الباب الثاني

مكونات وخصائص طرق تصنيف و تثبيت التربة

الفصل الأول (التربة) :

1-1 طبيعة التربة ومكوناتها الأساسية

(Nature and Basic Constituents of Soil):

يجري تصنيف التربة أساساً بالاعتماد على حجم حبيباتها الصلبة، حيث تقسم التربة حسب حجم حبيباتها في أغلب المواصفات العالمية إلى:

1. **التربة غير المتماسكة (Non-cohesive soil)** - وهي التربة التي لا تتماسك حبيباتها، وتكون خشنة وناتجة عن تفتت الصخور بفعل عوامل التعرية (Erosion). ويفتقر هذا النوع من التربة الى خاصية اللدونة (Plasticity) والتماسك بين الحبيبات (Cohesion)، وأما أشكال التربة غير المتماسكة فهي:

أ- الأحجار الكبيرة (Boulders) والدبش (Cobbles)، ويزيد مقاسها عن 60ملمتر.

ب- الحصى (Gravel) وأشكاله الأساسية :

- الحصى الناعم (Fine) وأبعاده تتراوح بين 2 و6 ملمتر.
- الحصى متوسط النعومة (Medium) وأبعاده تتراوح بين 6 و20ملمتراً .
- الحصى الخشن (Coarse) وأبعاده تتراوح بين 20و60ملمتراً .

جـ – الرمل (Sand) وأشكاله الأساسية:

- الرمل الناعم وأبعاده تتراوح بين 0.06 و 0.20 ملمتر،
- الرمل متوسط النعومة وأبعاده تتراوح بين 0.20 و 0.60 ملمتر،
- الرمل الخشن وأبعاده تتراوح بين0.60 و 2.00 ملمتر.

2- **التربة المتماسكة (Cohesive soil)** - وتتميز بوجود التماسك بين حبيباتها وكذلك باللدونة، إضافة إلى أنها تتكون من مواد ناعمة يقل مقاسها عن 0.06 ملمتر، وتقسم إلى الأشكال التالية:

- الطمي (Silt) ويتراوح مقاس حبيباته بين 0.002 و 0.060 ملمتر،
- الطين (Clay) ويتكون من حبيبات يقل مقاسها عن 0.002 ملمتر.

ومن النادر إيجاد نوع من أنواع التربة المذكورة منفصلاً في الطبيعة، فغالباً ما تتكون التربة من خليط : من الطين مخلوطاً ببعض الرمل مثلاً (طين رملي- Sandy clay)، أو الرمل المخلوط ببعض الطين (رمل طيني – Clayey sand)، أو الطين المخلوط ببعض الطمي (طين طميي- Silty clay)، كما أن هناك خليطاً من الرمل والطمي والطين اصطلح على تسميته بالطفال (Loam).

2-1 تصنيف التربة للأغراض الإنشائية

(Soil Classification For Construction Purposes):

إن اختلاف وتعدد أشكال التربة وأنواعها من مكان إلى مكان، وحتى في المكان الواحد، يجعل من الصعب اعتماد نظام واحد موحد لتصنيفها.

وتصنيف التربة للأغراض الإنشائية أمر غاية في الأهمية، فهو يعطي فكرة، وا ٍن كانت تقريبية، عن الخصائص المتوقعة لهذه التربة أو تلك، مما يساعد في رسم التصور الأولي في ذهن المهندس، عن الشكل الذي ستكون عليه أساسات المبنى أو المنشأ.

ولهذا الغرض، أي تصنيف التربة للأغراض الإنشائية، يتعامل المهندسون مع أنظمة عديدة مختلفة، يأخذ معظمها بالتدرج الحبيبي للتربة أساساً، بينما يعتمد جزء من هذه الأنظمة على خصائص اللدونة للتربة كأساس للتصنيف،وأعلى الأمري ْن معاً، كما سنرى بالتفصيل، من خلال استعراض اكثر هذه الأنظمة شيوعاً وانتشاراً .

وأما الأنظمة التي سنناقشها هنا فهي:

1- نظام المكتب الأمريكي لتصنيف التربة
(U.S Bureau soil classification system)

2- نظام معهد ماساشوستس للتكنولوجيا لتصنيف التربة
(M.I.T* soil classification system)

3- نظام الجمعية الأمريكية للطرق لتصنيف التربة
(AASHTO soil classification system)

4- النظام الموحد لتصنيف التربة
(Unified Soil Classification System-USCS)

ولا بد من الإشارة هنا، إلى أن تصنيف التربة حسب أي من هذه الأنظمة لا يعتبر نهائياً، والتصنيف النهائي للتربة يأتي بعد إجراء الفحوصات اللازمة في المختبر، التي تؤكد انتماء التربة إلى هذا النوع أو ذاك، وتؤكد بالتالي صحة التصنيف.

1-2-1 نظام المكتب الأمريكي لتصنيف التربة

(U.S Bureau Soil Classification System) :

يعتمد هذا النظام على قياس حبيبات التربة كأساس لتقسيمها إلى مجموعات.ويبي ّن الجدول (1-1) كيفية تقسيم التربة إلى مجموعات حسب قياس الحبيبات.

جدول (1-1)- نظام المكتب الأمريكي لتصنيف التربة

رقم المجموعة	نوع التربـــة	قياس الحبيبات (مم)

*M.I.T – Massachusetts Institute of Technology.

1-	حصى ناعم	(Fine gravel)	1.00-2.00
2-	رمل خشن	(Coarse sand)	0.500-1.00
3-	رمل	(Sand)	0.250-0.500
4-	رمل ناعم	(Fine sand)	0.200-0.250
5-	رمل ناعم جداً	(Very fine sand)	0.05-0.100
6-	طمي	(Silt)	0.005-0.05
7-	طين	(Caly)	0.005 >

2-2-1 نظام معهد ماساشوستس للتكنولوجيا لتصنيف التربة (M.I.T Soil Classification System) :

يعتمد هذا النظام، كسابقه، على قياس حبيبات التربة كأساس لتقسيمها إلى مجموعات مختلفة. ويبيّن الجدول (1-2) هذه المجموعات حسب قياس حبيبات التربة.

جدول (1-2) نظام معهد ماساشوستس للتكنولوجيا

رقم المجموعة	نوع التربـــة		قياس الحبيبات (مم)
1-	رمل خشن	(Coarse sand)	0.60-2.00
2-	رمل متوسط	(Medium sand)	0.20-0.60
3-	رمل ناعم	(Fine sand)	0.06-0.20
4-	طمي خشن	(Coarse silt)	0.02-0.06
5-	طمي متوسط	(Medium silt)	0.006-0.02
6-	طمي ناعم	(Fine silt)	0.002-0.006
7-	طين	(Caly)	0.002 >

ويقسم هذا النظام الطين إلى مجموعات هي:

- الطين الخشن (0.002-0.0006ملمتر)،
- الطين المتوسط (0.0006-0.0002ملمتر)،
- الطين الناعم أو الغروي (Colloidal clay) (أصغر من 0.0002ملمتر)، وهي قياسات صغيرة جداً ولا تدخل ضمن اهتمامات تصنيف التربة للأغراض الإنشائية.

ويكون تصنيف التربة حسب النظامين السابقين (1-2-3 و1-2-4) بعد رسم منحنىالتدر ج الحبيبي للتربة، وتوصف التربة على أساسه كما يلي-على سبيل المثال-:

(5% حصى، 43 % رمل، 16 % طمي، 36% طين).

3-2-1 نظام الجمعية الأمريكية للطرق لتصنيف التربة (AASHTO Soil Classification System) :

نشير في البداية إلى أن القارئ قد يصادف مسميات أخرى لهذا النظام، وأكثرها شيوعاً نسبته إلى مكتب الطرق العامة (Bureau of Public Roads- BPR) أو إلى مجلس أبحاث الطرق (Highway Research Board- HRB)، وهما مؤسستان في الولايات المتحدة الأمريكية .ولتوضيح السبب وراء هذه التسميات المختلفة نشير إلى أنه وفي عام 1928، تم إدخال هذا النظام إلى الممارسة العملية للمرة الأولى من قبل مكتب الطرق العامة (BPR) ليستعمله مهندسو الطرق بشكل واسع. وقد تمت مراجعة هذا النظام وتحديثه ثلاثاً : في عام 1945من قبل لجنة تابعة لمجلس أبحاث الطرق (HRB)، وفي عام 1949، وأخيراً في عام 1966 من قبل الجمعية الأمريكية للطرق (AASHTO)، والتي اعتمدت الشكل الحالي لنظام التصنيف هذا، فصار يحمل اسمها.

وأما مضمون هذا النظام واسع الانتشار فيكمن في أنه يقسم التربة إلى مجموعات أساسية (Groups) وأخرى فرعية (Subgroups) حسب التدرج الحبيبي وخصائص السيولة واللدونة لأشكال التربة المختلفة، وذلك كما هو موضح في الجدول الخاص بهذا النظام (جدول3-7).

وكما هو واضح من الجدول المذكور، فإن هذا النظام يقسم التربة غير العضوية (Inorganic soil) إلى سبع مجموعات أساسية (A-1 إلى A-7)والتي تنقسم بدورها إلى اثنتي عشر ة مجموعة فرعية. ويضع النظام التربة العضوية في مجموعة أساسية هي المجموعة (A-8)، وهي غير موجودة في جدول التصنيف (3-7). ويستعمل هذا النظام لتصنيف التربة ما يسمى بـ " دليل المجموعة " (Group Index-GI)، وهو قيمة عددية تساعد في إرجاع التربة إلى المجموعة الأساسية التي تنتمي إليها، وهي قيمة يتم إيجادها للتربة التي تحتوي على نسبة عالية معينة من المواد الناعمة، كما تساعد في الحكم على التربة من ناحية إمكانية استعمالها كسطح ترابي (Subgrade)، حيث تكون نوعيتها مناسبة أكثر لهذا الغرض كلما كان دليل المجموعة (GI) لها أقل.

جدول (3-1) تصنيف التربة وخليط التربة مع الحصى حسب نظام (AASHTO)

تصنيف عام	**مواد خشنة (حبيبية) (35% أو أقل مارة من منخل رقم 200)**								**مواد من الطمي والطين (أكثر من 35% مارة من منخل 200)**			
تصنيف المجموعات	A-1		A-3	A-2					A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5, A-7-6
التدرج الحبيبي- نسبة المار من منخل:												

رقم 10									50 max	
رقم 40	-	-	-	-	-	-	-	51 min	50 max	30 max
رقم 200	36 min	36 min	36 min	36 min	35 max	35 max	35 max	35 max	10 max	25 max	15 max
خصائص اللدونة :										
حد السيولة LL	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	-	-	
دليل اللدونة PI	11 min	11 min	10 max	10 max	10 min	11 min	10 max	10 max	غير لدنة NP	6 max	
دليل المجموعة GI	≤20	≤16	≤12	≤8	≤4		0		0	0	
أشكال المواد المحتواة أكثر في العينة	تربة طينية		تربة طمييية		حصى ورمل طميي أو طيني				رمل ناعم	قطع حجارة حصى رمل	
التقييم العام للمواد كتربة سطح للطرق (subgrade)	متوسطة إلى سيئة						ممتازة إلى جيدة				

1-2-4 النظام الموحد لتصنيف التربة

(Unified Soil Classification System-USCS) :

يعتبر النظام الموحد لتصنيف التربة واحداً من أكثر النظم انتشاراً في أوساط المهندسين الذين يتعاملون مع التربة. ويرجع تاريخ هذا النظام إلى عام 1942، عندما اقترح البروفيسور آرثر كازاغراند (A.Casagrande) عناصره الأساسية بتكليف من سلاح المهندسين في الجيش الأمريكي (Crops of Engineers, U.S Army)، الذي اعتمد هذا النظام لتصنيف التربة في أعمال إنشاء المطارات أثناء الحرب العالمية الثانية. وقد تم تعديل ومراجعة هذا النظام بعد الحرب، وأطلقت عليه تسمية النظام الموحد. وأما في العام 1969، فقد تم اعتماده من قبل الجمعية الأمريكية للفحوصات والمواد (ASTM) كنظام لتصنيف التربة للأغراض الإنشائية (ASTM D-2487).

1- تصنيف التربة الخشنة – وتقسم بموجب هذا النظام إلى المجموعتين:

(أ) حصى وتربة حصوية (Gravel and gravelly soils) ويرمز لها بالحرف (G).

(ب) رمل وتربة رملية (Sand and sandy soils) ويرمز لها بالحرف (S).

ويقسم كل من الحصى والرمل إلى أربع مجموعات:

- مواد جيدة التدرج (Well-graded) ويرمز لها بالحرف (W).
- مواد جيدة التدرج مع رابط طيني ممتاز (Excellent clay binder) ويرمز لها بالحرف (C).
- مواد سيئة التدرج (Poorly-graded) ويرمز لها بالحرف (P).
- مواد خشنة (Coarse materials) تحتوي على مواد ناعمة (Fines) ويرمز لها بالحرف (M).

2- تصنيف التربة الناعمة – وتقسم بموجب هذا النظام إلى ثلاث مجموعات:

(أ) التربة الطميية والرملية الناعمة جداً (Silty and very fine sandy soils) ويرمز لها بالحرف (M).

(ب) التربة الطينية غير العضوية (Inorganic clays)، ويرمز لها بالحرف (C).

(ت) الطمي والطين العضويين (Organic silts and clay)، ويرمز لها بالحرف (O).

تقسم كل مجموعة من المجموعات الثلاث السابقة حسب حد السيولة للتربة (LL) إلى:

- تربة ناعمة لها حد سيولة أقل أو يساوي (50) (ذات لدونة وانضغاطية عالية)، ويرمز لها بالحرف (H).

ملاحظة : يلزم لتصنيف التربة الخشنة بهذا النظام إيجاد معاملي الانتظام (Cu) والتجويف أو التقعر (Cc) ، وذلك من منحنى التدرج الحبيبي.

(أ) **تصنيف التربة الرملية** (Sandy soils):

1- تقسم التربة الرملية إلى مجموعات حسب التدرج الحبيبي (قياس الحبيبات في التربة)، وذلك كما هو موضح في الجدول (1-4) أدناه.

ويجري ضم التربة الرملية إلى هذه المجموعة أو تلك (جدول3-9)، بعد تجميع نسب الحبيبات التي تكون معروفة من فحص التدرج الحبيبي للتربة، وذلك بالتسلسل: حيث نجد أولاً نسبة وزن الحبيبات الأكبر من 2ملمتر، ثم الأكبر من 0.5ملمتر، وهكذا، حتى يحصل التطابق الذي يضع التربة ضمن إحدى المجموعات.

جدول (1-4)- مجموعات التربة الرملية حسب قياس حبيباتها

رقم المجموعة	وصف التربة	النسبة المئوية للحبيبات من وزن التربة الأصلي (%)
-1	رمل حصوي (Gravelly sand)	وزن الحبيبات الأكبر من 2 ملمتر اكثر من 25 بالمئة
-2	رمل خشن (Coarse-grained sand)	وزن الحبيبات الأكبر من 0.5 ملمتر اكثر من 50 بالمئة
-3	رمل متوسط الخشونة (Medium- grained sand)	وزن الحبيبات الأكبر من 0.25ملمتر اكثر من 50 بالمئة
-4	رمل ناعم (Fine- grained sand)	وزن الحبيبات الأكبر من 0.1ملمتر اكثر او يساوي 75 بالمئة
-5	رمل ناعم جداً (Dusty sand)	وزن الحبيبات الأكبر من 0.1ملمتر اقل من 75 بالمئة

2- يتم إيجاد نسبة الفراغات الأولية (Initial voids ratio) للتربة في حالتها الطبيعية (e_o)

جدول (1-5)- تسمية كثافة التربة الرملية حسب نسبة الفراغات الأولية فيها

رقم المجموعة	وصف التربة الرملية	كثافة التربة (Density)		
		كثيفة (Dense)	متوسطة الكثافة Medium) (dense	مخلخلة (Loose)
-1	رمل حصوي (Gravelly sand) رمل خشن (Coarse- grained sand) رمل متوسط الخشونة (Medium- grained sand)	$0.55> e_o$	$0.55\leq e_o \leq 0.70$	$0.70< e_o$
-2	رمل ناعم (Fine- grained sand)	$0.60> e_o$	$0.60\leq e_o \leq 0.75$	$0.75< e_o$
-3	رمل ناعم جداً (Dusty sand)	$0.60> e_o$	$0.60\leq e_o \leq 0.80$	$0.80< e_o$

3- يتم إيجاد درجة التشبع بالماء (Degree of saturation) للتربة وحسب الجدول (1-6) أدناه، تضاف تسمية التربة حسب درجة تشبعها بالماء.

4- يتم إيجاد القيمة التقديرية لمقاومة التربة الرملية للأحمال (Ro) من الجدول (1-7)، حسب درجة كثافة التربة.

وبهذا، بعد إتمام الخطوات الأربع السابقة، يصبح بالإمكان إعطاء وصف شامل لعينة التربة الرملية مع القيمة التقديرية لقدرة تحملها. وسيتضح هذا أكثر من خلال المثال التوضيحي الذي سنعرضه في نهاية هذا الموضوع.

جدول (1-6)- وصف التربة الرملية حسب درجة تشبعها بالماء

رقم المجموعة	*وصف التربة الرملية حسب درجة تشبعها بالماء*	درجة التشبع (Sr)
-1	قليلة الرطوبة (Low moist)	صفر $<Sr \leq 0.50$
-2	رطبة (Moist)	$0.50 <Sr \leq 0.80$
-3	مشبعة بالماء (Saturated)	$0.80 <Sr \leq 1.0$

جدول (1-7)- المقاومة التقديرية للتربة الرملية

رقم المجموعة	وصف التربة الرملية	المقاومة التقديرية (Ro) ميجا باسكال	
		كثيفة (Dense)	متوسطة الكثافة (Med. dense)
-1	رمل خشن بغض النظر عن رطوبته	0.60	0.50
-2	رمل متوسط الخشونة بغض النظر عن رطوبته	0.50	0.40
-3	رمل ناعم : أ- قليل الرطوبة (Low moist) ب- رطب ومشبع بالماء (Moist & Saturated)	 0.40 0.30	 0.30 0.20
-4	رمل ناعم : أ- قليل الرطوبة (Low moist) ب- رطب (Moist) ت- مشبع بالماء (Saturated)	 0.30 0.20 0.15	 0.25 0.15 0.10

(ب)تصنيف التربة الطينية (Calyey Soils):

1- تقسم التربة الطينية حسب هذه الطريقة إلى مجموعات حسب دليل اللدونة للتربة (Plasticity Index - PI)، كما في الجدول (1-8) أدناه.

جدول (1-8) مجموعات التربة الطينية حسب دليل اللدونة

رقم المجموعة	وصف التربة الطينية	دليل اللدونة (PI)
-1	طفال رملي (Sandy loam)	$1 \leq PI \leq 7$
-2	تربة طفالية (Loamy soil)	$7 \leq PI \leq 17$
-3	طين (Clay)	$17 < PI$

2- يتم إيجاد نسبة الفراغات الأولية (Initial Voids Ratio) للتربة في حالتها الطبيعية (e_o)

3- يتم إيجاد دليل السيولة (Liquidity Index-LI) للتربة

جدول (1-9) قوام التربة الطينية حسب دليل السيولة

رقم المجموعة	وصف قوام التربة الطينية	دليل السيولة (LI)
-1	طفال رملي (Sandy Loam): أ. قاس (Hard)	 LI < صفر

	ب. لدن (Plastic) ت. مائع (Liquid)	1 ≤ LI > صفر 1 < LI
2-	الطفال والطين (Loam and Clay): أ. قاس (Hard) ب. شبه قاس (Semi-Hard) ت.صلب إلى لدن (Stiff Plastic) ث. طري إلى لدن (Soft Plastic) ج. مائع إلى لدن (Liquid Plastic) ح. مائع (Liquid)	LI < صفر صفر ≤LI ≤ 0.25 0.25 ≤LI ≤ 0.50 0.50 <LI ≤ 0.75 0.75 <LI ≤ 1.0 1 <LI

4- يتم إيجاد القيمة التقديرية لمقاومة التربة الطينية للأحمال (Ro) من الجدول (3-15)، حسب دليل السيولة ونسبة الفراغات (e_o).

ملاحظة: يمكن اللجوء إلى التقريب بالاستكمال (Interpolation) عند استخراج قيم المقاومة التقريبية (Ro) من الجدولين (3-12) و (3-15)، وذلك للقيم الواقعة بين الحدود المبينة في هذين الجدولين.

جدول (1-10)- المقاومة التقديرية للتربة الطينية

رقم المجموعة	وصف التربة الطينية	نسبة الفراغات (e_o)	المقاومة التقديرية(Ro) (ميغاباسكال)	
			صفر=LI	1=LI
1-	طفال رملي (Sandy Loam)	0.50	0.30	0.30
		0.70	0.25	0.20
2-	تربة طفالية (Loamy Soil)	0.50	0.30	0.25
		0.70	0.25	0.18
		1.00	0.20	0.10
3-	طين (Clay)	0.50	0.60	0.40
		0.60	0.50	0.30
		0.80	0.30	0.20
		1.10	0.25	0.10

الفصل الثاني (خصائص التربة) :

2-2 مقدمة (Introduction) :

يمكن تقسيم الخصائص الأساسية للتربة الى خصائص فيزيائية (Physical properties) وميكانيكية (Mechanical properties) وأخرى كيميائية (Chemical properties)وهذه الخصائص، وا ٍن اختلفت في درجة أهميتها من منشأ الى آخر، ومن منطقة الى أخرى، إلا أنها كلها مهمة وضرورية للحكم على التربة التي تجري دراستها، واجراء التجارب عليها في المختبر ضروري للخروج بتوصيات متكاملة فيما يتعلق بالتربة والأساسات.

وأما المقصود **بالخصائص الفيزيائية** للتربة، فهو تلك الخصائص المتعلقة بطبيعة التربة كمحتوى الرطوبة الطبيعية فيها (Natural moisture content) وحدود السيولة (Liquid limit) واللدونة (Plastic limit) وكذلك الوزن النوعي (Specific gravity) والكثافة (Density) ونسبة الفراغات (Voids ratio) ودرجة التشبع بالماء (Degree of saturation) وغيرها.

وأما **الخصائص الميكانيكية** للتربة فيقصد بها خصائص التربة وسلوكها تحت تأثير الأحمال، كمقاومة التربة للقص (Shear strength) وقوة التماسك بين حبيباتها (Cohesion) وزاوية الاحتكاك الداخلي (Angle of internal friction) ومقاومة الانضغاط (Compressive strength) والدمك (Compaction) والتضاغط المحوري (Consolidation) وغيرها.

وأما **الخصائص الكيميائية** للتربة فيقصد بها ما تحتويه من مواد كيميائية قد يكون لها تأثير سلبي على خرسانة الأساسات، كمحتوى الكبريتات (Sulphate content) ومحتوى الكلوريدات (Chloride content) والشوائب العضوية (Organic impurities) والاملاح القابلة للذوبان (Total soluble salts) وحامضية أو قاعدية الوسط (Acidity or alkalinity of environment) التي يدل عليها الرقم الهيدروجيني (PH value) وغيرها.

وجميع الفحوصات التي ذكرت أعلاه يمكن اجراؤها في المختبر على عينات سليمة (Undisturbed) أو مخلخلة التركيب (Disturbed) كما سبق عند الحديث عن عينات التربة في الباب الأول، وكما سيرد لاحقاً عند الوقوف على تفاصيل هذه الفحوصات.

2-2-1 الخصائص الفيزيائية للتربة

(Physical properties of soil):

لتسهيل فهم الخصائص الفيزيائية الأساسية للتربة نتذكر ما ورد عن أن التربة تتكون من ثلاثة مكونات أساسية هي الحبيبات الصلبة (Solid particles) والفراغات بين هذه الحبيبات (Voids) والماء أو الهواء أو كلاهما داخل هذه الفراغات .

وتكون التربة كما ذكرنا سابقاً جافة (Dry)إذا كانت فراغاتها مليئة بالهواء وحده، ومشبعة جزئياً بالماء (Partially saturated) إذا تقاسم الهواء والماء فراغاتها ، ومشبعة تماماً بالماء (Fully saturated)

إذا ملأ الماء كل فراغاتها. وقد أطلق العالم الروسي نيكولاي غيرسيفانوف (N.Gersevanov) تسمية التربة ثلاثية المراحل (Three phase soil) على التربة التي تحتوي الماء والهواء اضافة الى الحبيبات الصلبة، والتربة ثنائية المراحل (Two phase soil) على تلك التي تتكون من اثنين من المكونات الرئيسية فقط (حبيبات صلبة وماء أو حبيبات صلبة وهواء). ويساعد الشكل (2-1) أدناه في توضيح المفاهيم المذكورة، وكذلك في فهم تعريفات ومعاني أهم الخصائص الفيزيائية للتربة التي سيلي استعراضها.

2-2-1-1 العلاقات الوزنية – الحجمية للتربة

(Weight – volume relationships) :

1- **محتوى الرطوبة** (Water or moisture content) هو النسبة بين وزن الماء في فراغات التربة ووزن الحبيبات الصلبة معبراً عنه بنسبة مئوية:

ويقاس محتوى الرطوبة عن طريق تجفيف عينة من التربة في فرن التجفيف الخاص (Drying oven) على درجة حرارة قياسية تتراوح بين 105-110 ° م، ومقارنة وزنها قبل وبعد عملية التجفيف التي تنتهي عندما يثبت وزن العينة، أو بعد مرور 24 ساعة كما تحدد المواصفات المتعلقة باجراء هذا الفحص.

2- **درجة التشبع بالماء** (Degree of saturation) هي النسبة بين حجم الماء في فراغات التربة الى الحجم الكلي للفراغات.

وتكون درجة التشبع صفراً للعينات الجافة (Sr = 0) و 100 % للعينات المشبعة تماماً بالماء (Sr = 100 %).

3- **نسبة الفراغات** (Voids ratio) وهي النسبة بين حجم الفراغات الموجودة في التربة إلى حجم الجزء الصلب (الحبيبات الصلبة).

وتتغير قيمة نسبة الفراغات للتربة ضمن نطاق واسع. حيث يمكن أن تتغير من 0.2 الى 1.5 للتربة التي تتكون من حبيبات معدنية (Mineral soils)، ومن 2 الى 12 للتربة التي تحتوي مكونات عضوية (Mineral – organic soils) /4/. ولكن الأكثر شيوعاً في الواقع هو أن تكون (e < 1) للتربة المدموكة، و (e >1) للتربة المخلخلة (Loose) غير المتضاغطة (Unconsolidated). وفي الحالة الأخيرة، يكون من الضروري اتخاذ اجراءات خاصة لتحسين خصائص التربة وتقويتها قبل إقامة أي منشأ عليها.

4-**المساميّة** (Porosity) وهي النسبة بين حجم الفراغات الموجودة في التربة الى الحجم الكلي للتربة.

5- **محتوى الهواء** (Air Content) وهو النسبة بين حجم الهواء الموجود في فراغات التربة الى الحجم الكلي للتربة.

6- **الكثافة** (Bulk density) هي النسبة بين الكتلة الكلية للتربة إلى حجمها الكلي.

وتقاس الكثافة بوحدات كيلوغرام/ متر مكعب (Kg/m^3) أو غرام / سنتمتر مكعب (g/cm^3) = طن / متر مكعب (t/m^3). أما كثافة الماء فيرمز لها بـ (ρ_w) وقمتها تساوي 1 غم /سم3 = 1000 كغم / م3.

7- **وزن وحدة الحجم** (Unit weight) وهو النسبة بين الوزن الكلي (قوة) الى الحجم الكلي للتربة.

8- **الوزن النوعي للحبيبات الصلبة** (Specific gravity of solid particles) يعرّف بأنه النسبة بين كتلة الحبيبات الصلبة إلى وزن كمية من الماء تشغل نفس الحجم.

ومن تعريف نسبة الفراغات (e) وإذا كان حجم الحبيبات الصلبة مساوياً وحدة واحدة، فإن حجم الفراغات يساوي (e) وحدة (معادلة 2-3). عندها تكون كتلة الحبيبات الصلبة مساوية ($G_s.\rho_w$) (معادلة 2-11). ومن تعريف محتوى الرطوبة، تكون كتلة الماء مساوية (W.Gs.ρw) (معادلة 2-1)، وعليه يكون حجم الماء (WG_s).

9- درجة التشبع بالماء

جدول (2-1) بعض الخصائص الفيزيائية لأنماط مختلفة من التربة

وصف التربة	المسامية (n)	نسبة الفراغات (e)	محتوى الرطوبة (W) (%)	وزن وحدة الحجم (غم/سم3)	
				ρ_d	ρ
رمل متجانس، مخلخل	0.46	0.85	32	1.43	1.89
رمل متجانس، كثيف	0.34	0.51	19	1.75	2.09
رمل متدرج، مخلخل	0.40	0.67	25	1.59	1.99
رمل متدرج، كثيف	0.30	0.43	16	1.86	2.16
طمي (لوس) (Loess)	0.50	0.99	21	1.36	1.86
طين طري يحتوي القليل من المواد العضوية	0.66	1.90	70	0.93	1.58
طين طري شديد العضوية	0.75	3.0	110	0.68	1.43

2-2-1-2 الخصائص الدالّة (Index properties) :

ويمكن أن تقسم الخصائص الدالة للتربة الى قسمين رئيسيين هما:

1- **الخصائص الحبيبية** (Grain properties) – وتتعلق بخصائص الحبيبات التي تتشكل منها التربة بشكل منفصل، دون الربط بينها وبين الشكل الذي هي عليه في التركيب الطبيعي للتربة. ولذا فمن السهل دراسة الخصائص الحبيبية لأية عينة من التربة، سليمة كانت أم مخلخلة. وتدرس الخصائص الحبيبية للتربة عادة من خلال فحص التدرج الحبيبي (Particle size distribution) باستعمال مناخل قياسية (Standard sieves) أو بالتحليل الحجمي بالهيدروميتر (Hydrometer analysis) للحبيبات ذات القياسات الناعمة من الطمي (Silt) والطين (Clay)، وهما الطريقتان الأكثر شيوعاً لهذا الغرض.

2- **خصـائص القـوام** (Consistency properties) – وتعبـر عنهـا الحـدود المعروفـة بحـدود أتربيـرج (Atterberg limits) نسبة الى العالم السويدي أتربيرج الذي كان أول من أشار اليها سنة 1911، وهذه الحدود هي :

- **حد السيولة** (Liquid Limit - LL) وهو محتوى الرطوبة الذي تتحول عنده التربة من حالة اللدونة الى حالة السيولة،
- **حد اللدونـة** (Plastic Limit - PL) وهو محتوى الرطوبة الذي تفقد عنده التربة خاصية اللدونة وتكون بحالة جافة نسبياً لا تسمح بتشكيلها الى خيوط،
- **حد الانكماش** (Shrinkage Limit - SL) وهو محتوى الرطوبة الذي تنتقل عنده التربة من الحالة شبه الصلبة (Semi-solid state) الى الحالة الصلبة (Solid state).
- **دليل اللدونة** (Plasticity Index - PI) وهو الفرق العددي بين قيمتي حد السيولة وحد اللدونة للتربة.
- **دليل السيولة** (Liquidity Index – LI) ويبين مدى قابلية التربة لمقاومة التغير في شكلها.
- **دليل القوام** (Consistency Index – Ic) .

أما كيف تساعد معرفة حدود أتربرغ، وخصوصاً دليل السيولة (LI)، في الحكم على قوام التربة، فيظهر من خلال الجدول (2-2) المعتمد في المواصفات الروسية /4/.

جدول (2-2) حدود القوام للتربة

الطين والطفال (Clays and Loams)			**الطفال الرملي (Sandy loams)**		
صلب	Hard	LI<0 (W<PL)	صلب	**Hard**	**LI<1**
شبه صلب	Semi-hard	LI=0.0-0.25	لدن	Plastic	0≤LI≤1
صلد لدن	Stiff-plastic	LI=0.25-0.50	سائل	Liquid	LI>1
طري لدن	Soft –plastic	LI=0.50-0.75			
سائل لدن	Liquid-plastic	LI=0.75-1.0			
سائل	Liquid	LI>1			

2-2-2الخصائص الميكانيكية للتربة

(Mechanical properties of soil):

المقصود بالخصائص الميكانيكية للتربة هو تلك الخصائص التي تعبر عن سلوك التربة تحت تأثير الأحمال المختلفة ، فعندما تتعرض التربة لتأثير الأحمال الناتجة من وزن المبنى فوقها (Superstructure) فإنها تنضغط وتتراص حبيباتها أكثر، على حساب الفراغات الموجودة فيها، وهي العملية التي تدعى بالتضاغط (Consolidation).

وبما أن حجم الفراغات الموجودة في تركيب التربة محدود ويتناقص مع زيادة الحمل الضاغط، فإن الذي يحدث عندما تتلاشى الفراغات مع ازدياد الحمل العمودي هو أن حبيبات التربة تبدأ بالانزلاق الواحدة فوق الاخرى، ويحصل ما يدعى بالقص (Shear). وأما ما يحصل اذا استمرت زيادة الحمل

المؤثر على التربة بعد مرحلة القص، فهو الانهيار (Failure). ويبين الشكل (2-4) المراحل الثلاثة المذكورة من خلال العلاقة بين الاجهاد العمودي (Vertical stress) وتشوه التربة (Deformation).

ومن هنا تبرز أهمية الدراسة المستفيضة لخصائص التضاغط، وللتربة الطينية بالتحديد، وذلك للحصول على المعطيات اللازمة لحساب قيمة الهبوط الكلي للمبنى ودراسة ظاهرة الهبوط مع الزمن. وكذلك الحال بالنسبة لفحوصات القص، التي تمكّن من الحصول على القيم اللازمة لحساب قدرة تحمل التربة، وهي قوة التماسك بين الحبيبات (Cohesion) وزاوية الاحتكاك الداخلي (Angle of internal friction)، وهي قيم ضرورية لأغراض أخرى مثل حسابات الضغوطات الجانبية للتربة (Lateral earth pressure)على الجدران الساندة ودراسة اتزان المنحدرات الترابية (Slope stability analysis) وغيرها.

ونكتفي هنا بشرح المقصود بالخصائص الميكانيكية للتربة بشكل عام، على أن يتواصل القارىء مع تفاصيل أكثر حين نتعرض في الفصول القادمة للفحوصات التي تجرى في المختبر لدراسة أهم هذه الخصائص.

2-2-2-1 القص في للتربة (Soil Shear Tests):

مقاومة التربة للقص (Shear strength of soil): من المعروف أن أساس المبنى أو المنشأ يقوم بعملية نقل وتوصيل الأحمال الى التربة التي يرتكز اليها. ويؤدي تأثير هذه الأحمال الى ظهور اجهادات (Stresses) في التربة تنتج عنها تشوهات (Deformations). وتكون هذه التشوهات إما مرنة (Elastic) لحبيبات التربة، أو حجمية نتيجة لخروج الماء من الفراغات، وينتج عنها تغيّر في حجم التربة (Volume change) وهي ظاهرة التضاغط (Consolidation) التي سنتناول تفاصيلها في الباب الخامس. وأما الشكل الثالث للتشوهات التي يمكن أن تظهر في التربة تحت تأثير الحمل الخارجي، فهو انزلاق حبيبات التربة الواحدة فوق الاخرى (Slippage of soil particles)، والذي قد يؤدي الى انزلاق كتلة ترابية فوق أخرى، مما يعني الانهيار (Failure)، وهذا الشكل من التشوهات هو ما يعرف بالقص (Shear). وحتى تتوضح صورة هذه الظاهرة والظروف التي تحصل خلالها، نورد مسلسل التحميل التالي:

لنفرض أن حِملاً خارجياً متصاعداً تدريجياً يؤثر على سطح التربة من خلال مكبس صلب (Rigid stamp) مع مراقبة الهبوط العمودي للتربة أثناء عملية التحميل. ولنفرض أن أول حمل كان (P_1) والهبوط الناتج عنه (S_1)، والحمل الثاني كان (P_2) والهبوط الناتج عنه (S_2)، وهكذا، حسب المنحنى ($P \rightarrow S$) الموضح في الشكل (4-1).

إن تحميل التربة حتى حد معين ينتج عنه تراص حبيباتها تحت تأثير الحمل على حساب الفراغات بين هذه الحبيبات، أي أن التربة تندمك بتقارب حبيباتها من بعضها البعض، وبالتالي تتحسن خصائصها، وتدعى هذه المرحلة من مراحل التحميل بمرحلة الانضغاط أو الدمك (Compaction phase)، ويمثل نهايتها على المنحنى الحمل (P_2) والهبوط الناتج عنه (S_2). وتنتهي هذه المرحلة عند تلاشي الفراغات

في تركيب التربة، ونظرياً، وحسب العالِم الروسي نيكولاي غيرسيفانوف (N.Gersevanov)، فإن العلاقة بين الحمل والهبوط في هذه المرحلة يمكن اعتبارها علاقة خطية (Linear)، وبالتالي يمكن استعمال القوانين والاشتقاقات الناتجة من نظرية المرونة (Theory of elasticity) لدراسة التربة في هذه المرحلة. وهذه الفرضية هي الأساس النظري الأكثر شهرة في ميكانيكا التربة، وهي صالحة طالما أن الحمل المؤثر على التربة ضمن نطاق المرحلة الاولى للتحميل، مرحلة الانضغاط أو الدمك.

ولكن، ما الذي يحصل لو تمت زيادة الحمل المؤثر على التربة بعد تلاشي الفراغات بين حبيباتها ؟

إن الذي يحصل هو أن الحبيبات تبدأ بالانزلاق الواحدة فوق الاخرى، أي تبدأ مرحلة القص (Shear phase). وتكون العلاقة بين الحمل والهبوط في هذه المرحلة غير خطية (Non-linear)، ودراسة التربة خلالها تتبع نظرياتخاصة، حتى أن فرعاً خاصاً في ميكانيكا التربة قد بدأ بالاستقلال بذاته وهو فرع "ميكانيكا التربة غير الخطية" (Non-linear soil mechanics).

وقد أظهرت تجارب عملية أجراها العالم الروسي فلاديمير بيريزانتسيف (V. Berezantsev) أن نواة متراصة (Compacted core) تتشكل في نهاية مرحلة الانضغاط وبداية مرحلة القص (شكل 4-2) وينتهي تشكلها عند بلوغ التربة قدرة تحملها القصوى (عند الحمل P_3 على الشكل 4-1)، وأي زيادة في الحمل بعد ذلك تؤدي الى ظهور اسطح انزلاق متصلة تكون دليلاً على أن التربة بدأت في فقدان ثباتها (Loss of stability)، وهو بداية مرحلة التحميل الثالثة، وتسمى مرحلة الانهيار (Failure phase).

ولدراسة مقاومة التربة للقص ، يتم اجراء أحد فحوصات القص في المختبر، وذلك لتحديد المركبين الرئيسيين لهذه المقاومة، وهما:

أ- التماسك بين الحبيبات وتعبّر عنه قوة التماسك (Cohesion) ويُرمز لها بالحرف (C)

ب-الاحتكاك بين الحبيبات الصلبة للتربة، وتعبّر عنه زاوية الاحتكاك الداخلي (Angle of internal friction) ويُرمز لها بالحرف اللاتيني (ϕ).

وقد كان العالم الفرنسي كولوم (Columb) أول من ربط بين زاوية الاحتكاك والتماسك بين الحبيبات، وذلك سنة 1773 في معادلته:

$$\tau = C + \sigma \tan\phi \quad (1\text{-}4)$$

حيث :

τ - مقاومة التربة للقص

C- قوة التماسك بين الحبيبات

σ- اجمالي الاجهاد العمودي عند مستوى القص

ϕ- زاوية الاحتكاك الداخلي.

ويمكن كتابة المعادلة (4-1) باستعمال قيم الاجهادلفعّال (Effective stress):

$$\tau' = C' + \sigma' \tan \phi' \quad (2\text{-}4)$$

حيث:

C', ϕ' - قوة التماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي منسوبة الى الاجهاد الفعال

σ' - الاجهاد الفعال العمودي (Normal effective stress):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3-4)$$

حيث:

u - ضغط الماء المسامي (Pore-water pressure).

2-2-2-2 التضاغط المحوري للتربة

(One - Dimensional Consolidation of Soil) :

إن انضغاطية التربة (Soil compressibility) وتضاغطها (Soil consolidation) يدلاّن على شيئيْن مختلفيْن، وا ٍن بدا للوهلة الأولى أنهما يدلاّن على الشيء نفسه. ونأمل أن يبين الشرح اللاحق للمقصود بالمصطلحيْن صواب اجتهادنا باختيار هذه الترجمة لهما.

وأما انضغاطية التربة، فهي نقصان حجم التربة حين تتعرض لتأثير إجهاد ضغط (Compressive stress)وذلك على حساب تضاؤل فراغاتها وا ٍعادة ترتيب الحبيبات الصلبة فيها. هذا هو المفهوم العام لانضغاطية التربة، وأما المفهوم الخاص لها، فهو مقدار أو كمية انضغاط التربة، حين يكون مسموحاً لها أن تتضاغط (Consolidate).

فما هو المقصود بالتضاغط ؟

هو مصطلح يؤتى به للتدليل على عملية تجري وفقاً لشروط وفرضيات خاصة، تشكل معاً الأساس النظري لنظرية التضاغط المحوري (One-dimensional consolidation theory).

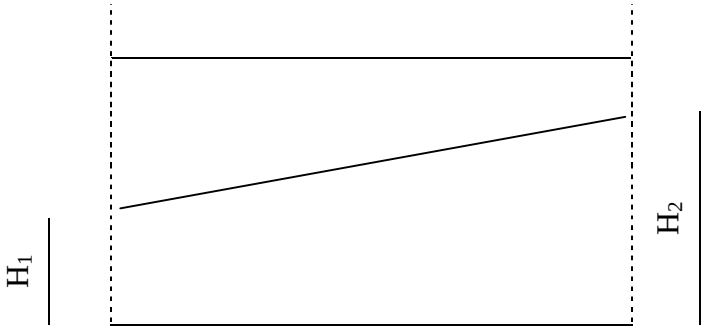
و التضاغط هو عملية تقارب الحبيبات الصلبة للتربة من بعضها أكثر خلال فترة زمنية وتحت تأثير إجهادات متزايدة. وتترافق هذه العملية مع خروج الماء من الفراغات الموجودة في التربة.

2-2-2-3 نفاذية التربة

(Soil Permeability Tests) :

يمكن تعريف نفاذية التربة بأنها قدرة التربة على السماح للسوائل بالجريان خلال فراغاتها. ويقصد بالسوائل هنا الماء.

وقد كان العالم الفرنسي دارسي (H. Darcy) أول من درس خاصية جريان الماء خلال الأوساط المنفذة (Porous medium)، وذلك سنة 1856، وكان القانون الرياضي المعروف باسم هذا العالم من النتائج المهمة لأبحاثه في هذا المجال. وينص قانون دارسي (Darcy's law) على أن سرعة جريان الماء عبر التربة تتناسب طردياً مع الميل الهيدروليكي (Hydraulic gradient).



شكل(3-1)

$$q = A.K.i$$

$$V = \frac{q}{A} = K.i$$

$$i = \frac{(H_2 - H_1)}{L} = \frac{\Delta H}{L}$$

L

حيث:

q– حجم الماء النافذ عبر التربة خلال وحدة الزمن.

A– مساحة المقطع العرضي للتربة.

K- معامل النفاذية (Coefficient of permeability).

i- الميل الهيدروليكي.

V- سرعة جريان الماء.

ويلاحظ من القانون أن وحدات القياس لمعامل النفاذية (K) هي نفس وحدات قياس السرعة، أي سنتمتر/الثانية، متر/السنة وهكذا.

ويعتبر معامل النفاذية (K)القيمة الكميّة التي يجري تحديدها للحكم على نفاذية التربة، سواء من خلال الفحوصات المخبرية أو الحقلية، علماً بأن الأخيرة تعطي تصوراً أكثر دقة ووضوحاً عن نفاذية التربة، لأن التربةتكون في وضعها الطبيعي بعيداً عن التأثيرات التي قد تحصل أثناء استخراج عينة التربة لفحص نفاذيتها في المختبر.

أما الأهمية العلمية لدراسة نفاذية التربة، فيمكن تلخيصها في النقاط التالية:

1- تحديد سرعة ترشح وتصرف الماء (Seepage) عبر التربة.

2- تحديد ضغط الترشح (Seepage pressure).

3- تفادي حصول ظواهر غير مستحبة بل خطيرة، مثل ظاهرة "غليان الرمل" (Sand boiling) والتي يظهر فيها الرمل وكأنه يغلي، بسبب تجاوز الميل الهيدروليكي (i) لما يسمى بالميل الهيدروليكي

الحرج (Critical hydraulic gradient) (i_c)، وتعرف الظاهرة كذلك باسم (Quick sand)، أو ظواهر التعرية السطحية (Subsurface erosion) والنحر (Piping)، وغيرها.

4- حساب مخزون المياه الجوفية.

5- حساب كمية الماء المفقود من مستودعات تخزين المياه (Storage reservoirs).

6- المساعدة في تصميم نظم التصريف حول أساسات المباني (Drainage system).

وغير ذلك من المجالات التطبيقية التي تعتمد أساساً على معرفة نفاذية التربة.

2-2-2-4 دمك التربة (Soil Compaction) :

تعتبر خصائص التربة كمقاومة القص (Shear strength) والنفاذية القليلة (Low permeability) والامتصاص القليل للماء (Low water absorption)، من أهم الخصائص التي تمنح التربة صفة الاتزان (Stability)وتحسّن من نوعيتها وا إمكانية عملها بشكل جيد تحت أي منشأ، سواء كان طريقاً أو مبنى، أو كمادة إنشائية في أعمال السدود والردميات.

ويعتبر الدمك (Soil compaction)أسلوباً ممتازاً لتحسين نوعية التربة والارتقاء بها للحصول على الخصائص المذكورة.

وأما دمك التربة، فهو عملية تتم خلالها إعادة ترتيب الحبيبات الصلبة في تكوين التربة من خلال إنقاص حجم الفراغات التي تكون ممتلئة بالهواء. ويتم هذا بواسطة مطارق خاصة (Hammers) أو مداحل (Rollers) أو بواسطة الهز (Vibration).

وينبغي التمييز بين عملية دمك التربة وعملية تضاغطها(Consolidation)، حيث إن الأخيرة هي عملية يتم فيها انضغاط التربة وتقارب حبيباتها من خلال إخراج أو طرد الماء المحتوى في فراغاتها، وذلك تحت تأثير الضغط العمودي المتواصل.

2-2-3 الخصائص الكيميائية للتربة (Chemical properties of soil) :

تتعلق الخصائص الكيميائية للتربة بما تحتويه الاخيرة من مواد يسبب وجودها أضراراً للاجزاء المطمورة من المبنى أو المنشأ المتلامسة مع التربة، مثل الاساسات باشكالها، جدران القبو، الأنابيب الخرسانية وأية أجزاء أخرى متلامسة مع التربة المحيطة.

وفيما يلي عرض موجز لأهم الجوانب العملية التي تتعلق بالخصائص الكيميائية للتربة.

1- **محتوى الكبريتات في التربة** (Sulphate content):

تكون الكبريتات الذائبة في الماء والتي تتواجد عادة في التربة على شكل كبريتات الصوديوم (Sodium sulphate – Na_2SO_4) وكبريتات المغنيسيوم (Magnesium sulphate – $MgSO_4$). وتوجد كبريتات الكالسيوم (Calcium sulphate – $CaSO_4$) على شكل جبس (Gypsum)، ولكنها

بطيئة الذوبان في الماء. ويعبر عن نسبة الكبريتات الموجودة في التربة عادة من خلال ايجاد نسبة ثالث أكسيد الكبريت (Sulphur trioxide – SO3) فيها.

وتكمن خطورة الكبريتات الذائبة في المياه الجوفية في مهاجمتها للخرسانة وأية مواد أخرى تحتوي الأسمنت. ويجري التفاعل بين الكبريتات ومركبات الألومينات (Aluminate compounds) الموجودة في الاسمنت مما يتسبب في حدوث تبلور لهذه المركبات يؤدي الى تمدد، تنشأ عنه اجهادات اضافية تتسبب في حدوث تشققات وتفتت. كما أن وجود الكبريتات في التربة التي تحيط بالانابيب المعدنية المطمورة يؤدي الى صدأ هذه الانابيب (Corrosion)، مما يتسبب في حدوث التسرب (Leakage). ويفيد تحديد نسبة الكبريتات في التربة في تقدير حجم الضرر الذي قد ينجم عنها، وذلك لاتخاذ ما يلزم من احتياطات مضادة، كاستعمال الاسمنت المقاوم للكبريتات (Sulphate resisting cement) أو زيادة نسبة الاسمنت في الخلطة الخرسانية.

وقد تم تضمين أهم الاحتياطات اللازم اتخاذها لمواجهة تأثير الكبريتات على الخرسانة في الملخص الصادر عن مؤسسة بحوث البناء في بريطانيا (Building Research Establishment) /14/، وهو ملخص قام مهندس الاساسات المتمرس م.توملينسون (M.Tomlinson) بشرحه مع ما يلزم من توصيات بخصوص الاسمنت وكميته للمتر المكعب من الخرسانة حسب نسبة الكبريتات، وذلك في الجدول (2-3) المرفق /5/.

وكما يظهر من الجدول (2-3)، فإن وجود الكبريتات لا يعني بالضرورة استخدام الاسمنت المقاوم لها، بل قد يُكتفى باستخدام الاسمنت البورتلاندي العادي (Normal Portland Cement) مع التشديد على كميةٍ دنيا للاسمنت في المتر المكعب من الخلطة الخرسانية، وكذلك تحديد نسبة الماء الى الاسمنت في الخلطة (Water cement ratio – W/C). ويلاحظ من الجدول كذلك أن الاجراءات المضادة لوجود الكبريتات تعتمد على منسوب المياه الجوفية وموقعها بالنسبة للاساسات.

2- **محتوى المواد العضوية** (Organic matter content):

تتنوع المركبات العضوية التي قد توجد في التربة تنوعاً كبيراً تبعاً لتنوع مصادرها. فالمواد العضوية في التربة تتشكل من مخلفات الحيوانات والمزارع. وأما تأثير وجود هذه المواد العضوية على سلوك التربة فهو سلبي ويمكن تلخيصه كما يلي /6/:

- يؤدي الى انخفاض قيمة قدرة تحمل التربة.
- يؤدي الى ازدياد انضغاطية التربة.
- يؤدي الى ازدياد احتمالات الانتفاخ (Swelling) والتقلص (Shrinkage) بسبب التغير في محتوى الرطوبة.

- وجود الغاز في فراغات التربة العضوية يمكن أن يؤدي لهبوط فوري (Immediate settlement)، كما قد يؤثر على الدقة في اشتقاق معاملات التضاغط (Consolidation coefficients) أثناء الفحص المخبري.
- وجود الغاز يمكنه كذلك أن يؤدي الى الحصول على قيم مغلوطة لمقاومة القص.
- يكون وجود المواد العضوية مصحوباً بحامضية الوسط (قيمة منخفضة للرقم الهيدروجيني PH)، وأحياناً بوجود الكبريتات.
- وجود المواد العضوية في التربة المستعملة لأغراض التثبيت في الطرق له أثر ضار.

مما تقدم، تبرز أهمية تحديد محتوى المواد العضوية في التربة لتقرير ما يلزم اتخاذه من احتياطات.

3- **محتوى الكلوريد** (Chloride content):

تساعد معرفة محتوى الكلوريد في المياه الجوفية أو في التربة على تحديد ما إذا كانت المياه الجوفية هي مياه بحر أو اذا كانت التربة قد تعرضت لمياه البحر. ويلاحظ في المناطق الساحلية في الشرق الأوسط أن تركيز ملح كلوريد الصوديوم (NaCl) في المياه الجوفية هو أعلى بكثير من تركيزه في مياه البحر، كما أن تركيزاً عالياً للكلوريد قد يصادف في مناطق من التربة والصخور المنفذة التي لا يوجد اتصال بينها وبين البحر /6،12/.

ولا يتفاعل الكلوريد مباشرة مع الاسمنت كما هو الحال بالنسبة للكبريتات، ولكن تأثيره يقتصر على الاجزاء المعدنية التي قد يصل اليها وأهمها حديد التسليح (Steel reinforcement)، وهذا يؤدي الى صدأ هذه الاجزاء، مما يتسبب في تلف الخرسانة المسلحة وحدوث التشققات في اجزائها.

وتجدر الاشارة الى أن الكلوريدات قد تكون موجودة في المكونات الاساسية للخرسانة، كالرمل والركام الخشن والماء. ووصولها لحديد التسليح ليس مقصوراً على نفاذها من التربة. ولهذا تولى عناية خاصة لهذا الموضوع في المنشآت والمباني التي تقام في المناطق الساحلية.

ونشير الى أن المواصفات البريطانية (BS 8110) تحدد النسبة القصوى المسموح بها لمحتوى الكلوريد (0.4 %) للاسمنت البورتلاندي العادي و (0.2 %) للاسمنت المقاوم للكبريتات.

4- **حامضية أو قاعدية الوسط** (Acidity or alkalinity – PH value):

تؤثر قاعدية أو حامضية المياه الجوفية في التربة تأثيراً سلبياً على الخرسانة المطمورة في الار ض. فالوسطالحامضي، وا ن كان معتدل الحامضية، يؤدي إلى صدأ المعادن وهو ما يفسر ضرر الحامضية على الخرسانة المسلحة. وهناك نوع من الترابط بين الرقم الهيدروجيني (PH) ونسبة الكبريتات، حيث يلزم قياس الرقم الهيدروجيني حيثما يتم قياس نسبة الكبريتات. وقد ثبت أنه اذا كانت قيمة الرقم الهيدروجيني أقل من 4.3 مع نسبة عالية من الكبريتات، فإن هذا يدل على وجود حامض الكبريتيك (H_2SO_4).

الفصل الثالث (اختبارات التربة) :

2-3-1 مقدمة (Introduction) :

تقسم الإختبارات إلى إختبارات مخبرية وأخرى حقلية. و الإختبارات الحقلية، كما هو واضح من تسميتها،هي تلك التي تجري في الحقل أو الموقع، وذلك على التربة في وضعها وتركيبها الطبيعيين.

ومن أهم الإختبارات الحقلية للتربة ما يلي:

(1) اختبارات الكثافة الحقلية (Field density tests)- لتحديد كثافة التربة الطبيعية أو بعد دمكها للتأكد من جودة الدمك. وهناك طرق مختلفة لإجراء هذا الإختبار، مثل طريقة مخروط الرمل أو إحلال الرمل (Sand cone or sand replacement method)، وطريقة البالون المطاطي (Rubber balloon method)، والطريقة الذرية (Nuclear method).والطريقة الأولى باستخدام الرمل هي الأكثر انتشاراً، لذلك سنعرضها بالتفصيل.

(2) اختبارات الاختراق (Penetration tests)- وتستخدم هذه الإختبارات لغرض تحديد قدرة تحمل التربة وخصائصها، وتقسم إلى إختبارات الاختراق الاستاتيكي (Static penetration tests)، التي يتم خلالها اختراق السطح الطبيعي للتربة بواسطة مخروط له أبعاد محددة، ومثالها إختبار المخروط، المعروف بـ (Dutch cone test)، و إختبارات الاختراق الديناميكي (Dynamic penetration tests)، التي يتم خلالها كذلك اختراق التربة بواسطة جهاز أسطواني خاص في مقدمته جامع عينات (Soil sampler) بواسطة مطرقة خاصة، ومثال هذه الإختبارت إختبار الاختراق القياسي (Standard Penetration Test- SPT) واسع الانتشار، والذي سنعرضه بالتفصيل.

(3) اختبارات القص (Shear tests)- وتستخدم غالباً لقياس مقاومة القص للتربة الطينية الناعمة ذات الرطوبة العالية، وأهمها فحص القص بالريشة (Vane shear test).

(4) اختبارات النفاذية (Permeability tests)- ويتم إجراء هذه الإختبارت داخل الآبار السبرية (Boreholes) أو الحفر الاختيارية (Trail pits) لقياس معامل نفاذية التربة (Coefficient of permeability) بتركيبها الطبيعي.

ويتم اللجوء إلى إجراء هذه الإختبارت ، والتي تتميز عن الإختبارت المخبرية بدقتها، في حالة المشاريع ذات الأهمية الخاصة، حين يكون لنفاذية التربة دور أساسي في تحديد سلوكها، كما هو الحال في المنشآت المائية (Hydraulic structures) كالسدود والقنوات، أو في حالة اساسات المباني والمنشآت الموجودة في مناطق تتأثر بمنسوب المياه الجوفية.

(5) اختبارات التحميل (Loading tests)- وتستخدم هذه الإختبارت لدراسة خصائص الهبوط والقص وقدرة التحمل للتربة. ومثالها إختبار قرص أو صفيحة التحميل (Plate bearing test) الذي يجري في الحفر الاختبارية عند منسوب التأسيس أو أي منسوب مطلوب. ويتم خلال الإختبار تعريض القرص أو الصفيحة المثبتة على سطح التربة لحمل ستاتيكي (Static load) متصاعد حتى حصول الانهيار

(Failure) أو الوصول إلى حمل معين، مع أخذ ما يلزم من قراءات لإجراء الحسابات اللازمة، وسنقدم في هذا الباب من البحث ، أهم تفاصيل الإختبارتالحقلية الاكثر انتشاراً .

2-3-2 اختبار الاختراق القياسي

(Standard Penetration Test - SPT) :

يعتبر هذا الإختبار الحقلي، كما سبق وأشرنا، أحد إختبارات الاختراق الديناميكية للتربة. ويتم إجراء هذا الإختبار في العادة داخل الآبار السبرية (Boreholes) أثناء تحريات الموقع (Site investigation)، وعلى أعماق مختلفة لتحديد خصائص التربة وقدرة تحملها.

(4) الفائدة العملية (Application):

يتم الاستفادة من رقم الاختراق القياسي (عدد الضربات N) لعدة أغراض عملية أهمها:

أ. تحديد الكثافة النسبية للتربة (Relative density) – ويبين الجدول (9-1) أدناه العلاقة بين عدد الضربات (N) والكثافة النسبية للتربة الرملية حسب ترزاجي وبيك(Terzaghi& Peck) /17/:

جدول (3-1) الكثافة النسبية

عدد الضربات (N)	الكثافة النسبية (Relative density)	
أقل من 4	مفككة جداً	(Very loose)
10-4	مفككة	(loose)
30-10	متوسطة الكثافة	(Medium dense)
50-30	كثيفة	(Dense)
أكثر من 50	كثيفة جداً	(Very dense)

ب. تحديد قوام التربة (Consistency) ومقاومة الضغط اللامحصور(Unconfied strength) للتربة الطينية التركيب، كما هو موضح في الجدول (9-2) أدناه، والقيم الواردة في الجدول تقريبية لكنها ذات فائدة عملية كبيرة /17/.

جدول (3-2) مقاومة الضغط اللامحصور

عدد الضربات (N)	قوام التربة (Consistency)		مقاومة الضغط اللامحصور(كيلونيوتن/م2) (Unconfined compressive strength)
أقل من 2	طري جداً	(Very Soft)	أقل من 25
4-2	طري	(Soft)	50-25
8-4	متوسط	(Medium)	100-50
15-8	صلب	(Stiff)	200-100
30-15	صلب جداً	(Very stiff)	400-200
أكبر من 30	قاسي	(hard)	أكبر من 400

ت. تحديد قدرة تحمل التربة (Bearing capacity) -حيث توصل تراز جي وبيك إلى تلخيص تجربتهما في منحنى خاص لتحديد قدرة التحمل المسموح بها (Allowed bearing capacity) حسب عدد الضربات في فحص الاختراق القياسي (SPT) ولمقاسات مختلفة من الأساسات، على افتراض أن منسوب المياه الجوفية (Water table) يقع على مسافة لا تقل عن عرض الأساس (B) من منسوب التأسيس. وتكون قيم قدرة التحمل قريبة جداً إلى الواقع في حالة التربة الرملية.

ث. تحديد قيمة زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) للتربة - ولهذا الغرض يمكن استعمال المنحنى الموضح في الشكل (9-4) من المرجع /3/ والذي يعطي قيماً تقريبية للزاوية (ϕ).

2-3-3 اختبارات التربة المخبرية

(Soil Testing for Construction Purposes):

ورد فيما تقدم، واثناء استعراض أهم خصائص التربة، ذكر معظم الإختبارت التي تجرى في المختبر لتحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية. وفيما يلي حصر لأهم هذه الإختبارت المخبرية ، وسنشير بشكل أساسي الى المقاييس البريطانية الخاصة بفحوصات التربة لأغراض الهندسة المدنية (BS 1377) /10/، ومقاييس الجمعية الأميركية للفحوصات والمواد (ASTM) /11/ وهما الاكثر شيوعاً واستعمالاً في الممارسة الهندسية في البلاد العربية، مع الإشارة إلى مقاييس الجمعية الأميركية للطرق (AASHTO) /12/الخاصة بإجراء بعض الفحوصات، وخصوصاً تلك التي تجري في إنشاء الطرق. ويمكن تقسيمها الى المجموعات الرئيسية التالية:

أ- فحوصات تصنيف التربة (Soil classification tests) وأهمها:			
1-	محتوى الرطوبة	Moisture content	BS 1377 Test No. 1 ASTM D-2216
2-	حد السيولة	Liquid Limit (LL)	BS 1377 Test No. 2 ASTM D-423 AASHTO T-89
3-	حد اللدونة	Plastic Limit (PL)	BS 1377 Test No. 3 ASTM D-424 AASHTO T-90
4-	حد الانكماش	Shrinkage Limit (SL)	BS 1377 Test No. 5 ASTM D-427
5-	الوزن النوعي	Specific gravity	BS 1377 Test No. 6 ASTM D-854
6-	التدرج الحبيبي	Sieve analysis	BS 1377 Test No. 7 ASTM D-422
7-	نسبة المواد التي يقل مقاسها عن 75 ميكرون	Percent finer sieve 75 micron (sieve # 200)	ASTM D-1140
8-	التحضير الجاف للعينات	Dry preparation of samples	BS 1377 , ASTM D-421
9-	التحضير الرطب	Wet preparation of samples	BS 1377, ASTM D-2217

	للعينات		
(ب) – فحوصات القوة للتربة (Soil strength tests) وأهمها:			
1-	القص المباشر	Direct shear	ASTM D-3080
2-	القص بتأثير الضغط ثلاثي المحاور	Triaxial compression	BS 1377 Test No. 21 ASTM D-2850
3-	الضغط اللامحصور	Unconfied compression	BS 1377, ASTM D-2166
4-	التضاغط المحوري	One-dimensional consolidation	BS 1377 Test No. 17 ASTM D-2435
5-	نسبة تحمل كاليفورنيا	California Bearing Ratio - CBR	BS 1377 Test No. 16 ASTM D-1883 AASHTO T-193
(جـ) – فحوصات الدمك (Compaction tests) وأهمها:			
1-	الدمك القياسي (بروكتور)	Standard Proctor test	BS 1377 Test No. 12 ASTM D-698 AASHTO T-90
2-	الدمك المعدّل	Modified compaction	BS 1377 Test No.13 ASTM D-1557 AASHTO T-180

(د) – فحوصات النفاذية (Permeability tests): ASTM D-2325, D-2434			
(هـ) – الفحوصات الكيميائية (Chemical tests) وأهمها:			
1-	محتوى المواد العضوية	Organic matter content	BS 1377 Test No.8
2-	محتوى الكبريتات	Sulphate content	BS 1377 Test No. 9
3-	محتوى الكبريتات في المياه الجوفية	Sulphate content in groundwater	BS 1377 Test No.10
4-	تحديد الرقم الهيدروجيني	PH value	BS 1377 Test No. 11
5-	محتوى الكلوريد في التربة	Chloride content	BS 812

2-3-4 أهداف الإختبارت المخبري للتربـة

(Purposes of Laboratory Soil Testing):

من البديهي أن إختبار التربة في المختبر يهدف إلى التعرف على خصائصها الرئيسية من فيزيائية وكيميائية وميكانيكية، مما يعطي الفرصة لاعتبار هذه الخصائص عند تصميم المبنى أو المنشأ، وأساساته على وجه التحديد.

ويمكن تلخيص الأهداف الأساسية لإختبار التربة كما يلي:

1. إمكانية التصنيف الدقيق للتربة.
2. التعرف على الخصائص المتعلقة بثبات التربة تحت تأثير الأحمال (Strength requirements) وقوة تحملها للضغط (Bearing capacity).
3. التنبؤ بمقدار الهبوط (Settlement) الذي سيحصل للمبنى والتأكد من عدم حصول الهبوط غير المتكافئ (Differential settlement) بين نقاط مختلفة.
4. دراسة تأثير المياه الجوفية (Ground water) – إن وجدت- على سلوك التربة والتعرف على إمكانية تغيير منسوبها ارتفاعاً أو انخفاضاً مع ربط هذا بعامل الزمن.
5. تحديد مدى احتواء التربة على الكبريتات (Sulphates) أو الكلوريدات (Chlorides) أو كليهما معاً لتقرير ضرورة أو عدم ضرورة استعمال الإسمنت المقاوم للكبريتات (Sulphate resisting cement).
6. دراسة مدى تأثير العوامل الجوية المحيطة (مياه الأمطار، الثلوج، الحرارة.....الخ) على سلوك التربة تحت الأساسات.
7. التعرف على أشكال خاصة من التر بة تستلزم التعامل معها بحذر كتربة اللوس الهابطة (Loess or collapsing soil) أو التربة المنتفخة أو –المتمددة- (Swelling or expansive soil) وغيرهما.

ونشير ختاماً إلى أن الوقت والجهد والمال التي يتم بذلها خلال عملية استطلاع أو تحريات الموقع (Site investigation)، والتي تتضمن الإختبارت تفصيلية للتربة وتحليلاً لنتائج هذه الإختبارت ، لا تقاس بتلك التي يتم بذلها عند ظهور خلل معين في مبنى أو منشأ بسبب عدم إجراء مثل هذه الإختبارت.

إختبارت التعرف على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة (Physical and chemical properties) مثل محتوى الرطوبة الطبيعي (Natural moisture content) وحدود أتربيرج (Atterberg limits) للسيولة واللدونة والانكماش والتدرج الحبيبي (Gradation) والوزن النوعي (Specific gravity) وكذلك محتوى الكبريتات (Sulphate content) والكلوريد (Chloride content) والأُس الهيدروجيني (PH value) وغيرها من الفحوصات التي لا يستدعي إجراؤها الحصول على عينات سليمة.

وقبل ترك موضوع العينات وأشكالها، نشير هنا إلى **ملاحظتين**:

الأولى: إن تسمية العينات بالسليمة هي تسمية نسبية، إذ يستحيل استخراج عينات التربة دون إحداث خلل معين- مهما صغَر - على تركيبها، مهما كانت دقة الأدوات المستعملة في العملية.

الثانية: إن إختبارت التربة التي تجري على العينات المضطربة التركيب المذكورة أعلاه، يمكن إجراؤها باستعمال عينات سليمة التركيب بعد خلخلتها وتشكيلها بالشكل الملائم، وهذا أمر بديهي لكن لا ضرر من الإشارة إليه.

2-3-5 حدود أتربيرج

(Atterberg Limits) :

يسهل تغيير الحالة التي يوجد فيها الطين أو التربة الطينية، وذلك بتغيير محتوى الرطوبة. فزيادة قليل من الماء إلى عينة من الطين تزيد رخاوتها، وهو أمر يسهل تصوره على كل من تعامل مع التربة بشكل أو بآخر.

ولكل شكل من أشكال التربة الطينية مجال من محتوى الرطوبة، تكون التربة فيه بحالة لدنة مثلاً، وهي واحدة من الحالات التي يمكن أن توجد فيها التربة الطينية. ولفهم هذه الحالات، نفرض أن كمية كافية من الماء قد أضيفت لعينة من الطين وحو ّ لتها إلى ما يشبه السائل اللزج. إن هذه الحالة التي أصبح عليها الطين هي حالة السيولة (Liquid state)وا ٍذا ما تركت العينة لتجف ببطء، فإن فقدان الماء يقارب حبيبات الطين من بعضها أكثر ويجعلها قادرة على إبداء مقاومة لتغيير شكلها، وهذه هي حالة اللدونة (Plastic state). ومع استمرار فقدان الماء من العينة، فإنها تبدأ بالتقلص (Shrink) وتزداد صلابتها مع احتفاظها بقليل من اللدونة، وهنا نقول بأنها في حالة شبه الصلابة (Semi-solid state). وتنتقل العينة إلى حالة الصلابة (Solid state) مع استمرار جفافها وتقلص حجمها إلى الحد الأدنى.

ويفيد تحديد هذه الحدود مع معرفة محتوى الرطوبة للتربة في تحديد خصائصها أكثر، حيث يمكن من خلالها إيجاد دليل السيولة (LI) بالمعادلة (2-20) وكذلك ما يسمى بدليل القوام (I c) (معادلة 3-2):

$$LI = \frac{W - PL}{LL - PL} = \frac{W - PL}{PI}, I_C = \frac{LL - W}{PI} \qquad (2\text{-}3)$$

ويشيع استعمال دليل السيولة (LI) أكثر في التعرف على قوام التربة.

ويبين الجدول التالي (3-3) العلاقة بين مجال الرطوبة للتربة ودليل السيولة ودليل القوام.

كما تُساعد معرفة حدود أتربرغ في إيجاد فعالية الطين (Clay activity)، وهي خاصية مرتبطة بنسبة الحبيبات الطينية (< 2 ميكرون) الموجودة في التربة. وقد توصل سكمبتون (Skempton) سنة 1953 إلى أن دليل اللدونة (PI) لعينة التربة التي تحتوي الطين مع حبيبات أكثر خشونة منه يعتمد على نسبة الطين في العينة (Clay fraction)، وأن النسبة بين دليل اللدونة (PI)

جدول (3-3) – دليل السيولة والقوام

محتوى الرطوبة	*دليل القوام* **(Ic)**	**دليل السيولة (LI)**
تحت حد اللدونة (PL)	1<	سالب

عند حد اللدونة (PL)	1	صفر
بين حد اللدونة (PL) والسيولة (LL)	صفر-1	صفر-1
عند حد السيولة (LL)	صفر	1
فوق حد اللدونة (LL)	سالب	1<

ونسبة الطين هي قيمة ثابتة جرت تسميتها بفعالية الطين (Activity):

فعالية الطين = دليل اللدونة (PI) ÷ نسبة الطين	(3-3)

ويتم تصنيف التربة الطينية حسب فعاليتها إلى أربع مجموعات كما هو موضح في الجدول (3-2) /6/ :

جدول (3-4) – فعالية الطين

رقم المجموعة	وصف المجموعة	الفعالية
1-	ين غير فعّال (Inactive clay)	0.75>
2-	طين عادي (Normal clay)	1.25-0.75
3-	ين فعّال (Active clay)	2.0-1.25
4-	طين عالي الفعالية (Highly active) (مثال البنتونايت)	2.0< 6.0≤

ويمكن تصنيف التربة بعد إيجاد حدود أتربرغ بواسطة المخطط الخاص الذي وضعه كازاغراند (Casagrande plasticity chart)، وهو ما سنأتي على ذكره لاحقاً عند الحديث عن طرق تصنيف التربة.

2-3-6 الوزن النوعي للتربة

(Specific Gravity of Soil):

جرى تعريف الوزن النوعي للتربة (الحبيبات الصلبة) بأنه النسبة بين كتلة الحبيبات الصلبة إلى وزن كمية من الماء تشغل نفس الحجم. ولا يشكل إيجاد الوزن النوعي للتربة أدنى صعوبة لو كانت تتكون من حبيبات متشابهة متجانسة، كالرمل النقي الذي يتكون من حبيبات الكوارتز مثلاً، ولكن التربة تتكون في الواقع من عدة أشكال من الحبيبات المعدنية (Mineral particles)، لكل منها وزنها النوعي، ومن هنا، فإن الذي تهدف إليه تجربة إيجاد الوزن النوعي للتربة، هو الوزن النوعي لهذا الخليط من الحبيبات ككل لا يتجزأ.

ويصادف القارئ للكتب الهندسية، وتلك المتعلقة منها بالتربة والمواد على وجه الخصوص، أكثر من مصطلح مرتبط بالوزن النوعي، كالوزن النوعي المطلق، والظاهري، والكلي بأشكاله، مما يسبب نوعاً من الخلط والتشويش. ولتوضيح هذه المصطلحات، نستعرض فيما يلي تعريفاتها:

الوزن النوعي المطلق (Absolute specific gravity)- وهو الوزن النوعي للمكونات المعدنية للتربة، ويقاس بعد سحق التربة وكشف كل الفراغات فيها.

الوزن النوعي الظاهري (Apparent specific gravity)- وهو الوزن النوعي لحبيبات التربة كما هي في الطبيعة.

الوزن النوعي الكلي (Bulk specific gravity) ويُقاس للحبيبات المشبعة بالماء مجففة السطح (Saturated surface dry) أي عندما تكون الفراغات مملوءة بالماء، وللحبيبات المبللة مجففة السطح (Wet surface dry) وذلك عندما تكون الفراغات غير ممتلئة تماماً بالماء، وكذلك للحبيبات المجففة بالفرن (Oven dry).

ويستعمل الوزن النوعي الكلي في حسابات الخرسانة ويتم تحديده عادة للركام المستعمل في الخلطات الخرسانية.

وأما الفائدة العملية لمعرفة الوزن النوعي لحبيبات التربة، فتكمن في استعمال قيمته في حساب نسبة الفراغات في التربة (Voids ratio) والمسامية (Porosity) ودرجة التشبع بالماء (Degree of saturation)، وكذلك في حسابات تجربة التدرج الحبيبي للتربة بالهيدروميتر.

وتتراوح القيمة العددية للوزن النوعي للتربة المتماسكة (غير العضوية) بين 2.68-2.72، وتبلغ حوالي 2.67 للتربة الرملية غير المتماسكة.

وسنعرض فيما يلي التجربة الأكثر شيوعاً لإيجاد الوزن النوعي للتربة باستعمال الدورق المدرج (البكنوميتر).

2-3-7 كثافة التربة

(Bulk Density of Soil) :

تعتبر كثافة التربة من أهم الخصائص التي يجري تحديدها لغرض استعمالها في عدّة مجالات مهمة في حسابات التربة والأساسات، منها على سبيل المثال:

1- حساب ضغط التربة على الجدران الاستنادية (Retaining walls).
2- دراسة اتزان المنحدرات الترابية (Slope stability analysis).
3- حسابات هبوط التربة (Settlement).
4- توزيع الاجهادات في التربة تحت القواعد (Stress distribution).
5- حساب حجوم أعمال الحفريات في التربة.

ويمكن إيجاد كثافة التربة عن طريق الفحوصات التي تجري في الموقع مباشرة، وتسمى بفحوصات الكثافة الحقلية (Field density tests)، أو عن طريق فحوصات بسيطة يمكن إجراؤها في المختبر. وسنتطرق هنا لتفصيل الفحوصات المخبرية للكثافة، على أن يجري العرض المفصل للفحوصات الحقلية في الباب المخصص لذلك (الباب التاسع).

2-3-8 التدرج الحبيبي للتربة

(Particle size distribution of soil) :

تتكون التربة من حبيبات ذات أحجام وقياسات مختلفة، تتراوح بين الأحجار التي تزيد أبعادها عن 20سنتمتراً، والمواد الطينية الناعمة، التي يكون قطر حبيباتها أقل من 0.002 ملمتر.

والمقصود بالتدرج الحبيبي للتربة، هو فرز الحبيبات ذات المقاساتالمتشابهة في العينة وا إيجاد نسبة كل منها إلى الوزن الكلي للعينة. ويجري التعبير عادة عن النسبة المئوية للمواد الأكثر نعومة من قياس معين (Percentage finer)، أو نسبة المواد التي تمر من منخل معين، كما سنرى فيما بعد.

وهناك طريقتان مختلفتان لإيجاد التدرج الحبيبي لعينات التربة، وهما طريقة التنخيل (الغربلة) (Sieving) وطريقة الترسيب (Sedimentation).

وتستعمل الطريقة الأولى ، أي طريقة التنخيلالإيجاد التدرج الحبيبي للتربة الحصو ّية والرملية (Gravel and sand size)، وذلك بتمرير عينة من التربة عبر سلسلة من المناخل (الغرابيل) القياسية (Standard sieves)، والتي تختلف في مقاسات فتحاتها، حيث توضع المناخل فوق بعضها بحيث يكون المنخل ذو الفتحات الأكبر في الأعلى، وتوضع فيه العينة، ثم يجري التنخيل بواسطة هزاز ميكانيكي (Mechanical shaker)، أو بواسطة اليد، لمدة من الوقت لا تقل عن عشر دقائق، تكون كافية لفرز الأحجام المختلفة من الحبيبات التي تحتويها العينة. وبعد انتهاء التنخيل يوزن الجزء المتبقي على كل منخل وتجري الحسابات لتحديد نسبة المتبقي (Percentage retained) ونسبة المار (Parentage passing) من كل منخل إلى الوزن الأصلي للعينة.

وتجدر الإشارة إلى أن قياس فتحات المناخل (Aperture size) يختلف باختلاف المواصفات، ويحتوي الملحق رقم (5) في نهاية هذا الكتاب على مقارنة بين المناخل المستعملة في كل من المقاييس الأمريكية (ASTM) والبريطانية (BS) والفرنسية (AFNOR) والألمانية (DIN)، على الرغم من أن الأكثر شيوعاً في الاستعمال، هي المناخل المطابقة للمواصفات الأمريكية والبريطانية.

وأما بالنسبة للتربة ناعمة التركيب من الطمي والطين، فإنه نظراً لنعومتها وعدم وجود مناخل ذات فتحات صغيرة (أصغر منخل قياسي متداول هو رقم200 ومقاس فتحاته 0.075ملمتراً)، يجري اللجوء إلى طرق الترسيب لدراسة تدرجها، وأشهرها باستعمال الهيدروميتر (Hydrometer)، وهو مصطلح يترجمه البعض إلى (المِ كثاف). وتكمن فحوى هذه الطريقة بإلقاء عينة من التربة المارة من المنخل رقم (200) في أنبوب ترسيب فيه محلول من الماء مع مادة هكساميتافوسفات الصوديوم (Sodium hexametaphosphate - $Na\ PO_3$) التي تمنع تلاصق الحبيبات. ويترك المحلول لفترة زمنية يجري خلالها أخذ عدة قراءات لكثافة المحلول، والتي يفترض أنها تقل كلما زادت نسبة الجزء المترسب من العينة. ويتم إيجاد حجم الحبيبات في هذه الطريقة باستعمال معادلة الفيزيائي الإنجليزي ج. ستوكس (G.Stokes)،

والتي تربط بين سرعة ترسب الحبيبات في السائل ومقاس هذه الحبيبات وكثافتها ولزوجة السائل (Viscosity).

ونشير هنا إلى أنه يجري أحياناً استعمال الطريقتين المذكورتين في آن معاً، وذلك عندما تحتوي التربة في تركيبها على مواد ناعمة، إضافة إلى المكونات الخشنة كالحصى والرمل، حيث يتم فصل العينة على المنخل رقم (200)، ويجري تنخيل الجزء المتبقي على هذا المنخل عبر سلسلة المناخل القياسية، ويدرس تدرج الجزء المار من هذا المنخل بواسطة الهيدروميتر أو غيره من طرق الترسيب.

ويتم تمثيل نتائج التدرج الحبيبي على منحنيات خاصة تسمى بمنحنيات التدرج الحبيبي (Particle size distribution curves) (شكل 3-6). وتكون قياسات الحبيبات على محور السينات لهذه المنحنيات، والنسبة المئوية للمواد الأنعم من كل قياس على محور الصادات.

ونشيرإلى أن هناك شكليْ ن من هذه المنحنيات. الأول، وتتدرج فيه المواد من الأنعم إلى الأخشن (على محور السينات)، من الشمال إلى اليمين، وهو المستعمل في الممارسة البريطانية، والثاني، وهو صورة معكوسة للأول، وتدرج المواد فيه يبدأ من اليمين، وهو المستعمل في الممارسة الأمريكية. وهي ملاحظة نوردها هنا، رغم عدم وجود أي فرق يذكر بين الشكلين من حيث المضمون، وذلك استكمالاً للفائدة.

وأما الضرورة العملية لمعرفة التدرج الحبيبي للتربة فتكمن في:

1- أن التدرج الحبيبي للتربة هو المفتاح الأول والأساسي لتصنيف التربة للأغراض الإنشائية (Soil classification for engineering purposes)، حيث تقسم التربة إلى أشكال مختلفة بحسب مقاسات الحبيبات التي تحتويها، ويساعد منحنى التدرج الحبيبي للتربة في تصنيفها إلى تربة منتظمة التركيب (Uniform) (أي تتكون من حبيبات متشابهة القياس)، أو جيدة التدرج (Well-graded) (تتوزع فيها مقاسات الحبيبات من الصغير إلى الوسط إلى الكبير)، أو سيئة التدرج (Poorly- graded) (لا تحتوي على قياسات وسطية، أي أنها تتركب من حبيبات كبيرة وصغيرة دون ما هو بينهما).

وهناك قيمتان يجري إيجادهما من منحنيات التدرج الحبيبي للتربة،

وتساعدان في تصنيف التربة، وهما معامل الانتظام (Uniformity coefficient):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (4-3)$$

ومعامل تجويف (تقعر) المنحنى (Concavity coefficient):

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}} \qquad (5-3)$$

حيث ترمز D_{10}، D_{30}، D_{60}، إلى قياسات الحبيبات التي تبلغ نسبة الأنعم منها في العينة 10 بالمئة، 30بالمئة و 60 بالمئة على التوالي. وتطلق على القياس D_{10}تسمية القياس الفعّال (Effective size).

2-وهناك استعمال مهم جداً للتدرج الحبيبي للتربة في الهندسة الجيوتقنية وأعمال الإنشاءات يمكن تلخيصه كما يلي:

(أ)اختيار مواد الردميات أو المواد المالئة (Fill material)، حيث تحدد المواصفات المختلفة حدوداً معينة للتدرج الحبيبي للمواد المستعملة لأغراض الردميات في أعمال السدود والمباني وغيرها.

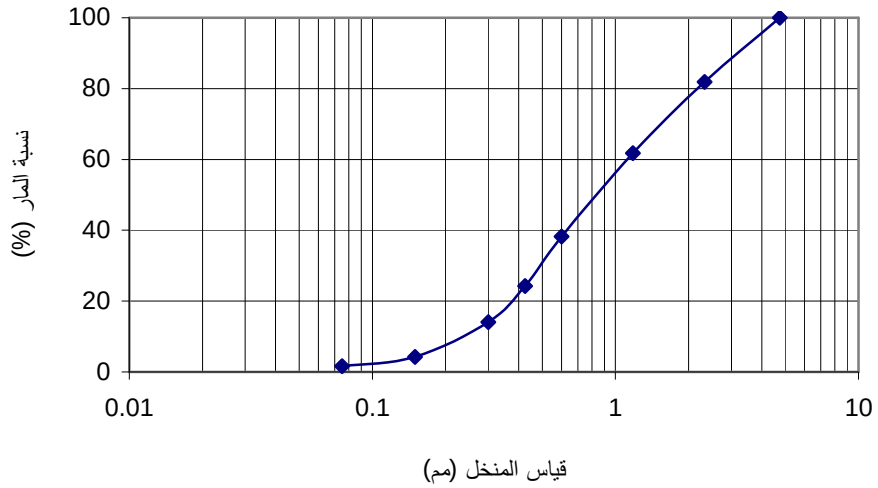
(ب)اختيار مواد الطبقات الترابية لأعمال الطرق، مثل طبقة ما تحت الأساس (Sub-base) والأساس (Base) وغيرها.

(ت)اختيار المواد المناسبة للعمل كمرشحات (Filters)،حيث يلزم أن يكون للمواد المستخدمة لهذا الغرض تدرج حبيبي محدد.

(ث)اختيار المواد المناسبة للاستعمال في الخلطات الخرسانية، كالرمل والركام (Fine and coarse aggregates) التي تحدد لها المواصفات مجالات التدرج الحبيبي المناسبة للخلطة الخرسانية المطلوبة.

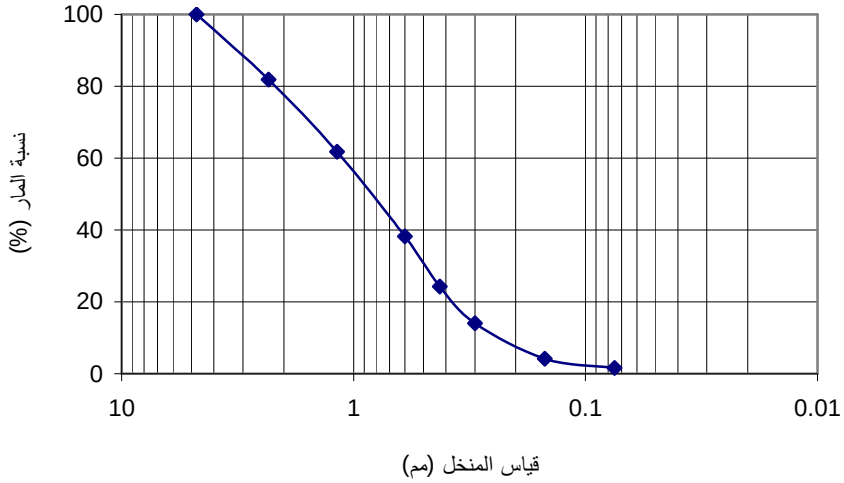
(ج)اختيار الطريقة الأنسب لأعمال التقوية والحقن الكيمائي للتربة (Grouting and chemical injection)، حيث يعتمد اختيار المواد ومدة الحقن على التدرج الحبيبي للتربة.

(ح)يُساعد معرفة التدرج الحبيبي للتربة في تقرير فاعلية تحسين خصائصها بواسطة الدمك (Compaction)،حيث تعتمد نسبة الدمك التي من الممكن بلوغها لنوع معين من التربة على التدرج الحبيبي لهذه التربة إلى حد كبير .



(أ)

(ب)



شكل (3-2)- منحنيات التدرج الحبيبي للتربة

أ.الشكل الشائع في الممارسة البريطانية (BS).

ب. الشكل الشائع في الممارسة الأمريكية (ASTM)

2-3-9 التدرج الحبيبي للتربة بطريقة الغسل

(Particle Size Distribution By Wet Sieving):

تستعمل هذه الطريقة للتنخيل عندما تحتوي عينة التربة على نسبة من الطين أو الطمي أو كليهما، والتي تكون عادة متماسكة الحبيبات ولا تذوب إلا بالغسل. وتستعمل الطريقة سواء كبرت نسبة المواد الناعمة في العينة قياساً إلى المكونات الخشنة، أو صغرت هذه النسبة في العينة.

2-3-10 القوام عند حد اللدونة (Consistency near plastic limit) :

تُزال من عينة التربة جميع الحبيبات المتبقية على منخل رقم (40)تُشكل عينة ذات حجم تقريبي يساوي مكعباً طول ضلعه 10ملليمترات من التربة الرطبة والمضاف إليها قليل من الماء إلى خيوط قطرها 3

ملمتر. ويتم تشكيل العينة بواسطة اليد على سطح أملس أو بين راحتي اليدين، عاد عجن وتحويل العينة إلى خيوط مما يترتب عليه نقص تدريجي في محتوى رطوبتها وتصلبها، وفي النهاية تفقد لدونتها، وتتفتت عندما يبلغ محتوى رطوبتها حد اللدونة. وكلما ازدادت متانة الخيوط (Toughness) عند اقتراب محتوى رطوبتها من حد اللدونة، وازدادت صلابة الكتلة عند تفتتها، كان ذلك دليلاً على احتوائها نسبة عالية من الطين. أما إذا أبدت اليغة ضعفاً عندما يكون محتوى رطوبتها مساوياً لحد اللدونة ونقصاً سريعاً في تماسك الكتل التي يقل محتوى رطوبتها عن حد اللدونة، فهذا دليل على أن العينة من الطين منخفض اللدونة (Low plastic clay) غير العضوي، أو مواد مثل الطين المحتوي على الكاؤولين (Kaolin).

ويلاحظ أن الطين المحتوى على كمية كبيرة من المواد العضوية يكون ضعيفاً وله ملمس اسفنجي عند حد اللدونة.

2-3-11 سرعة الترسب (تجربة الانتشار) (Dispersion test) :

تؤخذ عينة من التربة (حوالي 50-100غرام) وتوضع في أنبوب زجاجي أسطواني (Jar) بداخله ماء. إذا كانت التربة من الطمي، فإن حبيباتها تترسب في قعر الأنبوب خلال 15 دقيقة إلى ساعة. وأما إذا كانت الحبيبات الطينية هي الغالبة فيها، فإن ترسبها يستغرق ساعات طوالاً أو حتى بعض الأيام. ويمكن استعمال هذا الفحص للكشف عن الرمل، إذ لا تستغرق حبيباته أكثر من دقيقتين لتترسب في قعر الأنبوب الزجاجي.

ويمكن وصف التربة المتماسكة حسب قوامها (Consistency) بأنها قاسية (Hard) إذا تشوهت بسهولة بظفر إبهام اليد، وصلدة جداً (Very stiff) إذا كانت سهلة التشوه بظفر الإبهام لكنها صعبة الاختراق، وصلدة (Stiff) إذا تشوهت بسهولة بظفر الإبهام، وراسخة (Medium stiff) إذا أمكن اختراقها عدة سنتمترات بالإبهام ببذل جهد متوسط، أما الطرية (Soft) فهي التي يمكن اختراقها بالإبهام عدة سنتمترات بسهولة، والطرية جداً (Very soft) التي يمكن اختراقها عدة سنتمترات بقبضة اليد بسهولة.

2-3-12 اختبارات القص للتربة:

1- <u>اختبار القص المباشر</u> (Direct shear test) ويتم اجراؤه داخل ما يسمى بـ صندوق القص (Shear box) حيث تُؤخذ ثلاث عينات متشابهة، ويتم تعريض كل عينة لحملٍ عمودي مختلف ($\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$)، وبعدها يتم تعريض كل عينة لقوة قص أفقية (τ_3، τ_1،τ_2)، وتكون نتيجة الفحص رسم المنحنى ($\sigma \rightarrow \tau$) (شكل 4-4)، ومنه يتم ايجاد قيم زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) والتماسك (C) .

<u>ملاحظة</u>: معروف أن التربة الطينية فيها تماسك أقوى بين حبيباتها (C) واحتكاك داخلي أقل (ϕ)، والتربة الرملية والحصوية فيها احتكاك أقوى بين الحبيبات وتماسك أقل. وفي الظروف المثالية للتربة الطينية المتماسكة تكون ($\phi=0$)، وللتربة الرملية والحصوية ($C=0$)، ولهذا يكون الخط الممثل لمعادلة كولوم (4-1) موازياً لمور السينات في حالة الطين (شكل 4-5 أ)، ومنطلقاً من الصفر في حالة الرمل (شكل 4-5 ب).

2- اختبار القص ثلاثي المحاور (Triaxial shear test) – ويتم فيه تعريض ثلاث عينات اسطوانية الشكل (طولها ضعف قطرها) الى ضغط من كل الجهات داخل وعاء اسطواني محكم يسمى خلية (Cell)، وذلك من خلال ضخ ماء داخل الخلية ليحيط بالعينة التي تكون محفوظة داخل غشاء مطاطي (Rubber membrane)، ويكون هذا الضغط ثابتاً ويرمز له (σ_3). بعد ذلك، ومع وجود الضغط الثابت (σ_3) حول العينة، يتم التأثير بحملٍ عمودي خارجي متصاعد تدريجياً حتى انهيار العينة. ويبين الشكل (4-6) مبدأ القص ثلاثي المحاور /7/.

ويتم في نهاية هذا الفحص رسم المنحنى ($\sigma \rightarrow \tau$) الموضح في الشكل (4-7)، وذلك برسم دوائر مور (Mohr circles) لكل عينة مثلاً للعينة الاولى تُثَبَّت قيم الضغط (σ_3) و (σ_1) على المحور الافقي (σ) ومن منتصف المسافة ($\sigma_1 - \sigma_3$) يُرسم نصف الدائرة الأول، وهكذا. وبعد رسم دوائر مور، يتم توصيل مماس بينها كما هو في الشكل (4-7) يكون هو الممثل لمعادلة الخط المستقيم {معادلة كولوم (104)}.

ونشير هنا الى تعدد طرق اجراء الفحص في الجهاز ثلاثي المحاور، أما الاشكال الثلاثة الرئيسية للفحص فهي:

أ – الفحص على عينة غير متضاغطة-مُصَرَّفة (Unconsolidated-Undrained UU) وفيه يتم تعريض العينة داخل خلية الجهاز لضغط من كل الجوانب (σ_3)، ثم يتم التأثير بالضغط الخارجي ($\sigma_1 - \sigma_3$) فوراً دون السماح بحصول تصريف للمياه (Drainage) من العينة.

ت- الفحص على عينة متضاغطة-مُصَرَّفة (Consolidated-Undrained CU) وفيه يتم السماح بحصول التصريف في العينة أثناء تعرضها للحمل من كل الجوانب (σ_3)، الذي يستمر تأثيره على العينة حتى إتمام تضاغطها. بعدها يتم التأثير بالضغط الخارجي ($\sigma_1 - \sigma_3$) دون السماح بحدوث التصريف.

ث- الفحص على عينة متضاغطة-مُصَرَّفة (Consolidated-Drained CD) وفيه يتم السماح بحصول التصريف من العينة أثناء تعريضها للحمل من كل الجوانب (σ_3)، وكذلك أثناء تعريض العينة للضغط الخارجي ($\sigma_1 - \sigma_3$) بعد انتهاء تضاغطها.

3- فحص الانضغاط اللامحصور (Unconfined compression test) ويتم خلاله تعريض عينة اسطوانية الشكل (طولها ضعف قطرها) لضغط محوري بشكل متصاعد تدريجياً حتى انهيار العينة. وحسب الشكل (4-6)، وحيث أن الضغط ($\sigma_3 = 0$)، فإن الضغط الذي يحدث عنده الانهيار، ويرمز له بـ (q_u) يكون مساوياً (σ_1):

$$q_u = \sigma_1$$

ويكون الخط الذي يمثل معادلة كولوم موازياً للمحور الافقي (σ)، ومن الشكل (4-8) نستنتج أن:

$$C = \frac{q_u}{2} \quad (4-4)$$

أي أن قوة التماسك بين حبيبات التربة (الطينية) هي نصف قيمة مقاومة الضغط اللامحصور لها.

ونشير أخيراً ،الى أن فحص القص المباشر للتربة كان منتشراً بشكل واسع، إلا أن التقدم الذي طرأ على علم ميكانيكا التربة قد أدى الى تراجع شعبية هذا الفحص، وذلك للأسباب التي يلخصها ج. بولز (J. Bowles) كما يلي /8/ :

1- تغيّر مساحة العينة اثناء الفحص
2- سطح الانهيار الحقيقي ليس مستوياً كما كان التصور عند تصميم صندو القص، واجهاد القص لا يتوزع بشكل منتظم على سطح الانهيار كما كان مفترضاً
3- العينات المستعملة في الفحص صغيرة الابعاد مما يزيد من نسبة حصول الاخطاء عند تحضيرها،
4- الحجم المحدود للعينة يحول دون القيام بدراسات تفصيلية لضغط الماء المسامي (Pore-water pressure) أثناء الفحص،
5- لا يمكن ايجاد قيم معامل المرونة (Modulus of elasticity) ومعامل بواسون (Poisson's ratio) من هذا الفحص،
6- تطوير جهاز المحاور الثلاثة (Triaxial apparatus).

إلا أن انتشار هذا الفحص قد عاد مرة أخرى للأسباب التالية، كما يوردها ج.بولز نفسه:

1- وجود صعوبة نسبية في اجراء وتفسير نتائج فحص القص ثلاثي المحاور، وخصوصاً عند قياس ضغط الماء المسامي،
2- لا يأخذ حجم العينة المستعملة وقتاً طويلاً لعمل فحص القص السريع بعد التضاغط (Consolidated-Undrained CU)، وتجربة القص البطيء بعد التضاغط (Consolidated-Drained CD)، لأن الزمن اللازم لتصريف المياه قليل نسبياً ، حتى بالنسبة للمواد ذات معامل النفاذية القليل،
3- إدخال صندوق القص المربع الشكل الذي يُمكّن من أخذ تقليل مساحة العينة عند الفحص بعين الاعتبار،
4- جهاز القص المباشر مناسب أكثر لأجهزة القراءة الالكترونية، مما لا يتطلب بقاء الفاحص الى جانب الجهاز أثناء الفحص،
5- التقارب الموجود بين قيم (C) و (ϕ) الناتجة من فحص القص المباشر وتلك الناتجة من فحص القص ثلاثي المحاور.

2-3-12-1 فحص التربة المتماسكة (الطينية):

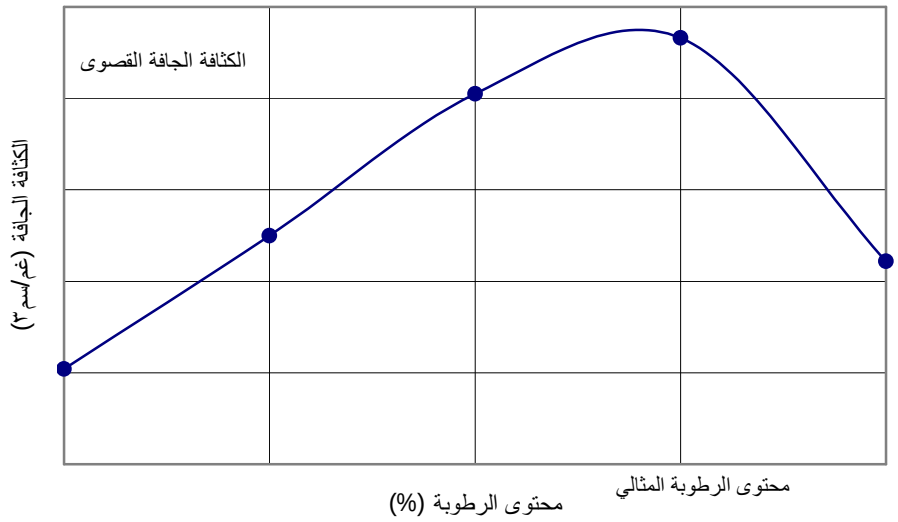
يجري فحص القص للتربة الطينية المتماسكة في صندوق القص المباشر بنفس الطريقة التي يجري للتربة غير المتماسكة، باختلاف بسيط يتمثل في أن العينة في هذه الحالة تكون سليمة التركيب (Undisturbed) ويجري قطعها من عينة أكبر وا ٍدخالها في صندوق القص. ويتم هنا انهاء تضاغط العينة (Consolidation) تحت تأثير الحمل العمودي قبل القيام بفصل جزئي ْ صندوق القص (خطوة رقم 5)، وذلك لضمان عدم خروج العينة الطري ّة من الصندوق عند القيام بعملية الفصل.

2-3-12-2 فحص القص بالريشة (Vane Shear Test):

ي ُلجأ لهذا الفحص الحقلي السريع لقياس مقاومة القص (Shear strength) للتربة الطينية ذات القوام الطري (Soft) ولا يمكن الاعتداد بنتائجه للأشكال الأخر ى من التربة، وكذلك عندما يكون الطين محتوياً على رمل (Sand) أو طمي (Silt). ولهذا السبب، فهذا الفحص محدود الاستعمال وغير منتشر في بلادنا العربية، بينما هو منتشر أكثر في أوروبا (خصوصاً في بريطانيا والدول الاسكندنافية) والولايات المتحدة الأمريكية. وسنعرض فيما يلي فكرة هذا الفحص وحسابات نتائجه باختصار.

2-3-13 فحوصات دمك التربة (soil compaction test) :

تهدف فحوصات الدمك التي تجري للتربة في المختبر إلى معرفة درجة الدمك القصوى الممكنة لها. ويتم الفحص عادة لإيجاد محتوى الرطوبة للتربة، الذي تحصل عنده (بعد دمكها) على أقصى كثافة، ويسمى محتوى الرطوبة هذا بمحتوى الرطوبة المثالي (Optimum moisture content - OMC)، والكثافة الجافة عنده بالكثافة الجافة القصوى (Maximum dry density - MDD)، وتكون نتيجة الفحص الحصول على منحنى العلاقة بين محتوى الرطوبة للتربة وكثافتها الجافة (شكل3-3).



شكل (3-3) – منحنى العلاقة بين رطوبة التربة وكثافتها الجافة

وعندما تكون الكثافة الجافة القصوى للتربة معروفة (كثافة المختبر)، يصبح من السهل إيجاد نسبة دمك التربة في الموقع (Degree of compaction)، وذلك بإيجاد الكثافة الجافة للتربة في الموقع، بعد دمكها، ونسبتها إلى الكثافة الجافة القصوى.

$$\text{نسبة الدمك} = \frac{\text{الكثافة الجافة للتربة في الموقع}}{\text{الكثافة الجافة القصوى (كثافة المختبر)}} \times 100\%$$

وتكون هذه النسبة واضحة ومحددة في المواصفات الخاصة بكل مشروع، وتتراوح بين90 و 100 بالمئة حسب المكان الذي يتم دمكه.

وأما فحص الدمك في المختبر، فيتلخص بدمك التربة على طبقات عند نسب مختلفة من محتوى الرطوبة (صاعدياً) داخل قوالب معدنية أسطوانية (Moulds) باستخدام مطارق خاصة (Rammers)، وا يجاد الكثافة الجافة للتربة عند كل محتوى رطوبة تمهيداً لرسم المنحنى الخاص (شكل 7-1) وبخصوص الأدوات المستعملة للفحص، فان المهندس ر. بروكتور (R.Proctor) الذي كان أول من ابتكر الفحص سنة 1933 في الولايات المتحدة الأمريكية، قد أجراه في قالب أسطواني قطره الداخلي 4 انش وحجمه 1/30 قدم مكعب، وباستعمال مطرقة حديدية وزنها 5.5 باوند (2.5 كيلو غرام). والفحص بهذه الأدوات اصبح يعرف بفحص بروكتور (Proctor test)،أو فحص الدمك القياسي (Standard compaction test)،وذلك لتمييزه عن الفحص الآخر المشابه، والذي يدعى بفحص الدمك المعدَل (Modified compaction test) ، والذي يتم إجراؤه باستعمال مطرقة وزنها 10 باوند (4.5 كيلو غرام)، أي باستعمال جهد مضاعف تقريباً .

وقد جاء تعديل الفحص أثناء وبعد الحرب العالمية الثانية خلال إنشاء المطارات العسكرية، حيث دعت الحاجة في ذلك الوقت للحصول على كثافة أكبر تحت مدارج الطائرات العسكرية من تلك التي يعطيها فحص الدمك القياسي.

وهناك تمايز في الأدوات التي تستعمل لإجراء شكلي الفحص حسب المواصفات المختلفة نوردها ملخصة في الجدولين أدناه (جدول 7-1 وجدول 7-2) بشكل يساعد على معرفة الأدوات التي تلزم لإجراء فحص الدمك القياسي وفحص الدمك المعدل حسب المواصفات البريطانية (British Standard – BS 1377)، والأمريكية، وأهمها مواصفات جمعية الفحوصات والمواد (ASTM) وجمعية الطرق (AASHTO) .

جدول(3-5) - مقارنة بين الأدوات المستعملة في فحوصات الدمك حسب المواصفات البريطانية (BS 1377)

الفحص	أبعاد القالب (سم)	حجم القالب (سم3)	وزن المطرقه (كغم)	عدد الطبقات	عدد الضربات
الدمك القياسي	قطر داخلي	1000	2.5	3	27

(بروكتور) (BS 1377 – Test No.12)	105ملم ارتفاع 115.5ملم				
الدمك المعدّل (BS 1377 – Test No.13)	قطر داخلي 105ملم ارتفاع 115.5ملم	1000	4.5	5	27

- يلاحظ استعمال نفس القالب في الفصيْن، وكذلك نفس عدد الضربات التي يجري التأثير بها على كل طبقة من التربة أثناء دمكها في القالب. والفرق هو في وزن المطرقة وعدد طبقات التربة في القالب أثناء الدمك .

جدول (3-6) مقارنة بين الأدوات المستعملة في فحوصات الدمك حسب المواصفات الأمريكية (ASTM) و(AASHTO)

الفحص	أبعاد القالب انش (مم)	حجم القالب (سم3)	وزن المطرقة (كغم)	عدد *الطبقات*	عدد الضربات	ملاحظات
الدمك القياسي (بروكتور) (ASTM D- 698) (AASHTO T- 90)	4 (102)	944	2.5	3	25	الطريقة (A)أو(C)
	6(152)	2124	2.5	3	56	الطريقة (B)أو (D)
الدمك المعدّل (ASTM D-1557) (AASHT T- 180)	4(102)	944	4.54	5	25	الطريقة (A)أو(C)
	6(152)	2124	4.54	5	56	الطريقة (B)أو(D)

- في الطريقتين (A) و (B) تكون العينة المستعملة في الفحص من المواد المارة في المنخل رقم 4 (4.75مم)، بينما تكون العينة في الطريقتين(C) و(D) من المواد المارة من المنخل رقم 3/4 انش.

3-14 اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا

(California Bearing Ratio-CBR Test) :

يعتبر إختبار نسبة تحمل كاليفورنيا واحداً من الإختبارت الهامة التي تجري للتربة في هندسة الطرق.

ويرمي هذا الإختبار إلى معرفة قابلية التربة لأن تكون طبقة أساس للطريق (Base) أو أساس مساعد (Sub-base) أو غيرها من الطبقات التي تتكون منها أي طريق.

وقد جاءت تسمية هذا الإختبار نسبة إلى قسم الطرق في ولاية كاليفورنيا الأمريكية (California Division of highways)، الذي كان أول من أطلق هذا الإختبار سنة 1929.

ويمكن تلخيص مبدأ هذا الإختبار كما يلي:

يتم غرز أداة قياسية أسطوانية الشكل (مكبس) في التربة وبسرعة محددة، ومن خلال العلاقة بين قوة الغرز أو مقاومة الغرز وقيمة الغرز (المسافة) (Load-Penetration relationship) يمكن إيجاد قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR).

وتعّرف قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR-value) بأنها النسبة بين الأحمال اللازمة لغرز المكبس الأسطواني (مساحته 3 انش مربع) مسافة معينة داخل عينة مدموكة من التربة لها رطوبة وكثافة

معينتين، وبين الأحمال القياسية اللازمة لغرز المكبس لنفس العمق في عينة قياسية من الأحجار المكسرة (Crushed stone)، أي أن:

$$\text{نسبة تحمل كاليفورنيا} = \frac{\text{الحمل الذي لزم لإحداث قيمة الغرز في عينة من مادة قياسية}}{\text{الحمل القياسي لإحداث هذا الغرز}} \times 100\%$$

وأما قيمة الأحمال القياسية (Standard loads) لقيم الغرز المختلفة فهي موضحة في الجدول (8-1) أدناه .

وبما أن قيمة تحمل كاليفورنيا تلزم للتربة المدموكة، فإن الفحص في المختبر يجري على عينة التربة بعد إيصالها إلى نسبة الدمك المطلوبة، أي عندما تكون لها كثافة مشابهة لكثافة التربة المطلوبة بعد دمكها، وكذلك، عند نفس محتوى الرطوبة (محتوى الرطوبة المثالي). ولهذا، فإن فحص الدمك لعينة معينة من التربة يسبق فحص نسبة تحمل كاليفورنيا لها، لأنه يعطي محتوى الرطوبة المثالي(Optimum moisture content) والكثافة الجافة القصوى(Maximum dry density) للتربة.

ويتم تحضير العينات لفحص نسبة تحمل كاليفورنيا داخل قوالب معدنية أسطوانية شبيهة بتلك التي يجري فيها تحضير العينات لفحص الدمك (مقاسات القالب حسب مواصفات الجمعية الأمريكية للطرق AASHTO هي قطر مساو لـ 6 انش وارتفاع 7 انش)، ويمكن استعمال القوالب المستعملة في فحص الدمك لتحضير عينة فحص نسبة تحمل كاليفورنيا، وذلك بدمك التربة حسب عدد الطبقات والضربات وباستعمال المطارق المختلفة كما هو موضح في الجدول (8-2) أدناه.

جدول (3-7) العلاقة بين الأحمال القياسية وقيم الغرز في فحص نسبة تحمل كاليفورنيا

الغرز		الحمل		الاجهاد	
ملمتر	انش	كيلونيوتن	باوند	(باوند/انش مربع)	كيلو باسكال
2		11.50			
2.5	(0.1)	13.24	(3000)	(1000)	6895
4		17.60			
5	(0.2)	19.96	(4500)	(1500)	10324
6		22.20			
8		26.30			
10		30.30			
12		33.50			

جدول (3-8) طرق تحضير العينات لفحص نسبة تحمل كاليفورنيا

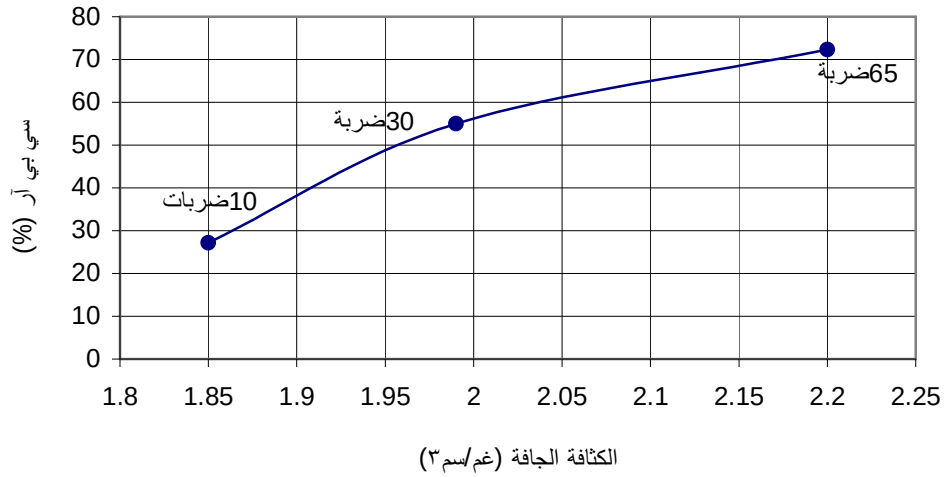
نـوع الـدمـك	المطرقة المستعملة	عدد الطبقات	عدد الضربات
1- الدمك القياسي حسب المواصفات البريطانية (BS 1377- Test No. 12)	2.5كغم	3	62
2- دمك المعدّل حسب المواصفات البريطانية (BS 1377- Test No. 13)	4.5كغم	5	62
3- الدمك القياسي حسب المواصفات الأمريكية (AASHTO T-90) (ASTM D-698)	5.5 باوند	3	56
4- دمك المعدّل حسب المواصفات الأمريكية (AASHTO T-180) (ASTM D-1557)	10.0باوند	5	56

ونشير هنا، إلى أنه وبعد تحضير عينات التربة داخل القوالب يجري غمرها في الماء (Soaking) لمدة 96 ساعة حسب مواصفات (AASHTO) وذلك للتربة التي تحتوي نسبة من الطين، بينما من الممكن أن تقتصر هذه الفترة على 24 ساعة للتربة الحصوية التي يرشح منها الماء بشكل أسرع. ويجري أثناء الغمر قياس قابلية العينة للانتفاخ (Swelling)، حيث يمكن إيجاد نسبة الانتفاخ للعينة في قالب (AASHTO) القياسي من العلاقة:

$$\text{نسبة الانتفاخ} = \frac{\text{التغيير في الطول (انش) خلال الغمر}}{4.584 \text{ انش}} \times 100\%$$

ويقتصر غمر العينات في الماء على المواصفات الأمريكية لهذا الفحص، فيما تخلو المواصفات البريطانية من هذه الخطوة.

كما نشير كذلك، إلى أنه يتم أحياناً تحضير ثلاثة قوالب من العينة الواحدةمحضّرة باستعمال جهد دمك مختلف لكل منها، لدراسة سلوكها عند كثافات مختلفة، بحيث تدمك القوالب على طبقات كما هو في الجدول (3-8)، ولكن باستعمال عدد (10) ضربات لكل طبقة لأحد القوالب، و(30) ضربة لكل طبقة للقالب الثاني و(65) ضربة لكل طبقة للقالب الثالث. ويمكن بعد إيجاد نسبة كاليفورنيا لكل قالب رسم علاقة بين الكثافة الجافة وقيمة نسبة تحمل كاليفورنيا للعينة الموجودة فيه كما هو موضح في الشكل (3-4) أدناه.



شكل (3-4) – مثال للعلاقة بين الكثافة الجافة للتربة ونسبة تحمل كاليفورنيا

وأخيراً، نشير إلى القيمة العملية لهذا الاختبار، فهو:

(1) يُساعد في الحكم على قابلية عمل طبقة التربة كطبقة أساس أو أساس مساعد في الطريق، والجدول (3-8) من المرجع /8/ يوضح ذلك.

(2) يُساعد في تصميم سُمك رصفة الطريق (Pavement thickness)، وتوجد لهذا الغرض منحنيات خاصة. ونورد هنا على سبيل المثال منحنيات سلاح المهندسين الأمريكي(Corps of Engineers) للعلاقة بين قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا وسُمك رصفة الطريق (شكل 8-2)، والمنحنيات مقتبسة من المرجع /19/.

جدول (3-9) تقييم نتائج اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا

قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا (%)	التقدير	الاستعمال	تصنيف التربة	
			حسب النظام الموحد (USCS)	حسب نظام (AASHTO)
3-0	ضعيف جداً	طبقة التأسيس (Subgrade)	OH,CH, MH,OL	A5, A6, A7
7-3	ضعيف إلى معتدل	طبقة التأسيس	OH,CH, MH,OL	A4, A5, A6, A7
20-7	معتدل	أساس مساعد (Sub-base)	OH, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7

50-20	جيد	أساس (Base course) أساس مساعد	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A-1-b, A-2-5, A3, A-2-6
50<	ممتاز	أساس	GW, GM	A-1-a, A-2-4, A4

وفي الجدول التالي (8-4) نورد قيم نسبة تحمل كاليفورنيا لطبقات الطرق المختلفة حسب متطلبات مواصفات أعمال الطرق في فلسطين والاردن، حيث يغلب استعمال نواتج الكسارات من الحجر الكلسي الطري إلى متوسط القساوة (Soft to medium hard limestone) في طبقات الأساس والأساس المساعد.

جدول (3-10) المواصفات المطلوبة لنسبة تحمل كاليفورنيا

لطبقات الطرق في فلسطين والاردن

الطبقة	نسبة كاليفورنيا (%)
طبقة التأسيس (Subgrade)	8 حداً أدنى
أساس مساعد (Sub-base course)	40 حداً أدنى
أساس (Base course)	80 حداً أدنى

الفصل الرابع(طرق تثبيت التربة):

2-4-1مقدمة غبار فرن الإسمنت :

هو مادة مسحوقة مماثلة في المظهر للاسمنت البورتلاندي ، ويمكن تصنيف الأتربة على أنها تنتمي إلى واحدة من أربع فئات، اعتمادا على العملية المستخدمة في الفرن وطريقة الفصل و درجته في نظام جمع الغبار [كولينز وايمري 1983].

هناك نوعان من أفران عمليات الاسمنت : قمائن العملية الرطب ، التي تقبل المواد العلفية في شكل الطين ، وقمائن العملية الجافة ، التي تقبل تغذية مواد في شكل الأرض الجافة و يمكن في كل عملية جمع الغبار بطريقتين:

(1) يمكن فصل جزء من الغبار، ويعاد إلى الفرن بنظام جمع الغبار الأقرب إلى الفرن (على سبيل المثال، الإعصار) .

(2) الكمية الإجمالية من الغبار الناتج يمكن إعادة تدويرها أو التخلص منها ، ويتم إنتاج كميات كبيرة من الغبار في قمائن الأسمنت أثناء تصنيع الكلنكر بواسطة العملية الجافة ، و الذي يحتوي خليط من العلف الخام وكذلك مواد الكلس مع بعض الأملاح المتقلبة ، وهو مستمد من نفس الأسمنت البورتلاندي الذي لم يتم حرقه بشكل كامل، لذا فإنه يختلف كيميائيا ، و من الممكن تقنيا إدخال معظم تقنيات التصنيع الحديثة مرة أخرى في دورة صنع الكلنكر، ومع ذلك، لا يتم ذلك بسبب القيود المفروضة على المحتويات القلوية والكلوريد في الأسمنت.

وقدرت صناعة الاسمنت في المملكة المتحدة أن أكثر من 200،000 طن سنويا من مساحة المكب فائضة في عملية صنع الكلنكر يمكن إنقاذها إذا كان يمكن إعادة تدويرها ، أو إذا كانت هنالك استخدامات بديلة يمكن العثور عليها [أيدين و تري فور 1995] ، يتم إنتاج حوالي 15 مليون طن من مخلفات الأسمنت سنويا من قبل صناعة الاسمنت الأمريكية [جمعية الاسمنت البورتلاندي 1992] ، أي أن مصنع للاسمنت متوسطة الحجم قد ينتج ما يصل إلى 30،000 طن سنويا. على أساس تحليل البيانات القائمة، بما في ذلك البيانات التي تم جمعها من قبل جمعية الاسمنت البورتلاندي من مشغلي مرافق الاسمنت.

2-4-2 التثبيت الكيميائي التربة:

هو طريقة لتحسين الخواص الهندسية للتربة وذلك بإضافة مواد كيميائية أو مواد أخرى لتحسين التربة الموجودة ، هذه التقنية عموما فعالة من حيث التكلفة : على سبيل المثال فإن تكلفة النقل و تجهيز المواد المضافة مثل الاسمنت أو الجير لعلاج التربة ربما تكون أكثر اقتصادا.

يمكن أن تكون الإضافات ميكانيكية ، وهذا يكون بإضافة تربة تحسن من الخصائص الهندسية للتربة الأم ، يمكن أيضا أن تكون الإضافات كيميائية ، وهذا يعني أن المادة المضافة تتفاعل مع أو تغير من الخصائص الكيميائية للتربة ، وبالتالي رفع مستوى الخصائص الهندسية.

وضع نوع خاطئ أو مقدار خاطئ من الإضافات - أو دمج غير صحيح للمادة المضافة إلى التربة - يمكن أن يكون له نتائج مدمرة على نجاح المشروع ، لذلك من أجل تنفيذ هذه التقنية بشكل صحيح يجب إتباع الآتي :

1- أن تكون هنالك فكرة واضحة عن النتيجة المرجوة.

2- فهم من نوع الإضافات للتربة وخصائصها في الموقع.

3- معرفة استخدام المادة المضافة وكيفية تفاعلها مع التربة و البيئة المحيطة.

4- فهم وسائل إدماج (اختلاط) المواد المضافة .

5- فهم كيفية تكوين التربة الناتجة .

2-4-2-1 الجمع بين المواد المضافة مع التربة :

وعادة ما يتم القيام به مع مختلف الآلات ، الطريقة المستخدمة عادة تستند على ثلاثة عوامل هي الأجهزة المتوفرة، و الموقع (الحضر أو الريف)، والإضافات التي يتم استخدامها ، و يجب أن يكون الخلط متجانس بقدر الإمكان .

أكثر طريقة اقتصادية وذات وقت فعال هي استخدام خلاط دوار، وهو آلة كبيرة تضم الإضافات مع التربة تلك التي توضع في غرفة خلط كبيرة مجهزةللدور ان و مصممة لتفريق وخلط المواد ، فهي قادرة على تقديم إضافات بشكل موحد ،ويستخدم الماء في حين تفكك التربة للوصول لدرجة التجانس الأمثل ، الخلاطات الدوارة تفعل الاختلاط في كل مكان ، و هي منقطعة النظير في الإنتاج من الطرق الأخرى .

2-4-2-2 الخلط باستخدام خلاط الصلصال (pug mill) :

يتم استخدامه بالنسبة لبعض التطبيقات التي تحتاج إلى مزيد من الدقة ،هو أساساً غرفة خلط كبيرة مشابهة لخلاط الأسمنت ، يتم قياس تدرج الركام والإضافات وعادة المياه ومن ثم تطبيقها على سمك موحد ، يتم الإنتاج بجودة عالية ولكن بتكلفة أعلى وسرعة أبطأ ، ويتم خلط بالشفرة مع استخدام الممهدة ، خلط الشفرة ليس فعالاً تقريباً مثل الأنظمة التي سبق وصفها ، أساسا يتم وضع المادة المضافة في الشفرة في صفوف لتختلط المادة المضافة مع التربة في سلسلة و من ثم تراجع الإجراءات ، وتستخدم أجهزة أخرى مماثلة للخلط كما تستخدم أيضا الخادشات و المحاريث والأقراص ، لذا فمن الصعب جدا السيطرة بشكل موحد على خلط النسب المئوية .

2-4-2-3 الإضافات :

هناك أنواع كثيرة من المواد المضافة المتاحة ، ليست كل الإضافات تعمل لجميع أنواع التربة ، و كل مادة مضافة تعمل بشكل مختلف تماما مع أنواع مختلفة من التربة ، عموما الإضافات يمكن أن تستخدم لتكون بمثابة عوامل مؤثرة مثلا تقليل تأثير الرطوبة و زيادة كثافة التربة أو تحييد الآثار الضارة للمادة في التربة.

وفيما يلي بعض من معظم الإضافات المستخدمة على نطاق واسع وتطبيقاتها :

2-4-2-3-1 الأسمنت البورتلاندي :

الأسمنت البورتلاندي هو الإضافة التي يمكن استخدامها للتربة لتعديل (لتحسين نوعية التربة) أو تثبيت التربة (لتحويل التربة إلى كتلة الاسمنت الصلبة) ، عادة ما يقارب جميع أنواع التربة يمكن أن تستفيد من القوة التي يكسبها تثبيت الأسمنت وقد وقع على أفضل النتائج عند استخدامه مع تربة جيدة التدرج .

رد فعل الاسمنت لا يتوقف على معادن التربة، والدور الرئيسي هو رد فعلها مع المياه التي قد تكون متاحة في أي تربة هذا يمكن أن يكون السبب في أن يستخدم الاسمنت لتحقيق الاستقرار في مجموعة واسعة من التربة.

تتوفر في السوق أنواع عديدة من الأسمنت و هي الأسمنت البورتلاندي العادي، والاسمنت المقاوم للكبريتات والأسمنت ذو الألومينا عالية ، عادة اختيار الاسمنت يعتمد على نوع التربة المراد علاجها والقوة النهائية المرجوة.

عملية الترطيب هي عملية بموجبها يحصل رد فعل الاسمنت، وتبدأ العملية عندما يتم خلط الأسمنت مع الماء والمكونات الأخرى لتطبيق المطلوب مما يؤدى إلى التصلب؛ يسير الماء ببطئ من و وسط حبيبات الأسمنت فتحدث مجموعة معقدة من التفاعلات الكيميائية و لكنها لا تغير من خواص التربة ، و تتأثر قوة التربة الناتجة بالآتي :

الشوائب ، نسبة الماء للأسمنت ، المحتوي الرطوبي ، سطح الخليط ، المواد المضافة .

اعتمادا على الأثر النهائي على إعداد وزيادة قوة الاسمنت قد تختلف التربة ، ولذلك ينبغي أن يؤخذ هذا في الاعتبار أثناء تصميم مزيج من أجل تحقيق القوة المرجوة.

المواد المتوفرة في التربة تستقر لإنتاج مزيد من المواد الأسمنتية (شيروود، 1993). عادة تكون كمية الاسمنت المستخدمة صغيرة ولكنها كافية لتحسين الخواص الهندسية للتربة وزيادة تحسين تبادل الأيونات الموجبة من الطين ، استخدام الأسمنت لتثبيت التربة له الخصائص التالية :

خفض التماسك (اللدونة) ، زيادة القوة ، زيادة حجم الانخفاض أو الانضغاطية

2-4-2-3-2 الجير الحي / الجير المطفأ :

الجير هو الإضافة الكيماوية التي تم استخدامها كعامل استقرار في التربة لعدة قرون ، وقد أظهرت التجربة أن الجير سيكون له رد فعل جيد مع الوسط المعتدل ، و الحبيبات في التربة الطينية ، الفائدة الرئيسية من استخدام الجير هو الحد من لدونة التربة من خلال تقليل المحتوى المائي للتربة فإنها تصبح أكثر جمودا ، كما ويقلل من قدرة التربة على التضخم ، و هو من المهم جدا لتحقيق التدرج السليم.

يصف تعديل الجير زيادة قدرة تبادل الأيونات الموجبة بدلا من تدعيم تأثير رد فعل المواد البوزولانية (شيروود، 1993). في التربة وجزيئات الطين يحول الجير الطين إلى جسيمات مثل الإبر المتشابكة ، التربة الطينية تصير أكثر جفافا وأقل عرضة للتغيرات في المحتوى المائي (روجر وآخرون، 1993).

استقرار الجير قد يشير إلى رد فعل في المواد البوزولانية التي تتفاعل مع الجير في وجود الماء لإنتاج المركبات الأسمنتية و الجير رطب ، الجير يمكن أن يستخدم أيضا في ظروف التربة الجافة حيث قد تكون هناك حاجة للمياه لتحقيق الضغط الفعال (هيكس) 2002.

مزايا الجير العادي على الجير المطفأ :

به محتوى أعلى للجير الحر لكل وحدة كتلة ، أكثر كثافة من الجير المطفأ (مطلوب أقل مساحة للتخزين) ، يولد الحرارة التي تسرع كسب القوة وانخفاضا كبيرا في نسبة الرطوبة .

عند مزج الجير مع التربة الرطبة وعلى الفور يستهلك كمية تصل إلى 32٪ من وزنه من الماء من التربة المحيطة به لتشكيل الجير المطفأ ، الحرارة المتولدة يرافقها زيادة فقدان المياه بسبب التبخر والتي تؤدي بدورها إلى زيادة الحد البلاستيكي في التربة مثل التجفيف والامتصاص ، عندما تكون التربة عند المحتوى الرطوبي 35٪ والبلاستيكية في حدود 25٪،و عند إضافة 2٪ من الجير تتغير البلاستيكية إلى 40٪ يصبح محتوى الرطوبة في التربة 5٪ دون حد البلاستيكية بدلا من 10٪ فوق الحد البلاستيكي (شيروود، 1993).

الانخفاض في اللدونة يحدث في المقام الأول عن طريق تبادل الأيونات الموجبة التي يتم عن طريقها استبدال الكاتيونات من الصوديوم والهيدروجين بواسطة أيونات الكالسيوم حيث يوجد في الطين أكبر تقارب للمياه ، حتى في تربة (مثل التربة الجيرية) التي تكون مشبعة بالطين مع أيونات الكالسيوم،

وا إضافة الجير يزيد درجة الحموضة وبالتالي زيادة قدرة الصرف ، عندما يتفاعل الاسمنت والجير مع المعادن الطينية الرطبة يؤدي ذلك إلى زيادة درجة الحموضة التي تذوب مركبات تتفاعل مع الكالسيوم لتشكيل السيليكا والكالسيوم و هيدرات الألومينا ، وهو منتج أسمنتي مماثل لتلك التي تنتج من عجينة الأسمنت.

في الغالب يستخدم الجير على نطاق واسع في التكنولوجيا في التطبيقات الجيوتقنية والبيئية ، بعض من التطبيقات تشمل التغليف من الملوثات ، الردم ، تثبيت المنحدرات وتحسين الأساسات ، كما هو الحال في استخدام كومة الجير أو أعمدة التربة (الإنجليزية وميتكالف، 1972). ومع ذلك ، وجود الكبريت والمواد العضوية قد يحول دون عملية الاستقرار للجير، الكبريتات (مثل الجبس) تتفاعل مع الجير وتضخمه والتي قد يكون لها تأثير على قوة التربة .

عند استخدام الجير في التربة الطينية يجب كسر الطين لجسيمات صغيرة الحجم، و السماح للجير بالتجانس ليتفاعل بشكل صحيح مع الطين .

يمكن استخدام الجير الجاف للتربة ، ولكن هبوب الرياح يثير القلق ويجري العمل عادة في منطقة مأهولة بالسكان، والجير يمكن أن يكون مختلطاً مع الماء لتشكيل الطين ، يكون زمن علاجه من 3 إلى 7 أيام عادة للسماح للجير ليتفاعل مع التربة ، وخلالها يتم رش التربة بالماء .

2-4-2-3-3 الرماد المتطاير :

الرماد المتطاير هو نتيجة ثانوية من الفحم ينطلق مرافق لتوليد الطاقة الكهربائية ، لديه خصائص اسمنتية قليلة مقارنة مع الجير والأسمنت ، معظم الرماد المتطاير ينتمي إلى المثبتات الثانوية ؛ هذه المثبتات لا يمكن ان تنتج الأثر المطلوب من تلقاء نفسها، ومع ذلك في وجود كمية صغيرة من المنشط فإنه يمكن أن تتفاعل كيميائيا لتشكيل مركب أسمنتي و الذي يساهم بدوره في تحسين قوة التربة الناعمة التي تكون متوفرة بسهولة وأقل تكلفة وصديقة للبيئة وآخرون (2005 .FM 5-410).

هناك نوعان من فئات رئيسية من الرماد لديها خصائص التدعيم العالية بسبب نسبة عالية من أكسيد الكالسيوم الحر ، الرماد المتطاير يمكن أن يكون مختلطاً مع الجير والماء لتحقيق الاستقرار في المواد الحبيبية مع القليل من الاسمنت لتكون مثل كتلة صلبة ، وعادة ما يكون دورها في عملية تحقيق الاستقرار هو لتكون بمثابة البوزلان و / أو كمنتج حشو للحد من فراغات الهواء ، الجير / الاسمنت / خليط الرماد المتطاير يطبق شيوعاً لاستقرار التربة ذات الحبيبات الخشنة ، و المنتج في الأصل من النفايات ويمكن الحصول عليه بتكلفة زهيدة .

2-4-2-3-4 كلوريد الكالسيوم :

كلوريد الكالسيوم هو المضاف الكيماوي الذي لديه القدرة على استيعاب الرطوبة في التربة مما يقلل من درجة حرارة التجمد ، لهذا السبب فإن التثبيت بكلوريد الكالسيوم يستخدم للمناطق ذات المناخ البارد ، كما يعمل كلوريد الكالسيوم على إدماج التربة والحد من الغبار .

2-4-2-3-5 القار :

القار هو المضاف الذي يحدث بشكل طبيعي أو كنتيجة ثانوية من تقطير البترول ،و هو المادة السوداء التي تستخدم في صنع الأسفلت و يستخدم الأسمنت الأسفلتي و الأسفلت التقشفي و القطران و المستحلبات جميعها لتحقيق استقرار التربة ، نوع التربة وطريقة البناء و الطقس كلها عوامل في اختيار القار للاستخدام. القار يجعل التربة أقوى ومقاومة للماء والصقيع ، استخدام القار يمكن أن يؤدي إلى تأخير العوامل المتصلة بالطقس خلال البناء، ويجعل الضغط أسهل وأكثر اتساقا .

2-4-3 التثبيت الميكانيكي التربة:

يتم تثبيت التربة الميكانيكي إما عن طريق الضغط أو إدخال التعزيزات غير القابلة للتحلل وغيره للتربة ، حيث أنه لا تتطلب هذه الممارسة التغيير الكيميائي عادة للتربة ، على الرغم من أنه من الشائع استخدام الوسائل الميكانيكية والكيميائية معاً لتحقيق الاستقرار المحدد ، هناك العديد من الأساليب المستخدمة لتحقيق الاستقرار الميكانيكي :

2-4-3-1 تعزيز التربة :

يتم علاج مشاكل التربة في بعض الأحيان عن طريق استخدام الحلول الميكانيكية ، يتم استخدام المنسوجات البلاستيكية كشبكة مصممة لاعتراض التربة ويساعد في السيطرة على تآكل التربة و الرطوبة و نفاذية التربة ، في المجاميع الكبيرة مثل الحصى و الحجارة والصخور وغالبا ما تستخدم فيها كتلة إضافية يمكن منع هجرة التربة المرغوب فيها أو تحسين خصائص التربة الحاملة .

2-4-3-2 إضافة تدريجات الركام :

هناك طريقة شائعة لتحسين الخصائص الهندسية للتربة هو إضافة بعض المجاميع التي تضفي سمات مرغوبة مثلاً ز يادة القوة أو خفض اللدونة ، يوفر هذا أسلوباً اقتصادياً ، ويحسن قدرات التدعيم للتربة الطبيعية .

عملية تثبيت التربة

كل مشاريع البناء وا عادة التأهيل الجديدة هي من المرشحة لعملية تثبيت التربة ، في حين أن إجراءات استقرار التربة دقيقة تختلف تبعا لعوامل كثيرة منها الموقع، والبيئة، والوقت ، والميزانية، والآلات المتاحة، والطقس .

2-4-3-3 إعداد الموقع :

يتم باستخدام المواد الموجودة في الموقع بما في ذلك الرصيف القائم إذا كان يجري استصلاحه ، والمسحوق باستخدام الخلاط الدوار ، و يتم إدخال المجاميع أو المواد الأساسية في هذا الوقت بحيث يتم تعديل المادة التي جلبت لتعطي محتوى الرطوبة الأمثل عن طريق تجفيف التربة الرطبة بشكل مفرط ، أو

إضافة الماء إلى التربة الجافة بشكل مفرط عن طريق الصف إذا لزم الأمر للحصول على عمق المواد المحدد .

2-4-3-4 إدخال الإضافات :

الاسمنت والجير أو الرماد المتطاير يمكن تطبيقها جافة أو رطبة ، عندما يطبق الجافة ، فإنه وعادة ما يتم نشره في فناء مربع أو محطة بالاستفادة من رش إعصار أو أي جهاز آخر عندما يتم تطبيق الجير على الطين، فإنه إما ينشر مع شاحنة صهريج أو من خلال خلاط دوار مع رذاذ الماء، كلوريد الكالسيوم عادة ما يتم نشره باستخدام شاحنة صهريج مجهزة بأداة الرذاذ .

تتطلب بعض المشاريع طبقات متعددة من التربة المعالجة والمتراصة ، عند تطبيق الأسمنت والرماد المتطاير من المهم إنهاء الاختلاط في أقرب وقت ممكن نظرا لخصائص الإعداد السريعة للإضافات .

2-4-3-5 الضغط و التشكيل / التشذيب :

الضغط يتبع عادة مباشرة بعد الاختلاط، وخصوصا عندما تكون المادة المضافة هي الاسمنت أو الرماد المتطاير بعض الإضافات مثل البيتومين تتطلب التأخير بين الاختلاط و الضغط للسماح لبعض المواد الكيميائية بإحداث تغييرات ، ويتم إنجاز الضغط من خلال العديد من التمريرات باستخدام مختلف الآلات ، و يكون الضغط الأولي اهتزازي ، يتبع الضغط المتوسط بالاستفادة من وجود الضاغطة الهوائية والتي توفر العجن الذي يزيد من كثافة التربة .

2-4-3-6 المعالجة :

المعالجة تسمح للمادة المضافة لتحقيق كامل الخواص الهندسية ، حيث أن الطقس و الرطوبة من العوامل الحاسمة، حيث أن المعالجة يمكن أن يكون لها تأثير مباشر علىقوة استقر ار التربة ، عموما ما لا يقل عن سبعة أيام مطلوبة لضمان علاج مناسب. أثناء المعالجة تؤخذ عينات من التربة لتحديد المحتوى الرطوبي.

هنالك مجموعة من المعايير التي تساعد المهندسين على تحديد خصائص التربة لغرض تصميم وبناء الطرق و الطرق السريعة وما يرتبط بها من دعم حركة المرور و الهياكل ، و تستخدم حدود اتبيرج عادة لتعريف التربة و أهمها تلك التي تنقل التربة من الحالة الصلبة للدنة و مؤشر اللدونة و هو الحد بين الحالة اللدنة والسائلة.