ميكانيك التربة والأساسات

- الدكتور المهندس رضوان حسين

الجيولوجيا الهندسية:
Engineering geology

الجيولوجيا الهندسية:

تعتبر الجيولوجيا الهندسية من العلوم الأساسية الهامة في **الهندسة المدنية**؛ حيث تفيد المهندسين والفنيين في حل المشكلات التي تصادفهم في كثير من المنشآت الهندسية مثل الأنفاق والسدود والطرق ...إلخ

من أهم خواص الصخور:

القساوة: Hardnes

تعتبر القساوة من أهم الخواص المميزة للمعادن ، علماً بأنها خلاصة مجموعة من الخواص الفيزيائية (لا يوجد لها تعريف عام) . غير أنه أتفق على التعريف المحدود التالي :

هي عبارة عن المقاومة التي يبديها المعدن تجاه تأثير أو دخول (خدش) أجسام غريبة في الوجه البلوري أو المقاومة تجاه القص (الانكسار) لهذه الأوجه البلورية. وبتعبير آخر تكون القساوة : هي المقاومة التي تبديها الأوجه البلورية (السطح الخارجي للبلورية) تجاه الخدش الميكانيكي (جرح الوجه) .

طريقة الخدش لموهز: (cratch methods of Mohs (1773 – 1839

وتعتمد هذه الطريقة على المقارنة بين قساوة معدن ما (قساوته غير معروفة مثلاً) وقساوة معدن آخر معروفة . ولهذا الهدف يستخدم سلم القساوة الذي يضم عشرة معادن مختلفة القساوة ، مرتبة حسب وجودها في الطبيعة من الأضعف إلى الأقسى الذي يؤثر في جميع المعادن التي تكون قبله (جدول 1-4) .

جدول 1-4 : سلم موهز للقساوة

درجة القساوة	اسم المعدن	الصيغة الكيميائية	ملاحظات
1	تالك	$Mg_3 Si_4O_{10} (HO)_2$	معادن يؤثر عليها بالاظفر
2	جبس	$CaSO_4.2H_2O$	
3	كلسيت	$CaCO_3$	معادن تخز بالزجاج
4	فلوريت	$Ca F_2$	
5	أباتيت	$Ca_5 F(PO_4)_3$	معادن قاسية نسبياً تخز بالفولاذ
6	فلدسبار	$K_2O.AL_2O_3.6SiO_2$	
7	كوارتز	SiO_2	معادن قاسية لا تخز بالزجاج
8	توباز	$AL_2SiO_4(F,OH)_2$	معادن قاسية جداً لا تخدشها السكين الفولاذية
9	كوروندم	AL_2O_3	
10	الماس	C	

وستقصر دراستنا هنا على القشرة الأرضية مع التركيز على الطبقات الرسوبية المنتشرة في القطر ، وذلك لأن أغلب المنشآت الهندسية في الهندسة المدنية ستقع ضمنها أوعليها .

١-٢- الصـــخور:

١-٢-١- لمحة وتعريف:

إن كلمة صخر لا تحمل بالضرورة نفـــس التعريـــف لـــدى الجيولـــوجيين والمهندسين ، إذ يعتبر الجيولوجي أن الصخر هو ركام المعادن بينما لا يوجد تعريـــف هندسي واضح للصخر. والتعريف الأكثر اســـتعمالاً في الهندســـة المدنية وبصـــورة خاصة في أعمال الطرق هو أن كل ارض طبيعية لا يمكن حفرها إلا بالتفجير تســـمى صخرا"، وماعدا ذلك فتدعى تربة.

إنّ علم ميكانيك الصخور قد بُدىء بدراسته وتطويره منذ وقت قصير، بينما علـــم ميكانيك التربة فقد عولج بعناية فائقة من الدراسة والبحث منذ سنين عديـــدة ويعـــود ذلك إلى أنّ التعامل مع التربة أصعب بكثير من التعامل مع الصخور، كما أن الكثير من المهندسين يتعاملون مع التربة بشكل أكبر بكثير من التعامل مع الصخور، إذ أنّ معظم المنشآت الهندسية ومنها الطرق تقام بشكل رئيسي على التربة.

١-٢-٢- الأنواع الرئيسية للصخور:

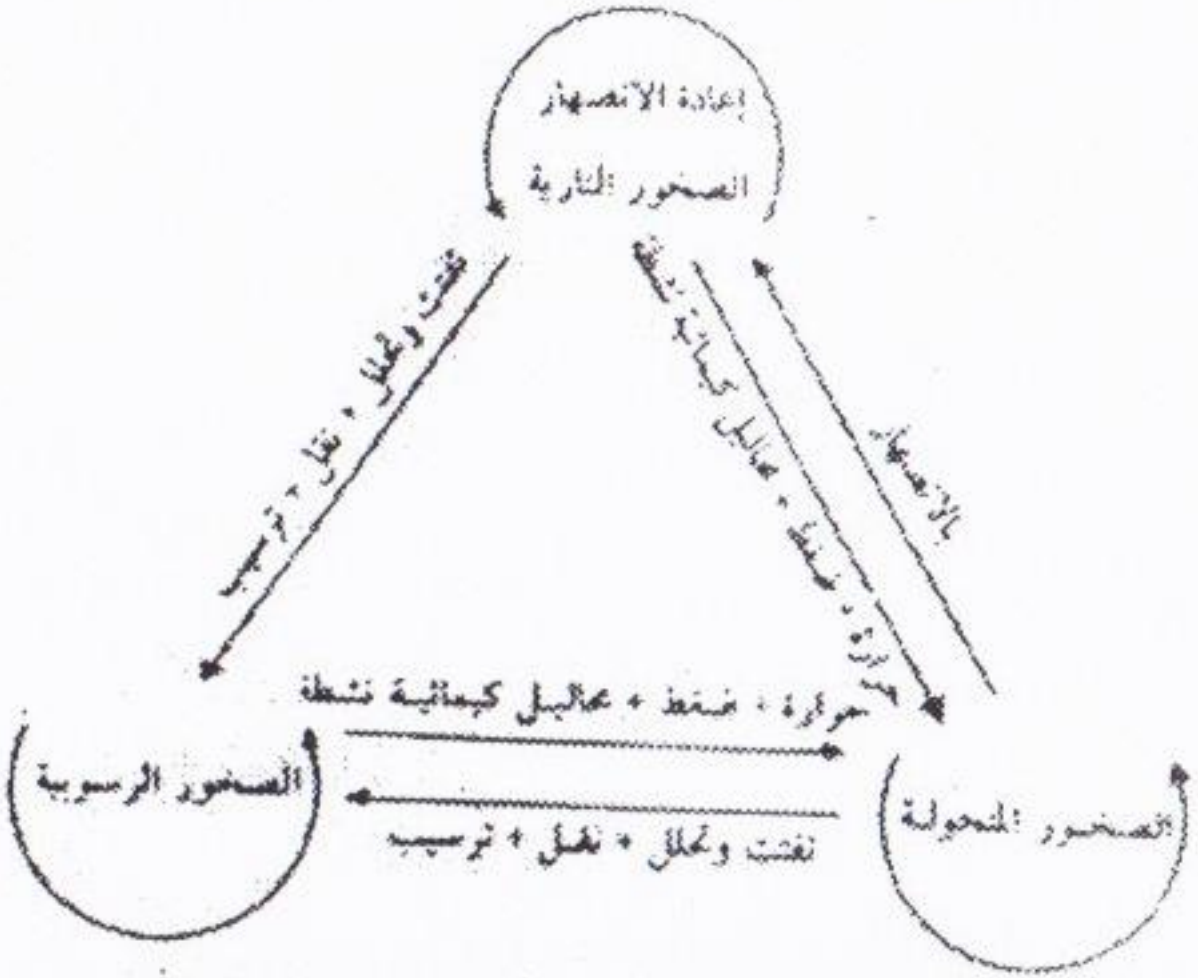
كما هو معروف في الجيولوجيا فإن صخور القشرة الأرضية يمكن تصنيفها حسب طريقة تكوينها إلى ثلاث مجموعات.

١- مجموعة الصخور النارية (IGNEOUS ROCKS): وقد تكونت من تجمد المواد المنصهرة (المكما).

٢- مجموعة الصخور الرسوبية (SEDIMENTARY ROCKS) وهي ذات تكوين ثانوي ، إذ تتألف من غيرها من الصخور والمعادن المنقولة إلى قعر البحار والمحيطات تحت تأثير عوامل ميكانيكية أو كيميائية أو عضوية.

٣- مجموعة الصخور المتحولة (METAMORPHIC ROCKS): وهي صخور تكونت من صخور نارية أصيلة أو صخور رسوبية تحولت نتيجة لتأثير الحرارة

والضغط. والشكل (١-٢) يوضح تداخل العلاقة بين المجموعات الثلاث عبر دورة تكون الصخور . وبما أنها دورة فلا يمكن تحديد بداية أو نهاية لها.



الشكل ١ ـ ٢ ـ تداخل العلاقة بين المجموعات الصخرية الثلاث

وتجدر الإشارة إلى أنّ أكثر من % 95 من حجم الأرض مؤلف من الصخور النارية والصخور المتحولة (حوالي % 80 نارية و % 15 متحولة). وهذا يقود إلى التفكير بأن نسبة الصخور الرسوبية ذات أهمية محدودة، وعلى العكس من ذلك فإن الصخور الرسوبية ذات أهمية كبيرة بالنسبة لأعمال الهندسة المدنية وهذا يعود إلى حوالي % 75من الصخور المكشوفة على سطح القشرة الأرضية (مجال أعمال الهندسة المدنية) هي من الصخور الرسوبية.

١-٢-٣- خواص الصخور:

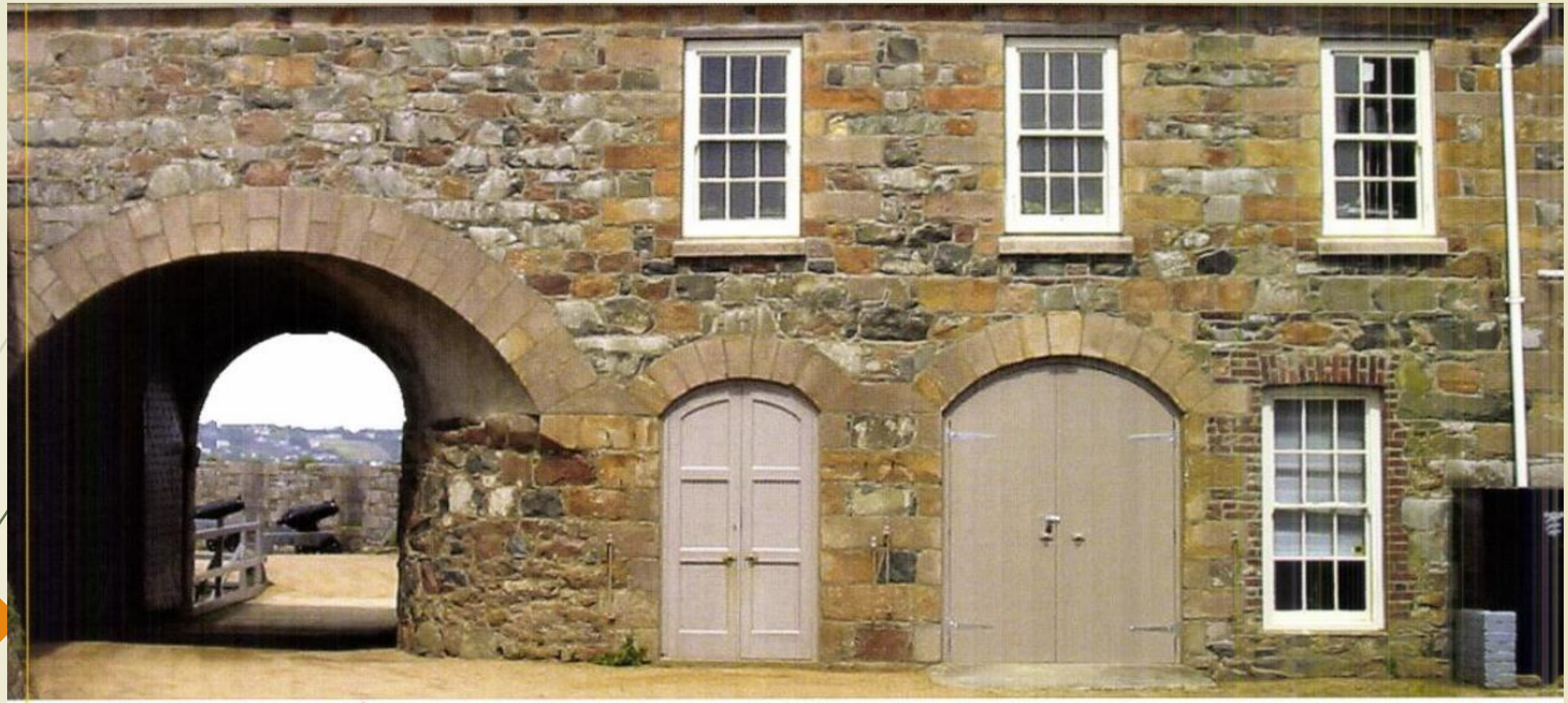
إن ما يهم المهندس المدني بشكل عام، ومهندس الطرق بشكل خاص من خواص الصخور هو معرفة:

- قوة هذه الصخور (Strength properties) وتأثير الماء عفي مقاومتها ومرونتها.
- انسيابها (Creep of Rocks) تحت تأثير الإجهادات العالية (الردميات العالية) .
- تأثير الشروط المحيطية.
- استعمالها كمواد إنشائية.
- مقدار سهولة الحفر فيها.

الجدول (٢ - ١) - الخواص الميكانيكية للصخور

MECHANICAL PROPERTIES OF VARIOUS ROCKS

نوعية الصخر	عامل يونغ في حالة عدم التحميل	الكثافة الكلية	المسامية	إجهاد الانضغاط	إجهاد الشد
	(10^5 Kg/cm^2)	(g/cm^3)	(%)	(Kg/cm^2)	(Kg/cm^2)
الغرانيت	2.6	2.6 – 2.7	0.5 – 1.5	1000-2500	70 – 250
الدولوريت	8-11	3.0-3.05	0.1-0.5	2000-3500	150-300
الغابرو	7-11	3.0-3.1	0.1-0.2	1000-3000	150-300
البازلت	6-10	2.8-2.9	0.1-1.0	1500-3000	100-300
الحجر الرملي	0.5-8	2.0-2.6	5-25	200-1700	40-250
الحجر الطيني الصفحي	1-3.5	2.0-2.4	10-30	100-1000	20-100
الحجر الكلسي	1-8	2.2-2.6	5-20	300-3500	50-250
الدولوميت	4-8.4	2.5-2.6	1-5	800-2500	150-250
الفحم	1-2			50-500	20-50
الكوارتزيت		2.65	0.1-0.5	1500-3000	100-300
الغنايس		2.9-3.0	0.5-1.5	500-2000	50-200
الرخام		2.6-2.7	0.2-2.0	1000-2500	70-200
الطين الصخري الصفحي		2.6-2.7	0.1-0.5	1000-2000	70-200



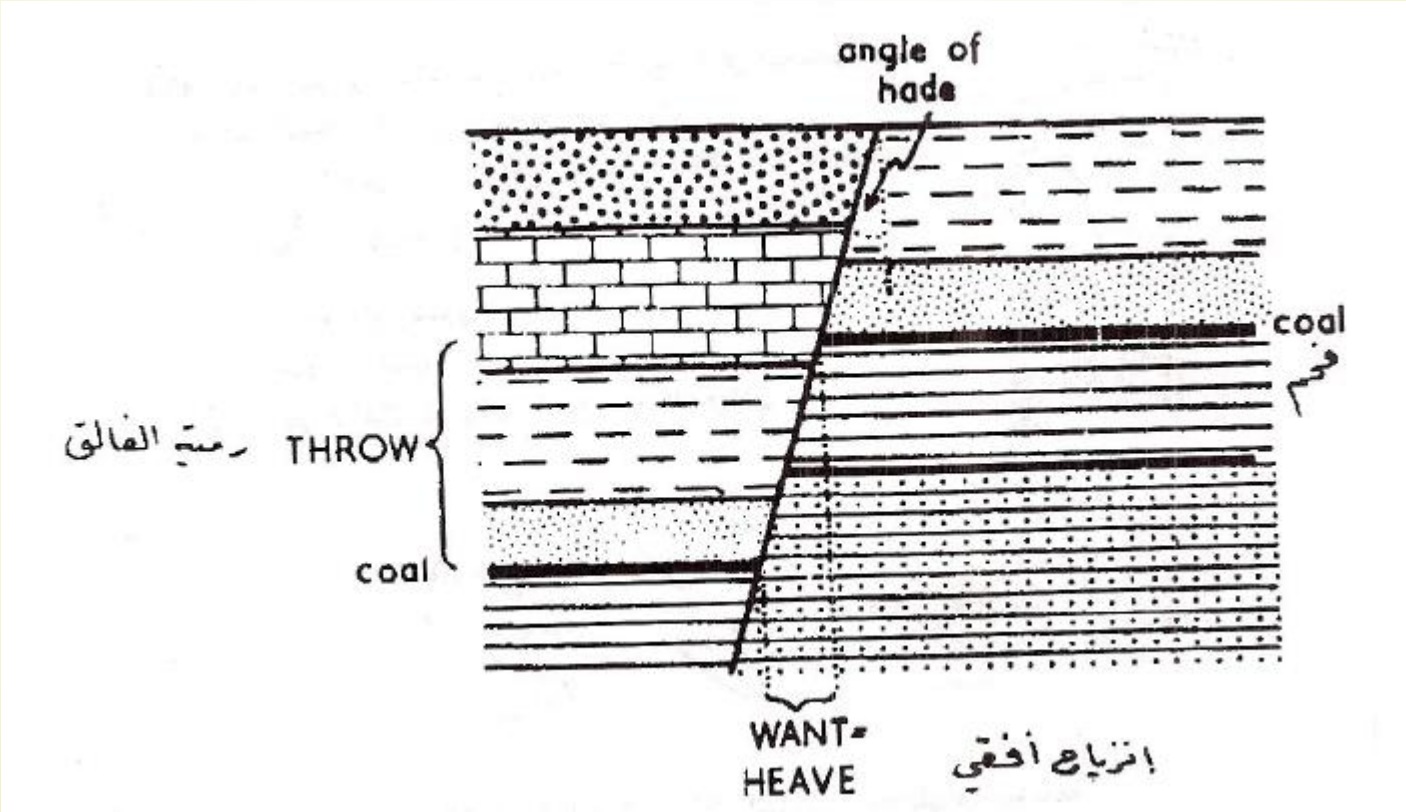
▲ منزل مبني من الغرانيت

الجس

الجبس أو الجص صخر رسوبي طري يمكن خدشه بسهولة بظفر اليد. لونه عادةً أبيض، ولكن الجبس الذي يحوي تلطخاً من أكسيد الحديد يمكن أن يظهر بلون بني محمر وفاتح. يستخدم الجبس عموماً في صنع جبيرات تقويم العظام

1-3-2-2 الفوالق : Fault

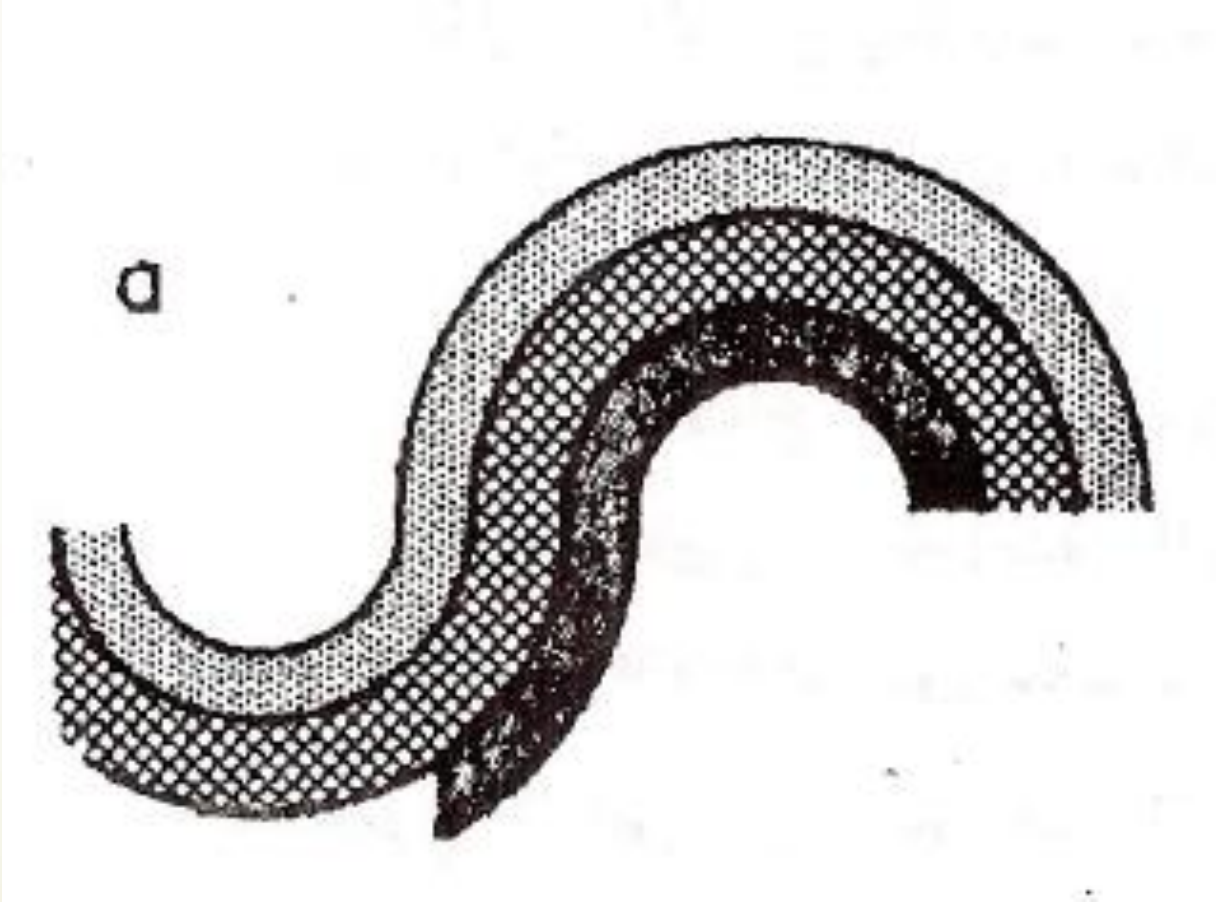
الفوالق أو الصدوع هي انكسارات تصطحب بتحريك الصخور من مكانها .



2-2-3-2 الطيات : Folding

فكثيراً ما يرافق ظهور الفوالق ، على الخرائط الجيولوجية ، العديد من الطيات (ارتفاع وانخفاض للطبقات بشكل منتظم أو غير منتظم = طي) ، التي تؤثرفي العمق كالفوالق في الطبقات

2-2-3-2 الطيات : Folding



يستحسن دائماً إجراء تجارب موقعية في النفق لأنها تعطي نتائج جيدة و معلومات هامة عن خواص الصخور ، وإمكانية ستعمال المواد المفجرة ، واختيار نوعية البناء وكيفية الحفر (الشق) .

وبناء علـى اقتراحـات (STINI (1950 توقـف الدراسـات الجيوهندسـية علـى توضيح النقاط التالية ذات الأهمية بالنسبة للتقر الجيولوجي :

1 –كيفية توضع الصخور : شاقولي (شديد الميل) ، أفقي ،

2 –ثخانة الطبقات واتجاه الفواصل الطبقية .

3 –الوزن النوعي وكثافة الصخور المراد اختراقها .

4 –التركيب المعدني : منها ما هو الضار مثل الحديد الكبريتي ، أو ما هو مخفف من مقاومة الصخر مثل الميكا ، أو الاحتواء على الغضار ،

5 –البنية الحبيبية ، والنسيج

6 –صلابة الصخر : التي تؤثر مباشرة على أعمال الحفر والتفجير وعلى عملية اقتلاع الصخر من المقلع (المقاومة الاستثمارية) .

7 –هيئة تكون الصخر في البروفيل : متطبق ، كتلي ، متورق .

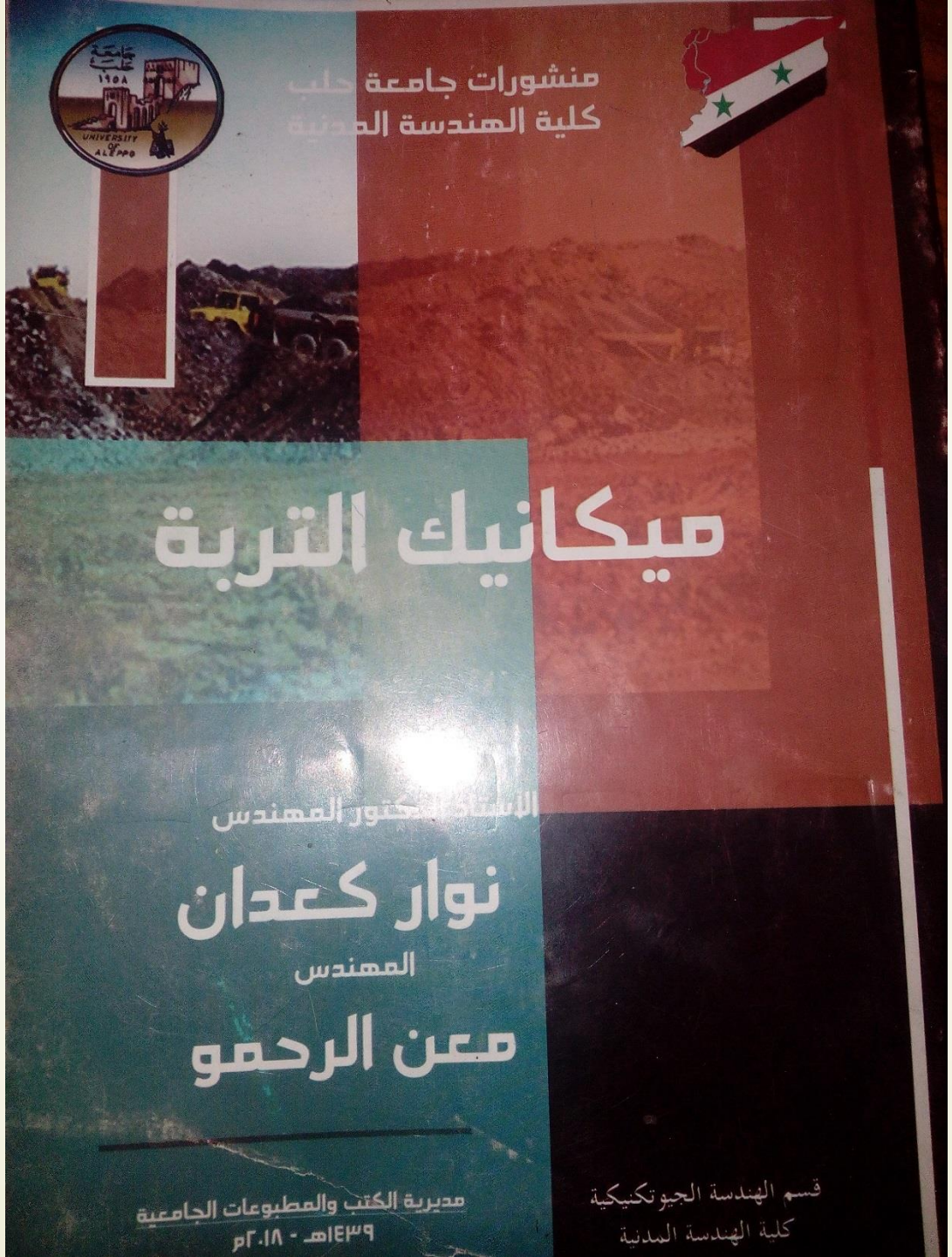
8 –تأثيرات الصخور التكتونية (البنيوية) : التشقق ، التصدع ، التفلق ، الطحن .

9 –مقاومة الصخور الشدية والانضغاطية في أماكن مختلفة من النفق .

10 – عامل ثبوتية الجبل : نوع الضغط الجبلي وقيمته .

11 – مقاومة التجوية الصخرية : حساب طول القطعة (من النفق) التي يمكن أن تتأثر بالصقيع ثم تبطينها .

الهزات الأرضية أو الزلازل : هي اهتزازات فجائية لأجزاء من القشرة الأرضية مصدرها باطن الأرض ترافقها أصوات أرضية عميقة . كثيراً ما تصطحب هذه الاهتزازات بشقوق أرضية و تصدعات تتدفق منها أحياناً مياه جوفية و غازات طبيعية كما ترتبط معها انهيارات جبلية و انزلاقات أو تشكيل منخفضات محلية .


منشورات جامعة حلب
كلية الهندسة المدنية
ميكانيك التربة
الأستاذ الدكتور المهندس
نوار كعدان
المهندس
معن الرحمو
مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية
١٤٣٩هـ - ٢٠١٨م
قسم الهندسة الجيوتكنيكية
كلية الهندسة المدنية

الفصل الأول

التحريات الجيوتكنيكية والتجارب الحقلية

Field Exploration

١-١ مقدمة

يتطلب تحديد خصائص طبقات تأسيس المنشآت الهندسية عموماً معرفة بعض العناصر اللازمة والتي تتمثل بنوع الحمولة المنقولة والشروط المسموحة للبناء وسلوك التربة وتغيراتها الناجمة عن تحمل حمولة المنشأة وأخيراً الحالة الجيولوجية للتربة وذلك بمعرفة شكل توضع الطبقات وموقع منسوب البساط المائي.

كما أنه هناك حاجة ملحة للتعامل مع المفاهيم الأساسية لعلم ميكانيك التربة باعتبار أنها عنصر فعال في سياق دراسة وتصميم أساسات أية منشأة بهدف الحصول على حلول أمينة واقتصادية في آن واحد وللوصول إلى تحديد هذه المفاهيم يتوجب وضع برنامج للتحريات الحقلية يتضمن مجموعة من التجارب التي يتم تنفيذها حقلياً ويتبع ذلك مجموعة من التجارب المخبرية سيتم التعرف عليها في الفصل الثاني من الكتاب.

١-٢ برنامج التحريات الحقلية Field Exploration Program

إن معرفة طبيعة ومواصفات تربة التأسيس أمر ضروري للغاية، وندعو بالتحريات الحقلية كل الجهود المبذولة لمعرفة الخصائص الجيوتكنيكية للتربة وطبيعة الطبقات وسماكاتها، لذلك فإن تجهيز وإعداد برنامج للتحريات الحقلية يجب أن يساعد في الحصول على بعض المعلومات اللازمة مثل:

١- اختيار نوع الأساس وعمق التأسيس المناسب للمنشأة المدروسة.

٢- حساب قدرة التحمل الحدية و المسموحة لتربة التأسيس.

٣- تقدير القيمة المتوقعة للهبوط الكلي لتربة التأسيس تحت المنشأة المدروسة.

٤- تحديد المشاكل الخاصة بتربة التأسيس من حيث سلوكيتها، كأن تكون ترب منتفخة أو من النوع القابل للانهيار..... الخ.

٥- تحديد منسوب البساط المائي.

٦- تقدير قيم دفع التربة على المنشآت (جدران استنادية).

٧- إمكانية استبدال تربة التأسيس الضعيفة بترب محسنة.

وعلى المهندس المصمم أن يتذكر دوماً أن التربة في أي موقع هي غير متجانسة وبالتالي فإن التغيرات التي تطرأ عليها متبدلة أيضاً، إلا أن معظم نظريات ميكانيك التربة تعتبر الحالة المثالية وأن تطبيق مثل هذه النظريات على مسائل الأساسات يتطلب تقدير دقيق للقيم والمعلومات المستقاة من برنامج التحريات. وتقدر عادة كلفة أعمال التحريات الحقلية كنسبة من الكلفة العامة للمنشأة بحدود 0.1-0.5 % منها.

١-٢-١ استقصاء المعلومات الأولية حول نوع المنشأة ووظيفتها وطبيعة دراستها الإنشائية والحمولات القصوى للأعمدة مع مجازات هذه الأعمدة، كما يجب معرفة " الكود " أو النظام الهندسي المعتمد في الدراسة.

١-٢-٢ الاستكشافات والزيارات الميدانية من قبل المهندس مباشرة وذلك لتأمين ما أمكن من المعلومات التالية:

أ-طبوغرافية الموقع العام للمشروع، احتمال وجود طبقات نفوذة، إمكانية حصول انهيار للمنحدرات الموجودة، إضافة إلى الأضرار الناجمة عن انتفاخ الترب، وكل ذلك يمكن ملاحظته بشكل مبدئي بزيارة الموقع.

ب-تطبق الترب ابتداءً من المناطق العميقة وحتى سطح التربة.

جـ-طبيعة النباتات في الموقع وهذا يعبر عن نوعية الترب بشكل مبدئي، فبعض النباتات تنشط في الترب الغضارية القابلة للانتفاخ والذي يؤدي إلى مشاكل في حالات التأسيس.

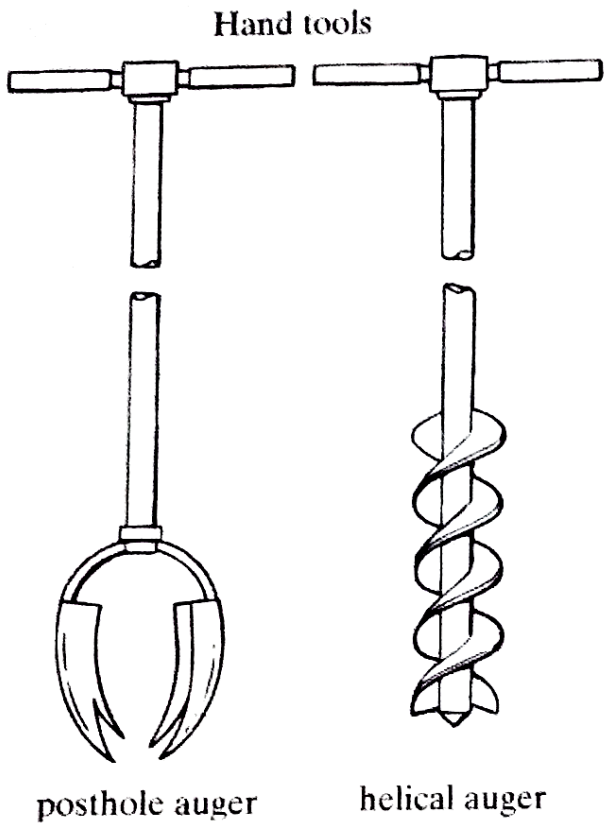
د – وجود مكامن مياه متاخمة لموقع المنشآت.

هـ – منسوب المياه الجوفية وحركته الفصلية (بين الشتاء والصيف).

و –وجود منشآت قديمة قد تحوي على تشققات ظاهرة في جدرانها، مما يعطي فكرة عن حدوث انتقالات تفاضلية، يجب البحث عن أسبابها لتفاديها في المنشآت الجديدة.

١-٢-٣ سبر التربة Soil boring هي عملية يدوية أو ميكانيكية تستخدم في حفر التربة بواسطة أداة سبر بحيث تشكل حفرة اسطوانية ضمن التربة، ناتج الحفر (السبر)، يمكن أن يكون عينات سليمة أو مخربة ويستفاد منها لمعرفة نوع التربة وتطبيقها مع تحديد ميل الطبقات إن وجد وهكذا فإن مجموعة من السبور تساعد في رسم المقطع الجيولوجي للمنطقة المدروسة.

وتستخدم أدوات السبر اليدوية الشكل (١-١) في بعض الأعمال الهندسية التي لا تتطلب دراسة التربة أكثر من 5m مثل مشاريع الطرق والمطارات وبعض المنشآت الصغيرة. ويتم بواسطة هذه الأدوات استخراج العينات الترابية السليمة والمخربة على السواء.



الشكل (١-١) أدوات السبر اليدوية

أما من أجل السبور العميقة فتستخدم آليات حفر خاصة تصل حتى 100m

ويتبع تحديد عدد وعمق السبور إلى نوعية المنشأة ومساحة الموقع فبالنسبة للمباني العادية تنفذ ثلاثة سبور، إذا كانت الأرض مستوية وخمسة سبور، إذا كانت غير مستوية (أربعة عند زوايا المبنى والخامس في المركز) أما بالنسبة لمنشآت الأبراج الكهربائية والمآذن وغيرها ذات الحمولات المركزة فينفذ سبر وحيد عند محور الحمولة المركزة.

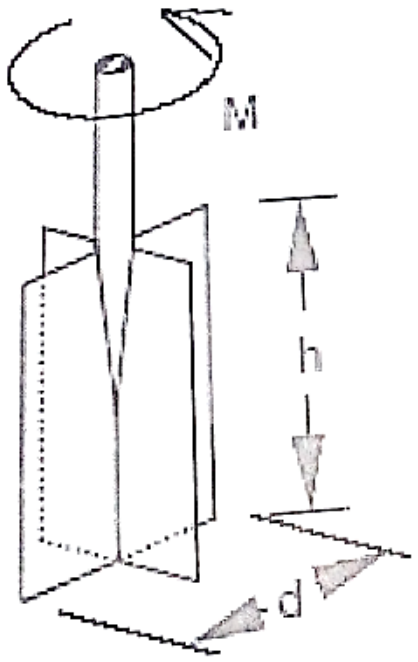
وبالنسبة للمنشآت ذات الطابق الوحيد يمكن اعتبار عمق السبر بحيث تتراوح قيمته بين (6-10)m أما المنشآت ذات الطوابق المتكررة والعالية فيتم الاستمرار في حفر السبور حتى الوصول إلى طبقة صخرية أو طبقة ترابية ذات مقاومة عالية.

الجدول (١-٢) تحديد التباعد الأصغري بين السبور

نوع المنشأة	التباعد الأصغري بين السبور بالمتر
أبنية متعددة الطوابق	10-30
منشآت صناعية وحيدة الطابق	20-60
سدود	40-80
طرق دولية	250-500

وعموماً لا يوجد عينة سليمة بكل معنى الكلمة إلا أنه يسبب أن درجة تشوهها أثناء استخراجها هي ضئيلة بالنسبة للعينات المخربة فعلاً يمكننا تسميتها بالعينة السليمة.

وحتى تبقى العينة سليمة يجب الحفاظ عليها (بالتشميع مع تحديد اتجاه توضع العينة) ونقلها إلى المخبر بشكل أمين دون تعريضها إلى اهتزازات تؤدي إلى تغيرات حجمية فيها. وفي الترب العديمة التماسك يتعذر الحصول على عينات سليمة والتي تبدي زيادة في الحجم أثناء عملية الاستخراج،



الشكل (١-٩) جهاز المروحة الدوارة

١-٢-٥ التجارب الحقلية: وهي مرحلة أساسية من برنامج التحريات الحقلية وتتمة للمراحل السابقة وتشمل مجموعة من التجارب التي تجرى في موقع العمل للحصول على قيم ونتائج تتعلق بخصائص التربة في موقع المشروع، من هذه التجارب:

أ- قياس مقاومة القص في الحقل بالمروحة الدوارة: Field Van Testing FVT

تستخدم هذه التجربة الحقلية لقياس مقاومة القص غير المصرفة C_u في الحقل وذلك للترب الغضارية الطرية والمفككة، ويتألف جهاز التجربة من أربعة شفرات تشكل مروحة مثبتة في نهاية قضيب مزود بقبضتين، الشكل (١-٩) $h = 2d$.

تثبت المروحة ضمن التربة ثم تطبق عليها مزدوجة فتل T

ج- تجربة الاختراق النظامية Standard Penetration Test (SPT)

وهي من أكثر طرق الاختراق شيوعاً والتي تقيس مقاومة اختراق مسبر نظامي الشكل (١-١٣) في أي سبر مدروس وتتميز بأنها من الطرق السريعة.

-تعرف مقاومة الاختراق (N) أو (SPT N) بأنها عدد الطرقات اللازمة لانغراس المسبر النظامي لعمق قدره 305 mm وذلك بعد انغراس أولي قدره152.5 mm

بعد تجهيز حفرة الاختبار حيث تنظف تماماً من بقايا الحفر يتم تثبيت جهاز الاختراق على أرضية الحفرة وتبدأ عملية الانغراس بواسطة المطرقة والتي تزن (622.72 N) ، 63.5 kg ، (140 lb) وتسقط من علو قدره 0.762 m.

يسجل عدد الطرقات N_1 التي يصل بتأثيرها المسبر إلى العمق 152.5mm ويستمر في غرس المسبر ضمن التربة حتى يصل إلى عمق يساوي ضعف العمق الأولي ويسجل عندها عدد الطرقات الإجمالية N_2 فنحصل على مقاومة الاختراق (SPT N).

$$N = N_2 - N_1$$

الشكل (١-١٣) نوع من المطارق المستخدمة في تجربة SPT

توقف التجربة في الحالات التالية:

- عندما يصل عدد الطرقات 100.
- عندما لا يتجاوز الإنغراس 10 mm لكل ٢٥ طرقة.
- عندما لا يكون تجاوب في الإنغراس بعد الطرقة العاشرة.

يستفاد من نتائج تجربة (SPT) في معرفة نوعية الترب الغضارية حيث قوامها، كما يبين الجدول (١ – ٥)

الجدول (١ – ٥) قوام الترب الغضارية بدلالة N

مقاومة الاختراق	القوام	الضغط غير المحصور q_u
N	Consistency	kN/m^2
0 – 2	طري جداً	0 - 25
2 – 5	طري	25 - 50
5 – 10	متوسط التماسك	50 - 100
10- 20	متماسك	100 - 200
20 – 30	شديد التماسك	200 - 400
أكبر من 30	قاسي	أكبر من 400

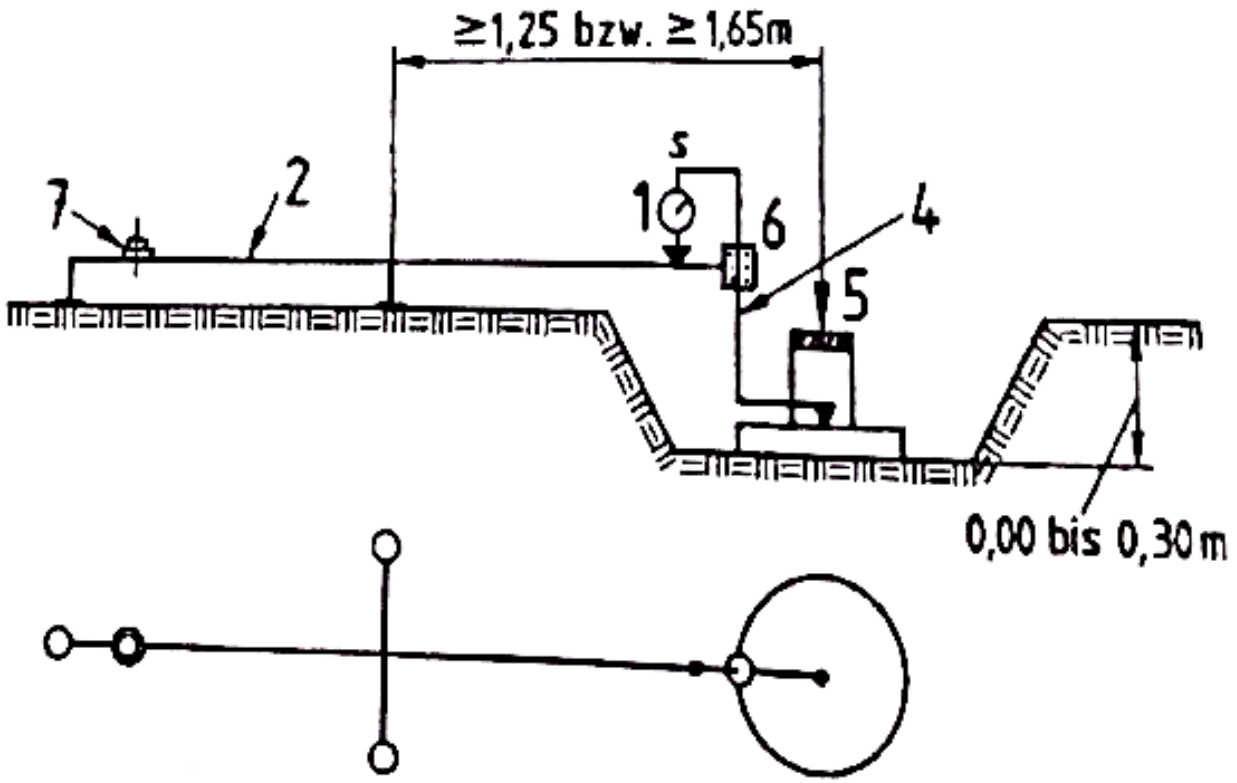
يمكن الاستعانة من النتائج الحقلية العديدة لقيم مقاومة الاختراق في الترب المفككة والغير متجانسة لمعرفة مواصفات هذه الترب بشكل أولي وذلك كما يوضح الجدول (١-٦).

الجدول (١-٦) مواصفات الترب المفككة بدلالة N

مقاومة N الاختراق	الكثافة النسبية Dr %	زاوية الاحتكاك الداخلية ϕ°	وزن واحدة الحجم γ_b kN/m^3
0 – 5	0 – 5 مخلخلة جداً	26 – 30	11 - 16
5 – 10	5 - 30 مخلخلة	28 – 35	14 - 18
10 – 30	30 - 60 متوسطة	35 – 52	17 - 20
30 – 50	60 - 95 كثيفة	38 – 46	20 - 22

و – تجربة التحميل الحقلية Plate Load Test

تستخدم في قياس مقاومة التربة للإجهاد والمطبقة في الحقل مع تحديد قيم الهبوطات المتوقعة، حيث يتم تطبيق حمولات تدريجية على سطح التربة بواسطة صفيحة مربعة $(305 \times 305)mm$ أو دائرية $\phi(150-722)mm$ سماكتها 25m.m ويبين الشكل (١-١٦) مبدأ عمل هذه التجربة.



1 Meßuhr bzw. Wegaufnehmer
2 Traggestell
3 Drehpunkt
4 Tastarm
5 Last
6 Linearlager
7 Dosenlibelle
s_M, s Setzung an der Meßuhr bzw. am Wegaufnehmer

الشكل (١-١٦) تجربة التحميل الحقلية

الفصل الثاني

الخصائص الأساسية للترب *Properties of Soils*

إن علم ميكانيك التربة هو علم يهتم بدراسة التربة وسلوكها وتطبيقاتها المختلفة واستخدامها كمواد إنشاء و بناء، وهو بذلك يشكل واحد من مجموعة الاختصاصات المكونة لعلوم الهندسة الجيوتكنيكية والتي تشمل:

- ميكانيك التربة (خواص التربة وسلوكها)
- ديناميك التربة (الخواص الديناميكية للترب، هندسة الزلازل)
- هندسة الأساسات (الأساسات السطحية والعميقة)
- هندسة الطرق (الرصف الصلب والمرن)
- ميكانيك الصخور (توازن واستقرار الصخور، الأنفاق)
- الترب المسلحة (تحسين الترب)

١-٣-١- تكوين التربـــــة:

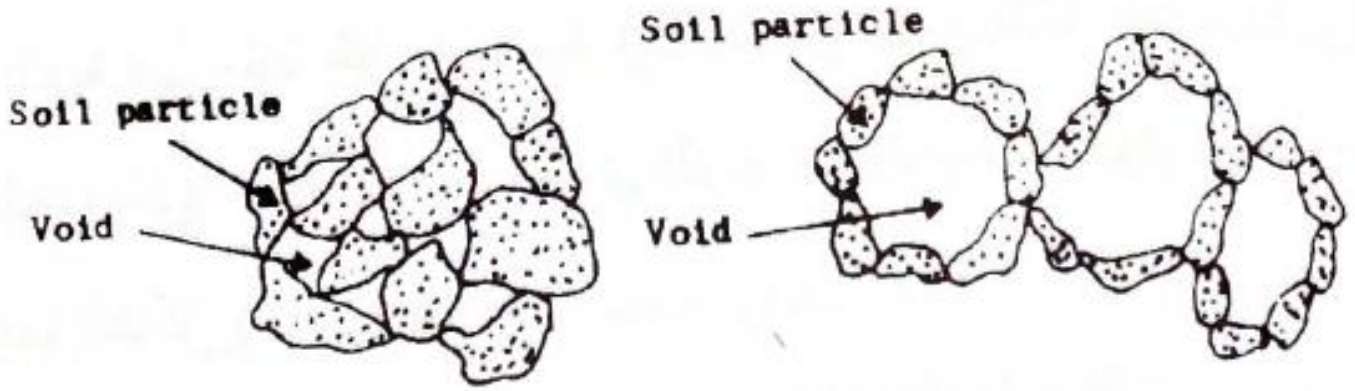
إن الحبيبات الصلبة التي تتألف منها التربة غير العضوية هي عبارة عن نتـــائج تأثير القوى الميكانيكية والكيميائية على الصخور الأصلية حيث تؤدي هذه القوى إلى عملية تآكل وتفتت هذه الصـــخور (The disintegration or decompasition of rocks).ومن بين القوى المؤثرة، يمكن أن نذكر تأثير الرياح والماء وتـــواتر التجمـــد والتميع والتغيرات الحرارية والتحلل الكيميائي وغيرها، تبعاً للعوامل الرئيسية المسؤولة عن تكوين وتواجد التربة في موقع معين فإننا يمكن أن نميز بين الترب المتبقية والتـــرب المنقولة.

- **الترب المتبقية:** وهي الترب التي تكون موجودة فوق الصخر الأم مباشرة وتتميز بتركيب معدني مشابه للصخر الأم، وتختلف درجة تماسكها وفقاً لعمقها، وطبقاتها ذات التدرج الانتقالي من التربة إلى الصخر، كما أن حواف حباتها حادة خلافاً لأنواع الترب المنقولة.

- **الترب المنقولة:** وهي الترب التي ترسبت بعد أن نقلت من مواقع تكوينها إلى مواقع أخرى بإحدى وسائط النقل كالماء والرياح والجليد واندفاعات البراكين، وتتميز بفقدانها للتجانس واستدارة حباتها. وتعتبر التربة المنقولة بوساطة المياه الجارية أهم تربة للمهندس في قطرنا نظراً لشمولها في طبيعتنا بشكل أوفر وانتشارها بشكل أوسع.

٢-٤ -١ بنية الترب الحبيبية Granular soil structure:

تكون التربة الحبيبية كالرمال والحصى والمشكلة من الحبات التي يزيد قطرها عن D>0.01mm مجموعات غير مترابطة حيث أن قوى الثقالة فيما بينها أكبر من القوى بين الحبات كما في الشكل (٢-٨)



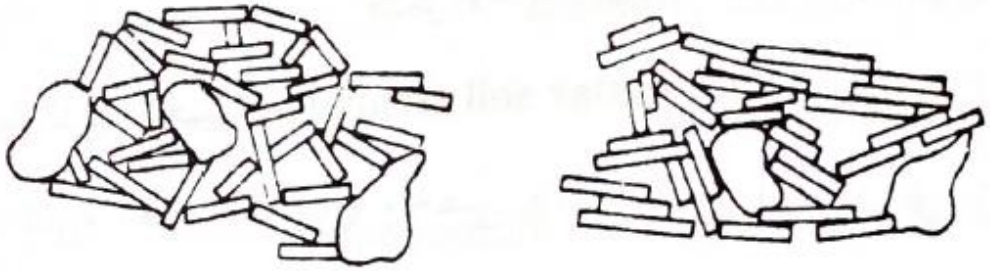
الشكل (٢-٨) بنية التربة الحبيبية (الخشنة)

تتباين هذه الترب فيما بينها وفق قيمة الكثافة النسبية فهي إما أن تكون مخلخلة أو كثيفة في توضعها وهي عموماً تتحمل الإجهادات الستاتيكية وتنهار عند الحمولات الديناميكية أو عند تغير المحتوى المائي فيها بشكل مفاجئ.

٢-٤ - ٢ بنية الترب المتماسكة:

تتضح هذه البنية بواسطة الاعتماد على المجهر الإلكتروني وهي عبارة عن تجمعات مترابطة للحبات التي يقل قطرها عن D<0.01mm وتكون عبارة عن تجمع على شكل عناقيد أو رقائق مشكلة بذلك الوحدات الأساسية للمعادن الغضارية وتكون هذه البنية إما مفرقة Dispersed structure كما في حالة الصفائح التي تتوضع بشكل متوازي مع وجود قوى تنافر فيما بينها كما في الشكل (٢-٩). أو أن تكون متكتلة على بعضها البعض Flocculated structure بسبب قوى التجاذب وتبدي هذه الأنواع من الترب مقاومة أكثر من الترب ذات البنية المفرقة .

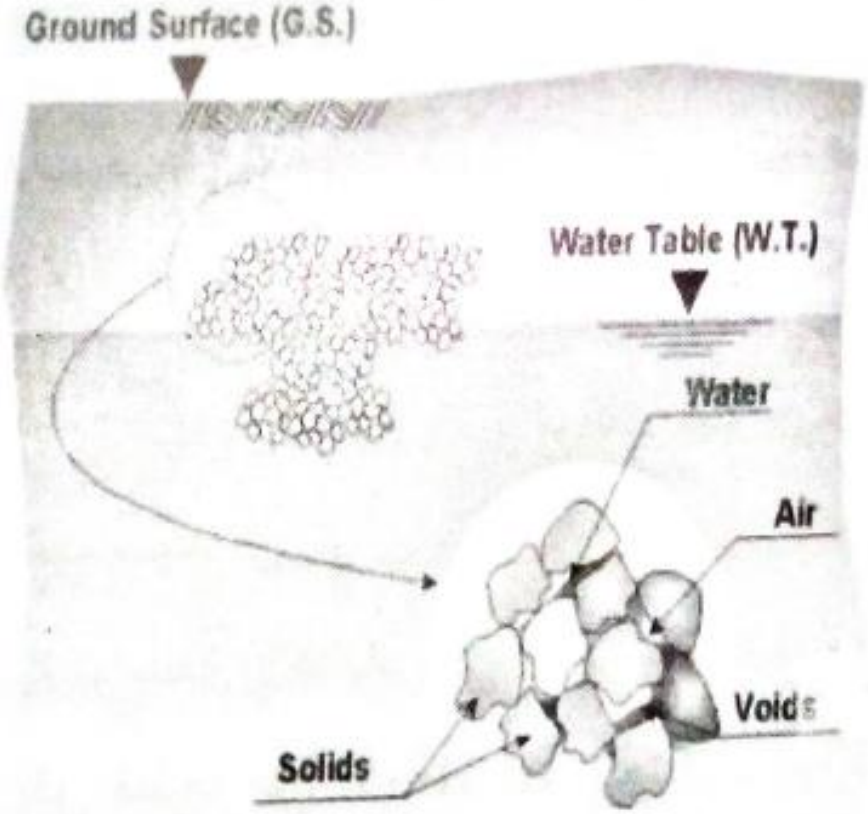
الشكل (٢-٩) بنية التربة المتماسكة (بنية مفرقة)



الشكل (٢-١٠) بنية التربة المتماسكة (Flocculated structure)

٢-٥ البنية الفيزيائية للترب (عناصر التربة) Phase Relationships:

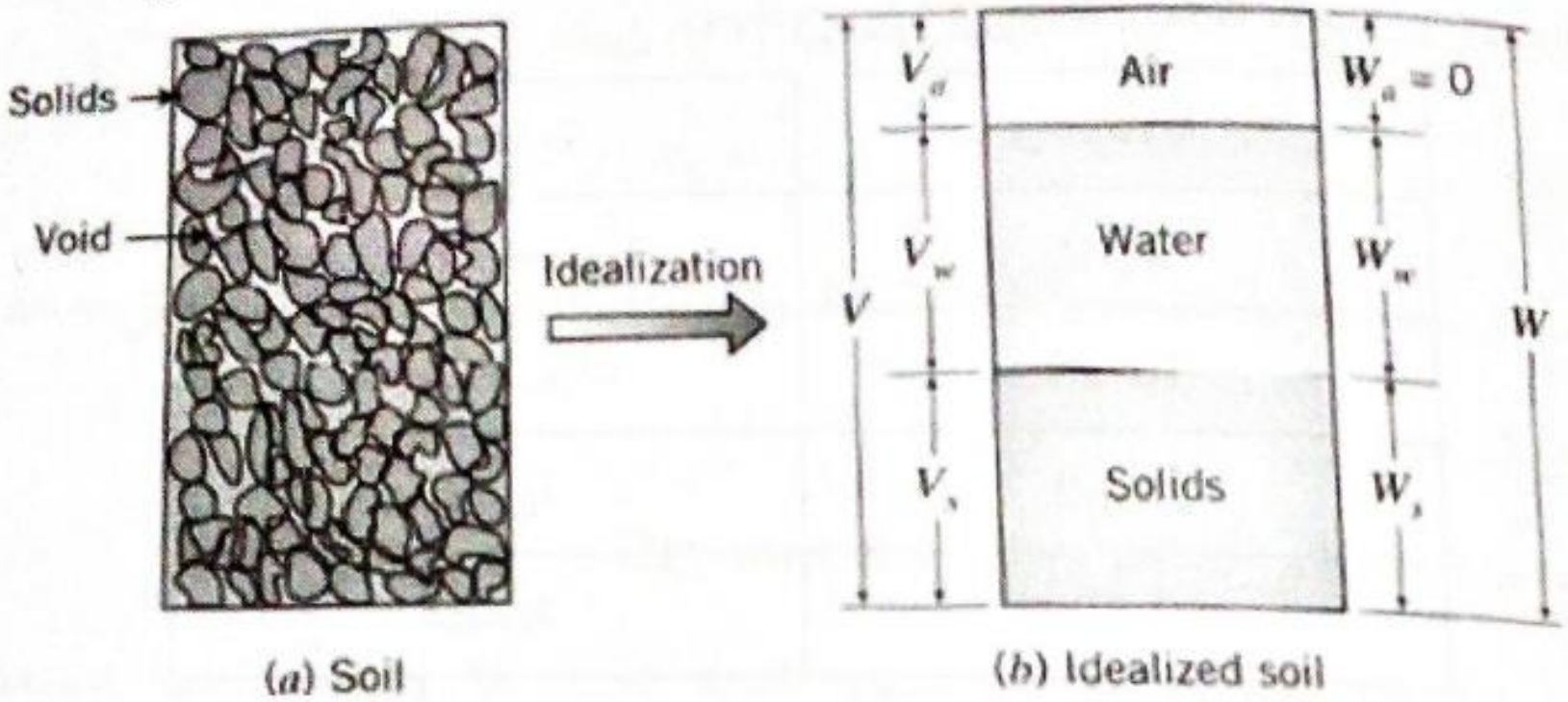
إن التربة هي مادة غير متجانسة وتتكون من تجمع ثلاثة عناصر من المادة وهي المادة الصلبة + الماء + الهواء حيث تحتوي التربة على فراغات تكون مليئة بنسب متغيرة بالماء والهواء، الشكل (٢-١١).



الشكل (٢-١١) عناصر التربة

تتألف التربة الحبيبية (المفككة) من حصى ورمل حيث تتراوح أقطار حبات الرمل من 0.06-63mm، أما الترب الناعمة (سيلت و غضار) فهي التي تكون أبعاد حباتها أقل من 0.06mm وتدعى بالترب المتماسكة.

يتم إيجاد خصائص التربة الفيزيائية مخبرياً وذلك بالاعتماد على تحليل عناصر التربة الثلاثة (مادة صلبة، ماء، هواء) وذلك لحالة ترب مشبعة جزئياً كما في الشكل:



الشكل (٢-١٢) تحليل عناصر التربة إلى حجوم وأوزان

تم الرمز إلى حجم كل عنصر من عناصر التربة بالرمز V و الوزن بالرمز W

يتضح من الشكل أن حجم الفراغات الكلية في التربة V_v هو عبارة عن مجموع حجم الفراغات الهوائية V_a وحجم الفراغات المائية V_w وبالتالي فإنه في حالة الترب المشبعة كلياً فإن حجم الفراغات الكلية يساوي حجم الفراغات المائية أي $V_v=V_w$. من الشكل يتضح أن الحجم الكلي للعينة V_T أو V هو مجموع حجوم العناصر الثلاثة أي:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \qquad (٢-١)$$

حيث: V_s حجم المواد الصلبة، V_v الحجم الكلي للفراغات، V_w حجم الماء V_a حجم الهواء للعينة الواحدة.

وكذلك الوزن الكلي W_T أو W هو مجموع وزن المادة الصلبة W_s ووزن الماء W_w أي:

$$W = W_s + W_w \qquad (٢-٢)$$

محتوى الماء أو محتوى الرطوبة Water content (w):

هو النسبة بين وزن الماء إلى وزن المادة الصلبة (الوزن الجاف) أي:

$$W = W_w / W_s \qquad (٣-٢)$$

يبين الجدول (٢-١) نسبة (محتوى) الرطوبة لأنواع مختلفة من الترب حسب النظام الألماني: (DIN 18 121-1/2)

الجدول (٢-١) قيم محتوى الرطوبة

نوع التربة	محتوى الرطوبة %
رملية أو حصوية	2-10
سيلتية ضعيفة	10-20
غضارية	20-80
عضوية	50-800

درجة الإشباع The degree of Saturation (S_r):

وهي النسبة بين حجم الماء إلى الحجم الكلي للفراغات وتتراوح بين (0-100):

$$S_r = V_w / V_v \qquad (٤-٢)$$

نسبة الفراغات Void ratio (e) :

هي نسبة حجم الفراغات الكلية V_v إلى حجم الحبات الصلبة V_s

$$e = V_v / V_s \qquad (٥-٢)$$

المسامية Porosity (n):

هي نسبة حجم الفراغات الكلية V_v إلى الحجم الكلي للعينة V وتتراوح قيمتها بين 0 و 1 وهي دوما أقل من قيمة نسبة الفراغات e لنفس العينة.

$$n = V_v / V \qquad (٢-٦)$$

والعلاقة بين نسبة الفراغات e و المسامية n يمكن تمثيلها وفق ما يلي:

$$e = \frac{n}{1-n} \quad , \quad n = \frac{e}{1+e} \qquad (٢-٧)$$

محتوى الهواء Air content:

هو نسبة حجم الهواء في العينة V_a إلى حجمها الكلي V أي: $A=V_a/V$

وزن واحدة الحجم الكلي (الرطب) Bulk unit weight γ_b:

هو النسبة بين الوزن الكلي للعينة W إلى حجمها V

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \qquad (٨-٢)$$

وتتراوح قيمها عموماً بين 18-21 kN/m^3 وكلما قلت قيمتها دل ذلك على ضعف و تخلخل في التربة.

وزن واحدة الحجم الجاف Dry unit weight γ_d:

هو نسبة الوزن الجاف W_s إلى حجم العينة الكلي V وتتراوح قيمها عموماً بين 15-20 kN/m^3 وكلما قلت قيمتها دل ذلك على إمكانية حدوث هبوطات في التربة.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \qquad (٩-٢)$$

بدراسة العلاقة بين γ_b و γ_d يتبين: $\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w}$ (١٠-٢)

وزن واحدة الحجم الصلب Solid unit weight γ_s:

هو نسبة الوزن الصلب (الجاف) W_s للعينة إلى حجمها الصلب V_s

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \qquad (٢-١١)$$

وزن واحدة الحجم المشبع Saturated unit weight γ_{sat}:

هو النسبة بين الوزن الكلي للعينة W و الحجم الكلي لها V وذلك في حالة $V_v=V_w$

أي أن الماء يشغل كافة الفراغات الهوائية (تربة مشبعة).

وزن واحدة الحجم المغمور γ' **Submerged unit weight**:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \qquad (١٢-٢)$$

أي أن التربة ينقص وزنها في حالة الغمر نتيجة لقوى دفع أرخميدس.

حيث: $\gamma_w = 1000\ kg/m^3 = 10\ kN/m^3 \approx 9.81\ kN/m^3$ (١٣-٢)

الثقل النوعي (النسبي) Specific gravity G:

هو نسبة وزن واحدة الحجم الصلب γ_s إلى وزن واحدة الحجم للماء المقطر في الدرجة $+4^{\circ}c$:

$$G = \gamma_s / \gamma_w \qquad (١٤-٢)$$

تتراوح قيمة الثقل النوعي G للمواد الصلبة في التربة بين 2-3 بينما ترتفع قيمتها في المعادن المشكلة للتربة لتصل حتى (5) كما في أكسيد الحديد، يبين الجدول التالي قيم الثقل النوعي لبعض أنواع التربة والمعادن المكونة لها:

الجدول (٢-٢) قيم الثقل النوعي G لترب ومعادن مختلفة

نوع التربة/ المعدن	الثقل النوعي G	نوع التربة / المعدن	الثقل النوعي G
حصى أو رمال	2.60-2.70	صفاح (صوديوم)	2.62-2.78
سيلت	2.68-2.70	كلورايت	2.60-2.90
غضار	2.70-2.80	بيوتيت	2.8-3.2
كاولينيت	2.64	موسكوفيت	2.76-3.1
إللايت	2.80	هورنبلند	3.0-3.47
مونتموريللونيت	2.75-2.78	ليمونيت	3.6-4.0
هالوسيت	2.0-2.55	أوليفين	3.27-3.37
صفاح (بوتاسيوم)	2.55	جبس	2.32

هناك إمكانية ربط كافة التعاريف التي تم عرضها سابقاً وذلك وفق ما يلي:

- **درجة الإشباع S_r بدلالة G و e**

$$S_r = \frac{w \cdot G}{e} \quad , \quad S_r = 1 \quad \Rightarrow \quad e = w \cdot G \qquad (٢-١٥)$$

- **محتوى الهواء A بدلالة e ,w ,G, n**

$$A = \frac{e - w \cdot G}{1+e} = n \cdot (1 - S_r) \qquad (٢-١٦)$$

- **وزن واحدة الحجم الكلي (الرطب) γ_b بدلالة n, γ_d, γ_s ,e , γ_w, w.G, S_r**

$$\gamma_b = \frac{G \cdot (1+w)}{1+e} \cdot \gamma_w = \frac{G + S_r \cdot e}{1+e} \cdot \gamma_w \qquad (٢-١٧)$$

$$\gamma_b = \gamma_s \cdot (1-n) \cdot (1+w) = \gamma_d + S_r \cdot n \cdot \gamma_w$$

- وزن واحدة الحجم المشبع γ_{sat} أي عندما $S_r = 1$ بدلالة G, γ_w, e

$$\gamma_{sat} = \frac{G+e}{1+e} \cdot \gamma_w \qquad (٢-١٨)$$

- وزن واحدة الحجم الجاف γ_d بدلالة G, γ_w, w, γ_b, e

$$\gamma_d = \frac{G}{1+e} \cdot \gamma_w = \frac{\gamma_b}{1+w} = \frac{S_r \cdot \gamma_e \cdot \gamma_w}{w \cdot \gamma_s + S_r \cdot \gamma_w} \qquad (٢-١٩)$$

- وزن واحدة الحجم المغمور γ' بدلالة G, γ_w, γ_{sat}, e

$$\gamma' = \frac{G-1}{1+e} \cdot \gamma_w = \gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma_d + (n-1) \cdot \gamma_w \qquad (٢-٢٠)$$

- نسبة الفراغات e والمسامية n بدلالة G, γ_w, γ_d

$$e = \frac{G \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad , \quad n = 1 - \frac{\gamma_d}{G \cdot \gamma_w} \qquad (٢١-٢)$$

- رطوبة الإشباع w_s بدلالة γ_w, γ_s, γ_d

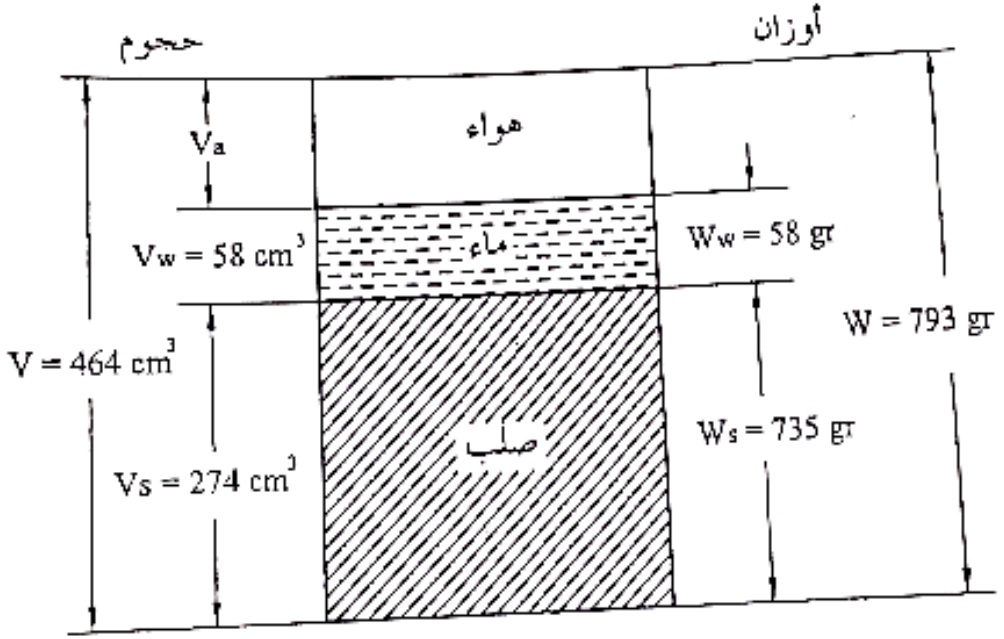
$$w_s = \gamma_w \cdot \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right) \qquad (٢٢-٢)$$

مسألة (1-4) :

عينة ترابية رطبة وزنها 793 gr وحجمها $464\ cm^3$ ووزنها الجاف 735 gr ، الوزن النوعي لحبات التربة 2,68 ، عين كلاً من نسبة الفراغ ، المسامية ، الرطوبة ودرجة الإشباع ؟

الحل :

انظر إلى الشكل (4 -1) :



الشكل (4 -1)

نلاحظ من الشكل أن :

$W = 793$ gr ; $W_s = 735$ gr ; $G = 2{,}68$

$W_w = 793 - 735 = 58$ gr

حجم الصلب :

$$V_s = \frac{735}{2,68} = 274 \text{ cm}^3$$

حجم الماء :

$$V_w = 58 \text{ cm}^3 \quad ; \quad \gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

حجم الفراغات :

$$V_v = V - V_s = 464 - 274 = 190 \text{ cm}^3$$

نسبة الفراغ :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{190}{274} = 0,693$$

المسامية :

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{190}{464} = 0,410$$

الرطوبة :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{58}{735} \times 100 = 7,9 \ (\%)$$

درجة الإشباع :

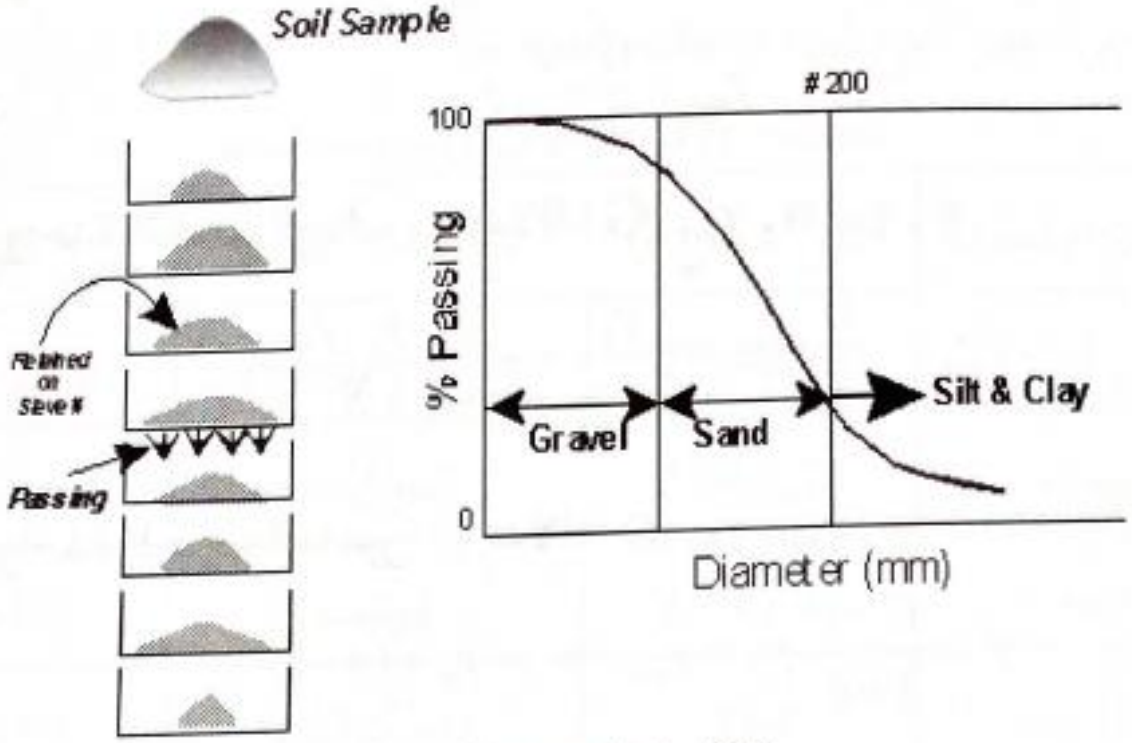
$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{58}{190} \times 100 = 30,5 \ (\%)$$

٢- ٦ التجارب المخبرية:

سيتم التعرف على بعض التجارب المخبرية الأساسية وهي تجارب التركيب الحبي للترب الخشنة والناعمة، الكثافة النسبية D_r، نسبة الفراغات الأعظمية والأصغرية، حدود القوام (حدود أتربرغ)، النفوذية، القص المباشر، وتجربة التشديد.

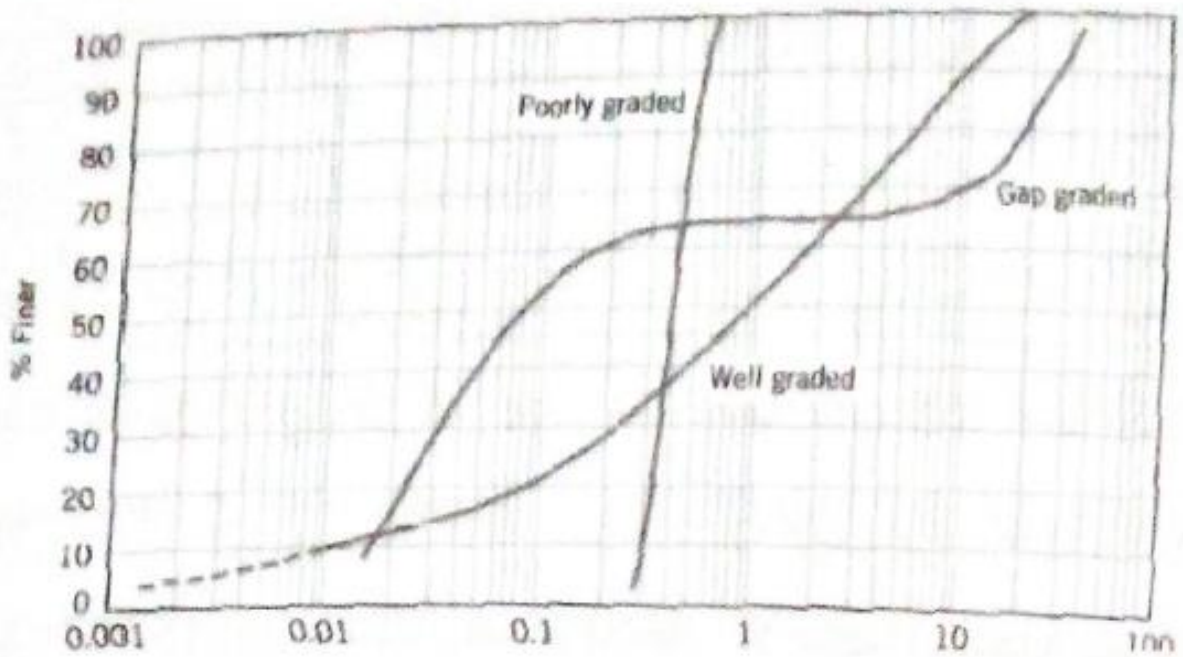
٢- ٦-١ التركيب الحبي Size distribution :

تفيد هذه التجربة في تحديد أقطار ونسبة الحبات المكونة للتربة من خلال التمثيل البياني بين أقطار الحبات (مقياس لوغاريتمي) وبين النسبة المئوية المارة (مقياس عادي)، كما في الشكل (٢-١٣) حيث تحدد أولاً كمية معروفة وزنا من التربة الجافة والمراد إجراء تجربة التركيب الحبي عليها ومن ثم تمرر هذه الكتلة عبر مجموعة من المناخل ذات الفتحات المعروفة والمرتبة من الأعلى إلى الأسفل



الشكل (٢-١٣) تجربة التركيب الحبي

لتسهيل عملية مرور التربة عبر المناخل المتتالية المتدرجة في أقطار فتحاتها يمكن الاستعانة بواسطة هزاز ميكانيكي حيث يتم قي نهاية التجربة وزن ما قد تم حجزه على كل منخل ومن ثم تدرس العلاقة بين أقطار الحبات والنسبة المئوية المارة ويتم تمثيل هذه العلاقة في منحني كما في الشكل (٢-١٤).



الشكل (٢-١٤) تجربة التركيب الحبي

يدل كل منحني من المنحيات الممثلة في الشكل (٢-١٤) على نوع معين من تربة مدروسة فهي إما أن تكون جيدة التدرج أي تحتوي على نسب من المواد الناعمة والرملية والحصوية على السواء كما في المنحني Well graded أو تكون وحيدة النوع كما في المنحني Uniform فهي في هذه الحالة تربة رملية فقط.

مسألة(٢-١)

تم إجراء تجربة التحليل الحبي على كتلة من التربة وزنها الجاف 5717 g وبلغت أوزان الكتل المحجوزة على كل منخل كما في الجدول التالي:

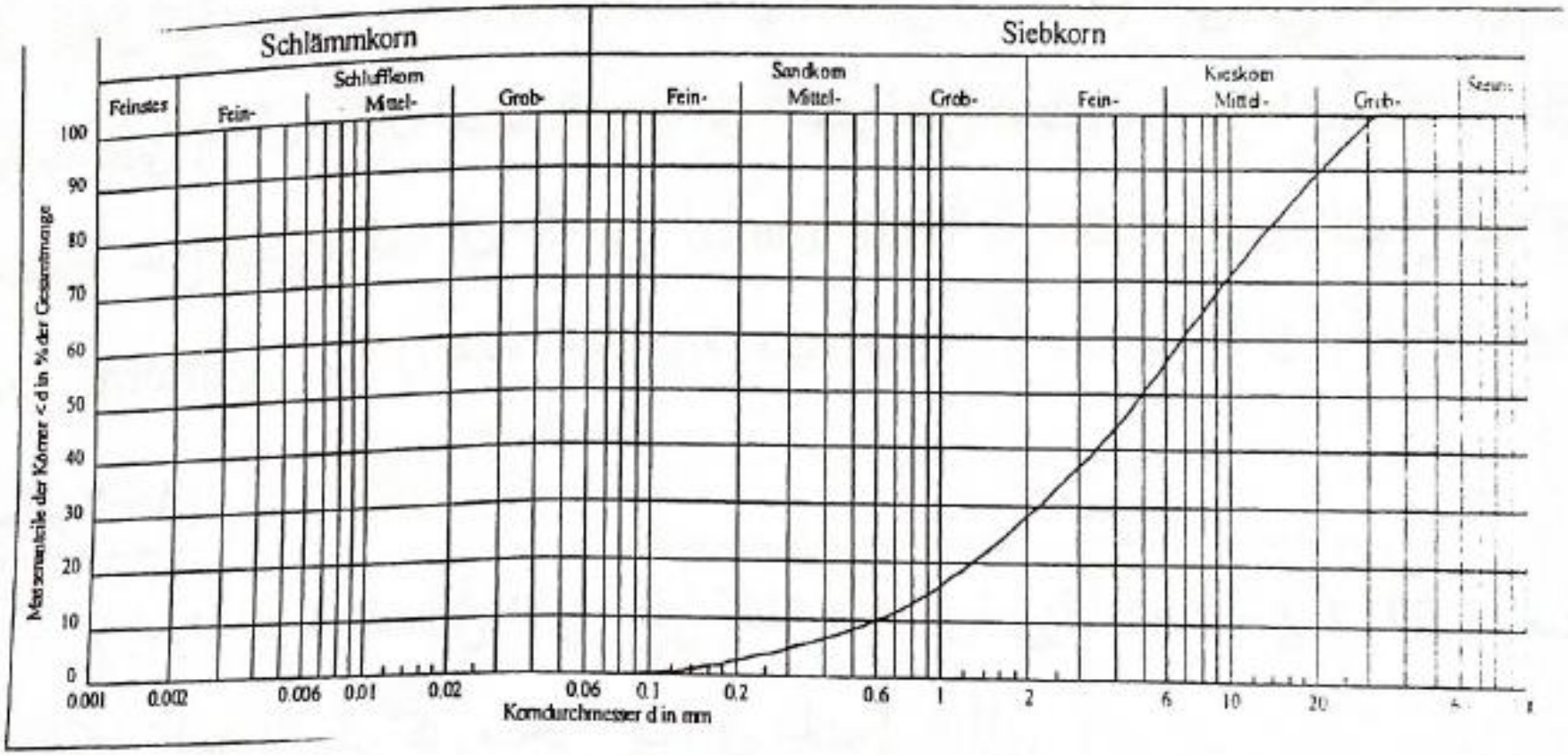
فتحة المنخل mm	31.5	16.0	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5	0.25	0.125	0.063
الوزن المحجوز g	0	884	1112	1284	827.4	741.9	428	220.5	205.5	11.3

المطلوب تمثيل نسبة المواد المارة بيانياً بدلالة أقطار الحبات.

الحل : يتم أولاً تشكيل الجدول التالي:

أقطار الحبات mm	الوزن المحجوز g	النسبة المحجوزة %	النسبة المارة %
31.5	0.00	0.00	100.00
16.0	884.50	15.47	84.53
8.0	1112.80	19.46	65.06
4.0	1284.00	22.46	42.60
2.0	827.40	14.47	28.13
1.0	741.90	12.98	15.15
0.5	428.00	7.49	7.67
0.25	220.50	3.86	3.81
0.125	205.50	3.59	0.22
0.063	11.30	0.20	0.02

تحسب النسبة المحجوزة لكل قطر كما يلي: عند القطر 16.0 mm مثلاً تكون النسبة المحجوزة % 15.47 = 5717/(100× 884.5) وبالتالي فإن النسبة المارة هي: 100-15.47 = 84.53 % وهكذا بالنسبة للأقطار الأخرى، في النهاية يتم تمثيل قيم الجدول بين النسبة المارة و أقطار الحبات كما في الشكل التالي:



من المنحني البياني يتم إيجاد قيم تفيد في تصنيف الترب وهي عامل الانتظام U أو C_u وعامل التقعر C_c وذلك بدلالة قيم أقطار الحبات وفق النسب d_{60} ,d_{10},d_{30}

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad , \quad C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \qquad (٢٣-٢)$$

وتكون التربة الرملية جيدة التدرج عندما يتحقق $C_u \geq 6$ و $C_c = (1\text{-}3)$ بينما تكون التربة الحصوية جيدة التدرج عندما يتحقق $C_u \geq 4$ و $C_c = (1\text{-}3)$ وفيما عدا ذلك فالتربة الرملية أو الحصوية هي سيئة التدرج.

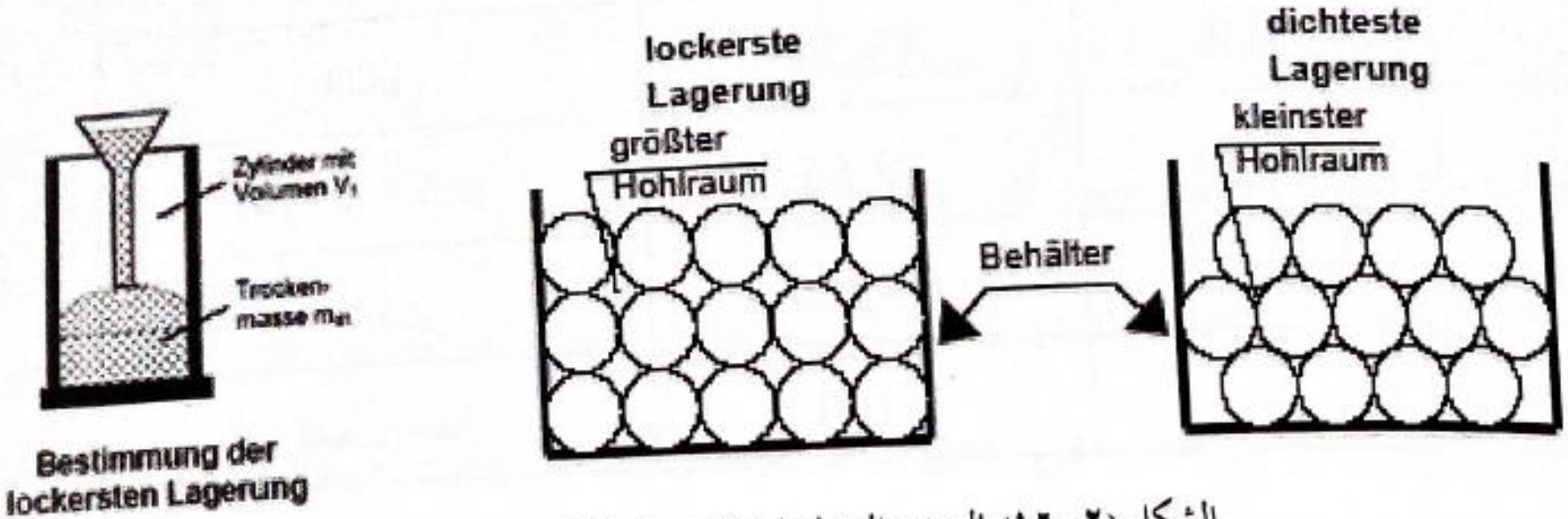
من المنحني البياني $d_{10} = 0.643$ mm و $d_{30} = 2.39$ mm و $d_{60} = 7.01$ mm وبالتالي حسب العلاقات (٢-٢٣) ينتج: $C_u = 10.9 \geq 6$ و $C_c = 1.27$ يتبين من قيم C_u و C_c أن التربة هي حصوية رملية جيدة التدرج.

عندما تزيد نسبة المواد الناعمة أي المارة من المنخل ذو الفتحة 0.06 mm عن 20% فإنه ينصح بإجراء تجربة الترسيب بالمكثاف لتصنيف المواد الناعمة وفق أقطارها

وفي أغلب الأحيان لا نقوم بتعيين المنحني الحبي كاملا وإنما نكتفي بالتحليل الحبي المنخلي فقط دون إضافة المنحني الحبي الناتج عن طريقة الترسيب، وذلك لأن معرفة المنحني الحبي للترب الناعمة ليس له فائدة عملية إلا في حالة تثبيت الترب، أما في الحالة العامة فإننا نعتمد على خواص اللدونة المتمثلة بحدود أتربرغ.

٢- ٦-٢ نسبة الفراغات العظمى والصغرى (الكثافة النسبية):

تعد قيم نسب الفراغات من القيم الأساسية التي تساعد في توصيف الترب وتحديد حالة توضعها (أي القوام) فهي عموماً إما ذات توضع مخلخل أو كثيف، الشكل (٢-١٦).



الشكل (٢-١٦) التوضع المخلخل Loose والكثيف Dense

يتم تحديد نسبة الفراغات الصغرى e_{min} لتربة (توضع مخلخل) بواسطة ملء هذه التربة في اسطوانة ذات حجم معروف بواسطة قمع، أما نسبة الفراغات العظمى e_{max} فتحدد بملء الاسطوانة بالتربة على مراحل يتم خلالها هز الاسطوانة لتكتنز ضمنها الحبات وتكون نسبة الفراغات الطبيعية e_n أو e لتربة ما محصورة بين القيمتين e_{min} و e_{max} ويتم تحديد قيمة الكثافة النسبية (Relative Density D_r) أو (I_D) من العلاقات التالية:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{V_{max} - V}{V_{max} - V_{min}} \qquad (٣١-٢)$$

تتراوح قيم D_r للتربة الرملية بين (0-100)% وكلما ازدادت قيمتها كانت ذات توضع اشد كثافة Dense وبالتالي أكثر مقاومة وبالعكس كلما نقصت قيمتها كان الرمل مخلخلاً Loose، ويمكن حساب دليل الكثافة I_n بدلالة قيم المسامية العظمى والصغرى من العلاقة:

$$I_n = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}} \qquad (٣٢-٢)$$

يبين الجدول (٢-٣) وصف التربة بدلالة قيم الكثافة النسبية D_r و دليل الكثافة I_n

الجدول (٢-٣) وصف التربة بدلالة قيم الكثافة النسبية Dr

الحالة	(I_D), D_r %	I_n %
مخلخل جداً	0-15	0-15
مخلخل	15-33	15-30
متوسط الكثافة	33-65	30-50
كثيف	65-100	50-100
كثيف جداً	>100	-

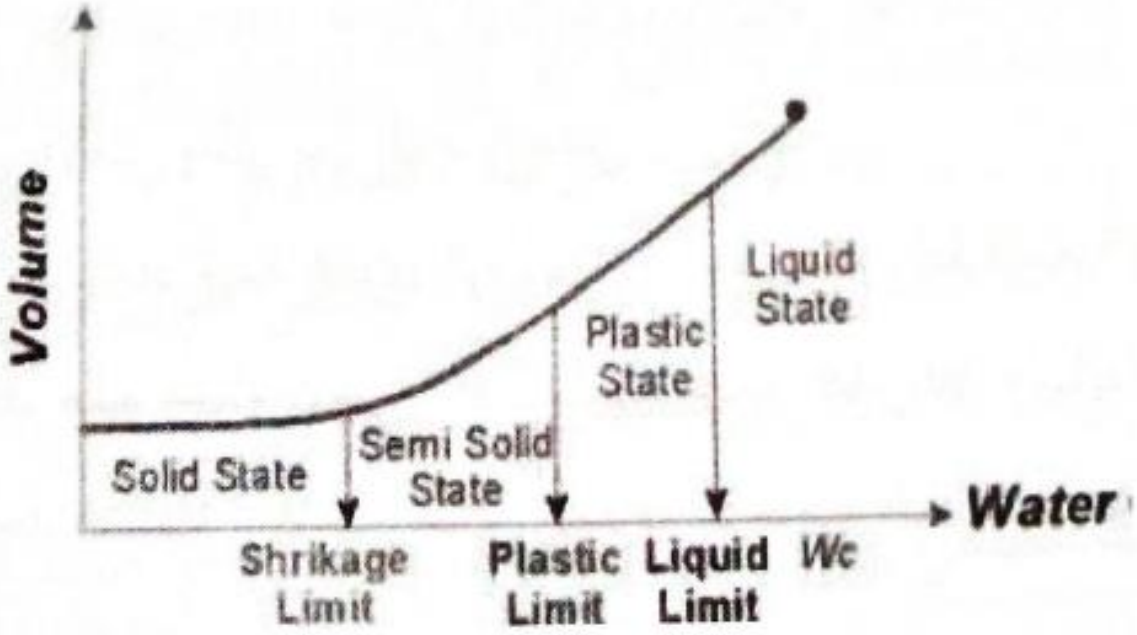
وتقاس قابلية التربة للرص بدلالة قيم نسبة الفراغات بالعلاقة التالية:

$$I_f = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{min}} \qquad (٢-٣٣)$$

٢- ٦-٣ حدود القوام (حدود أتربرغ)consistency of soil:

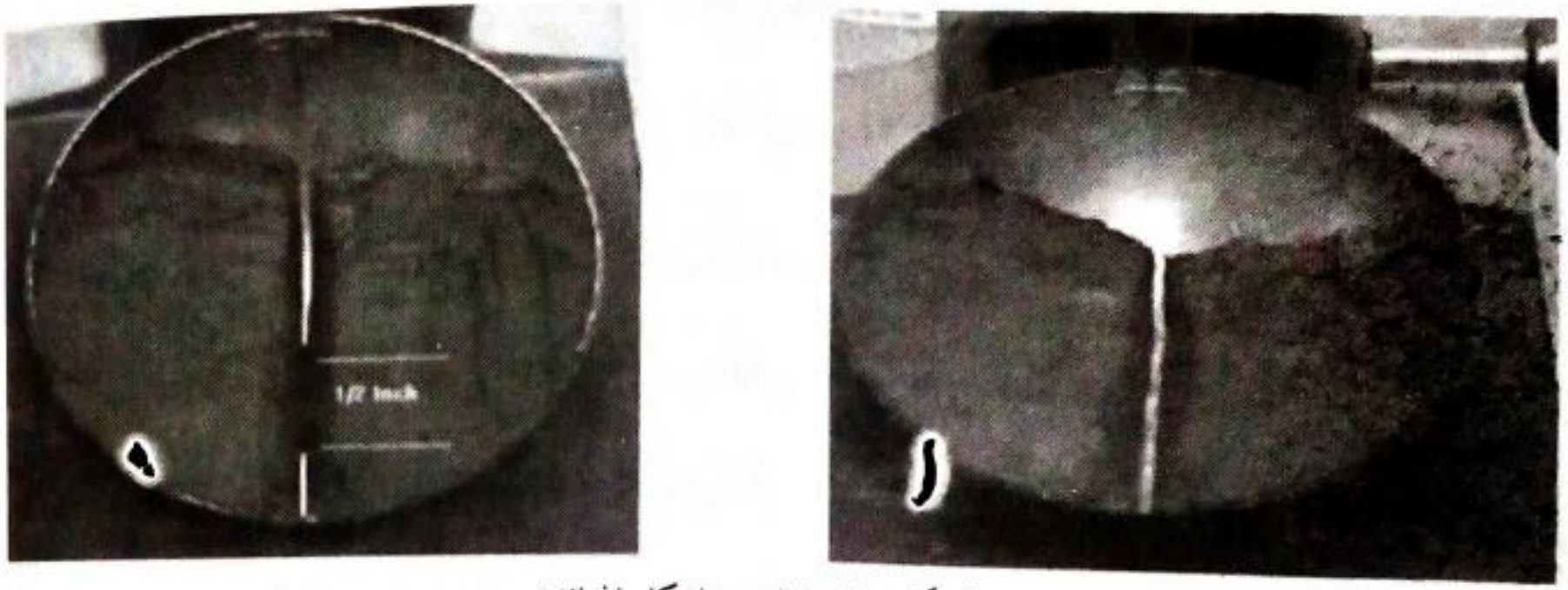
إن حدود القوام consistence للترب الغضارية هي العلاقة بين تغير محتوى الرطوبة وبين التغير الحجمي فيها فهي بمعنى آخر قابلية تشكل وتغيير سلوك هذه الترب من الحالة السائلة إلى الحالة اللدنة بدلالة محتوى الرطوبة W حيث أنه بنقصان المحتوى المائي في التربة يمكن للتربة الغضارية أن تكون في حالتها السائلة ثم تصبح طرية (لدنة) ومن ثم متوسطة القساوة (نصف صلبة) Semi Solid State وأخيراً قاسية (صلبة) Solid State

وذلك عند بلوغ قيمة المحتوى المائي فيها الحد الأدنى، ويدعى الحد الفاصل بين الحالة السائلة Liquid State والحالة اللدنة Solid Stat بحد السيولة Liquid limit ويرمز له W_L وهو كمية الرطوبة الأصغرية التي تجري عندها التربة تحت تأثير وزنها الذاتي و الحد الفاصل لانتقال التربة بسلوكها من الحالة اللدنة إلى الحالة النصف صلبة بحد اللدونة Plastic limit ويرمز له W_P و الحد الفاصل بين الحالة النصف صلبة والحالة الصلبة بحد لتقلص Shrinkage limit ويرمز له W_{sh}، الشكل (٢-١٧).



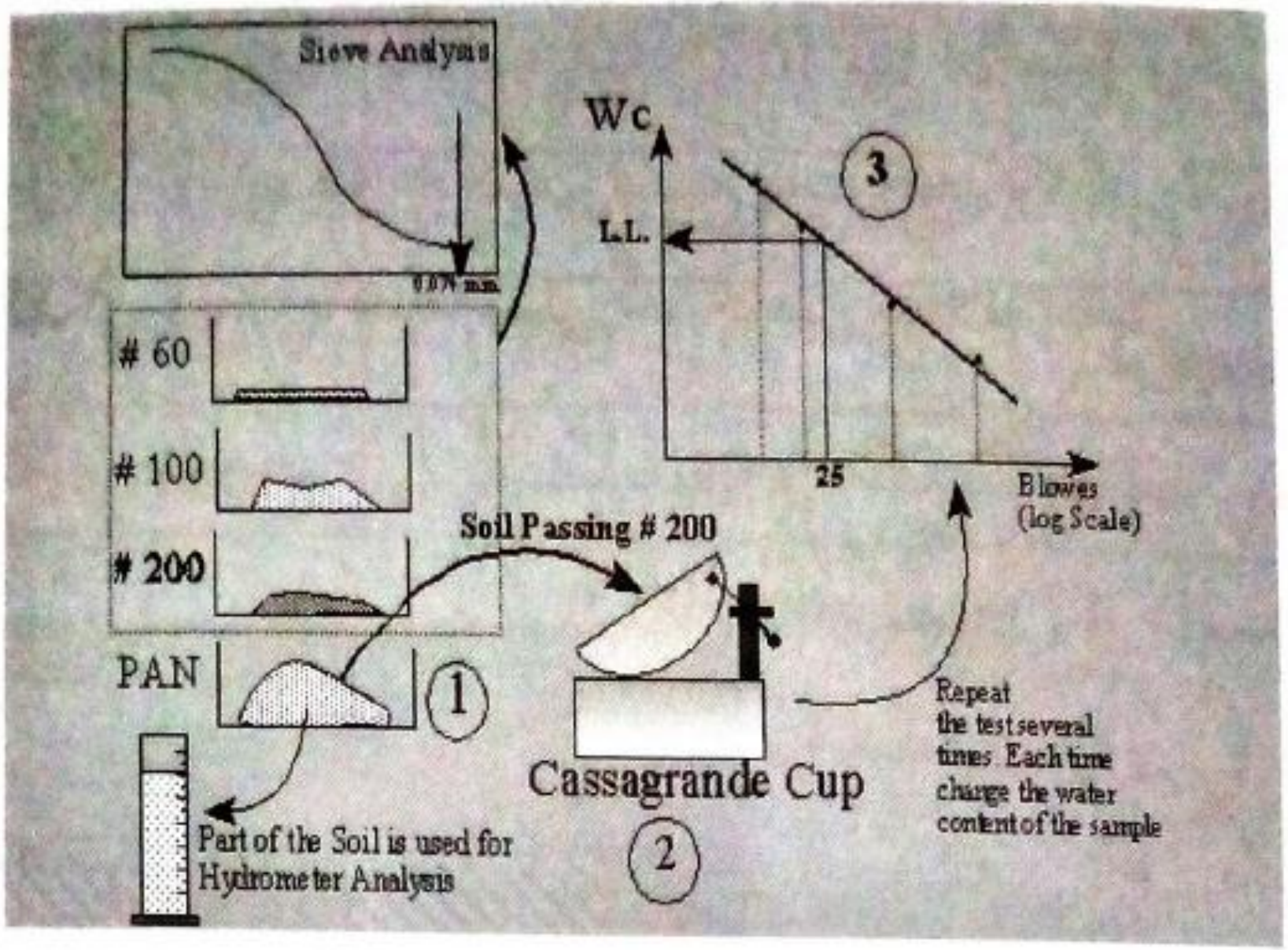
الشكل (٢-١٧) حدود القوام

أول من بدأ بتحديد قيم حدي السيولة و اللدونة بشكل مبسط هو العالم ATTERBERG ومن ثم طور العالم CASAGRANDE طريقة تجريبية لتحديد قيمة حد السيولة W_L بواسطة جهاز يدوي وأصبح الآن كهربائي، ويوضح الشكل (٢-١٨) جهاز كاساغراندي مع العينة الترابية و التي تجفف وتطحن بمطرقة مطاطية وتمرر من المنخل ذي الفتحة 425 µm.



الشكل (٢-١٨) جهاز كاساغراندي

تجرى **تجربة حد السيولة** W_L بتجهيز العينة ووضعها في (طاسه) كاساغراندي بحيث تشغل ثلثي المساحة تقريباً وبواسطة محز يتم يدوياً تشكيل ثلم طوله حوالي 40mm, وعرضه بحدود 2mm بعد ذلك وبشك يدوي أو كهربائي تدور العتلة الجانبية لتسقط الطاسة على قاعدة مطاطية قاسية مع كل دورة وبذلك يلاحظ تقارب خطي العينة حتى يتم التلاصق وتتوقف عملية الدوران عندما يكون التلاصق بحدود 10mm كما في الشكل (٢-١٨) عندها تثبت عدد الدورات N وتكرر التجربة ثلاث مرات كحد أدنى يتم في كل مرة تغيير محتوى الرطوبة في العينة وبذلك يتم تحديد قيم عدد مرات السقوط (عدد الطرقات) N من أجل قيم مختلفة لمحتوى الرطوبة w وبتمثيل العلاقة البيانية بين N و w يتم تحديد المستقيم الأمثل والمار بين نقاط التمثيل.

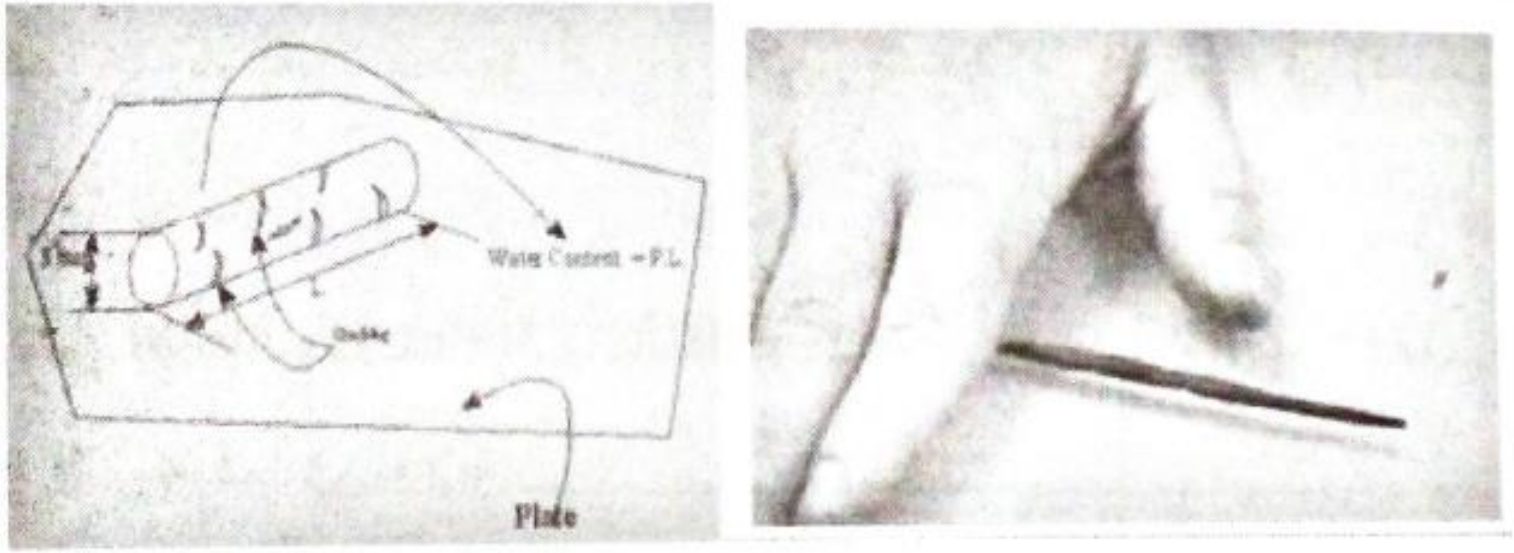


(الشكل ٢-١٩) تعيين قيمة حد السيولة WL

بعد ذلك يتم إيجاد قيمة محتوى الرطوبة من أجل عدد الطرقات N=25 إن قيمة محتوى الرطوبة عند هذه الحالة تدعى بحد السيولة ويرمز لها W_L وسابقا (L.L.) كما يمكن إيجاد قيمة حد السيولة W_L من خلال العلاقة التجريبية التالية بدلالة عدد الطرقات والرطوبة الخاصة لهذه الطرقات:

$$W_L \approx w_n \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \qquad (٣٤-٢)$$

وتجرى **تجربة حد اللدونة** W_p يدوياً وذلك بعد تحضير العينة حتى تصبح عجينة لدنة تؤخذ منها قطعة بحدود 5g وتدرج يدوياً على لوح صقيل لتصبح بشكل فتائل بسماكة حوالي 3mm وعندما لا تتشقق الفتائل يعاد عجنه لتقليل رطوبته وتكرر التجربة حتى تظهر التشققات أو ينقطع الفتيل تحدد نسبة الرطوبة أو المحتوى المائي عند مرحلة التشقق

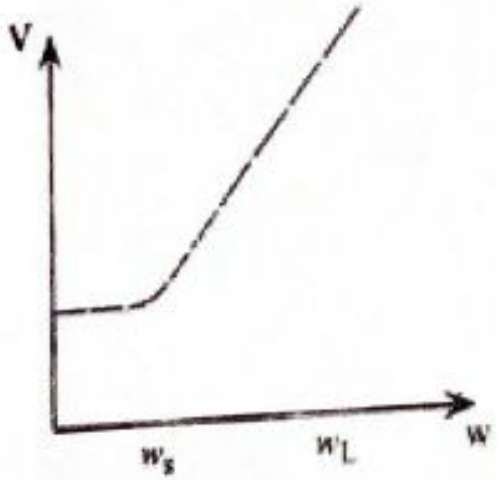


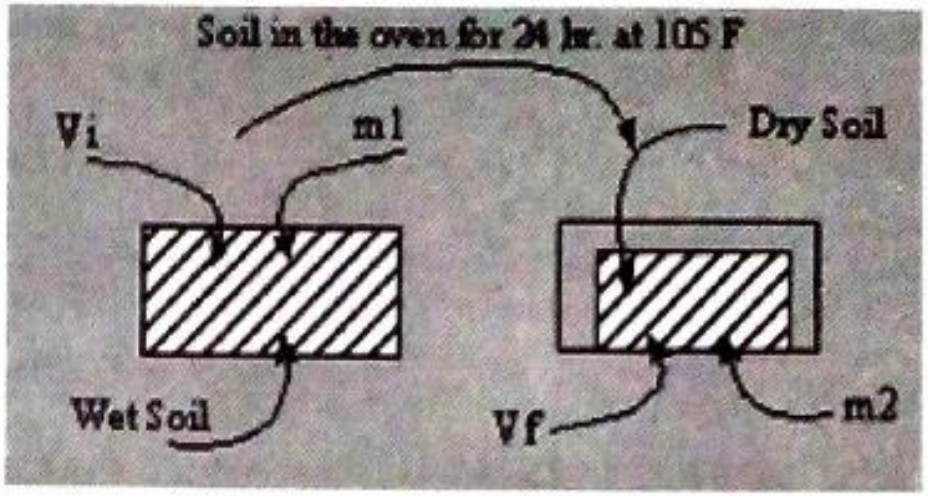
(الشكل ٢-٢٠) تعيين قيمة حد اللدونة **WP**

و تكرر التجربة ثلاث مرات كحد أدنى إن القيمة الوسطى لمحتوى الرطوبة هي ما تدعى بحد اللدونة W_P (يرمز له سابقاً .P.L)، (الشكل ٢-٢٠).

يعرف **حد التقلص** w_{sh} أو S.L. بأنه محتوى الرطوبة في العينة التي بعد تجفيفها يثبت حجمها عند مقدار معين لا يتغير بعده وتجرى التجربة إما يدوياً أو حسابياً حيث تجفف العينة الغضارية المشبعة بالفرن حرارته $105^{\circ}C$ لمدة 24 ساعة ويكون حجمها V_i أو V_1 ووزنها W_s أو m_1 قبل التجفيف لتصبح ذات حجم V_f أو V_2 ووزن m_2 بعد التجفيف (الشكل ٢-٢٦) عندها يعطى حد التقلص بالعلاقة التالية:

$$w_{sh} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2}\right) \times 100 - \frac{(V_1 - V_2)\cdot \gamma_w}{m_2} \times 100 \qquad (٣٥-٢)$$





(الشكل ٢-٢١) تعيين قيمة حد التقلص w_{sh}

تدل قيم حد التقلص على قابلية التربة للتغير الحجمي كما في الجدول التالي:

الجدول (٢-٤) التغير الحجمي بدلالة حد التقلص W_{sh}

حد التقلص W_{sh}	12 <	10-12	10 >
قابلية التغير الحجمي	صغيرة	متوسطة	كبيرة

من قيم حدود القوام (حدود أتربرغ) يمكن استنتاج دلائل تفيد في تصنيف الترب الغضارية مثل:

- **دليل اللدونة I_P (plasticity Index)**: وهو الفرق الحسابي بين حدي السيولة و اللدونة كما في العلاقة:

$$I_P = W_L - W_P \qquad (٣٦-٢)$$

يحدد هذا الدليل مجال الرطوبة التي تبقى فيه التربة لدنة السلوك ويدل الازدياد في قيمته على قابلية عالية للتغير الحجمي بسبب اللدونة العالية ويمكن تصنيف درجات اللدونة وقابلية التغير الحجمي وفق الجدول التالي:

الجدول (٢-٥) التغير الحجمي بدلالة دليل اللدونة I_P

دليل اللدونة I_P	0-5	5-15	15-40	40 <
درجة اللدونة	غير لدنة	متوسطة اللدونة	لدنة	عالية اللدونة
دليل اللدونة I_P	0-5	5-15	15-30	30 <
قابلية التغير الحجمي	قليلة		متوسطة	عالية

- **دليل السيولة I_L (Liquidity Index):**

هو الفرق بين الرطوبة الطبيعية w_n و حد اللدونة W_P منسوباً إلى دليل اللدونة I_P

$$I_L = \frac{w_n - w_P}{I_P} \qquad (٢-٣٧)$$

- **دليل القوام I_c (Consistency Index):**

هو الفرق بين حد السيولة W_L و الرطوبة الطبيعية w_n منسوباً إلى دليل اللدونة I_P

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{I_P} \qquad (٣٨-٢)$$

حيث: $I_L + I_C = 1$ وتدل هذه القيم على قوام التربة، فإذا اقتربت الرطوبة الطبيعية من قيمة حد السيولة أصبحت قيمة $I_L = 1$ وبالتالي فان $I_C = 0$ وهذا يعني أن التربة في حالة طرية وإذا اقتربت قيمة الرطوبة الطبيعية من قيمة حد اللدونة أصبحت قيمة $I_L = 0$ بالتالي فان $I_C = 1$ وهذا يعني أن التربة ذات مقاومة جيدة.

ين النظام الألماني DIN 18 122 حالة التربة الغضارية بدلالة I_L و I_C كما في الجدول:

الجدول (٢-٦) حالة التربة الغضارية بدلالة I_L و I_C

حالة التربة	I_L	I_C
سائلة	أكبر من 1	أقل من 0
طرية	1.0 - < 0.5	1.0 - < 0.5
ضعيفة	0.5 – < 0.25	0.5 - < 0.75
متماسكة	0.25 – 0	0.75 - 1.0
شبه قاسية	أقل من 0	أكبر من 1

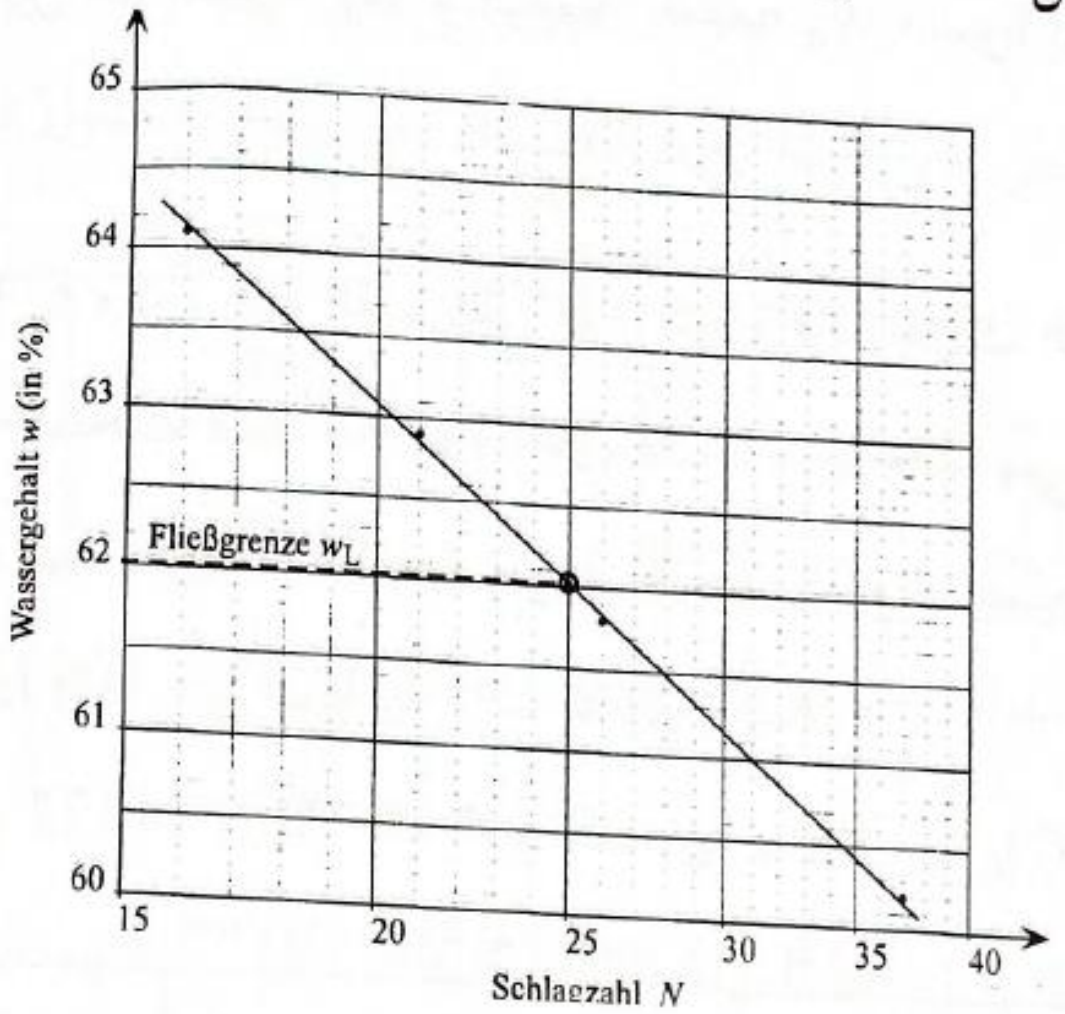
مسألة(٢-٣)

عينة غضارية بلغ وزنها الرطب مع الوعاء 261.9g ووزنها بعد التجفيف مع الوعاء 215.1g ووزن الوعاء فارغ 103.7g، المطلوب حساب قيمة حد السيولة W_L وذلك من نتائج التجربة وفق الجدول التالي:

عدد الطرقات N	37	26	21	16
المحتوى المائي w%	60.2	61.8	62.9	64.1

بفرض أن حد اللدونة $W_P = 32.3\%$، أوجد كل من قيم دليل السيولة I_L ودليل القوام I_C.

الحل: يتم أولاً تمثيل عدد الطرقات بدلالة المحتوى المائي كما في الشكل:



من الشكل أعلاه ومن القيمة N = 25 يتم تحديد المحتوى المائي المقابل لهذه القيمة وهي

قيمة حد السيولة أي $W_L = 62\%$.

يتم تحديد المحتوى المائي w (نسبة الرطوبة) من العلاقة التالية:

$$w = \frac{261.9 - 215.1}{215.1 - 103.7} = 0.42$$

من العلاقات (٢-٣٦)، (٢-٣٧)، (٢-٣٨) يتم تحديد القيم التالية:

دليل اللدونة $I_P = 62.0 - 32.3 = 29.7\% = 0.297$

دليل السيولة $I_L = \frac{0.42 - 0.323}{0.297} = 0.327$

دليل القوام $I_c = \frac{0.62 - 0.42}{0.297} = 0.673$

يتضح من النتائج أن الغضار يمكن أن يصنف طري وذلك وفق النظام الألماني.

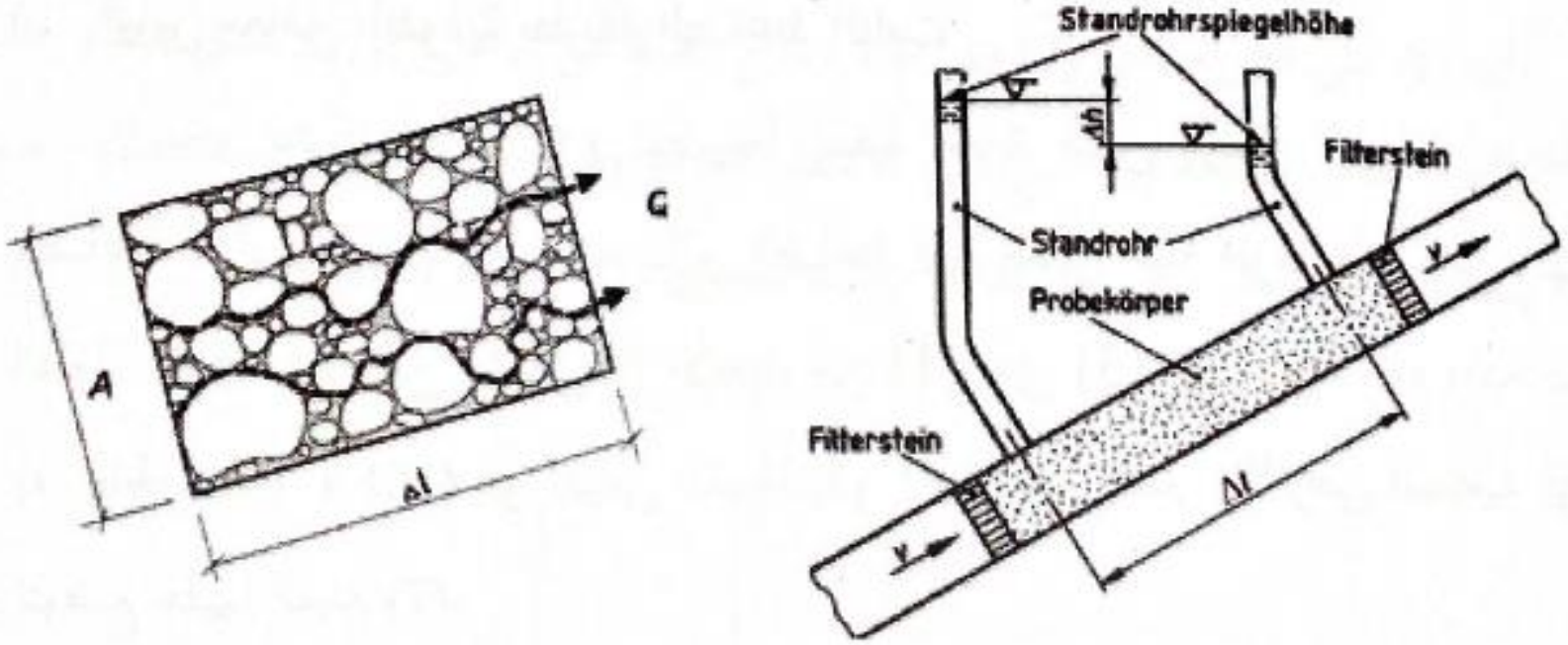
٢- ٦-٤ النفوذية Permeability:

تعرف نفوذية التربة بأنها كمية الماء المارة في التربة بتأثير ضاغط مائي Δh عبر مقطع محدد بمسار طوله Δl وذلك خلال فترة زمنية محددة (الشكل ٢-٢٢).

وقد أعطى من قبل Darcy علاقة الجريان الصفحي والمعروفة بعلاقة دارسي:

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \qquad (٣٩-٢)$$

ويرمز لمعامل النفوذية بـ k ولها نفس واحدة السرعة (m/s)



تتعلق نفوذية الترب بشكل مباشر بنوعية التربة وبشكل خاص بحالة توضع هذه التربة وقيمة نسبة الفراغات e وبدرجة الحرارة التي تؤثر على لزوجة الماء ضمن التربة.

إن قياس معامل النفوذية k للتربة يفيد في إيجاد الطريقة الأفضل لتصريف المياه الموجودة في موقع العمل وفي تقدير التغير في منسوب البساط المائي كما يفيد في تمثيل شبكة الجريان تحت موقع التأسيس وأخيراً فإنه يساعد في تقدير قيم الهبوطات في موقع التأسيس

تصنف النفوذية في الترب بحسب قيمة معامل النفوذية إلى خمسة أصناف كما في الجدول التالي بحسب النظام الألماني DIN 18 130:

الجدول (٢–٧) تصنيف الترب بدلالة قيمة معامل النفوذية k

نوع التربة	حالة النفوذية في التربة	k (m/s)
غضار غير متشقق	ضعيفة جداً	$10^{-8} - 10^{-12}$
سيلت غضاري	ضعيفة	$5.10^{-6} - 10^{-8}$
سيلت و رمل ناعم جداً	نفوذه	$5.10^{-5} - 10^{-7}$
رمل	نفوذية كبيرة	$10^{-3} - 10^{-4}$
حصى رملي	عالية النفوذية	$2.10^{-2} - 10^{-3}$

يمكن قياس معامل النفوذية k مخبرياً وحقلياً ففي المخبر يمكن تنفيذ التجربة بطريقتين:

١. طريقة الضاغط الثابت

٢. طريقة الضاغط المتغير

٢- ٦-٥ تصنيف التربة Soil classification:

أنظمة تصنيف التربة Soil classification schemes

- يلجأ المهندسون الى تصنيف التربة اعتماداً على الأنظمة أو الكودات المتوفرة والمعتمدة مثل نظام (AASHTO)

American Association of State Highway and Transportation Officials highways

- ونظام تصنيف التربة الموحد USCS

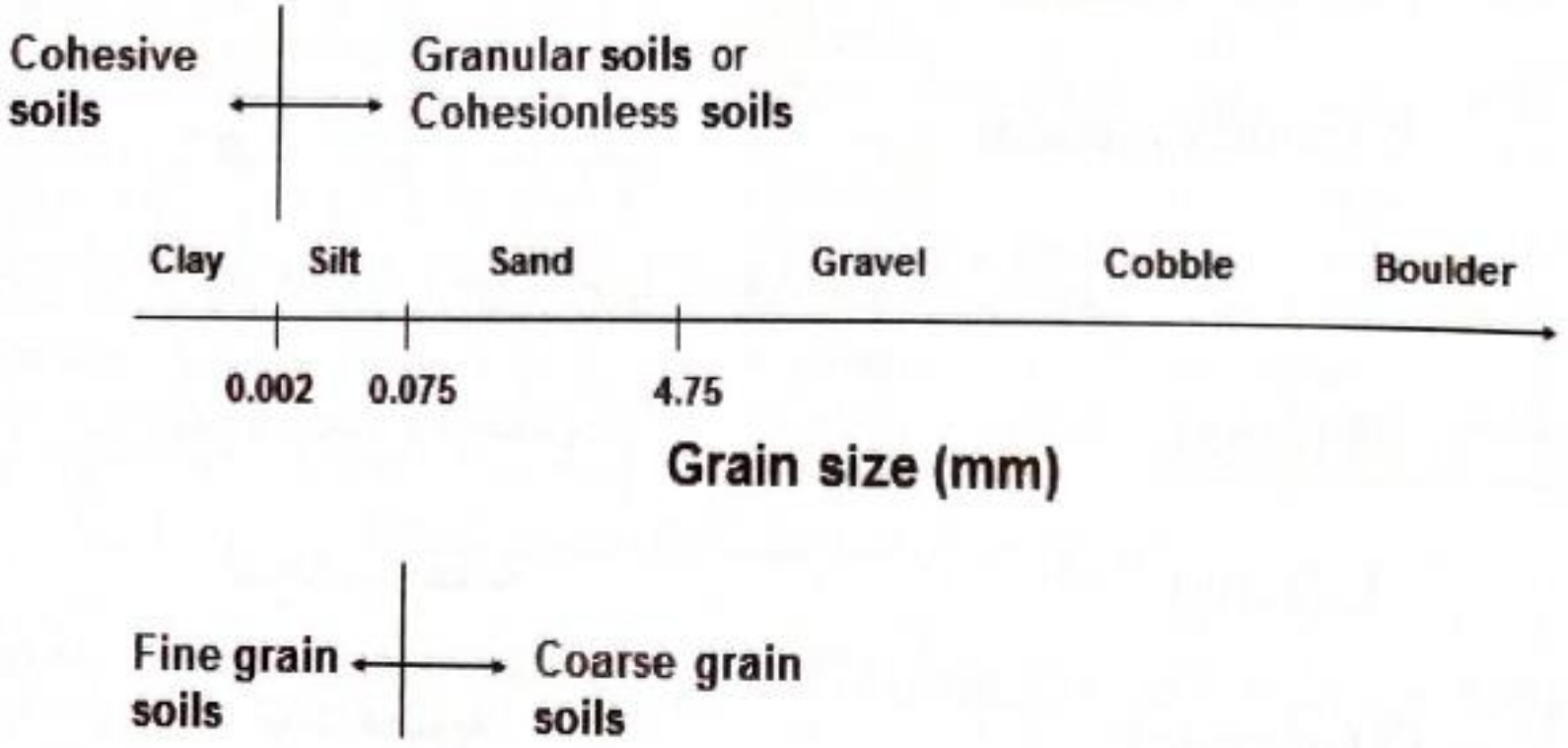
Unified Soil Classification System

يفيد تصنيف التربة في تحديد خواص ومواصفات هذه التربة في منطقة التأسيس أو تلك التي تستخدم في أعمال الطرق والردم وغيرها.

- سيتم في هذا المنهاج التعرف على نظام التصنيف الموحد للتربة USCS

التجارب المعتمدة في التصنيف

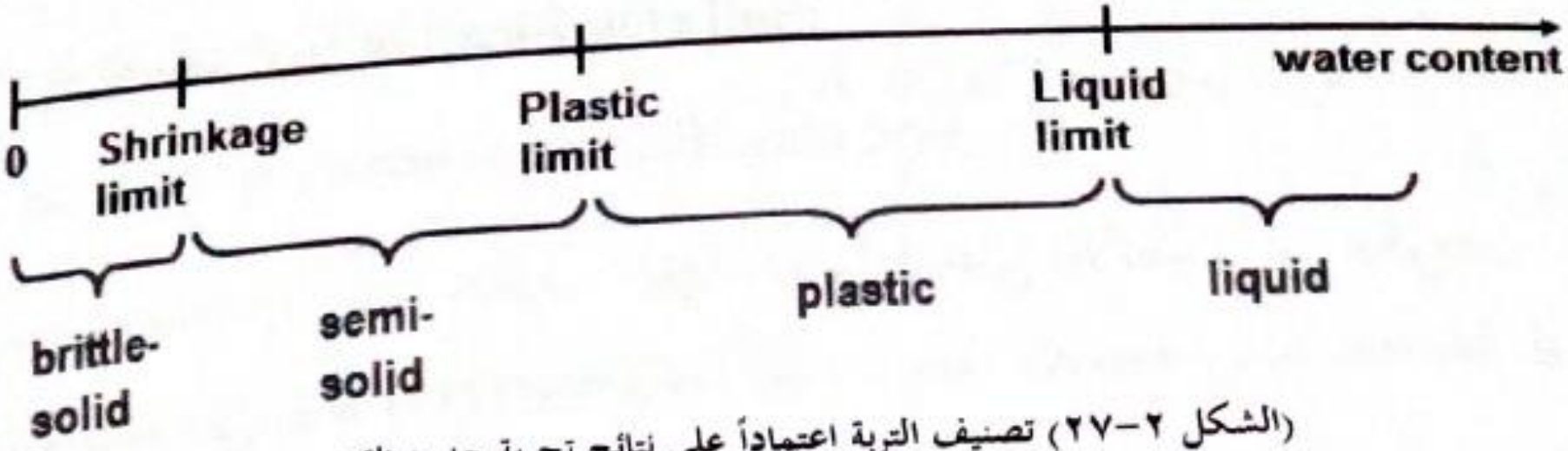
١- تجربة التركيب الحبي: من خلال معرفة نسب واقطار حبات التربة يمكن تصنيفها ضمن مجموعات كما يبين الشكل



(الشكل ٢-٢٦) تصنيف التربة اعتماداً على نتائج تجربة التحليل الحبي

٢- تجربة حدود القوام Atterberg Limits :

يستفاد من تجربة حدود القوام في تحديد حالة التربة الناعمة من حيث درجة اللدونة يالقياس بقيمة دليل اللدونة I_p كما يوضح الشكل:



(الشكل ٢-٢٧) تصنيف التربة اعتماداً على نتائج تجربة حدود القوام

يعتبر نظام التصنيف USCS من الأنظمة الدقيقة والمفصلة وهي بآن واحد مبسطة وسهلة الاستخدام يستخدم هذا النظام رموز تميز مجموعات التربة اعتماداً على حجم ذراتها، مثل:

- G – gravel (حصى) حجارة
- S – sand رمل
- M – silt سيلت
- C – clay غضار

هذه الرموز يمكن أن تكون مقرونة برموز أخرى تتعلق بخصائص التدرج الحبي مثل :

W (well graded)	جيد التدرج
P (poorly graded)	سيىء التدرج

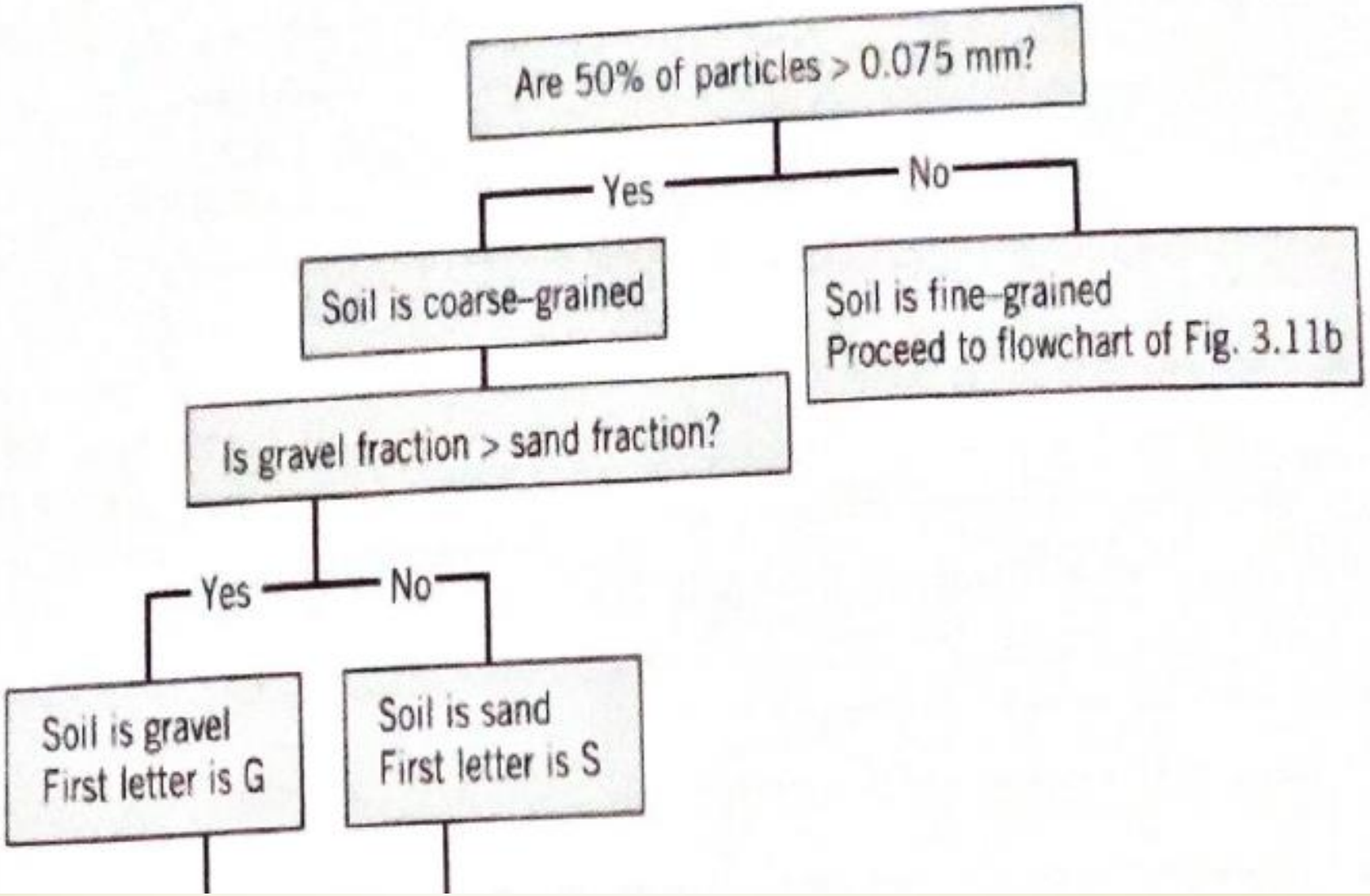
كما يمكن أن تكون مقرونة برموز أخرى تتعلق بخصائص اللدونة مثل:

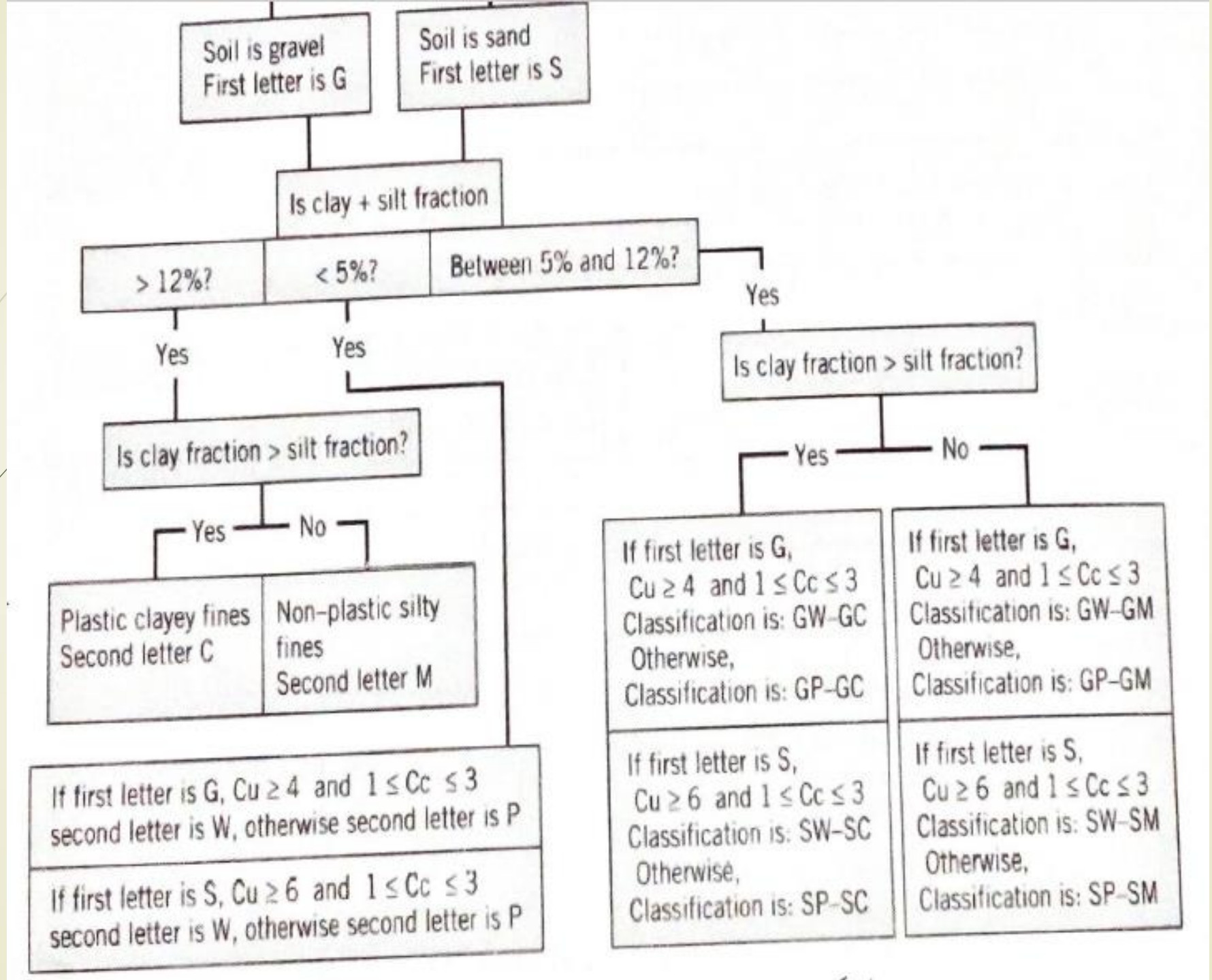
لدونة عالية (مرتفعة)	H (high)
لدونة منخفضة	L (Low)
مواد عضوية	O (organic)

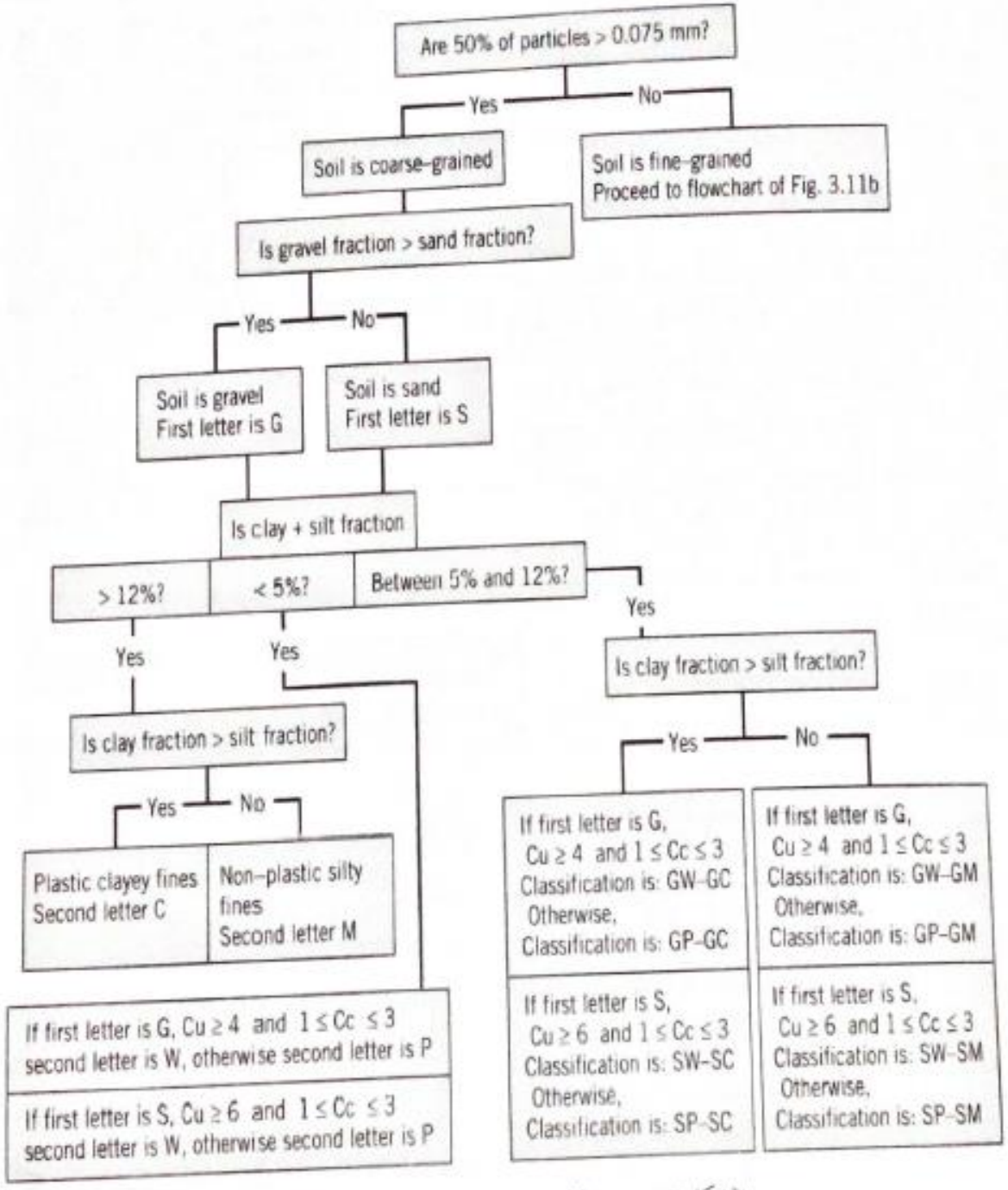
أمثلة:

غضار منخفض اللدونة	CL (clay soil with low plasticity)
رمل سيىء التدرج	SP (poorly graded sand)

مخطط تصنيف التربة الموحد USCS للترب الخشنة




Soil is gravel
First letter is G
Soil is sand
First letter is S
Is clay + silt fraction
> 12%?
< 5%?
Between 5% and 12%?
Yes
Yes
Yes
Is clay fraction > silt fraction?
Is clay fraction > silt fraction?
Yes
No
Yes
No
Plastic clayey fines
Second letter C
Non-plastic silty fines
Second letter M
If first letter is G, Cu ≥ 4 and 1 ≤ Cc ≤ 3
second letter is W, otherwise second letter is P
If first letter is S, Cu ≥ 6 and 1 ≤ Cc ≤ 3
second letter is W, otherwise second letter is P
If first letter is G,
Cu ≥ 4 and 1 ≤ Cc ≤ 3
Classification is: GW-GC
Otherwise,
Classification is: GP-GC
If first letter is G,
Cu ≥ 4 and 1 ≤ Cc ≤ 3
Classification is: GW-GM
Otherwise,
Classification is: GP-GM
If first letter is S,
Cu ≥ 6 and 1 ≤ Cc ≤ 3
Classification is: SW-SC
Otherwise,
Classification is: SP-SC
If first letter is S,
Cu ≥ 6 and 1 ≤ Cc ≤ 3
Classification is: SW-SM
Otherwise,
Classification is: SP-SM

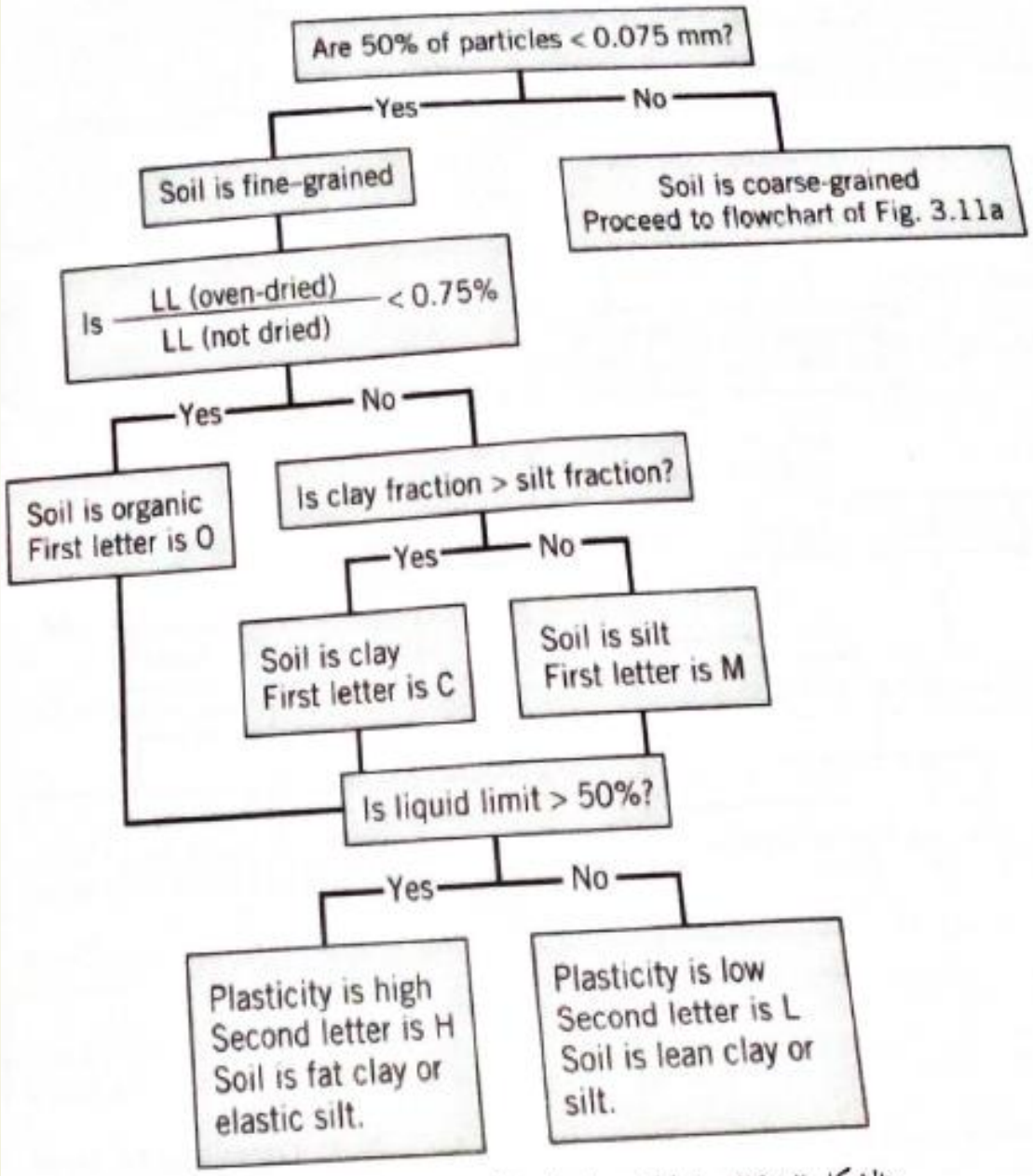


(الشكل ٢-٢٨) مخطط تصنيف التربة الخشنة وفق USCS

هل 50% من المواد أكبر من 0.075 mm أي أن المواد خشنة، في هذه الحالة يمكن الاستعانة بالمخطط النهجي السابق لتحديد صنف التربة واختيار الرمز الملائم له.

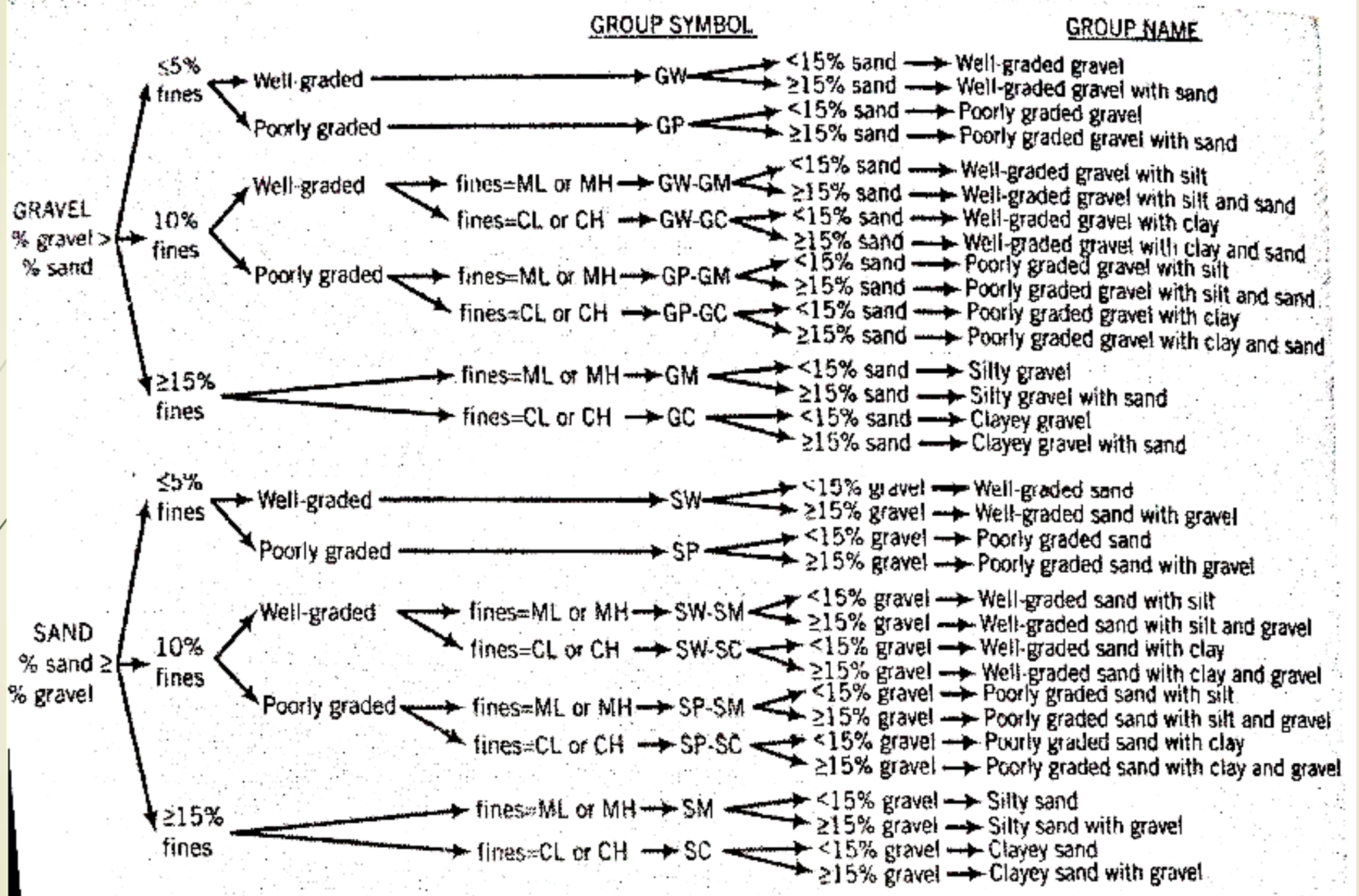
أما إذا كانت نسبة المواد المارة من المنخل 0.075 mm أكبر من 50% فالمواد ناعمة ونلجأ في هذه الحالة إلى المخطط النهجي الآخر الخاص بالمواد الناعمة لتصنيف هذه التربة:

مخطط تصنيف التربة الموحد USCS للترب الناعمة



(الشكل ٢-٢٩) مخطط تصنيف التربة الناعمة وفق USCS

كما يمكن الاعتماد على التحليل التالي في تصنيف التربة للنظام الموحد

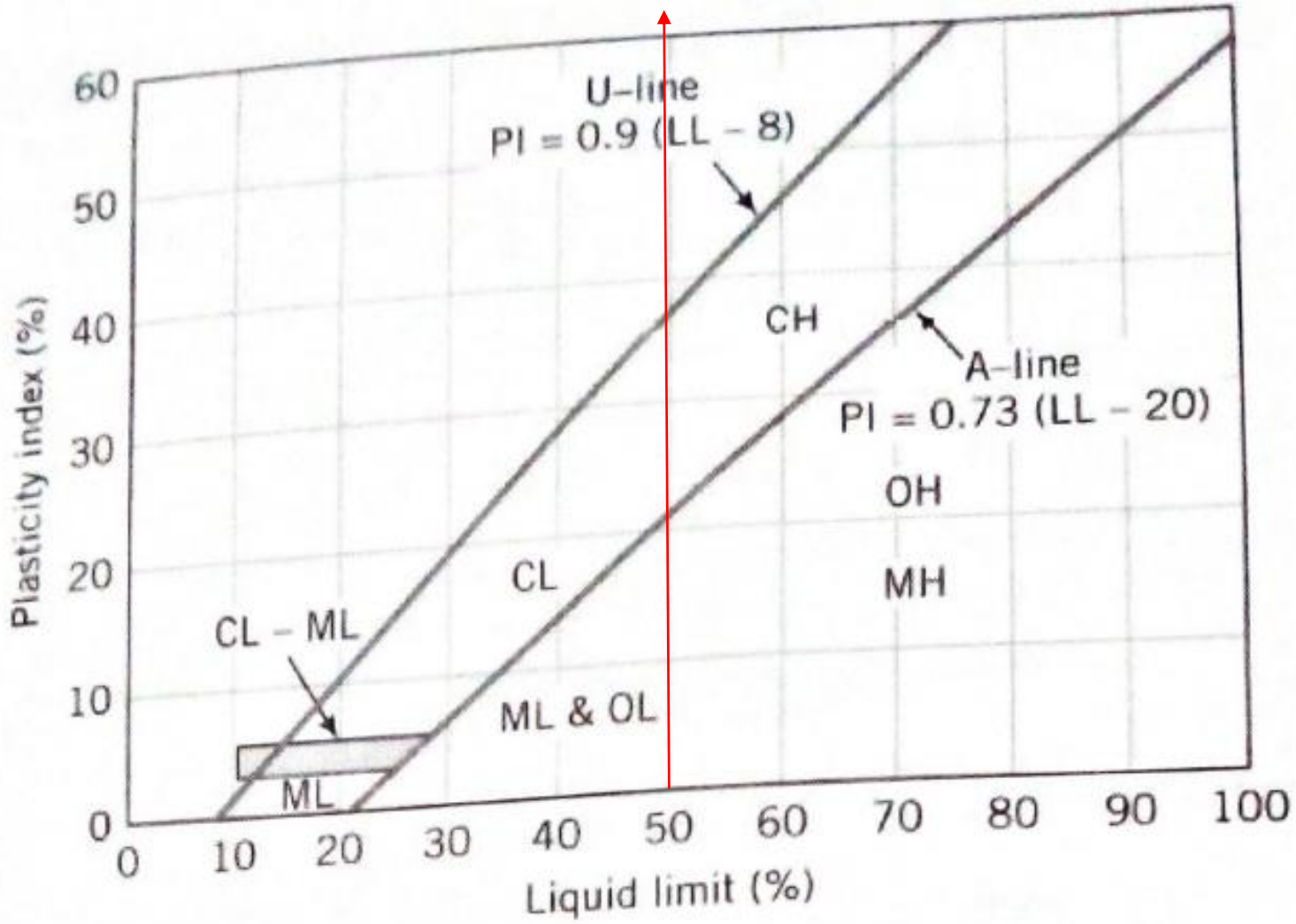


ote—Percentages are based on estimating amounts of fines, sand, and gravel to the nearest 5%.

GROUP SYMBOL				GROUP NAME
CL	<30% plus No. 200	<15% plus No. 200		Lean clay
		15-25% plus No. 200	% sand ≥% gravel	Lean clay with sand
	≥30% plus No. 200	% sand ≥% of gravel	<15% gravel	Sandy lean clay
			≥15% gravel	Sandy lean clay with gravel
		% sand <% gravel	<15% sand	Gravelly lean clay
			≥15% sand	Gravelly lean clay with sand
ML	<30% plus No. 200	<15% plus No. 200		Silt
		15-25% plus No. 200	% sand ≥% gravel	Silt with sand
			% sand <% gravel	Silt with gravel
	≥30% plus No. 200	% sand ≥% of gravel	<15% gravel	Sandy silt
			≥15% gravel	Sandy silt with gravel
		% sand <% gravel	<15% sand	Gravelly silt
			≥15% sand	Gravelly silt with sand
CH	<30% plus No. 200	<15% plus No. 200		Fat clay
		15-25% plus No. 200	% sand ≥% gravel	Fat clay with sand
			% sand <% gravel	Fat clay with gravel
	≥30% plus No. 200	% sand ≥% of gravel	<15% gravel	Sandy fat clay
			≥15% gravel	Sandy fat clay with gravel
		% sand <% gravel	<15% sand	Gravelly fat clay
			≥15% sand	Gravelly fat clay with sand
MH	<30% plus No. 200	<15% plus No. 200		Elastic silt
		15-25% plus No. 200	% sand ≥% gravel	Elastic silt with sand
			% sand <% gravel	Elastic silt with gravel
	≥30% plus No. 200	% sand ≥% of gravel	<15% gravel	Sandy elastic silt
			≥15% gravel	Sandy elastic silt with gravel
		% sand <% gravel	<15% sand	Gravelly elastic silt
			≥15% sand	Gravelly elastic silt with sand

Note—Percentages are based on estimating amounts of fines, sand, and gravel to the nearest 5%.

تصنف الترب الناعمة كما رأينا من خلال نتائج تجارب حدود القوام كما يمكن الاعتماد على المخطط الموضح في الشكل لتحديد نوعية التربة الناعمة:



(الشكل ٢-٣١) تصنيف التربة اعتماداً على نتائج تجربة حدود القوام

مسألة(٢-٥): ليكن لدينا نتائج تجربة التحليل الحبي التالية:

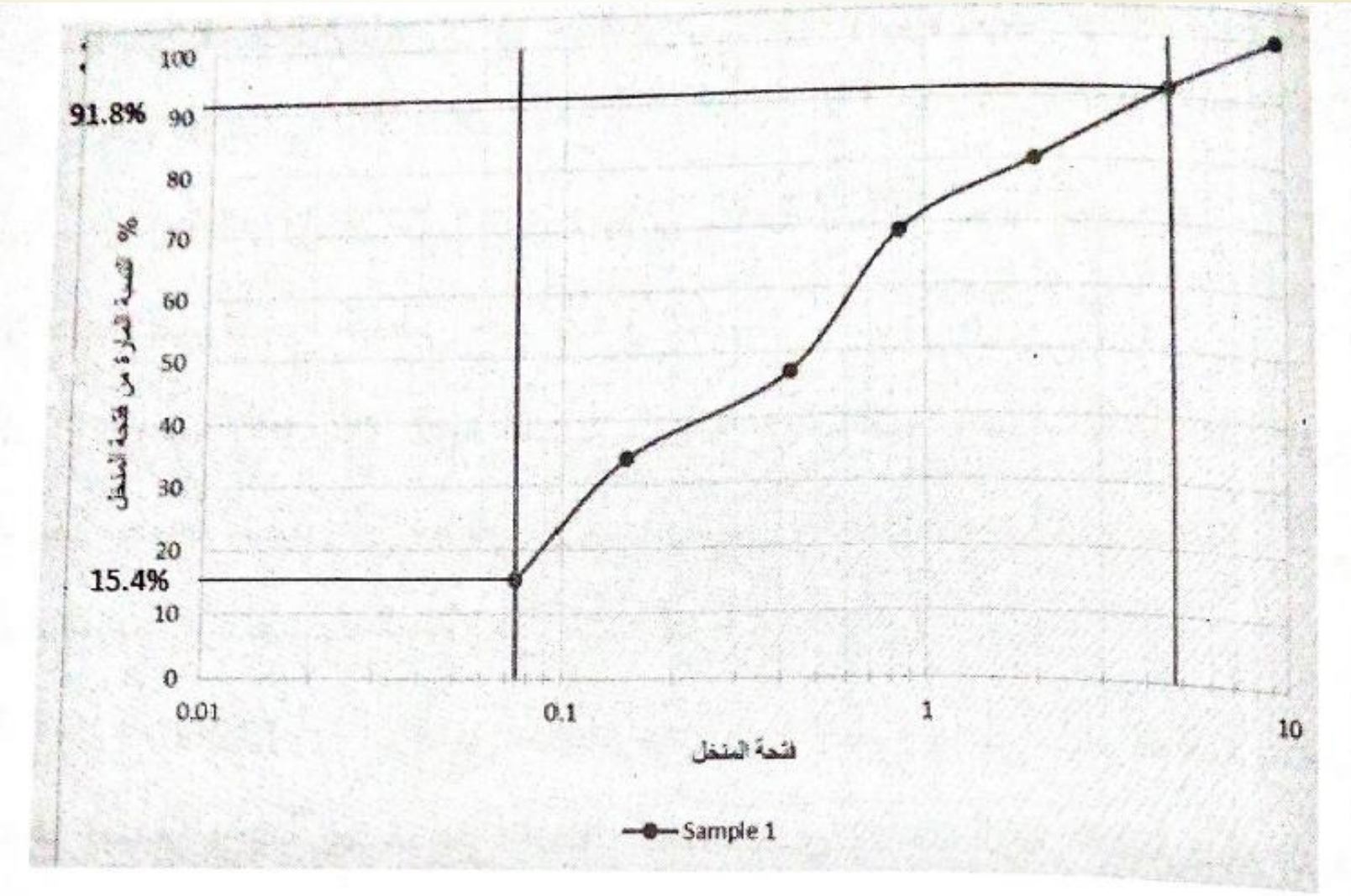
Sieve #	Diameter mm	% Retained	% Finer
3/8"	9.53	0	100
4	4.75	8.2	91.8
10	2	11.7	80.1
20	0.85	11.2	68.9
40	0.425	21.9	47
100	0.15	13.1	33.9
200	0.075	18.5	15.4

المطلوب تصنيف هذه التربة إذا علمت أن:

حد السيولة للعينة WL=62% وحد اللدونة Wp=20%

الحل:

يتم أولاً رسم منحني التحليل الحبي لهذه العينة (فتحة المنخل- النسبة المارة)، فيكون:



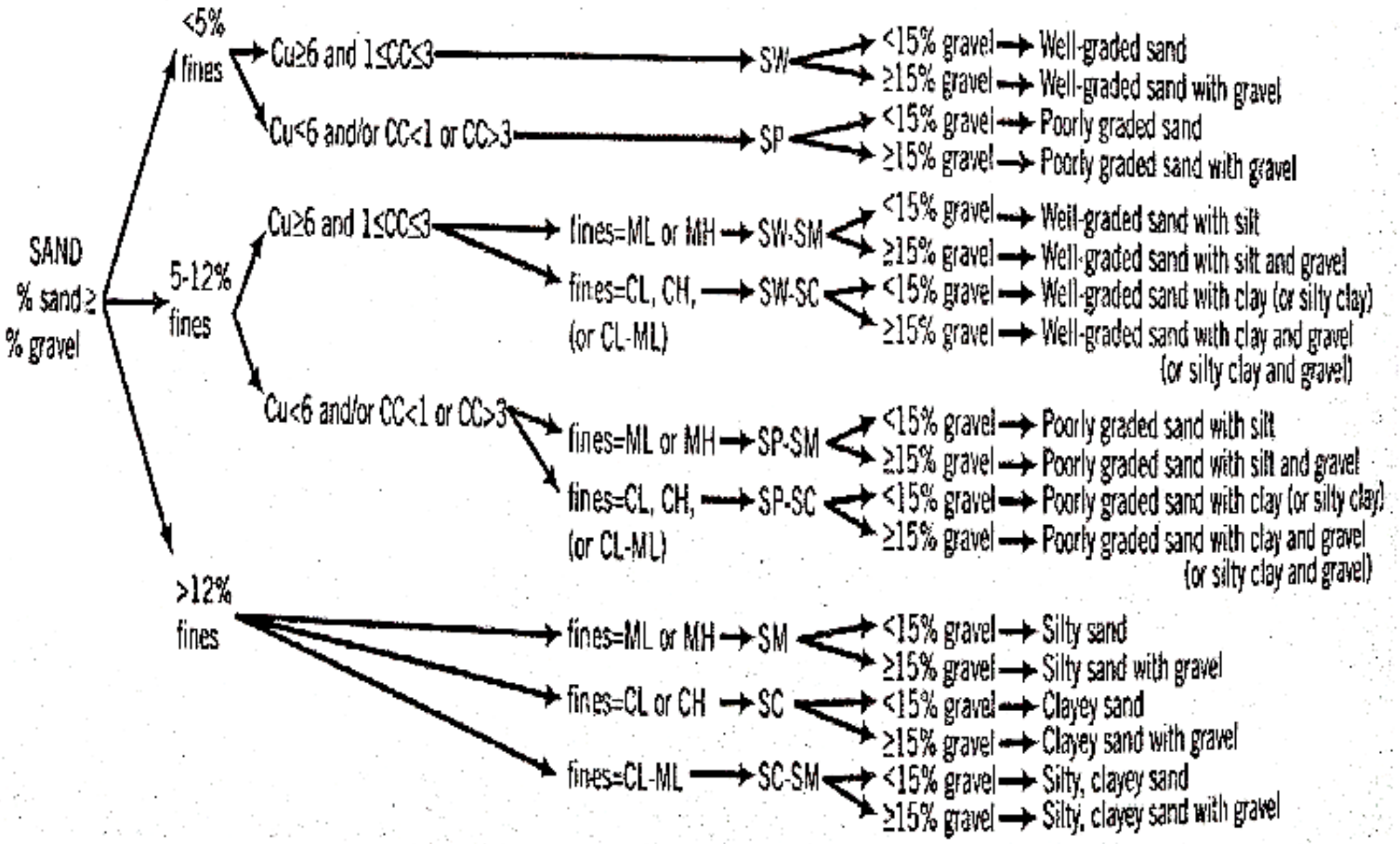
يلاحظ أن نسبة المواد الناعمة (أصغر من 0.075mm) هي 15.4%

ونسبة الرمل في العينة هي 76.4%

تكون نسبة الحصويات هي نسبة المواد المحجوزة على المنخل ذو الفتحة 4.75mm و هي

تساوي 100-91.8=8.2%

تحليل النتائج يكون الاستعانة بالمخطط التالي:



يلاحظ من المخطط السابق أن في حالة الترب الخشنة (سواء الرملية أو الحصوية) لدينا ثلاث حالات لنسب المواد الناعمة وهي:

أولاً P#200<5% أي أن التربة الخشنة نظيفة وتأخذ تصنيفاً وحيداً يعتمد على معاملي الانحناء والتقعر لمنحني التحليل الحبي Cu و Cc.

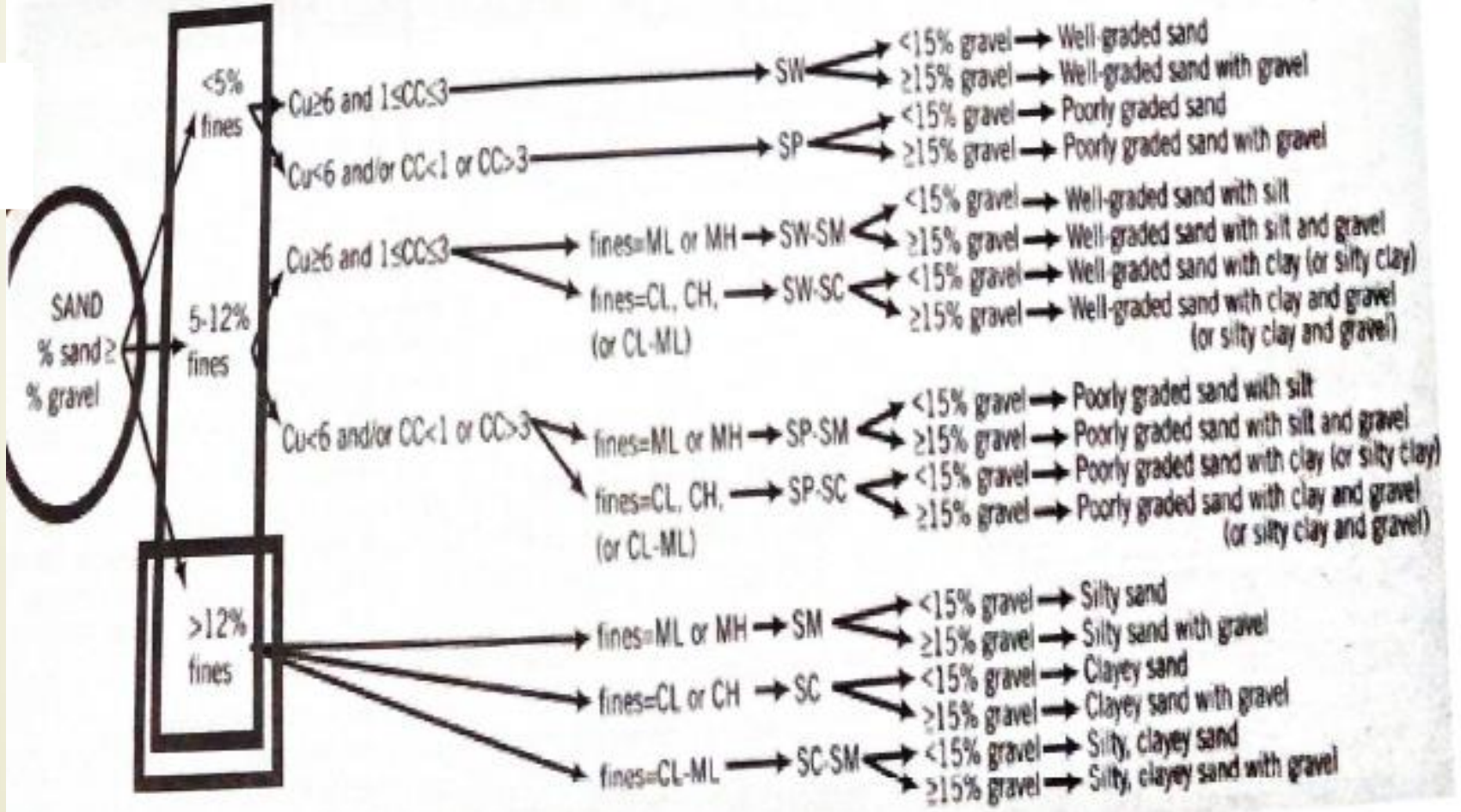
ثانياً 5%<P#200<12% التربة الخشنة مشوبة بتربة ناعمة وعندها تأخذ هذه التربة تصنيفا مزدوجاً يعتمد على معاملي الانحناء والتقعر ومخطط كاساغراندي ويضاف اسم المواد الناعمة إلى تصنيف التربة (رمل جيد التدرج مع غضار)

ثالثاً P#200>12% أي أن التربة الخشنة تحوي كمية لابأس بها من المواد الناعمة وتأخذ عندها تصنيفا وحيداً يعتمد على مخطط كاساغراندي وتأخذ التربة الخشنة صفة التربة الناعمة (رمل غضاري)

ويلاحظ أيضاً أن للمواد الحصوية أثراً في التسمية فإذا زادت نسبتها عن 15% نضيفها إلى تصنيف التربة (رمل جيد التدرج مع غضار وحصى)

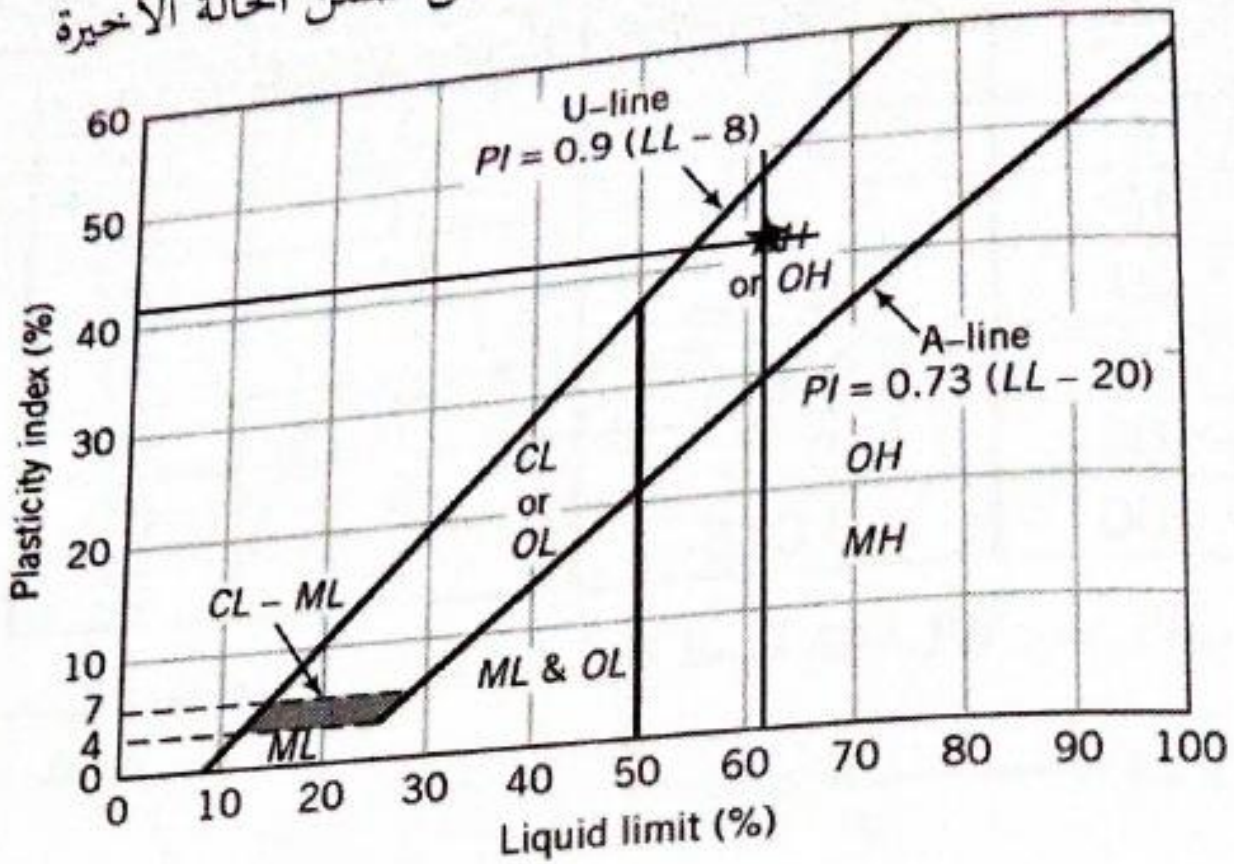
كما تبين فالتربة رملية حيث أن نسبة الرمال أكبر من نسبة الحصى في التربة

التربة



الخطوة التالية هي استخدام نسبة المواد الناعمة المارة من المنخل ذو الفتحة 0.075mm

وكما وجدنا هي 15.4% وهي أكبر من 12% إذن نحن ضمن الحالة الأخيرة



كما سبق من مخطط كاساغراندي فالمواد الناعمة هي من نوع غضار عالي الانضغاطية

أي: CH

فالتصنيف النهائي للتربة هو رمل غضاري SC

وكما وجدنا فإن نسبة المواد الحصوية هي 8.2% وأقل من 15%

مسألة(٢-٦): ليكن لدينا نتائج تجربة التحليل الحبي التالية:

Sieve #	Diameter mm	% Retained	% Finer
3/8"	9.53	0	100
4	4.75	11	89
10	2	10	79
20	0.85	9	70
40	0.425	4	66
100	0.15	5	61
200	0.075	7	54

المطلوب تصنيف التربة علماً بأن: حد السيولة للعينة WL=42 وحد اللدونة Wp=20

الحل:

من جدول التحليل الحبي للعينة سنقوم باستخراج نسب المواد الأساسية

نسبة المواد المحجوزة على المنخل #4 هي الحصويات G=100-89=11%

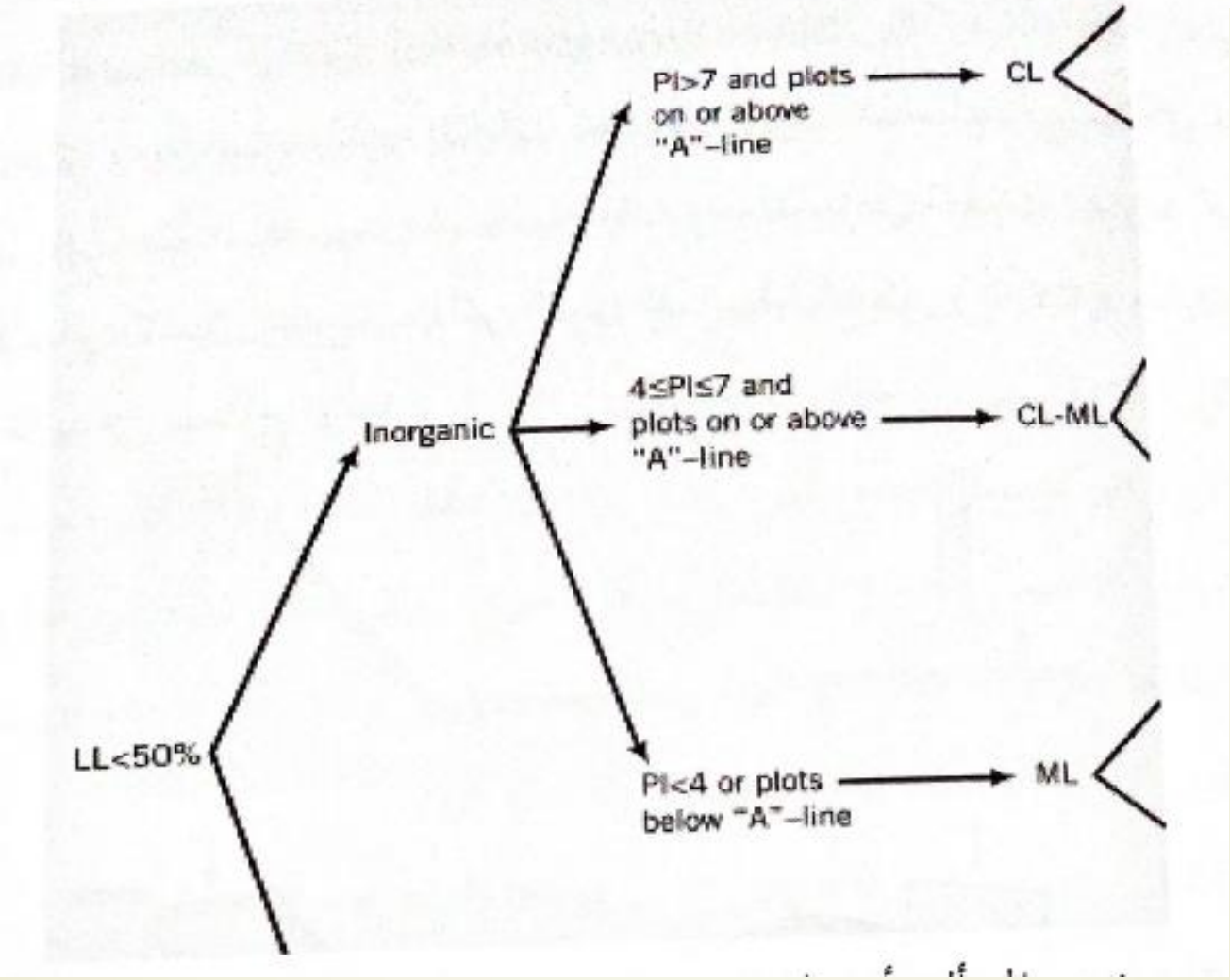
نسبة المواد المارة من المنخل #4 والمحجوزة على المنخل #200 هي الرمال S=89-54=35%

نسبة المواد الناعمة المارة من المنخل #200 هي F=54%

Sieve #	Diameter mm	% Retained	% Finer
3/8"	9.53	0	100
4	4.75	11	89
10	2	10	79
20	0.85	9	70
40	0.425	4	66
100	0.15	5	61
200	0.075	7	54

نسبة المواد الناعمة المارة من المنخل #200 هي F=54>50% أي أن التربة ذات أغلبية ناعمة.ولتصنيف هذه التربة سنعتمد على مخطط كاساغراندي.

وسنتبع المخطط التالي في تصنيف التربة الناعمة.



ولدينا من نص المسألة أن التربة ذات حد سيولة WL=42 أي أنها منخفضة الانضغاطية.لذلك سنعتمد في الحساب على دليل اللدونة PI=WL-WP=42-20=22 وهذه القيمة PI>7 أي أن التربة غضارية منخفضة الانضغاطية CL

الخطوة التالية هي فحص كمية المواد المحجوزة على المنخل #200 (أي الحصى والرمال) وبما أن المواد المارة من المنخل #200 هي 54% فالمواد المحجوزة على المنخل #200 والمناخل التي تسبقه هي S+G=100-54=46% وهذه النسبة G+S>30% إذن سوف يضاف أثر هذه المواد على التصنيف النهائي للتربة.

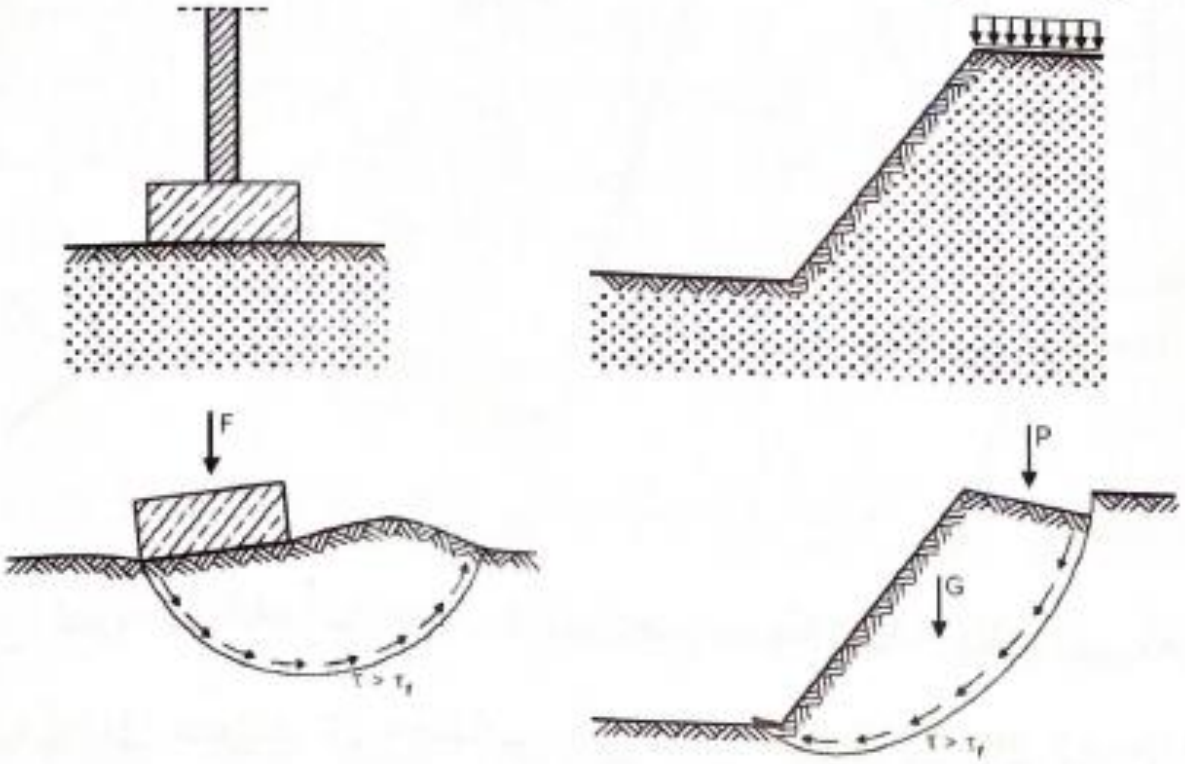
ولكن السؤال هنا هل ستأخذ التربة الناعمة صفة الرمل أم الحصى؟؟

لذلك علينا معرفة نسبة كل من الحصى والرمل لدينا مسبقا S=35% و G=11% إذن S>G فالتربة هنا إذن ذات صفة رملية وبما أن نسبة الحصى G=11%< 15% فهي لاتذكر في التصنيف

فالتصنيف النهائي للتربة هو: غضار رملي منخفض الانضغاطية sCL

٢- ٦-٦ قوى القص في التربة Shear Strength of Soil:

تتأثر التربة الواقعة تحت المنشآت الهندسية بأوزان هذه المنشآت بشكل مباشر فيحدث فيها انضغاط قد يزيد عن حدوده المسموحة مما يؤدي لحدوث انهيارات كما في حالة الأساس المنعزل والمنحدر بتأثير القوى المماسية، الشكل (٢-٣١) وذلك بفعل تشكل ما يدعى بسطوح الانهيار.



الشكل (٢-٣١) تشكل القوى المماسية وسطوح الانزلاق

إن القيمة العظمى لمقاومة التربة للقوى المماسية تدعى بقوى القص لهذه التربة وهي عبارة عن مجموع تأثير قوى الاحتكاك ϕ وقوى التماسك c المقاومة للقص، وقد بين كلاً من Coulomb/Mohr العلاقة بين الإجهاد الناظمي والإجهاد المماسي وفق ما يلي:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\varphi \qquad (٤٣-٢)$$

حيث τ (kN/m^2) إجهاد القص، c (kN/m^2) قوى التماسك ، ϕ° زاوية الاحتكاك الداخلية، σ (kN/m^2) الإجهاد الناظمي.

يرمز لـ c و Φ بعوامل القص وتعد من العوامل المفيدة في حساب قيم دفع التربة و توازن المنحدرات واستقرار مناطق التأسيس و تتأثر هذه العوامل بالجريان المائي ضمن التربة

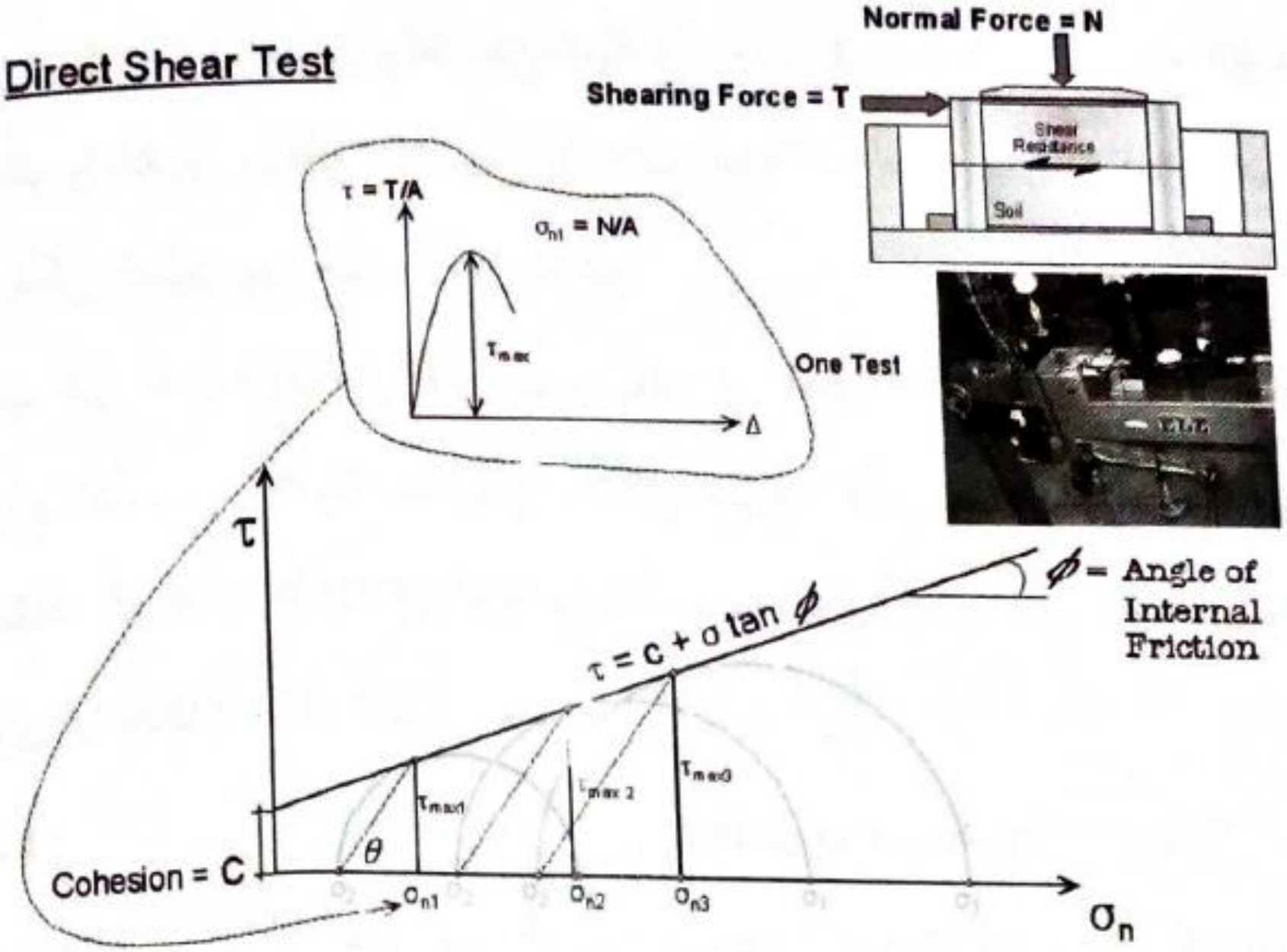
يتم إيجاد قوى القص أو عوامل القص مخبرياً بواسطة ثلاثة أنواع من التجارب:

تجربة القص المباشر ، تجربة الانضغاط أحادي المحور، تجربة الانضغاط ثلاثي المحاور

تجربة القص المباشر direct shear test:

يبين الشكلين (٢-٣٢) و (٢-٣٣) مبدأ تجربة القص المباشر والجهاز المستخدم حيث توضع العينة الترابية مقطعها $A(cm^2)$ في حجرة القص المكونة من قطعة سفلية

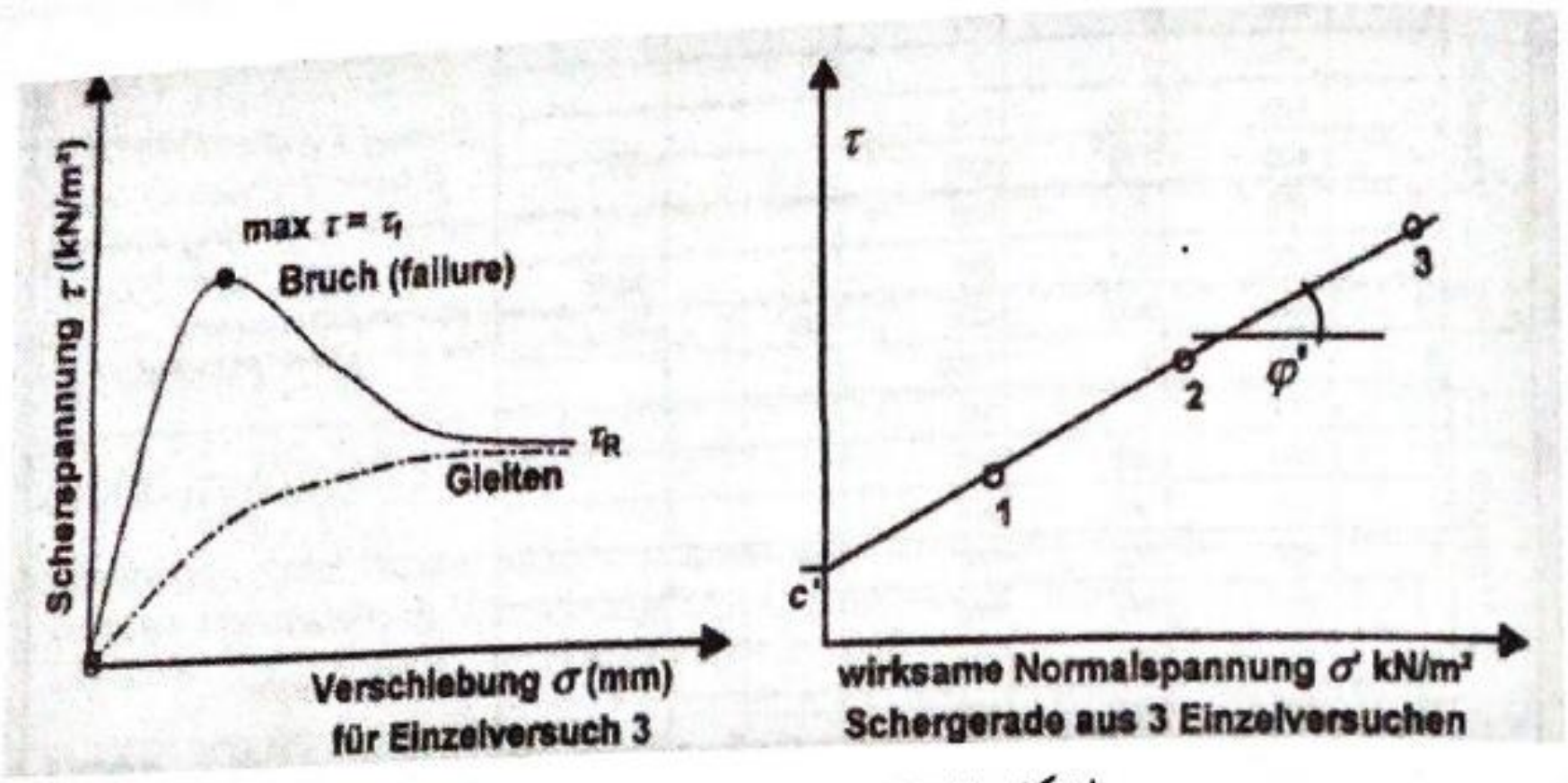
ثابتة وأخرى علوية قابلة للحركة الأفقية بتأثير قوى القص T بسرعة منتظمة يمكن التحكم بها



الشكل (٢-٣٢) مبدأ تجربة القص المباشر

وفق حالة التجربة ويطبق عليها إجهاد ناظمي σ_v ونتيجة لذلك تنشأ في العينة الترابية قوى ممانعة لحركة الجزء العلوي من علبة القص وهي القوى المماسية τ وتستمر التجربة في هذه الحالة حتى تتغلب قوة الإزاحة الأفقية على القوى الممانعة وعندها تنهار العينة ويحدث القص، تكرر التجربة بقيمة جديدة للإجهاد الناظمي كحد أدنى ثلاث مرات يتم في كل مرة دراسة العلاقة بين الإزاحة الأفقية و إجهاد القص τ وتحديد القيمة العظمى τ_{max} التي يحدث عندها الانهيار.

بتمثيل العلاقة بين قيم τ على المحور الشاقولي وقيم الإجهاد الناظمي المماثلة لكل حالة على المحور الأفقي يتم المستقيم الأمثل والمار بين نقاط التمثيل، الشكل (٢-٣٤) يمثل ميل هذا المستقيم زاوية الاحتكاك الداخلية للتربة ϕ أما تقاطع المستقيم مع المحور الشاقولي فيمثل قيمة تماسك التربة c.



الشكل (٢-٣٤) تحديد عوامل القص Φ و c

يبين الجدول التالي قيم عملية لزاوية الاحتكاك الداخلية والتماسك حسب نوع التربة:

بحسب النظام الألماني DIN 18 137-3:

الجدول (٢-٨) قيم c` , ϕ` لأنواع من الترب

نوع التربة		ϕ`	c` (kN/m^2)
ترب غير متماسكة	حجر ورمل متوسط الكثافة	37.5°	-
	رمل مخلخل	30.0°	-
	رمل متوسط الكثافة	32.5°	-
	رمل ناعم كثيف	37.5°	-
ترب متماسكة	رمل غضاري مشدد	27.5°	30.0
	رمل غضاري متوسط التشديد	27.5°	15.0
	رمل غضاري كتلي	27.5°	10.0
	سيلت قليل اللدونة	30.0°	10.0
	غضار متوسط اللدونة متوسط التشديد	25.0°	30.0
	غضار متوسط اللدونة مشدد	25.0°	20.0

مسألة (٢-٧):

يوضح الجدول المرفق نتائج تجربة القص المباشر لعينة ترابية من الرمل السيلتي الناعم بوضعها المخلخل،

تم اعتماد ثلاث قيم للإجهاد الناظمي: $\sigma_v = 200 - 400 - 600\ kN/m^2$

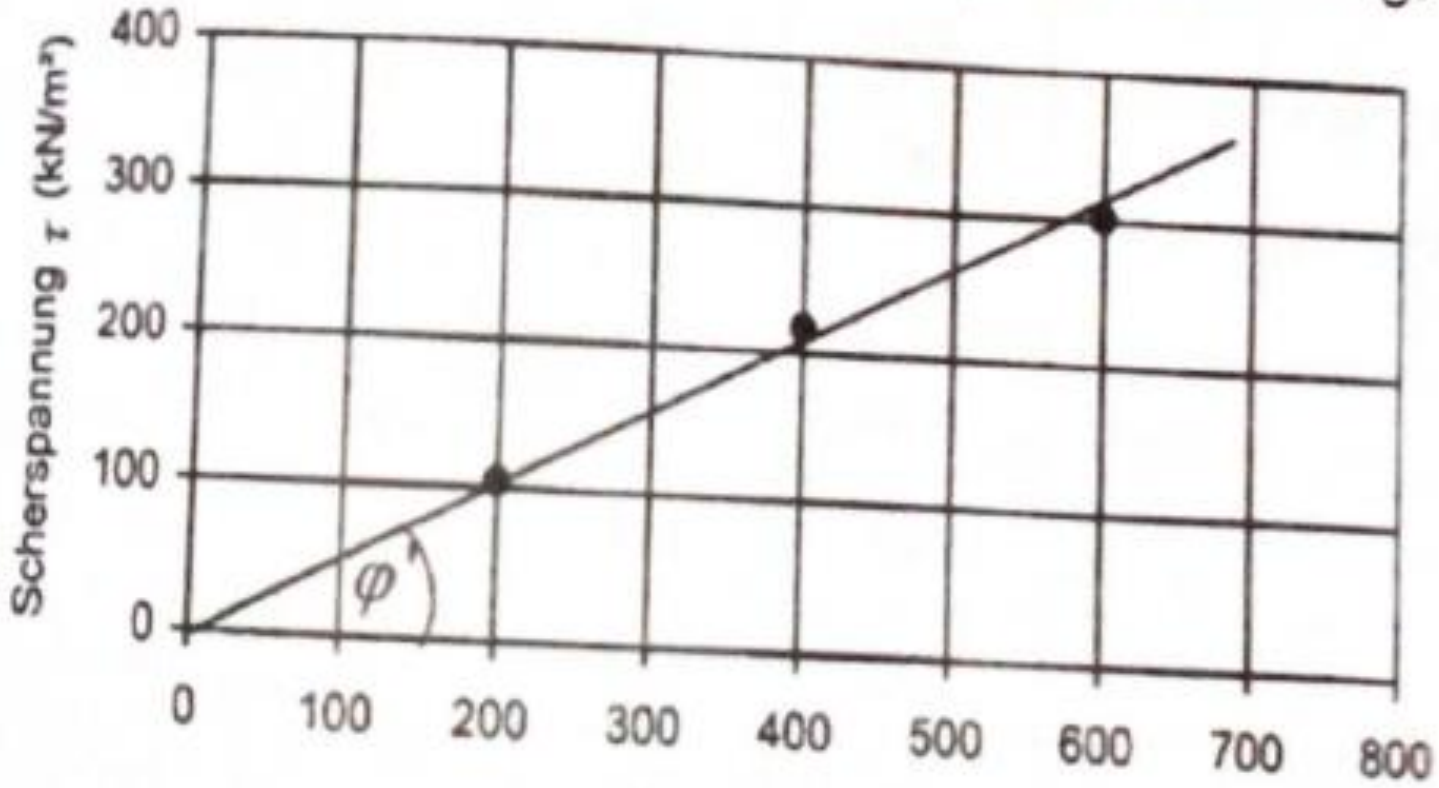
بتشكيل جدول النتائج:

$\sigma_v\ kN/m^2$	200	400	600
$\tau\ kN/m^2$	105	217	302

المطلوب تحديد عوامل القص للعينة

الحل

يمكن تمثيل العلاقة الخطية بين قيم σ_v و τ كما يلي:



من المخطط البياني يمكن حساب قيمة زاوية الاحتكاك وفق:

$$\tan\varphi' = \frac{312}{600} = 0.52$$

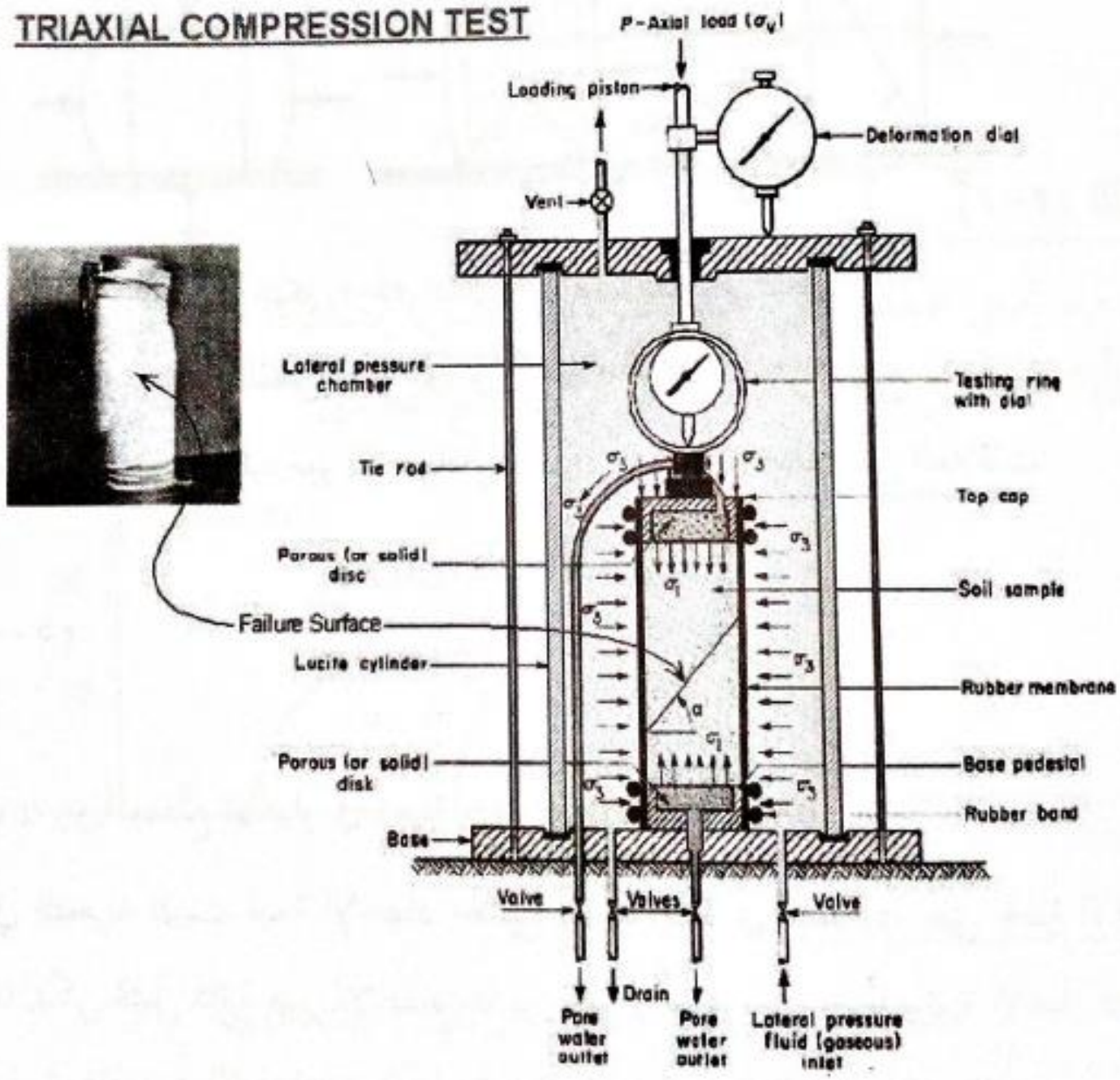
$$\rightarrow \varphi' = 27.5°$$

يلاحظ أيضاً أن قيمة $c = 0$ أي أن التربة عديمة التماسك باعتبارها رملية سيلتية.

تجربة الانضغاط ثلاثي المحور Triaxial test (تجربة القص غير المباشرة):

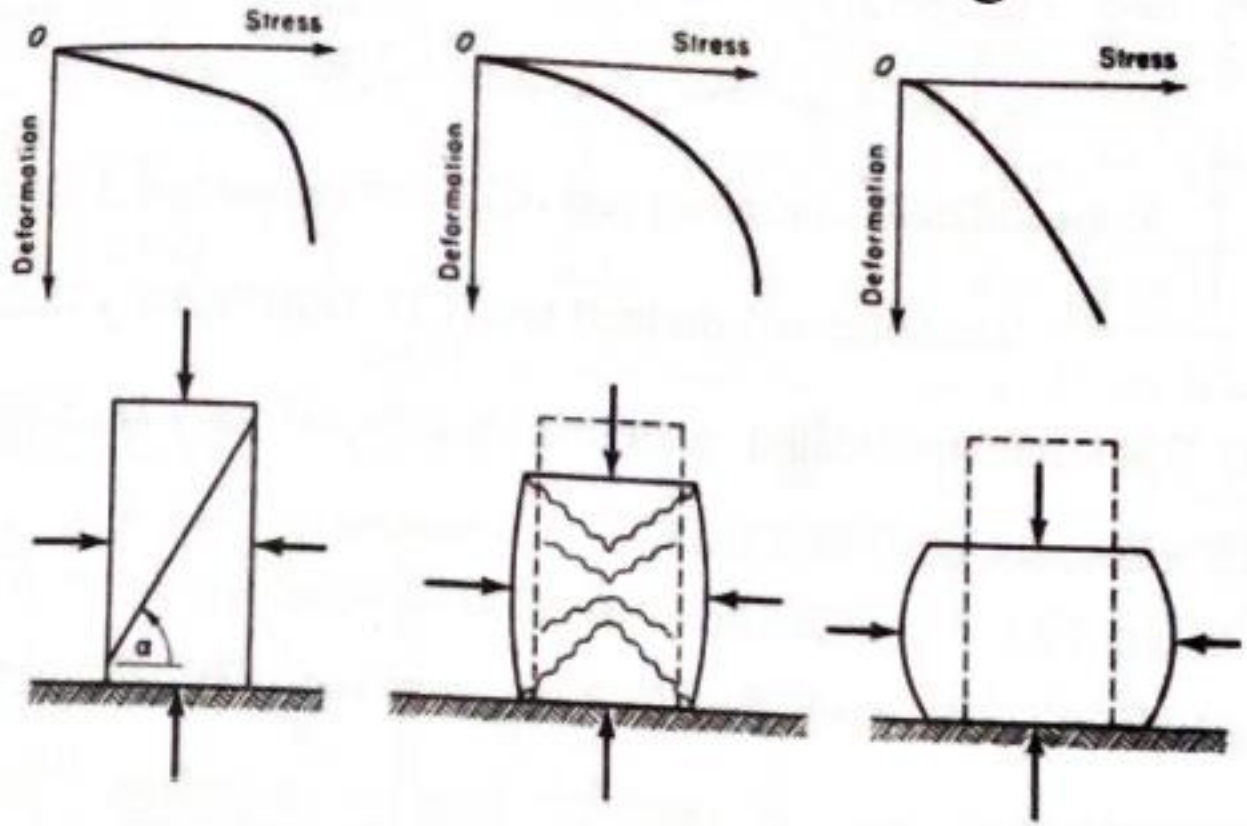
يعتمد على هذه التجربة في تحديد قيم مقاومة القص للتربة بشكل مشابه للواقع حيث تجهز عينة اسطوانية الشكل ضمن الخلية كما في الشكل (٢-٣٧) وتوضع الخلية ضمن حجرة تملأ بالماء ويطبق على الخلية ضغط تطويق جانبي σ_3 وآخر ناظمي σ_1 ويمكن تنفيذ هذه التجربة على عينات مشبعة وغير مشبعة وجافة ويوفر جهاز الضغط ثلاثي المحاور عدة إمكانيات لتنفيذ التجارب يمكن تلخيصها بما يلي:

- العينة مشددة و غير مصرفة consolidated- undrained test (CU Test):
- العينة مشددة و مصرفة consolidated-drained test (CD Test):
- العينة غير مشددة و غير مصرفة unconsolidated- undrained test (UU Test):



الشكل (٢-٣٧) جهاز الضغط ثلاثي المحاور

تختلف أشكال انهيار العينة المدروسة باختلاف نوعها فالعينة القاسية ذات المواصفات الجيدة للتحمل لا تبدي أية هبوطات ظاهرية و لا تغير في مقطعها ويكون سطح الانهيار مائل كما في الشكل (٢-٣٨)، في حين تبدي العينة المتوسطة هبوطاً وتغير في المقطع بالإضافة إلى أن التشققات تكون عشوائية أحياناً، أما العينات الطرية فتبدي تغير لدن واضح في مقطعها وطولها.



الشكل (٢-٣٨) أشكال الانهيار بتجربة ضغط ثلاثي المحاور

للحصول على عوامل القص c` و Φ` و الإجهاد الناظمي على سطح الانكسار σ أو σ` يمكن الاستعانة بدائرة مور للإجهادات Mohr`s circle وذلك من العلاقات:

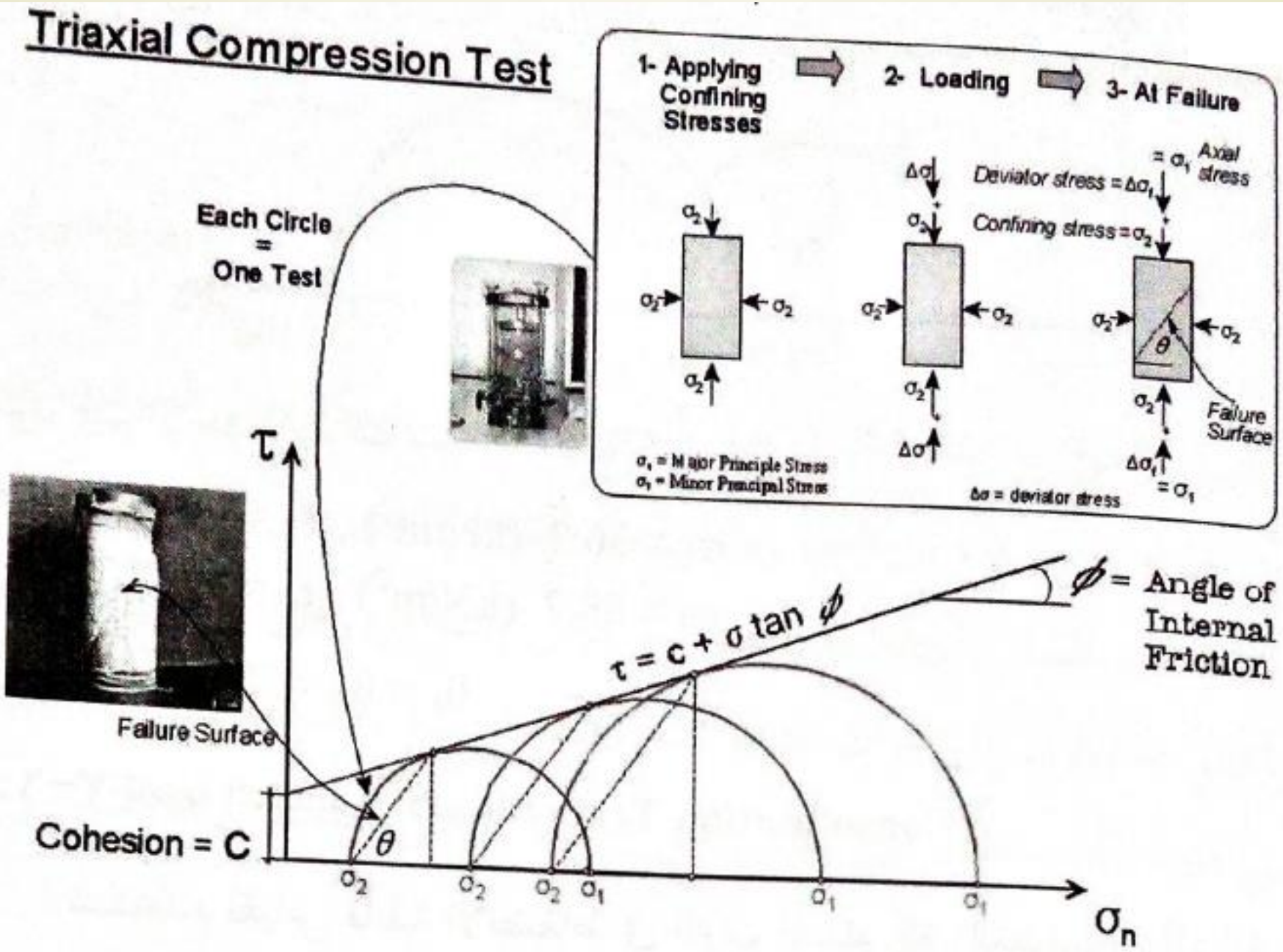
$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\alpha \qquad (٥٠-٢)$$

حيث α زاوية مقطع الانهيار في العينة وتتراوح بين $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

يتم في التجربة تثبيت قيمة الإجهاد الجانبي σ_3 و زيادة في قيمة σ_1 حتى لحظة الانهيار عندها يمكن تمثيل دائرة مور للإجهادات بين قيم σ و τ ويتم تحديد زاوية الانهيار $\theta=\alpha$ وتكتب العلاقة بين الإجهادات الناظمية و المماسية كما في الشكل (٢-٣٩):

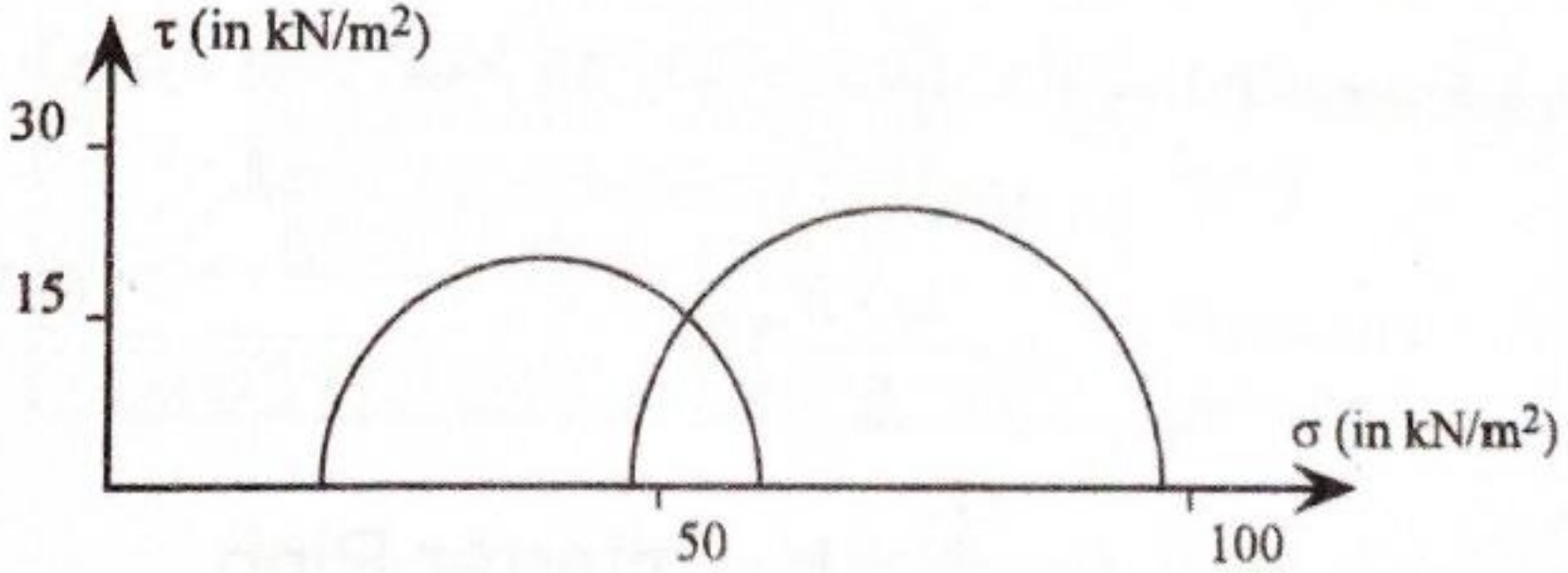
$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\varphi$$



الشكل (٢–٣٩) دوائر مور

مسألة (٢-٩):

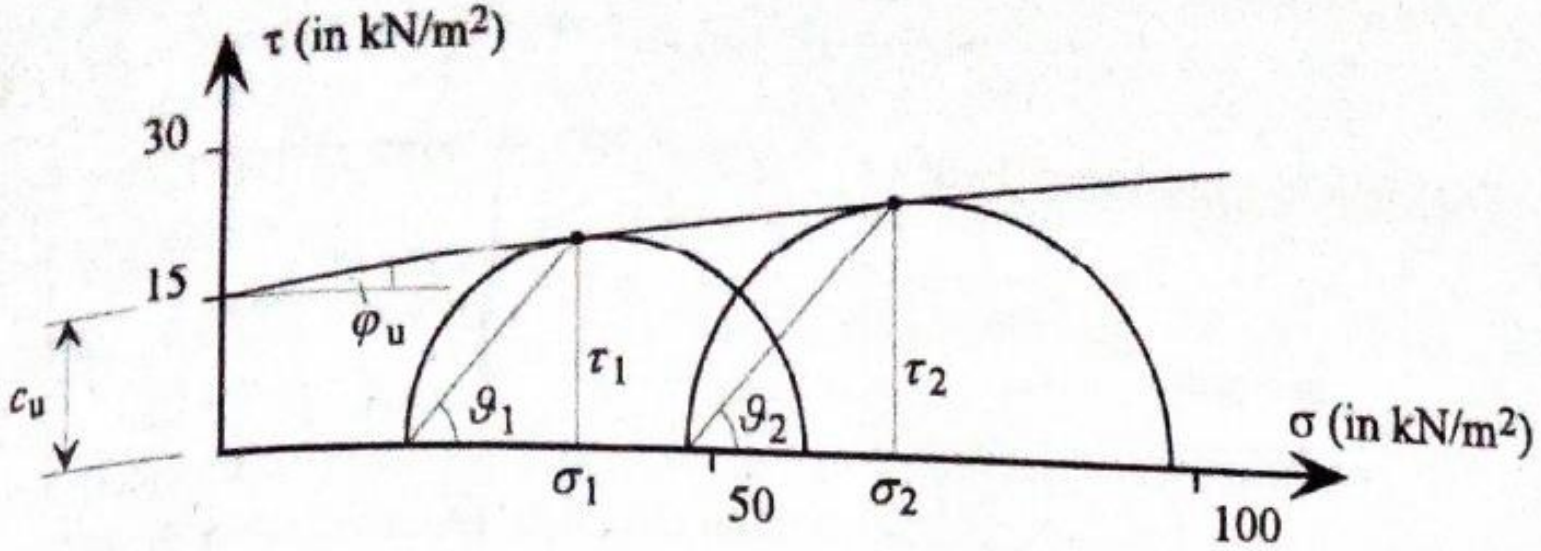
تم إجراء تجربتي ضغط ثلاثي المحاور على عينة غضارية متماسكة ومشبعة جزئياً بطريقة (UU Test) وتمثل دوائر مور في الشكل التالي نتائج التجربتين.



المطلوب حساب القيم التالية:

c_u (kN/m^2) , ϕ_u° , σ (kN/m^2) , τ (kN/m^2), θ

الحل: يتم أولاً رسم المماس المشترك لدائرتي مور فيتقاطع مع محور إجهاد القص فتكون قيمة التماسك $c_u \approx 15\ kN/m^2$ وزاوية الاحتكاك الداخلية (ميل المماس) $\phi_u \approx 8^\circ$



وتكون قيم الإجهادات الناظمية والقصية كما يلي:

$$\sigma_1 \approx 36.3\ (kN/m^2)\ ,\ \tau_1 \approx 20.1\ (kN/m^2)$$

$$\sigma_2 \approx 68.7\ (kN/m^2)\ ,\ \tau_2 \approx 24.7\ (kN/m^2)$$

و زاوية الانهيار $\theta_1 = \theta_2 \approx 50^\circ$

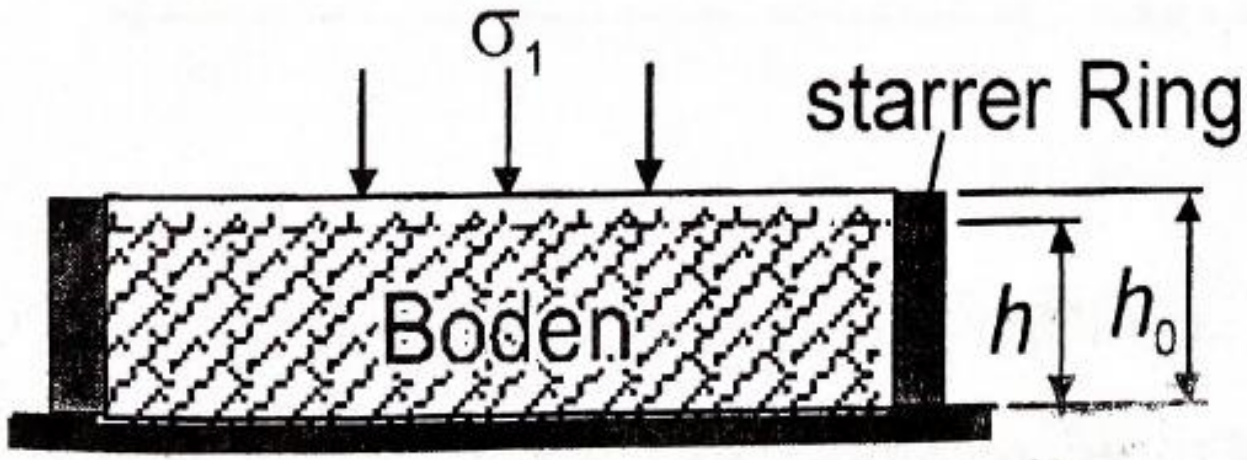
٢- ٦-٧ تجربة التشديد (الانضغاط) Consolidation Test:

تستخدم لقياس قابلية الانضغاط في الترب المتماسكة (الغضارية) بتأثير الحمولات الشاقولية حيث توضع العينة ضمن حلقة معدنية لتمنع تمدد العينة بالاتجاه العرضاني بتأثير الحمولات الشاقولية وبالتالي فان الانتقالات الجانبية معدومة حيث يقاس فقط الانتقال الشاقولي.

في بداية التجربة يكون ارتفاع العينة الأولي h_0، الشكل (٢-٤٠) وفي نهاية التحميل تصبح h ويكون مقدار الهبوط Δh والتشوه الشاقولي ε أو نسبة الانضغاط كما يلي:

$$\Delta h = h_0 - h$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100 \qquad (٢-٥٢)$$



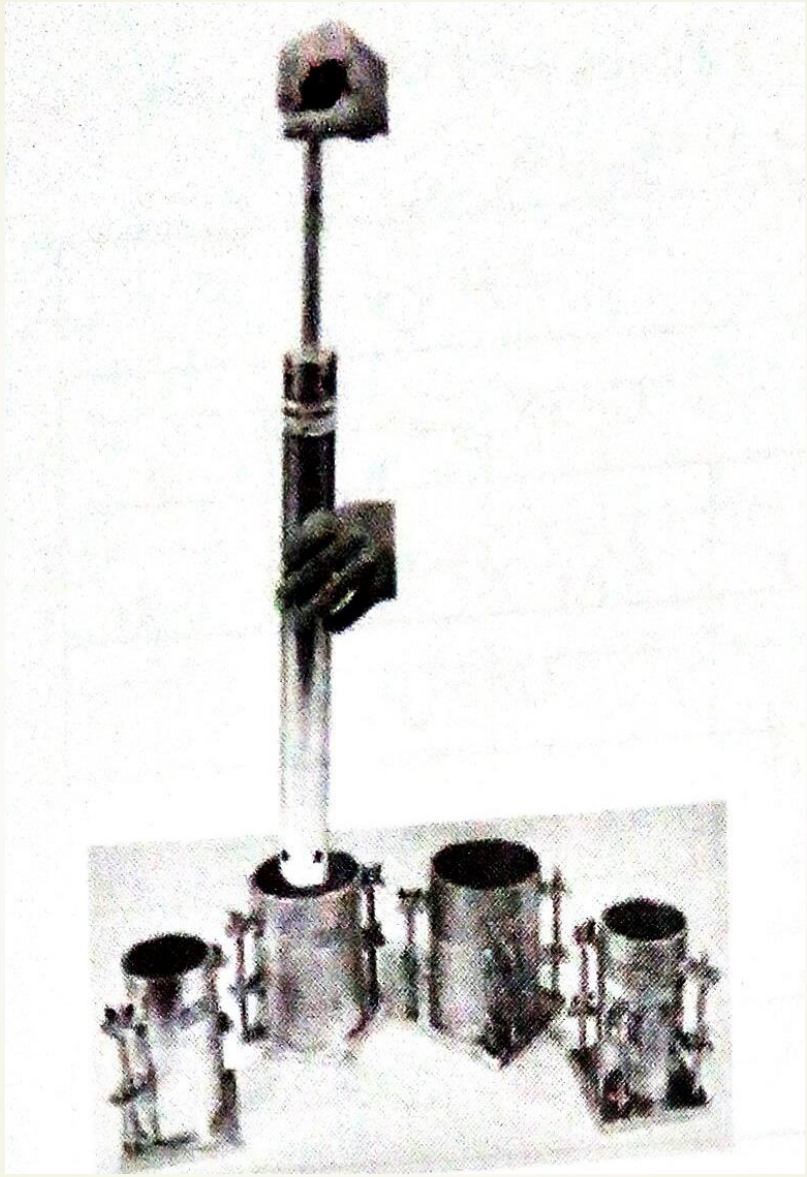
الشكل (٢-٤٠) العينة في حلقة التشديد

نتيجة لتطبيق الحمولات على العينة الترابية فات حبات التربة فيها يعاد ترتيبها على حساب نسبة الفراغات وبذلك ينتقل الماء من المسامات المائية إلى خارج العينة بالاتجاهين العلوي والسفلي عبر الأقراص المسامية التي تحصر العينة من الأعلى والأسفل

في الترب غير المتماسكة ونتيجة للنفوذية العالية فيها فان الماء يخرج بسهولة من العينة مع بداية تطبيق الحمولات الشاقولية، في حين أنه في الترب المتماسكة ذات النفوذية الضعيفة فان ماء المسام يخرج ببطء من العينة وبالتالي فان الضغط المطبق على العينة في البداية هو ذاته ضغط ماء المسام u (kN/m^2) يبدأ مع الزمن بالتناقص حتى تنعدم قيمته عندها تنتقل كامل الحمولات إلى حبات التربة، تدعى هذه العملية بالتشديد Consolidation وتسمى التربة بأنها مشددة حين تطبق كامل الحمولات على حبات التربة الصلبة ولم يعد هناك أي قيمة لضغط ماء المسام.

٢- ٦-٨ تجربة بروكتور Proctor Test:

يعتمد على هذه التجربة في تحديد درجة الرص لطبقة ترابية وهي تجربة ميكانيكية يتم من خلالها دراسة العلاقة بين نسبة الفراغات ووزن واحدة الحجم الجافة γ_d بدلالة محتوى الرطوبة w . سميت بتجربة بروكتور نسبة للعالم Proctor مبتكر هذه التجربة عام 1933 ويمكن التمييز بين نوعين من هذه التجارب، تجربة بروكتور النظامية (طاقة الرص تبلغ $0.6\ MNm/m^3$) وتجربة بروكتور المعدلة (طاقة الرص تبلغ $2.7\ MNm/m^3$) تجرى التجربة على ترب متماسكة وغير متماسكة بعد تجفيفها بالفرن.



يبين الشكل (٢-٤٦) قالب بروكتور والذي يتألف من قالب ارتفاعه h_1 وقطره d_1 تعلوه حلقة بنفس القطر وإلى جانبه مطرقة بروكتور قطرها d_2 وارتفاع سقوطها h_2 ويمكن أن تكون المطرقة يدوية أو آلية كما في الشكل، يتم وضع العينة بنسبة رطوبة معينة في القالب وترص بواسطة المطرقة على طبقات وفي نهاية التجربة يتم حساب وزن واحدة الحجم وتكرر التجربة عدة مرات (خمس مرات) بتغيير نسب الرطوبة ويتم حساب وزن واحدة الحجم الجاف بدلالة نسبة الرطوبة ووزن واحدة الحجم وفق العلاقة:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\frac{w}{100}} \quad kg/cm^3 \qquad (٢-٥٥)$$

بتمثيل العلاقة بين قيم الكثافة الجافة المحسوبة من كل تجربة مع نسبة الرطوبة لكل منها يتم الحصول على القيمة العظمى للكثافة الجافة $\gamma_{d\,max}$ أو γ_{pr} و محتوى الرطوبة المثالي W_{opt} ويتم حساب درجة الرص D_{pr} من نسبة وزن واحدة الحجم الحقلية الجافة إلى وزن واحدة الحجم الجاف الأعظمي في تجربة بروكتور أي:

(٢-٥٦)

$$D_{pr} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d\max}} \%$$

يبين الجدول (٢-١١) قيم $\gamma_{d\,max}$ و w_{opt} لأنواع من الترب بدلالة عامل الانتظام U

الجدول (٢-١١) قيم $\gamma_{d\,max}$ و w_{opt} لأنواع من الترب

نوع التربة	$\gamma_{d\,max}$ (t/m^2)	w_{opt}
رمل وحصى U=35	2.12	0.07
رمل حصوي U=7	1.98	0.10
رمل U=5	1.87	0.13
رمل ناعم U=2	1.70	0.14
سيلت رملي	1.79	0.16
غضار رملي	1.75	0.17
غضار سيلتي	1.62	0.22
غضار لدن	1.44	0.30

مسألة (٢-١٢):

تم إجراء تجربة بروكتور على عينة سيلتية رملية فكانت النتائج كما في الجدول التالي:

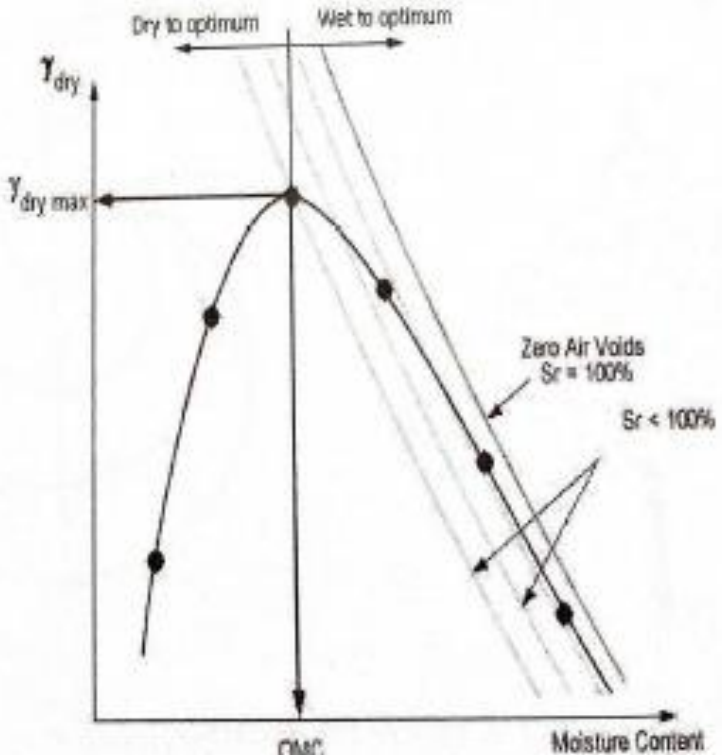
رقم التجربة	1	2	3	4	5
نسبة الرطوبة w %	11.5	14.0	15.2	16.7	18.9
وزن واحدة الحجم الجاف γ_d g/cm^3	1.817	1.842	1.861	1.855	1.773

المطلوب تمثيل العلاقة بين قيم γ_d و w وتحديد قيمة $\gamma_{d\,max}$ و w_{opt} وحساب درجة الرص لطبقة من نفس التربة تم رصها فكانت قيمة وزن واحدة الحجم الحقلية الجافة فيها $1.826\ g/cm^3$.

الحل:

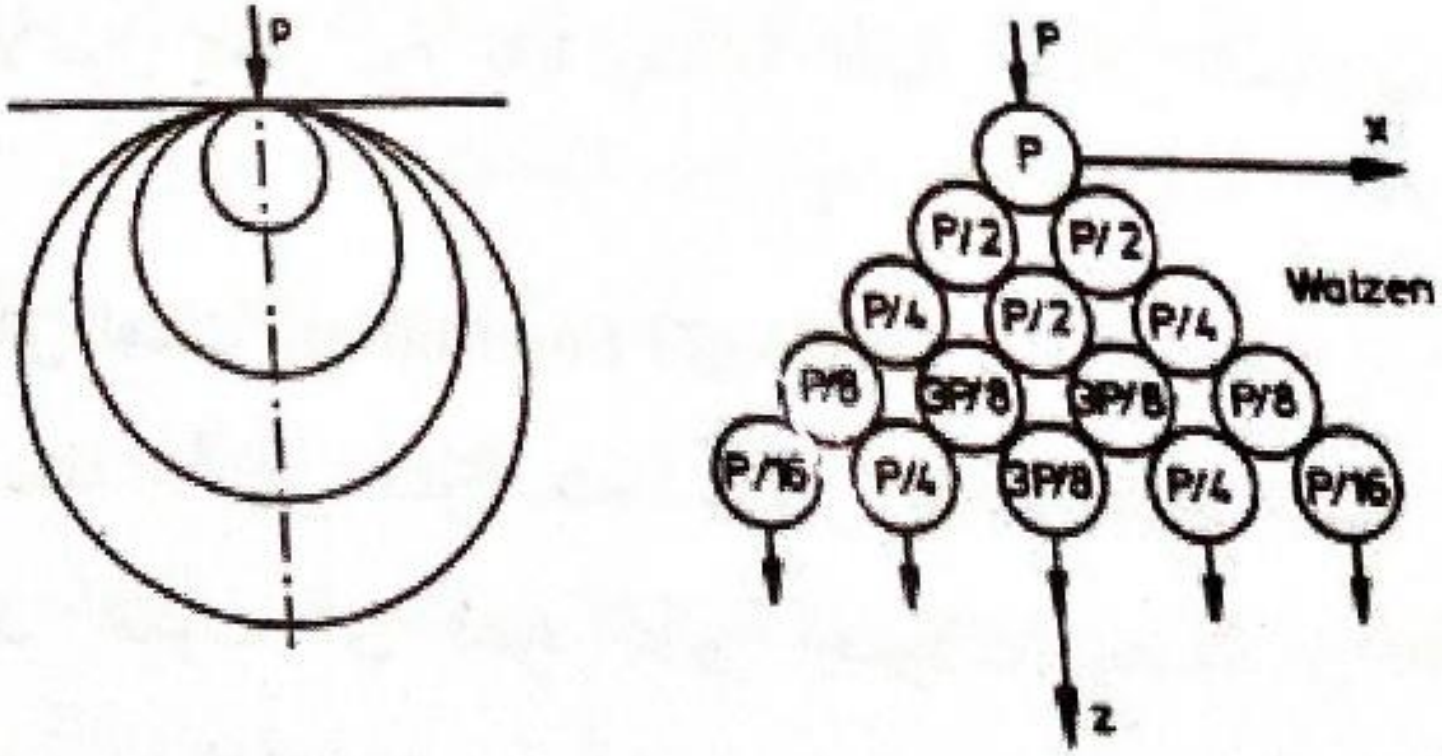
بتمثيل العلاقة بين قيم وزن واحدة الحجم الجاف و نسبة الرطوبة كما في الشكل يمكن تحديد قيمة وزن واحدة الحجم الجاف الأعظمي $\gamma_{d\,max} = 1.863\ g/cm^3$ و المحتوى المثالي للرطوبة $w_{opt} = 21.7\ \%$ وبحساب درجة الرص في الطبقة السيلتية الرملية يتبين أنها تساوي:

$$D_{pr} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d\,max}} = \frac{1.826}{1.863} = 98\%$$



الإجهادات والانفعالات في التربة

في عام ١٨٨٥ بين العالم Boussinesq من خلال نظرية المرونة أن الإجهادات تتوزع ضمن التربة بحيث تتناقص قيمته مع العمق بنسب محددة تتعلق بشكل الحمولات ونوع التربة، يبين الشكل (٣-١) مبدأ بوسينسك في توزع الإجهادات:



الشكل (٣-١) توزع الإجهادات وفق **Boussinesq**

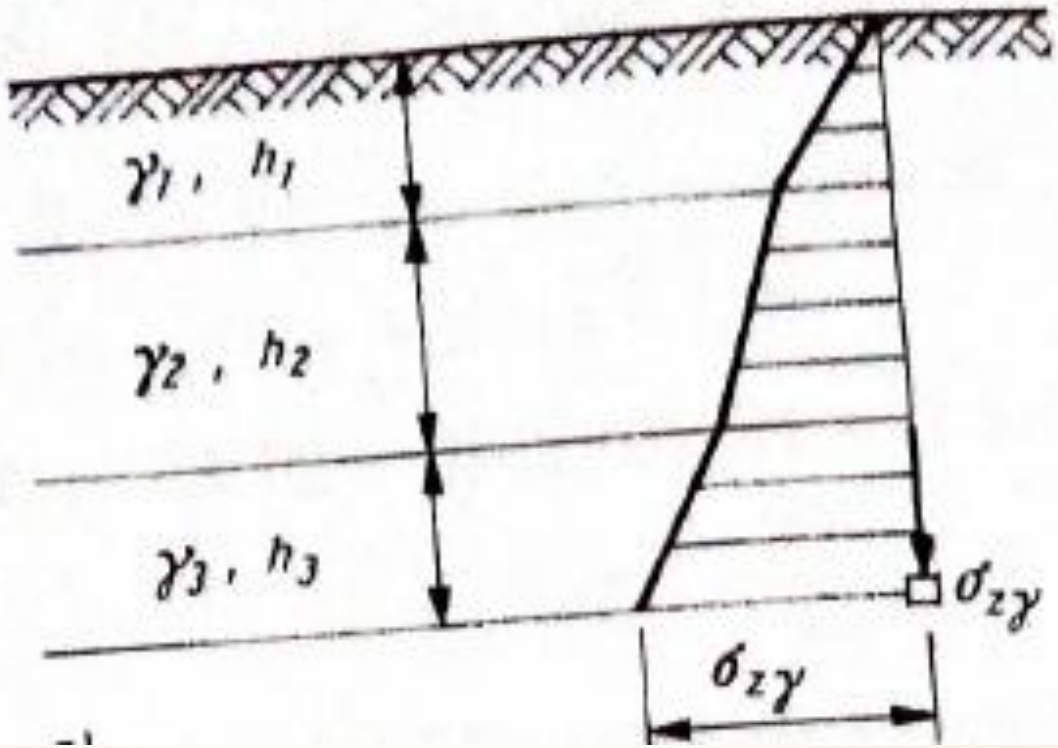
٣-٣ حساب الإجهادات:

٣-٣-١ حساب الإجهادات الناجمة عن الوزن الذاتي للتربة:

قبل أن تطبق أية حمولة على سطح التربة فانه عند نقطة ما من وسط التربة بعمق محدد يمكن حساب قيمة الإجهاد الشاقولي σ_{zy} بتأثير الوزن الذاتي للتربة وفق العلاقة:

$$\sigma_{zy} = \sum_1^n \gamma_n \cdot h_n \qquad (٣-٢)$$

و يمكن تطبيق هذه العلاقة في حالة تطبقات ترابية


γ_1 , h_1
γ_2 , h_2
γ_3 , h_3
$\sigma_{z\gamma}$
$\sigma_{z\gamma}$

عندما تكون الطبقة الترابية مغمورة بالماء فان وزن واحدة الحجم المغمور γ' تعطى كما في العلاقة (٢-١٢) $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

يدعى ضغط الماء في التربة بالضغط المسامي ويرمز له بالرمز U ويكون
U=γw*Z أي جداء كثافة الماء بالارتفاع.
وتكون الإجهادات الفعالة تساوي الإجهاد الكلي مطروحاً منه ضغط الماء المسامي.
`=σ-Uσ
حيث الإجهاد الكلي هو جداء الكثافة الرطبة بالارتفاع.
وتكون الإجهادات الفعالة جداء الكثافة المغمورة بالارتفاع.

- **صعود الماء بالخاصة الشعرية:**

يحدث صعود للمياه الجوفية من خلال الأنابيب الشعرية المتكونة باتصال فراغات التربة.

ويتعلق ارتفاع الصعود بنعومة حبات التربة.

تعريف البساط المائي:

المستوي المائي الذي يكون عنده الضغط مساوياً للضغط الجوي وعند هذا السطح يكون ضغط الماء المسامي معدوماً.

المعادلة العامّة لبوسينسك للانتقال الشّاقوليّ تحت تأثير حمولة دائريّة موزّعة بانتظام من الشّكل:

$$w = \frac{(1+v)qa}{E}\left\{\frac{a}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{1-2v}{a}\left[(a^2+z^2)^{0.5} - z)\right]\right\} \qquad (8-10)$$

حيث:

$\Delta=\omega$: الانتقال الشّاقوليّ.

E: معامل مرونة الطّابق التّرابيّ.

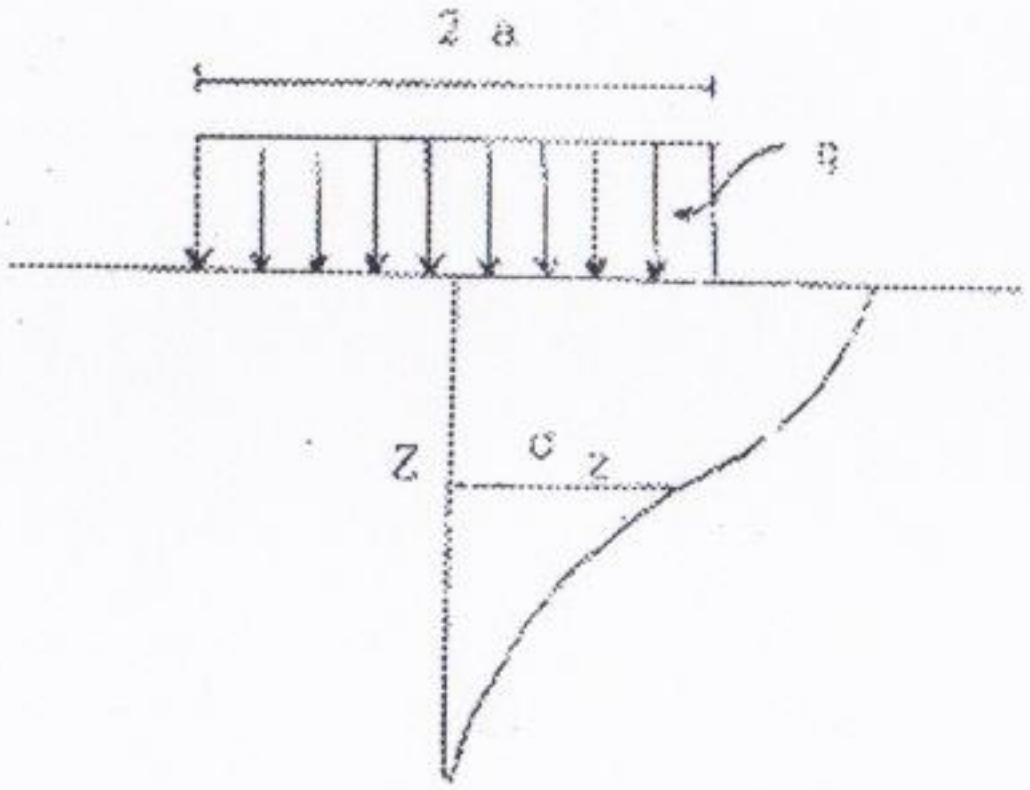
υ: معامل بواسون.

$q=P$: الإجهاد المطبّق.

a: نصف قطر سطح التّحميل.

z: عمق النّقطة المدروسة.

$$\sigma_z = q\left[1 - \frac{z^3}{\left(a^2 + z^2\right)3/2}\right]$$

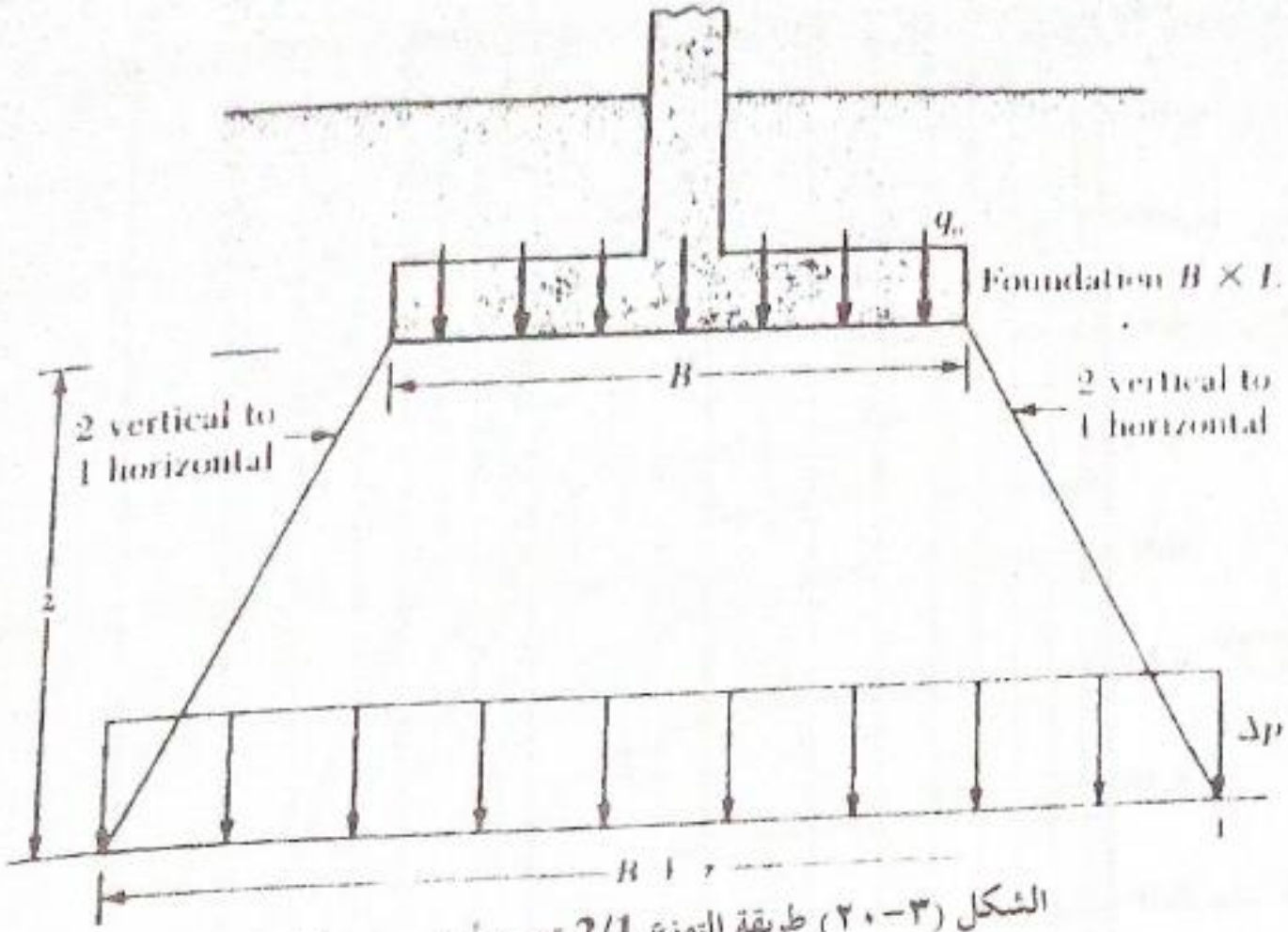


الشكل ١ ـ١٩ ـ توزع الاجهادات وفق بوسينسك

٣-٣- ٧ حساب الإجهاد الشاقولي تحت حمولة موزعة بانتظام بشكل مستطيل:

ب - حالة الأساس الصلب:

من أجل الأساسات المستطيلة B×L كما في الشكل (٣-٢٠) تعتمد طريقة شائعة لحساب قيمة الزيادة في الإجهاد الشاقولي تحت الأساس الصلب وعند العمق z وتدعى بطريقة توزع الإجهادات 2/1 (2 شاقولي، 1 أفقي).



الشكل (٣-٢٠) طريقة التوزع 2/1 تحت أساس مستطيل

وتحسب قيمة ΔP بهذه الطريقة وفق العلاقة التالية:

$$\Delta P = \frac{q_0 \cdot B \cdot L}{(B+z)(L+z)} \qquad (٣-١٨)$$

مسألة (٣-٢):

أساس أبعاده $(2\times4)\,m$ حمولته منتظمة $q_0 = 125\ kN/m^2$، المطلوب إيجاد الزيادة في الإجهاد الشاقولي ΔP بتأثير هذه الحمولة على عمق $z = 5m$ ولنقطة تقع تحت محور القاعدة، اعتبر حالة الأساس الصلب

الحل:

حالة للأساس الصلب:

تعطى الزيادة في الإجهاد حسب العلاقة (٣-١٨)

$$\Delta P = \frac{q_0 \cdot B \cdot L}{(B+z)(L+z)}$$

بالتعويض

$$\Delta P = \frac{125\times2\times4}{(2+5)(4+5)} = 15.87\ kN/m^2$$

وهي قيمة الإجهاد عند العمق $z = 5m$ (قيمة منتظمة تحت كامل القاعدة)

٣-٤ حساب الهبوطات:

٣-٤-١ أشكال الهبوطات:

تتعرض الأساسات إلى حمولات ينتج عنها انتقالات شاقولية باتجاه تطبيق الحمولات وتدعى هذه الانتقالات بالهبوطات، وبشكل عام تقسم الهبوطات إلى نوعين رئيسيين:

أ - هبوط أولي (مرن): S_e يحدث خلال أو مباشرة بعد تطبيق الحمولات من المنشأة

ب - هبوط التشديد: S_c يتعلق بالزمن ويبدأ عند تطبيق الحمولات ويحدث نتيجة خروج ماء المسام من الفراغات المائية الموجودة في الطبقة الغضارية المشبعة ، ويمكن أحياناً التمييز بين هبوط التشديد الرئيسي S_{c1} وهبوط التشديد الثانوي S_{c2} حيث تشكل قيمة الهبوط الثانوي S_{c2} نسبة ضئيلة من الهبوط الكلي للتشديد لا تزيد عن 15% وذلك

حسب اقتراح FLOSS:

$$S_c = S_{c1} + S_{c2} \qquad (٣-١٩)$$

ويعرف الهبوط الكلي بأنه مجموع الهبوط المرن S_e وهبوط التشديد S_c أي:

$$S = S_e + S_c \qquad (٣-٢٠)$$

ويمكن تحديد الأسباب المؤدية لحدوث الهبوطات بالعوامل التالية:

١. تطبيق حمولات ديناميكية أو ستاتيكية كبيرة.

٢. حدوث تغير في منسوب البساط المائي مما يؤثر على قيم إجهادات التربة.

٣. وجود طبقات ضعيفة تشكل فواصل وأحياناً فراغات نتيجة لانضغاطها بتأثير الحمولات.

٤. حدوث جريان للمياه الجوفية ضمن الطبقات القابلة للانحلال بالماء مما يؤدي لتشكل فراغات أسفل طبقات التأسيس وهذا يؤدي في النهاية إلى هبوطات واضحة وأحياناً إلى أضرار جسيمة.

٥. تخلخل في جسم تربة التأسيس نتيجة لتحرك طبقات التربة بتأثير الحركات التكتونية.

٦. الصقيع والذي يعمل على زيادة في حجم الترب عن طريق تجمد الماء في المساحات وزيادة حجم المساحات مما يؤدي إلى تشكل فراغات كبيرة ومناطق ضعف بعد عملية ذوبان الصقيع.

٧. انتفاخ التربة الغضارية الشديدة الحساسية للماء.

٣-٤-٥ الهبوط التفاضلي Differential Settlement

عندما تكون الانتقالات الشاقولية (الهبوطات) تحت نقاط المنشأة الواحدة غير متساوية فهي تتعرض لحالة من حالات الهبوط غير المنتظم وهذا ما يدعى بالهبوط التفاضلي حيث يتم قياسه بحساب الفرق بين القيمة الدنيا و العظمى لقيم الهبوط المختلفة لنفس المنشأة وبسبب طبيعة التربة غير المتجانسة وحسب نوعية الأساس (صلب أو مرن) فإن إيجاد قيمة الهبوط التفاضلي يعتمد على طرق تجريبية واقتراحات، منها ما ورد عن Terzaghi و Peck أنه في الترب الرملية تقدر قيمة الهبوط التفاضلي كنسبة من الهبوط الكلي على ألاّ تزيد عن 75% منها، أما بالنسبة للترب الغضارية فيمكن اعتبار أن الهبوط التفاضلي يصل إلى حدوده العليا عندما تبلغ قيمة الهبوط الكلي.

الجدول (٣-٤) القيم الأعظمية للهبوطات التفاضلية معطاة بـ cm.

نوع التربة	أساس منعزل	حصيرة
غضارية	6	10
رملية	3.8	6

الرمل

الهبوط الكلي الأعظمي	٤٠ mm	للقواعد المنعزلة
الهبوط التفاضلي الأعظمي بين الأعمدة	٤٠ – ٦٥ mm	لأساسات الحصائر
	٢٥ mm	

الغضار

الهبوط الكلي الأعظمي	٦٥ mm	للقواعد المنعزلة
	٤٥ – ١٠٠ mm	لأساسات الحصائر
الهبوط التفاضلي الأعظمي بين الأعمدة	٤٠ mm	

الجدول رقم (7-1): أقصى هبوط كلي مسموح به للأساسات السطحية

نوع الأساس	نوع التربة	أقصى هبوط (مم)
أساسات منفصلة	متماسكة (غضارية)	70
	غير متماسكة (رملية)	50
حصيرة	متماسكة	150
	غير متماسكة	100

للتقليل من تأثير الهبوطات غير المقبولة على المنشآت يتم اللجوء إلى طرق تساعد في تخفيض قيم الهبوط أو حتى تسريع الهبوط منها:

١- إزالة الترب القابلة للانضغاط واستبدالها بردميات جيدة المواصفات: وتتم الإزالة عن طريق حفريات حيث تستبعد التوضعات العضوية ذات المقاومة الضعيفة للقص وذات القابلية العالية للانضغاط، كما تستبعد عموماً الطبقة السطحية المعرضة مباشرة للعوامل الجوية.

وإذا كانت الطبقة القابلة للانضغاط مستمرة في العمق، يفضل إزالتها حتى العمق 3.0-4.5m.

٢- تسهيل عملية الهبوط بضخ كميات مياه ضمن التربة مما يساعد في زيادة رصها والتقليل من قيمة الهبوط فيما بعد وذلك بالنسبة للأساسات الصغيرة.

٣- اللجوء إلى طرق التفجير والتي تساعد بشكل عام على اكتناز حبات التربة والحصول على درجة عالية من الرص، حيث توضع شحنات محددة بكميات كافية للحصول على رص مطلوب وفعال يصل لأعماق بين (6-9) متر.

٤- تشديد الترب خصوصاً إذا كانت الطبقات القابلة للانضغاط ذات سماكة صغيرة، ويمكن تطبيق الحمولات بحيث تتعرض هذه الطبقات إلى انضغاط يخفض فيما بعد من قيم الهبوط عند إقامة المنشأة، ويمكن تسريع التشديد عن طريق تصريف سريع للمياه (حفر آبار).

٥- إجراءات وقائية للمنشأة ذاتها حيث يتم وضع فواصل في البناء عند الأجزاء المختلفة الارتفاع أو عند الأجزاء ذات أعماق مختلفة للتأسيس، أو أحياناً بتقوية عناصر المنشأة الحاملة في المناطق المعرضة لقوى شد نتيجة الهبوط.

٣-٥ حساب قدرة تحمل التربة

٣-٥-١ مقدمة

إن الإجهاد الناجم عن حمولة قدرها Q لأساس عرضه B يؤدي لهبوط مقداره S متناسب مع الإجهاد المطبق، بزيادة الحمولة Q تتغير قيمة الانتقال الشاقولي S. وبدراسة العلاقة بين الهبوط والحمولات والتي تتعلق بأبعاد الأساس ووضعية التربة تحت الأساس وطبيعة الحمولة ذاتها يمكن أن تحدد بشكل مبدئي الحمولة الحدية Q_u والتي تستطيع قاعدة الأساس تحملها وتمثل منطقة ذروة منحني العلاقة بين الهبوط والحمولات

إن الإجهاد المطبق على القاعدة في هذه الحالة هو q_u ويدعى بالإجهاد الحدي ويساوي

$$q_u = \frac{Q_u}{A} \qquad (٣-٢٩)$$

حيث A مساحة قاعدة الأساس، وبهذا فإن جميع المنشآت يجب أن تنفذ بحيث تحقق عامل الأمان أو أن لا تتجاوز قيمة الإجهاد المسموح والذي يعرّف بالعلاقة:

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} \qquad (٣٠-٣)$$

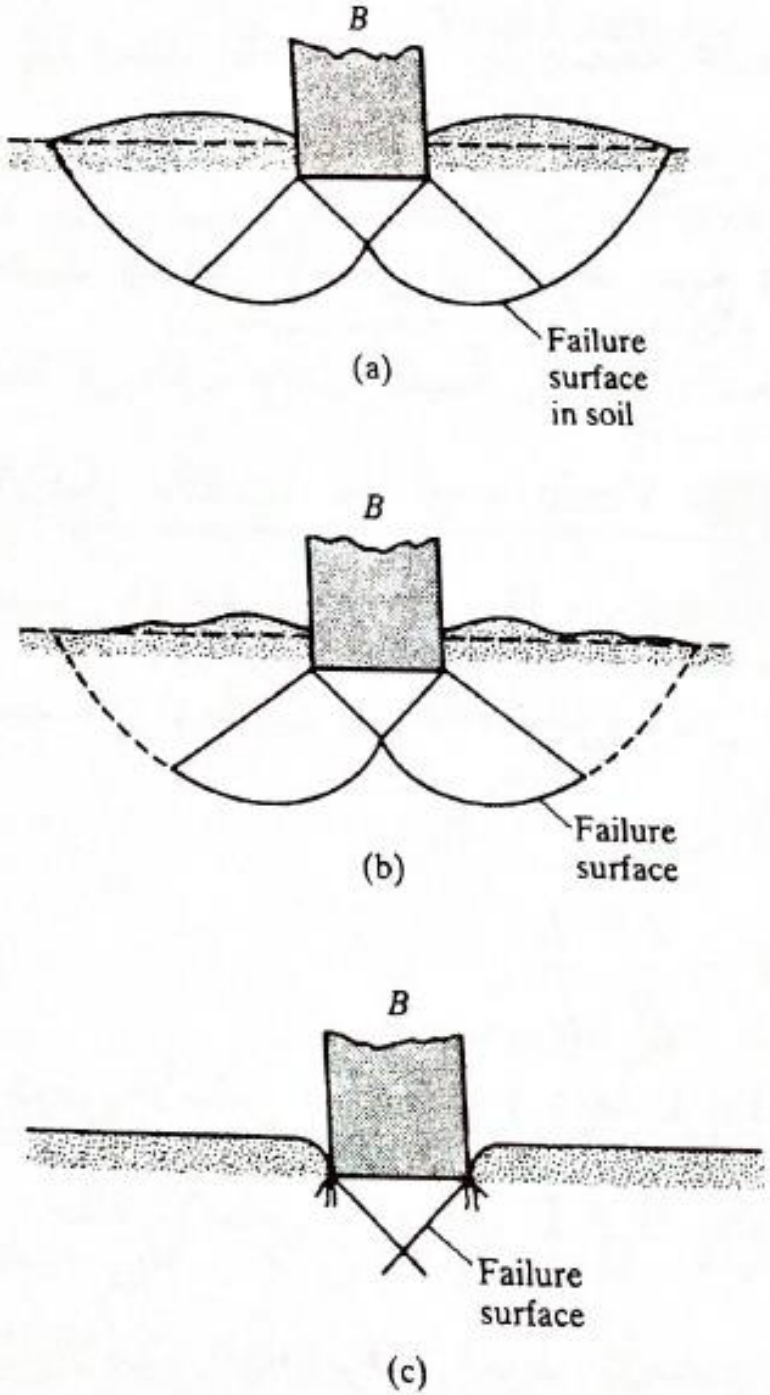
حيث F_s عامل الأمان، وبالتالي فالحمولة المسموحة يمكن إيجادها من الإجهاد المسموح

$Q_{all} = q_{all} * A$

٣-٥-٢ أشكال الانهيار – مفهوم التحمل الحدي:

تحدث الانهيارات نتيجة تجاوز الحمولات الحدية على شكل انهيار قصي تحت قاعدة الأساس وقد أكد ذلك عدة أمثلة من الانهيارات التي حدثت ولوحظ أن منطقة كبيرة تحت الأساس تعرضت إلى قص عام وبالتالي إلى ضعف التربة في منطقة التأثير مما أدى إلى انهيار المنشأة، ويمكن تقسيم أشكال الانهيار إلى ثلاثة أنواع:

- انهيار بالقص العام General shear failure
- انهيار بالقص الموضعي local shear failure
- انهيار بالثقب Punching shear failure


B
Failure
surface
in soil
(a)
B
Failure
surface
(b)
B
Failure
surface
(c)

تحديد عمق التأسيس Df

العمق الأصغري (m)	دليل اللدونة	إمكانية الإنكماش
1.0	>40	مرتفعة
0.9	20-40	متوسطة
0.75	10-20	منخفضة

٣-٥-٣ حساب التحمل الحدي:

بالاعتماد على نظرية ترزاكي Terzaghi والتي تعتمد أساس مستمر ذو قاعدة خشنة (وجود احتكاك بين قاعدة الأساس والتربة)، يتعرض لحمولة شاقولية.

هذا وقد أعطى ترزاكي العلاقة الأساسية لحساب التحمل الحدي q_u لأساس مستمر من الشكل:

$$q_u = \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma + q N_q + c N_c \qquad (٣٣-٣)$$

حيث: c: تماسك التربة.

γ : وزن واحدة الحجم للتربة.

$q = \gamma \cdot D_f$: الإجهاد المطبق من الحمولات الجانبية.

N_γ, N_q, N_c : عوامل التحمل والتي تتعلق بشكل مباشر بزاوية الاحتكاك الداخلية ϕ ويمكن إيجادها بالاعتماد على جداول أو منحنيات خاصة بها.

علاقات Prandtl/Reissner:

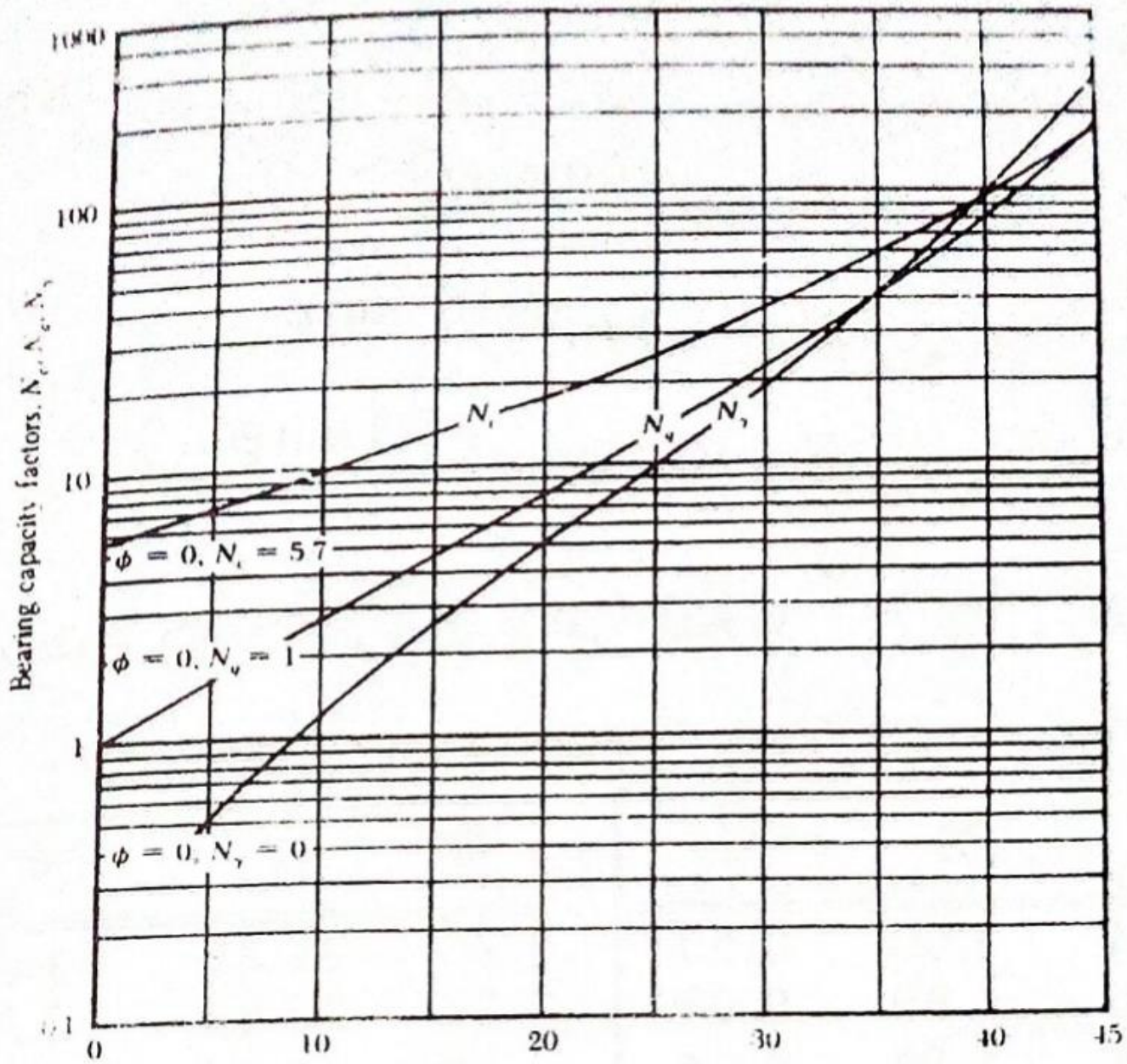
$$\begin{cases} N_q = e^{\pi \tan\phi} \cdot \tan^2\left(\dfrac{\pi}{4} + \dfrac{\phi}{2}\right) \\ N_c = \left(N_q - 1\right)\cot\phi \\ N_\gamma = 2\left(N_q + 1\right)\tan\phi \end{cases} \qquad (۳٤-۳)$$

Caqout/Kerisel/Vesic ñÚnnÞn

ويمكن أيضاً اعتماد الجدول (٣-٦) لإيجاد عوامل التحمل N_c, N_q, N_γ بدلالة ϕ .

الجدول (٣-٦) عوامل التحمل لـ Vesic

Φ	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00
1	5.38	1.09	0.07
2	5.63	1.20	0.15
3	5.90	1.31	0.24
4	6.19	1.43	0.34
5	6.49	1.57	0.45
6	6.81	1.72	0.57
7	7.16	1.88	0.71
8	7.53	2.06	0.86
9	7.92	2.25	1.03
10	8.35	2.47	1.22
11	8.80	2.71	1.44
12	9.28	2.97	1.69
13	9.81	3.26	1.97
14	10.37	3.59	2.29
15	10.98	3.94	2.65
16	11.63	4.34	3.06
17	12.34	4.77	3.53
18	13.10	5.26	4.07
19	13.93	5.80	4.68
20	14.83	6.40	5.39
21	15.82	7.07	6.20
22	16.88	7.82	7.13
23	18.05	8.66	8.20
24	19.32	9.60	9.44
25	20.72	10.66	10.88
26	22.25	11.85	12.54
27	23.94	13.20	14.47
28	25.80	14.72	16.72
29	27.86	16.44	19.34
30	30.14	18.40	22.40
31	32.67	20.63	25.99
32	35.49	23.18	30.22
33	38.64	26.09	35.19
34	42.16	29.44	41.06
35	46.12	33.30	48.03
36	50.59	37.75	56.31
37	55.63	42.92	66.19
38	61.35	48.93	78.03
39	67.87	55.96	92.25
40	75.31	64.20	109.41
41	83.86	73.90	130.22
42	93.71	85.38	155.55
43	105.11	99.02	186.54
44	118.37	115.31	224.64
45	133.88	134.88	271.76
46	152.10	158.51	330.35
47	173.64	187.21	403.67
48	199.26	222.31	496.01
49	229.93	265.51	613.16
50	266.89	319.07	762.89
51	312.45	388.20	902.70



الشكل (٣-٣٤) عوامل التحمل لترزاكي

مسألة (٣-٥):

أساس مربع m (1.5×1.5) يستند على تربة تماسكها $15.2\,kN/m^2$ وزاوية احتكاكها 20 درجة وزن واحدة الحجم $17.8\,kN/m^3$ ، احسب الحمولة الكلية المسموح تطبيقها إذا علمت أن عامل الأمان يساوي (4) وأن عمق التأسيس يساوي m (1) وأن الانهيار هو من نوع الانهيار بالقص العام.

الحل:

من علاقة نرزاكي لأساس مربع :

$$q_u = 0.4\gamma B N_\gamma + q N_q + 1.3 c N_c \qquad (٣-٤١)$$

ومن الشكل (٣-٣٤) من أجل $\phi = 20^\circ$:

$$N_\gamma = 5 \quad , \quad N_q = 7.4 \quad , \quad N_c = 17.7$$

بالتعويض:

$$q_u = (0.4)(17.8)(1.5)(5) + (1 \times 17.8)(7.4) + (1.3)(15.2)(17.7)$$

$$q_u = 53.4 + 131.72 + 349.75 = 534.87 \approx 535 \ kN/m^2$$

ويكون التحمل الكلي المسموح:

$$q_{all} = \frac{q_u}{F_s} = \frac{535}{4} = 133.75 \ kN/m^2$$

وبالتالي فإن الحمولة الكلية المسموح تطبيقها هي:

$$Q_{all} = (133.75) B^2 = 133.75 (1.5)^2 = 300.9 \approx 300 \ kN$$

٣-٧ العلاقة العامة للتحمل الحدي:

بعد الأخذ بعين الاعتبار تأثير مجمل العوامل السابقة من شكل الأساس وعمق التأسيس وميل الحمولة وميل أرضية الأساس ووجود أساس على منحدر، يمكن التعبير عن علاقة التحمل العامة والموسعة لأساس مستمر وذلك اعتماداً على ما بدأ به Terzaghi (63) بالشكل التالي:

$$q_u = \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma i} F_{\gamma \alpha} F_{\gamma d} F_{\gamma a} + q N_q F_{qs} F_{qi} F_{q\alpha} F_{qd} F_{qa} + c N_c F_{cs} F_{ci} F_{c\alpha} F_{cd} F_{ca} \qquad (٣-٥٠)$$

حيث : B عرض الأساس

γ وزن واحدة الحجم للتربة

q وزن الحمولات الجانبية (إجهادات فعالة)

c تماسك التربة

$F_{\gamma s}, F_{qs}, F_{cs}$ عوامل الشكل للأساس

$F_{\gamma i}, F_{qi}, F_{ci}$ عوامل ميل الحمولة المطبقه (عن ناظم الأساس)

$F_{\gamma \alpha}, F_{q\alpha}, F_{c\alpha}$ عوامل ميل أرضية الأساس (عن الأفق)

$F_{\gamma d}, F_{qd}, F_{cd}$ عوامل عمق التأسيس

عوامل المنحدر $F_{\gamma a}, F_{qa}, F_{ca}$

عوامل تحمل التربة بدلالة ϕ N_{γ}, N_{q}, N_{c}

٣-٨ تحديد القيم التقديرية لتحمل تربة الأساسات السطحية المنعزلة:

من أجل عدة أنواع للترب والصخور فقد تمت دراسة العديد من حالات الأساسات المنعزلة وذلك لحساب قيم التحمل المسموحة، ويبين الجدول (٣-١١) القيم المعتمدة في الأنظمة الأمريكية Naval للتحمل المسموح من أجل الأساسات السطحية والمنعزلة:

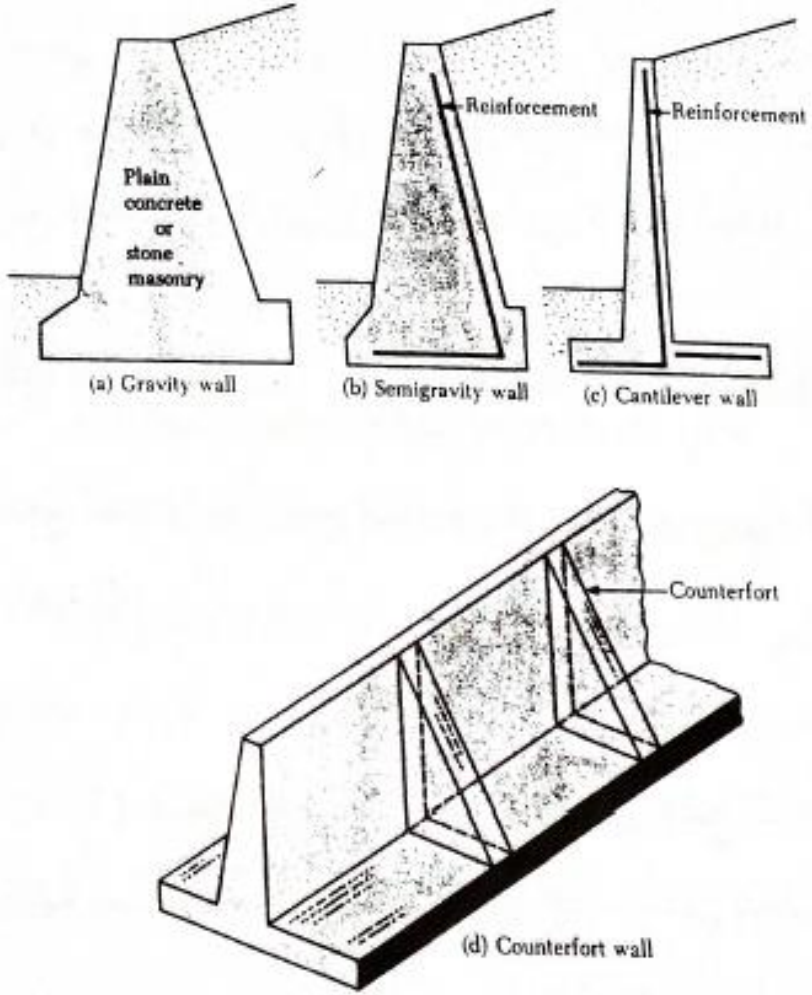
جدول (٣-١١) قيم التحمل المسموحة NAVAL – 89

نوع التربة أو الصخر	التحمل المسموح kN/m^2
صخر قاسي (غرانيت - بازلت)	8600
صخر متحول (اردواز - شيست)	3765
صخر رسوبي (حجر رملي - حجر سيلتي)	2150
صخور ضعيفة $(RQD < 25)$	1070
حصى، مزيج من الحصى والرمل مرصوص جيداً	750
متوسط الرص	535
مخلخل	320
رمل خشن إلى متوسط مرصوص جيداً	430
متوسط الرص	320
مخلخل	160

مخلخل		160
غضار لاعضوي	قاسي	430
غضار رملي	متوسط القساوة	215
غضار سيلتي	ضعيف	50
سيلت لاعضوي	قاسي	320
سيلت رملي	متوسط القساوة	160
سيلت غضاري	ضعيف	50

٤-١ مقدمة:

تعتمد بعض المشاريع الهندسية إلى تنفيذ عناصر إنشائية داعمة (جدران) مهمتها حماية المنشأة من الدفع الجانبي الناجم عن التربة المجاورة خصوصاً في الأقبية وفي حالة اختلاف المناسيب بالإضافة إلى بعض مشاريع الطرق ، يبين الشكل (٤-١) حالات مختلفة للجدران الإستنادية:



(a) Gravity wall (b) Semigravity wall (c) Cantilever wall

(d) Counterfort wall

يتم دراسة الجدران الإستنادية من حيث توازنها واستقرارها حيث يقوم المهندس المصمم بتحديد مقدار الدفع الجانبي على هذه الجدران ليتم تصميمها إنشائيا بما يتناسب مع قوى الدفع الجانبي، حيث أن استقرار الجدار يتعلق مباشرة بنوعية التربة التي تستند إليه وبالتالي إلى خصائص هذه التربة مثل:

وزن واحدة الحجم γ_b، زاوية الاحتكاك الداخلية للتربة ϕ، قيمة تماسك التربة c، محتوى الرطوبة w.

عند دراسة الدفع الجانبي على الجدران الإستنادية يتم تحديد محصلة واتجاه القوى ونقطة تطبيقها، ويمكن حسب (رانكين) التمييز بين ثلاثة أنواع من حالات دفع التربة:

٤-٢ دفع التربة في وضع الراحة Earth pressure at rest:

يتعرض عنصر ترابي على عمق z خلف الجدار لإجهادات شاقولية σ_v وجانبية σ_h، إن الجدار في هذه الحالة لا يبدي حركة في أي اتجاه وتحسب قيمة الدفع الجانبي σ_0 عليه في وضع الراحة كنسبة من الإجهاد الشاقولي كما في العلاقة:

$$\sigma_0 = K_0 \cdot \sigma_v \qquad (٤-١)$$

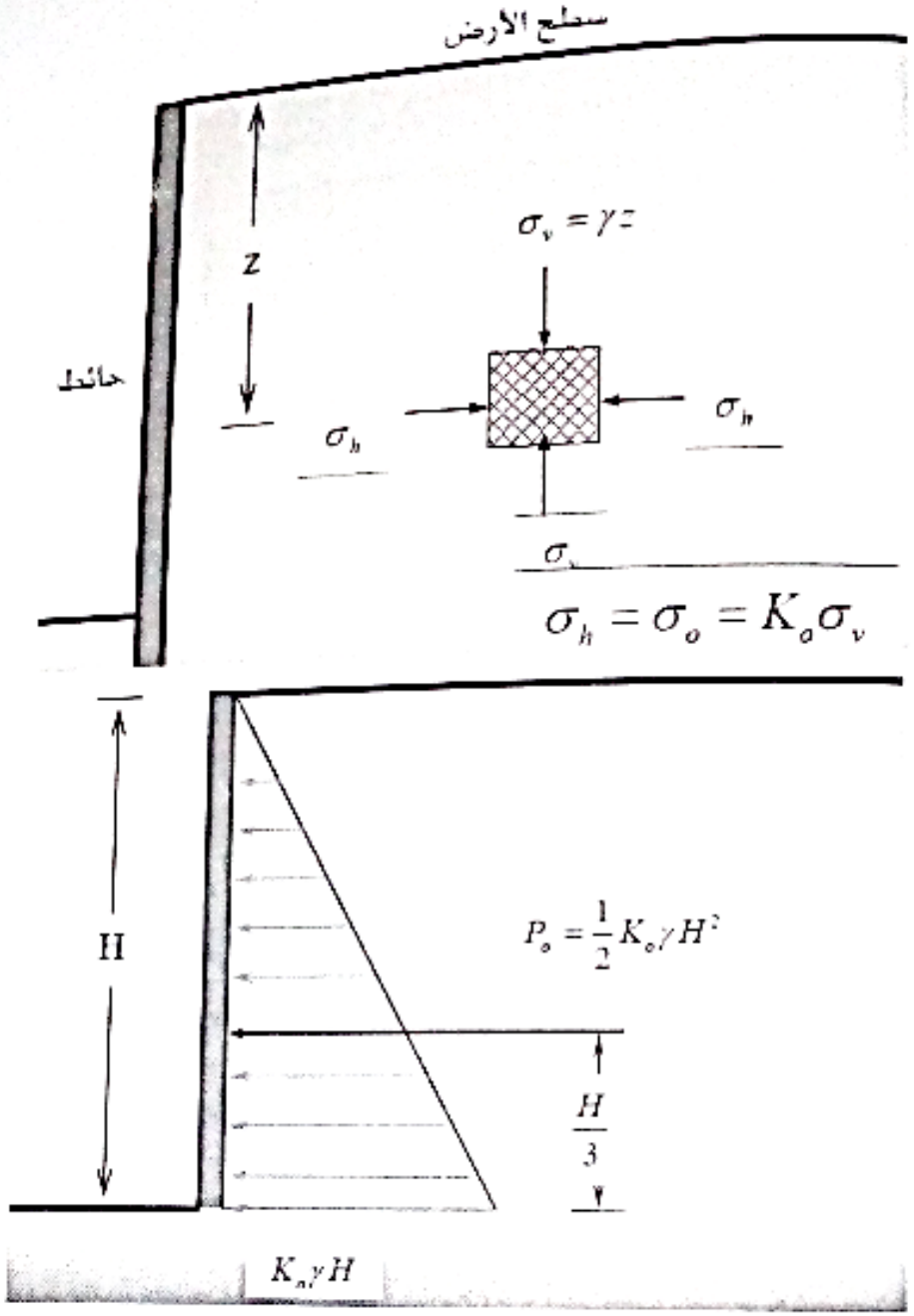
حيث: $\sigma_v = \gamma \cdot z$ هو الإجهاد الشاقولي الناجم عن وزن التربة

K_0 معامل الدفع أثناء الراحة تتراوح قيمته من 0.5-1.0 و يعطى بالعلاقة التالية بدلالة زاوية احتكاك التربة ϕ:

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \qquad (٤-٢)$$

يبين الشكل (٤-٢) طريقة توزع دفع التربة الجانبي في وضع الراحة خلف الجدار ذي الارتفاع H، وكيفية حساب محصلة الدفع التي تؤثر في الثلث السفلي للجدار وفق العلاقة:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot H^2 \qquad (٤-٣)$$



الشكل (٤-٢) دفع التربة في وضع الراحة (الجدار في حالة سكون)

٤-٣ دفع التربة الفعلي Active earth pressure:

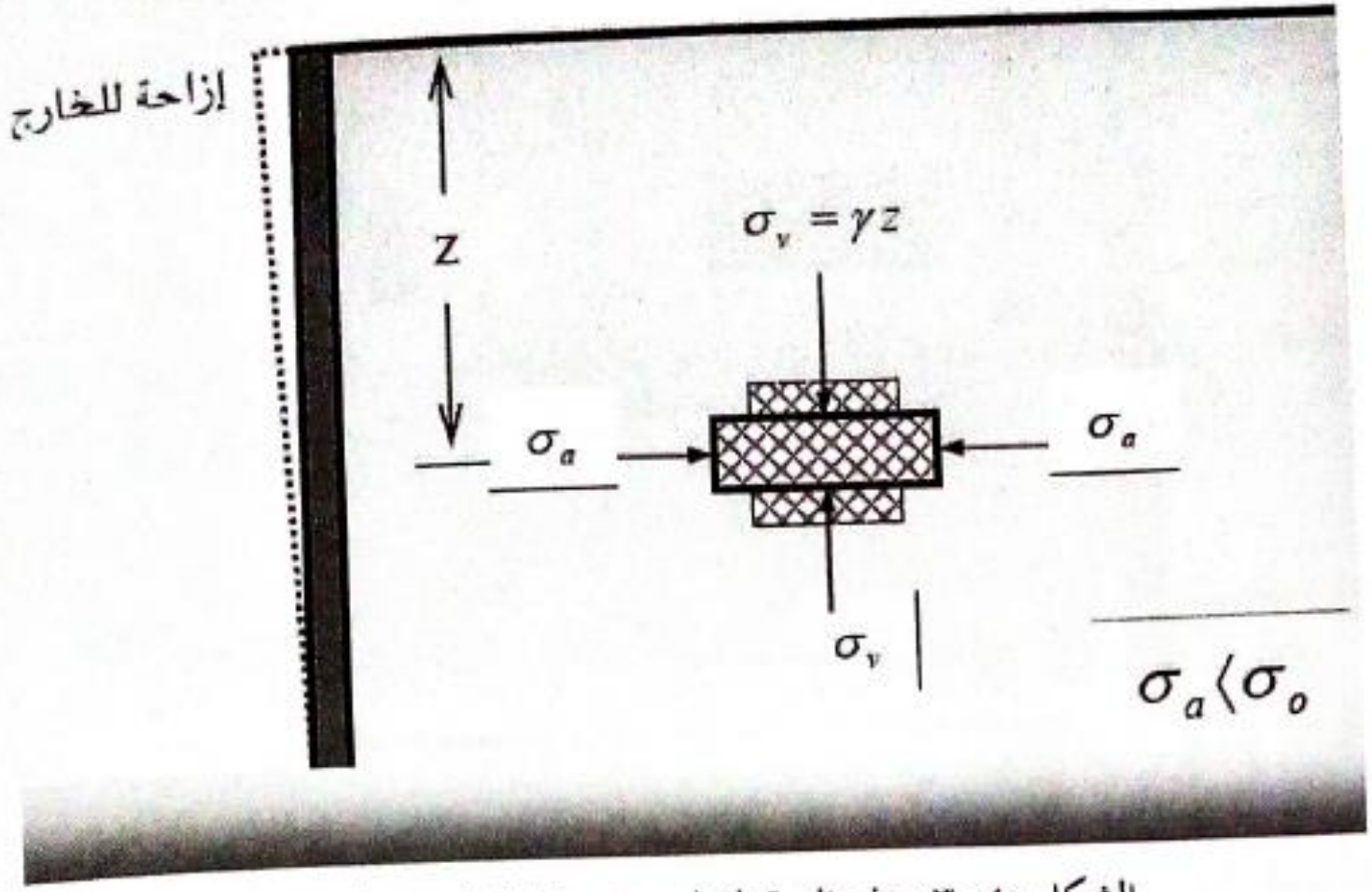
عندما يتعرض الجدار الإستنادي إلى إزاحة باتجاه الخارج مبتعداً عن التربة نتيجة لدفع التربة فانه يسمى بالدفع الفعلي σ_a وتكون قيمته أقل من σ_0 ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\sigma_a = K_a \cdot \sigma_v - 2c\sqrt{K_a} \qquad (٤-٤)$$

حيث: c تماسك التربة (kN/m^2)

K_a معامل الدفع الفعلي والذي يعطى بالعلاقة التالية بدلالة زاوية احتكاك التربة ϕ

$$K_a = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} = \tan^2\left(45-\frac{\varphi}{2}\right) \qquad (٥-٤)$$



الشكل (٤-٣) دفع التربة الفعلي σ_a (إزاحة الجدار للخارج)

في الترب المتماسكة تتعرض الطبقة السطحية منها إلى قوى شد نتيجة نقصان في محتوى الرطوبة وينجم عن ذلك تشققات طولانية تمتد من سطح التربة باتجاه العمق يرمز إليها بما يسمى بعمق الشد الأصغري z_0 والذي يعطى بالعلاقة التالية:

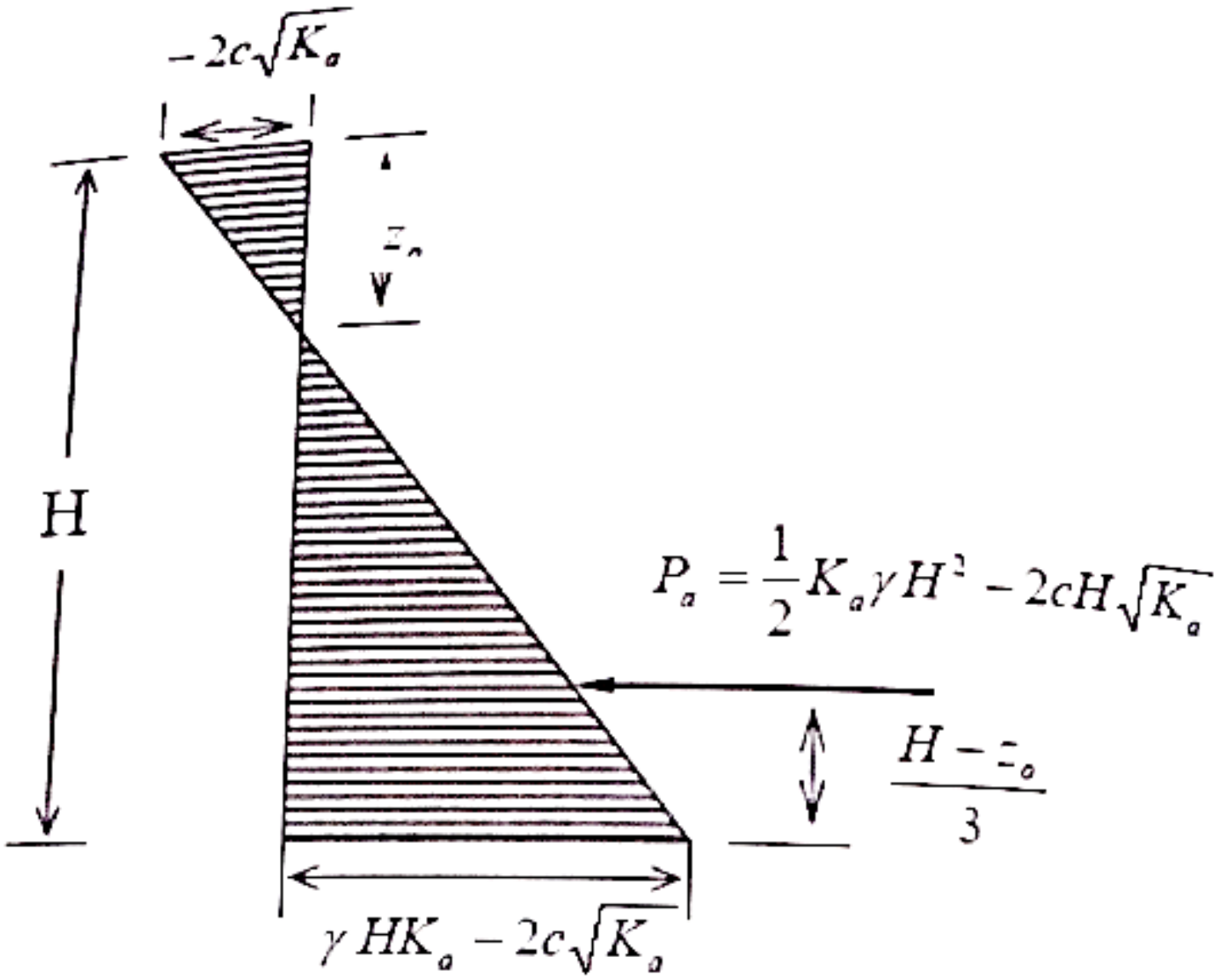
$$Z_0 = \frac{2c}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}} \qquad (٤-٦)$$

وفي حالة الترب الغضارية الصرفة حيث $\phi = 0$ فإن عمق الشد الأصغري يصبح:

$$Z_0 = \frac{2c}{\gamma} \qquad (٤-٧)$$

وبالتالي فان محصلة الدفع الفعلي P_a تكون:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot H^2 - 2cH\sqrt{K_a} \qquad (٤-٨)$$



الشكل (٤-٤) محصلة الدفع الفعلي P_a

٤-٤ دفع التربة العكسي Passive earth pressure:

في هذه الحالة يتحرك الجدار باتجاه التربة وبالتالي فانه يؤثر بشكل عكسي وتزيد بذلك الإجهادات فتصبح قوى الدفع العكسي σ_p أكبر من الدفع الجانبي في وضع الراحة σ_0 ويعطى بالعلاقة التالية:

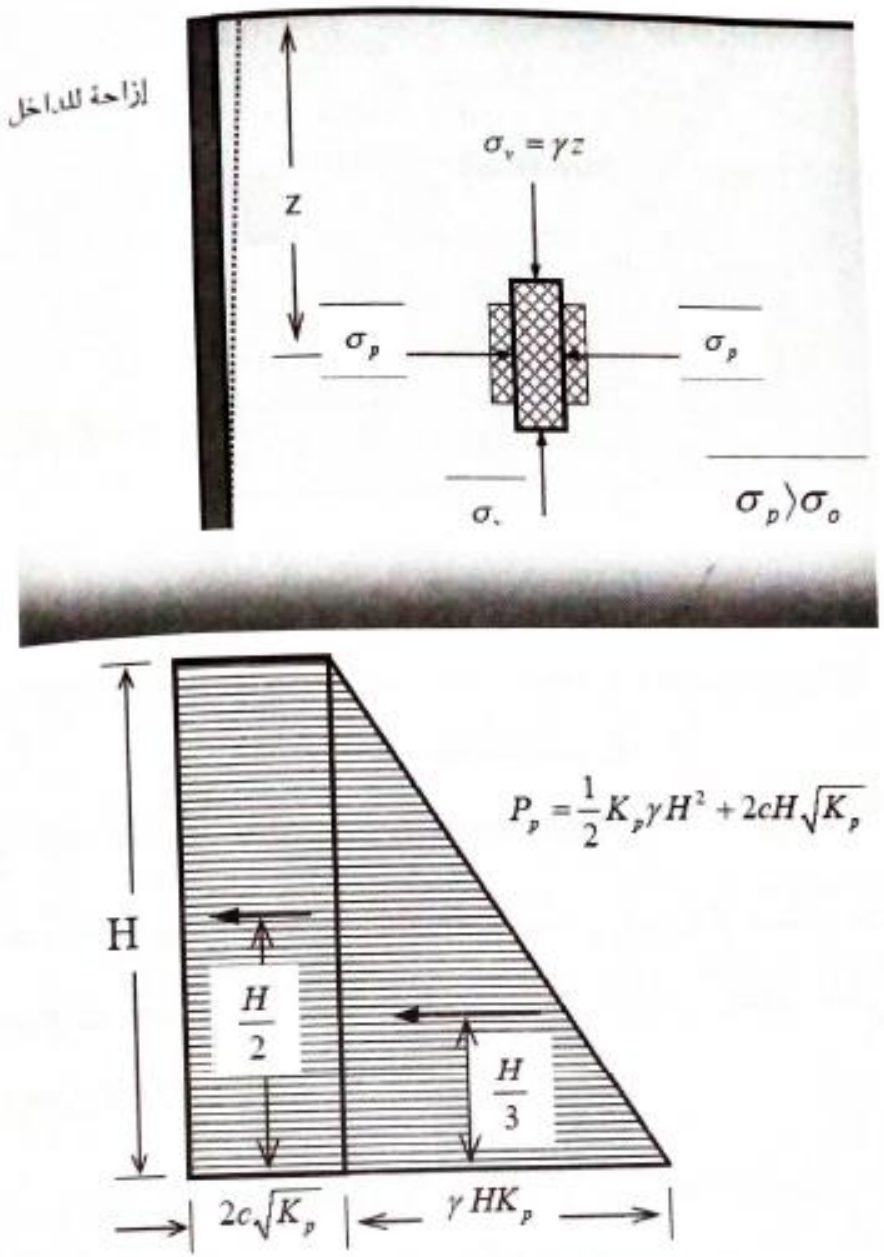
$$\sigma_p = K_p \cdot \sigma_v + 2c\sqrt{K_p} \qquad (٤-٩)$$

حيث K_p معامل الدفع العكسي ويعطى بالعلاقة التالية:

$$K_p = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = \tan^2\left(45+\frac{\varphi}{2}\right) \qquad (٤-١٠)$$

أما محصلة الدفع العكسي فتعطى حسب الشكل (٤-٥) بالعلاقة التالية:

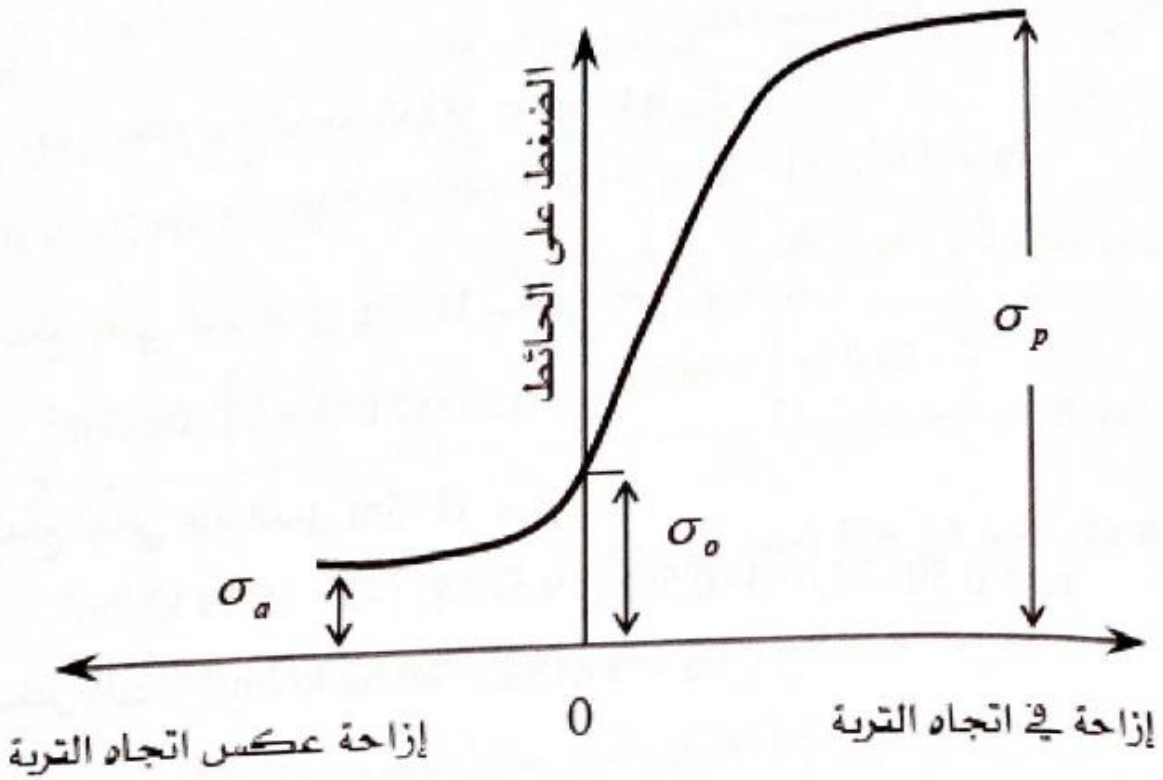
$$P_p = \frac{1}{2}K_p \cdot \gamma \cdot H^2 + 2cH\sqrt{K_p} \qquad (٤-١١)$$



الشكل (٤-٥) دفع التربة العكسي σ_p(ازاحة الجدار للداخل)

ومحصلة الدفع العكسي P_p

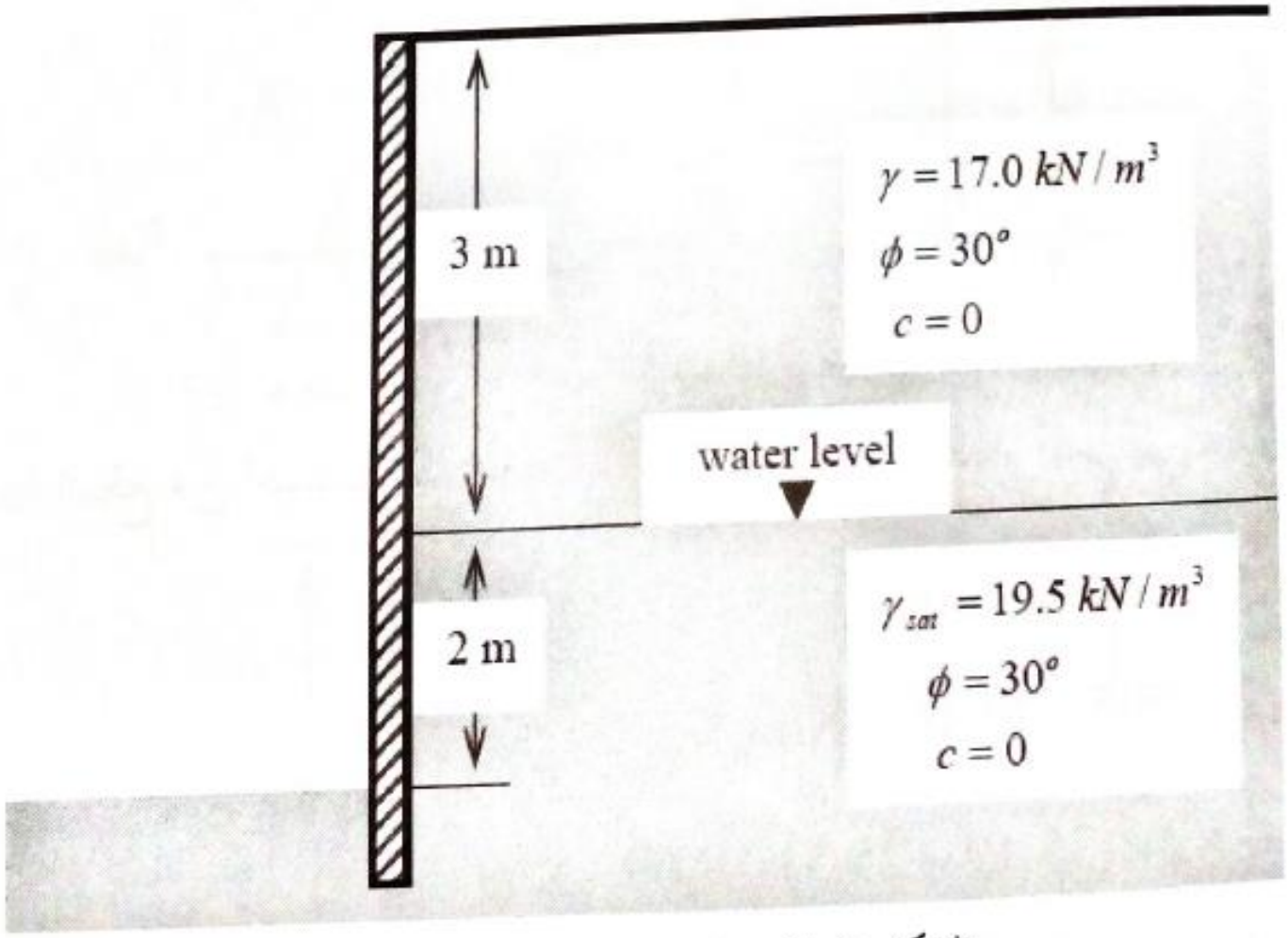
بمقارنة حالات الدفع الثلاثة التي تتعرض لها الجدران الإستنادية يتبين أن الإجهادات في التربة تضعف عندما يتحرك الجدار بعيداً عن التربة وتصبح σ_a وهي تزداد بشكل ملحوظ عندما يدفع الجدار التربة التي خلفه لتصبح قيمتها σ_p بينما تحافظ على قيمتها في حال السكون فتكون σ_0 وهي الحالة التي لا يتحرك فيها الجدار أبداً، الشكل (٤-٦) يبين العلاقة بين حالات الدفع الجانبي للتربة.



الشكل (٤-٦) حالات الدفع الجانبي

مسألة (٤-١):

المطلوب حساب محصلة الدفع الجانبي للتربة الرملية في وضع الراحة للجدار الإستنادي الموضح في الشكل (٤-٧) وتعيين نقطة تأثير المحصلة.



الشكل (٤-٧) جدار استنادي في وضع الراحة

الحل:

يعطى معامل الدفع عند الراحة بالعلاقة $K_0 = 1 - \sin\varphi$

أي: $K_0 = 1\text{-}\sin 30 = 0.50$

- الدفع الجانبي عند العمق H=3m يساوي: $\sigma_0 = K_0 \cdot \sigma_v$

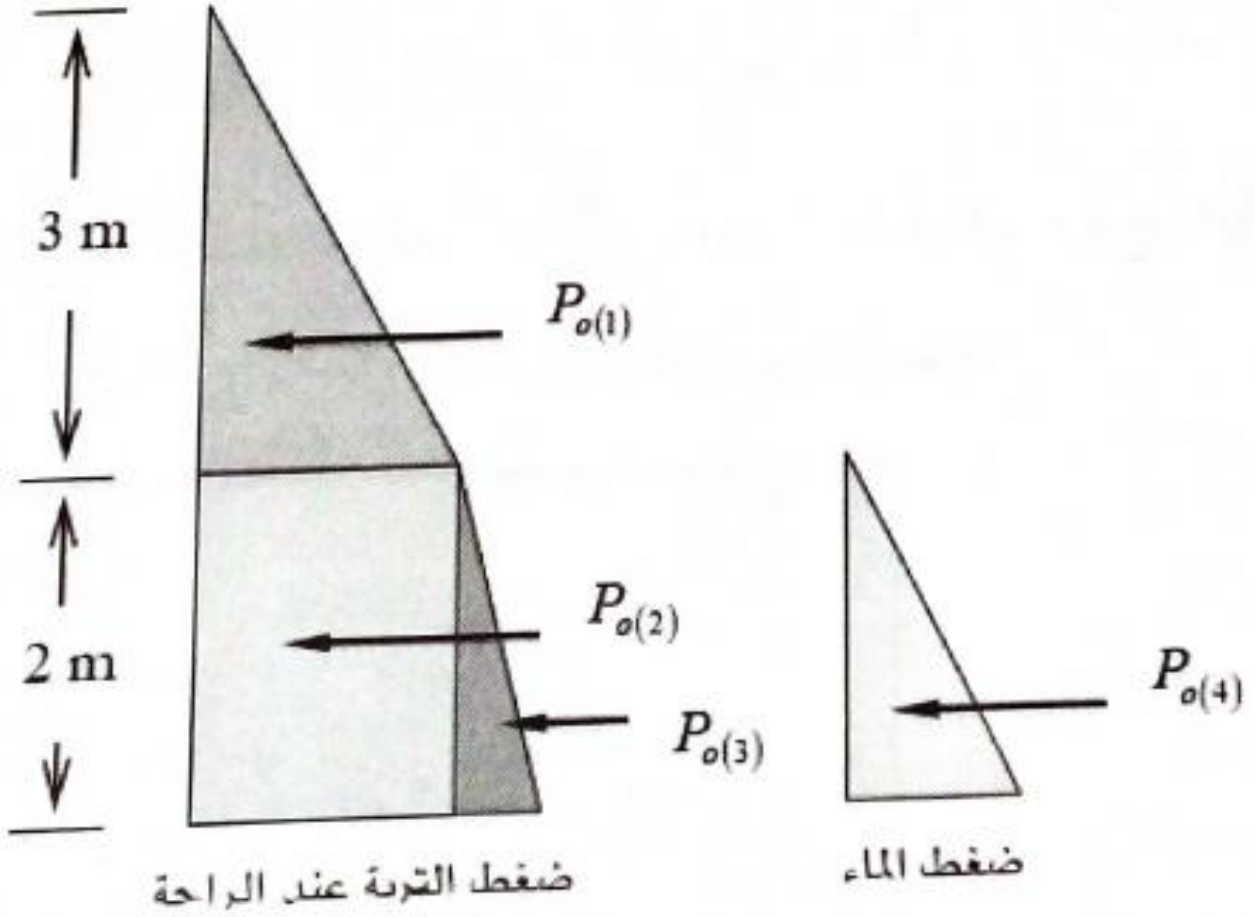
وبالتالي: $\sigma_0 = 0.50 \times 17.0 \times 3 = 25.50\ kN/m^2$

- الدفع الجانبي عند العمق H=5m يساوي:

$$\sigma_0 = 0.50 \times 17.0 \times 3 + 0.50 \times (19.5 - 9.81) \times 2 = 35.19\ kN/m^2$$

- ضغط الماء: $u = 9.81 \times 2 = 19.62\ kN/m^2$

وبتمثيل قيم الدفع الجانبي للتربة والماء يتبين:



تحسب قوى الدفع من حساب المساحات للمتر الطولي من الجدار كما يلي:

$$p_{0(1)} = \frac{1}{2} \times 3 \times 25.5 = 38.25 \text{ kN/m}$$

$$p_{0(2)} = 2 \times 25.5 = 51.00 \text{ kN/m}$$

$$p_{0(3)} = \frac{1}{2} \times 2 \times (35.19 - 25.5) = 9.69 \text{ kN/m}$$

$$p_{0(4)} = \frac{1}{2} \times 2 \times 19.62 = 19.62 \text{ kN/m}$$

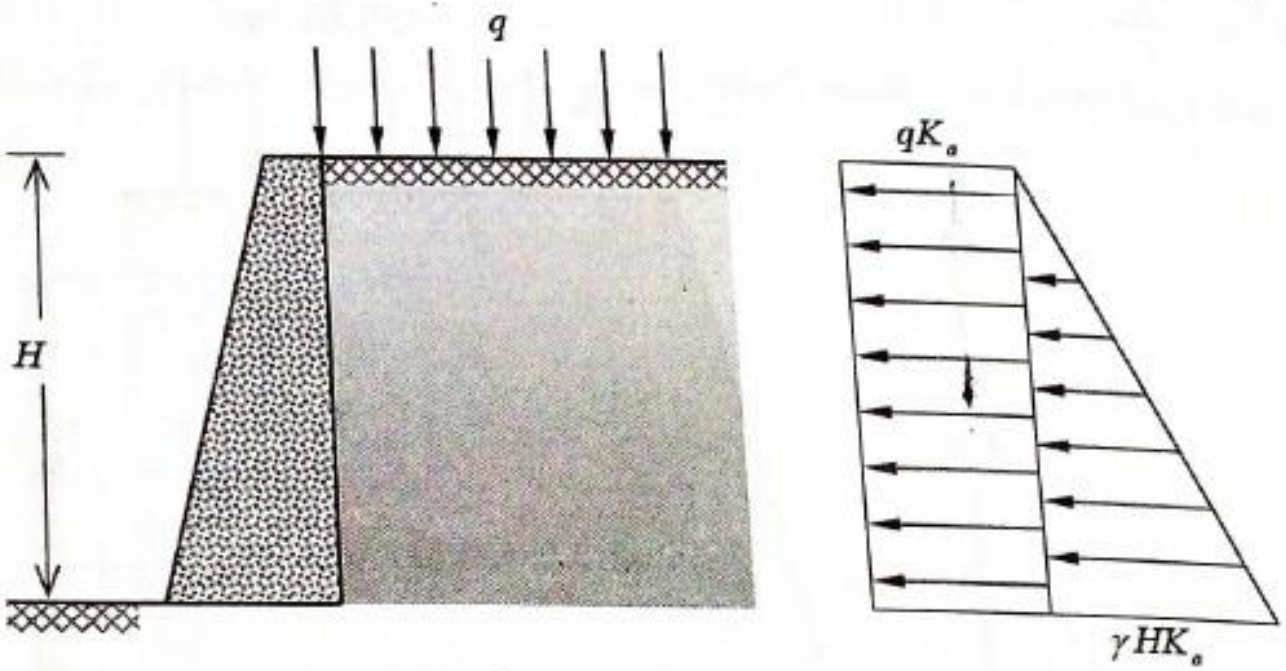
وبالتالي فان محصلة قوى الدفع الجانبي في وضع الراحة:

$$P_0 = P_{0(1)} + P_{0(2)} + P_{0(3)} + P_{0(4)}$$
$$= 38.25+51.00+9.69+19.62 = 118.56 \text{ kN/m}$$

ولتحديد نقطة تأثير المحصلة اعتباراً من أسفل الجدار:

$$h = \frac{38.25\times\left(3\times\frac{1}{3}+2\right)+51.00\times\frac{2}{2}+9.69\times\frac{2}{3}+19.62\times\frac{2}{3}}{118.56} = 1.56m$$

٤-٦ دفع التربة في حالة وجود حمولات حية Surcharges:



الشكل (٤-٩) دفع التربة الفعلي . حالة حمولات حية

تتعرض التربة خلف الجدران الإستنادية أحياناً لحمولات قد تكون مركزة أو موزعة بانتظام q كما في الشكل (٤-٩)، وتعطى قيمة الإجهاد الناظمي لنقطة على عمق z بالعلاقة التالية:

$$\sigma_v = q + \gamma \cdot z \qquad (٤-١٦)$$

ويحسب الدفع الفعلي بالعلاقة:

$$\sigma_a = (q + \gamma \cdot z)\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} = (q + \gamma \cdot z)K_a \qquad (١٧-٤)$$

ومحصلة الدفع الفعلي:

$$P_a = \frac{1}{2}\gamma \cdot H^2 \cdot K_a + q \cdot H \cdot K_a \qquad (١٨-٤)$$

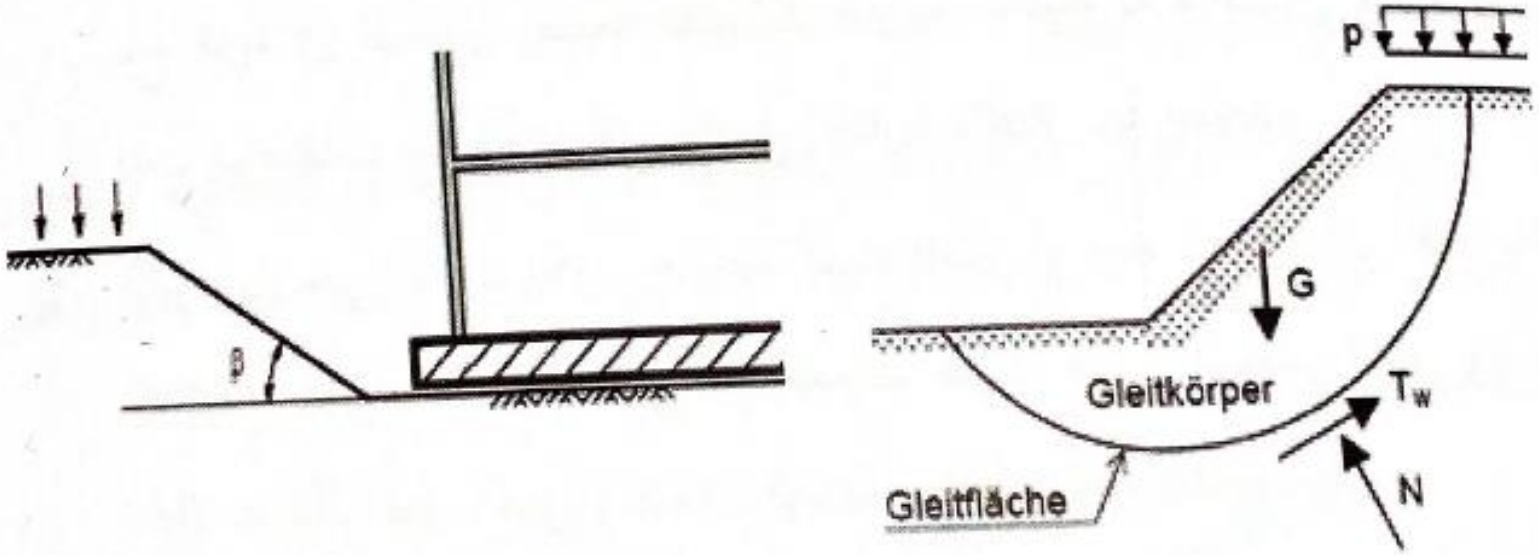
يتبين أن الإجهاد (الدفع) الناجم الحمولات الحية يبقى ثابتاً ولا يتغير مع العمق.

و تكون محصلة الدفع العكسي:

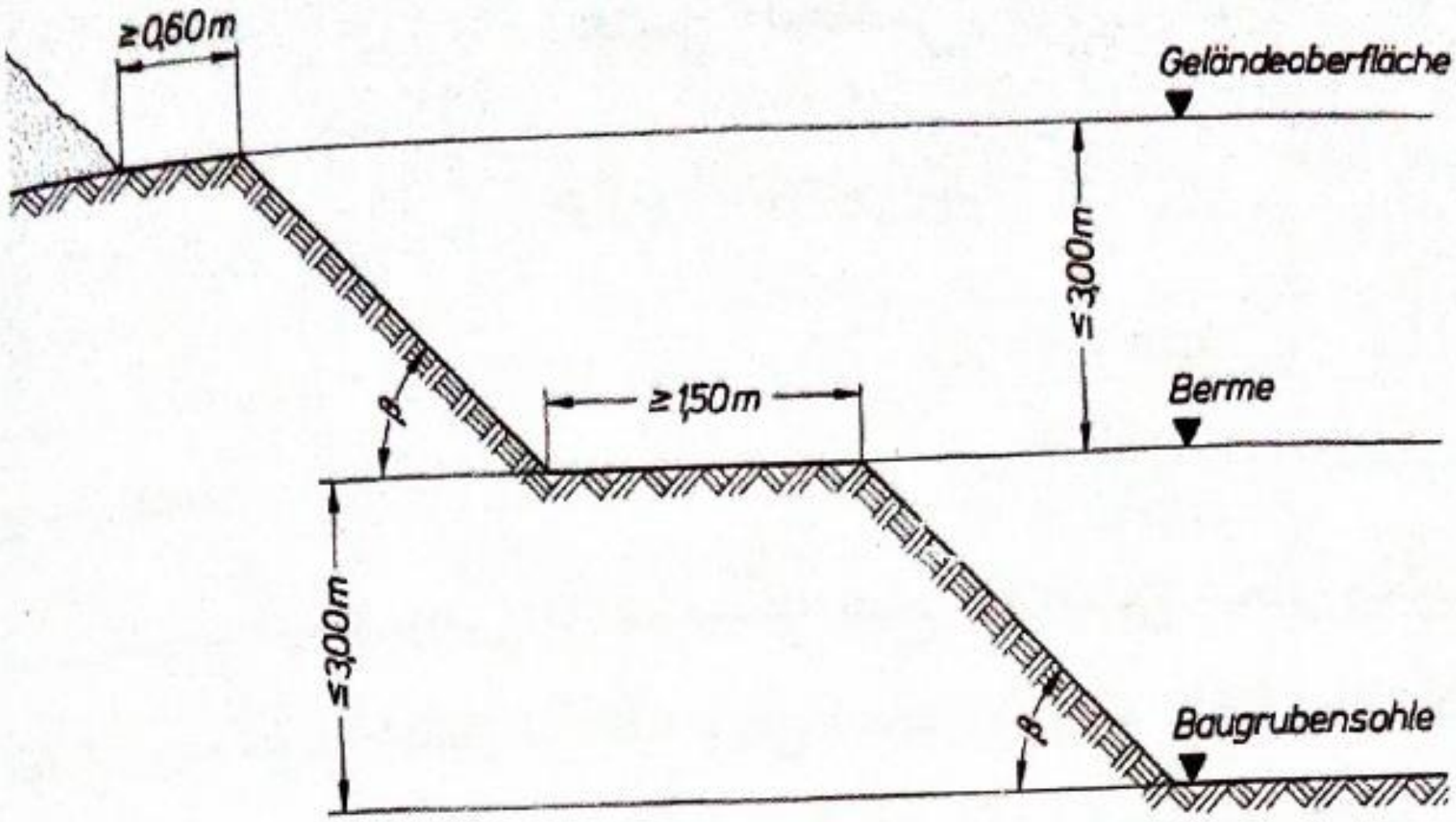
$$P_p = \frac{1}{2}\gamma \cdot H^2 \cdot K_p + q \cdot H \cdot K_p \qquad (١٩-٤)$$

٥-١ مقدمة:

تتواجد التربة في بعض الحالات مشكلة سطح مائل يسمى منحدر ويكون صلة الوصل بين مستويين مختلفين من التربة ويبقى المنحدر في وضع استقرار طالما أن قوى القص (Φ، c) لم تتأثر بالعوامل الخارجية مثل الحمولات الزائدة على المنحدر وتغير منسوب البساط المائي فيه. يمكن للمنحدرات أن تكون طبيعية أو أن تكون اصطناعية بفعل الإنسان كما في حالة المنشآت ذات المنسوب المنخفض و مشاريع الطرق والسكك والجسور وغيرها..،الشكل (٥-١).



في المشاريع التي تحتاج فيها تنفيذ حفريات مثل مشاريع تمديد خطوط الصرف الصحي يتم اللجوء لتنفيذ حفريات طولية ذات جوانب مائلة (منحدرات) لحماية الجدران من الانهيار ويجب أن تحقق شروطاً خاصة لتبقى في وضع الاستقرار حيث يتعلق ذلك بعمق الحفرية وزاوية ميل المنحدر ونوع التربة، وفي حالة الأعماق الكبيرة للحفريات يتم تنفيذ جوانب الحفرية من مجموعة منحدرات تفصل بينها مستويات أفقية لا تقل عن 1.5m كما في الشكل (٥-٢).



الشكل (٥-٢) نموذج لمنحدر منفذ على مرحلتين

٥-٢ أشكال انهيار المنحدرات:

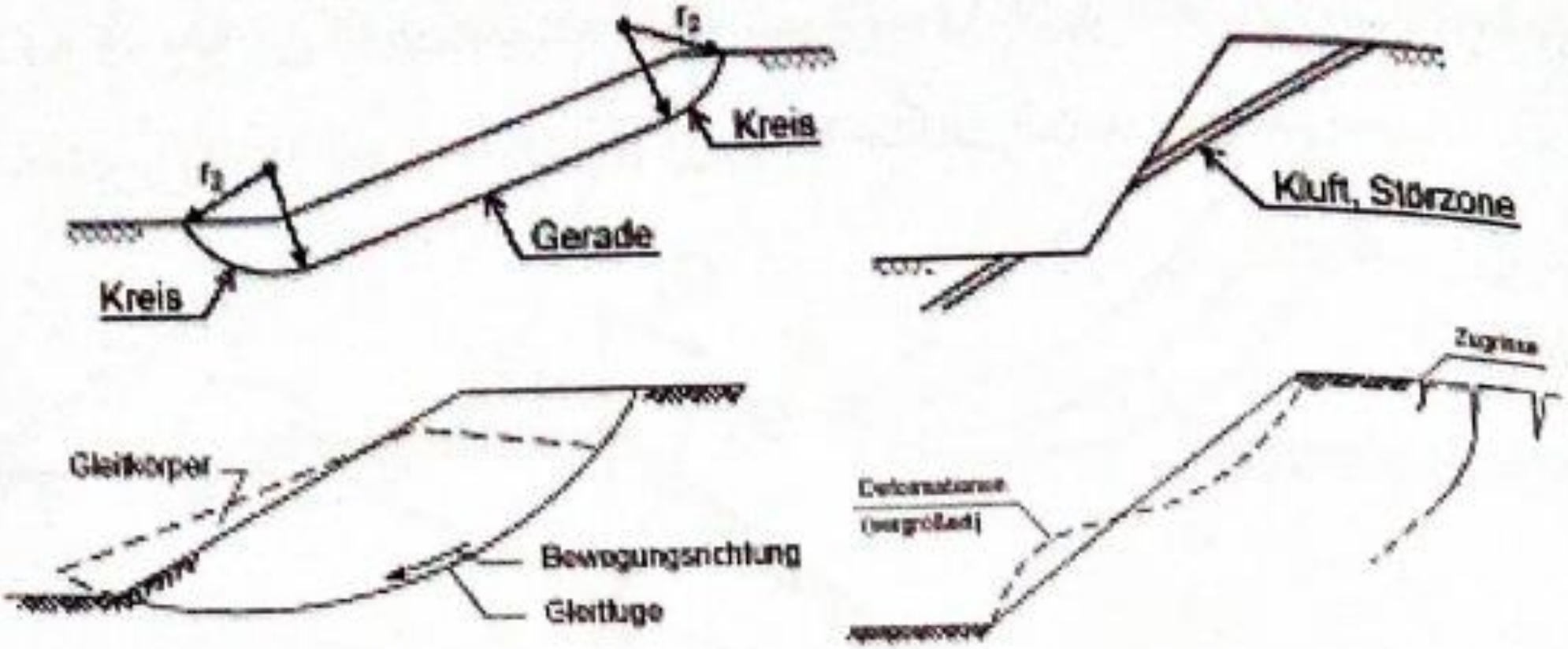
يمكن حصر العوامل المؤثرة على استقرار المنحدرات ضد الانهيار بما يلي:

١. نوع التربة في المنحدر وطبيعة الطبقات الترابية المكونة له واحتمال وجود طبقات ذات مواصفات ضعيفة تشكل فواصل إجبارية لانهيار تربة المنحدر.

٢. تأثير المياه وهي إما أن تكون خارجية كمياه المطار أو مياه الري أو أن تكون داخلية كارتفاع منسوب البساط المائي أو حدوث جريان ضمن المنحدر الترابي وفي جميع الحالات تتأثر قوى القص وتضعف قيمتها وبالتالي مقاومتها.

٣. الحمولات المطبقة خصوصاً الديناميكية منها كالحمولات الناجمة عن حركة الآليات الثقيلة بجانب المنحدر أو أعمال الحفريات وبناء المنشآت قرب المنحدرات بالإضافة للحمولات الناجمة عن الهزات الأرضية.

تختلف أشكال انهيار المنحدرات بحسب طبيعة كل منحدر وعموماً تأخذ سطوح الانهيار الأشكال الدائرية أو المنحنيات اللوغارتمية وأحياناً سطوح مستوية مع منحنيات، وحسب تايلور فان المنحدرات تنهار عندما تكون قيمة زاوية الاحتكاك الداخلية $\Phi \approx 5^\circ$ بدون أية حمولات إضافية، يبين الشكل (٥-٣) أشكال الانهيار الشائعة.

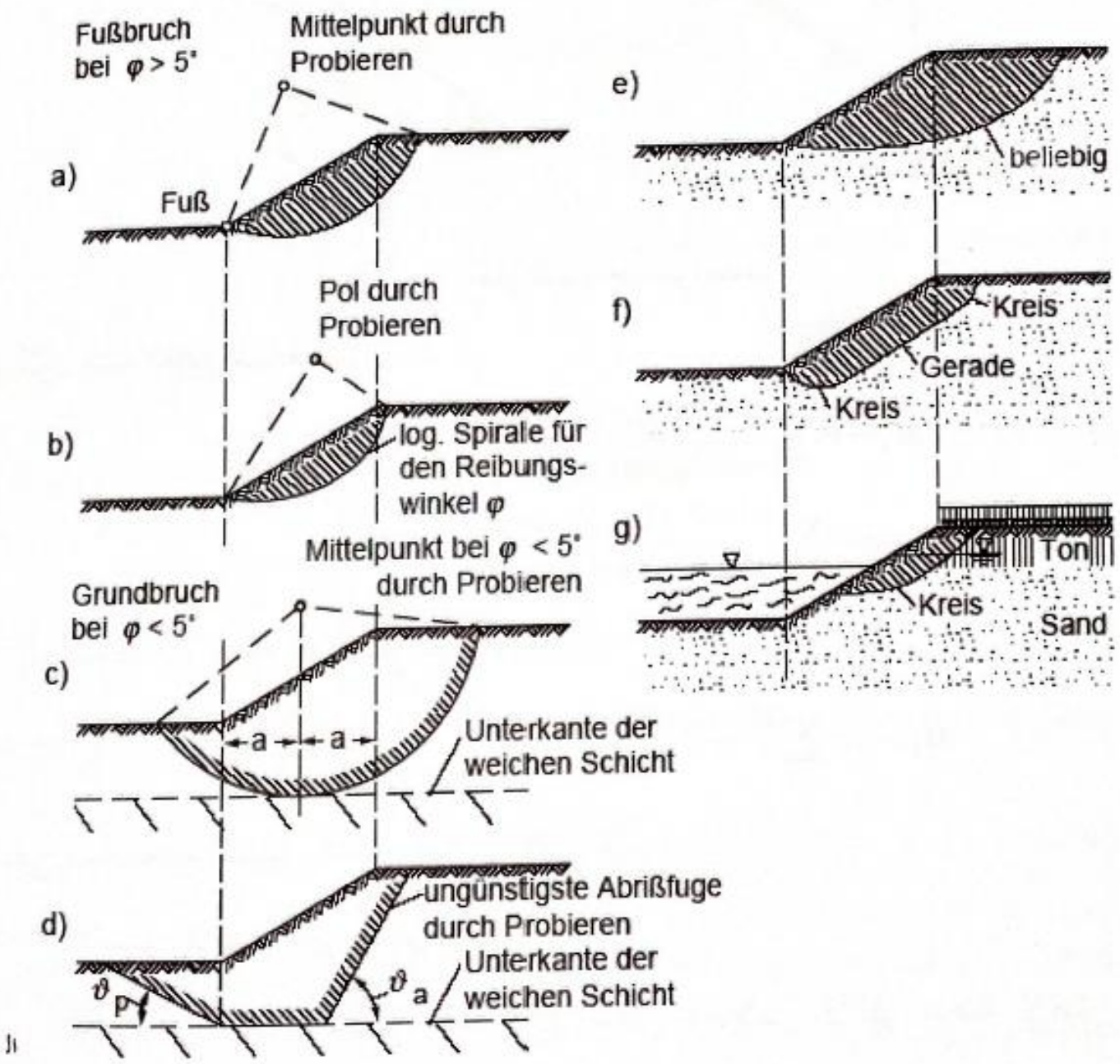


الشكل (٥-٣) أشكال انهيار المنحدرات

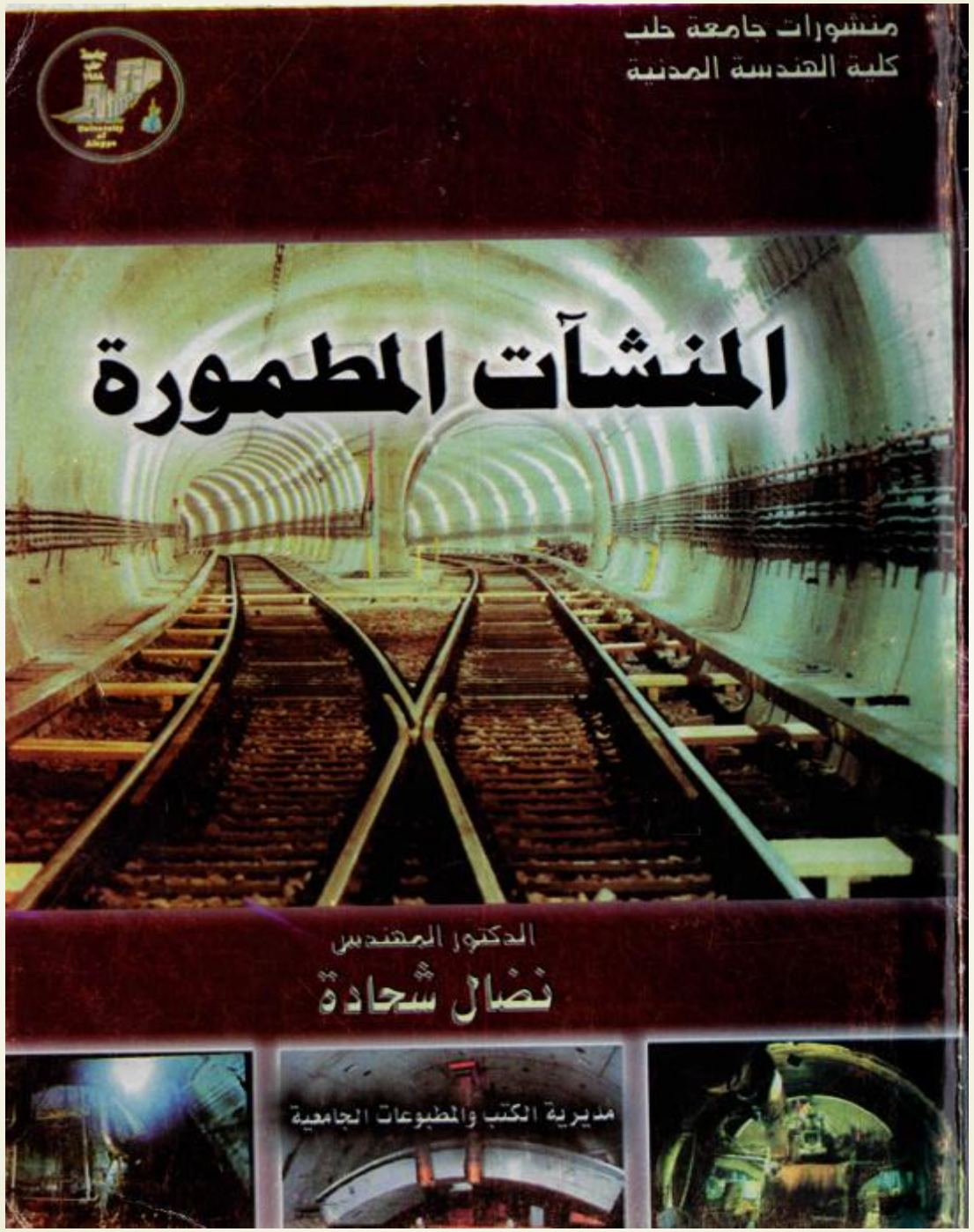
٥-٣-٣ سطوح الانهيار الغير مستقرة:

يمكن من خلال الشكل (٥-١٢) عرض الحالات الأكثر عرضة لانهيار المنحدرات والتي تبدأ بتشكل سطوح انهيار مختلفة فيما بينها ومشتركة في أنها غير مستقرة وستؤول إلى الانهيار، وهذه الحالات هي:

- سطح انهيار دائري يصل لقاعدة المنحدر
- سطح انهيار دائري بسبب ضعف قوى الاحتكاك وتغلب قوى التماسك
- سطح انهيار دائري محدود لا يصل لقاعدة المنحدر
- سطح انهيار لوغاريتمي يصل لقاعدة المنحدر (نادر الحدوث)
- سطح انهيار مركب دائري ومستوي
- سطح انهيار مستوي محدد بطبقة ضعيفة
- سطح انهيار منحني (يمكن أن يأخذ أي شكل)



شكل (٥-١٢) حالات مختلفة لسطوح انهيار غير مستقرة


منشورات جامعة حلب
كلية الهندسة المدنية
المنشآت المطمورة
الدكتور المهندس
نضال شحادة
مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية

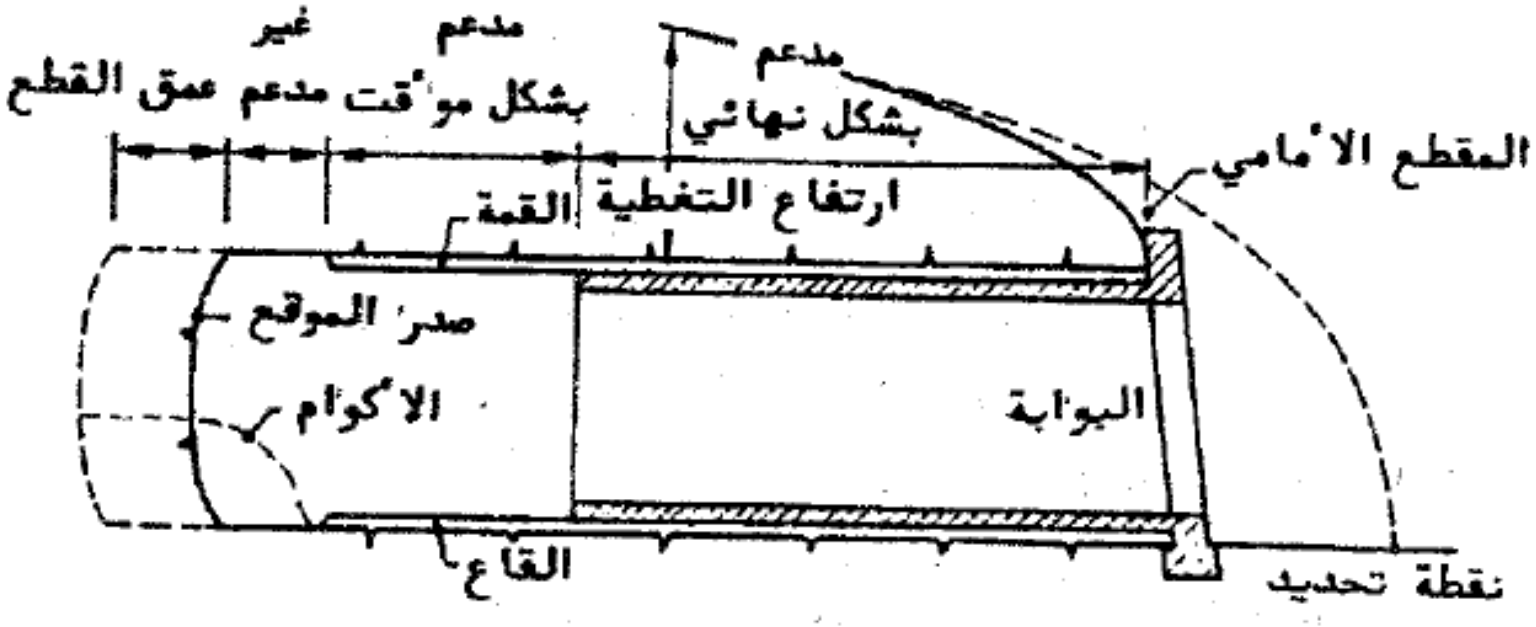
يمكن تعريف "**المنشآت المطمورة**" بأنها جميع المنشآت التي تنفذ تحت سطح الأرض مهما كانت أبعادها أو الغرض من استخدامها، وبغض النظر عن طريقة تنفيذها. ومن المهم التمييز بين طريقتين أساسيتين في تنفيذ المنشآت المطمورة هما:

أ . **الطريقة المغلقة**: حيث يتم تنفيذ المنشأة في هذه الطريقة بواسطة الحفر ضمن الجبل أي تحت سطح الأرض الطبيعية، سواء كانت عمليات الحفر بالتفجير أو بالطرق الآلية (الشكل ١ .١).

ب . **الطريقة المفتوحة (المكشوفة)**: حيث يتم تنفيذ المنشأة في هذه الطريقة من خلال تنفيذ حفرية مكشوفة (خندق) ابتداءً من سطح الأرض الطبيعية، وبعد ذلك تنفذ المنشأة على قاع الحفرية ثم يتم ردمها (الشكل ١ .٢).

١ .٣ . المصطلحات المستخدمة في بناء المنشآت المطمورة

يتضمن الشكلان (١ .٤ و ١ .٥) بعض المصطلحات الأساسية المستخدمة في مجال بناء المنشآت تحت الأرضية من خلال مقطع طولي في نفق أثناء التنفيذ ومن خلال مقطع عرضي تقليدي.



شكل (١ .٤) مقطع طولي في نفق في طور الإنشاء

الـ ـجـ ـبـ ـل (١) : هو مجموعة الروابط الصخرية للمادة الواقعة في محيط النفق سواء كان النفق ضمن جبل بالمفهوم العام أو تحت الماء أو ضمن المدن. أي أن هذا المفهوم يطلق على المادة التي سينفذ ضمنها النفق مهما كان نوعها.

الضغط الجبلي (٢) : هو القوى التي يظهر تأثيرها عند فتحة النفق مباشرة.

صـ . ـدر الموة . ـع : هو المقطع العرضي المغلق الذي سيتعرض للإغارة.

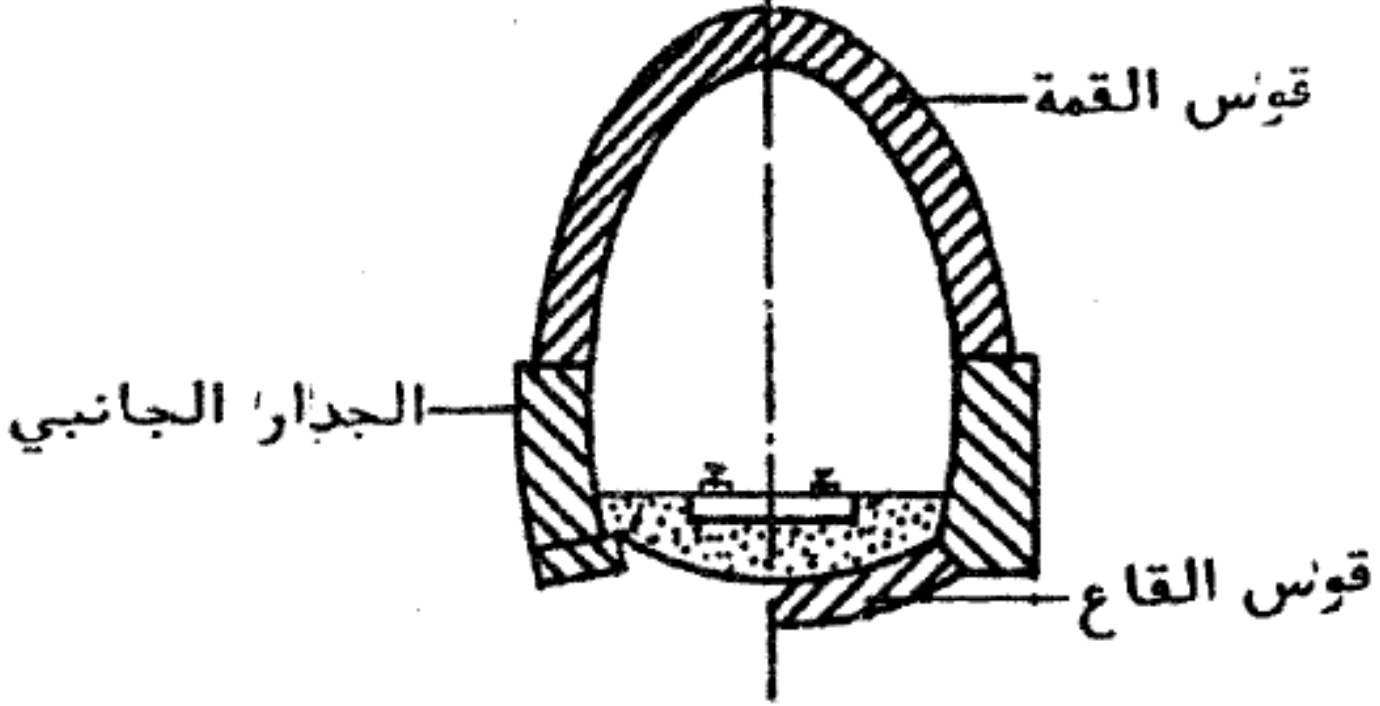
الإغارة (أو الاقتحام) : هي عمليات الحفر والتفجير والتهوية والترحيل.

القطع : يمثل عملية التقدم في كل إغارة.

القمة : هي السطح العلوي لمقطع الفتحة.

القاع (أو القعر) : هو السطح السفلي لمقطع الفتحة.

الترحيل : عملية نقل الكتل الناجمة عن فتح المقطع من أمام صدر الموقع.



شكل (١ ـ٥) مقطع عرضي في نفق موضحاً عليه عناصر الكسوة

التهوية : عملية سحب وضخ الهواء من أجل الحفاظ على صدر الموقع نقياً من الغبار.

كسوة (بطانة) النفق : يقصد بها مادة البناء التي تعطي للمقطع العرضي للنفق شكله النهائي وتتألف عادة من قوس القمة والجدران الجانبية وقوس القاع، ويمكن أن تكون من الأحجار أو القرميد أو البيتون...الخ.

ويمكن تعريف **زمن الصمود** t بأنه الزمن الذي يستطيع أثناءه الجبل بالصمود (عدم الانهيار) ابتداءً من لحظة حفره وحتى لحظة تدعيمه . و بتعبير آخر فان زمن الصمود هو الزمن الفاصل بين لحظة شق النفق وانهياره (دون وجود تدعيم) .

صنف الجبل	الوصف	زمن الصمود t
A	ثابت (مقاوم)	20 y.
B	تصدعي	6 mon.
C	شديد التصدع	1 w.
D	تكسري	5 h.
E	سريع التكسر	20 min.
F	انضغاطي	2 min.
G	عالي الانضغاطية	10 s.

٢ .٥ .١ . تدعيم المنشآت تحت الأرضية بواسطة بيتون الرش

إن تدعيم (تبطين) المنشآت تحت الأرضية بواسطة بيتون الـ رش أو مـ ايمكن تسميته بالبيتون المقذوف (Shotcrete) يعتمد على رش البيتون على السطح الخارجي للتجاويف الجبلية دون استخدام قوالب معينة ·

ويتكون بيتون الرش من مزيج من الاسمنت ومواد مضافة ذات حجوم حبـ ات محددة وكذلك الماء ويمكن إضافة مواد أخرى حسب الضرورة، أي أن تركيبه يشـ ابه تماماً لتركيب البيتون ا لعادي · وفي حالات خاصة يتم استخدام تعبير " ملاط الرش "

صنف الجبل	A	B	C	D	E	F	G
الصفة	ثابت	تصدعي	تكسري خفيف	تكسري متوسط	تكسري كبير	انفصالي	انفصالي شديد
التدعيم بواسطة بيتون الرش (سماكة cm)	لا يحتاج	2..3 عند الحاجة	3..5	5..7	7..10	10..20	

٣ . ١٠ . تعريف

من أجل دراسة الإجهادات في الجبال لابد من التنويه إلى حالتين أساسيتين:

أ . حالة الإجهادات الأولية (الابتدائية) (Primary stresses condition)

وتعرف بأنها حالة الإجهادات السائدة في الجبال المتوضعة طبيعياً أي قبل التعرض لها بعملية شق نفق أو منشأة تحت أرضية.

ب . حالة الإجهادات الثانوية (التالية) (Secondary stresses condition)

وتعرف بأنها حالة الإجهادات التي تنشأ في الجبال نتيجة عمليات الحفر التي تتعرض لها.

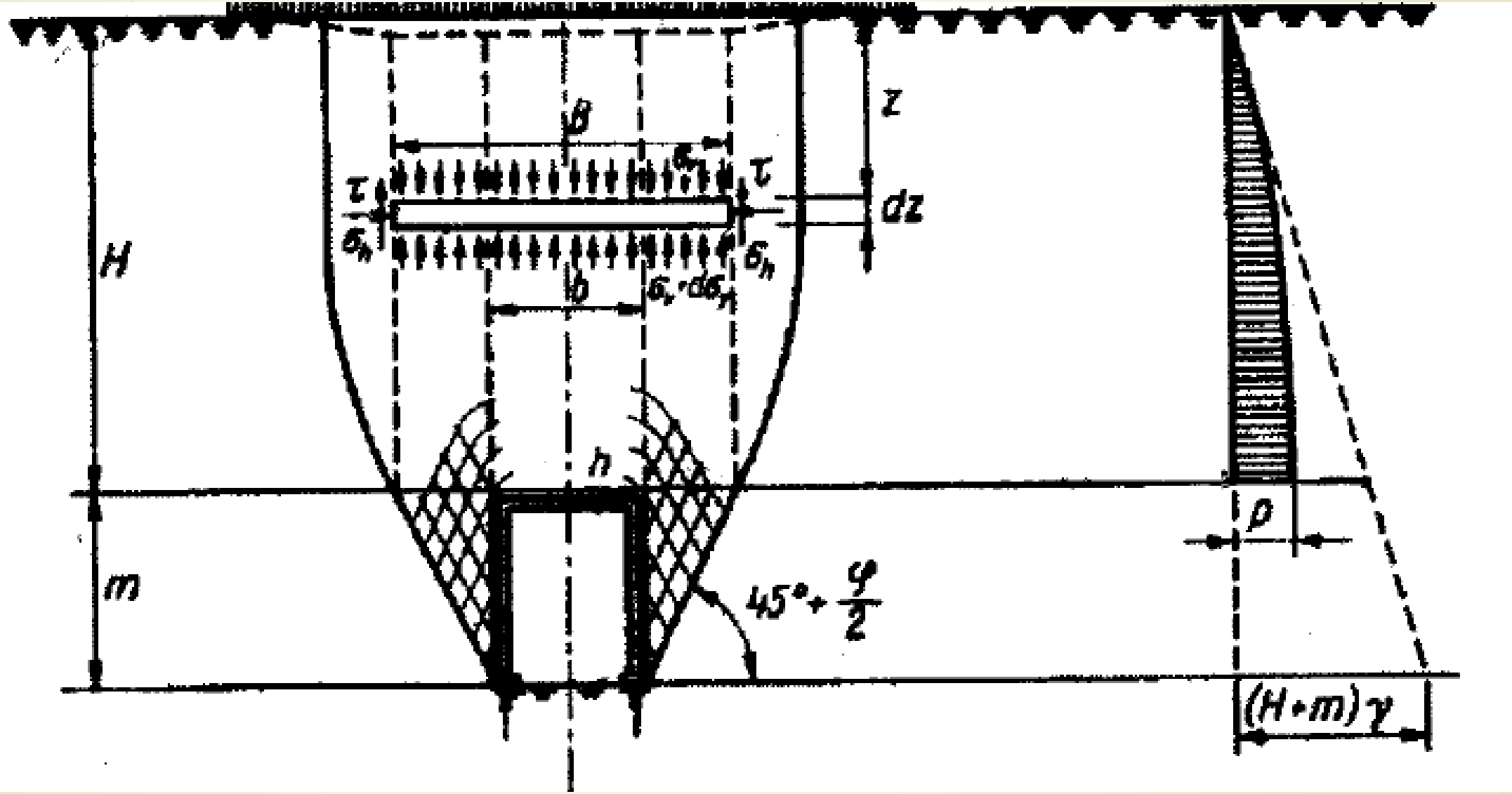
إن تزايد الإجهادات يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار في مجال المنشآت تحت الأرضية المستقبلية في حالة ارتفاعات التغطية القليلة. أما في الأعماق الكبيرة فيمكن إهمال هذا التزايد على ارتفاع المنشأة بالمقارنة مع قيم الإجهادات P_v ، P_h وبذلك تكون المعالجة النظرية للمنشآت العميقة الواقعة في الأعماق الكبيرة معتمدةً على شرط أساسي وهو أن حالة الإجهادات الأولية في مجال المنشأة تكون ثابتة في كل نقطة منها، بحيث تؤخذ قيمة الإجهاد الأساسي P_v عند قمة المنشأة ويتم تعميمها بالنسبة للمحور الأفقي ولقعر هذه المنشأة.

الضغوط على المنشآت المنفذة بالطريقة المغلقة

يتأرجح مقدار الضغط الجبلي بين قيمتين حديتين هما الضغط الجيوستاتيكي الكلي، وقيمة الصفر في الصخر الشديد الثبات.

إن التحديد الأدق للضغوط يكون فقط من نصيب **الضغط الثقلي** الكلي (الضغط الجيوستاتيكي) والذي يحسب ببساطة من ثقل الطبقات الواقعة فوق النفق. ولكن هذا الأمر يتعلق فقط بالأنفاق القريبة جداً من سطح الأرض الطبيعية.

TERZAGHI نظرية . ٢٠ ١٠ ١٠ ٤



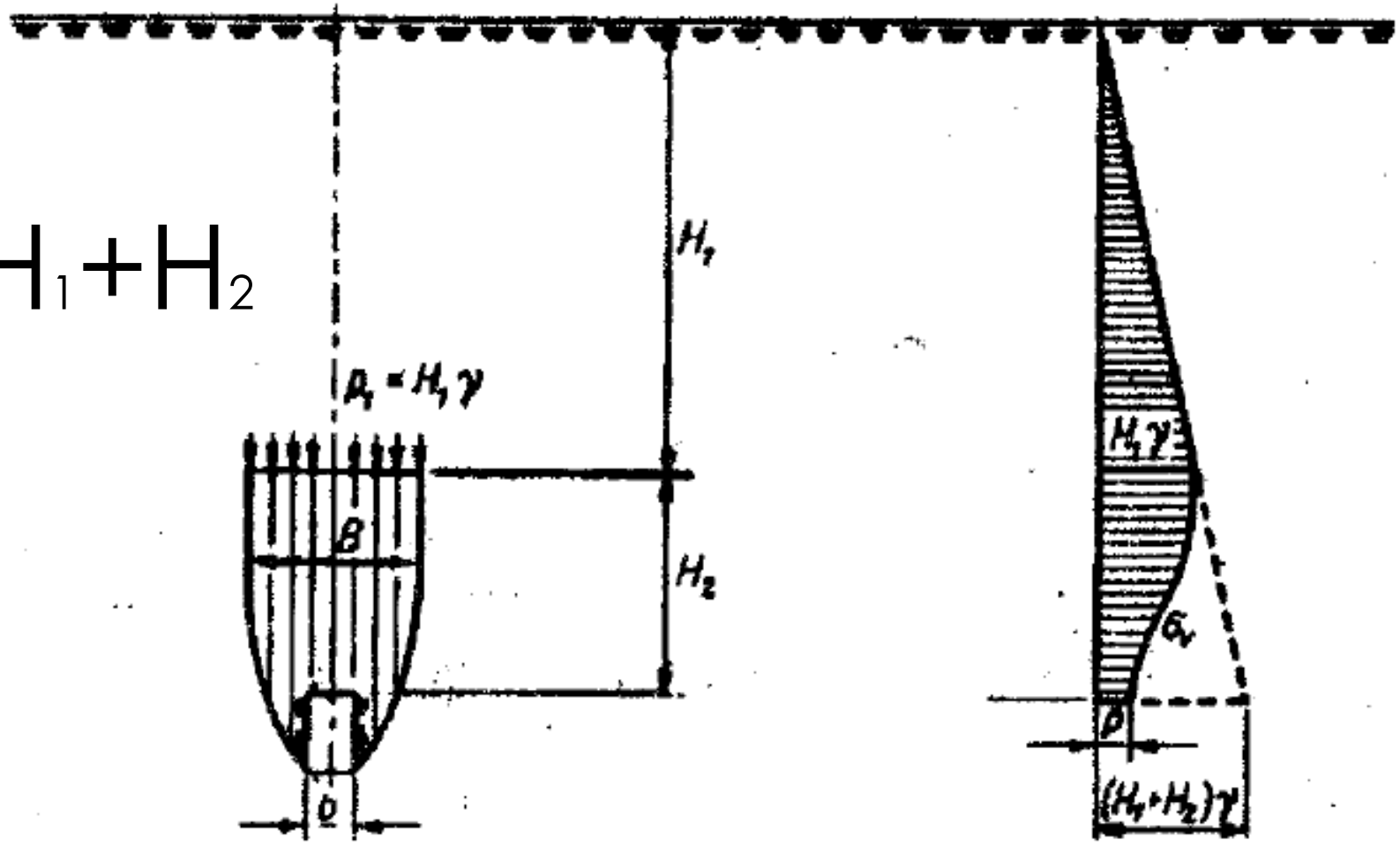
ومن الطبيعي أن يتم تحديد كتلة التربة الهابطة عند قمة النفق (أو الممر تحت الأرضي) اعتماداً على الزاوية $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ والتي تمثل ميل سطح الانزلاق لدفع التربة الفعلي.

وهكذا فإن عرض كتلة التربة الهابطة يبلغ حسب الشكل (٤ .٤) :

$$B = 2[\frac{b}{2} + m \cdot tg\,(45 - \frac{\varphi}{2})]$$

الضغط الجبلي الشاقولي يتكون من جزئين، يتحدد الجزء الأول منه بارتفاع التربة الذي يخضع لفعل التقوس H_2، أما الجزء الثاني فيتحدد بالارتفاع المتمم له حتى سطح الأرض الطبيعية H_1 (شكل ٤ .٥).

$$H=H_1+H_2$$



شكل (٤ .٥) تحول الضغوط الجبلية في الأعماق الكبيرة حسب ترزاكي

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - \frac{2C}{B})}{2k \cdot tg\varphi}(1 - e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2Z}{B}}) + q \cdot e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2Z}{B}} \qquad (٤ .. ١٠)$$

تمثل المعادلة (٤ .. ١٠) الشكل العام لمعادلة ترزاكي والمعممة على كافة أنواع الترب كما ورد ذكره في بداية شرح النظرية ·

عندما تكون الترب خشنة والتماسك معدوم يكون:

$$p_v = \frac{\gamma . B}{2k \cdot tg\varphi}(1 - e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2H_2}{B}}) + \gamma \cdot H_1 . e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2H_2}{B}} \qquad (٤ .. ١٣)$$

$H_2 = 2.5 * B$

قيمة الضغط الجبلي على الأنفاق الواقعة في الأعماق الكبيرة جداً تستقر مع مرور الزمن لتأخذ القيمة النهائية :

$$p_{max} = \frac{\gamma \cdot B}{2k \cdot tg\varphi} \qquad (١٤.٤)$$

وفي هذه الحالة الخاصة فقط يمكن ملاحظة أن الضغط الشاقولي على النفـ ـق لم يعـ ـد متعلقاً بارتفاع التغطية.

في البداية يتوجب حساب قيمة B التي تعطى بالعلاقة :

$$B = b+2m \cdot tg\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

من أجل حساب الأعماق التي يتم ضمنها تعرض المنشآت تحت الأرضية بشكل عام إلى الضغط الجيوستاتيكي ($\gamma \cdot H$)، يؤخذ عمق المقارنة بمقدار 2,5 - 2 (B) .

$P_v = (\gamma \cdot H)$ ⟵ $H<2.5*B$

$H_1=0$

التوتر سوف يصل ضمن التربة الواقعة فوق الممر

حتى سطح الأرض الطبيعية.

وبتطبيق معادلة ترزاكي (٤ .١٢)

$$p_v = \frac{\gamma \cdot B}{2K \cdot tg\varphi}\left(1-e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2H}{B}}\right)$$

$H=H_2=2.5*B$

التوتر لا يصل إلى السطح الطبيعية:

$$H=H_1+H_2$$

$$p_v = \frac{\gamma \cdot B}{2k \cdot tg\varphi}\left(1-e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2H_2}{B}}\right) + \gamma \cdot H_1 \cdot e^{-k \cdot tg\varphi \cdot \frac{2H_2}{B}}$$

$$H>2.5*B$$

في حالة $H_2 < 0{,}20 \cdot H$

فسوف تزداد قيمة H_2 لتصل إلى $0.20 \cdot H$ وبالتالي سوف تستقر قيمة الضغط عند القيمة الواردة في المعادلة (٤ ـ ١٤).

$$p_{max} = \frac{\gamma \cdot B}{2k \cdot tg\varphi} \qquad (٤ \ ـ \ ١٤)$$

$$P_v = (\gamma \cdot H)$$

H<2.5*B

$$p_v = \frac{\gamma \cdot B}{2K \cdot tg\varphi}\left(1 - e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2H}{B}}\right)$$

H=2.5*B

$$p_v = \frac{\gamma \cdot B}{2k \cdot tg\varphi}\left(1 - e^{-k \cdot tg\varphi \frac{2H_2}{B}}\right) + \gamma \cdot H_1 \cdot e^{-k \cdot tg\varphi \cdot \frac{2H_2}{B}}$$

H>2.5*B

$$p_{max} = \frac{\gamma \cdot B}{2k \cdot tg\varphi}$$

0.2*H>2.5*B

اعتماداً على المعادلة (٤ .١٠) والشرط الحدي ($z = H$) وبالأخذ بعين الاعتبار أن $q = 0$ فإنه يتم الحصول على معادلة تصلح من أجل حساب الضغط الشاقولي على نفق منفذ في تربة متماسكة وذلك على الشكل التالي:

$$p_v = \frac{B\left(\gamma - \frac{2C}{B}\right)}{2k \cdot \mathrm{tg}\varphi}\left(1 - e^{-k \cdot \mathrm{tg}\varphi \frac{2H}{B}}\right) \qquad (٤ .١٥)$$

ويلاحظ من العلاقة أن الضغط الجبلي لن ينشأ عندما تكون $\gamma = \frac{2C}{B}$ وبتعبير آخر عندما تكون $B \leq \frac{2C}{\gamma}$

٤ .١ .١ .١ . نظرية BIERBAUMER

إن إنشاء الأنفاق في جبال الألب كان الحافز الرئيسي للباحث بيرباومر لكي يضع نظريته الشهيرة والتي تنص على أن النفق يتعرض للإجهاد بموجب كتلة جبلية محددة بقطع مكافئ يساوي ارتفاعه h نسبة معينة من ارتفاع التغطية الكلي H، ويعطى بالعلاقة $h = \alpha . H$ حيث تمثل α عامل التخفيض (شكل ٤ .٢).

وسوف يكون الضغط في هذه الحالة مساوياً للقيمة:

$$p = \alpha \cdot H \cdot \gamma \qquad (٤ .٢)$$

٤ .٢ .١ . التحديد التقريبي للضغوط الجانبية

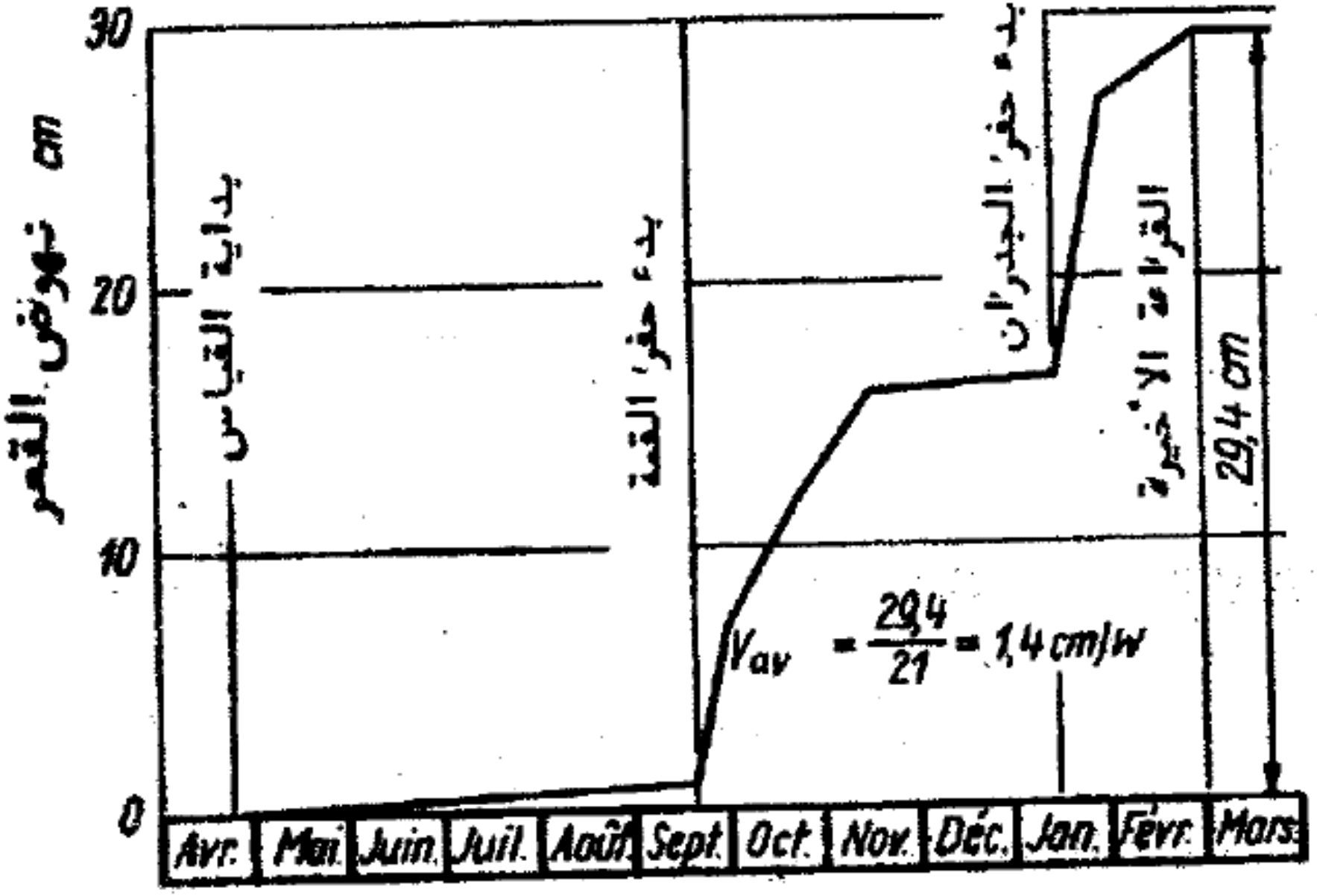
يمكن تحديد الضغط الجانبي بشكل تقريبي وحسب مفاهيم دفع التربة كناتج لضغط القمة أو الضغط الجيوستاتيكي مضروباً بعامل دفع التربة الجانبي '

إن نتائج دراسات STINI تقضي بأن الضغوط الجانبية تصل إلى حوالي 1/3 أو 1/4 من قيمة الضغط الشاقولي

في الصخور عالية التماسك لا ينشأ أي ضغط جانبي

٤ .٣ . تحديد ضغط القعر

من المفترض نظرياً أن يظهر ضغط القعر على شكل صورة معكوسة لضغط القمة كرد فعل يجهد النفق من الأسفل عندما يكون المقطع العرضي للنفق مغلقاً (في حالة وجود قوس القعر) . ولكن هذا الأمر لا يتحقق بسبب التأثير المشترك للكتل الجبلية المحيطة بالنفق وغالباً ما تكون قيمة ضغط القعر أقل من ضغط القمة. ويذكر ترزاكي بناءً على خبرته أن ضغط القعر يبلغ بشكل تقديري نصف قيمة ضغط القمة بينما يبلغ الضغط الجانبي ثلث هذه القيمة .



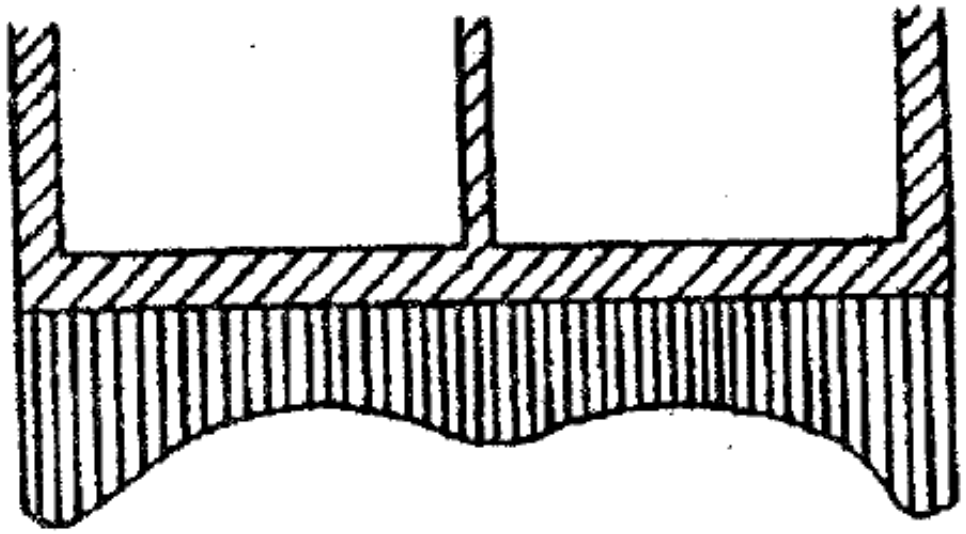
شكل (٤ . ١١) قيم نهوض القعر للقاسة مع مراحل عملية التقدم

تعتمد هذه الطريقة على شق النفق باستخدام أسلوبين هما أسلوب الثقب (الحفر) والتفجير وأسلوب التقدم الآلي. وقد بدئ باستخدام أسلوب التفجير منذ القرن السابع عشر ولازال منتشراً حتى يومنا هذا، أما أسلوب التقدم الآلي فلم يبدأ استخدامه إلا في عام ١٩٦٠. وعلى الرغم من أن شق النفق بالطريقة الآلية يقدم فوائد عدة بالمقارنة مع أسلوب الثقب والتفجير وعلى الرغم من انتشاره المتزايد في المجال العملي إلا أن الحاجة لاستخدام أسلوب الثقب والتفجير تطغى عليه في بعض الأحيان

الضغط الشاقولي يؤخذ من وزن الطبقات فوق النفق، أما الدفع الجانبي يؤخذ نسبة من الضغط الشاقولي كالعادة

٧ . ٤ . ٢ . ٣ . ضغط القعر

يتعلق ضغط القعر في المنشآت المنفذة بالطريقة المفتوحة بصلابة المنشأة والأرضية التي تستند عليها. وعادةً ما يتركز الضغط تحت الجدران الخارجية وبشكل أقل تحت الجدران الوسطية (الشكل ٧ . ١٩).



شكل (٧ . ١٩) تمركز الضغوط تحت قاع المنشأة

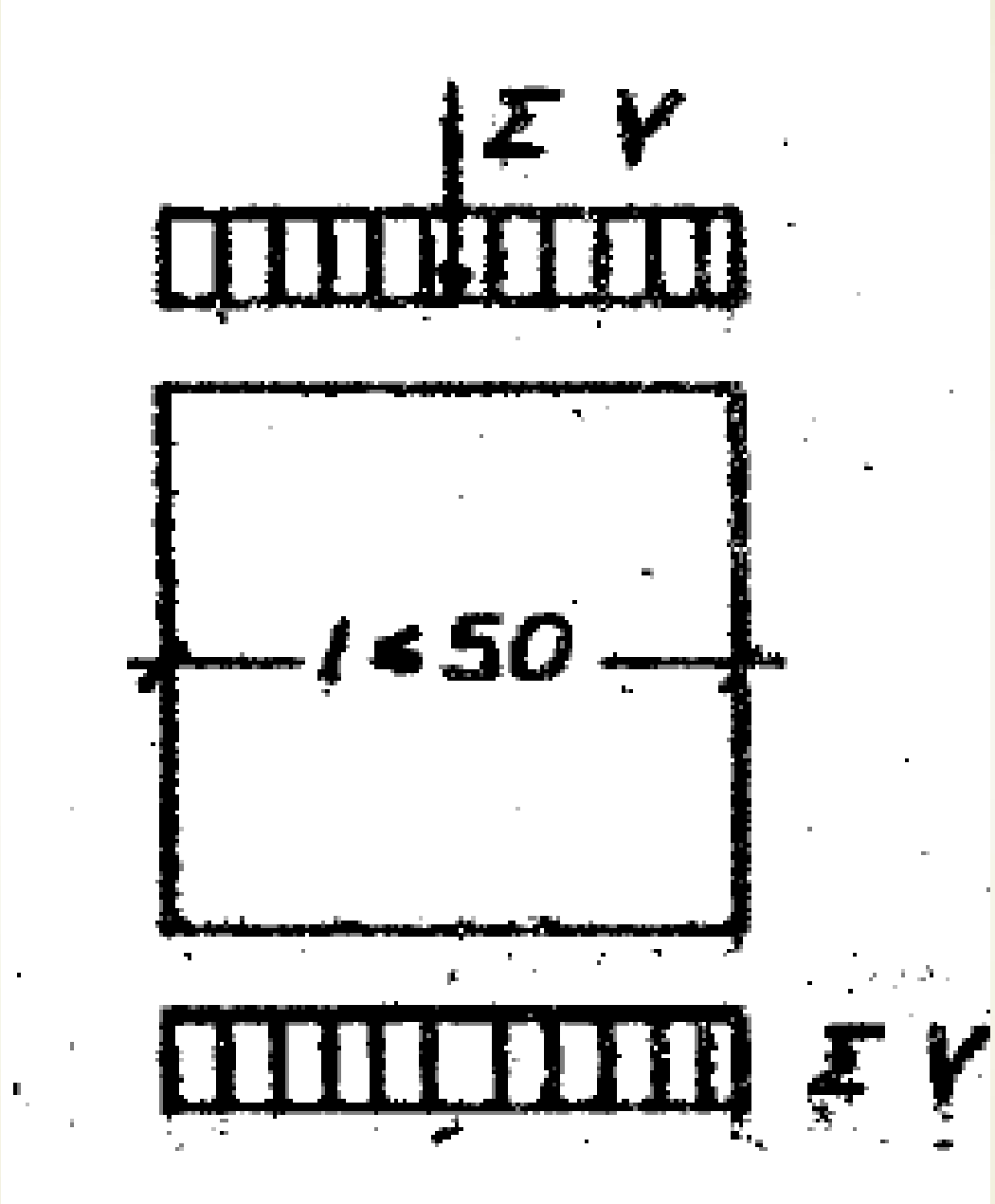
وفي الواقع العملي يمكن اعتماد بعض الحسابات التقريبية البسطة من أجل تحديد قمة ضغط القعر وشكل توزعه تحت المنشأة. وفي هذا الشأن يمكن أن تلحظ أربع حالات مختلفة لحساب ضغط القعر وتوزعه وفقاً لعرض المنشأة، وذلك كما يلي:

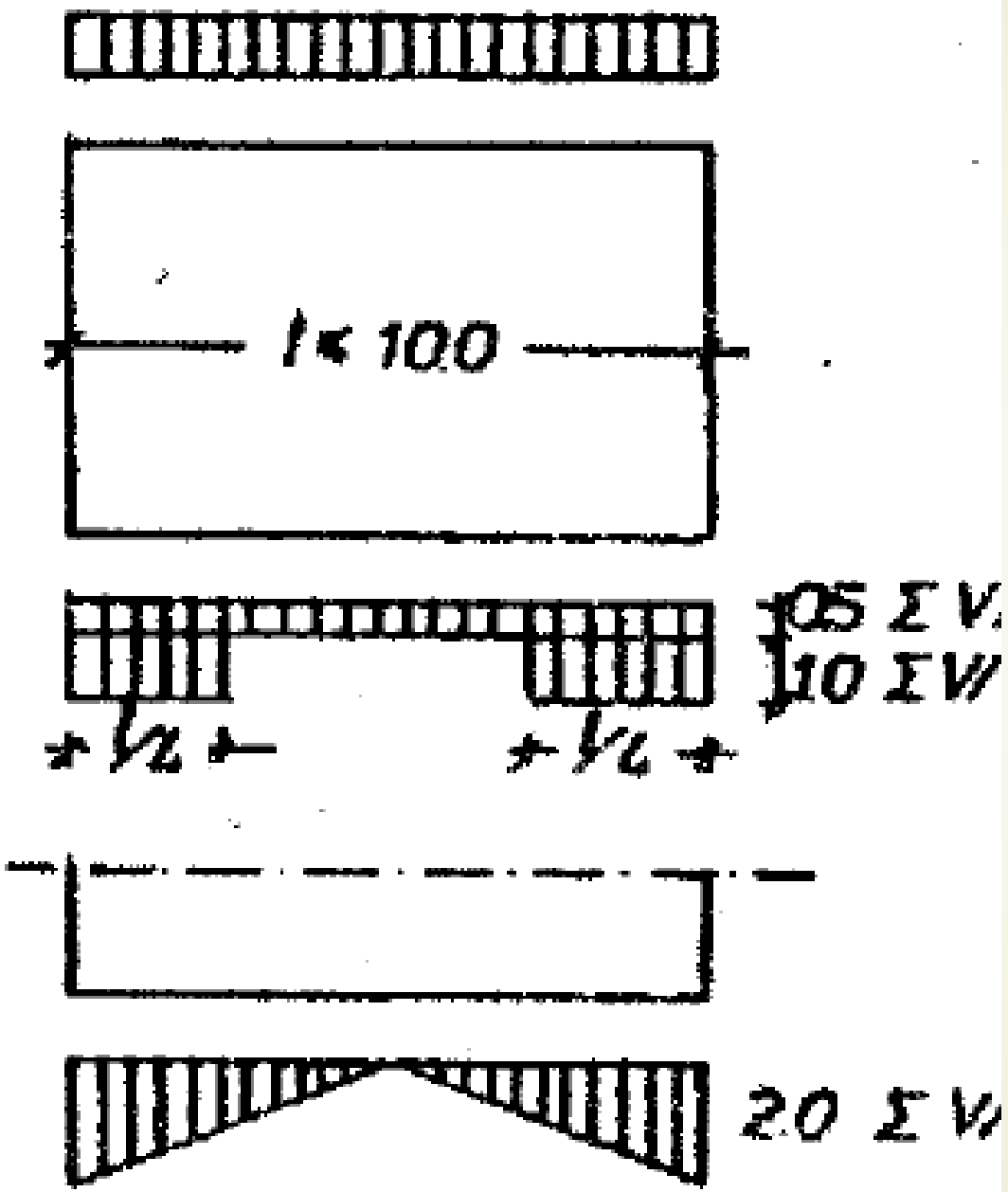
١. عرض المنشأة أقل أو يساوي 5m، ويمكن اعتبارها حالة نفق بخط سكة وحيد على سبيل المثال. وفي مثل هذه الحالة يعطى الضغط بالقيمة والتوزع الواردين في الشكل (٧ ٢٠).

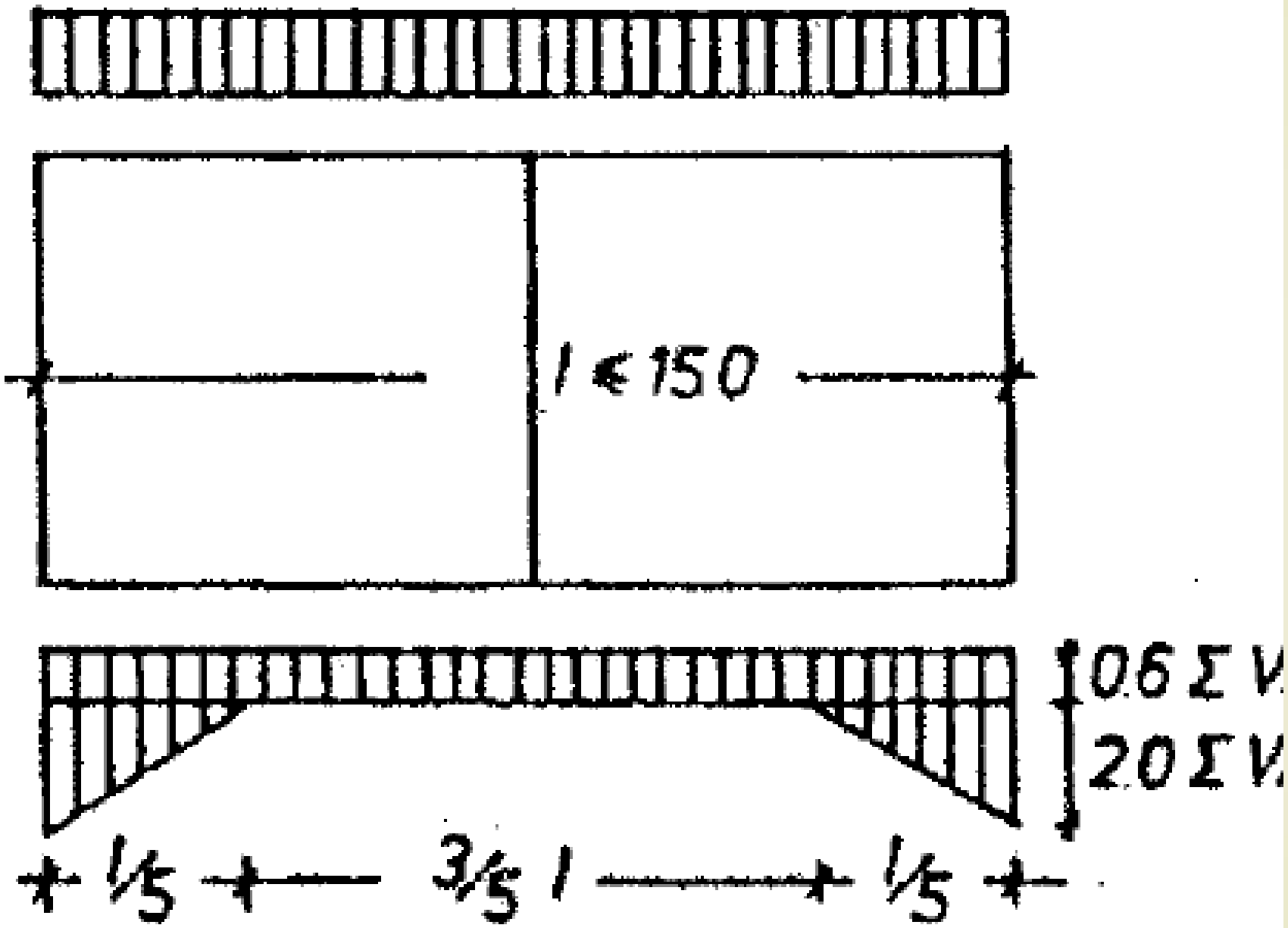
٢. عرض المنشأة أقل أو يساوي 10m، ويمكن اعتبارها حالة نفق بخطي سكة حديدية على سبيل المثال. وفي مثل هذه الحالة يعطى الضغط بالقيمة والتوزع الواردين في الشكل (٧ ٢١)، حيث يمكن اعتماد أحد الحلين الواردين في الشكل.

٣. عرض المنشأة أقل أو يساوي 15m ومدعمة. وفي مثل هذه الحالة تكون المنشأة مدعمة في الوسط ويعطى فيها الضغط بالقيمة والتوزع الواردين في الشكل (٧ .٢٢).

٤. عرض المنشأة أكثر من 15m مهما كانت طبيعة الدعم الوسطي، وفي مثل هذه الحالة يحسب التوزع الحقيقي للضغط ويكون توزعه كما هو وارد في الشكل (٧ .٢٣).


Σ Y
150
Σ Y


l = 10.0
0.5 Σ V
1.0 Σ V
l/2
l/2
2.0 Σ V


l ≤ 150
0.6 Σ V
2.0 Σ V
1/5
3/5 l
1/5