقير التدرج الحبي مع 10% من مواد ناعمة LL=20% و PI=6% . بما أن الجزيئات الخشنة هي رمل فقير التدرج فمجموعة الرموز اليسارية هي SP . أما بالنسبة لمجموعة الرموز اليمينية، من مخطط اللدونة نستنتج أن نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" تقع ضمن

المنطقة المهشرة أي أن المواد الناعمة هي غضار سيلتي (Silty-Clay, CL-ML) ، وبما أن المواد الخشنة هي رمل فالرموز اليمينية تصبح SC، وبالتالي يصبح رمز المجموعة SP-SC وهي تعني رمل فقير التدرج الحبي مع مواد ناعمة مكونة من الغضار (يتم في التسمية اعتماد المكون من المواد الناعمة ذي النسبة الأكبر وهو الغضار).

6- إذا كانت التربة في غالبيتها بحصية أو رملية واحتوت على 15% أو أكثر من مادة خشنة أخرى (رمل أو بحص) فإنه تضاف الصفة "مع رمل" "with sand" أو "مع بحص " "with gravel" إلى اسم المجموعة، أما إذا كانت النسبة أقل من 15% فإن المادة الخشنة الثانية تهمل في التسمية. مثال على ذلك، بحص فقير التدرج الحبي مع رمل Poorly Poorly graded gravel with sand.

7- إذا احتوت التربة على حجارة فإنه تضاف عبارة مع حجارة "with cobbles" . مثال، بحص سيلتي مع حجارة Silty gravel with cobbles .

يبين الجدول 12-2 والشكل 9-2 تصنيف الترب الخشنة وفق نظام التصنيف الموحد USCS نسخة الـ ASTM

تصنيف الترب الخشنة					
نوع التربة والشروط			رمز المجموعة	اسم المجموعة
تربة خشنة (أكثر من 50% محجوز على المنخل رقم 200 (0.075mm)	بحص (أكثر من 50% من المحجوز على المنخل رقم 200 محجور على المنخل رقم 4 (4.75mm)	بحص نظيف (أقل من 5% مواد ناعمة)	$C_u \geq 4 and 1 \leq C_z \leq 3$	GW	بحص جيد التدرج الحبي[F]
			$C_u < 4 and / or 1 > C_z > 3$	GP	بحص فقير التدرج الحبي[F]
		بحص مع مواد ناعمة (أكثر من 12% من المواد الناعمة)	المواد الناعمة مصنفة ML أو MH	GM	بحص سيلتي[G,H,F]
			المواد الناعمة مصنفة CL أو CH	GC	بحص غضاري[G,H,F]
	رمل (50% أو أكثر مار من المنخل 200)	رمل نظيف (أقل من 5% مواد ناعمة)	$C_u \geq 6 and 1 \leq C_z \leq 3$	SW	رمل جيد التدرج الحبي[I]
			$C_u < 6 and / or 1 > C_z > 3$	SP	رمل فقير التدرج الحبي[I]
		رمل مع مواد ناعمة (أكثر من 12% من المواد الناعمة)	المواد الناعمة مصنفة ML أو MH	SM	رمل سيلتي[G,H,I]
			المواد الناعمة مصنفة CL أو CH	SC	رمل غضاري[G,H,I]

إعداد الدكتور رامي اسطة

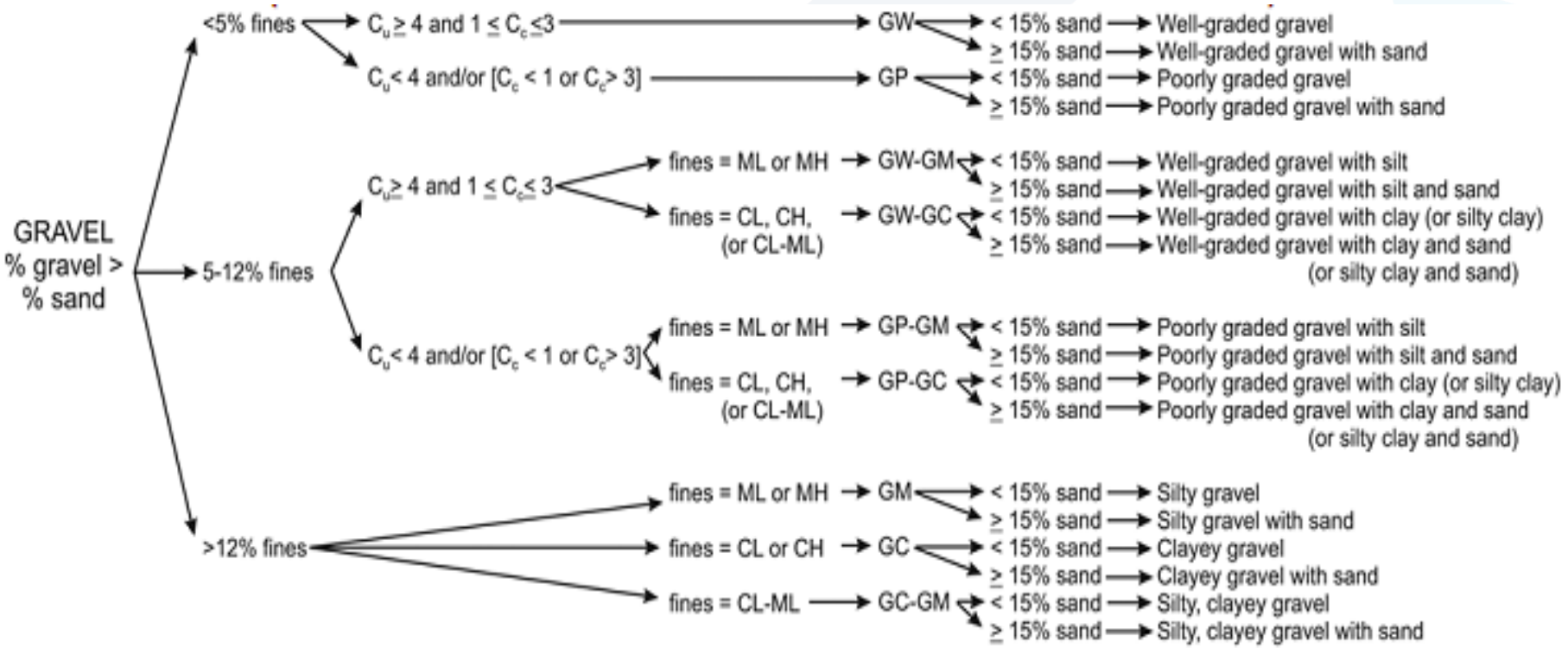
الجدول 12-2: تصنيف الترب الخشنة وفق النظام الموحد USCS نسخة الـ ASTM

F : إذا احتوت التربة على نسبة تساوي أوتزيد عن 15% من الرمل فإنه تضاف عبارة "مع رمل" إلى تسمية المجموعة

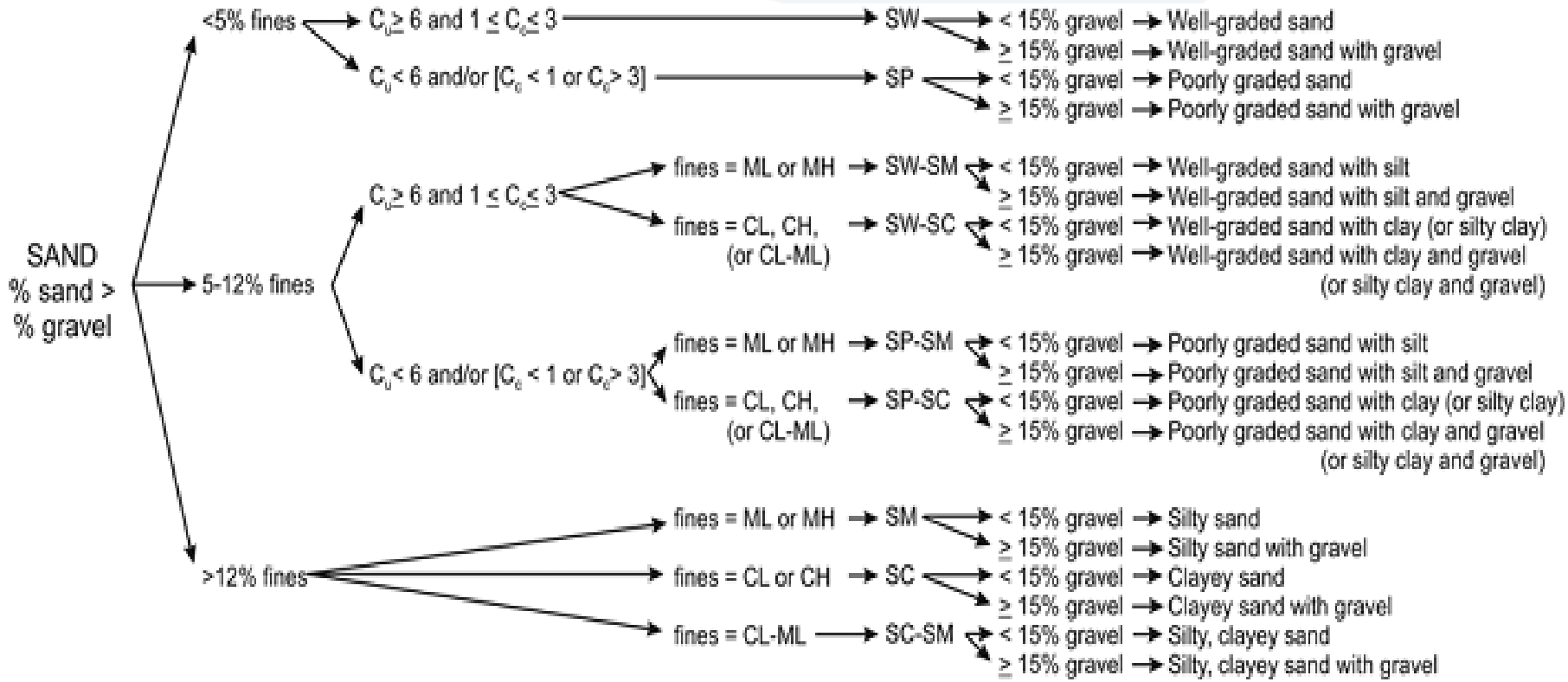
G : إذا صنفت المواد الناعمة CL-ML فإنه يستخدم الترميز الثنائي مثل GC-GM أو SC-SM

H : إذا كانت المواد الناعمة عضوية فإنه تضاف عبارة "مع مواد عضوية" إلى تسمية المجموعة

I : إذا احتوت التربة على نسبة تساوي أوتزيد عن 15% من البحص فإنه تضاف عبارة "مع بحص " إلى تسمية المجموعة



الشكل 2-9a : تصنيف الترب الخشنة وفق نظام الـ AASHTO نسخة الـ ASTM



الشكل 2-9b : تصنيف الترب الخشنة وفق نظام الـ AASHTO نسخة الـ ASTM

2. 4. 1. 2 تصنيف الترب الناعمة

قسمت الترب الناعمة (50% أو أكثر مار من المنخل 200) حسب حد السيولة وقرينة اللدونة إلى سيلت (M) وغضار (C) وترب عضوية (O) وتورب (Pt).

تصنف الترب الناعمة كسيلت إذا وقعت نقطة "حد السيولة -قرينة اللدونة" في مخطط اللدونة (الشكل 10-2) تحت المستقيم A . أما إذا وقعت النقطة على أو فوق المستقيم A فتصنف التربة على أنها غضار.

بشكل عام, يمكن القول أن المستقيم A يفصل الترب الناعمة التي سلوكها قريب من السيلت عن الترب الناعمة ذات السلوك القريب من الغضار.

هناك تصنيف آخر للسيلت والغضار والعضويات يستند على حد السيولة المنخفض (L) وعلى حد السيولة المرتفع (H), وقد اعتبر حد السيولة 50% كخط فاصل بين الترب ذات حد السيولة المنخفض وحد السيولة المرتفع.

يمكن أيضاً تصنيف الترب الناعمة بترميز مضاعف. على سبيل المثال, تصنف التربة بـ CL-ML إذا وقعت الحدود داخل المنطقة المهشرة (قرينة اللدونة بين 4% و7% وحد السيولة بين 12% و25%.

1- تصنف التربة بأنها غضار لا عضوي إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" على المستقيم A أو فوقه وكانت قرينة اللدونة أكبر من 7 وإذا كانت نسبة المواد العضوية لا تؤثر كثيراً على قيمة حد السيولة فيما إذا تم تحديده مع التجفيف بالفرن أو بدون تجفيف $\left(\frac{LL(\text{بالفرن} \quad \text{تجفيف})}{LL(\text{تجفيف} \quad \text{بدون})} > 0.75\right)$. يمكن للغضار وبحسب حد السيولة أن يكون لا دهني (منخفض اللدونة) أو دهني (عالي اللدونة) كما يلي:

1. 1 يصنف الغضار بغضار لا دهني (Lean Clay, CL) إذا كان حد السيولة أصغر من 50%

1. 2 يصنف الغضار بغضار دهني (Fat Clay, CH) إذا كان حد السيولة يساوي 50% أو أكثر

1. 3 تصنف التربة غضار سيلتي (Silty Clay, CL-ML) إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" على المستقيم A أو فوقه وقرينة اللدونة محصورة بين 4 و 7.

2- تصنف التربة بأنها سيلت لا عضوي إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" تحت المستقيم A أو إذا كانت قرينة اللدونة أصغر من 4 وإذا كانت نسبة المواد العضوية لا تؤثر كثيراً على قيمة حد السيولة فيما إذا تم تحديده مع التجفيف بالفرن أو بدون تجفيف بالفرن $\left(\frac{LL(\text{بالفرن} \quad \text{تجفيف})}{LL(\text{تجفيف} \quad \text{بدون})} > 0.75\right)$.

يمكن للسيلت وبحسب حد السيولة أن يكون منخفض اللدونة أو عالي اللدونة كما يلي:

2. 1 يصنف السيلت (Silt, ML) إذا كان حد السيولة أصغر من 50%

2. 2 يصنف السيلت بسيلت مرن (Elastic Silt, MH) إذا كان حد السيولة يساوي 50% أو أكثر.

3- تصنف التربة بأنها سيلت أو غضار عضوي إذا كان لون التربة داكناً ورائحتها نتنة في الجو الدافئ وكانت نسبة المواد العضوية تؤثر على قيمة حد السيولة فيما إذا تم تحديده مع التجفيف بالفرن أو بدون تجفيف بالفرن

$\left(\frac{LL(\text{بالفرن} \quad \text{تجفيف})}{LL(\text{بدون} \quad \text{تجفيف})} < 0.75\right)$ وفي هذه الحالة يجب تحديد حد السيولة دون تجفيف بالفرن.

3. 1 تصنف التربة غضار عضوي أو سيلت عضوي منخفض اللدونة OL إذا كان حد السيولة المحدد دون تجفيف بالفرن أصغر من 50%

3. 2 تصنف التربة سيلت عضوي منخفض اللدونة OL إذا كانت قرينة اللدونة أصغر من 4 أو إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" تحت المستقيم A

3. 3 تصنف التربة غضار عضوي منخفض اللدونة OL إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" على المستقيم A أو فوقه وكانت قرينة اللدونة أكبر من 7

3. 4 تصنف التربة غضار عضوي أو سيلت عضوي عالي اللدونة OH إذا كان حد السيولة المحدد دون تجفيف بالفرن 50% أو أكثر

3. 5 تصنف التربة سيلت عضوي عالي اللدونة OH إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة" تحت المستقيم A

3. 6 تصنف التربة غضار عضوي عالي اللدونة OH إذا وقعت نقطة "حد السيولة-قرينة اللدونة "على المستقيم A أو فوقه.

4- إذا احتوت التربة على البحص أو الرمل أو الاثنين معاً وكانت النسبة أصغر من 15% فإنها لا تؤخذ بعين الاعتبار في التسمية.

5- إذا احتوت التربة على البحص أو الرمل أو الاثنين معاً وكانت النسبة 15% أو أكثر وأقل من 30% فإنه تضاف العبارة "مع بحص ، with gravel " أو "مع رمل، with sand " في نهاية التسمية.

5. 1 إذا كان أحد المكونين (بحص أو رمل) أكبر من الآخر فإنه يؤخذ المكون ذو النسبة الأكبر فقط في التسمية حيث تضاف العبارة "مع بحص ، with gravel " أو "مع رمل، with sand " في نهاية التسمية.

5. 2 إذا كانت نسبة الرمل تساوي نسبة البحص فإنه يؤخذ الرمل فقط بعين الاعتبار في التسمية حيث تضاف العبارة "مع رمل، with sand " في نهاية التسمية.

6- إذا احتوت التربة على البحص أو الرمل أو الاثنين معاً وكانت النسبة أكبر من 30% فإنه تضاف إلى التسمية عبارة "مبحص، Gravely " أو "رملي، Sandy ".

6. 1 إذا كان أحد المكونين (بحص أو رمل) أكبر من الآخر فإنه يؤخذ المكون ذو النسبة الأكبر فقط في التسمية حيث تضاف إلى التسمية عبارة "مبحص، Gravely " أو "رملي، Sandy ".

6. 2 إذا كانت نسبة الرمل تساوي نسبة البحص فإنه يؤخذ الرمل فقط بعين الاعتبار في التسمية حيث تضاف إلى التسمية عبارة "رملي، Sandy ".

يبين الجدول 2-13 والشكل 2-11 تصنيف الترب الناعمة وفق نظام التصنيف الموحد USCS نسخة الـ ASTM

نوع التربة والشروط				رمز المجموعة	اسم المجموعة
تربة ناعمة (50% أو أكثر مار من المنخل رقم 200 (0.075mm)	سيلت وغضار (حد السيولة أصغر من 50%)	لاعضوي	تقع على الخط A أو فوقه PI>7 و $\frac{LL(\text{تجفيف بالفرن})}{LL(\text{تجفيف بدون})} > 0.75$	CL	غضار منخفض اللدونة (لا دهني)[K,L,M]
			تقع تحت الخط A أو PI<4 و $\frac{LL(\text{تجفيف بالفرن})}{LL(\text{تجفيف بدون})} > 0.75$	ML	غضار منخفض اللدونة (لا دهني)[K,L,M]
		عضوي	$\frac{LL(\text{تجفيف بالفرن})}{LL(\text{تجفيف بدون})} < 0.75$	OL	غضار عضوي[K,L,M,N]
				OL	سيلت عضوي[K,L,M,O]
	سيلت وغضار (حد السيولة 50% أو أكثر)	لاعضوي	تقع على الخط A أو فوقه و $\frac{LL(\text{تجفيف بالفرن})}{LL(\text{تجفيف بدون})} > 0.75$	CH	غضار دهني[K,L,M]
			تقع تحت الخط A و $\frac{LL(\text{تجفيف بالفرن})}{LL(\text{تجفيف بدون})} > 0.75$	MH	سيلت مرن[K,L,M]
		عضوي	$\frac{LL(\text{تجفيف بالفرن})}{LL(\text{تجفيف بدون})} < 0.75$	OH	غضار عضوي[K,L,M,P]
				OH	سيلت عضوي[K,L,M,O]
تربة عالية العضوية	مواد عضوية ظاهرة، لون غامق، رائحة مواد عضوية			PT	بيت

الجدول 13-2: تصنيف الترب الناعمة وفق النظام الموحد USCS نسخة الـ ASTM

K : إذا احتوت التربة على نسبة أكبر من 15 % وأقل من 30 % محجوزة على المنخل 200 فإنه تضاف عبارة "مع رمل" إذا كانت نسبة الرمل أكبر من نسبة البحص ، أو "مع بحص" إذا كانت نسبة البحص أكبر من نسبة الرمل .

L : إذا احتوت التربة على نسبة أكبر أو تساوي 30 % محجوزة على المنخل 200 وكانت نسبة الرمل أكبر أو تساوي نسبة البحص فإنه :

أ- إذا كانت نسبة البحص أصغر من 15% تضاف عبارة "رملي" إلى كل من الغضار والسيلت فيصبح غضار رملي أو سيلت رملي وإذا كان عضوي تضاف صفة عضوي في النهاية.

ب- إذا كانت نسبة البحص أكبر أو تساوي 15% تضاف عبارة "رملي" إلى كل من الغضار والسيلت فيصبح غضار رملي أو سيلت رملي ، كما تضاف بعد ذلك عبارة "مع بحص" فتصبح التسمية غضار رملي مع

بحص أو سيلت رملي مع بحص ، إذا كان عضوي تضاف صفة عضوي بعد عبارة "رملي" فتصبح التسمية غضار رملي عضوي مع بحص أو سيلت رملي عضوي مع بحص .

M : إذا احتوت التربة على نسبة أكبر أو تساوي 30 % محجوزة على المنخل 200 وكانت نسبة البحص أكبر أو تساوي نسبة الرمل فإنه :

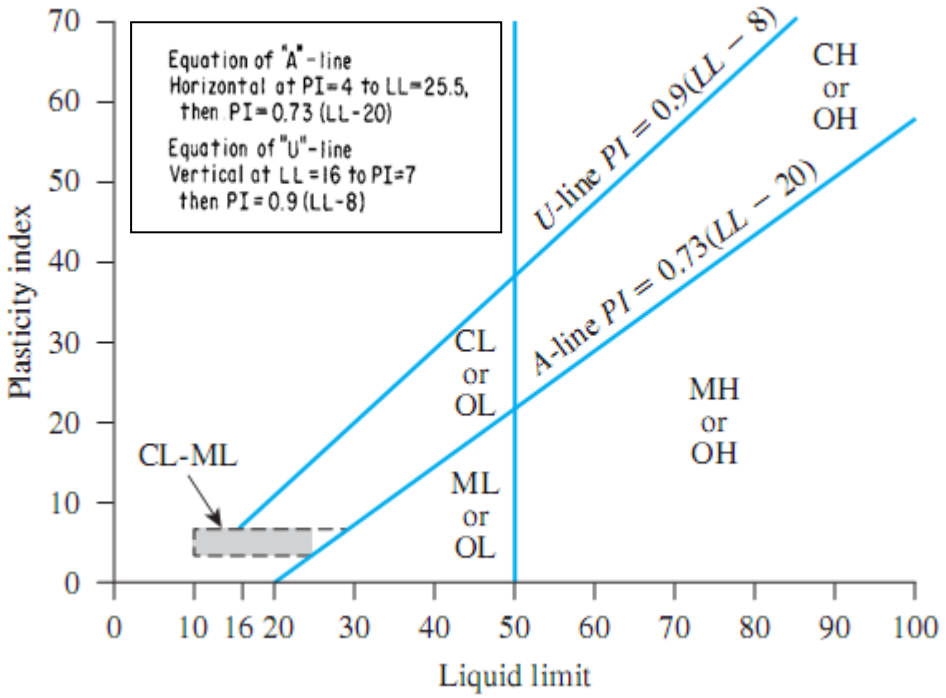
أ- إذا كانت نسبة الرمل أصغر من 15% تضاف عبارة "مبحص" إلى كل من الغضار والسيلت فيصبح غضار مبحص أو سيلت مبحص وإذا كان عضوي تضاف صفة عضوي في النهاية.

ب- إذا كانت نسبة الرمل أكبر أو تساوي 15% تضاف عبارة "مبحص" إلى كل من الغضار والسيلت فيصبح غضار مبحص أو سيلت مبحص ، كما تضاف بعد ذلك عبارة "مع رمل" فتصبح التسمية غضار مبحص مع رمل أو سيلت مبحص مع رمل، إذا كان عضوي تضاف صفة عضوي بعد عبارة "مبحص" فتصبح التسمية غضار مبحص عضوي مع رمل أو سيلت مبحص عضوي مع رمل.

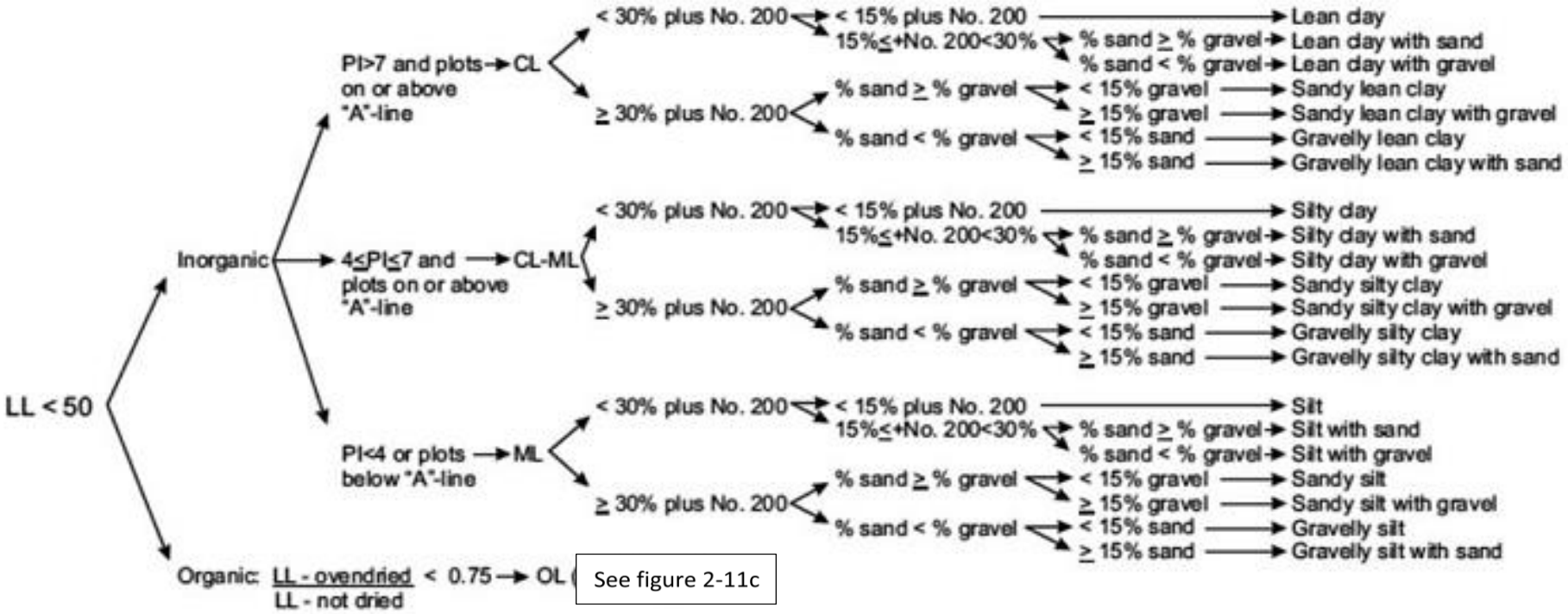
N : $P_I \geq 4$ وتقع فوق المستقيم A

O : $P_I < 4$ أو تقع تحت المستقيم A

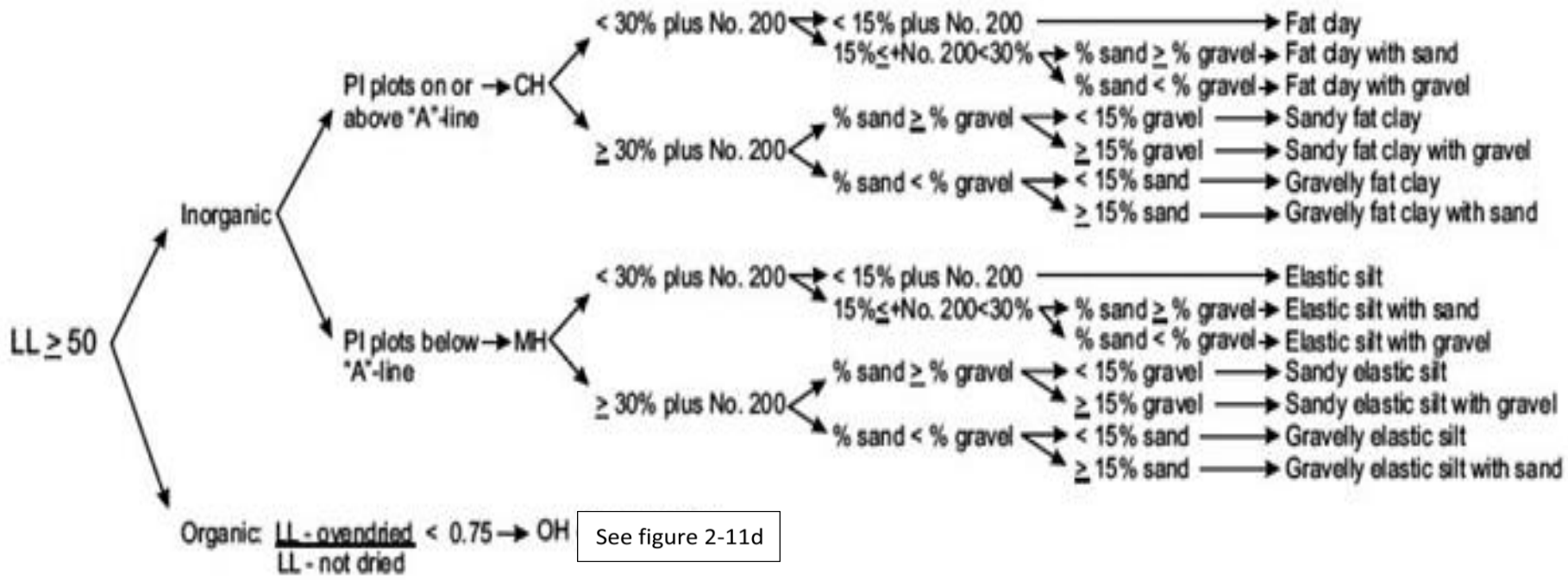
P : تقع على المستقيم A أو فوقه



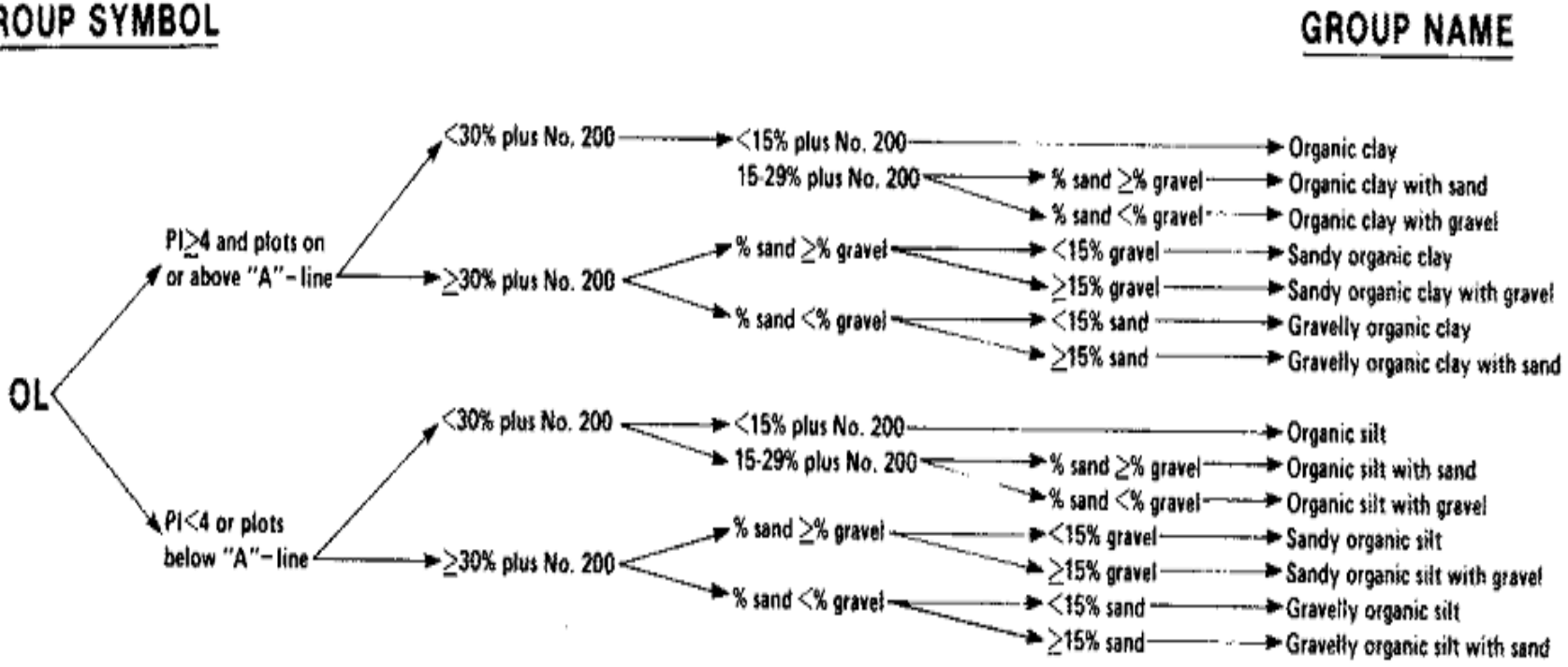
الشكل 10-2 : تصنيف الترب الناعمة اعتماداً على حد السيولة وقرينة اللدونة



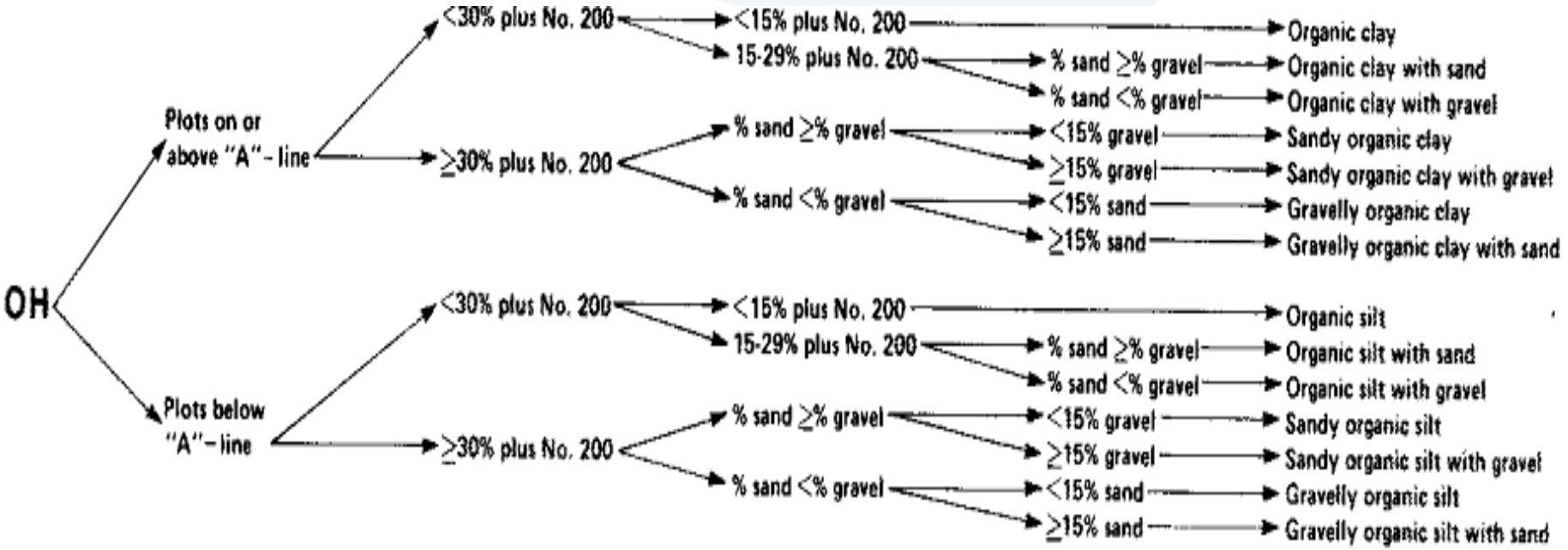
الشكل 2-11a : تصنيف الترب الناعمة (السيلت والغضار اللاعضوي منخفض اللدونة) وفق نظام الـ AASHTO نسخة الـ ASTM



الشكل 2-11b : تصنيف الترب الناعمة (السيلت والغضار اللاعضوي عالي اللدونة) وفق نظام الـ AASHTO نسخة الـ AS



الشكل 2-11c : تصنيف الترب الناعمة (السيلت والغضار العضوي منخفض اللدونة) وفق نظام الـ AASHTO نسخة الـ ASTM



الشكل 2-11d : تصنيف الترب الناعمة (السيلت والغضار العضوي عالي اللدونة) وفق نظام الـ AASHTO نسخة الـ ASTM

نشير في النهاية إلى أن الرموز المستخدمة لتصنيف التربة وفق نظام التصنيف الموحد لا تستطيع لوحدها توصيف التربة بشكل كامل، لذلك يجب إضافة بعض الصفات الإضافية كاللون والرائحة وقوام الترب الناعمة ودرجة تراص الترب الخشنة...الخ. فيما يلي بعض المعلومات الأساسية التي يجب ذكرها حسب نوع التربة:

حالة الترب الخشنة

يجب ذكر درجة تراص التربة (مخلخلة، متوسطة التراص، عالية التراص او متصخرة) كما هو موضح في الجدول 14-2 وذلك اعتماداً على درجة صعوبة الحفر، وعلى رطوبة التربة ودرجة تصريفها، كما يجب ذكر نسب الرمل والبحص والأبعاد الأعظمية للجزيئات وكذلك شكل الجزيئات إن كانت مدببة الحواف أو مستديرة وخشونتها وقساوتها ودرجة تجويتها، ويتم في النهاية تسمية التربة بين قوسين وفق التصنيف الموحد. مثال على ذلك، رمل سيلتي مع بحص . نسبة البحص 20% وهي قاسية ومدببة الحواف. القطر الأعظمي للبحص يبلغ 15mm ، الرمل ناعم وخشن أملس الحواف ومتراص. نسبة المواد الناعمة حوالي 15% وهي غير لدنة ومقاومتها صغيرة في الحالة الجافة. التصنيف وفق USCS هو (SM) .

الكثافة النسبية I_D(%)	حالة التربة
0-15	مخلخلة جداً
15-50	مخلخلة
50-70	متوسطة التراص
70-85	متراصة
85-100	عالية التراص

الجدول 14-2: تصنيف الترب الخشنة وفقاً لكثافتها النسبية

حالة الترب الناعمة

يتم ذكر اسم التربة وقوامها (Consistency) (الجداول من 2-6 حتى 2-8) ودرجة لدونتها ونسبة الجزيئات الخشنة ولون التربة في الحالة الرطبة وكذلك رائحتها ورطوبتها وخواص التصريف وأية معلومات إضافية هامة، ونذكر في النهاية تسميتها بين قوسين وفق التصنيف الموحد.

. مثال على ذلك، سيلت غضاري بني اللون، منخفض اللدونة، يحتوي على نسبة ضئيلة من الرمل الناعم. مع وجود العديد من الثقوب الناتجة عن جذور النباتات. هذه التربة عالية المقاومة وجافة؛ تصنيف هذه التربة لوس (ML) .

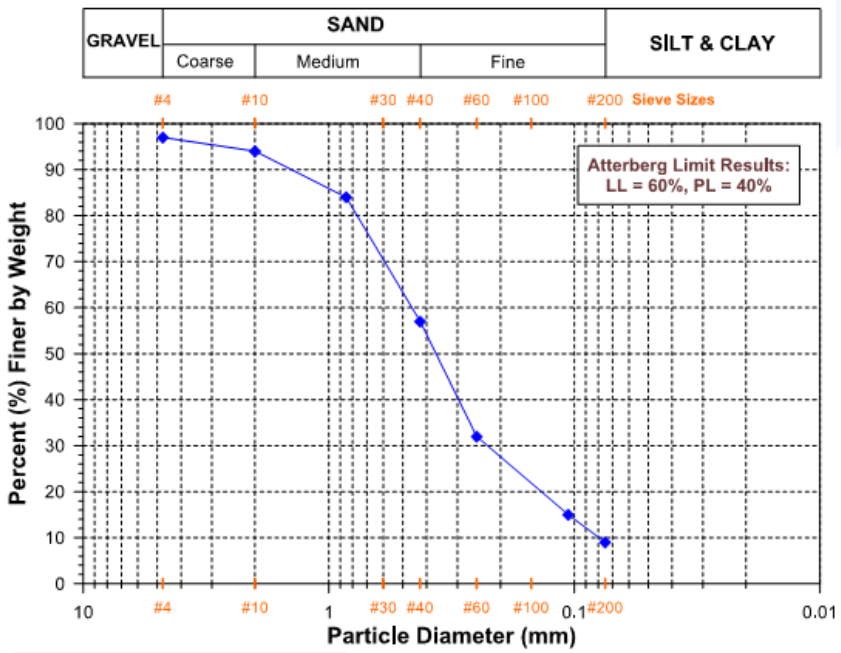
مثال على تصنيف التربة

أجريت تجربة التحليل الحبي وقد كانت النتائج كما يلي:

Sieve No.	Dia. (mm)	% Passing
½ in	12.7	100
#4	4.75	97
#10	2	94
#20	0.85	84
#40	0.425	57
#60	0.25	32
#140	0.106	15
#200	0.075	9

يطلب تصنيف التربة وفق نظام التصنيف الموحد USCS علماً بأن حد السيولة للتربة هو LL=60% وحد اللدونة PL=40%

الحل:



نسبة البحص= 100-المار من المنخل 4.75=100-97=3%

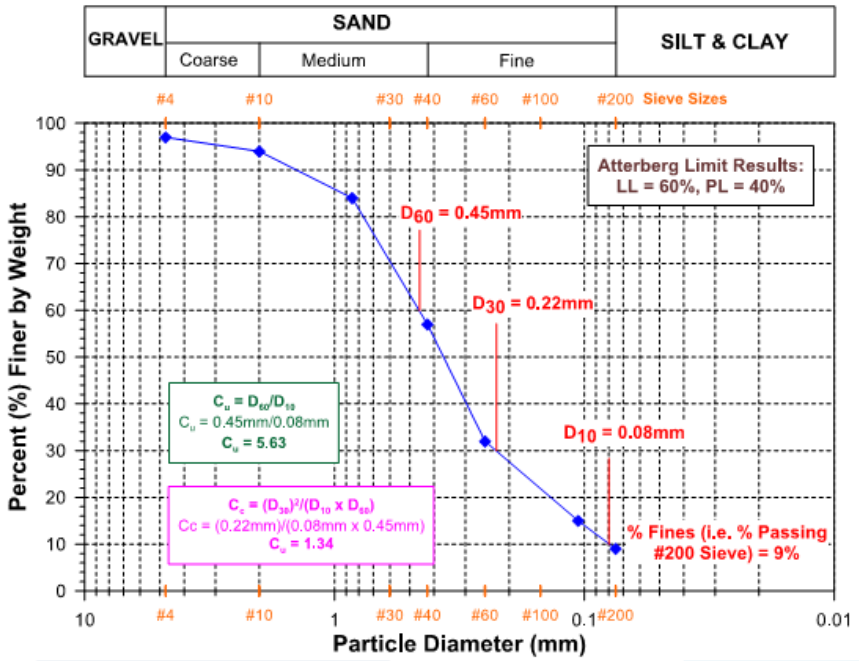
نسبة الرمل= المار من المنخل 4.75- المار من المنخل 200=97-9=88%

فالتربة خشنة ومكونها الأساسي الرمل والبحص لا يدخل في التسمية لأن نسبته أقل من 15%

إعداد الدكتور رامي اسطة

أما بالنسبة للمواد الناعمة فنسبتها =9% فهي تدخل في التسمية ونسبتها بين 5% و 12% فالتسمية مضاعفة ويجب أخذ التدرج الحبي في هذه الحالة كما يجب تحديد نوع المواد الناعمة (سيلت أم غضار)

التدرج الحبي



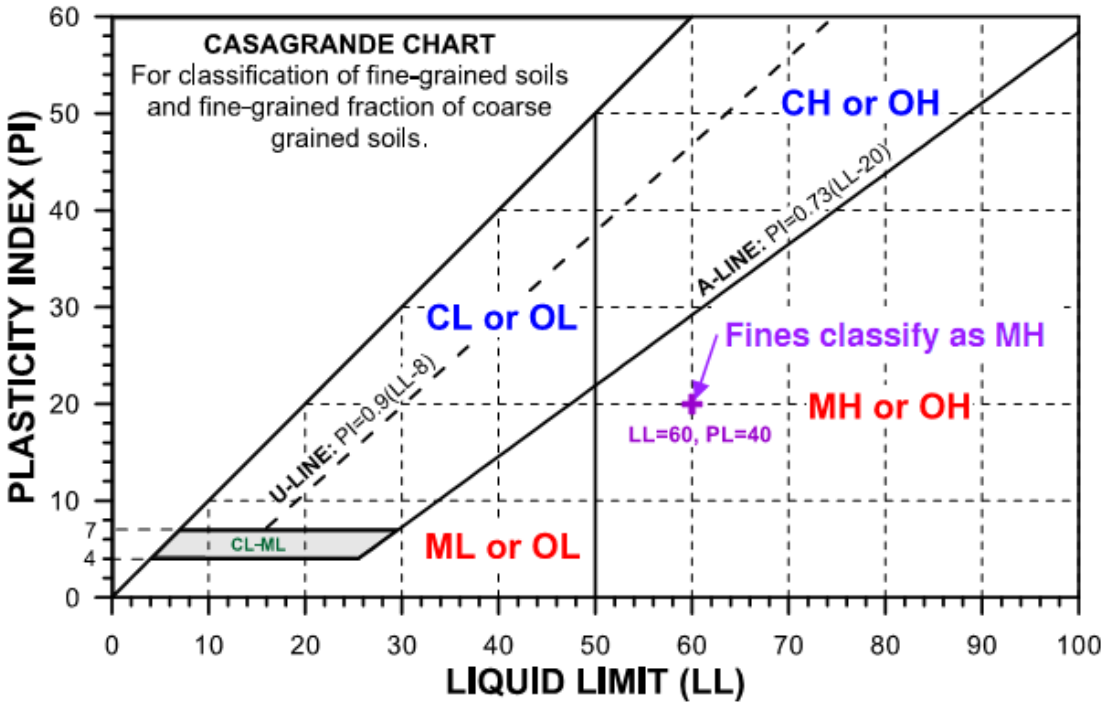
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.45}{0.08} = 5.63$$

$$C_z = \frac{D^2_{30}}{D_{60} \cdot D_{10}} = \frac{0.22^2}{0.45 * 0.08} = 1.34$$

أي أن الرمل فقير التدرج الحبي (poorly graded sand)

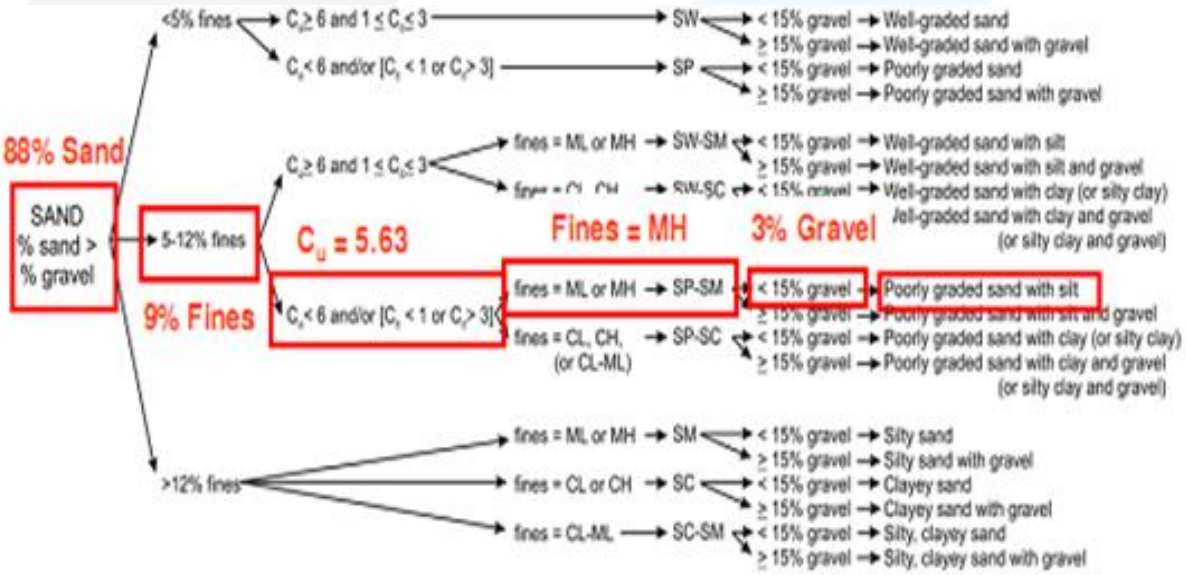
نوع المواد الناعمة

من مخطط اللدونة التالي نلاحظ بأن المواد الناعمة هي سيلت عالي اللدونة



وبالتالي يصبح تصنيف التربة رمل فقير التدرج الحبي مع سيلت (poorly graded sand with silt) وتصنف بـ SP-SM

وهذا موضح في الشكل التالي:



2.4.2 نظام تصنيف الـ AASHTO

تم انجاز النسخة الأولى من تصنيف الـ AASHTO عام 1929 ، ثم تم مراجعة هذه النسخة عدة مرات وفي عام 1945 تم وضع النسخة النهائية لنظام التصنيف AASHTO وهذه النسخة قريبة من النسخة المستخدمة حالياً (ASTM D-3282 and AASHTO M145).

تصنيف الـ AASHTO مبين في الجدول 2-16، حيث يتم تصنيف التربة ضمن 7 مجموعات رئيسية، من A-1 حتى A-7 ومن مجموعات ثانوية ضمن المجموعات الرئيسية. الترب المصنفة A-1 و A-2 و هي ترب خشنة، نسبة المار من المنخل 200 هي 35% أو أقل. عندما تتجاوز نسبة المار من المنخل 200 الـ 35%، تصنف التربة من A-4 حتى A-7 ، وغالباً ما تكون هذه التربة سيلتية أو غضارية. يستند نظام تصنيف الـ AASHTO على المعايير التالية:

1-أبعاد الجزيئات:

يبين الجدول التالي تسمية مكونات التربة بحسب أقطارها وفقاً لنظام الـ AASHTO

جزيئات التربة	الأبعاد
حجارة	>75mm
بحص	(2-75)mm
رمل خشن	(0.425-2)mm
رمل ناعم	(0.075-0.425)mm
سيلت/أو غضار	<0.075mm

الجدول 2-15: أقطار جزيئات التربة وفق تصنيف الـ AASHTO

2-اللدونة:

تستخدم عبارة سيلتي (Silty) عندما تكون قيمة قرينة اللدونة للمواد الناعمة الموجودة في التربة 10 أو أقل، وتستخدم عبارة غضاري (Clayey)عندما تكون قيمة قرينة اللدونة للمواد الناعمة 11 أو أكثر.

ملاحظة:

يتم استبعاد الحجارة (D>75mm) المتواجدة في التربة ولا تحتسب نسبتها عند تحديد التدرج الحبي للتربة ولكن يتم تسجيل نسبة الحجارة الموجودة في التربة.\

من أجل تصنيف التربة وفق الجدول 2-16، يتم الاختبار من اليسار باتجاه اليمين وبطريقة الحذف وأول مجموعة من اليسار تنطبق شروطها على نتائج الاختبارات تكون هي المجموعة التي تصنف وفقها التربة.

من أجل تحديد نوعية التربة المستخدمة في طبقات رصف الطرق يجب أيضاً استخدام ما يدعى بقرينة المجموعة GI والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$GI=(F_{200}-35)[0.2+0.005(L_L-40)]+0.01(F_{200}-15)(P_I-10) \quad (2-23)$$

F200 تمثل النسبة المئوية للمواد المارة من المنخل 200

L_L تمثل حد السيولة مأخوذ كنسبة مئوية

من أجل تحديد قيمة قرينة المجموعة بالعلاقة 2-23 فإنه يجب اتباع القواعد التالية:

1- إذا كانت قيمة قرينة المجموعة المحسوبة أصغر من الصفر فإنه يتم اعتبار قرينة المجموعة تساوي الصفر

2- قرينة المجموعة هي عدد طبيعي، أي يتم دوماً تقريب قيمة قرينة المجموعة (مثلاً إذا كانت قيمة قرينة المجموعة 3.4 فإننا نعتبرها مساوية 3 ، وإذا كانت القيمة تساوي 3.5 فإننا نعتبر قرينة المجموعة تساوي 4 وإذا كانت أصغر من الصفر تعتبر صفر) .

3- لا يوجد حدود عليا لقرينة المجموعة

4- قرينة المجموعة للمجموعات A-1, A-2-4, A-2-5, A-3 دوما تساوي الصفر

5- من أجل المجموعتين A-2-6, A-2-7 تستخدم العلاقة الجزئية التالية لحساب قرينة المجموعة:

$$GI=0.01(F_{200}-15)(PI-10) \quad (2\text{-}24)$$

بشكل عام، إن كفاءة الترب المستخدمة في ردميات جسم الطريق تتناسب عكساً مع قرينة المجموعة، أي أنه كلما انخفضت قيمة قرينة المجموعة كلما كانت نوعية التربة أفضل للرصف الطرقي.

نلاحظ من الجدول 2-16 أن التربة الخشنة مصنفة ضمن المجموعات من A-1 حتى A-3. المجموعات A-1 جيدة التدرج الحبي بينما المجموعة A-3 تمثل رمل متجانس، أما بالنسبة للمجموعات A-2 فهي تحتوي على كمية كبيرة من المواد الناعمة (حتى 35% من المواد الناعمة المارة من المنخل 200). المجموعات من A-4 حتى A-7 تخص السيلت والغضار وتصنف اعتماداً على حدود أتربرغ.

General classification	Granular materials (35% or less of total sample passing No. 200)						
	A-1			A-2			
Group classification	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis (percentage passing)							
No. 10	50 max.						
No. 40	30 max.	50 max.	51 min.				
No. 200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
Characteristics of fraction passing No. 40							
Liquid limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General subgrade rating	Excellent to good						

General classification	Silt-clay materials (more than 35% of total sample passing No. 200)			
Group classification	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5[a] A-7-6[b]
Sieve analysis (percentage passing)				
No. 10				
No. 40				
No. 200	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Characteristics of fraction passing No. 40				
Liquid limit	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual types of significant constituent materials	Silty soils		Clayey soils	
General subgrade rating	Fair to poor			

[a]For A-7-5, $PI \leq LL - 30$
[b]For A-7-6, $PI > LL - 30$

الجدول 16-2 : تصنيف التربة وفق الـ AASHTO