

1 الفصل الأول: الهندسة الجيوتكنيكية

1.1 الهندسة الجيوتكنيكية – مقدمة

لأغراض هندسية، عرفت التربة كحصىات لا اسمنتية من منرالات حبيبية (أجزاء صلبة) ومواد عضوية مع سائل وغاز ضمن الفراغات بين الجزيئات الصلبة. واستخدم الإنسان التربة كمادة بناء في العديد من مشاريع الهندسة المدنية، كما واستخدمها لتكون أساس لمختلف الأنظمة الإنشائية. من هنا، كان من واجبات المهندس المدني دراسة خصائص هذه التربة وهي: المنشأ، التدرج، حجم الحبيبات، إمكانية تصريف المياه، الانضغاطية، مقاومة القص، وقدرة تحمل التربة.

أما مفهوم ميكانيك التربة يتعلق بدراسة الخصائص الفيزيائية للتربة وسلوك كتل التربة المعرضة لحمولات مختلفة. في حين أن هندسة الترب تعتبر تطبيق لمبادئ ميكانيك التربة على حالات عملية. وعلم الهندسة الجيوتكنيكية يعتبر فرع من فروع الهندسة المدنية والذي يعنى بدراسة مواد طبيعية موجودة قرب سطح الأرض، مع تطبيق مبادئ ميكانيك التربة والصخور وتصميم الأساسات والمنشآت الساندة والمنشآت الترابية.

2.1 الهندسة الجيوتكنيكية قبل القرن الثامن عشر

إن تاريخ أول شخص استخدم التربة كمادة بناء تعود لزمن بعيد، وفي الحقيقة وحسب مفاهيم الهندسة فإن فهم الهندسة الجيوتكنيكية كما تعرف الآن بدأ في القرن الثامن عشر (1985،Skempton). ولسنوات عدة، فإن فن الهندسة الجيوتكنيكية كان مبني على الخبرة من خلال العديد من التجارب الناجحة من دون أي صفة علمية حقيقية، وبناء على هذه التجارب، العديد من المنشآت تمّ بناءها – وهناك الكثير منها تخرب بينما بقي بعضها الآخر كما هو حتى زمننا الحاضر.

السجلات التاريخية تخبرنا أن الحضارات القديمة ازدهرت على طول ضفاف الأنهار. وتم بناء الكثير من المنشآت الترابية لحماية القرى والمدن من جهة ومن جهة ثانية تمّ بناءها لأغراض زراعية. وليس هناك دليل أنه تم أخذ قياسات من أجل حساب استقرار الأساسات أو التأكد من التآكل الذي

تسببه الفيضانات (Kerisel, 1985). إن حضارة اليونانيين القدماء استخدمت الأساسات المنفردة والشريطية والحصائر من أجل بناء المنشآت. هذا الأمر طرح عدة تحديات مرعبة من أجل بناء الأساسات التي تحقق الاستقرار للمنحدرات وللمعابد الكبيرة. إن العديد من هذه المنشآت تم بناءها على طبقات السلت والغضار الطري. وفي بعض الحالات تخطى الضغط المنقول من الأساسات للتربة قدرة تحملها ولذلك وجدنا أضرار كبير لحقت بهذه المنشآت.

واحدة من أشهر الأمثلة بما يتعلق بقدرة تحمل التربة ظهرت في القرن قبل الثامن عشر ألا وهو برج بيزا المائل في إيطاليا. (أنظر الشكل 1.1). بناء البرج بدأ في العام 1173 بعد الميلاد ووصلت قيمة الإجهادات النقلة من البرج إلى التربة حوالي 15.00 طن/م². البرج يستند على أساس دائري بقطر 20 متر. في البداية مال البرج للشرق ثم للشمال ثم للغرب وأخيراً للجنوب. وآخر التحريات أظهرت أن طبقة غضار ضعيفة موجودة على عمق حوالي 11 متر أسفل سطح الأرض المضغوط، وهذا ما سبب بميلان البرج. بلغ ميلان البرج حوالي 5 متر لارتفاع 54 متر. لذلك تم إغلاق البرج عام 1990 خوفاً من إنهياره. مؤخراً تم تدعيمه عن طريق حفر التربة أسفل الجهة الشمالية من البرج. حالياً يميل البرج حوالي 5 درجات مما جعل البرج مستقر بشكل أكبر.

الشكل 2.1 يوضح برجين تم بنائهما في بولونيا في القرن الثاني عشر. البرج اليساري يعرف باسم برج Garisenda، ارتفاعه حوالي 48 متر ووزنه حوالي 4210 طن. هذا البرج مال بمقدار 4 درجات. أما البرج اليميني يعرف باسم برج Asinelli، ارتفاعه حوالي 97 متر ووزنه 7300 طن.



الشكل (1.1): برج بيزا المائل في إيطاليا



الشكل (1.2): أبراج توجد في بولونيا

ولكن وبعد مواجهة العديد من المشاكل المتعلقة بالأساسات خلال البناء على مر السنوات السابقة، بدأ المهندسون والعلماء في أوائل القرن الثامن عشر بدراسة معمقة للهندسة الجيوتكنيكية للفترة الممتدة من عام 1700 حتى عام 1927. ويمكن تقسيم مراحل نشأة الهندسة الجيوتكنيكية حسب الفترات إلى أربع مراحل رئيسية (Skempton, 1985):

1. مرحلة ما قبل الكلاسيكية (1700 حتى 1776 بعد الميلاد).
2. مرحلة ميكانيك التربة الكلاسيكية – الفترة الأولى (1856 وحتى 1910 بعد الميلاد).
3. مرحلة ميكانيك التربة الكلاسيكية – الفترة الثانية (1856 وحتى 1910 بعد الميلاد).
4. مرحلة ميكانيك التربة الحديثة (1910 وحتى 1927 بعد الميلاد).

شرح ملخص لبعض التطورات المحلوطة خلال كل مرحلة من هذا المراحل الأربع سوف تتم مناقشته تباعاً.

1.2.1 مرحلة ما قبل الكلاسيكية لميكانيك التربة (1700-1776)

في هذه المرحلة تمّ التركيز على دراسات تتعلق زاوية الميل الطبيعية والوزن الحجمي للعديد من الترب، وأيضاً نظريات ضغط التربة شبه التجريبية. ففي عام 1717 قام مهندس فرنسي ملكي، Henri Gautier (1660-1737)، بدراسة الميول الطبيعية للترب من أجل تشكيل العمليات التصميمية للجدران الاستنادية وحدد متغير مهم هو زاوية الميل الطبيعي والتي عرفت بزاوية التوضع. ووفقاً لهذه الدراسة فإن الميل الطبيعي لتربة مكونة من رمل جاف وأرض طبيعية هو ما بين 31° و 45° ، أما قيم الوزن الحجمي للرمل الجاف وأرض طبيعية ينصح من أجل تأمين الاستقرار بأن تكون ما بين 18.1 kN/m^3 و 13.4 kN/m^3 .

وفي العام 1729 نشر الباحث Bernard Forest de Belidor (1671-1761) كتاب في الهندسة المدنية في فرنسا، هذا الكتاب قدم لنا نظرية لضغط التربة الجانبي على الجدران الاستنادية والتي كانت تنمّة للدراسة الأصلية التي قام بها الباحث (Gautier, 1717)، الذي عرف نظام لتصنيف التربة وأعطى قيم للوزن الحجمي وفقاً لتصنيفه كما هو موضح بالجدول التالي:

الوزن الحجمي	تصنيف التربة
kN/m^3	
–	الصخور
16.7	الرمل القاسي
18.4	الرمل المرصوص
13.4	تربة طبيعية بحالة جافة
16.0	تربة قاسية (سلتية)
18.9	الغضار

وفي العام (1746) قام المهندس الفرنسي Francois Gadroy (1705-1759) ببناء نموذج مصغر لجدار استنادي بارتفاع 76 مم في المختبر ووضع خلفه تربة رملية، خلال التجربة تبين له

وجود سطوح انزلاق في التربة عند الانهيار، وقام المهندس (J. J. Mayniel in 1808) بمتابعة هذه الدراسة ولنفس النموذج وقدم ملخص عنها.

2.2.1 مرحلة الكلاسيكية لميكانيك التربة – الفترة الأولى (1776-1856)

خلال هذه المرحلة، معظم التطورات التي حصلت في مجال الهندسة الجيوتكنيكية جاء من علماء ومهندسين في الجمهورية الفرنسية. في مرحلة ما قبل الكلاسيكية، كانت الافتراضات النظرية المستخدمة في حساب ضغط التربة الجانبي على الجدران الاستنادية مبنية على سطوح انهيار افتراضية في التربة. وفي ورقة البحث المشهورة التي قدمها المهندس شارل كولومب فيما يتعلق بسطوح الانزلاق (Charles Augustin Coulomb, 1736-1806) استخدم مبادئ الحساب الأعظمية والأصغرية لتحديد مواقعها خلف الجدار الاستنادي كما أنه استخدم قوانين الاحتكاك والتماسك للأجسام الصلبة.

في عام 1820 درس المهندس الفرنسي (Jacques Frederic Francais, 1775-1833) وأستاذ الميكانيك التطبيقي الفرنسي (Claude Louis Marie Henri Navier, 1785-1836) حالات خاصة لأعمال الباحث كولومب والمتعلقة بميل الردم والحمولات المطبقة خلف الجدار الاستنادي. أما في العام 1840 وسع المهندس الفرنسي وأستاذ الميكانيك (Jean Victor Poncelet, 1788-1867) نظرية كولومب لتشمل الجدران الاستنادية المائلة والشاقولية مع وضع فرضية أن السطوح عبارة عن مضلع مكسر. ويجب أن نذكر أن الباحث Poncelete هو أول من استخدم رمز ϕ من أجل زاوية احتكاك التربة، وهو من قدم أول نظرية لحساب قدرة تحمل التربة الحديدية من أجل الأساسات السطحية. في عام 1846 قدم المهندس (Alexandre Collin, 1808-1890) تفاصيل سطوح الانزلاق في المنحدرات الغضارية والسدود والحفريات. الباحث Collin برهن أنه في جميع حالات التحميل، تبدأ سطوح الانزلاق بالظهور عندما تتخطى قيمة التماسك المنقول من الجدار إلى التربة قيمة التماسك الموجود في التربة. واستنتج أيضاً أن سطح الانزلاق الفعلي يمكن تقريبه لقوس من دائرة. نهاية المرحلة الأولى لميكانيك التربة الكلاسيكية كانت عام 1857 عند أول بحث نشر من قبل (William John Macquorn Rankine, 1820-1872)، وهو أستاذ في الهندسة المدنية في جامعة غلاسغو، هذا البحث أظهر نظرية مهمة للضغط الجاني وتوازن الكتل الترايبية وتسمى حالياً بنظرية رانكين هي تبسيط لنظرية كولومب.

3.2.1 مرحلة الكلاسيكية لميكانيك التربة – الفترة الثانية (1856–1910)

في هذه المرحلة تمّ تنفيذ العديد من التجارب على الترب الرملية وتمّ تدوين الكثير من النتائج. وأهم هذه الدراسات هي التي قدمها المهندس الفرنسي (Philibert Gaspard Darcy, 1803–1858), (Henri). ففي العام 1856 نشر هذا الباحث دراسة عن مفهوم نفاذية فلاتر الرمل وبناءً على هذه التجارب، قام دارسي بتعريف مفهوم الناقلية الهيدروليكية (معامل النفاذية) للتربة، وهو من أهم خواص التربة حتى يومنا هذا.

الأستاذ في علم الفلك (Sir George Howard Darwin, 1845–1912)، قام بالعديد من التجارب لتحديد عزم القلب لجدار استنادي مفصلي ضمن تربة رملية مخلخلة وكذلك ضمن تربة رملية متراصة (كثيف). وهناك مساهمة قيمة أخرى تم نشرها عام 1885 من قبل (Joseph Valentin Boussinesq 1842–1929)، والتي تتعلق بنظرية توزيع الإجهادات ضمن الأوساط المتجانسة والمرنة المنتهية والمتماثلة نتيجة الحملات المطبقة. ويجب أن نتذكر أنه في العام 1887 شرح Reynolds، (Osborne 1842–1912) ظاهرة التوسع في الرمل.

4.2.1 مرحلة ميكانيك التربة الحديثة – (1910–1927)

في هذه المرحلة، أجريت أبحاث عديدة على الترب الغضارية وتم نشر نتائجها، وبناءً على هذه الأبحاث وضعت الخصائص الأساسية ومتغيرات الترب الغضارية. وأهم هذه المنشورات:

- في العام 1908 قام الكيميائي وعالم التربة السويدي (Alebrt Mauritz Atterberg 1846–1916)، بتعريف حجم حبيبات الغضار التي هي أصغر من 2 ميكرون. حيث أدرك أهمية حجم أجزاء الغضار في التربة وخاصية اللدونة. لذلك وفي العام 1911، شرح قوام الترب المتماسكة عن طريق تعريف حد السيولة وحد اللدونة وحد الانكماش (انظر (Atterberg, 1911).

- في أكتوبر عام 1909 انهار السد الترابي Charnes في فرنسا ذو الارتفاع 17 م والذي تم بناءه بين العامين 1902 و 1906. ولمعرفة أسباب الانهيار، قام المهندس الفرنسي Jean Frontrard في الفترة (1884–1962) بمجموعة من التحريات المخبرية ومنها تجارب القص غير المصرّف على عينات غضارية (مساحتها 0.77 م² وسماكتها 200 مم) وتحت

تأثير إجهاد شاقولي ثابت من أجل تحديد متغيرات مقاومة القص (انظر Frontard, 1914) وكان الزمن اللازم لانتهاء هذه العينات هو بين 10 إلى 20 دقيقة.

- في هذه المرحلة، قام أيضاً المهندس الإنكليزي (Arthur Langley Bell (1874–1956 بتصميم وبناء الجدار البحري الخارجي في Rosyth Dockyard. وبناء على عمله، طور علاقات الضغط الجانبي ومقاومة الترب الغضارية وقدرة تحمل التربة للأساسات السطحية المستندة على الترب الغضارية (انظر Bell, 1915). كما استخدم أيضاً تجارب علبة القص (Shear Box tests) لقياس مقاومة القص غير المصرفة لعينات غضارية غير مضطربة.
- قام المهندس السويدي (Wolmar Fellenius (1876–1957 بتطوير طريقة تحليل الاستقرار لمنحدرات من الترب الغضارية المشبعة (بشرط $\phi=0$) مع افتراض أن سطح الانزلاق هو جزء قطع من دائرة (analysis Stability). وهذا ما شرحه بإسهاب في بحثه المنشور عام 1918 و1926. أما بحثه المنشور في العام 1926 أعطى حلول عددية صحيحة لاستقرار عدد من سطوح الانزلاق المارة من أسفل المنحدر.
- قام المهندس Karl Terzaghi (1883–1963) من استراليا (انظر الشكل 1.3) بتطوير نظرية الانضغاطية للغضار والتي أصبحت كما نعرفها اليوم. استمرت دراسته لهذا الغرض حوالي 5 سنوات من 1919 وحتى 1924 وذلك على خمس أنواع من ترب غضارية. وتراوح حد السيولة لهذه الترب من 36 وحتى 67، وقرينة اللدونة بين 18 و38. نظرية الانضغاطية تم نشرها ضمن كتاب ترزاكي Edbaumechanik في عام 1925.

3.1 الهندسة الجيوتكنيكية بعد عام 1927

إن البحث الذي نشره Karl Terzaghi في عام 1925 شكل مرحلة جديدة في تطور ميكانيك التربة. إن ترزاكي يعرف بأنه أب ميكانيك الهندسة الحديثة. ولد ترزاكي في 2 أكتوبر عام 1883 ودرس الهندسة الميكانيكية وتخرج من جامعة Technische Hochschule in Graz، بعد التخرج عمل لمدة سنة واحدة في الجيش الاسترالي. وبعد الخدمة العسكرية، درس ترزاكي ولمدة عام علوم الهندسة الجيولوجية. في كانون الثاني 1912، نال درجة الدكتوراه في العلوم التقنية من alma mater in Graz. وفي عام 1916 بدأ بالتدريس في Imperial School of Engineering in Istanbul.

(1925 – 1918) وهناك درس سلوك الترب والهبوط في الترب الغضارية وانهارها نتيجة التمديد في الرمل تحت السدود.

في عام 1925 ، قام ترزاكي بالتدريس في معهد Massachusetts Institute of Technolog. حيث عمل حتى عام 1929. وخلال هذه الفترة أصبح معروفا كرئيس لفرع جديد في الهندسة المدنية عرف باسم ميكانيك التربة. في اكتوبر عام 1929، عاد إلى أوروبا. وفي عام 1939، استقر في الولايات المتحدة ليصبح أستاذ في جامعة هارفارد.

ترأس ترزاكي المؤتمر الأول للجمعية العالمية لميكانيك التربة وهندسة الاساسات (ISSMEFE) الذي عقد في جامعة هارفارد في عام 1936، حيث بلغ عدد الحضور في هذا المؤتمر 200 شخص ممثلين 21 دولة، وفي هذا المؤتمر نشر ترزاكي بحثاً يعتبر أساساً ومرشداً للأبحاث في مستقبل ميكانيك التربة. أما المواضيع التي طرحها المؤتمر هي:

- الإجهادات الفعالة.
- مقاومة القص.
- التجارب باستخدام Dutch cone penetrometer.
- الانضغاطية.
- تجارب الطرد المركزي.
- نظرية المرونة وتوزيع الإجهادات.
- التحميل المسبق للتحكم بالهبوط.
- الغضار الانتفاخي.
- تأثير التجميد.
- الزلازل وتمييع الترب.
- الآلات الرجاجة.
- النظرية القوسية في ضغط التربة.

في عام 1939، قدم ترزاكي مجموعة من المحاضرات ضمن جامعة Institution of Civil Engineers, London ومنها محاضرة بعنوان "ميكانيك التربة - فصل جديد في علم الهندسة". وفيها أوضح أن معظم انهيارات الأساسات التي تظهر ليست "أفعال من الله".

أيضاً حدثان هامان حدثا بين 1948 و1960 هما:

(1) بحث علمي للمهندس A.W.Skempton درس من خلاله متغيرات ضغط الماء المسامي B،A والتي جعلت حسابات الإجهادات الفعالة أكثر عملية للعديد من الأعمال الهندسية.

(2) تمّ نشر كتاب حول قياس خواص التربة من خلال تجارب القص ثلاثي المحاور وهذا الكتاب بعنوان:

The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Text by A. W. Bishop and B. J. Henkel (Arnold، London) in 1957

في أوائل 1950، ومع تطور صناعة الحواسيب، تمّ استخدام طرق عديدة وهي طريقة العناصر أو الفروق المحدودة لتطبيقها على العديد من مشاكل الهندسية الجيوتكنيكية.

منذ الأيام الأولى، قطع مهندسين وعلماء الهندسة الجيوتكنيكية شوطاً طويلاً لإدراك وفهم هذا المجال حتى أصبح الآن فرع من فروع الهندسة المدنية، والآلاف من المهندسين اختاروا الهندسة الجيوتكنيكية لتكون مجال اختصاصهم.

وأصبحت المؤتمرات أداة من أجل تبادل المعلومات والتطورات والنشاطات العلمية في الهندسة الجيوتكنيكية.

□

4.1 المراجع

1. ATTERBERG, A. M. (1911). “-ber die physikalische Bodenuntersuchung, und über die Plastizitet de Tone,” International Mitteilungen für Bodenkunde, Verlag für Fachliteratur. G.m.b.H. Berlin, Vol. 1, 10–43.
2. BELIDOR, B. F. (1729). La Science des Ingenieurs dans la Conduite des Travaux de Fortification et D’Architecture Civil, Jombert, Paris.
3. BELL, A. L. (1915). “The Lateral Pressure and Resistance of Clay, and Supporting Power of Clay Foundations,” Min. Proceeding of Institute of Civil Engineers, Vol. 199, 233–272.
4. BISHOP, A. W. and HENKEL, B. J. (1957). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Arnold, London.
5. BOUSSINESQ, J. V. (1885). Application des Potentiels â L’Etude de L’équilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
6. COLLIN, A. (1846). Recherches Expérimentales sur les Glissements Spontanés des Terrains Argileux Accompagnées de Considérations sur Quelques Principes de la Mécanique Terrestre, Carilian-Goeury, Paris.
7. COULOMB, C. A. (1776). “Essai sur une Application des Règles de Maximis et Minimis à Quelques Problèmes de Statique Relatifs à L’Architecture,” Mémoires de la Mathématique et de Phisique, présentés à l’Académie Royale des Sciences, par divers savans, et lûs dans sés Assemblées, De L’Imprimerie Royale, Paris, Vol. 7, Annee 1793, 343–382.
8. DARCY, H. P. G. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
9. DARWIN, G. H. (1883). “On the Horizontal Thrust of a Mass of Sand,” Proceedings, Institute of Civil Engineers, London, Vol. 71, 350–378.
10. FELLENIUS, W. (1918). “Kaj-och Jordrasen I Goteborg,” Teknisk Tidskrift. Vol. 48, 17–19.
11. FRANCAIS, J. F. (1820). “Recherches sur la Poussée de Terres sur la Forme et Dimensions des Revêtements et sur la Talus D’Excavation,” Mémorial de L’Officier du Génie, Paris, Vol. IV, 157–206.
12. FRONTARD, J. (1914). “Notice sur L’Accident de la Digue de Charmes,” Anns. Ponts et Chaussées 9th Ser., Vol. 23, 173–292.

13. GADROY, F. (1746). *Mémoire sur la Poussée des Terres*, summarized by Mayniel, 1808.
14. GAUTIER, H. (1717). *Dissertation sur L'Epaisseur des Culées des Ponts sur L'Effort et al Pesanteur des Arches et sur les Profils de Maçonnerie qui Doivent Supporter des Chaussées, des Terrasses, et des Remparts*. Cailleau, Paris.
15. ISHIHARA, K. (1999). Personal communication.
16. KERISEL, J. (1985). "The History of Geotechnical Engineering up until 1700," *Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume*, A. A. Balkema, 3–93.
17. MAYNIEL, J. J. (1808). *Traité Experimentale, Analytique et Pratique de la Poussée des Terres*. Colas, Paris.
18. NAVIER, C. L. M. (1839). *Leçons sur L'Application de la Mécanique à L'Etablissement des Constructions et des Machines*, 2nd ed., Paris.
19. PECK, R. B. (1985). "The Last Sixty Years," *Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume*, A. A. Balkema, 123–133.
20. PONCELET, J. V. (1840). *Mémoire sur la Stabilité des Revêtements et de leurs Fondations*, Bachelier, Paris.
21. RANKINE, W. J. M. (1857). "On the Stability of Loose Earth," *Philosophical Transactions, Royal Society, Vol. 147*, London.
22. REYNOLDS, O. (1887). "Experiments Showing Dilatency, a Property of Granular Material Possibly Connected to Gravitation," *Proceedings, Royal Society, London, Vol. 11*, 354–363.
23. SKEMPTON, A. W. (1948). "The f₀ Analysis of Stability and Its Theoretical Basis," *Proceedings, II International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 1*, 72–78.
24. SKEMPTON, A. W. (1954). "The Pore Pressure Coefficients A and B," *Geotechnique, Vol. 4*, 143–147.
25. SKEMPTON, A. W. (1985). "A History of Soil Properties, 1717–1927," *Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume*, A. A. Balkema, 95–121.
26. TAYLOR, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley, New York.

27. TERZAGHI, K. (1925). Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage, Deuticke, Vienna.
28. TERZAGHI, K. (1939). "Soil Mechanics—A New Chapter in Engineering Science," Institute of Civil Engineers Journal, London, Vol. 12, No. 7, 106–142.
29. TERZAGHI, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, New York.
30. TERZAGHI, K., and PECK, R. B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, New York.

2 الفصل الثاني: منشأ التربة وحجم الحبيبات

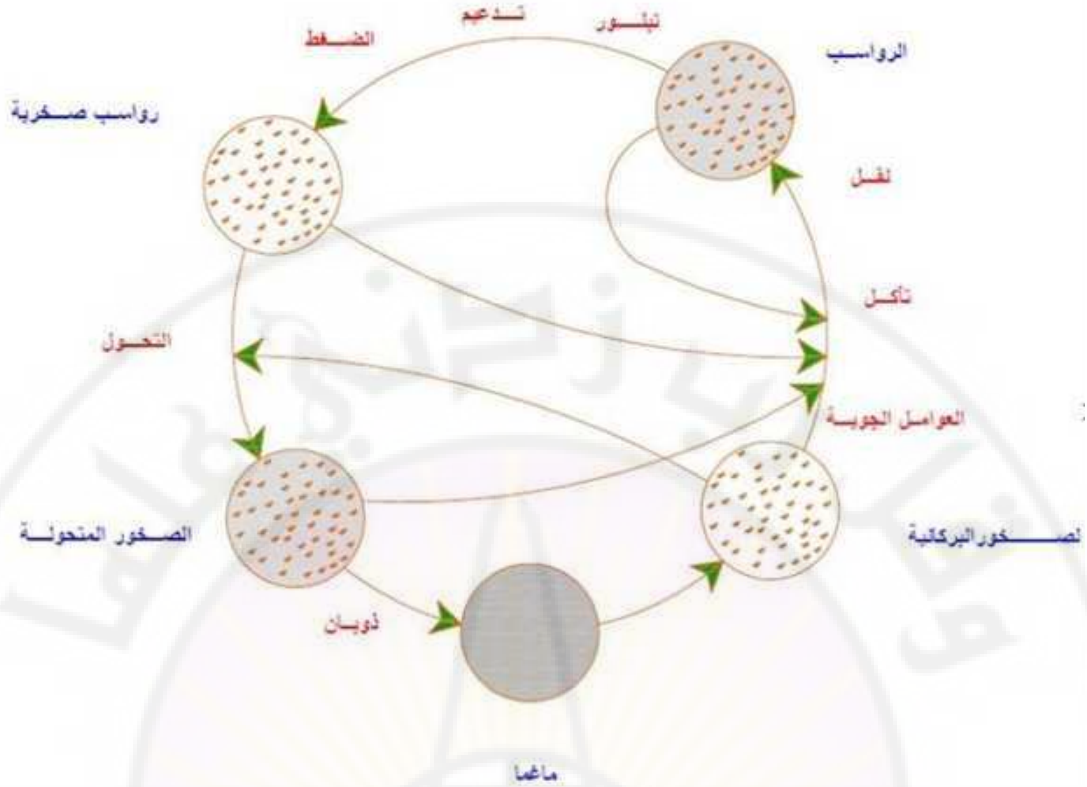
تتشكل التربة عموماً عن طريق عوامل الحت على الصخور. وتلعب الفلزات التي تشكل حبيبات التربة دور أساسي في تحديد خصائصها الفيزيائية.

الفصل سيناقش دورة تشكل الصخور ومنشأ التربة وتوزع حجم الحبيبات في كتلة التربة.

1.2 دورة تشكل الصخور ومنشأ التربة

تتشكل الحبيبات الفلزية والتي تشكل الطور الصلب في التربة نتيجة عوامل الحت على الصخور، ويمتد حجم الحبيبات ضمن هذا التشكل على مجال واسع. ويجب أن نعلم أن العديد من الخواص الفيزيائية للتربة يتم تحديدها من خلال حجم، شكل، والمكونات الكيميائية للحبيبات. ولفهم أفضل لهذه المكونات لابد من معرفة الأنواع الأساسية للصخور والتي تشكل القشرة الأرضية، الفلزات المكونة للصخور، وعمليات الحت.

تقسم الصخور حسب المنشأ إلى ثلاثة أنواع رئيسة : اندفاعية، رسوبية ومتحولة. الشكل (1.2) يظهر مخطط لدورة تشكل أنواع مختلفة من الصخور والعمليات المرتبطة بها وهذا ما يسمى بدورة تشكل الصخور، في الفقرات التالية، سنقدم مناقشة ملخصة لكل عنصر من دورة تشكل الصخور.



الشكل (1.2) : دورة الصخور

1.1.2 الصخور الاندفاعية

تتشكل الصخور الاندفاعية من عملية تصلب الماغما المنصهرة الخارجة من باطن نواة الارض، وكذلك من تبرد الماغما المنصهرة الخارجة من باطن الأرض عن طريق الاندفاعات البركانية أو الصدوع. أحيانا تتوقف الماغما المنصهرة عن الاندفاع تحت القشرة الأرضية وتبرد وتشكل ما يسمى بالصخور النارية الجوفية. وقد تظهر هذه الصخور والتي تشكلت على مر الزمن على السطح نتيجة العمليات المستمرة من الحت والتآكل والتي تغطيها لاحقاً.

يعتمد تحديد نوع الصخر الاندفاعي الذي تشكل نتيجة تبرد الماغما المنصهرة على عدة عوامل مثل تركيب الماغما وسرعة التبريد الموافقة. بعد إجراء العديد من التجارب في المخبر، وضع العالم □□□□□□□□□□ العلاقة بين سرعة تبريد الماغما وتشكل الأنواع المختلفة من الصخور. هذا التوضيح يعرف باسم مبادئ بوين الأساسية (Bowen's reaction principle). هذه المبادئ بينت التسلسل الذي تتشكل فيه المواد عندما تبرد الماغما. وشرح بوين أن بلورات الفلز تنمو لتصبح بشكل أكبر وفي بعض الاحيان تستقر. وباقي الفلزات المعلقة التي بقيت في السائل تتفاعل مع

المصهور المتبقى لتشكل فلز جديد عندما تنخفض درجة الحرارة. تستمر هذه العملية حتى يتصلب كامل الجزء المصهور.

صنف هذه التفاعلات إلى مرحلتين:

(1) تتشكل فيها الفلزات مع اختلاف في المكونات الكيميائية والبنية البلورية .

المرحلة الأولى والتي

(2) تتشكل فيها فلزات تختلف فيما بينها بالمكونات الكيميائية ولكن لها نفس البنية البلورية.

المرحلة الثانية والتي

الشكل (2.2) يظهر هذين التفاعلين.

المكونات الكيميائية للفلزات معطاة في الجدول رقم 1.2 أما الشكل (3.2) يوضح ماسح ضوئي ميكروغرافي لأجزاء من سطح الكوارتز التي تظهر كشكل الزجاج من دون أي مستويات شقوق أو انفصال. في حين أن الشكل (4.2) يقدم صورة لماسح ضوئي ميكروغرافي يظهر التقسيم الأساس لحبيبات الميكا المفردة.

بناءً على خواص الفلزات الموجودة، تشكلت أنواع عديدة من أنواع الصخور الاندفاعية. من هذه الصخور : الغرانيت، الغابرو، البازلت، والجدول 2.2 يظهر الخواص العامة لبعض الصخور الاندفاعية .



الشكل (2.2) : سلاسل تفاعلات بون

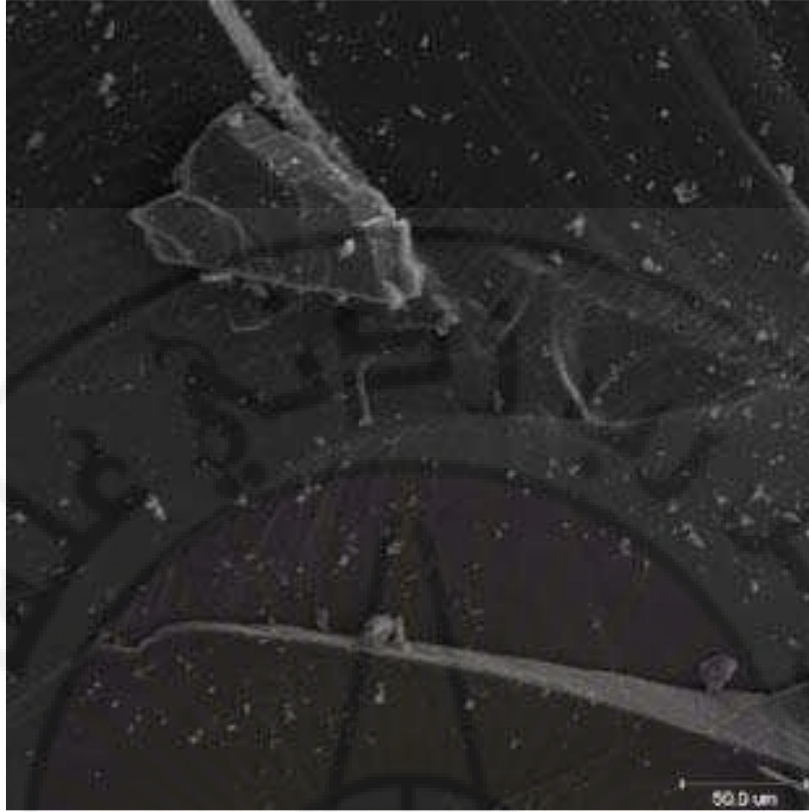
الجدول (1.2) : تراكيب الفلزات حسب بوين

Mineral	Composition
Olivine	$(Mg, Fe)_2SiO_4$
Augite	$Ca, Na(Mg, Fe, Al)(Al, Si_2O_6)$
Hornblende	Complex ferromagnesian silicate of Ca, Na, Mg, Ti, and Al
Biotite (black mica)	$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
Plagioclase { calcium feldspar	$Ca(Al_2Si_2O_8)$
sodium feldspar	$Na(AlSi_3O_8)$
Orthoclase (potassium feldspar)	$K(AlSi_3O_8)$
Muscovite (white mica)	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Quartz	SiO_2

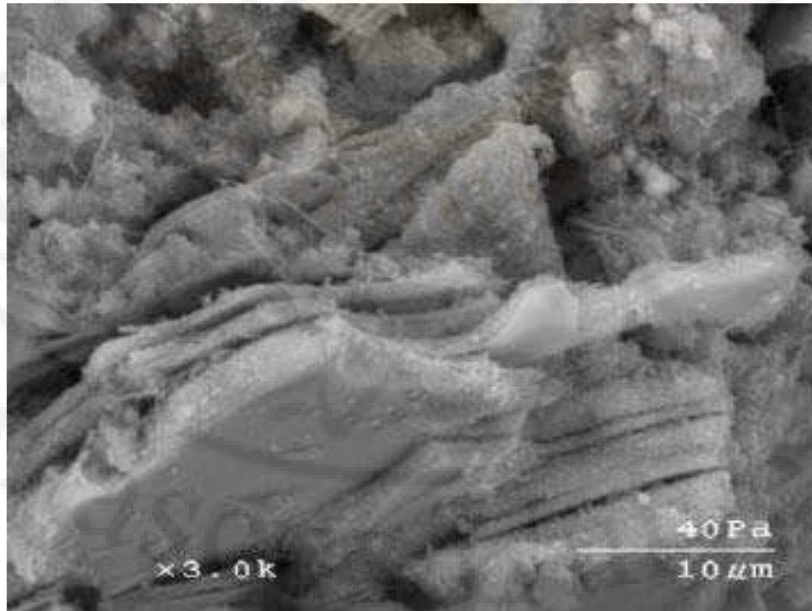
الجدول (2.2) : خواص وتراكيب الصخور الإندفاعية

Name of rock	Mode of occurrence	Texture	Abundant minerals	Less abundant minerals
Granite	Intrusive	Coarse	Quartz, sodium feldspar, potassium feldspar	Biotite, muscovite, hornblende
Rhyolite	Extrusive	Fine		
Gabbro	Intrusive	Coarse	Plagioclase, pyroxenes, olivine	Hornblende, biotite, magnetite
Basalt	Extrusive	Fine		
Diorite	Intrusive	Coarse	Plagioclase, hornblende	Biotite, pyroxenes (quartz usually absent)
Andesite	Extrusive	Fine		
Syenite	Intrusive	Coarse	Potassium feldspar	Sodium feldspar, biotite, hornblende
Trachyte	Extrusive	Fine		
Peridotite	Intrusive	Coarse	Olivine, pyroxenes	Oxides of iron

(ملاحظة : عرضت الجداول باللغة الإنكليزية للمحافظة على دقة التعبير)



الشكل (3.2) : ماسح ضوئي ميكروغرافي لأجزاء من سطح الكوارتز التي تظهر كشكل الزجاج من دون أي مستويات شقوق أو انفصال



الشكل (4.2) : صورة لماسح ضوئي ميكروغرافي يظهر التقسيم الأساس لحبيبات الميكا المفردة

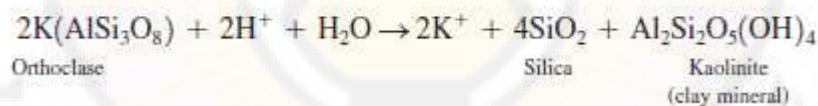
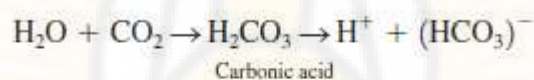
□

الحث

هي عبارة عن عمليات ميكانيكية وكيميائية وعضوية تصيب الصخور وتؤدي إلى تقطيعها إلى قطع أصغر مما كانت عليه. تحدث العمليات الميكانيكية نتيجة التمدد والتقلص بسبب ارتفاع وانخفاض درجات الحرارة المستمر الذي يحدث في الطبيعة والتي تسبب تفكك أغلب الصخور. أثناء تسرب الماء المستمر في مسامات وشقوق الصخور ومع انخفاض درجات الحرارة يتجمد الماء ويتوسع حجمه، ونتيجة لذلك فإن الضغط المطبق نتيجة هذا التوسع الحجمي يكون كافياً لتحطيم حتى الصخور الكبيرة.

هناك العديد من العوامل الفيزيائية التي تساهم في تفتيت الصخور منها : الأنهار الجليدية، الرياح، جريان المياه في المجاري والأنهار، الأمواج الشاطئية.

من المهم معرفة أنه في حالة الحت الفيزيائي، تنقعت الصخور الكبيرة إلى صخور أصغر من دون حدوث تغيير في التركيب الكيميائي لهذه الصخور. الشكل (5.2) يظهر عدة أمثلة عن الحت الميكانيكي للأمواج الشاطئية والرياح في CaCO_3 في CaCO_3 .



أما في حال الحت الكيميائي، نجد أن فلزات الصخور الأصلية تتحول إلى فلزات جديدة نتيجة التفاعل الكيميائي. إن وجود الماء وثاني أكسيد الكربون في الجو تشكل حمض كربوني والذي بدوره يتفاعل مع الفلزات الموجودة في الصخور لتشكل فلزات جديدة وأملاح منحلة. أما الأملاح المنحلة الموجودة في المياه الجوفية والحمض العضوي المتشكل نتيجة تعفن المواد العضوية تسبب الحت الكيميائي للصخور. ومثال عن الحت الكيميائي □□□□□□□□ لتشكل فلزات الغضار والسيليكا وكربونات البوتاسيوم المنحلة : معظم شوارد البوتاسيوم الناتجة تتحول إلى كربونات البوتاسيوم والذي يتم استهلاكه من قبل النباتات.

الحت الكيميائي Ca^{2+} هي مشابه للموجودة في CaCO_3 والتي تشكل فلزات الغضار، السيليكا وأملاح منحلة أخرى. الفلزات المنغنيزية أيضاً هي عبارة عن نواتج تحليل الفلزات الغضارية، السيليكا والأملاح المنحلة. وجود الحديد والمنغنيز في الفلزات المنغنيزية تعطي

3. ترب البحيرات : وهي الترب المشكلة نتيجة الترسيب ضمن البرك الهادئة. □
4. الترب البحرية : وهي الترب التي تشكلت نتيجة الترسيب ضمن البحار. □
5. الترب الريحية : وهي الترب التي انتقلت وترسبت نتيجة الرياح. □
6. الترب الثقالية : وهي الترب التي تشكلت نتيجة حركة الترب من مكانها الأصلي نتيجة الجاذبية كالتي تتشكل نتيجة حصول الانزلاقات الأرضية. □



الشكل (5.2) : ميكانيكية الجرف

2.1.2 الصخور الرسوبية

إن البحص والرمل والسلت والغضار المتشكل نتيجة عوامل الحت قد ترتص نتيجة ضغط الطمر الناتج عن الوزن الذاتي للمواد وتتماسك نتيجة عدة عوامل مثل أكسيد الحديد، كالسيت، دولوميت وكوارتز. مواد التماسك تكون عادة منحلة في المياه الجوفية. تملأ هذه المواد الفراغات بين الحبيبات وتشكل صخر رسوبي. وتسمى الصخور المشكلة بهذه الطريقة بالصخور الرسوبية الحتية. كل الصخور الرسوبية الحتية لها بيئة مفككة، والأمثلة التالية هي لصخور رسوبية حتية ذات بنية مفككة :

Particle size	Sedimentary rock
Granular or larger (grain size 2 mm–4 mm or larger)	Conglomerate
Sand	Sandstone
Silt and clay	Mudstone and shale

- الكونغلوميرا: عندما تكون للحبيبات زوايا حادة فإنها تسمى بريش: $\square\square\square\square$. وعندما تكون للحبيبات زوايا مدورة تسمى بودنغ.
 - الصخر الرملي : يتراوح حجم الحبيبات ما بين 0.06 مم و 2 مم. وعندما تكون كل الحبيبات في الرمل الصخري عبارة عن كوارتز يسمى عندها $\square\square\square\square\square\square\square\square$.
 - الحجر الطيني والسحيل : فإن حجم الحبيبات يكون عموماً أقل من 0.06 مم حيث له جانب $\square\square\square\square$ بينما في حالة السحيل فإن الصخر ينقسم إلى ألواح صفائحية.
- إعادة صياغة الصخر الرسوبي يمكن تشكيله بعملية الحت الكيميائية وتصنف مثل هذه الصخور بالصخور الرسوبية الكيميائية. هذه الصخور قد تكون لها بيئة مفككة أو غير مفككة.

Composition	Rock
Calcite (CaCO_3)	Limestone
Halite (NaCl)	Rock salt
Dolomite [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]	Dolomite
Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Gypsum

وهذه بعض الأمثلة عن الصخور الرسوبية الكيميائية :

✓ الحجر الكلسي يتشكل غالباً نتيجة ترسب كربونات الكالسيوم مع أو بدون مواد عضوية ومعظم الحجر الكلسي له بنية قابلة للتفكك. الشكل (6.2) يظهر المسح الالكتروني الميكروغرافي لسطح قطع من الحجر الكلسي. تظهر الحبيبات المنفصلة من الكالسيت على شكل سداسي منتظم.

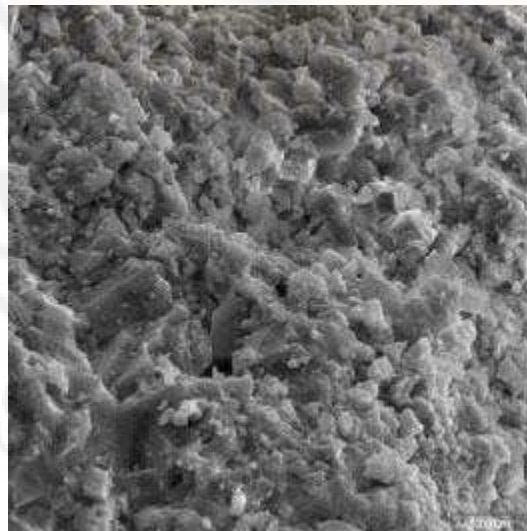
✓ الحوار هو عبارة عن صخر رسوبي تكون نتيجة عمليات بيوكيميائية على الكالسيت. والتي هي عبارة عن قطع ميكروسكوبية من هياكل النباتات والحيوانات.

✓ الدولوميت يتشكل نتيجة تفاعلات كيميائية لخليط من الكربونات أو نتيجة التفاعل بين المغنيزيوم مع الحجر الكلسي في الماء .

✓ يتشكل الجبس والأنهدريت نتيجة تكثف كبريتات الكالسيوم □ □ □ □ المنحل في مياه البحار بفعل التبخر.

وهناك صخور تصنف بالصخور المتبخرة مثل الملح الصخري □ □ □ والتي تشكل نتيجة ترسب الملح الموجود في مياه البحر.

الصخور الرسوبية قد تخضع لعمليات الحت لتشكل الرواسب أو قد تتعرض لعمليات تحويلية لتصبح صخور متحولة.



الشكل (6.2) : المسح الالكتروني الميكروغرافي لسطح قطع من الحجر الكلسي.
تظهر الحبيبات المنفصلة من الكالسيت شكل سداسي منتظم

3.1.2 الصخور المتحولة

هي عملية تحول مكونات وبنية الصخور (من دون الانصهار) نتيجة الحرارة والضغط المرتفعين. أثناء التحول تتشكل فلزات جديدة وحبيبات الفلزات المتشكلة يتم إعادة تشكيلها لتعطي بنية ورقية للصخور المتحولة. وأهم الصخور المتحولة :

الغنايس: يتكون نتيجة عمليات تحول عند درجات حرارة عالية للصخور الاندفاعية والرسوبية القديمة ومثال عليها : الغرانيت، الغابرو والديوريت.

عمليات التحول عند درجات حرارة منخفضة للسحيل والاحجار الطينية يعطي $\square\square\square\square$. الفلزات الغضارية في السحيل تصحب كلورايت وميكا نتيجة الحرارة لذلك $\square\square\square\square$ مكون بشكل أساسي من رقائق الميكا والكلورايت .

الفيليت: والذي تشكل من $\square\square\square$ مع عمليات تحول إضافية نتيجة التعرض لحرارة أكبر من $250^{\circ}\square$ إلى $300^{\circ}\square$.

الشيست: تكون من عدة صخور اندفاعية، رسوبية وصخور ذات درجة تحول منخفضة ذات بيئة جيدة للتطبيق ورقائق ظاهرة من منارات $\square\square\square\square$ و $\square\square\square\square\square\square\square$.

تحتوي عادة الصخور المتحولة على كميات كبيرة من الكوارتز والفلدسبار. أما المرمز (الرخام) يتشكل من الكالسيت والدولوميت نتيجة إعادة التبلور. حجم حبيبات الفلز في المرمز (الرخام) أكبر من التي تكون في التربة الأصلية. ففي حالة المرمز الأخضر نجد أن تلونه يكون نتيجة $\square\square\square\square\square\square\square\square$ ، $\square\square\square\square$ ، أما المرمز الأسود فنجد أنه يحوي على فلزات البيثومين والمرمز البني يحوي أكسيد الحديد والحجر الكلسي.

الكوارتز: تشكل من الأحجار الرملية الغنية بالكوارتز. السيليكا تدخل ضمن الفراغات بين الكوارتز وحبيبات الرمل وتشكل عامل تماسك بينهم. الكوارتز هو واحد من أقسى فلزات الصخور.

قد تنصهر الصخور المتحولة تحت ضغط وحرارة عاليين لتشكل الماغما وتعود لتبدأ الدورة من جديد.

2.2 حجم حبيبات التربة

إن أقطار الحبيبات التي تشكل التربة تتغير ضمن مجال واسع. وتسمية التربة يكون عموماً بناءً على حجم الحبيبات المسيطر في تكوين التربة : بحص، رمل، سلت، غضار .
لوصف التربة وفقاً لحجم حبيباتها، قامت عدة منظمات بتطوير عدة تصانيف بناءً على حجم الحبيبات في التربة. الجدول 3.2 يبين نظام تصنيف الترب حسب حجم الحبيبات وفق : معهد ماساشوستس للتكنولوجيا، المديرية الأمريكية للزراعة، الجمعية الأمريكية لتطوير الطرق والمواصفات الرسمية، رابطة الجيش الأمريكي للمهندسين، الدائرة الرسمية الأمريكية للإستصلاح. وفي هذا الجدول، تم ذكر نظام ϕ فقط لأسباب توضيحية حيث يعتبر نظام هام في تاريخ تطوير أنظمة تصنيف حدود حجم الحبيبات الموجودة في الترب. ويعتبر نظام تصنيف الترب الموحد من أكثر الأنظمة المقبولة عالمياً وتم إعتماده من قبل الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM). الشكل (7.2) يظهر حدود حجم الحبيبات على شكل رسم تخطيطي.

البحص : عبارة عن قطع من الصخر مع بعض حبيبات الكوارتز، الفلدسبار، وفلزات أخرى.

حبيبات الرمل : تتشكل معظمها من الكوارتز والفلدسبار، مع بعض الفلزات المختلفة.

الشكل (8.2) يظهر المسح الالكتروني الميكروغرافي لبعض حبيبات الرمل . حيث نلاحظ وجود حبيبات ذات حواف دائرية وذلك نتيجة التآكل أثناء الانتقال بفعل الرياح أو الماء .

الشكل (9.2) هو تكبير للحبيبات المشار لها في الشكل (8.2)، حيث يظهر الشكل حبيبات غضارية قليلة ملتصقة بحبيبات رملية أكبر .

السلت : يتألف من حبيبات الكوارتز الناعمة جداً وبعض الحبيبات ذات الشكل الرقائق والتي تشكل أجزاء من فلزات الميكاسوز μm .

الغضار : حبيباته ذات شكل صفائحي ميكروسكوبي وأصغر من حبيبات الميكا، فلزات الغضار ومنرالات أخرى يظهرها الجدول 3.2 والشكل (7.2)، إن قطر حبيبات الغضار تكون أصغر من 0.002 مم. وفي بعض الحالات يكون قطر حبيبات الغضار محصورة ما بين 0.002 مم و 0.005 مم. الحبيبات المصنفة غضار بناءً على حجمها ليس من الضرورة أن تحوي فلزات الغضار . حبيبات

الفصل الثاني منشأ التربة وحجم الحبيبات أ.د.م. إبراهيم حمود

الغضار هي التي تعطي لدونة عند مزجها بنسبة محددة من الماء. () (اللدونة في الغضارهي عبارة عن خاصية مشابهة للمعجون عند احتوائه على كمية محددة من الماء).

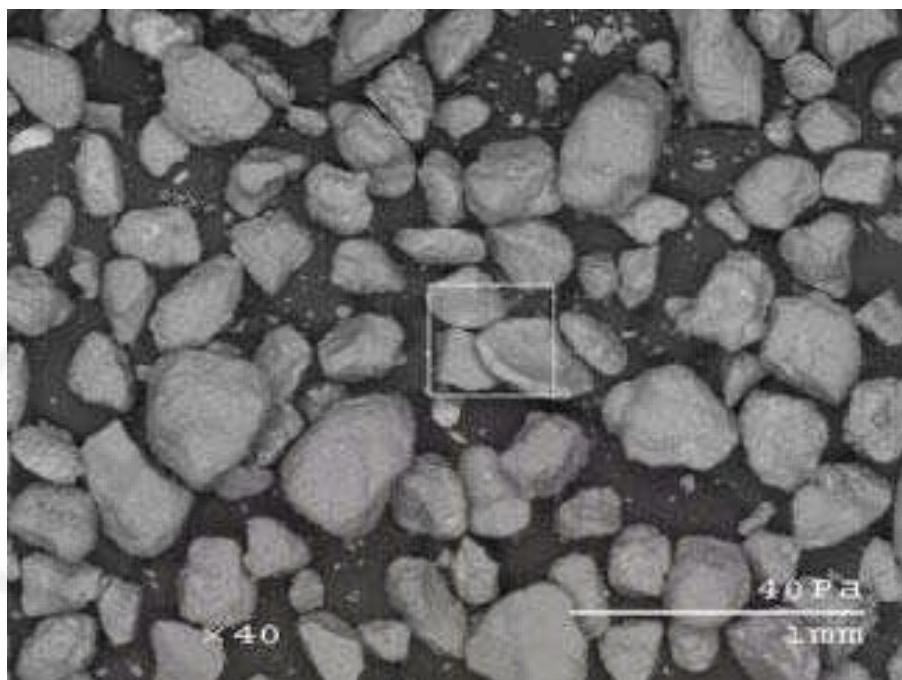
الجدول (3.2) : تصنيف التربة حسب أبعاد الحبيبات المشكلة لها

Name of organization	Grain size (mm)			
	Gravel	Sand	Silt	Clay
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 to 0.06	0.06 to 0.002	<0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 to 0.05	0.05 to 0.002	<0.002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76.2 to 2	2 to 0.075	0.075 to 0.002	<0.002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation, and American Society for Testing and Materials)	76.2 to 4.75	4.75 to 0.075	Fines (i.e., silts and clays) <0.075	

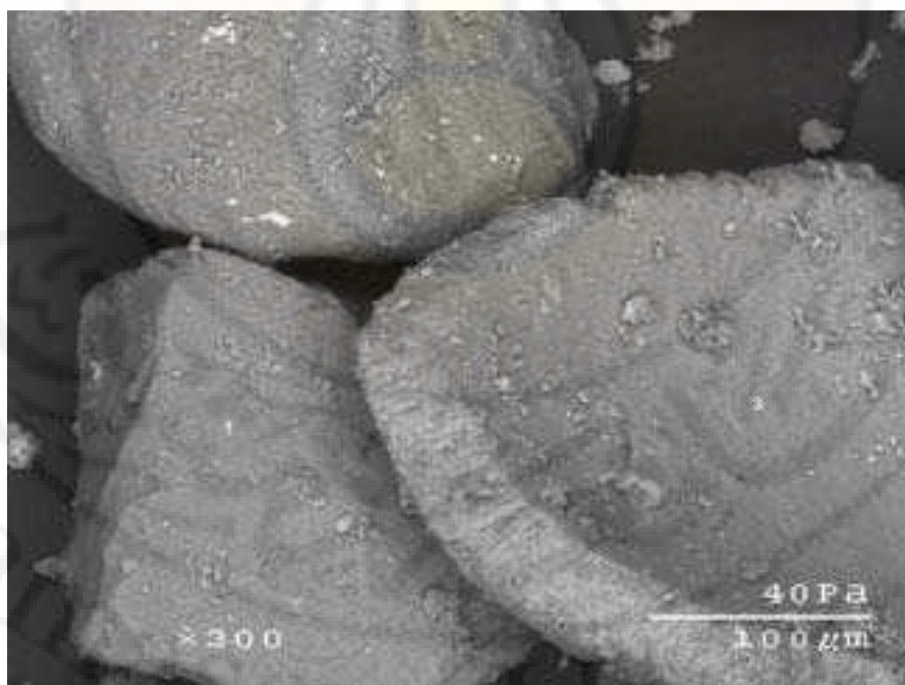
Note: Sieve openings of 4.75 mm are found on a U.S. No. 4 sieve; 2-mm openings on a U.S. No. 10 sieve; 0.075-mm openings on a U.S. No. 200 sieve. See Table 2.5.



الشكل (7.2) : تصنيف حجوم حبيبات التربة حسب أنظمة التصنيف المختلفة



الشكل (8.2) : المسح الالكتروني الميكروغرافي لبعض حبيبات الرمل



الشكل (9.2) : تكبير للحبيبات المشار لها في الشكل 2.8 ،
حيث يظهر الشكل حبيبات غضارية قليلة ملتصقة بحبيبات رملية أكبر

الترب اللاغضارية يمكن أن تحوي حبيبات صغيرة من الكوارتز، الفلدسبار أو الميكا والتي يمكن تصنيفها ضمن الغضار. لذلك من الملائم أن نسمي التربة التي قطر حبيباتها ذات الأقطار أقل من 2 ميكرون أو 5 ميكرون كما هي معرفة ضمن التصنيف المختلفة بتربة ذات حجم حبيبات غضارية بدلاً من الغضار . حبيبات الغضار بالحجم الغروي تتراوح من 2 إلى 1 ميكرون وهي الحدود العليا.

3.2 فلزات الغضار

فلزات الغضار هي عبارة عن سبائك الألمنيوم المعقدة، وهي عبارة عن خليط من مكونين رئيسيين هما :

(1) رباعی وجوه السیلیکا.

(2) ثمانی وجوه الألومینا. □

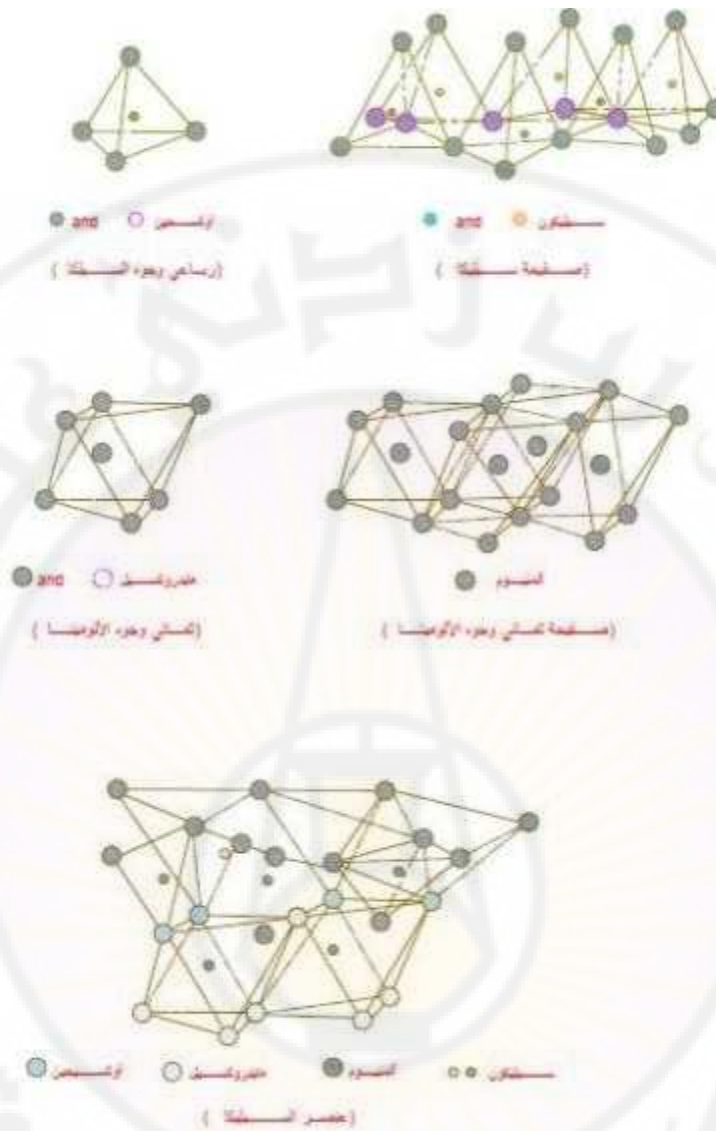
كل عنصر رباعي وجوه يتألف من أربع ذرات أكسجين ميحطة بذرة سيليك (الشكل 10.2).
تركيبية عناصر رباعي وجوه السيليكا تعطي صفيحة سيليك (الشكل 10.2). يتم تشارك ثلاث ذرات من الأكسجين مع الرباعي الوجوه المجاور.

أما العنصر ثماني وجوه الألومينا يتألف من ست ذرات هيدروكسيل محيطة بذرة ألومنيوم (الشكل 10.2)، وتركيبية عناصر ثماني وجوه الألومنيوم الهيدروكسيل تعطي صفيحة ثمانية الوجوه. (وهذا ما يسمى أيضاً بصفيحة الغينسايت _ الشكل 10.2). في بعض الأحيان يتم استبدال ذرات الألومنيوم في عنصر الثماني الوجوه بذرات المغنيزيوم وتسمى في هذه الحالة صفيحة الثماني الوجوه بصفيحة البروسايت.

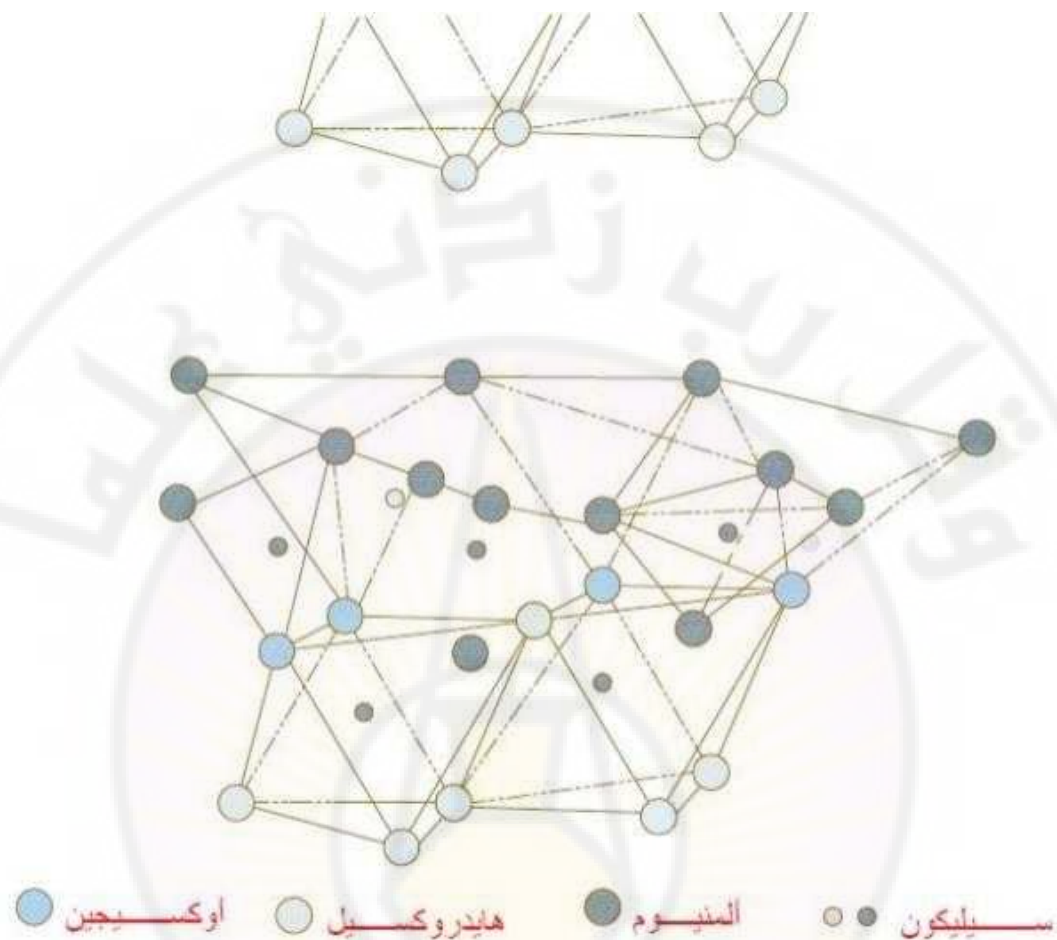
في صفحة السيليكا، كل ذرة سيليكون مشحونة بشحنة موجبة قيمتها 4^+ ترتبط مع أربع ذرات أكسجين بقيمة شحنة سالبة 8^- . ولكن كل ذرة أكسجين في قاعدة العنصر رباعي الوجوه ترتبط مع ذرتين سيليكون. هذا يعني أنه عند أعلى ذرة الأكسجين عند كل عنصر رباعي وجوه له قيمة سالبة 1 للحصول على التوازن. عندما تصبح صفحة السيليكا فوق صفحة العنصر ثماني الوجوه كما في الشكل (10.2 □) فإن ذرات الأكسجين هذه تبادل الهيدروكسيل من أجل توازن الشحنات.

من الفلزات الغضارية الهامة الثلاثة :

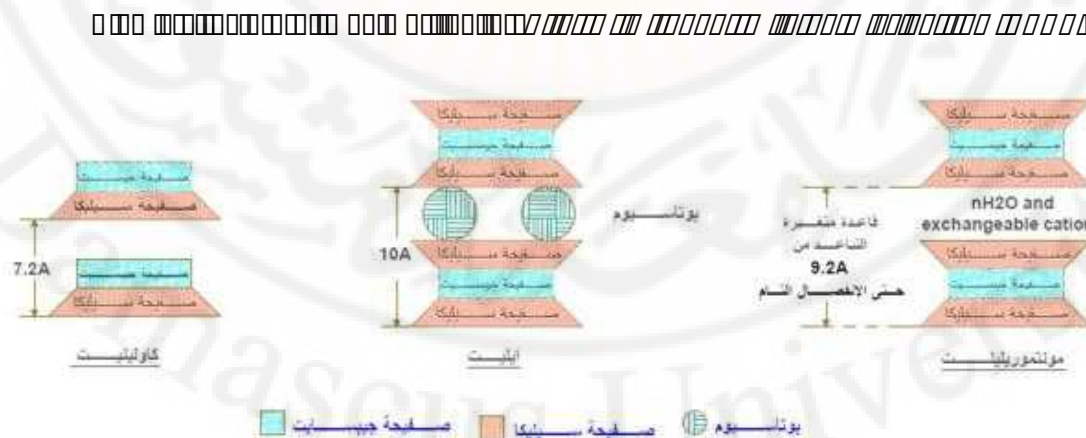
- الكاوولينيت يتألف من تكرار لصفائح السيليكا - الغينسيت بشكل شبكي 1:1، كما يظهر الشكل (11.2) و 12.2. كل طبقة سمكها حوالي 0.0001. الطبقات متماسكة مع بعضها عن طريق الروابط الهيدروجينية. يظهر الكاوولينيت بشكل صفائحي. بتباعد عرضي حوالي 1000 إلى 20,000 Å وسماكة حوالي 0.0001 إلى 0.0002. المساحة السطحية لحبيبات الكاوولينيت لوادة الكتل : هي عبارة عن 1000 Å²، المساحة السطحية لوادة الكتل تعرف بالسطح النوعي. الشكل 12.2 يظهر المسح الالكتروني الميكروغرافي لعينة كاوولينيت.
- الإيليت يتألف من صفيحة غيبسيت مربوطة مع صفيحتي سيليك - واحدة في الأعلى والآخرى في الأسفل - (الشكل 14.2 و 12.2). تسمى عادة بغضار الميكا. طبقات الإيليت متماسكة عن طريق أيونات البوتاسيوم. الشحنة السالبة لتعادل أيونات البوتاسيوم تأتي من استبدال الألمنيوم ببعض السيليكون في صفيحة رباعي الوجوه. يتم تعويض عنصر في آخر من دون تغيير في البنية البلورية يعرف بالتعويض المتماثل. حبيبات الإيليت عموماً لها أبعاد عرضية بحوالي 1000 إلى 5000 Å وسماكة حوالي 50 إلى 500 Å. السطح النوعي للحبيبات هو حوالي 80 Å².
- المونتموريللونيت له بنية مشابهة لبنية الإيليت ولكن صفيحة الغيبسيت متوضعة بين صفيحتي سيليك. (الشكل 15.2 و 12.2). في المونتموريللونيت هناك تعويض تماثلي في المغنيزيوم والحديد بالألمنيوم في صفائح ثنائي الوجوه. شوارد البوتاسيوم غير موجودة في الإيليت وتتوضع كمية كبيرة من الماء في المسافة الفاصلة بين الطبقات. حبيبات المونتموريللونيت لها أبعاد عرضية من 1000 إلى 5000 Å وسماكة حوالي 10 إلى 50 Å. السطح النوعي حوالي 100 Å². الشكل (16.2) هو مسح الكتروني ميكروغرافي يظهر بنية المونتموريللونيت.



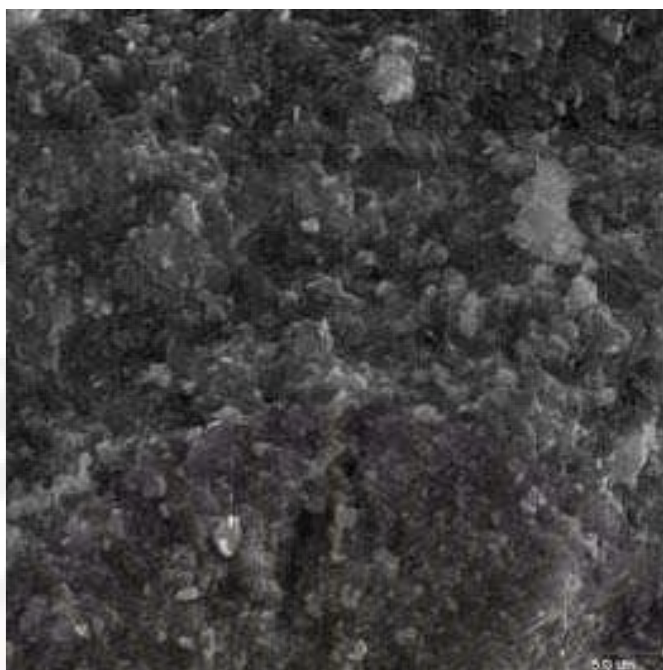
الشكل (10.2) : منيرالات الغضار



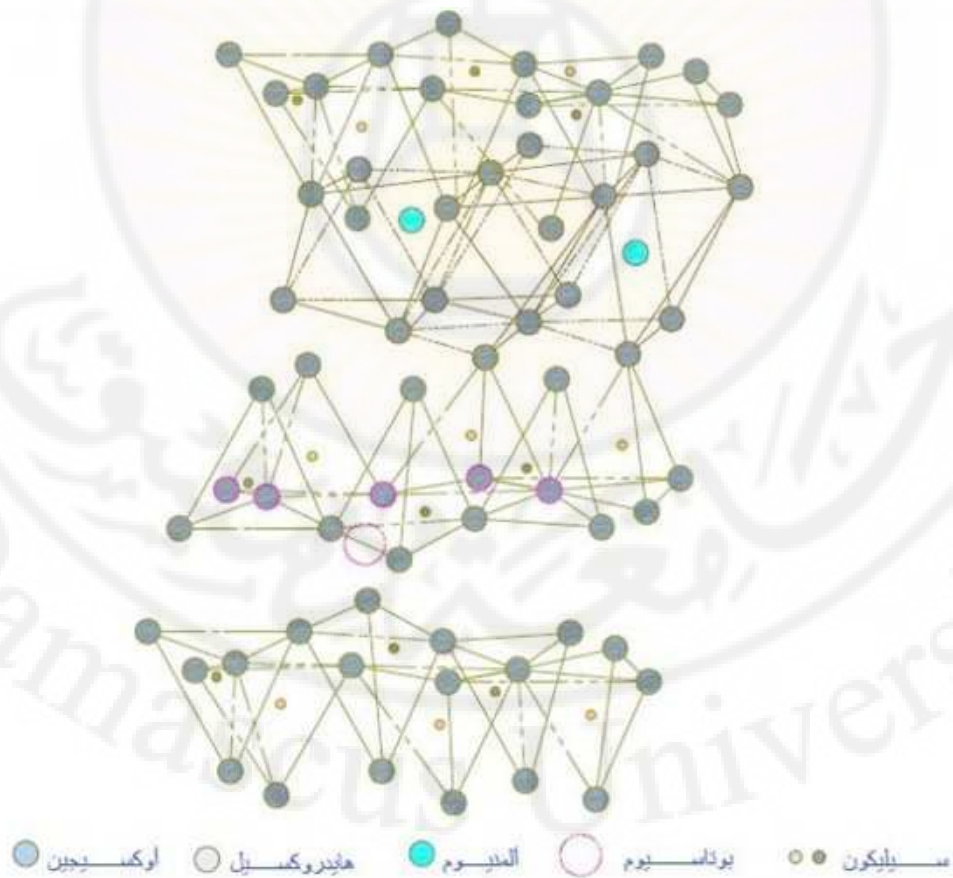
الشكل (11.2) : التركيب الذري لمادة لمونتموريلونيت



الشكل (12.2) : مخطط لبينة أنواع الغضار المختلفة



الشكل (13.2) : يظهر المسح الالكتروني الميكروغرافي لعينة كاؤولينيت



الشكل (14.2) : التركيب الذري لللايليت

بالإضافة للكاؤولينيت، الإيليت والمونتموريللونيت هناك فلزات غضارية أخرى موجودة هي الكلورايت، الهالوسيت، فيرميكوليت والأتابولجيت .

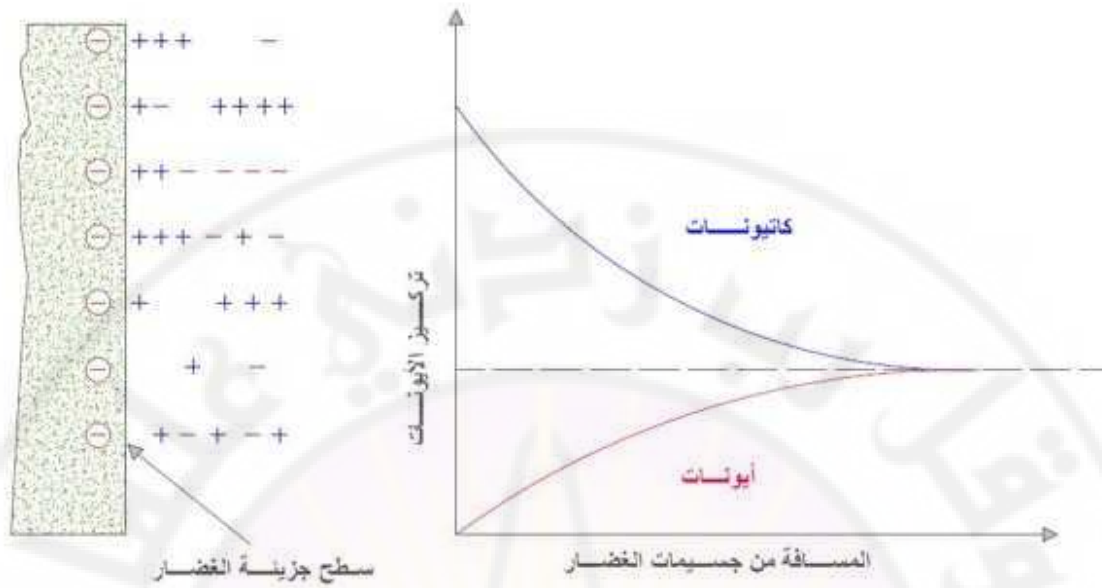
تحمل حبيبات الغضار شحنة سالبة صافية على سطحها، نتيجة التعويض التماثلي ونتيجة الانقطاع في استمرارية البنية عند الحواف. تكون الشحنات السالبة كبيرة كلما كبر السطح النوعي. وفي بعض المناطق المشحونة بشحنات موجبة أيضاً تظهر عند حواف الحبيبات. والقائمة التالية توضح وسطي التشاركية لكثافة الشحنات السالبة للسطح لبعض الفلزات الغضارية (Table 17.2)

Clay mineral	Reciprocal of average surface density of charge (Å ² /electronic charge)
Kaolinite	25
Clay mica and chlorite	50
Montmorillonite	100
Vermiculite	75

تتوازن الشحنة السالبة في الغضار الجاف نتيجة تبادل الشحنات الموجبة مثل Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^{+} ، K^{+} المحيطة بالحبيبات المترابطة نتيجة التجاذب الالكتروني. عندما يضاف الماء للغضار فإن هذه الشحنات الموجبة والقليل من الأيونات تحيط حول حبيبات الغضار. هذا العملية تسمى بتشتت الطبقات المضاعفة (الشكل 17.2). تركيز الأيونات يتناقص مع زيادة المسافة عن وجه الحبيبات (الشكل 17.2) .

جزيئات الماء مختلفة القطبية حيث ذرات الهيدروجين ليست متناظرة حول ذرة الأكسجين ولكنها توجد بزاوية تماسك 105 درجات (الشكل 18.2) . ونتيجة لذلك فإن جزيئات المياه لها شحنة موجبة من طرف وشحنة سالبة من الطرف الآخر وهذا ما يعرف بثنائية القطب .

□



الشكل (17.2): تشتت الطبقات المضاعفة عند إضافة الماء للغضار



الشكل (18.2) : جزئ ثنائي القطب من الماء

□

ينجذب قطبي الماء للشحنات السالبة لسطح جزيئات الغضار وأيضاً الأيونات الموجبة في الطبقات المزدوجة. الأيونات الموجبة في دورها تتجذب لحبيبات التربة وأيضاً هناك آلية ثالثة حيث ينجذب الماء لحبيبات التربة وتشكل الرابطة الهيدروجينية حيث ذرات الهيدروجين في الماء ضمن جزيئات الماء تتشارك مع جزيئات الأكسجين على سطح الغضار. بعض الأيونات الموجبة التي توجد ضمن مسامات الماء تتجذب أيضاً لسطح حبيبات الغضار وهذه الأيونات الموجبة تجذب جزيئات الماء ثنائية القطب. كل هذه الآليات لانجذاب الماء للغضار موضحة بالشكل (19.2). قوة التجاذب بين الماء والغضار تتناقص بالبعد عن سطح الجزيئات. كل الماء المرتبط مع جزيئات الغضار بفعل قوة التجاذب تسمى بطبقة المياه المزدوجة. الطبقة الداخلية لطبقات المياه المزدوجة والتي ترتبط بشكل قوي مع الغضار تسمى بالماء المتصل حيث هذا الماء له لزوجة أكبر من الماء الحر.



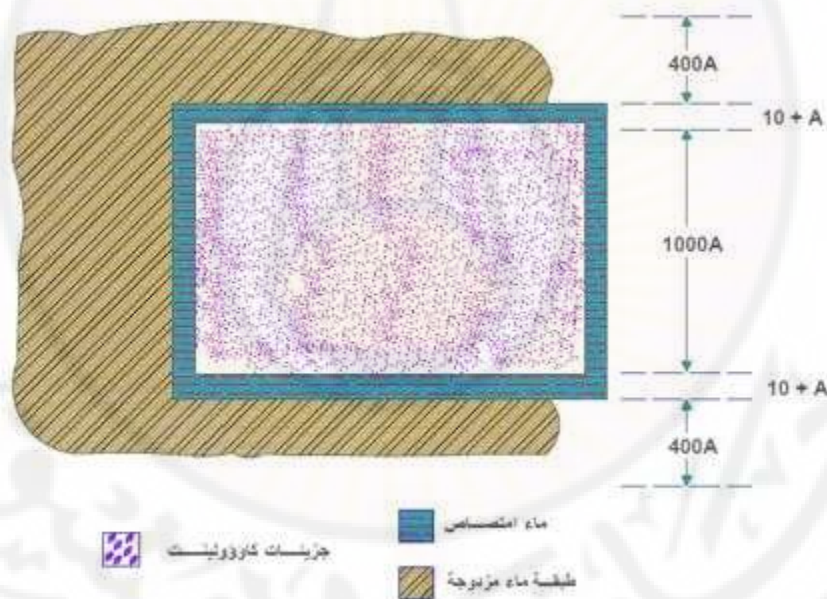
الشكل (19.2) : تفاعل بين جزيئات ثنائية القطب عند الانتشار في الطبقات المزدوجة

يظهر الشكل (20.2) طبقة المياه المزدوجة والمتصلة لجزيئات من المونتموريللونيت والكاؤولينيت. اتجاه الماء المحيط بجزيئات الغضار تعطي للتربة الغضارية خاصية اللدونة.

□



جزئية مونتموريللونيت مثالية 1000A by 10A



جزئية الكاؤولينيت مثالية 10.000A by 1000A

الشكل (20.2): يظهر طبقة المياه المزدوجة والمتصلة لجزيئات من المونومورليونيت والكاؤولينيت.

اتجاه الماء المحيط بجزيئات الغضار تعطي للترب الغضارية خاصية اللدونة.



إن وجود فلزات الغضار في التركيب الحبي للتربة يؤثر بشكل كبير على الخواص الهندسية للتربة. وعند وجود الرطوبة فإن السلوك الهندسي للتربة سوف يتغير بشكل كبير كلما زادت نسبة فلزات الغضار في التربة. ولأغراض عملية في حال كانت نسبة الغضار $\leq 5\%$ أو أكبر يمكن اعتبار أن جزيئات السلت والرمل تحيط بذرة الغضار وتكون فلزات الغضار هي المحددة بشكل أساسي للخواص الهندسية للتربة .

4.2 الوزن النوعي النسبي G_s

يعرف الوزن النوعي النسبي بأنه النسبة ما بين الوزن الحجمي لمادة معطاة إلى الوزن الحجمي للماء. الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة في التربة نحتاجه للعديد من الحسابات في ميكانيك التربة. يمكن تحديده بدقة في المختبر والجدول 4.2 يظهر الوزن النوعي النسبي لبعض الفلزات المعروفة والموجودة في الترب. قيم الوزن النوعي النسبي تتراوح بين ما بين 2.65 إلى 3.0 . الوزن النوعي النسبي للجزيئات الصلبة للرمل الخفيف الملون والذي يتألف بمعظمه من الكوارتز يكون بحدود 2.65 إلى 2.76 ، ومن أجل الترب الغضارية والسلتية، تتراوح قيم الوزن النوعي النسبي ما بين 2.65 إلى 3.0 .

الجدول (4.2) : يبين قيم الوزن النوعي النسبي لبعض الفلزات المعروفة

Mineral	Specific gravity, G_s
Quartz	2.65
Kaolinite	2.6
Illite	2.8
Montmorillonite	2.65–2.80
Halloysite	2.0–2.55
Potassium feldspar	2.57
Sodium and calcium feldspar	2.62–2.76
Chlorite	2.6–2.9
Biotite	2.8–3.2
Muscovite	2.76–3.1
Hornblende	3.0–3.47
Limonite	3.6–4.0
Olivine	3.27–3.7

5.2 التحليل الحبي للتربة (تحليل ميكانيكي)

التحليل الحبي للتربة، هو عبارة عن تحديد حجم الحبيبات الموجودة في التربة، ويعبر عنه كنسبة مئوية من الوزن الجاف الكلي. هناك طريقتين يمكن استخدامهما لتحديد توزيع حجم الحبيبات في التربة حسب أبعاد الحبيبات وهما : □

(1) التحليل الحبي للتربة بطريقة التحليل المنخلي، وتستخدم هذه الطريقة للحبيبات ذات الأقطار الأكبر من □ □ □ □ □ □.

(2) التحليل الحبي للتربة بطريقة تحليل الهيدروميتر ويستخدم من أجل الحبيبات ذات الأقطار أصغر من □ □ □ □ □ □.

وبكلا الطريقتين نحصل على ما يسمى بمنحني التحليل الحبي للتربة. المبادئ الأساسية للطريقتين سوف يتم شرحها في الفقرات التالية.

1.5.2 التحليل الحبي للتربة بطريقة التحليل المنخلي

التحليل المنخلي هو عبارة عن عملية نخل للتربة عبر إمرارها بمجموعة من المهزات ذات الأقطار المترتبة من الأكبر قطراً حتى الأصغر قطراً . المناخل النظامية الأمريكية مع أرقامها وأقطار فتحاتها (□ □ □ □ □ □ □ □ □ □) موضحة في الجدول 5.2 .

للقيام بالتحليل الحبي بطريقة التحليل المنخلي للتربة، لابد أولاً من تجفيف التربة بالفرن ثم تحطيم كل الكتل الكبيرة إلى حبيبات أصغر . بعد ذلك يتم نخل التربة من خلال مجموعة من المهزات ذات الأقطار المتناقصة من الأعلى للأسفل (يتم وضع صينية أسفل هذه المهزات). الشكل (21.2) يظهر مجموعة من المهزات في هزاز مستخدم للقيام بالتجربة في المختبر. المهزات الأصغر الواجب استخدامها لهذا من النوع من التجارب حسب □ □ هي المهزة رقم □ □ □ . عند تحليل الترب المتماسكة، فإن تحطيم القطع الكبيرة إلى أجزاء صغيرة قد يكون صعباً لذلك يمكن إضافة الماء ليصبح طيناً ومن ثم يتم غسله خلال هذه المهزات. الكميات المحجوزة من كل منخل يتم جمعها بشكل منفصل ويتم تجفيفها بالفرن قبل قياس العينات المحجوزة .

الجدول (5.2) : أرقام وأقطار المناخل النظامية (US)

رقم المهزة	قطر المهزة (mm)	رقم المهزة	قطر المهزة (mm)
4	4.75	35	0.500
5	4.00	40	0.425
6	3.35	50	0.355
7	2.80	60	0.25
8	2.36	70	0.212
10	2.00	80	0.180
12	1.70	100	0.150
14	1.40	120	0.125
16	1.18	140	0.106
18	1.00	170	0.09
20	0.850	200	0.075
25	0.710	270	0.053
30	0.600		



الشكل (21.2) : مجموعة من المهزات في هزاز مستخدم للقيام بالتجربة في المخبر

ويمكننا أن نلخص خطوات العمل كما يلي :

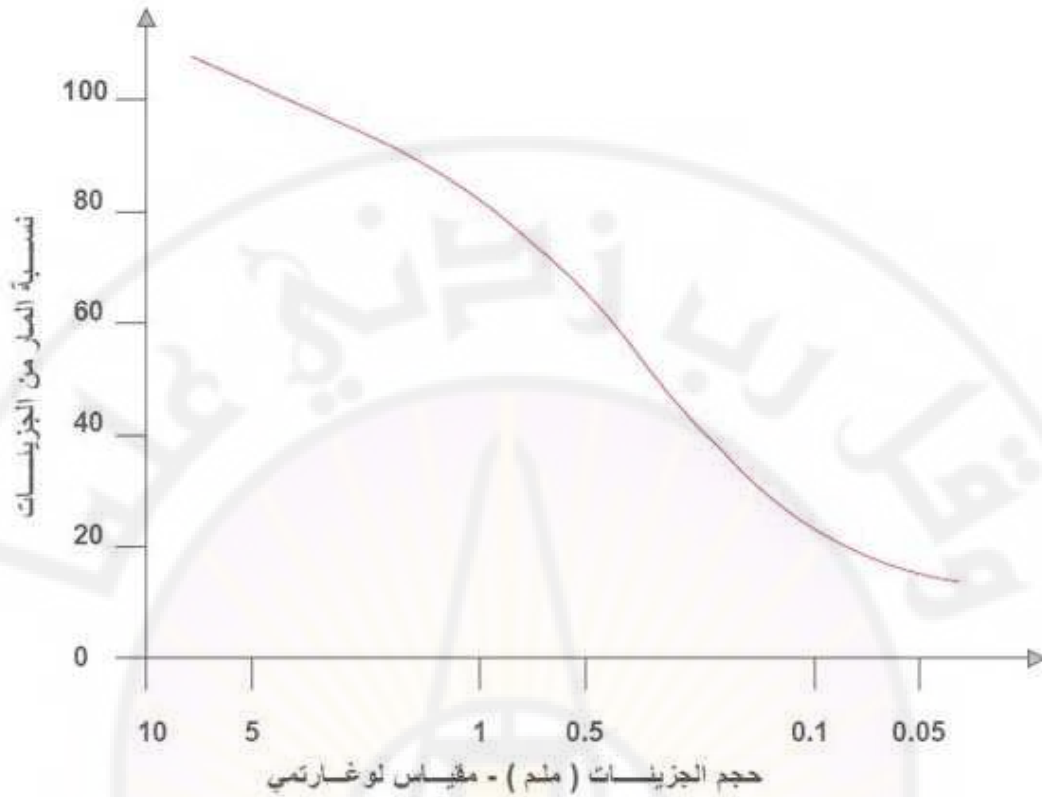
1. نقوم بقياس وزن المحجوز على كل مهزة M_i ، وأيضاً للصينية (M) .
2. يتم حساب الوزن الكلي للمحجوز $M_1 + M_2 + \dots + M_i + M$.
3. حسب المحجوز التراكمي وهو وزن المحجوز على مهزة محددة M_i ومجموع أوزان المحجوز للمهزات التي فوقها $M_1 + M_2 + \dots + M_i$.
4. يتم حسب وزن التربة المارة من المهزة المحددة بطرح الوزن الكلي من المحجوز التراكمي:

$$\sum M - (M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i)$$

5. ثم يتم حساب النسبة المئوية للمار من كل مهزة (نسبة المار):

$$F = \frac{\sum M - (M_1 + M_2 + \dots + M_i)}{\sum M} \times 100$$

وبعد أن نقوم بحساب نسبة المار لكل مهزة (الخطوة الخامسة)، نقوم برسم الناتج على ورق نصف لوغاريتمي (الشكل 22.2) حيث نسبة المار (مقياس حسابي) على المحور الشاقولي وأقطار فتحات المهزات على المحور الأفقي (مقياس لوغاريتمي) . هذا المخطط يسمى بمحني التحليل الحبي لحبيبات التربة والناتج من طريقة التحليل الحبي المنخلي.



الشكل (22.2): منحنى التحليل الحبي

2.5.2 التحليل الحبي للتربة بطريقة تحليل الهيدروميتر

الطريقة الثانية لتحديد حجم حبيبات التربة هي التحليل الهيدروميتر. هذه الطريقة مبنية على مبادئ سرعة الترسيب لحبيبات التربة في الماء. عند وضع التربة الناعمة بالماء تنتشت عينة التربة، وتبدأ الذرات بالترسب. تترسب حبيبات التربة بسرعات مختلفة بناءً على شكلها، حجمها، وزنها ولزوجة الماء. وللتبسيط يمكن افتراض أن شكل حبيبات التربة كروي وعندها فإن السرعة التي تتسرب فيها جزيئات التربة نعبر عنها بقانون ستوكس:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (1.2)$$

حيث :

v : السرعة .

ρ_s : كثافة حبيبات التربة .

ρ_w : كثافة الماء .

η : لزوجة الماء .

$\square$: قطر حبيبات التربة .

وبالتالي من المعادلة السابقة نستطيع أن نكتب:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta v}{\rho_s - \rho_w}} = \sqrt{\frac{18\eta}{\rho_s - \rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2.2) \square$$

حيث :

$$v = \frac{\text{Distance}}{\text{Time}} = \frac{L}{t} \square$$

ومن جهة ثانية، لدينا :

$$\rho_s = G_s \cdot \rho_w \quad (3.2) \square$$

ومن المعادلتين (2.2) و (2.3) نجد :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.2) \square$$

$$\frac{D(mm)}{10} = \sqrt{\frac{18\eta[(g \cdot \text{sec}/\text{cm}^2)]}{(G_s - 1)\rho_w(g/\text{cm}^3)}} \sqrt{\frac{L(\text{cm})}{t(\text{min}) \times 60}} \square$$

$$D = \sqrt{\frac{30 \cdot \eta}{(G_s - 1)\rho_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}} \square$$

وباعتبار $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$:

$$D (mm) = K \sqrt{\frac{L(mm)}{t(\text{min})}} \quad (5.2) \square$$

$$K = \sqrt{\frac{30\eta}{G_s - 1}} \quad (6.2)$$

مع العلم أن : $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$

لاحظ أن قيمة K هي تابعة لتغيرات قيم الوزن النوعي للتربة ρ_s ولزوج الماء η والذي يعتمد على درجة حرارة التجربة. الجدول 6.2 يعطي قيم تغيير K مع تغير درجات الحرارة للتجربة والوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة للتربة.

في المختبر، يتم إجراء تجربة الهيدروميتر في اسطوانة ترسيب، من خلال وضع ρ_s من التربة الجافة وأحياناً ρ_w . ارتفاع اسطوانة الترسيب ρ_s وقطرها ρ_w . الاسطوانة مدرجة حتى حجم ρ_s . يضاف هيكساميثا سولفات الصوديوم عادة كعامل تشتت. يتم زيادة حجم التربة المشتتة حتى ρ_s عن طريق زيادة الماء المقطر. الشكل 23.2 يظهر هيدروميتر حسب نظام ρ_s .

عندما يتم وضع الهيدروميتر ضمن عينة معلق التربة عند زمن معين t ، مقاس من لحظة بدء عملية الترسيب فإنه يعطي الوزن النوعي بجوار الانتفاخ عند العمق h (الشكل 24.2). الوزن النوعي هو عبارة عن تابع لكمية جزيئات التربة الموجودة ضمن واحدة الحجم للمعلق عند ذلك العمق، وأيضاً عند الزمن t فإن جزيئات التربة ضمن المعلق عند العمق h سوف يكون لها قطر أقل من d كما تم حسابه في المعادلة (5.2) الجزيئات الأكبر سوف تترسب على مسافة بعيدة عن منطقة القياسات.

تصمم الهيدروميترات لتعطي كمية التربة مقدرة بالغرام والتي لا تزال بالمعلق، حيث يتم معايرتها حتى قيم وزن نوعي للتربة ρ_s . أما من أجل الترب ذات وزن نوعي مختلف فيجب الضرب بمعامل تصحيح عن طريق معرفة المتغيرات التالية : كمية التربة في المعلق، ρ_s و ρ_w .

يمكن حساب نسبة التربة عن طريق وزن النواعم بدلاً من معرفة القطر. لاحظ أن ρ_s هي المسافة المقاسة من سطح الماء وحتى مركز ثقل انتفاخ الهيدروميتر والتي تقاس عندها كثافة المعلق. قيمة K يمكن أن تتغير بناءً على الزمن t .

الفصل الثاني منشأ التربة وحجم الحبيبات أ.د.م. إبراهيم حمود

يعد تحليل الهيدروميتر فعال من أجل فصل حبيبات التربة حتى حجم $0.075 \mu m$. قيمة ϕ من أجل هيدروميتر حسب المواصفة $ASTM D 422$ يمكن إعطائه حسب المعادلة التالية (انظر الشكل 24.2).

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_2 - \frac{V_B}{A} \right) \quad (7.2)$$

حيث :

L : المسافة على طول ساق الهيدروميتر من أعلى الانتقال وحتى علامة قراءة الهيدروميتر ϕ .

L_1 : طول انتقال الهيدروميتر ϕ

V_B : حجم انتقال الهيدروميتر ϕ

A : مساحة المقطع العرضي لاسطوانة الترسيب ϕ

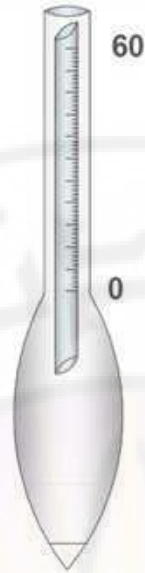
حيث قيمة ϕ هي 0.075 من أجل قراءة 0.075 و 0.0075 من أجل قراءة 0.0075 لذلك من أجل أي قراءة ϕ :

$$L_1 = 10.5 - \frac{(10.5 - 2.3)}{50} R = 10.5 - 0.164R \text{ (cm)} \quad (8.2)$$

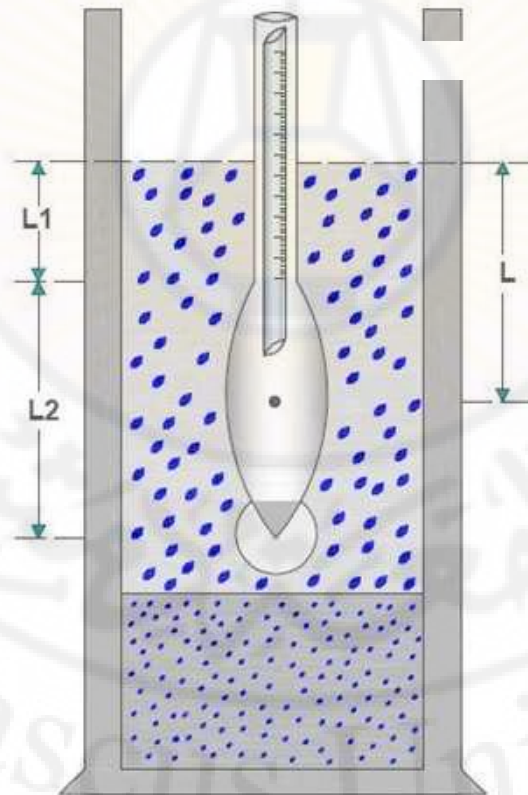
حيث R = قراءة الهيدروميتر المصححة من السطح الهلالي .

وبناءً على المعادلة (8.2)، فإن تغيير طول L مع قراءة الهيدروميتر ϕ تعطى بالجدول 7.2 .

□



الشكل 2-23 : ASTM 152H hydrometer



الشكل 2-24 : تحديد قيمة L في تجربة الهيدرومتر

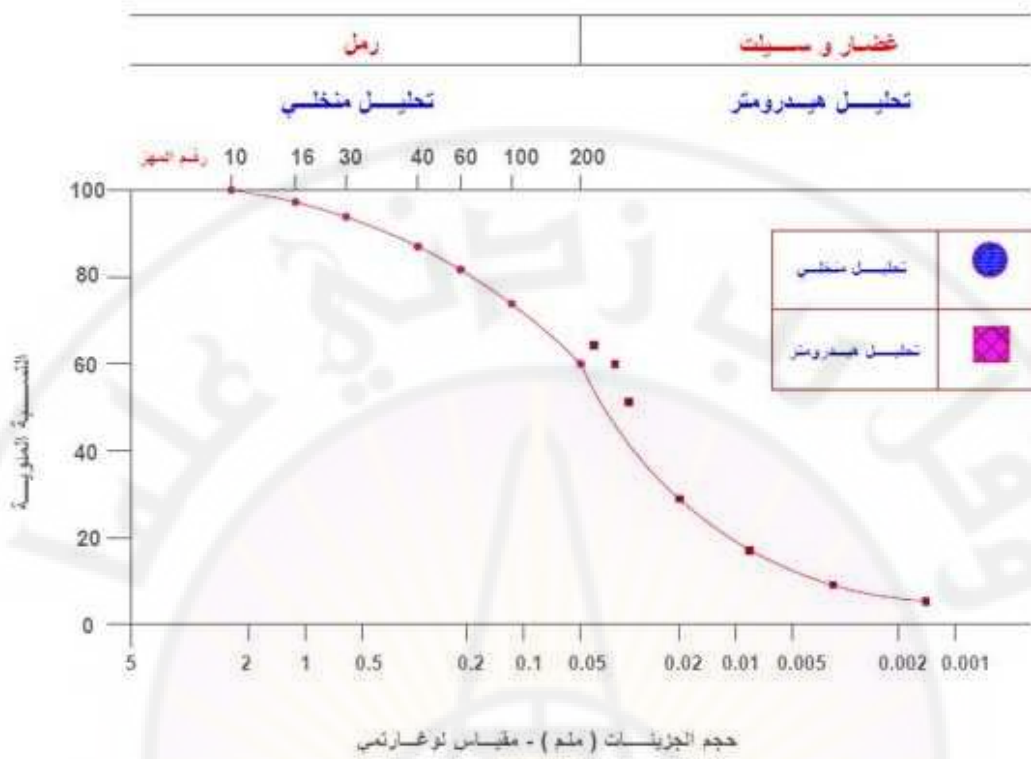
الجدول (7.2) : تغيرات المسافة L في تجربة الهيدرومتر حسب نظام ASTM

Hydrometer reading, R	L (cm)	Hydrometer reading, R	L (cm)
0	16.3	31	11.2
1	16.1	32	11.1
2	16.0	33	10.9
3	15.8	34	10.7
4	15.6	35	10.6
5	15.5	36	10.4
6	15.3	37	10.2
7	15.2	38	10.1
8	15.0	39	9.9
9	14.8	40	9.7
10	14.7	41	9.6
11	14.5	42	9.4
12	14.3	43	9.2
13	14.2	44	9.1
14	14.0	45	8.9
15	13.8	46	8.8
16	13.7	47	8.6
17	13.5	48	8.4
18	13.3	49	8.3
19	13.2	50	8.1
20	13.0	51	7.9
21	12.9	52	7.8
22	12.7	53	7.6
23	12.5	54	7.4
24	12.4	55	7.3
25	12.2	56	7.1
26	12.0	57	7.0
27	11.9	58	6.8
28	11.7	59	6.6
29	11.5	60	6.5
30	11.4		

1

[illegible]

1



الشكل (25.2): منحنى التحليل الحبي للتربة ناتج من : التحليل المنخلي - تحليل الهيدرومتر

في العديد من الحالات، يمكن دمج نتائج التحليل الحبي بطريقة التحليل الهيدروميتري والتحليل الحبي بطريقة التحليل المنخلي ضمن مخطط واحد كما في الشكل (25.2) وعند دمج هذه النتائج تظهر عدم استمرارية حيث يتراكب كلا المنحنيين. هذا التراكب في المنحني يكون نتيجة أن حبيبات التربة غير منتظمة الشكل.

يجب أن نفهم أن استخدام التحليل الحبي بطريقة التحليل المنخلي يعطي الأبعاد الوسطية للجزيئات أما استخدام التحليل الحبي بطريقة تحليل الهيدرومتر يعطي القطر المكافئ لكرة ممكن أن تترسب بنفس سرعة ترسب جزيئة التربة.

□

6.2 منحنى التحليل الحبي

يمكن استخدام منحنى التحليل الحبي للتربة لإيجاد أربعة متغيرات لتربة معينة (الشكل 26.2) وهي:

1. **القطر الفعال (D_{10})** : هو قطر الحبيبات في منحنى التحليل الحبي الموافق لنسبة مار

□□□. القطر الفعال للتربة الحبيبية هو مقياس جيد لتقدير الخواص الهيدروليكية

والتصريف خلال التربة. □

2. **معامل التجانس (C_u)** : هو معامل معرف كالتالي □:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (9.2) \square$$

حيث □□ = القطر الموافق لنسبة مار □□□.

3. **معامل التدرج (C_z)** : هو معامل معرف كالتالي □:

$$C_z = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (10.2) \square$$

4. **معامل الفرز (S_0)** : هو عبارة عن معامل آخر للتعبير عن التجانس وهو عموماً يتم

استخدامه في الأعمال الجيولوجية وهو معرف كالتالي □:

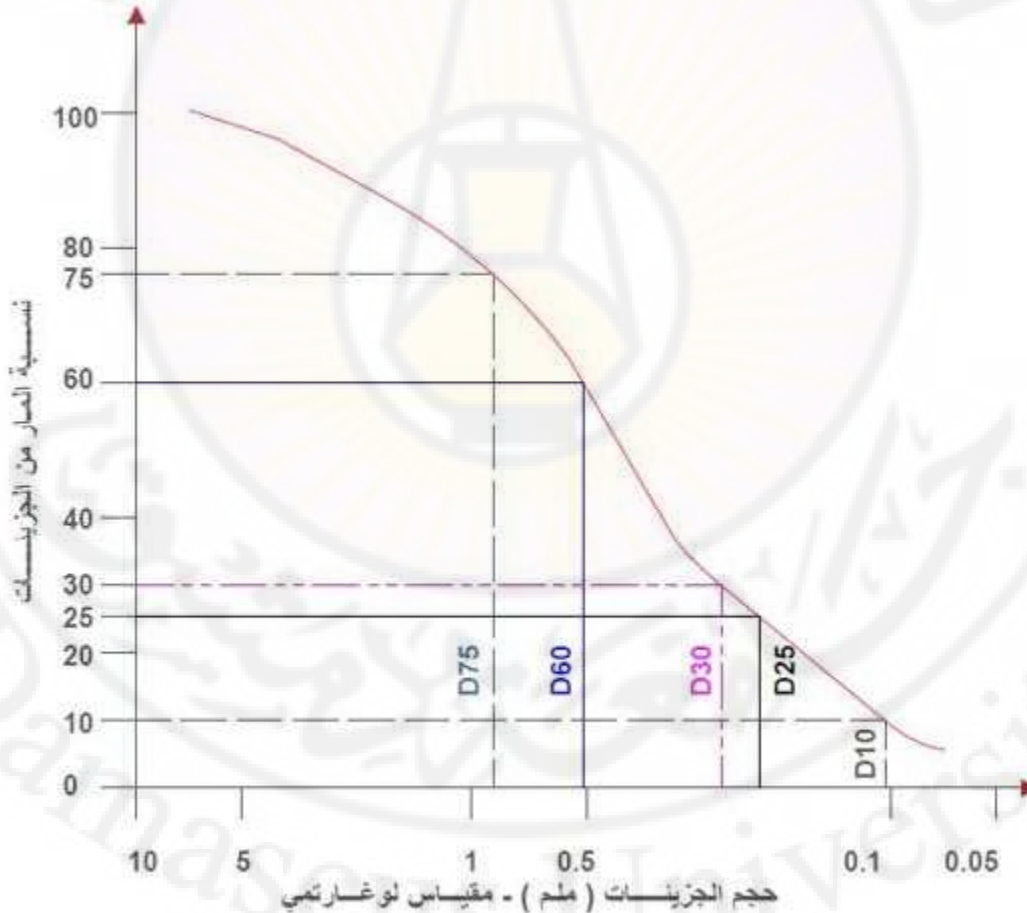
$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \quad (11.2) \square$$

حيث معامل الفرز لا يتم استخدامه عادة من قبل مهندسي الجيوتكنيك.

نسب البحص، الرمل، السلت، والغضار، نجدها من خلال أقطار الحبيبات التي نحصل عليها من منحنى التحليل الحبي. وكمثال على ذلك سوف نستخدم منحنى التحليل الحبي كما في الشكل (25.2) لتحديد أقطار حبيبات البحص، الرمل، السلت والغضار كالتالي (بناءً على نظام التصنيف العالمي الموحد - انظر الجدول 3.2).

□

التسمية	نسبة المار (%)	قطر المهزة (mm)
	100	76.2
بحص		0.075 - 4.75
	100	4.75
رمل		0.075 - 4.75
	62	0.075
سيلت وغضار		0.075 - 0.0075
	0	-



الشكل (26.2) : تحديد النسب D_{75} , D_{60} , D_{30} , D_{25} , D_{10}

منحني التحليل الحبي لا يظهر فقط مجال أقطار الحبيبات الموجودة في التربة ولكن يظهر أيضاً نوع التوزيع لحبيبات التربة. وهذه الأنواع موضحة في الشكل (27.2).

المنحني I : يظهر نوع من التربة التي حبيباتها ذات قطر واحد تقريباً وهذا ما يسمى بتربة فقيرة التدرج الحبي.

المنحني II : يظهر التربة التي تتوزع حبيباتها على مجال واسع وتسمى بجيدة التدرج الحبي حيث لها معامل تجانس أكبر من 4 للبحص و 6 للرمل ومعامل تدرج بين 1 و 3 (للبحص والرمل). قد تحوي التربة مزيج من اثنين أو أكثر من الجزيئات المتجانسة.

المنحني III : يظهر تربة معينة وتسمى الترب ذات الفجوة في التدرج.



الشكل (27.2): مختلف منحنيات التحليل الحبي للترب

- المنحني I يظهر نوع من التربة تسمى بتربة فقيرة التدرج الحبي.
- المنحني II يظهر التربة التي تسمى بجيدة التدرج الحبي.
- المنحني III يظهر تربة تسمى الترب ذات الفجوة في التدرج.

مثال 1.2:

أظهرت نتائج تجربة التحليل الحبي للتربة بطريقة التحليل المنخلي النتائج التالية :

رقم المهزة (□ □)	كتلة التربة المحجوزة على المهزة (□)
4	0
10	40
20	60
40	89
60	140
80	122
100	210
200	56
الصينية	12

قم بالحسابات اللازمة وارسم منحنى التحليل الحبي الناتج ؟

□

الحل :

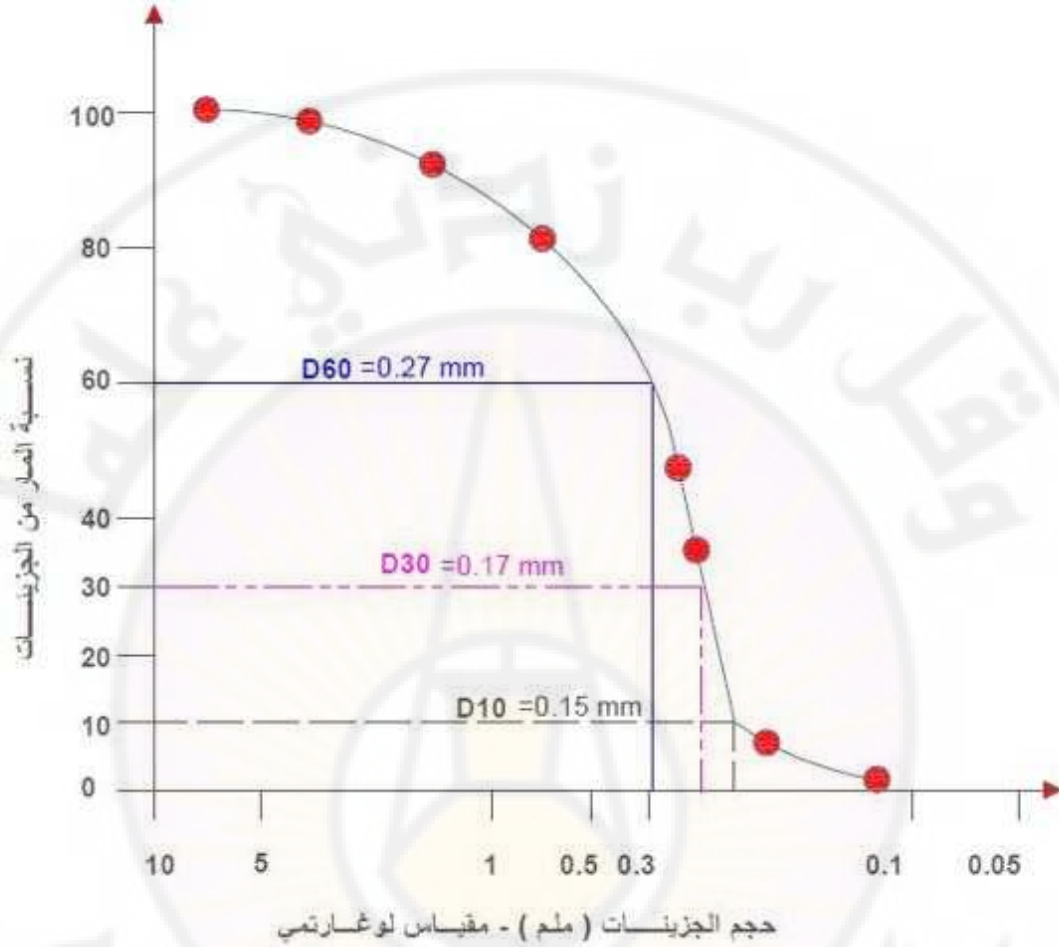
باتباع الخطوات السابقة يمكن تنظيم الجدول التالي :

1	2	3	4	5
رقم المهزة	قطر المهزة (mm)	كتلة التربة المحجوزة على المهزة (g)	المجموع التراكمي لكتلة التربة المحجوزة على المهزات (g)	نسبة المار من المهزة
4	4.75	0	0	100
10	2.00	40	40 = 0+40	94.5
20	0.850	60	100 = 60+40	86.3
40	0.425	89	189 = 89 + 100	74.1
60	0.250	140	329 = 140 + 189	54.9
80	0.180	122	451 = 122 + 329	38.1
100	0.150	210	661 = 210 + 451	9.1
200	0.075	56	717 = 56+ 661	1.7
الصينية	-	12	729 = 12 + 717	0

$$\text{العمود رقم 5} = \frac{\sum M - \text{(4) العمود}}{\sum M} \times 100 = \frac{729 - \text{(4) العمود}}{729} \times 100$$

□

ثم نقوم برسم منحنى التحليل الحبي حسب الجدول السابق :



الشكل (28.2): نتائج منحنى التحليل الحبي للتربة المختبرة وتحديد الأقطار D_{60} , D_{30} , D_{10}

□

مثال 2.2 :

من أجل منحني التحليل الحبي المبين بالشكل (28.2)، أحسب :

- σ_{av} ، σ_{v} ، σ_{h}
- معامل التجانس σ_{v}
- معامل التدرج σ_{h}

الحل :

من الشكل -28.2- نلاحظ أن :

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{av}} &= \frac{D_{60} + D_{30} + D_{10}}{3} \\ \sigma_{\text{v}} &= \frac{D_{60} + D_{30}}{2} \\ \sigma_{\text{h}} &= \frac{D_{60} - D_{10}}{D_{30} - D_{10}} \end{aligned}$$

وبالتالي حسب القوانين السابقة، يكون لدينا :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.27}{0.15} = 1.8$$

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0.17)^2}{(0.27)(0.15)} = 0.71$$

□

مثال 3.2 :

لمنحني التحليل الحبي المبين بالشكل (28.2) حدد نسبة كل من البحص والرمل والسلت والغضار باستخدام تصنيف ؟

الحل :

من منحني التحليل الحبي يمكن استنتاج التالي وذلك حسب الجدول 28.2 :

النسبة المارة	قطر الحبيبات ()
100	76.2
$100 - 100 = 0.0 \% \text{ حصى}$	
100	4.75
$100 - 1.7 = 98.3 \% \text{ رمل}$	
1.7	0.075
$1.7 - 0.0 = 1.7 \% \text{ سيلت وغضار}$	
0	-

□

7.2 شكل الحبيبات

يعد شكل الحبيبات في كتلة التربة بذات أهمية أقطارها لأن لها تأثير كبير على لخواص الفيزيائية لتربة معطاة. ولكن ليس هناك اهتمام كبير بشكل الجزيئات لأنه من الصعب قياسها. يمكن تقسيم شكل حبيبات التربة إلى ثلاث مجموعات رئيسية :

1. كتلية.

2. رقائقية.

3. إبرية.

الحبات تتشكل عادة نتيجة عوامل الحت على الصخور والفلزات. يستخدم الجيولوجيون مصطلحات مثل زاوي، شبه زاوي، شبه مدور، مدور لشرح أشكال الحبات. تظهر هذه الأشكال ضمن الشكل (29.2).

جزيئات الرمل الصغيرة المتوضعة بالقرب من منشأها تكون عادة زاوية. تحمل جزيئات الرمل بفعل الرياح والماء لمسافات كبيرة لتصبح شبه زاوية أو مدورة. إن شكل الحبيبات في كتلة التربة له تأثير كبير على الخواص الفيزيائية مثل معامل المسامية الأعظمي والأصغري، متغيرات مقاومة القص، الانضغاطية، إلخ.....

الزاوية يمكن تعريفها بالعلاقة :

$$A = \frac{\text{نصف القطر الوسطي للزوايا و الحواف}}{\text{نصف قطر الكرة}}$$

كروية الأجزاء الصلبة يمكن تعريفها كالتالي :

$$S = \frac{D_e}{L_p} \quad (13.2)$$

حيث :

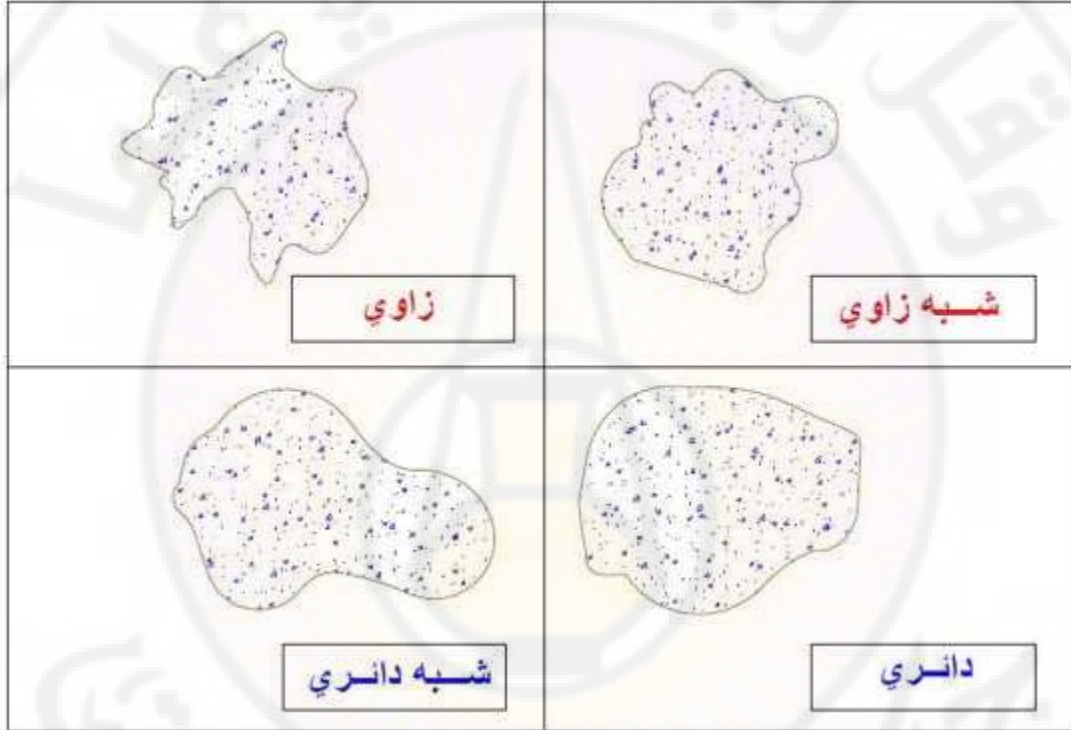
□ : القطر المكافئ للجزيئة.

□ : حجم الحبيبات.

□: طول الجزيئات.

أما القطر المكافئ فيعطى بالعلاقة :

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$



الشكل (29.2): أشكال الجزيئات : زاوي، شبه زاوي، شبه مدور، مدور

الجزيئات الرقائقية لها كروية منخفضة جداً عادة □□□ أو أقل، هذه الجزيئات عادة هي فلزات الغضار.

الجزيئات إبرية الشكل هي أقل شيوعاً مقارنة مع النوعين السابقين.

أمثلة على ترب تحوي جزيئات إبرية الشكل هي بعض رواسب □□□□ وغضار □□□□□□.

□

8.2 ملخص

في هذا الفصل تم مناقشة دورة تشكل الصخور، منشأ التربة نتيجة الحت، التحليل الحبي للجزئيات في كتلة التربة، شكل الحبيبات وفلزات الغضار. بعض النقاط الهامة هي :

1. يمكن تصنيف الصخور إلى ثلاث مجموعات رئيسية : (1) اندفاعية، (2) رسوبية، (3) متحولة. □
2. تتشكل الترب نتيجة عوامل الحت الكيميائية والميكانيكية على الصخور. □
3. بناءً على حجم حبيبات التربة يمكن تصنيف التربة إلى بحص، رمل، سلت، غضار. □
4. الغضار عادة له شكل صفائح ميكروسوبية وتحت ميكروسكوبية من جزئيات الميكا. فلزات الغضار وفلزات أخرى. □
5. فلزات الغضار هي عبارة عن مركبات سليكات الألومنيوم التي تعطي اللدونة عندما يتم مزجها مع نسبة معينة من الماء. □
6. التحليل الحبي للتربة هي عملية يتم فيها تحديد توزع أقطار الحبيبات المتواجدة ضمن كتلة التربة. □
7. التحليل الحبي بطريقة التحليل المنخلي والتحليل الحبي بطريقة الهيدروميتر هما تجربتان تستخدمان لرسم منحي التحليل الحبي للتربة. □

2.9 الأمثلة غير المحلولة

1. من أجل تربة معينة، افترض أن:

و σ_{max} و σ_{min} و σ_{avg}

احسب معامل التجانس ومعامل التدرج .

2. أعد المسألة 1 مع فرض: σ_{max} و σ_{min} و σ_{avg}

3. أعد المسألة 1 مع فرض: σ_{max} و σ_{min} و σ_{avg}

4. التالي هو نتائج التحليل الحبي بطريقة التحليل منخلي:

رقم المهزة	كتلة التربة المحجوزة (g)
4	0
10	18.5
20	53.2
40	90.5
60	81.8
100	92.2
الصينية	26.5

والمطلوب:

1. حدد نسبة المار لكل منخل وارسم منحنى التحليل الحبي.

2. حدد σ_{max} ، σ_{min} ، σ_{avg} من منحنى التحليل الحبي.

3. احسب معامل التجانس σ_{max} .

4. احسب معامل التدرج σ_{max} .

5. أعد المسألة 4 ولكن استخدم النتائج التالية:

□

رقم المهزة □ □	كتلة التربة المحجوزة (□ □)
4	0
10	44
20	56
40	82
60	51
80	106
100	92
200	85
الصينية	35

6. أعد المسألة 4 ولكن استخدم النتائج التالية: □

رقم المهزة □ □	كتلة التربة المحجوزة (□ □)
4	0
10	41.2
20	55.1
40	80.0
60	91.6
100	60.5
200	35.6
الصينية	21.5

7. أعد حل المسألة 4 ولكن باستخدام النتائج التالية :

رقم المهزة	كتلة التربة المحجوزة ()
4	0
6	0
10	0
20	9.1
40	249.4
60	179.8
100	22.7
200	15.5
الصينية	23.5

8. التالي هو نتائج للتحليل الحبي للتربة بواسطة بطريقة التحليل المنخلي وطريقة تحليل هيدروميتر.

والمطلوب:

التحليل	رقم المهزة	نسبة المار %
المهزات	40	100
	80	97
	170	82
	200	90
الهيدروميتر	0.075 مم	74
	0.075 مم	42
	0.075 مم	27
	0.075 مم	17
	0.075 مم	11

١. ارسم منحني التحليل الحبي .
٢. حدد نسبة البحص، الرمل، السلت، الغضار وفقاً لنظام .
٣. أعد الطلب وفقاً لنظام .
٤. أعد الطلب وفقاً لنظام .
9. من أجل أقطار الحبيبات للتربة المعطاة في الجدول . ارسم منحني التحليل الحبي .

نسبة المار %	قطر المهزة ()
100	0.425
90	0.033
80	0.018
70	0.01
60	0.0062
50	0.0035
40	0.0018
35	0.001

ثم حدد نسبة البحص، الرمل، السلت، الغضار :

١. وفقاً لنظام .
٢. وفقاً لنظام .
10. أعد المسألة 9.2 مع أخذ المعطيات التالية :

نسبة المار %	قطر المهزة ()
100	0.425
92	0.1
84	0.052
62	0.02
46	0.01
32	0.004
22	0.001

11. في تجربة التحليل الحبي للتربة بطريقة تحليل الهيدروميتر كانت النتائج كالتالي :
 ودرجة حرارة الماء = 24 ° و 60 دقيقة بعد بداية الترسيب (انظر الشكل 24.2).

ما هو القطر الأصغر للحبيبات التي ترسبت بعد منطقة القياس عند ذلك الوقت (والذي هو 60 دقيقة) ؟

12. أعد المسألة 11 مع أخذ المعطيات التالية :
 ودرجة حرارة الماء = 23 ° و 60 دقيقة و 60 دقيقة .

□

10.2 المراجع

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007).
2. ASTM Book of Standards, Sec. 4, Vol. 04.08, West Conshohocken, Pa. BOWEN, N. L. (1922). "The Reaction Principles in Petrogenesis," Journal of Geology, Vol. 30, 177-198.
3. GRIM, R. E. (1953). Clay Mineralogy, McGraw-Hill, New York.
4. GRIM, R. E. (1959). "Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 85, No. SM2, 1-17.
5. LAMBE, T. W. (1958). "The Structure of Compacted Clay," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, 1655-1 to 1655-35.
6. YONG, R. N., and WARKENTIN, B. P. (1966). Introduction of Soil Behavior, Macmillan, New York.

3

الفصل الثالث: علاقات الوزن - الحجم

ناقش الفصل الثاني العمليات الجيولوجية التي أدت إلى تكوين التربة، كذلك تمّ توصيف حدود أبعاد وحجم الحبيبات والتحليل الميكانيكي للتربة. وعلمنا أن التربة بشكلها الطبيعي مكونة من ثلاثة أطوار وهي الطور الصلب للتربة، الماء والهواء. هذا الفصل يناقش علاقات الوزن مع الحجم لمكونات التربة.

1.3 علاقات الوزن - الحجم

الشكل (1.3 a) يبين لنا عنصر من التربة ذو حجم V ووزن W كما هو بحالته الطبيعية. ولإنشاء علاقات الوزن مع الحجم، سوف نفصل الأطوار الثلاثة (ألا وهي الأجزاء الصلبة، الماء والهواء) كما في الشكل (1.3 b). استناداً لذلك، فإن الحجم الكلي لتربة معطاة يمكن أن نعبر عنه من خلال:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \quad (1.3) \square$$

حيث:

V_s : حجم الأجزاء الصلبة.

V_v : حجم الفراغات.

V_w : حجم الماء في الفراغات.

V_a : حجم الهواء في الفراغات.

وبفرض أننا أهملنا وزن الهواء، بهذه الحالة فإن الوزن الكلي لعنصر التربة يمكن إعطائه كالتالي:

$$W = W_s + W_w \quad (2.3) \square$$

حيث:

W_s : وزن الأجزاء الصلبة.

W_w : وزن الماء.

إن علاقات الحجم تستخدم عادة للأطوار الثلاثة لعنصر التربة وهي: معامل المسامية، المسامية ودرجة الإشباع.

معامل مسامية التربة (e)، يعرف بأنه نسبة حجم الفراغات التي تحتويها التربة إلى حجم الأجزاء الصلبة فيها، وذلك وفق العلاقة التالية:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.3) \square$$

مسامية التربة (n)، تعرف بأنها نسبة حجم الفراغات التي تحتويها التربة إلى الحجم الكلي لها أي:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (4.3) \square$$

أما درجة الإشباع للتربة (S)، تعرف بأنها نسبة حجم الماء في التربة إلى حجم الفراغات التي تحتويها وفقاً للعلاقة التالية:

$$S = \frac{V_w}{V_v} (\%) \quad (5.3) \square$$

ويعبر عنها عادة كنسبة مئوية.



الشكل (1.3): (a) عنصر تربة بالحالة الطبيعية، (b) الأطوار الثلاثة لعنصر التربة

العلاقات ما بين معامل المسامية والمسامية يمكن التعبير عنها بالمعادلة (1.3)، (3.3)، (4.3) والتي يمكن أن نستنتج منهم العلاقة التي تربط ما بينهم كما هو مبين بالعلاقة:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V}\right)}{1 - \left(\frac{V_v}{V}\right)} = \frac{n}{1 - n} \quad (6.3) \square$$

ومن خلال المعادلة (6.3) نستطيع أن نستنتج أن مسامية التربة تعطى بالعلاقة:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (7.3) \square$$

عملياً نستطيع استخدام متغيرات الوزن في تحديد محتوى الرطوبة والوزن الحجمي للتربة.

إن محتوى الرطوبة للتربة (w) يعرف بأنه محتوى الماء في التربة ويحدد رياضياً من خلال النسبة ما بين وزن الماء إلى وزن الأجزاء الصلبة ضمن حجم تربة معطى كما هو مبين بالعلاقة:

$$w = \frac{W_w}{W_s} (\%) \quad (8.3) \square$$

أما الوزن الحجمي (γ) فيعرف بأنه وزن واحدة الحجم في التربة ونعبر عنه بالعلاقة:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (9.3) \square$$

ويمكننا التعبير أيضاً عن الوزن الحجمي بدلالة وزن الأجزاء الصلبة، محتوى الرطوبة والحجم الكلي. فمن خلال المعادلات: (2.3)، (8.3)، (9.3) يمكننا كتابة:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s \left[1 + \left(\frac{W_w}{W_s}\right)\right]}{V} = \frac{W_s(1 + w)}{V} \quad (10.3) \square$$

مهندسو التربة أحياناً يعرفون الوزن الحجمي المعبر عنه في المعادلة (9.3) بالوزن الحجمي الرطب.

غالباً ولحل المسائل المتعلقة بالتربة لا بد من معرفة وزن واحدة الحجم للتربة من دون الماء ويعرف هذا الوزن بالوزن الحجمي الجاف للتربة γ_d ولذلك نعبر عنه رياضياً من خلال العلاقة:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (11.3) \square$$

من المعادلة (10.3) و(11.3) يمكننا أن نربط الوزن الحجمي والوزن الحجمي الجاف ومحتوى الرطوبة للتربة من خلال العلاقة:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (12.3) \square$$

يعبر عن الوزن الحجمي بالوحدات الإنكليزية (وهو نظام قياس gravitational) بالباوند لكل قدم مكعب (lb/ft^3). وفي الوحدات الدولية SI الواحدة المستخدمة هي كيلو نيوتن لكل متر مكعب (kN/m^3) ولأن النيوتن وحدة مشتقة ممكن استخدام الكثافات (ρ) للتربة. الواحدة الدولية للكثافة هي كيلوغرام لكل متر مكعب (Kg/m^3). ويمكننا كتابة معادلات الكثافة (بشكل مشابه للمعادلات (9.3)، (11.3) كالتالي:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (13.3) \square$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (14.3) \square$$

حيث:

ρ : كثافة التربة (kg/m^3).

ρ_d : الكثافة الجافة للتربة (kg/m^3).

M : الكتلة الكلية لعينة التربة (kg).

واحدة الحجم الكلي V هي (m^3).

والوزن الحجمي بالوحدة (kN/m^3) يمكن إيجادها من الكثافات بالوحدة kg/m^3 كالتالي:

$$\gamma(\text{KN/m}^3) = \frac{g \cdot \rho(\text{Kg/m}^3)}{1000} \square$$

و

$$\gamma_d(\text{KN/m}^3) = \frac{g \cdot \rho_d(\text{Kg/m}^3)}{1000} \square$$

حيث $g = \text{تسارع الجاذبية الأرضية} = 9.81 \text{ m/sec}^2$.

لاحظ أن الوزن الحجمي للماء (γ_w) مساوي للقيمة 9.81 kN/m^3 أو 62.4 lb/ft^3 أو 1000 kgf/m^3 .

2.3 العلاقات بدلالة الوزن الحجمي، معامل المسامية، محتوى الرطوبة،

والوزن النوعي النسبي

للحصول على العلاقات بدلالة الوزن الحجمي (أو الكثافة) لقيم معامل المسامية ومحتوى الرطوبة، سوف نعتبر أن حجم الأجزاء الصلبة للتربة مساوٍ للواحد، وكما في الشكل (2.3) إذا كان حجم الأجزاء الصلبة للتربة يساوي الواحد فإن حجم الفراغات فيها يساوي معامل المسامية (من المعادلة 3.3). ضمن هذه الفرضيات فإن وزن الأجزاء الصلبة والماء يمكن إعطائه بالعلاقات التالية:

$$W_s = G_s \cdot \gamma_w$$

$$W_w = w \cdot W_s = w \cdot G_s \cdot \gamma_w$$

حيث:

G_s : الوزن النوعي النسبي للجزيئات الصلبة للتربة.

W : محتوى الرطوبة.

γ_w : الوزن الحجمي للماء.

الآن وباستخدام تعاريف الوزن الحجمي والوزن الحجمي الجاف (المعادلات 9.3 و 11.3) نستطيع كتابة:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s \cdot \gamma_w + w \cdot G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{(1 + w) G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad (15.3)$$

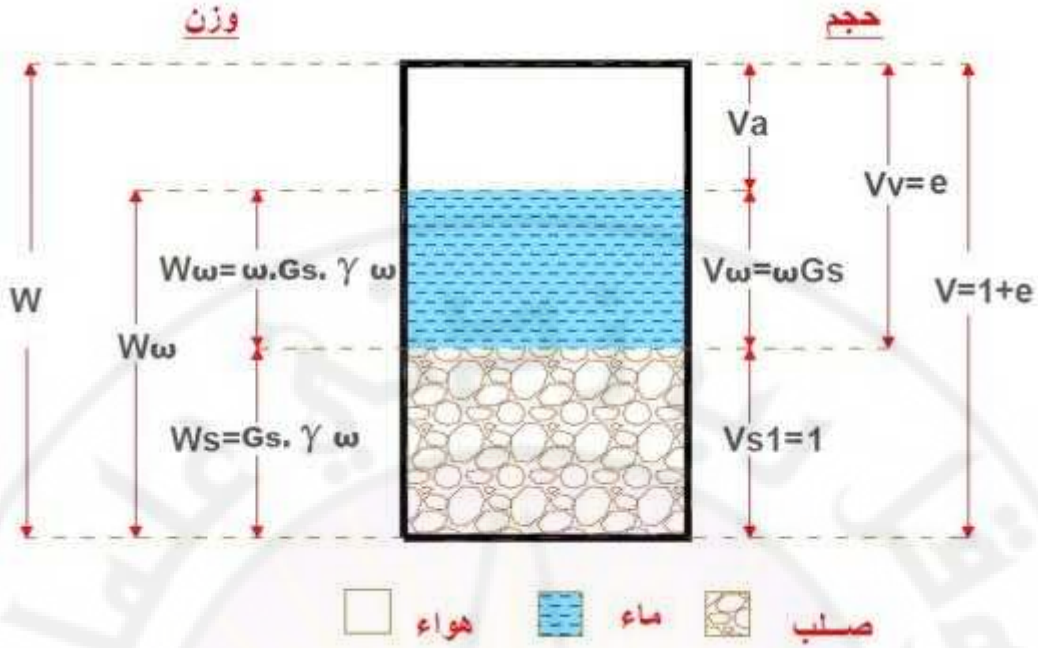
و

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad (16.3)$$

أو

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (17.3)$$

□



الشكل (2.3): ثلاثة أطوار لعنصر التربة، وحجم الأجزاء الصلبة تساوي الواحد

ولأن وزن الماء في عنصر التربة المفترض للدراسة يعبر عنه بالعلاقة $w.G_s.\gamma_w$ فإن الحجم المملوء من قبل الماء في هذا العنصر يعطى بالعلاقة:

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{w.G_s.\gamma_w}{\gamma_w} = w.G_s$$

وعليه، فإن درجة الإشباع في عنصر التربة وبحسب التعريف المستخدم في المعادلة (5.3) نجد أن:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w.G_s}{e}$$

أو من خلال العلاقة التالية:

$$S.e = w.G_s \quad (18.3)$$

هذه المعادلة مفيدة في حل المسائل المتعلقة بعلاقات الأطوال الثلاثة للتربة.

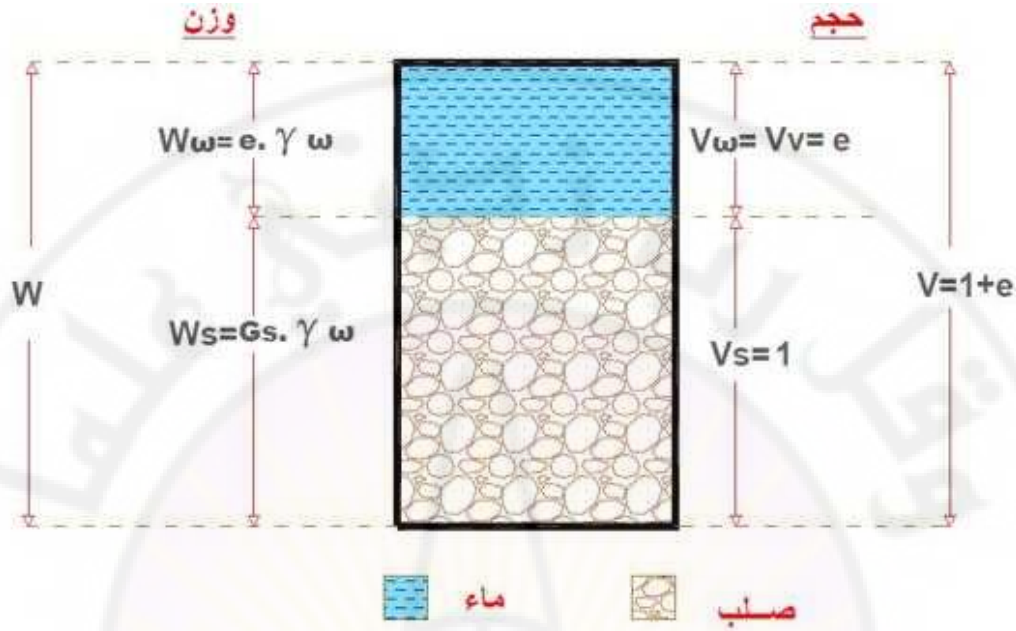
عندما تكون عينة التربة مشبعة، هنا الفراغات سوف تكون مملوءة بالماء (الشكل 3.3)، وبالتالي

فإن العلاقات من أجل الوزن الحجمي المشبع γ_{sat} يمكن إيجادها بطريقة مشابهة كالتالي:

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s.\gamma_w + e.\gamma_w}{1 + e} = \frac{(G_s + e).\gamma_w}{1 + e} \quad (19.3)$$

أيضاً ومن المعادلة (18.3) وبفرض أن $S=1$ نستطيع كتابة:

$$e = w \cdot G_s \quad (20.3)$$



الشكل (3.3): عنصر من التربة مشبع، وحجم الأجزاء الصلبة يساوي الواحد

كما تم ذكره سابقاً ونتيجة لسهولة التعامل مع الكثافات في الوحدات الدولية، فإن المعادلات التالية مشابهة لعلاقات الوزن الحجمي المعطاة في المعادلات (15.3)، (19.3)، (16.3)، وهي:

$$\text{Density (الكثافة)} = \rho = \frac{(1 + w) \cdot G_s \cdot \rho_w}{1 + e} \quad (21.3)$$

$$\text{Dry density (الكثافة الجافة)} = \rho_d = \frac{G_s \cdot \rho_w}{1 + e} \quad (22.3)$$

$$\text{Saturated density (الكثافة المشبعة)} = \rho_{sat} = \frac{(G_s + e) \cdot \rho_w}{1 + e} \quad (23.3)$$

حيث $\rho_w = \text{كثافة الماء} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

المعادلة (21.3) ممكن اشتقاقها من الشكل (4.3) حيث أن حجم الأجزاء الصلبة للتربة يساوي الواحد وحجم الفراغات فيها يساوي e .



الشكل (4.3): الأطوار الثلاثة للتربة، الكتلة والحجم والعلاقة بينهما

لذلك، إذا كان لدينا في التربة المدروسة معلوم لدينا قيمة كتلة الأجزاء الصلبة M_s والمساوية إلى القيمة $G_s \cdot \rho_w$ ، وبحسب تعرف محتوى الرطوبة الوارد في المعادلة (8.3) يمكننا أن نعبر رياضياً عن الرطوبة بالعلاقة التالية:

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\text{كتلة الماء}}{\text{كتلة الأجزاء الصلبة}} = \frac{M_w}{M_s}$$

حيث: M_w = كتلة الماء.

وبما أن كتلة التربة تساوي $G_s \cdot \rho_w$ ، فإن كتلة الماء ضمن التربة تحسب من خلال العلاقة:

$$M_w = w \cdot M_s = w \cdot G_s \cdot \rho_w$$

ومن المعادلة (13.3)، نستطيع حساب الكثافة بالعلاقة:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \cdot \rho_w + w \cdot G_s \cdot \rho_w}{1 + e} = \frac{(1 + w) \cdot G_s \cdot \rho_w}{1 + e}$$

المعادلات (22.3)، (23.3) يمكن استنتاجها بشكل مشابه.

3.3 العلاقات بدلالة الوزن الحجمي، المسامية، محتوى الرطوبة

العلاقات التي نحسب من خلالها قيم المسامية ومحتوى الرطوبة بدلالة الوزن الحجمي، يمكن إيجادها بشكل مشابه كما تم شرحه في الفقرة السابقة. ولهذا سوف نعتبر أن الحجم الكلي للتربة يساوي الواحد وكما يظهر الشكل (5.3) ومن المعادلة (4.3) يمكننا كتابة:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

في حال كان V يساوي الواحد، هذا يعني أن V_v يساوي n وبالتالي فإن $V_s = 1 - n$ ، وعليه فإن وزن الأجزاء الصلبة للتربة (W_s) ووزن الماء ضمنها (W_w) يمكن التعبير عنهما من خلال العلاقات:

$$W_s = G_s \cdot \gamma_w \cdot (1 - n) \quad (24.3)$$

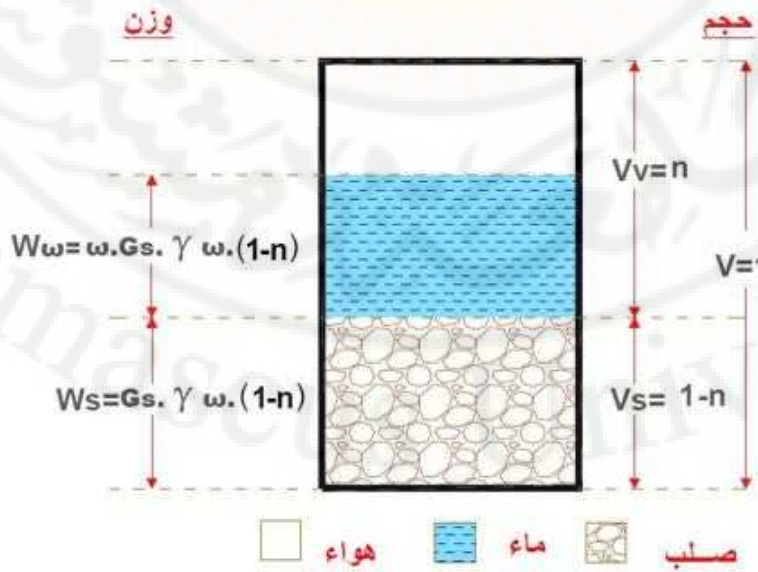
$$W_w = w \cdot W_s = w \cdot G_s \cdot \gamma_w (1 - n) \quad (25.3)$$

وبالتالي فإن الوزن الحجمي الجاف للتربة نستطيع حسابه من خلال:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \cdot \gamma_w \cdot (1 - n)}{1} = G_s \cdot \gamma_w (1 - n) \quad (26.3)$$

أما الوزن الحجمي الرطب للتربة فيعطى بالعلاقة التالية:

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V} = G_s \cdot \gamma_w (1 - n)(1 + w) \quad (27.3)$$



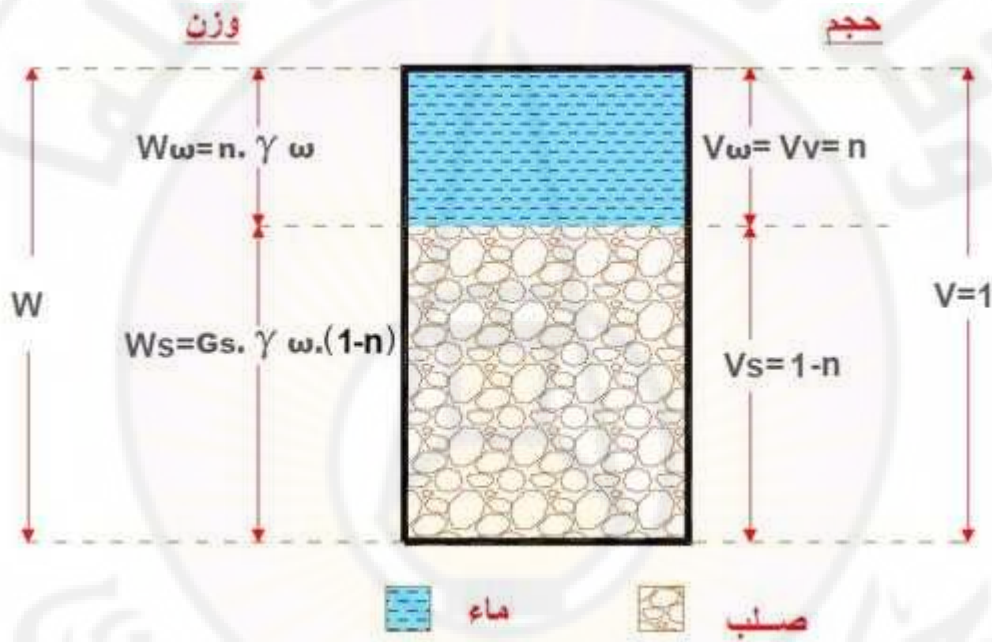
الشكل (5.3): الأطوار الثلاثة للتربة والحجم الكلي يساوي الواحد

في الشكل (6.3) يظهر لنا عينة من تربة مشبعة لها حجم مساوي إلى الواحد : $V=1$ ، بناءً على الشكل، يمكننا القول أن الوزن الحجمي المشبع للتربة يمكن كتابته بالمعادلة:

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{(1-n)G_s \cdot \gamma_w + n \cdot \gamma_w}{1} = [(1-n) \cdot G_s + n] \cdot \gamma_w \quad (28.3) \square$$

أما محتوى الرطوبة لهذه التربة المشبعة يمكن التعبير عنه بالمعادلة التالية:

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{n \cdot \gamma_w}{(1-n) \cdot \gamma_w \cdot G_s} = \frac{n}{(1-n) \cdot G_s} \quad (29.3)$$



الشكل (6.3): عنصر تربة مشبع، والحجم الكلي يساوي الواحد

4.3 علاقات الوزن الحجمي المختلفة

في الفقرة 2.3 و 3.3 تم استنتاج العلاقات الأساسية للوزن الحجمي الرطب، الوزن الحجمي الجاف والوزن الحجمي المشبع للتربة.

العديد من العلاقات الأخرى والتي يمكن استنتاجها من $\gamma, \gamma_d, \gamma_{sat}$ معطاة في الجدول (1.3). بعض القيم الشائعة لمعامل المسامية ومحتوى الرطوبة في حالة الإشباع والوزن الحجمي الجاف لتربة بحالتها الطبيعية معطاة أيضاً في الجدول (2.3).

الجدول (1.3): العلاقات ما بين الخواص الفيزيائية

Moist unit weight (γ)		Dry unit weight (γ_d)		Saturated unit weight (γ_{sat})	
Given	Relationship	Given	Relationship	Given	Relationship
w, G_s, e	$\frac{(1+w)G_s\gamma_w}{1+e}$	γ, w	$\frac{\gamma}{1+w}$	G_s, e	$\frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e}$
S, G_s, e	$\frac{(G_s+Se)\gamma_w}{1+e}$	G_s, e	$\frac{G_s\gamma_w}{1+e}$	G_s, n	$[(1-n)G_s+n]\gamma_w$
w, G_s, S	$\frac{(1+w)G_s\gamma_w}{1+\frac{wG_s}{S}}$	G_s, n	$\frac{G_s\gamma_w(1-n)}{1+\frac{wG_s}{S}}$	G_s, w_{sat}	$\left(\frac{1+w_{sat}}{1+w_{sat}G_s}\right)G_s\gamma_w$
w, G_s, n	$G_s\gamma_w(1-n)(1+w)$	G_s, w, S	$\frac{G_s\gamma_w}{1+\left(\frac{wG_s}{S}\right)}$	e, w_{sat}	$\left(\frac{e}{w_{sat}}\right)\left(\frac{1+w_{sat}}{1+e}\right)\gamma_w$
S, G_s, n	$G_s\gamma_w(1-n)+nS\gamma_w$	e, w, S	$\frac{eS\gamma_w}{(1+e)w}$	n, w_{sat}	$n\left(\frac{1+w_{sat}}{w_{sat}}\right)\gamma_w$
		γ_{sat}, e	$\gamma_{sat}-\frac{e\gamma_w}{1+e}$	γ_d, e	$\gamma_d+\left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$
		γ_{sat}, n	$\gamma_{sat}-n\gamma_w$	γ_d, n	$\gamma_d+n\gamma_w$
		γ_{sat}, G_s	$\frac{(\gamma_{sat}-\gamma_w)G_s}{(G_s-1)}$	γ_d, S	$\left(1-\frac{1}{G_s}\right)\gamma_d+\gamma_w$
				γ_d, w_{sat}	$\gamma_d(1+w_{sat})$

الجدول (2.3): معامل المسامية, الرطوبة الطبيعية, الوزن الحجمي الجاف لبعض الترب بحالتها الطبيعية

الوزن الحجمي الجاف γ_d kN/m ³ lb/ft ³		الرطوبة الطبيعية %	معامل المسامية e	نوعية التربة
92	14.5	30	0.8	رمل مخلل منتظم
115	18	16	0.45	رمل متراس منتظم
102	16	25	0.65	رمل سيلتي مخلل
121	19	15	0.40	رمل سيلتي متراس
108	17	21	0.6	غضار قاسي
93 - 73	14.5 - 11.5	50 - 30	1.40 - 0.9	غضار طري
86	13.5	25	0.9	الرواسب
51 - 38	8 - 6	120 - 90	3.2 - 2.5	الغضار العضوي الطري
134	21	10	0.3	الترب الحتية الجليدية

المثال 1.3:

إذا كان لدينا تربة مشبعة، أثبت أن الوزن الحجمي المشبع لها يساوي إلى القيمة التالية:

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{w}\right) \left(\frac{1+w}{1+e}\right) \cdot \gamma_w$$

الحل :

بحسب الفرض وهو أن التربة مشبعة، أي أن $S = 1$ ومن العلاقات 19.3 و 20.3 نستطيع كتابة:

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad (a)$$

وكذلك:

$$e = w \cdot G_s$$

أو

$$G_s = \frac{e}{w} \quad (b)$$

وبدمج العلاقتين a, b نحصل على:

$$\gamma_{sat} = \frac{\left(\frac{e}{w} + e\right) \cdot \gamma_w}{1 + e} = \left(\frac{e}{w}\right) \left(\frac{1+w}{1+e}\right) \cdot \gamma_w$$

وهو المطلوب.

المثال 2.3:

من أجل عينة تربة رطبة، لدينا المعطيات التالية:

$$V = 1.2 \, m^3$$

$$M = 2350 \, kg$$

$$w = 8.6\%$$

$$G_s = 2.71$$

المطلوب حساب القيم التالية:

(a) الكثافة الرطبة.

(b) الكثافة الجافة.

(c) معامل المسامية.

(d) المسامية.

(e) درجة الإشباع.

(f) حجم الماء ضمن عينة التربة.

الحل:

(a) من العلاقة 13.3 نجد أن:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{2350}{1.2} = 1958.3 \text{ kg/m}^3$$

(b) من العلاقة 14.3 نجد أن:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} = \frac{M}{(1+w)V} = \frac{2350}{\left(1 + \frac{8.6}{100}\right)(1.2)} = 1803.3 \text{ kg/m}^3$$

(c) من العلاقة 22.3 نجد أن:

$$\rho_d = \frac{G_s \cdot \rho_w}{1 + e}$$

$$e = \frac{G_s \cdot \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{(2.71)(1000)}{1803.3} - 1 = 0.503$$

(d) من العلاقة 7.3 نجد أن:

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0.503}{1 + 0.503} = 0.335$$

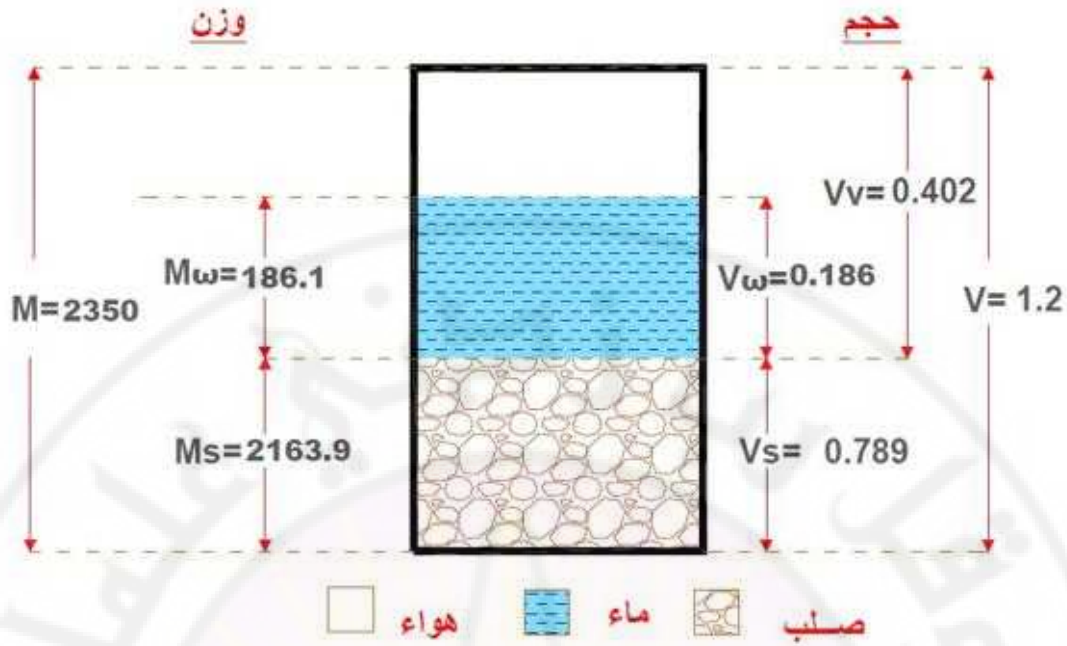
(e) من العلاقة 18.3 نجد أن:

$$S = \frac{w \cdot G_s}{e} = \frac{\left(\frac{8.6}{100}\right)(2.71)}{0.503} = 0.463 = 46.3 \%$$

(f) إن حجم الماء يعطى كما يلي:

$$\frac{M_w}{\rho_w} = \frac{M - M_s}{\rho_w} = \frac{M - \frac{M}{1+w}}{\rho_w} = \frac{2350 - \left(\frac{2350}{1 + \frac{8.6}{100}}\right)}{1000} = 0.186 \text{ m}^3$$

بالتالي يمكننا إيجاد طريقة ثانية للحل من خلال الشكل (7.3):



الشكل (7.3): عنصر يوضح بشكل تفصيلي مكونات التربة

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{2350}{1.2} = 1958.3 \text{ kg/m}^3$$

$$M_s = \frac{M}{1 + w} = \frac{2350}{1 + \frac{8.6}{100}} = 2163.9 \text{ kg}$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} = \frac{M}{(1 + w) \cdot V} = \frac{2350}{\left(1 + \frac{8.6}{100}\right) (1.2)} = 1803.3 \text{ kg/m}^3$$

وعليه، فإن حجم الأجزاء الصلبة:

$$\frac{M_s}{G_s \cdot \rho_w} = \frac{2163.9}{(2.71)(1000)} = 0.798 \text{ m}^3$$

وأما حجم الفراغات:

$$V_v = V - V_s = 1.2 - 0.798 = 0.402 \text{ m}^3$$

ومنه، فإن معامل المسامية:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.402}{0.798} = 0.503$$

أما المسامية:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{0.402}{1.2} = 0.335$$

وحجم الماء يعطى من خلال:

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{186.1}{1000} = 0.186 \text{ m}^3$$

وعليه، فإن درجة الإشباع للتربة تعطى بالعلاقة:

$$S = \frac{0.186}{0.402} = 0.463 = 46.3 \%$$

$$V_w = 0.186 \text{ m}^3$$

المثال 3.3:

من أجل عينة تربة لدينا القيم التالية:

$$n = 0.4$$

$$G_s = 2.68$$

$$w = 12\%$$

والمطلوب تحديد كتلة الماء الواجب إضافتها لعشرة أمتار مكعبة من هذه التربة للوصول لدرجة الإشباع التام.

الحل:

العلاقة 27.3 يمكن إعادة كتابتها بدلالة الكثافة كالتالي:

$$\rho = G_s \cdot \rho_w (1 - n)(1 + w)$$

وبشكل مشابه من العلاقة 2.28 نجد أن:

$$\rho_{sat} = [(1 - n)G_s + n]\rho_w$$

وبالتعويض:

$$\rho = (2.68)(1000)(1 - 0.4)(1 + 0.12) = 1800.96 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{sat} = [(1 - 0.4)(2.68) + 0.4](1000) = 2008 \text{ kg/m}^3$$

وبالتالي كتلة الماء الواجب إضافتها لكل متر مكعب:

$$\rho_{sat} - \rho = 2008 - 1800.96 = 207.04 \text{ kg}$$

وعليه، فإن كتلة الماء الكلية الواجب إضافتها إلى 10 متر مكعب هي:

$$207.04 \times 10 = 2070.4 \text{ kg}$$

□

المثال 4.3:

من أجل عينة تربة مشبعة يعطى التالي:

$$\gamma_d = 103 \text{ lb/ft}^3$$

$$w = 23\%$$

المطلوب حساب:

(a) الوزن الحجمي المشبع γ_{sat} .

(b) الوزن النوعي النسبي G_s .

(c) معامل المسامية e .

الحل:

(a) من المعادلة 12.3:

$$\gamma_{sat} = \gamma_d(1 + w) = (103) \left(1 + \frac{23}{100}\right) = 126.69 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\cong 126.7 \text{ lb/ft}^3$$

(b) من المعادلة 16.3:

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

ومن أجل تربة مشبعة ومن خلال العلاقة 20.3 نجد $e = w \cdot G_s$ وبالتالي:

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + w G_s}$$

$$103 = \frac{G_s(62.4)}{1 + (0.23)(G_s)}$$

وبالتعويض:

$$103 + 23.69 G_s = 62.4 G_s \Rightarrow G_s = 2.66$$

(c) من أجل تربة مشبعة:

$$e = w \cdot G_s = (0.23)(2.66) = 0.61$$

□

5.3 الكثافة النسبية

يسخدم مفهوم الكثافة النسبية لحساب الكثافة الحقلية ومدى تخلخل الترب الحبيبية وذلك من خلال العلاقة التالية:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (30.3) \square$$

حيث:

D_r : الكثافة النسبية وتعطى عادة كنسبة مئوية.

e : معامل المسامية الحقلي.

e_{max} : معامل المسامية بحالة التخلخل الأعظمي للتربة.

e_{min} : معامل المسامية بحالة الكثافة العظمى للتربة (الترب المرصوفة).

قيمة D_r ممكن أن تتراوح من القيمة 0% للترب المخلطة وحتى القيمة 100% للترب الكثيفة (المرصوفة).

مهندسو التربة قاموا بوصف نوعي للترب الحبيبية بناءً على الكثافات النسبية للترب الحبيبية كما هو مبين في الجدول (3.3). الترب بحالتها الطبيعية نادراً ما تتراوح كثافة التربة النسبية من 20% وحتى 30%. إن عملية رص الترب الحبيبية للوصول لكثافة نسبية أكبر من 85% يعتبر عملية صعبة.

الجدول (3.3): توصيف التربة استناداً لقيمة الكثافة النسبية

الكثافة النسبة (%) (D_r)	توصيف التربة
15 - 0	مخلطة جداً
50 - 15	مخلطة
70 - 50	متوسطة التراص
85 - 70	مرصوفة
100 - 85	مرصوفة جداً

علاقات الكثافة النسبية يمكن استنتاجها بدلالة المسامية، من خلال العلاقات التالية:

$$e_{max} = \frac{n_{max}}{1 - n_{max}} \quad (31.3) \square$$

$$e_{min} = \frac{n_{min}}{1 - n_{min}} \quad (32.3) \square$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (33.3) \square$$

حيث n_{min} و n_{max} هي المسامية للتربة بحالتها المخلخلة وبحالة الكثافة العظمى على التوالي، بتعويض المعادلتين (31.3) و (33.3) في المعادلة (30.3)، نستطيع إيجاد:

$$D_r = \frac{(1 - n_{min})(n_{max} - n)}{(n_{max} - n_{min})(1 - n)} \quad (34.3) \square$$

وباستخدام تعريف الوزن الحجمي الجاف المعطى في المعادلة (16.3). نستطيع التعبير عن الكثافات النسبية بدلالة الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والأصغري، من خلال العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{\left[\frac{1}{\gamma_{d(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_d} \right]}{\left[\frac{1}{\gamma_{d(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_{d(max)}} \right]} \\ &= \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)} - \gamma_{d(min)}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(max)}}{\gamma_d} \right] \end{aligned} \quad (3.35) \square$$

حيث:

(γ_{dmin}) = الوزن الحجمي الجاف بحالة الخلخلة الأعظمية للتربة (عند معامل مسامية e_{max} أعظمي).

(γ_d) = الوزن الحجمي الجاف لحالة التربة الحقيقية (عند معامل مسامية e).

(γ_{dmax}) = الوزن الحجمي الجاف بحالة الكثافة الأعظمية للتربة (عند معامل مسامية e_{min} أصغري).

وبدلالة الكثافات، المعادلة (35.3) يمكن التعبير عنها بالعلاقة:

$$D_r = \left[\frac{\rho_d - \rho_{d(min)}}{\rho_{d(max)} - \rho_{d(min)}} \right] \frac{\rho_{d(max)}}{\rho_d} \quad (36.3) \square$$

قدم نظام ((ASTM (D-4253 – D4254 (2007) طريقة لتحديد الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والأصغري للترب الحبيبية والتي يمكن استخدامها في المعادلة (3.35) لقياس الكثافة النسبية للرص في الحقل.

تتضمن التجربة استخدام قالب بحجم $(0.1\text{ft}^3) (2830\text{ cm}^3)$. ومن أجل تحديد الكثافة الجافة الدنيا يتم استخدام الرمل المخلخل وصبه في القالب من خلال قمع بقطر $(12.7\text{ mm}) (0.5\text{ in})$. ارتفاع السقوط الوسطي للرمل إلى القالب هو $(25.4\text{ mm}) (1\text{ in})$. إن قيمة الوزن الحجمي الجاف الأصغري γ_{dmin} يمكن حسابها باستخدام المعادلة التالية:

$$\gamma_{d(min)} = \frac{W_s}{V_m} \quad (37.3) \square$$

حيث:

W_s : وزن الرمل اللازم لملئ القالب.

V_m : حجم القالب.

أما الكثافة الجافة العظمى فتحدد من خلال عملية صب مستمر للرمل في القالب لمدة 8 دقائق وبعد ذلك يتم وضع حمولة تسبب إجهاد مقداره 14 kN/m^2 مطبق على سطح القالب ويوضع القالب على طاولة ويتعرض للهرز بتردد 3600 دورة / دقيقة بمطال 0.635 مم وتحدد الكثافة الجافة العظمى بنهاية المدة بعد معرفة حجم ووزن عينة الرمل المستخدم.

تتأثر قيمة الكثافة الجافة العظمى بعدة عوامل:

- التسارع.
- الحمولة المطبقة.
- موضع التسارع.

وبالتالي نحصل على قيم أكبر للقيمة (γ_{dmax}) من التي حصلنا عليها حسب مواصفة ASTM والتي تم شرحها سابقاً.

□

المثال 5.3:

من أجل عينة تربة رملية يعطى التالي:

$$e_{max} = 0.75$$

$$e_{min} = 0.4$$

$$G_s = 2.68$$

تم رص العينة للوصول إلى $\rho = 112 \text{ lb/ft}^3$ عند محتوى رطوبة $w = 12\%$

المطلوب تحديد الكثافة النسبية D_r .

الحل:

من العلاقة 3.21:

$$\rho = \frac{(1 + w) \cdot G_s \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

أو:

$$e = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{\rho} - 1 = \frac{(2.68)(62.4)(1 + 0.12)}{112} - 1 = 0.67$$

ومن العلاقة 3.30:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{0.75 - 0.67}{0.75 - 0.4} = 0.229 = 22.9 \%$$

□

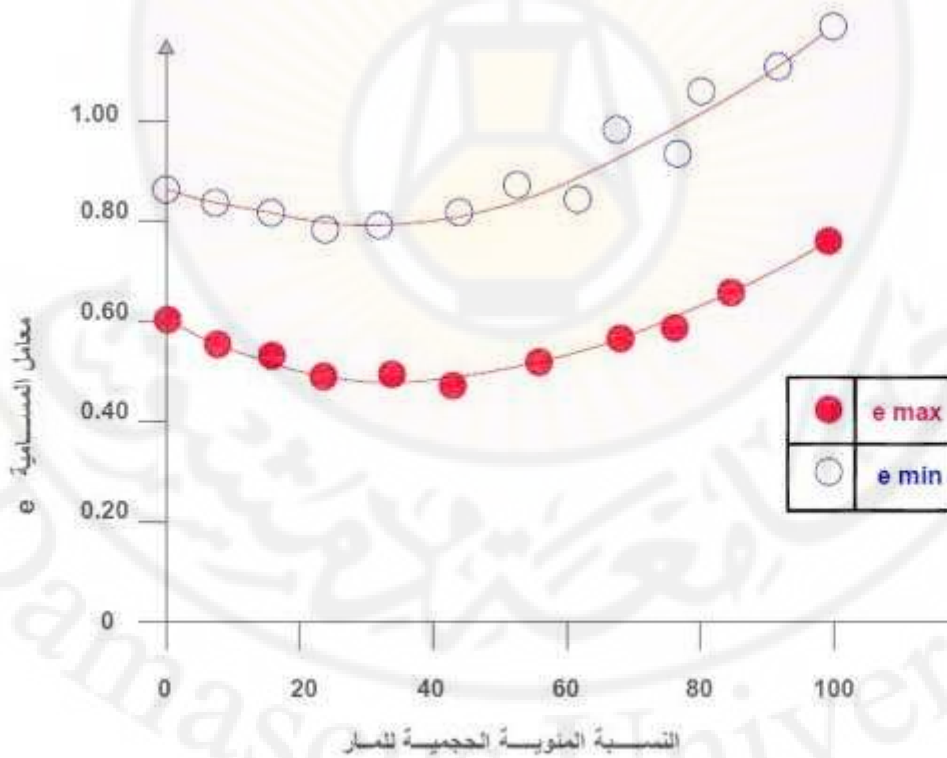
6.3 ملاحظات على e_{max} , e_{min}

تتعلق قيم e_{max} و e_{min} بعدة عوامل منها:

- حجم الحبيبات.
- شكل الحبيبات.
- طبيعية منحنى التدرج الحبي.
- الجزيئات الناعمة F_c والتي قطرها أقل من 0.075 مم.

ملاحظة:

تتأثر معاملات المسامية السابقة بمحتوى الجزيئات الناعمة بشكل كبير وهذا موضح بالشكل (3.8) حيث يظهر تغير معاملات e_{max} و e_{min} مع نسبة النواعم غير اللدنة (معبّر عنها بالحجم) من أجل رمل (Nevada 50/80) (حسب Lade .et al (1998).



الشكل (8.3): تغيرات e_{max} , e_{min} مع نسبة النواعم غير اللدنة معبر عنها بالحجم

نلاحظ أن القيمة D_{50} (قطر المهزة التي تمرر 50% من التربة) من أجل رمل ونسبة النواعم اللالندة المستخدمة في التجربة الموضحة في الشكل (3.8) (وهي: $(D_{50-نواعم}/D_{50-رمل})$) كانت 4.2 حسب الشكل (3.8). ومن نفس الشكل نلاحظ أنه عندما ازدادت نسبة النواعم مقدرة بالحجم من الصفر وحتى 30% قلت قيمة e_{max} و e_{min} وتعتبر هذه المرحلة مرحلة ملئ الفراغات حيث تميل النواعم لملئ الفراغات ما بين جزيئات الرمل الكبيرة. وهناك مرحلة انتقالية عندما تكون نسبة النواعم بين 30 إلى 40%. على كل حال، عندما تصبح نسبة النواعم أكبر من 40%، فإن قيمة e_{max} و e_{min} تبدأ بالازدياد، وهذه المرحلة هي مرحلة استبدال الأجزاء الصلبة، حيث يتم إزاحة الجزيئات الكبيرة ويتم استبدالها تدريجياً بالنواعم.

درس كلاً من السيدان Cubrinovski and Ishihara في العام 2002 تغير قيم e_{min} و e_{max} للعديد من الترب وبناءً على خطوط التراجع الأمثلية قدما العلاقات التالية:

• من أجل رمل صاف ($F_c = 0 \text{ to } 5 \%$):

$$e_{max} = 0.072 + 1.53e_{min} \quad (Clean \text{ sand}) \quad F_c \quad (38.3)$$

• من أجل رمل مع نواعم ($5 < F_c \leq 15 \%$):

$$e_{max} = 0.25 + 1.37e_{min} \quad Sand \text{ with fines } (5 < F_c \leq 15\%) \quad (3.39)$$

• من أجل رمل مع نواعم وغضار ($15 < F_c \leq 30 \%$)، ($P_c = 5 \text{ to } 20 \%$):

$$e_{max} = 0.44 + 1.21e_{min} \quad (40.3)$$

• من أجل ترب سلتية ($30 < F_c \leq 70 \%$)، ($P_c = 5 \text{ to } 20 \%$):

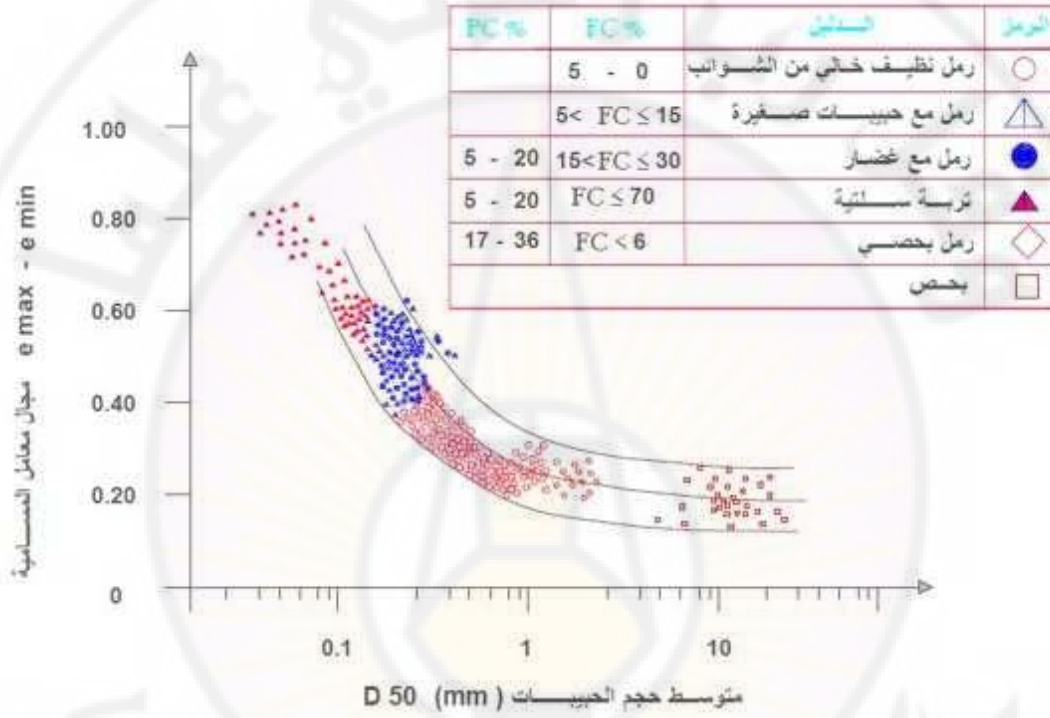
$$e_{max} = 0.44 + 1.32e_{min} \quad (41.3) \square$$

حيث F_c : نسبة النواعم من أجل حجم حبيبات أقل من 0.075 mm.

P_c : نسبة حجم الغضار ($< 0.005 \text{ mm}$).

الشكل (9.3) يظهر تغير القيمة $e_{max}-e_{min}$ مقابل حجم الجزيئات الوسطي (D_{50}) من أجل عدد من الترب (Cubtinovski and Ishihara 1900 - 2000). من الشكل أيضاً، نستطيع القول أن المنحني الوسطي للرمل والترب الحبيبة يمكن إعطائه بالعلاقة:

$$e_{max} - e_{min} = 0.23 + \frac{0.06}{D_{50}(mm)} \quad (42.3)$$



الشكل (9.3): تغيرات e_{max} , e_{min} حسب أبعاد ذرات التربة

□

7.3 الخلاصة

في هذا الفصل تم مناقشة علاقات الوزن مع الحجم ومبدأ الكثافة النسبية. كما قدم علاقات الحجم بدلالة المسامية، معامل المسامية، ودرجة الإشباع، إن علاقات الوزن تشمل محتوى الرطوبة، الوزن الحجمي الرطب والجاف والمشبع. الكثافة النسبية تستخدم لوصف كثافة التربة الحبيبية. الكثافة النسبية يمكن التعبير عنها بدلالة الوزن الحجمي الحقلي (الكثافات) الأعظمي والأصغري من أجل الترب ويعبر عنه كنسبة مئوية.

□

8.3 أمثلة غير محلولة

1. من أجل تربة معطاة، أثبت أن:

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w$$

2. من أجل تربة معطاة أثبت أن:

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + \left(\frac{e}{1+e} \right) \gamma_w$$

3. من أجل تربة معطاة أثبت أن:

$$\gamma_d = \frac{e \cdot S \cdot \gamma_w}{(1+e) \cdot w}$$

4. لدينا عينة لتربة رطبة حجمها 0.4 m^3 لها الخواص التالية:

- الكتلة الرطبة = 711.2 kg
- الكثافة الجافة = 623.9 kg
- الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة = 2.68 .

أحسب التالي:

- (a) محتوى الرطوبة.
- (b) الكثافة الرطبة.
- (c) الكثافة الجافة.
- (d) معامل المسامية.
- (e) المسامية.

5. لدينا تربة بحالتها الطبيعية كان لها حجم يساوي إلى 0.33 ft^3 ووزن 39.93 lb . وكان وزن التربة بعد تجفيفها بالفرن هو 34.54 lb . فإذا كانت $G_s = 2.67$. احسب محتوى الرطوبة، الوزن الحجمي الرطب، الوزن الحجمي الجاف، معامل المسامية، المسامية، درجة الإشباع.

6. إذا كان الوزن الرطب لتربة حجمها 0.2 ft^3 هو 23 lb ، ومحتوى الرطوبة والوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة تم تحديده بالمختبر ولهما القيم التالية: 11% و 2.7 على التوالي، أحسب ما يلي:

- (a) الوزن الحجمي الرطب (lb/ft^3).
- (b) الوزن الحجمي الجاف (lb/ft^3).
- (c) معامل المسامية.
- (d) المسامية.
- (e) درجة الإشباع (%).
- (f) الحجم الذي يشغله الماء (ft^3).

7. إذا كان الوزن الحجمي المشبع لترية هو 19.8 kN/m^3 ومحتوى الرطوبة هو 17.1% ، والمطلوب لهذه التربة تحديد ما يلي:

(a) الوزن الحجمي الجاف.

(b) الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة.

(c) معامل المسامية.

8. إذا كان الوزن الحجمي لترية هو 95 lb/ft^3 ومحتوى الرطوبة للتربة هو 19.2% ، عندما تكون درجة الإشباع 60% . والمطلوب تحديد التالي:

(a) معامل المسامية.

(b) الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة.

(c) الوزن الحجمي المشبع.

9. من أجل تربة معينة لدينا المعطيات التالية: $G_s = 2.67$

الوزن الحجمي الرطب $\gamma = 112 \text{ lb/ft}^3$ ومحتوى الرطوبة $w = 10.8\%$. المطلوب حساب التالي:

(a) الوزن الحجمي الجاف.

(b) معامل المسامية.

(c) المسامية.

(d) درجة الإشباع (%).

10. بناءً على المسألة 3.9، يطلب حساب وزن الماء بالباوند اللازم إضافته لتقديم مكعب من تربة بحالة درجات الاشباع التالية:

(a) (80%) من درجة الإشباع.

(b) (100%) من درجة الإشباع.

11. إذا كانت الكثافة الرطبة لتربة هي 1680 kg/m^3 ومحتوى الرطوبة $w = 18\%$ والوزن النوعي النسبي $G_s = 2.73$ أحسب ما يلي:

(a) الكثافة الجافة.

(b) المسامية.

(c) درجة الإشباع.

(d) كتلة الماء مقدرة بالوحدة Kg/m^3 اللازم إضافتها للوصول للإشباع التام.

12. إذا كانت الكثافة الجافة لتربة هي 1780 kg/m^3 و $G_s = 2.68$ ما هو محتوى الرطوبة عند الوصول لدرجة الإشباع.

13.3 المسامية لتربة هي 0.35، والوزن النوعي النسبي لها هو: $G_s = 2.69$ ، احسب:

(a) الوزن الحجمي المشبع (KN/m^3).

(b) محتوى الرطوبة عندما يكون الوزن الحجمي الرطب 17.5 KN/m^3 .

13. لدينا تربة مشبعة لها: $w = 23\%$ و $G_s = 2.62$. المطلوب تحديد الكثافات الجافة والمشبعة مقدرة بالوحدة Kg/m^3 .

14. لدينا تربة لها الخواص التالية: $e=0.75$ ، و $w = 21.5\%$ و $G_s = 2.71$. والمطلوب تحديد:

(a) الوزن الحجمي الرطب (lb/ft^3).

(b) الوزن الحجمي الجاف (lb/ft^3).

(c) درجة الإشباع (%).

16. لدينا تربة لها المعطيات التالية: $w = 18.2\%$ و $G_s = 2.67$ و $S = 80\%$. والمطلوب تحديد الوزن الحجمي الرطب والجاف لتربة بالوحدة lb/ft^3 .

17. بحال كان الوزن الحجمي الرطب لتربة هو 112.32 lb/ft^3 عند محتوى رطوبة 10%. وقيمة الوزن النوعي النسبي للتربة هو: $G_s = 2.7$.

المطلوب حساب :

(a) e.

(b) الوزن الحجمي المشبع.

18. بحال كان الوزن الحجمي الرطب ودرجة الإشباع لتربة معطى بالجدول التالي:

$\gamma \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right)$	S (%)
105.73	50
112.67	75

أحسب ما يلي:

(a) e.

(b) G_s .

19. بناءً على نص المسألة 18 . يطلب تحديد وزن الماء بالوحدة lb الموجود ضمن 2.5 ft^3 للتربة عند درجة الإشباع.

20. من أجل عينة رمل، وبحال كان معامل المسامية الأعظمي والأصغري هو 0.78 و 0.43 على التوالي:

ومعطى لدينا: $G_s = 2.67$ ، أحسب الوزن الحجمي الجاف للتربة بوحدة KN/m^3 عندما تكون الكثافة النسبية 65%.

21. من أجل تربة رملية، $e_{\max} = 0.75$ و $e_{\min} = 0.46$ ، $G_s = 2.68$ ما هو الوزن الحجمي الرطب عند الرص (KN/m^3) حقلياً إذا كانت $D_r = 78\%$ و $w = 9\%$.

22. من أجل تربة رملية، الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والأصغري هو 108 lb/ft^3 و 92 lb/ft^3 على التوالي. معطى لدينا : $G_s = 2.65$ ، أحسب الوزن الحجمي الرطب للتربة عندما تكون الكثافة النسبية 60% ومحتوى الرطوبة 8%.

23. محتوى الرطوبة لعينة تربة هو 18.4% والوزن الحجمي الجاف هو 100 lb/ft^3 . مع افتراض أن الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة هو 2.65.

(a) أحسب درجة الإشباع.

(b) ما هو الوزن الحجمي الجاف الأعظمي حتى يتم رص التربة من دون تغيير محتوى الرطوبة.

24. رمل ردمي مخلخل غير مرصوص يملأ 6 قدم بالعمق له كثافة نسبية 40%. التجارب المخبرية أظهرت أن معامل المسامية الأعظمي والأصغري للرمل هو 0.46 و 0.90 على التوالي والوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة للرمل هو 2.65.

(a) ما هو الوزن الحجمي الجاف للرمل.

(b) في حال تم رص الرمل إلى كثافة نسبية 75%، ما السماكة التي تم نقصانها من الأقدام الستة للردم.

□

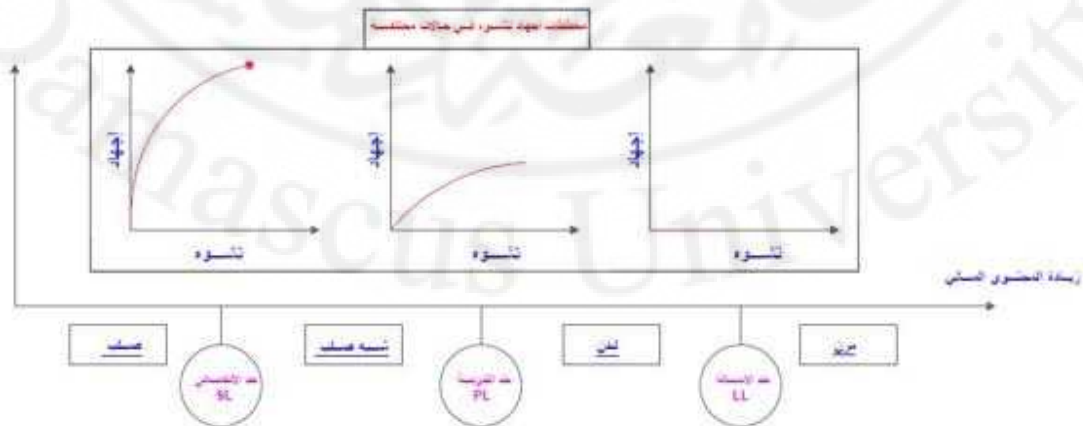
9.3 المراجع

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007). *Annual Book of ASTM Standards* ،Sec. 4، Vol. 04.08. West Conshohocken، Pa.
2. CUBRINOVSKI، M.، and ISHIHARA، K. (1999). "Empirical Correlation Between SPT N-Value and Relative Density for Sandy Soils،" *Soils and Foundations*. Vol. 39، No. 5، 61–71.
3. CUBRINOVSKI، M.، and ISHIHARA، K. (2002). "Maximum and Minimum Void Ratio Characteristics of Sands،" *Soils and Foundations*. Vol. 42، No. 6، 65–78.
4. LADE، P. V.، LIGGIO، C. D.، and YAMAMURO، J. A. (1998). "Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand،" *Geotechnical Testing Journal*، ASTM. Vol. 21، No. 4، 336–34.

4 الفصل الرابع: اللدونة وبنية التربة

1.4 مقدمة

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



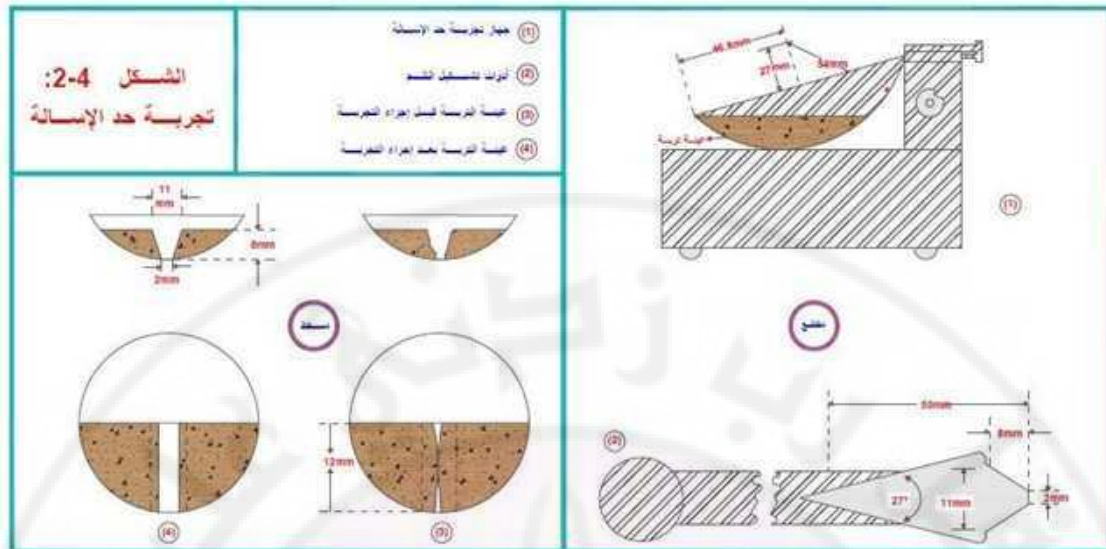
الشكل (1.4): حدود أتربرغ

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

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

2.4 حد السيولة (LL)

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



الشكل (2.4): تجربة حد السيولة

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

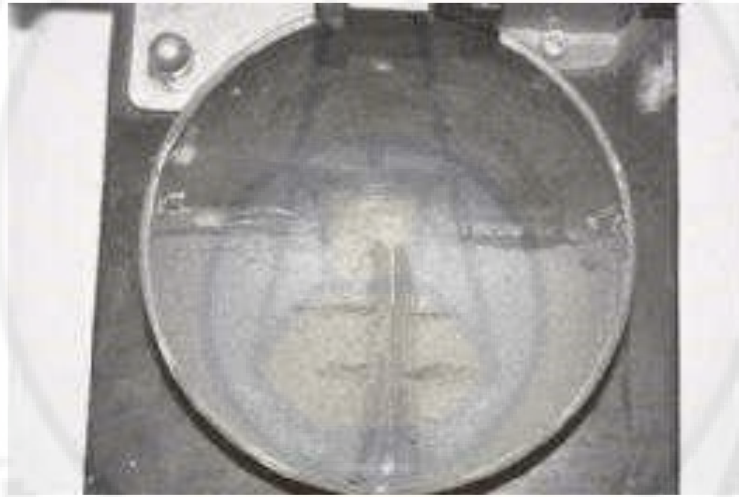


الشكل (3.4): تجربة حد السيولة

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



(a) قبل التجربة



(b) بعد التجربة

الشكل (4.4): صورة لكيفية قياس حد السيولة

(Courtesy of Braja M.Das, Henderson Nevada)

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



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

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

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

حيث I_F : معامل التصريف.

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

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

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

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

حيث C = ثابت.

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

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

وهي بالشكل التالي:

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

حيث :

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

w_N : محتوى الرطوبة الموافق.

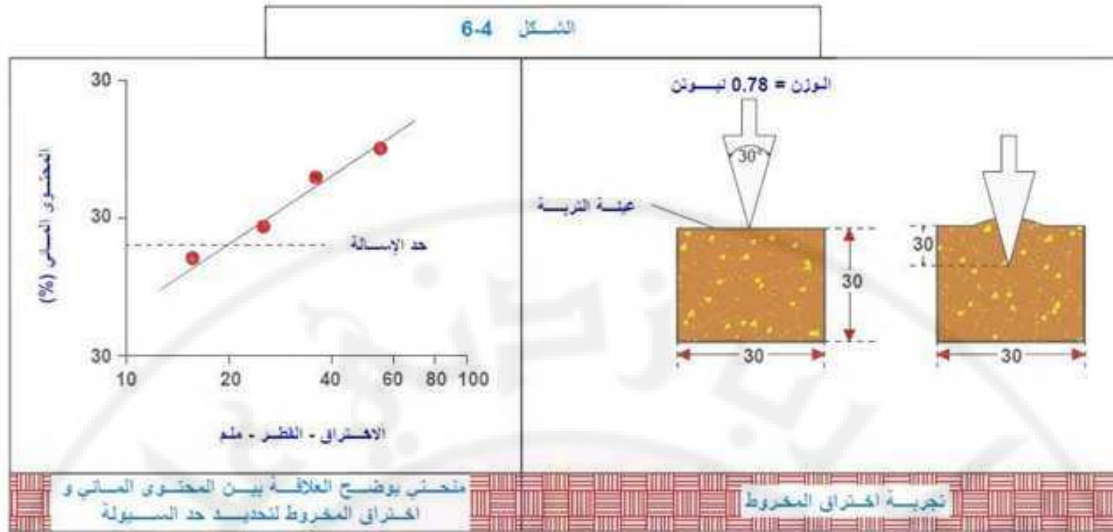
$\tan \beta = 0.121$ (ولكن انتبه أن $\tan \beta$ لا تساوي 0.121 لكل أنواع الترب).

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

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

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

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



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

3.4 حد اللدونة

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



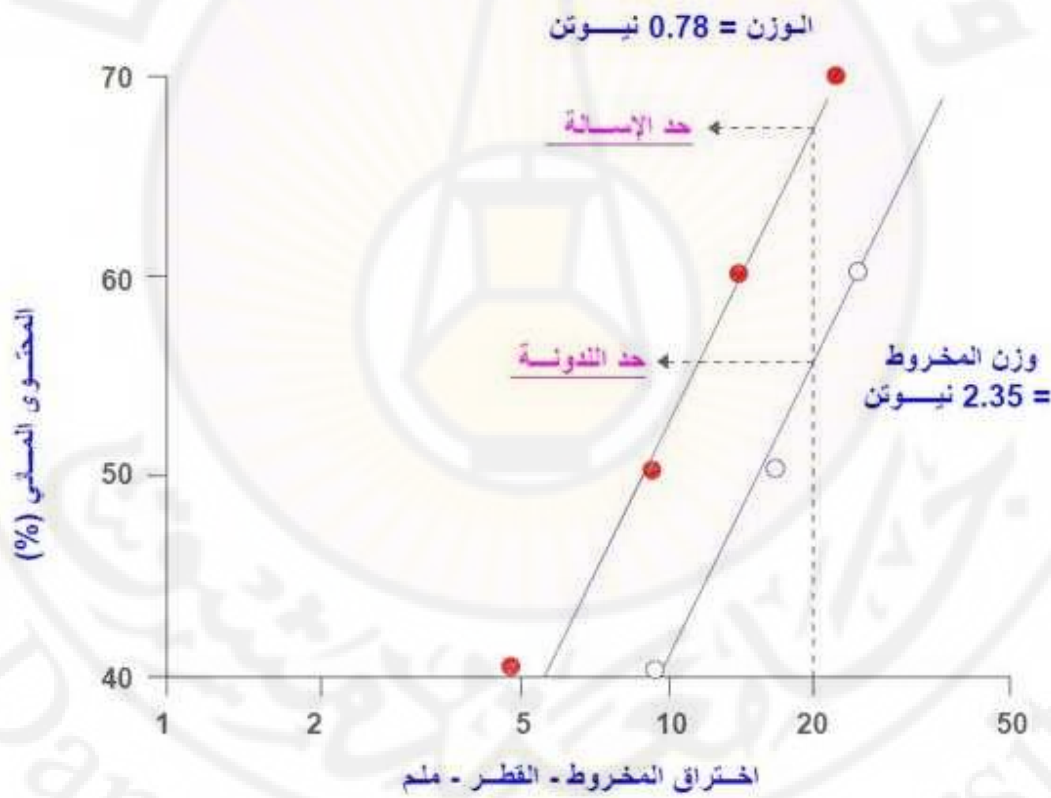
الشكل (7.4): الفتائل لقياس حد اللدونة

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

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

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

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



الشكل (8.4) : حد السيولة وحد اللدونة للغضار

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

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

□

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

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

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

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

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

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

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

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

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

□

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

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

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

4.4 حد الانكماش

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

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

وبالإشارة للشكل (9.4) يمكن تحديد حد الانكماش كالتالي:

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

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

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

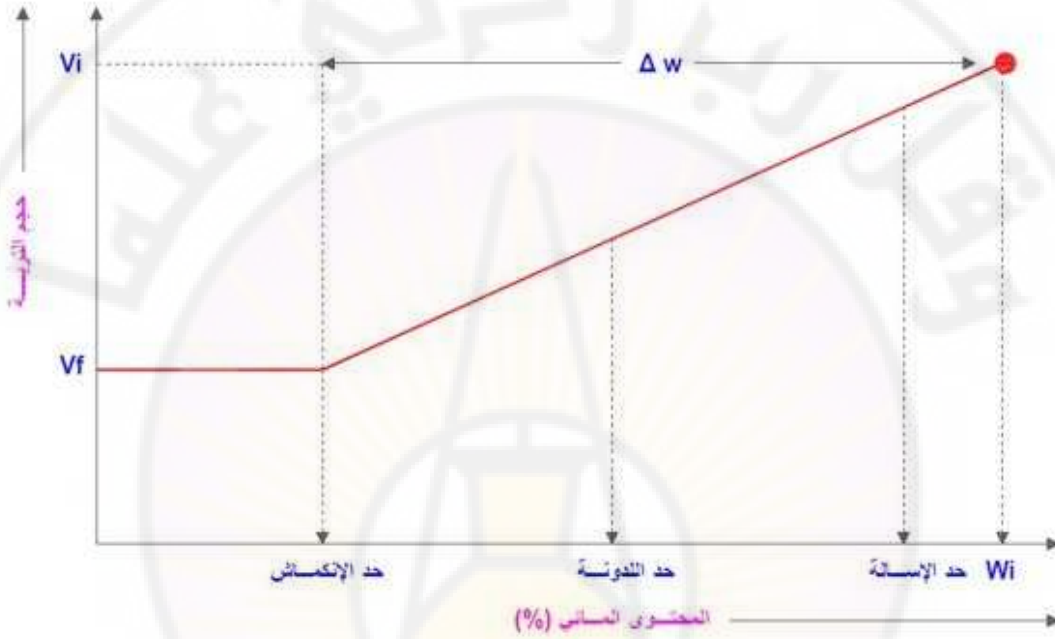
وبالتالي:

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

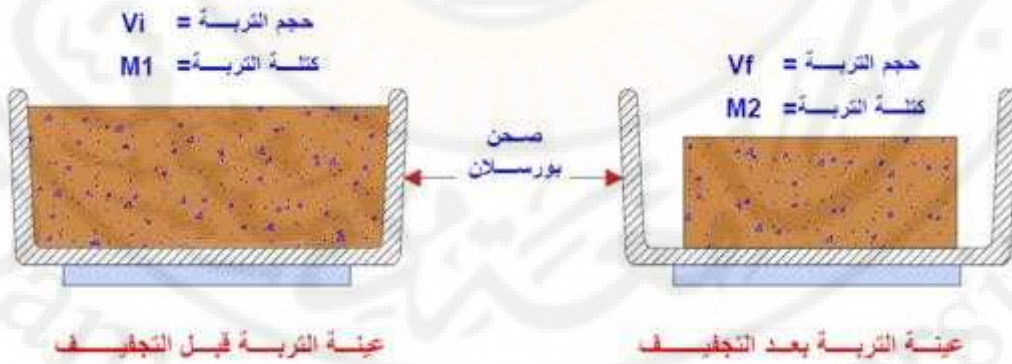
حيث:

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

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



الشكل (9.4): تعريف حد الإنكماش



الشكل (10.4): تجربة حد الإنكماش

وأيضاً:

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

حيث:

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

V_f = حجم العينة المجففة بالفرن cm^3 .

ρ_w = كثافة الماء (g/cm^3).

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

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

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

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

حيث:

ΔV = التغير في الحجم.

ΔM = التغير في الكتلة الرطبة الموافق.

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

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

حيث G_s = الوزن النوعي النسبي للجزيئات الصلبة.

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

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

مثال 1.4:

أجريت تجربة حد الانكماش على تربة، وكانت النتائج كالتالي:

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

المطلوب: حساب حد الانكماش للتربة.

الحل:

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

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

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

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

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

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

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

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

□

5.4 قرينة السيولة وقرينة القوام

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

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

حيث: w = محتوى الرطوبة الطبيعي للتربة.

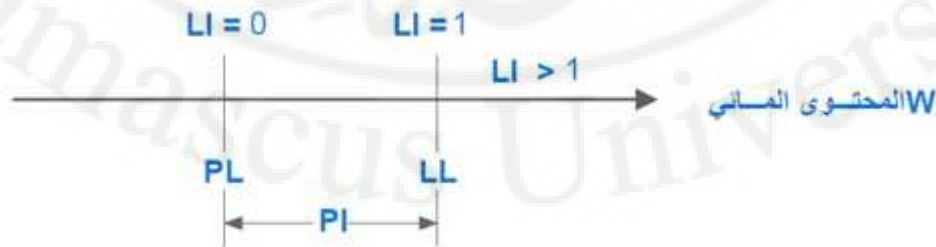
يمكن أن يكون محتوى الرطوبة بالحالة الطبيعية لعينة غضارية حساسية أكبر من حد السيولة في هذه الحالة (الشكل 11.4).

$$LI > 1 \square$$

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

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

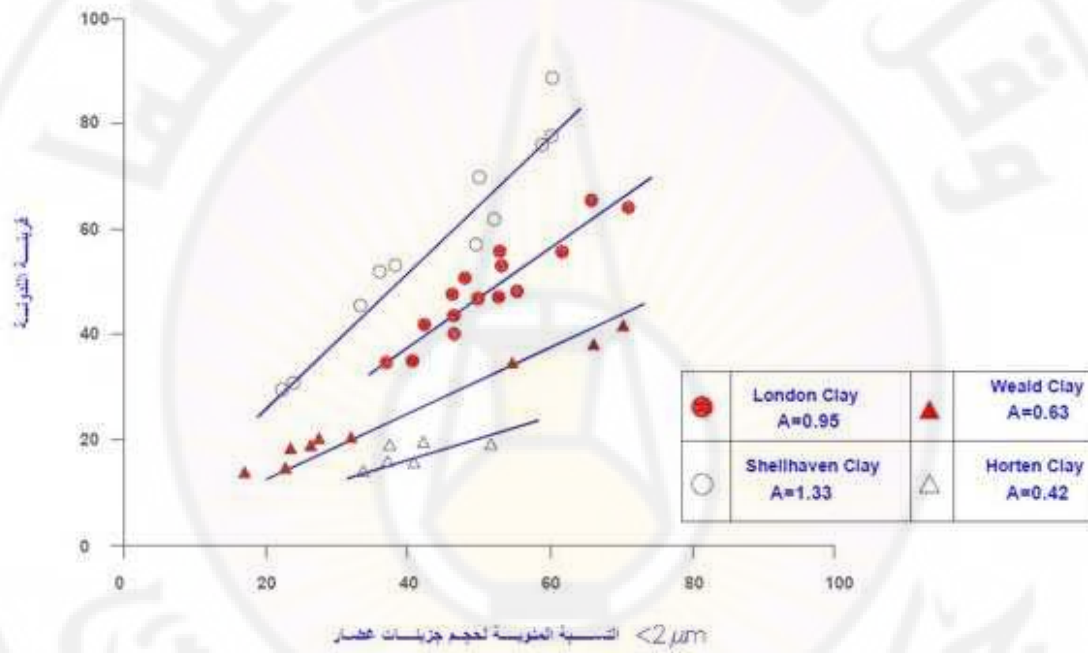
حيث w = محتوى الرطوبة الطبيعي. وعندما تساوي w حد السيولة تصبح قرينة القوام تساوي الصفر، وعندما تكون $w = PI$ نجد أن $CI = 1$.



الشكل (11.4): حدود السيولة على محور الرطوبة

6.4 النشاط

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



الشكل (12.4): النشاط حسب :

(Based on Skempton, 1953)

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

□

يمكن تعريف النشاط إذاً بالعلاقة التالية:

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

حيث $A =$ النشاط.

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

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

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

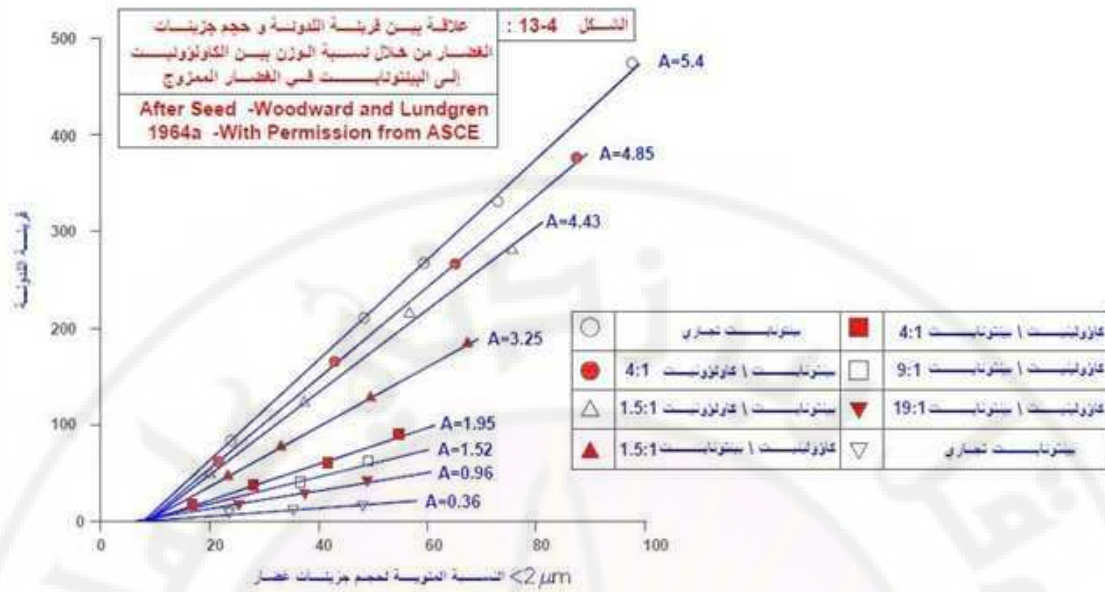
حيث C' هي ثابت من أجل تربة معطاة .

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

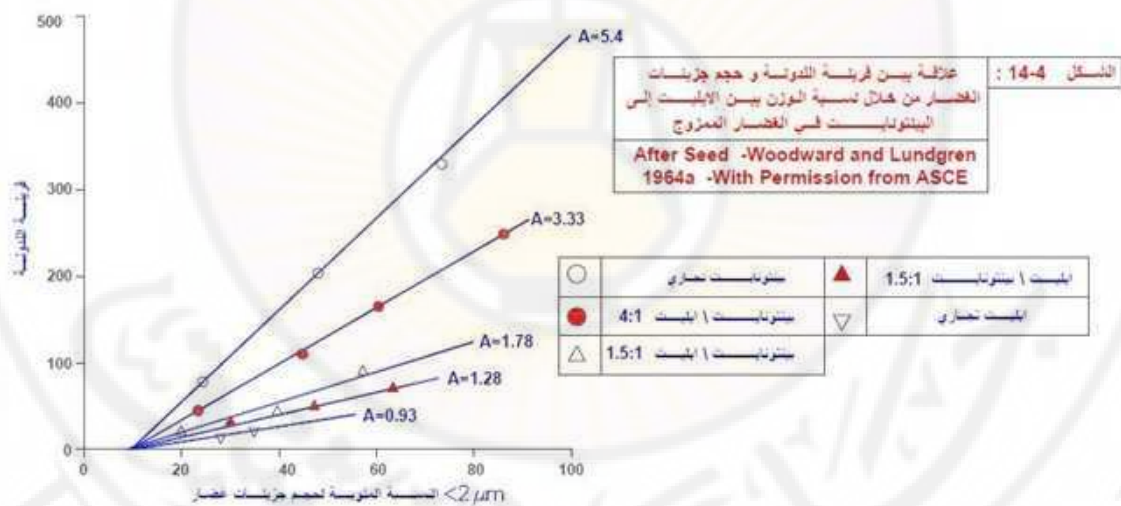
وفي أعمال لاحقة قام نفس الباحثين Seed, Woodward, and Lundgren في العام (1964) بإظهار أن العلاقة بين قرينة اللدونة ونسبة النواعم الموجودة في التربة والتي يمكن التعبير عنها بخطين مستقيمين وهذا ما يظهره تقريباً الشكل (15.4)، حيث أنه ومن أجل الترب التي تكون فيها جزيئات الغضار أكثر من 40% فإن الخط المستقيم يمكن أن يمر من المبدأ عند استمراريته. وبناءً على المعادلتين (8.4) و (9.4) أعطى Polidori (2007) علاقة تجريبية للنشاط (من أجل CF أكبر أو يساوي 30%) هي كالتالي:

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

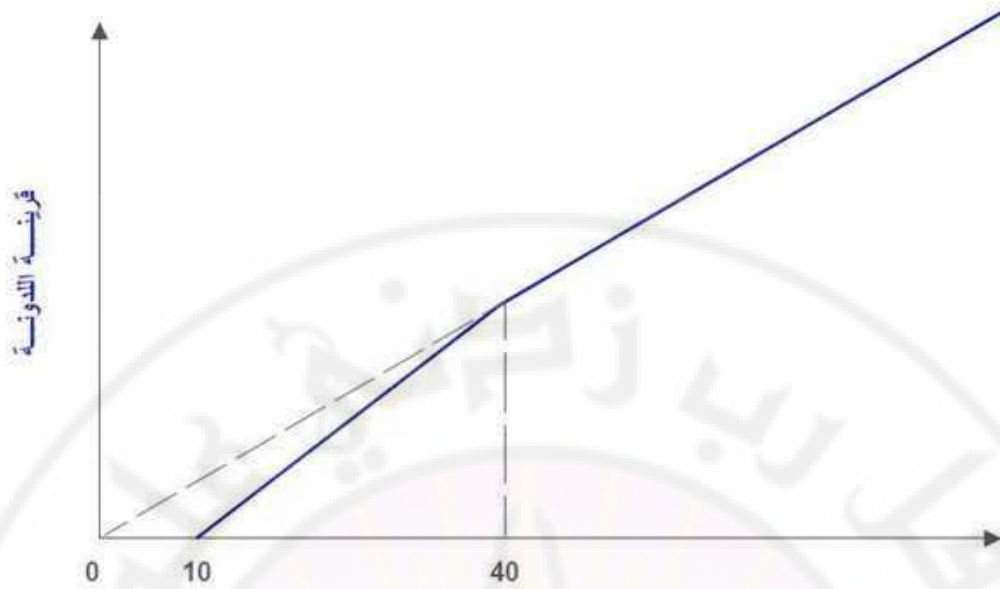
حيث CF هي نسبة النواعم ($< 2\mu m$).



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



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



الشكل 15-4 : علاقة بسيطة بين قرينة اللدونة و حجم جزيئات الغضار من خلال نسبة الوزن
After Seed -Woodward and Lundgren
1964b -With Permission from ASCE

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

7.4 مخطط اللدونة

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

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

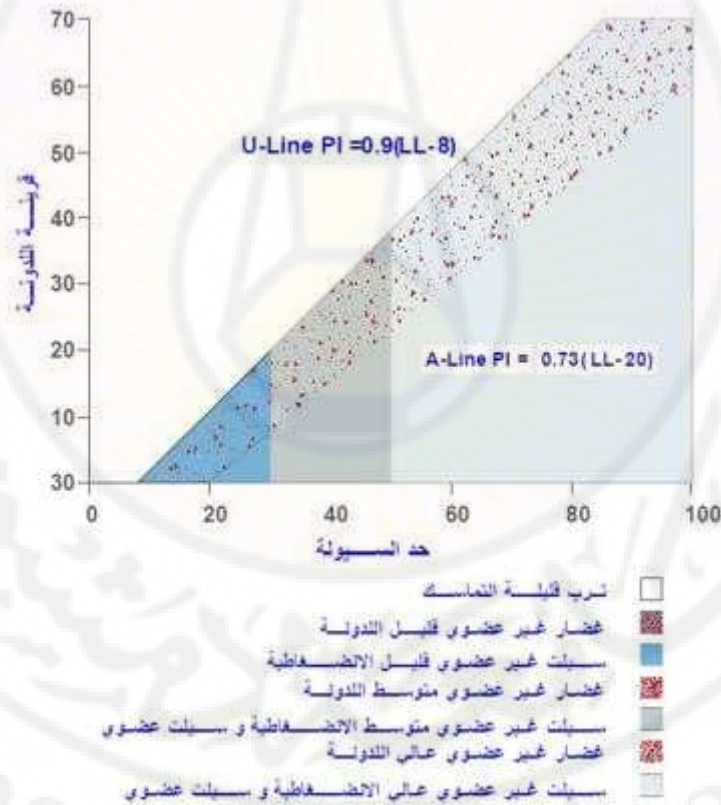
$$PI=0.73(LL-20)$$

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

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

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

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



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

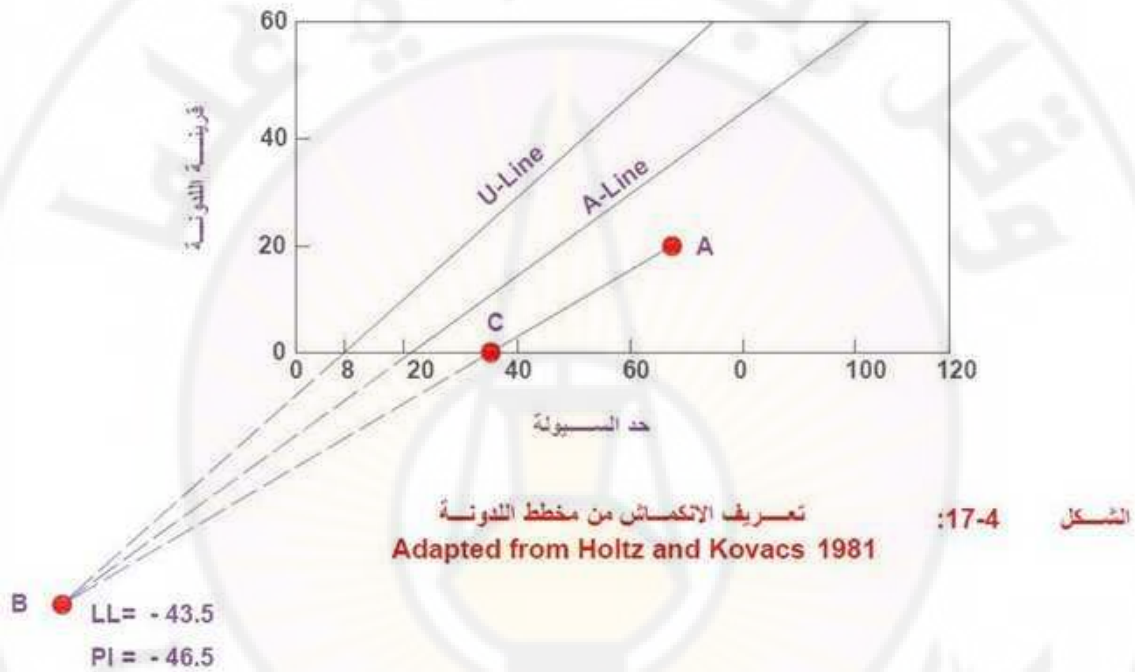
هناك استخدام آخر لخط (A-Line) وخط (U-Line). اقترحه العالم كزاغراند وهو أن حد الانكماش لتربة يمكن تحديده تقريباً إذا تم معرفة قرينة اللدونة وحد السيولة (انظر Holtz and Kovacs, 1981). ويمكن أن يتم ذلك وفقاً للشكل (17.4) :

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

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

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

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



الشكل (4.17): استنتاج حد الانكماش من خلال معرفة حد السيولة وحد اللدونة

8.4 بنية التربة

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

1.8.4 بنية الترب اللامتماسكة

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

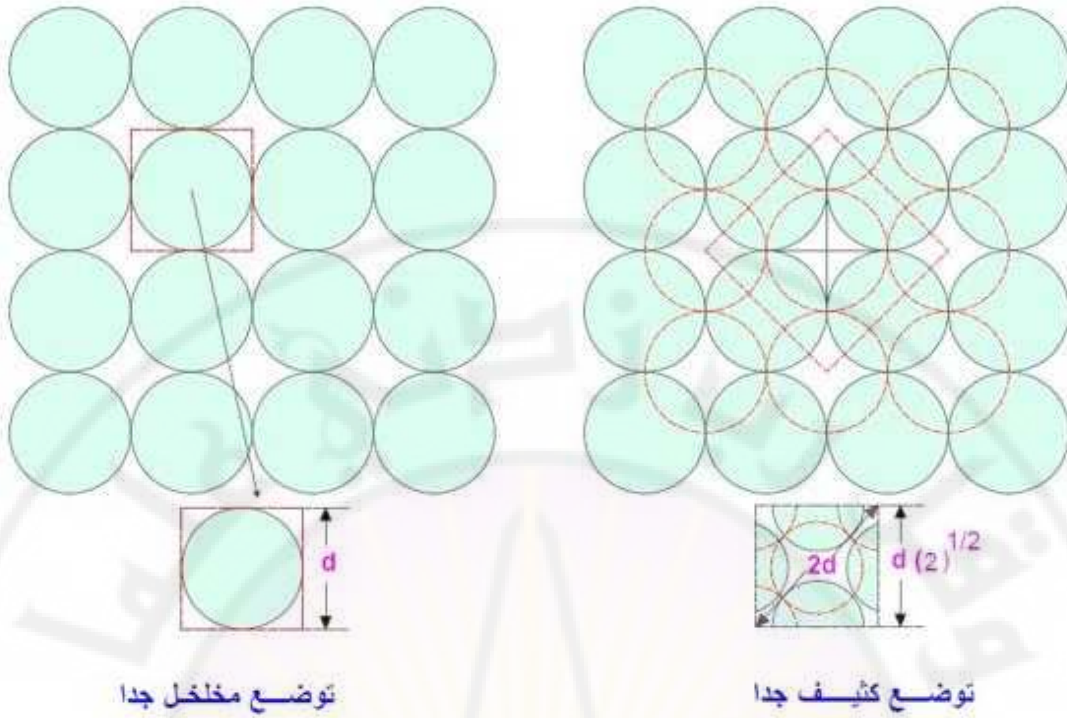
- بنية وحيدة الحبيبات.
- بنية على شكل خلايا نحل.

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



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

□



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

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

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

حيث:

$$d^3 = \text{حجم المكعب} = V$$

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

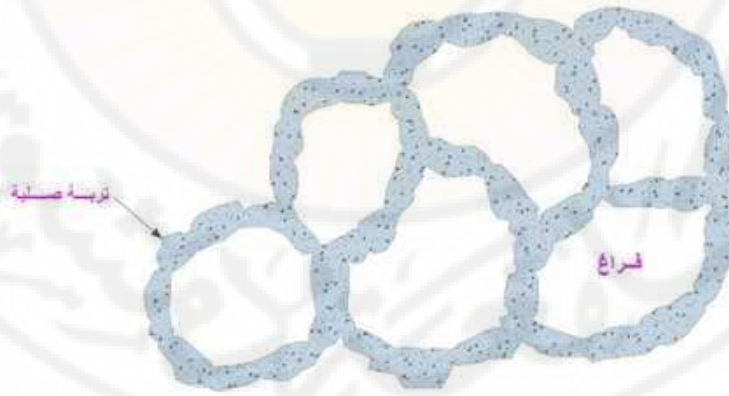
ومع ملاحظة أن $V = d^3$ وأن $V_s = \pi d^3/6$ وبالتالي:

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

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

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

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



الشكل 20-4 : هيكل حبيبات مليء

الشكل (20.4): هيكل التربة (خلايا النحل)

2.8.4 البنية في الترب المتماسكة

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

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

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

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



الشكل (21.4): هيكل التربة الرسوبية

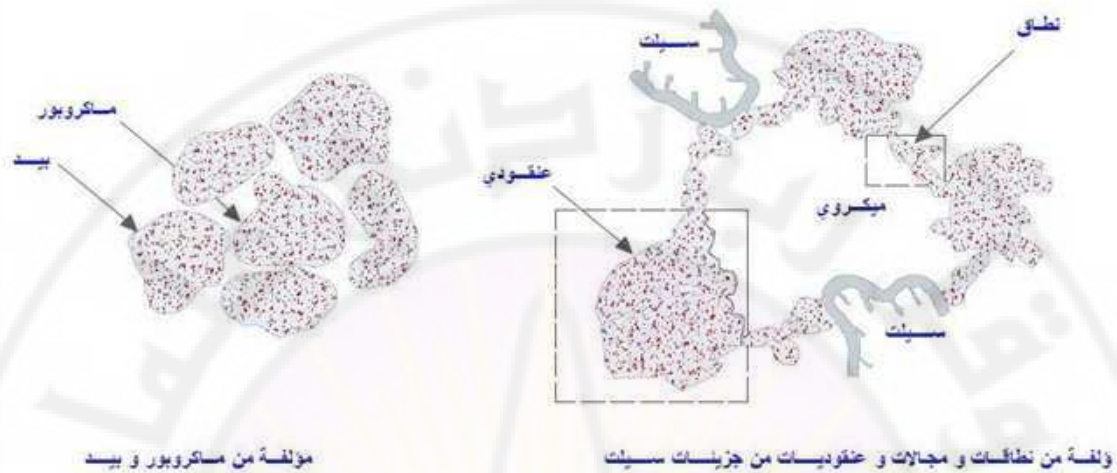
بنية الغضار الحاوي على بنى صوفية تكون خفيفة الوزن ولها معامل مسامية كبير، وهناك مثال عن هذه البنية وهي رواسب الغضار المتشكلة في البحر حيث البيئة الصوفية كبيرة. أما رواسب الطمي المتشكلة من ماء الأنهار لها بيئة متوسطة بين المشتتة والصوفية. أما طمي فلزات الغضار النقي تكون نادرة في الطبيعة. وعندما تحوي التربة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

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

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

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

يظهر توزيع (Peds) والمسافات المكروية. أما توزيع (Domains) وتوزيع (Clusters) مع حجم حبيبات السلت موضح في الشكل (22.4 b).



الشكل 4-22 : هيكلية التربية

الشكل (22.4): هيكل التربة:

(a) توزيع (Peds) والمساحات المكروية.

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

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

الجدول (2.4): هيكلية التربة الغضارية

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

9.4 ملخص

ناقش هذا الفصل مكونين أساسيين في دراسة ميكانيك التربة وهما:

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

(b) بنية التربة نوقشت بالفقرة 8.4.

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

□

10.4 مسائل غير محلولة

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

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

- (a) ارسم مخطط التصريف أو الغزارة واستنتج حد السيولة للتربة.
 (b) ما هي قرينة اللدونة للتربة.
2. المطلوب تحديد قرينة السيولة للتربة المشروحة في المسألة 1 إذا كانت $w_{in situ} = 31\%$.
3. التالي هي نتائج تجارب حد السيولة. ومع العلم أن حد اللدونة للتربة هو $PL = 18.7\%$ المطلوب:

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

- (a) ارسم مخطط التصريف أو الغزارة واستنتج حد السيولة.
 (b) ما هي قرينة اللدونة للتربة.
4. بالإشارة للمسألة الثالثة، المطلوب تحديد قرينة السيولة للتربة في حال كانت الرطوبة الطبيعية 26% .
5. لدينا تربة مشبعة لها الخواص التالية:
- الحجم البدائي $(V_i) = 19.65 \text{ cm}^3$ والحجم النهائي $(V_f) = 13.5 \text{ cm}^3$ ،
 - كتلة التربة الرطبة $(M_1) = 36 \text{ g}$ ، وكتلة التربة الجافة هي $(M_2) = 25 \text{ g}$ ،
- المطلوب تحديد حد الانكماش ونسبة الانكماش.
6. كرر المسألة السابقة باستخدام التالي:
- $(V_i) = 24.6 \text{ cm}^3$ والحجم النهائي $(V_f) = 15.9 \text{ cm}^3$
- كتلة التربة الرطبة $(M_1) = 44 \text{ g}$ ، وكتلة التربة الجافة هي $(M_2) = 30.1 \text{ g}$.

11.4 المراجع

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

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

5 الفصل الخامس: تصنيف التربة

يمكن لنا أن نصنف ترب مختلفة بخواص مشابهة إلى مجموعات رئيسية ومجموعات ثانوية وفقاً لسلوكها الهندسي. إن نظام التصنيف يعطي للمهندس لغة مفهومة ومختصرة للتعبير عن الخواص العامة للترب، والتي تختلف بشكل لا نهائي من دون الدخول في الوصف التفصيلي. معظم أنظمة تصنيف الترب والتي تم تطويرها لأغراض هندسية مبنية على معاملات وخواص بسيطة مثل التدرج الحبي واللدونة. على الرغم من العديد من أنظمة التصنيف التي يتم استخدامها حالياً، إلا أنه لا يوجد نظام يعطي خواص تعريفية كاملة لأي نوع تربة ولكل التطبيقات المحتملة وذلك بسبب التنوع الكبير لخواص التربة.

في هذا الفصل سنقوم بشرح أنظمة تصنيف التربة التي تعتمد إما :

- معيار التحليل الحبي للتربة فقط وهذا ما سنسميه التصنيف النسيجي،
 - أو التي تعتمد معيار التحليل الحبي ولدونة التربة التي تؤثر على السلوك الهندسي للتربة،
- وهنا سنعرض نوعين فقط من التصنيف هما : نظام الآشتو (AASHTO) المستخدم كثيراً في مؤسسات الطرق، أما المهندسين الجيوتكنيكيين ولأغراض الإنشاء يفضل استخدام نظام التصنيف العالمي الموحد (Unified Soil Classification System (USCS).

1.5 التصنيف النسيجي

إن نسيج التربة بشكل عام، يشير إلى مظهر السطح. يتأثر نسيج التربة بحجم الحبيبات الموجودة فيها. الجدول (2.3) يقسم التربة إلى مجموعات من البحص، الرمل، السلت، والغضار بناءً على حجم الحبيبة. في معظم الحالات، نجد أن الترب الطبيعية عبارة عن مزيج من حبيبات لمجموعات ذات أحجام مختلفة. في التصنيف النسيجي تسمى التربة بناءً على المكون الرئيسي فيها، مثل: رمل غضاري، أو سلت غضاري وهكذا.

تم تطوير عدد من أنظمة التصنيف النسيجي في الماضي في مختلف المنظمات لكي تخدم احتياجات المهندس الدارس، والعديد من تلك الأنظمة لا تزال تستخدم إلى الآن. الشكل (1.5) يظهر نظام التصنيف النسيجي المطور من قبل الهيئة الأمريكية للزراعة (USDA). إن هذا النظام يعتمد في التصنيف على حدود حجم الحبيبات كما هو مشروح في جدول نظام التصنيف USDA رقم (2.3)، حيث:

- حجم الرمل: ويمتد من قطر حبيبات 2.0 مم وحتى قطر حبيبات 0.05 مم.
- حجم السلت: ويمتد من قطر حبيبات 0.05 مم وحتى قطر حبيبات 0.002 مم.
- حجم الغضار: ويمتد لجميع الحبيبات ذات القطر الأصغر من 0.002 مم.

طريقة استخدام هذا الجدول يمكن شرحها بأفضل شكل عن طريق حل مثال عليها.

إذا كان توزيع حجم الحبيبات لتربة A يحتوي : ما نسبته 30% من الرمل، 40% من السلت، 30% من الغضار، وتصنيفها النسيجي يمكن أن يحدد باتباع الأسهم الموضحة في الشكل (1.5)، وتقع هذه التربة في منطقة غنية بالغضار.

لاحظ أن المخطط مبني فقط على الجزيئات التي تمر من المنخل رقم 10، لذلك فإنه في حال كان توزيع التدرج الحبي لتربة يحتوي نسبة حبيبات بقطر أكبر من 2 مم لا بد من عمل تصحيح.

مثال على ذلك، في حال كانت التربة B لها تدرج حبي كما يلي: تحتوي نسبة 20% من البحص، 10% من الرمل، 30% من السلت، 40% من الغضار، فإن المكونات النسيجية المعدلة تصبح:

$$\square \times 100 = \frac{\text{نسبة الرمل}}{\text{نسبة البحص} - 100} \times 100$$

$$\square \times 100 = \frac{\text{نسبة السيلت}}{\text{نسبة البحص} - 100} \times 100$$

$$\square \times 100 = \frac{\text{نسبة الغضار}}{\text{نسبة البحص} - 100} \times 100$$

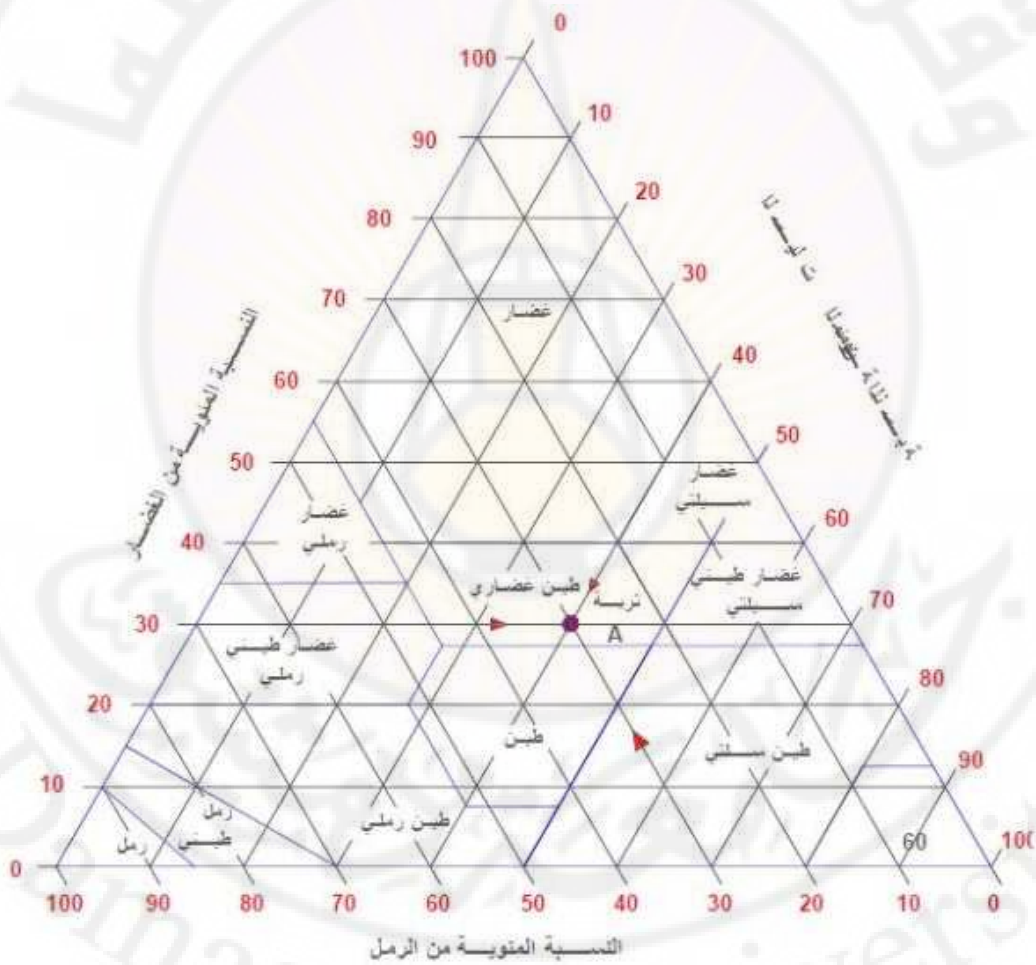
وبناءً على النسب المعدلة فإن تصنيف التربة بحسب USDA هو تربة غضارية.

ملاحظة هامة :

من قواعد المتبعة في هذا التصنيف وبحال كانت مكونات التربة تحتوي نسبة للحبيبات التي قطرها أكبر من 2 مم والتي تتمثل بالبحص، يرى هذا النوع من التصنيف أنه لا مانع من إضافة كلمة البحص قبل النسبة المعدلة المسيطرة على تركيب التربة المدروسة.

وبناءً على ذلك يمكننا أن نسمي التربة **B** بأنها تربة بحصية غضارية.

العديد من أنظمة التصنيف النسيجي مازالت تستخدم ولكنها لم تعد تستخدم لأغراض الهندسة المدنية.



الشكل (1.5): نظام التصنيف النسيجي المطور من قبل الهيئة الأمريكية للزراعة (USDA)

□

مثال 1.5:

صنف الترب التالية وفقاً لنظام التصنيف USDA:

نسب مكونات التربة من الحبيبات %	التربة			
	A	B	C	D
البحص	10	21	0	12
الرمل	20	12	18	22
السيات	41	35	24	26
الغضار	29	32	58	40

الحل :

بما أن التربة تحتوي نسبة محددة لحبيبات قطرها أكبر من 2 مم كالبحص، لا بد من القيام أولاً بحساب النسب المعدلة للرمل والسيات والغضار في هذه التربة كما هو مبين في العلاقات التالية :

النسبة المئوية المعدلة للرمل:

$$\frac{\text{النسبة المئوية للرمل}}{100 - \text{النسبة المئوية للبحص}} \times 100$$

النسبة المئوية المعدلة للسيات:

$$\frac{\text{النسبة المئوية للسيات}}{100 - \text{النسبة المئوية للبحص}} \times 100$$

النسبة المئوية المعدلة للغضار:

$$\frac{\text{النسبة المئوية للغضار}}{100 - \text{النسبة المئوية للبحص}} \times 100$$

بالتالي ينتج معنا نسب معدلة لنسب الحبيبات في التربة المدروسة كما هو مبين بالجدول التالي:

نسب مكونات التربة من الحبيبات %	التربة			
	A	B	C	D
البحص	10	21	0	12
الرمل	22.2	15.2	18	25
السيلت	45.6	44.3	24	29.5
الغضار	32.2	40.5	58	45.5

ثانياً ومن القيم المعدلة المحسوبة سابقاً وبالإشارة للشكل (1.5) ولتحديد المنطقة التي تقع فيها التربة نجد أن تسميات الترب هي كما هو مبين بالجدول التالي :

تصنيف التربة			
A	B	C	D
بحص سلتى غضاري (loam)	بحص سيلتي غضاري	غضار	بحص غضاري

ملاحظة : تم إضافة كلمة بحص وفقاً لما تم ذكره في قواعد هذا التصنيف.

2.5 التصنيف حسب السلوك الهندسي

على الرغم من أن التصنيف السابق بسيط نسبياً إلا أنه مبني على التركيب الحبي للتربة، ولكن وبحسب سلوك التربة في الواقع، فإن كمية الفلزات الغضارية الموجودة بالتربة الناعمة تؤثر بشكل كبير على الخواص الفيزيائية، لذلك يجب على مهندسي التربة أن تأخذ بعين الاعتبار ظاهرة اللدونة والتي تنشأ بسبب وجود الفلزات الغضارية لوصف خواص التربة بشكل صحيح.

بما أن نظام التصنيف النسيجي لا يأخذ بعين الاعتبار ظاهرة اللدونة وهو لا يحدد العديد من الخواص الهامة للتربة، فهو غير ملائم لمعظم الأغراض الهندسية. حالياً يتم استخدام نظامين من التصنيف أكثر تفصيلاً يتم استخدامها بكثرة من قبل مهندسي التربة، وكلا النظامين يأخذ بعين الاعتبار توزيع التدرج الحبي وحدود اتربرغ وهما:

1. المنظمة الامريكية الرسمية للطرق السريعة والمواصلات

The American Association of state highway and Transportation (AASHTO)

2. نظام التصنيف العالمي الموحد (USCS) Unified Soil Classification System.

حيث يتم استخدام نظام الآشتو كثيراً في مؤسسات الطرق. أما المهندسين الجيوتكنيكيين ولأغراض الإنشاء يفضل استخدام نظام التصنيف العالمي الموحد.

3.5 نظام تصنيف الآشتو

تم تطوير نظام تصنيف الآشتو AASHTO في عام 1929 كنظام تصنيف لمديريات الطرق العامة. وقد تم تنقيحه العديد من المرات، والنسخة المعمول بها حالياً مقدمة من قبل:

Committee on Classification of Materials for Subgrades and Granular Type Roads of the Highway Research Board in 1945 (ASTM designation D-3282; AASHTO method M145).[]

إن تصنيف الآشتو المستخدم حالياً معطى في الجدول (1.5). وبناءً على هذا النظام يمكن أن تصنف الترب إلى عدة مجموعات رئيسية وعددها سبع مجموعات مرقمة من المجموعة A-1 وحتى المجموعة A-7.

فإذا كانت التربة تحتوي مواد حبيبية بنسبة 35% أو أقل للحبيبات التي تمر من المنخل 200، يمكن أن تصنف التربة في هذه الحالة ضمن المجموعات A-1، A-2، A-3. أما الترب التي تحتوي على نسبة 35% أو أكثر من الحبيبات تمر من المنخل رقم 200 يتم تصنيفها بحسب هذه الشروط ضمن المجموعات A-4، A-5، A-6 و A-7 ومعظم هذه الترب هي ترب سلتية وغضارية.

إن نظام التصنيف هذا مبني على المعايير التالية:

1. حجم الحبيبات:

أ. البحص: وهي الحبيبات التي تمر من المنخل الأمريكي قطر 75 mm (3-in)

والمحجوزة على المنخل الأمريكي رقم 10 (2 mm).

ب. الرمل: وهي الحبيبات التي تمر من المنخل الأمريكي رقم 10 (2 mm) المحجوزة

على المنخل رقم 200 (0.075 mm).

ج. السلت والغضار: وهي الحبيبات التي تمر من المنخل الأمريكي رقم 200.

2. اللدونة: هنا نميز ما بين : مصطلح تربة سلتية والذي يستخدم في حالة الترب الناعمة التي

لها قرينة لدونة 10 أو أقل. أما مصطلح تربة غضارية يستخدم في حالة الترب الناعمة

التي لها قرينة لدونة 11 أو أكبر.

3. في حال وجود القطع والحجارة الصخرية cobbles and boulders (والتي قياسها أكبر

من 75 مم) يتم استبعادها من عينة التربة التي يتم تصنيفها. ولكن ومن المهم تسجيل نسبة

هذه المواد ضمن كتلة التربة المدروسة.

وعليه ولتصنيف الترب وفقاً للجدول (1.5) لا بد من تطبيق البيانات باستخدام الجدول من

اليسار لليمين. ومع استمرار الاستقصاء، المجموعة الأولى من اليسار التي توافقها بيانات التجربة

تكون هي التصنيف الصحيح.

الشكل (2.5) يظهر مخطط لمجالات متنوعة من حد السيولة وقرينة اللدونة والتي تقع ضمن المجموعات A-2، A-4، A-5، A-6، A-7، ولتقييم جودة هذه التربة كمادة تأسيس للطرق لابد من معرفة رقم مهم جداً ويسمى بمعامل المجموعة (GI) للمجموعات الرئيسية والثانوية للتربة. يتم كتابة هذا المعامل بين قوسين بعد تحديد تصنيف ومجموعة التربة.

ويعطى معامل المجموعة بالمعادلة التالية:

$$GI = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10) \quad (1.5)$$

حيث:

F_{200} = نسبة المار من المنخل رقم 200.

LL = حد السيولة.

PI = قرينة اللدونة.

إن أول حد في المعادلة (1.5) هو :

$$(F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)]$$

ويعبر عن معامل المجموعة الجزئي المحدد من خلال حد السيولة.

أما الحد الثاني هو :

$$0.01(F_{200} - 15)(PI - 10)$$

فإنه يعبر عن معامل المجموعة الجزئي المحدد من خلال قرينة اللدونة.

أما عن التعليمات التي توضح بعض قوانين تحديد معامل المجموعة فهي :

1. إذا أعطت المعادلة (1.5) قيمة سالبة، علينا أن نأخذ قيمة معامل المجموعة مساو للصفر.

2. يتم تقريب معامل المجموعة في المعادلة (1.5) لأقرب رقم صحيح (مثال: $GI = 3.4$ يقرب ليصبح 3 و $GI = 3.5$ تقرب ليصبح 4).

3. لا يوجد حد أعلى لمعامل المجموعة.

4. معامل المجموعة للترب التي تنتمي للمجموعات A-1-a، A-1-b، A-2-4، A-2-

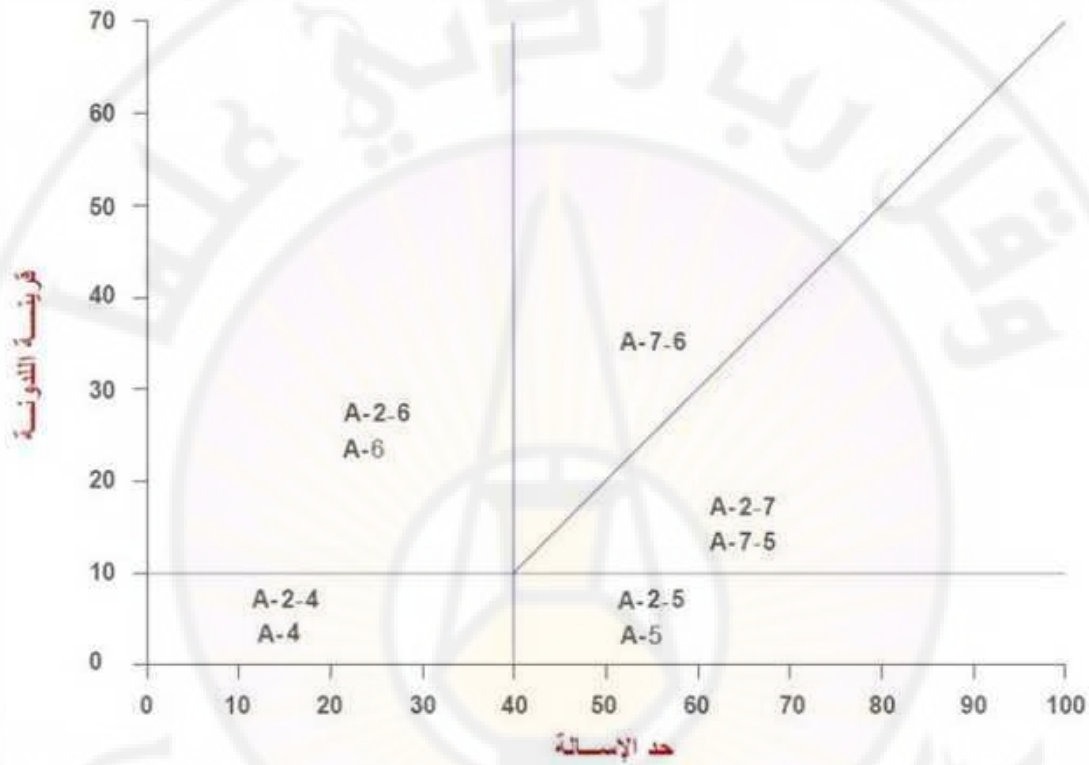
A-3، 5 يؤخذ مساو للصفر.

5. عندما يتم حساب معامل المجموعة للتربة المنتمية للمجموعات A-2-6 و A-2-7

يؤخذ معامل المجموعة الجزئي الخاص بقرينة اللدونة PI كما يلي :

$$GI = 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10) \quad (2.5)$$

عموماً، جودة أداء تربة معينة كطبقة تأسيس يتناسب عكسياً مع معامل المجموعة.



الشكل (2.5): مجال حد السيولة وحد اللدونة لمجموعات التربة

A-2, A-4, A-5, A-6, and A-7

□

الجدول (1.5): تصنيف التربة حسب نظام الأشتو

General classification	Granular materials (35% or less of total sample passing No. 200)						
Group classification	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis (percentage passing)							
No. 10	50 max.						
No. 40	30 max.	50 max.	51 min.				
No. 200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
Characteristics of fraction passing No. 40							
Liquid limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General subgrade rating	Excellent to good						
General classification	Silt-clay materials (more than 35% of total sample passing No. 200)						
Group classification	A-4		A-5		A-6		A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Sieve analysis (percentage passing)							
No. 10							
No. 40							
No. 200			36 min.	36 min.	36 min.		36 min.
Characteristics of fraction passing No. 40							
Liquid limit			40 max.	41 min.	40 max.		41 min.
Plasticity index			10 max.	10 max.	11 min.		11 min.
Usual types of significant constituent materials	Silty soils			Clayey soils			
General subgrade rating	Fair to poor						

^aFor A-7-5, $PI \leq LL - 30$

^bFor A-7-6, $PI > LL - 30$

□

مثال 2.5:

أظهرت تجربة التحليل الحبي لتربة النتائج التالية:

- نسبة المار من المنخل رقم 10 = 100 %
- نسبة المار من المنخل رقم 40 = 80 %
- نسبة المار من المنخل رقم 200 = 58 %

أما بالنسبة للترب المارة من المنخل رقم 40 فكان حد السيولة 30 % وقرينة اللدونة 10.

المطلوب تصنف التربة وفق نظام تصنيف الآشتو.

الحل:

باستخدام الجدول رقم (1.5) وبما أن نسبة المار من المنخل رقم 200 هي 58 % بالتالي فهي تقع ضمن تصنيف ترب غضارية - سلتية أي ضمن المجموعات A-4، A-5، A-6، A-7 وبالتالي بمتابعة التصنيف ومن المعادلة 1.5 نحسب معامل المجموعة من خلال :

$$GI = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10)$$

$$GI = (58 - 35)[0.2 + 0.005(30 - 40)] + 0.01(58 - 15)(10 - 10)$$

$$GI = 3.43 \approx 3$$

بالتالي تصنيف التربة هو: **A-4(3)**.

مثال 3.5:

إذا كانت نسبة المار من المنخل رقم 200 هي 95 % وحد السيولة 60 % وقرينة اللدونة 40.

المطلوب تصنف التربة وفق نظام تصنيف الآشتو.

الحل:

حسب الجدول رقم (1.5)، تقع التربة تحت المجموعة A-7 (وبمتابعة بشكل مشابه للمثال 2.5) ومع ملاحظة أن:

$$40 (PI) > 60(LL) - 30$$

وبالتالي تصنيف التربة أصبح: **A-7-6**، أما بالنسبة لمعامل المجموعة فهو:

$$GI = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10)$$

$$GI = (95 - 35)[0.2 + 0.005(60 - 40)] + 0.01(95 - 15)(40 - 10)$$

$$GI = 42 \square$$

وبالتالي تصنيف التربة النهائي هو **A-7-6(42)**.

مثال 4.5:

صنف التربة التالية وفق نظام تصنيف الآشتو:

- نسبة المار من المنخل رقم 10 = 90%
- نسبة المار من المنخل رقم 40 = 76%
- نسبة المار من المنخل رقم 200 = 34%
- حد السيولة للأجزاء بعد المنخل رقم 40 = 37
- قرينة اللدونة للأجزاء بعد المنخل رقم 40 = 12

الحل:

نلاحظ أن نسبة المار من المنخل رقم 200 أقل من 35% وبالتالي التربة تقع ضمن تصنيف ترب حبيبية ومن الجدول (1.5) نجد أن تصنيف التربة هو **A-2-6** ومن المعادلة (2.5):

$$GI = 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10) \square$$

حيث: $F_{200} = 34$, $PI = 12$

$$GI = 0.01(34 - 15)(12 - 10) = 0.38 \cong 0.0$$

وبالتالي تصنيف التربة هو **A-2-6 (0)**.

4.5 نظام التصنيف العالمي الموحد

الشكل الأولي لهذا النظام تم تقديمه من قبل المهندس كزاغراندني (Casagrande) في العام 1942 وذلك للاستخدام في أعمال بناء مدرجات الطائرات بناء على طلب إدارة الهندسة العسكرية الأمريكية خلال الحرب العالمية الثانية Army Corps of Engineers، وبالتعاون مع طلب مكتب الدراسات الأمريكية: U.S. Bureau of Reclamation، تم مراجعة هذا النظام عام 1952.

حالياً يتم استخدام هذا النظام بشكل واسع من قبل المهندسين والمعروف عالمياً والمعمول به في أغلب مخابر الدراسات (ASTM Test Designation D-2487). ويظهر الجدول (2.5) نظام التصنيف العالمي الموحد.

الجدول (2.5): نظام التصنيف العالمي الموحد.

Criteria for assigning group symbols				Group symbol
Coarse-grained soils More than 50% of retained on No. 200 sieve	Gravels More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve	Clean Gravels	$C_u \geq 4$ and $1 \leq C_c \leq 3^a$	GW
		Less than 5% fines ^a	$C_u < 4$ and/or $1 > C_c > 3^a$	GP
		Gravels with Fines	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3)	GM
		More than 12% fines ^{a,d}	$PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3)	GC
	Sands 50% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Clean Sands	$C_u \geq 6$ and $1 \leq C_c \leq 3^a$	SW
		Less than 5% fines ^b	$C_u < 6$ and/or $1 > C_c > 3^a$	SP
		Sands with Fines	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3)	SM
		More than 12% fines ^{b,d}	$PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3)	SC
Fine-grained soils 50% or more passes No. 200 sieve	Silts and clays Liquid limit less than 50	Inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3) ^c	CL
			$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) ^c	ML
	Organic		$\frac{\text{Liquid limit} - \text{oven dried}}{\text{Liquid limit} - \text{not dried}} < 0.75$; see Figure 5.3; OL zone	OL
	Silts and clays Liquid limit 50 or more	Inorganic	PI plots on or above "A" line (Figure 5.3)	CH
			PI plots below "A" line (Figure 5.3)	MH
Highly Organic Soils	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor		$\frac{\text{Liquid limit} - \text{oven dried}}{\text{Liquid limit} - \text{not dried}} < 0.75$; see Figure 5.3; OH zone	OH

^a Gravels with 5 to 12% fine require dual symbols: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^b Sands with 5 to 12% fines require dual symbols: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^c If $4 \leq PI \leq 7$ and plots in the hatched area in Figure 5.3, use dual symbol GC-GM or SC-SM.

^d If $4 \leq PI \leq 7$ and plots in the hatched area in Figure 5.3, use dual symbol CL-ML.

يصنف هذا النظام التربة إلى مجموعتين رئيسيتين هما:

1. **الترب خشنة التدرج الحبي:** والتي هي تربة بحصية أو تربة رملية في طبيعتها بنسبة

مار أقل من 50% خلال المنخل رقم 200. رمز هذه المجموعة يبدأ بالرمز G أو

S.G والدالة على ترب بحصية أو ترب رملية بحصية، والرمز S يدل على رمل أو

ترب رملية.

2. **الترب ناعمة التدرج الحبي:** وهي الترب التي تحتوي نسبة مار 50% أو أكثر من

المنخل رقم 200، رمز هذه المجموعة يبدأ بالرمز M والذي يدل على الترب السلتية

اللاعضوية، الرمز C للدلالة على الترب اللاعضوية الغضارية، أو الرمز O للدلالة

على السلت أو الغضار العضوي أما الرمز Pt للدلالة على الخبث والترب عالية

العضوية.

رموز أخرى مستخدمة بالتصنيف وهي:

- W: جيدة التدرج الحبي.
- P: سيئة التدرج الحبي.
- L: ذات لدونة منخفضة (حد اللدونة أقل من 50)
- H: ذات لدونة مرتفعة (حد اللدونة أكبر من 50)

إن الترب البحصية التي تحتوي نسبة نواعم من 5% إلى 12% تتطلب رموز مزدوجة:

GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC

كذلك الحال في الترب الرملية التي تحتوي نسبة نواعم من 5% إلى 12% تتطلب رموز مزدوجة:

.SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC

في حال كانت قيمة قرينة اللدونة للتربة محصورة بالمجال ($4 \leq PI \leq 7$) ووقعت في خارج المنطقة

المهشرة المبينة على الشكل (3.5) يجب استخدام الرموز المزدوجة GC-GM أو SC-SM.

أما في حال كانت قيمة قرينة اللدونة للتربة محصورة بالمجال ($4 \leq PI \leq 7$) ووقعت داخل المنطقة المهيشرة المبينة على الشكل (3.5) يجب استخدام رموز مزدوجة CL – ML.

لأغراض تتعلق بالتصنيف في هذا النظام لا بد من معرفة المعلومات التالية:

1. **نسبة البحص:** وهي نسبة المار من المنخل بقطر فتحات 76.2 مم وتحجز على المنخل رقم 4 (ذو قطر فتحات 4.75 مم).
 2. **نسبة الرمل:** وهي نسبة المار من المنخل رقم 4 (ذو قطر فتحات 4.75 مم) وتحجز على المنخل رقم 200 (ذو قطر فتحات 0.075 مم).
 3. **نسبة الغضار والسلت:** وهي نسبة المار من المنخل رقم 200 ذو قطر الفتحات 0.075 مم.
 4. معامل التجانس هو Cu ومعامل التدرج Cc.
 5. حد السيولة وقرينة اللدونة هي لأجزاء التربة المارة من المنخل رقم 40.
- حيث رموز المجموعات للتربة الحبيبية الخشنة هي:

GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC

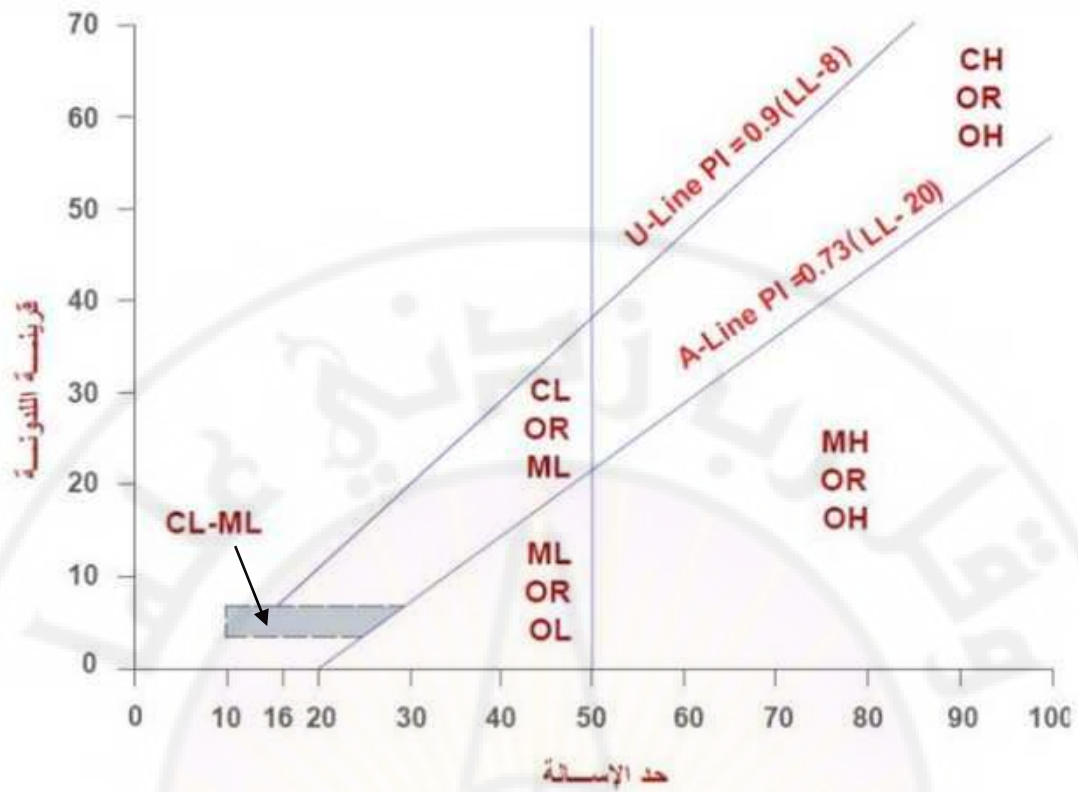
أما رموز المجموعات للتربة الناعمة هو:

.CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML, Pt

وحديثاً، أنتجت لجنة المواصفات ASTM المواصفة D-2487 المفصلة لتحديد اسم المجموعة التي تنتمي إليها التربة. وهذه الأسماء ملخصة في الشكل 4.5 و 6.5 وباستخدام هذه الأشكال، لا بد من أن نتذكر ومن أجل حالة تربة معطاة أن :

- الحبيبات الناعمة = نسبة المار من المنخل رقم 200.
- الحبيبات الخشنة = نسبة المحجوز على المنخل رقم 200.
- حبيبات البحص = نسبة المحجوز على المنخل رقم 4.
- حبيبات الرمل = (نسبة المحجوز على المنخل رقم 200) - (نسبة المحجوز على المنخل رقم

(4).



الشكل (3.5): تصنيف التربة بحسب حدود أتيرغ (تصنيف كزاغراند)

5.5 ملخص ومقارنة بين نظام تصنيف AASHTO ونظام تصنيف

USCS

كلا نظامي التصنيف المعتمدين AASHTO و USCS مبني على ظاهرة النسيج وظاهرة اللدونة للتربة وهذين النظامين يقسم التربة إلى مجموعتين رئيسيتين هما: التربة خشنة التدرج الحبي أو التربة ناعمة التدرج الحبي والمفصولة بالمنخل رقم 200.

بناءً على نظام تصنيف AASHTO، تعتبر التربة ناعمة التدرج الحبي عندما يمر ما نسبته 35% من المنخل رقم 200. وبناءً على نظام USCS تعتبر التربة ناعمة التدرج الحبي عندما يمر ما نسبته أكثر من 50% من المنخل رقم 200.

التربة الخشنة والتي تملك نسبة 35% من النواعم سوف تتصرف كمواد ناعمة التدرج الحبي وهذا بسبب وجود نواعم كافية لملئ الفراغات بين الحبيبات الخشنة والمثبتة لها.

في نظام AASHTO، يستخدم المنخل رقم 10 لفصل البحص عن الرمل، وفي نظام التصنيف الموحد يستخدم المنخل رقم 4. ومن وجهة نظر الحدود الفاصلة بين الحبيبات، المنخل رقم 10 هو الأكثر استخداماً من أجل الرمل. ويستخدم هذا الحد في البيتون وتكنولوجيا طبقات التأسيس للطرق.

ويمكننا أن نقدم جدول للمقارنة ما بين طرق التصنيف المشرحة سابقاً وطرق أخرى مثل ASTM و طرق التصنيف وفق الكود البريطاني BS. كما هو مبين بالجدول التالي :

BS	Clay	Silt			Sand			Gravel			Cobbles	Boulders
		Fine	Medium	Coarse	Fine	Medium	Coarse	Fine	Medium	Coarse		
USCS	Fines (silt, clay)				Sand			Gravel		Cobbles	Boulders	
					Fine	Medium	Coarse	Fine	Coarse			
AASHTO	Clay	Silt		Sand		Gravel				Boulders		
				Fine	Coarse							
ASTM	Clay	Silt		Sand			Gravel			Cobbles	Boulders	
				Fine	Medium	Coarse						
0.0010.0050.010.0750.10.425124.7510751003001000 Grain size (mm)												

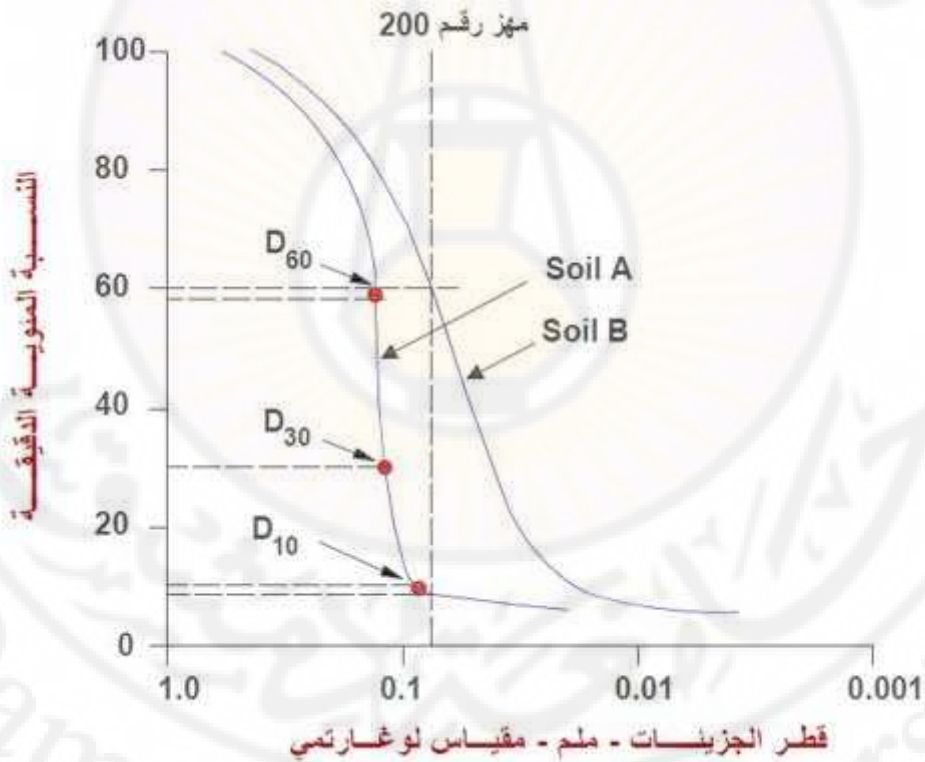
جدول يبين حدود الفصل وتسمية التربة وفقاً لعدة طرق من التصنيف.

مثال 5.5:

من أجل منحنى التدرج الحبي للتريتين الموضحين بالشكل (4.5)، وأيضاً حد السيولة وقرينة اللدونة للأجزاء المارة من المنخل رقم 40 والمبينة بالجدول التالي:

	تربة A	تربة B
حد السيولة (LL)	30	26
حد اللدونة (PL)	22	20

المطلوب تحديد رمز واسم المجموعة لكل تربة وفق تصنيف USCS.



الشكل (4.5): التربة المختبرة

الحل: للتربة A

حسب منحنى التدرج الحبي للتربة A والمبين في الشكل (4.5) ويرفع خط شاقولي عند المنخل 0.075 مم ليقطع المنحنى المرسوم، نجد أن نسبة المار هي 8 % ووفق جدول التصنيف USCS

نجد أنها تربة حبيبية خشنة، وبالمثل نجد أن نسبة المحجوز على المنخل رقم 4 هي 0 % بالتالي التربة رملية، ومن الشكل (4.5) نجد أن:

$$D_{10} = 0.085 \text{ mm}, D_{30} = 0.12 \text{ mm}, D_{60} = 0.135 \text{ mm}$$

وبالتالي:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.135}{0.085} = 1.59 < 6$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0.12)^2}{(0.135)(0.085)} = 1.25 > 1$$

وبما أن حد السيولة LL=30 وقرينة اللدونة PI = 30 - 22 = 8 > 7 بالتالي فإنها تقع فوق الخط A-Line في الشكل (3.5) لذلك رمز المجموعة هو **SP-SC**.

ولتحديد اسم المجموعة، فنجد أن نسبة البحص = 0 وهي أقل من 15% بالتالي اسم المجموعة:

تربة حبيبية خشنة رملية مع قليل من الغضار

poorly graded sand with clay

التربة B:

حسب منحنى التدرج الحبي للتربة B من الشكل (4.5) ويرفع خط شاقولي عند المنخل 0.075 مم ليقطع المنحنى نجد أن نسبة المار هي 61 % ووفق جدول التصنيف USCS نجد أنها تربة حبيبية ناعمة وبما أن حد السيولة LL = 26 وقرينة اللدونة PI = 26 - 20 = 6 وبالتالى فإنها تقع ضمن المنطقة المهيشرة في الشكل (3.5) لذلك رمز المجموعة هو **CL-ML**.

ولتحديد اسم المجموعة وبفرض أن التربة غير عضوية من الشكل 5.5 وحسب نسبة المحجوز على المنخل 200 والتي تساوي 30 > 39 = 100 - 61 نجد أن نسبة البحص = 0 ونسبة الرمل هي 39 = 100 - 61 وبالتالى بما أن نسبة الرمل أكبر من نسبة البحص فإن اسم المجموعة:

رمل سيلتي غضاري

sandy silty clay

□

مثال 6.5:

صنف التربة التالية وفق نظام تصنيف USCS واذكر رمز المجموعة واسمها:

- نسبة المارمن المنخل رقم 4 تساوي 70 .
- نسبة المار من المنخل رقم 200 تساوي 30.
- حد السيولة = 33.
- حد اللدونة = 12.

الحل:

باستخدام الجدول رقم 2.5 وبما أن نسبة المار من المنخل رقم 200 أقل من 50 % بالتالي فالتربة حبيبية خشنة وعليه فإن:

- نسبة الحبيبات الخشنة: $100 - 30 = 70 \%$
- نسبة البحص هي نسبة المحجوز على المنخل رقم 4: $100 - 70 = 30 \%$

وبالتالي أكثر من 50 % مرت من المنخل رقم 4 بالتالي فإن التربة تسمى تربة رملية.

وبما أن نسبة المار من المنخل رقم 200 أكبر من 12 % فرمز المجموعة هو SM or SC

وحسب الشكل (3.5) وبما أن حد السيولة يساوي 33 وقرينة اللدونة تساوي $33 - 12 = 21$ فإن التربة تقع فوق الخط A-Line ورمزها هو **SC**، ومن الشكل (4.5) وبما أن نسبة البحص أكبر من 15 % بالتالي اسم المجموعة:

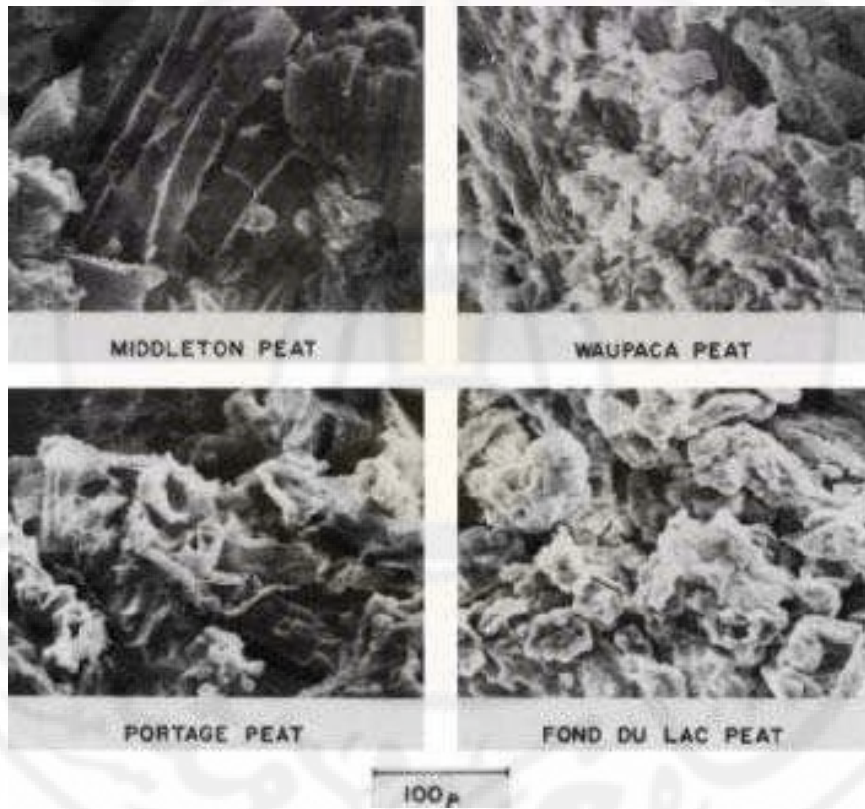
غضار رملي مع بحص

clayey sand with gravel.

في نظام التصنيف الموحد، التربة البحصية والتربة الرملية مفصولة بشكل واضح، ولكن في نظام AASHTO ليسوا كذلك. المجموعة A-2 بالذات تحوي تنوع كبير للتربة. رموز مثل GW, SM, CH ورموز أخرى تستخدم في نظام الآشتو تعد أفضل وصفاً لخواص التربة من المجموعة ذات الرمز A المستخدمة في نظام الآشتو.

تصنيف التربة العضوية مثل OL, OH, Pt موجود في نظام التصنيف العالمي الموحد. أما حسب نظام الآشتو لا يوجد مكان للتربة العضوية. الخبث يحوي عادة محتوى رطوبة عالي، وزن نوعي للأجزاء الصلبة منخفض ووزن حجمي منخفض، الشكل (5.5) يظهر المسح الإلكتروني الميكروغرافي لأربع عينات خثية مأخوذة من Wisconsin وبعض خواص الخبث معطاة في الجدول (3.5).

قارن الباحث Liu في العام (1967) نظام الآشتو مع نظام التصنيف الموحد. وكانت نتائج دراسته موضحة في الجدول 4.5 و 5.5.



الشكل (5.5): المسح الإلكتروني الميكروغرافي لأربع عينات خثية مأخوذة من Wisconsin

(After Dhowian and Edil, 1980. Copyright ASTM INTERNATIONAL. Reprinted with permission.)

الجدول (3.5): خواص الخبث

Source of peat	Moisture content (%)	Unit weight		Specific gravity, G_s	Ash content (%)
		kN/m ³	lb/ft ³		
Middleton	510	9.1	57.9	1.41	12.0
Waupaca County	460	9.6	61.1	1.68	15.0
Portage	600	9.6	61.1	1.72	19.5
Fond du Lac County	240	10.2	64.9	1.94	39.8

الجدول (4.5): المقارنة ما بين نظام الآشتو ونظام التصنيف الموحد

Soil group in AASHTO system	Comparable soil groups in Unified system		
	Most probable	Possible	Possible but improbable
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1-b	SW, SP, GM, SM	GP	—
A-3	SP	—	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	—	GW, GP, SW, SP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	—	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	—	SM, GM
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

* After Liu (1967)

Source: From A Review of Engineering Soil Classification Systems. In Highway Research Record 156, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1967, Table 5, p. 16. Reproduced with permission of the Transportation Research Board.

الجدول (5.5): المقارنة ما بين نظام التصنيف الموحد ونظام الآشتو

Soil group in Unified system	Comparable soil groups in AASHTO system		
	Most probable	Possible	Possible but improbable
GW	A-1-a	—	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2-7	A-2-4	A-4, A-6, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4	A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	—
CL	A-6, A-7-6	A-4	—
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	—
MH	A-7-5, A-5	—	A-7-6
CH	A-7-6	A-7-5	—
OH	A-7-5, A-5	—	A-7-6
Pt	—	—	—

* After Liu (1967)

Source: From A Review of Engineering Soil Classification Systems. In Highway Research Record 156, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1967, Table 6, p. 17. Reproduced with permission of the Transportation Research Board.

6.5 أمثلة غير محلولة

1. صنف الترب التالية باستخدام نظام:

U.S. Department of Agriculture textural classification chart:

التربة	نسبة الحبيبات (%)		
	رمل	سيات	غضار
A	20	20	60
B	55	5	40
C	45	35	20
D	50	15	35
E	70	15	15

2. النتائج التالية هي لتحليل حبي منخلي لعشر ترب وحد السيولة واللدونة للجزيئات المارة من المنخل رقم 40. صنف هذه الترب باستخدام نظام AASHTO وأوجد معاملات المجموعات.

رقم التربة	التحليل المنخلي: نسبة المار (%)			حد السيولة %	حد اللدونة %
	منخل رقم 10	منخل رقم 40	منخل رقم 200		
1	98	80	50	38	29
2	100	92	80	56	23
3	100	88	65	37	22
4	85	55	45	28	20
5	92	75	62	43	28
6	48	28	6	–	NP
7	87	62	30	32	24
8	90	76	34	37	25
9	100	78	8	–	NP
10	92	74	32	44	35

3. صنف التربة التالية باستخدام نظام التصنيف العالمي الموحد. أعطي رمز المجموعة واسمها.

رقم التربة	التحليل المنخلي: نسبة المار (%)		حد السيولة %	حد اللدونة %	ملاحظات
	منخل رقم 4	منخل رقم 200			
1	94	3	–	NP	$C_u = 4.48$ $C_c = 1.22$
2	100	77	63	25	
3	100	86	55	28	
4	100	45	36	22	
5	92	48	30	8	
6	60	40	26	4	
7	99	76	60	32	

4. من أجل تربة لاعضوية، التحليل الحبي المنخلي معطى بالتالي:

رقم المهزة	نسبة المار (%)
4	100
10	90
20	64
40	38
80	18
200	13

ومن أجل هذه التربة، $LL = 23\%$ و $PL = 19\%$ صنف التربة باستخدام:

1. نظام تصنيف الآشتو.
2. نظام التصنيف العالمي الموحد.
3. أعطي اسم المجموعة ورمزها.

□

7.5 المراجع

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1982). AASHTO Materials, Part I, Specifications, Washington, D.C.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007). Annual Book of ASTM Standards, Sec. 4, Vol. 04.08, West Conshohoken, Pa.
3. CASAGRANDE, A. (1948). "Classification and Identification of Soils," Transactions, ASCE, Vol. 113, 901-930.
4. DHOWIAN, A. W., and EDIL, T. B. (1980). "Consolidation Behavior of Peats," Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 3, No. 3, 105-114.
5. LIU, T. K. (1967). "A Review of Engineering Soil Classification Systems," Highway Research Record No. 156, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1-22.

6 الفصل السادس: رص التربة

الكثير من المنشآت الهندسية كما في بناء أساسات الطرق، السدود الترابية، وغيرها من المنشآت، لا بد من رص الترب المخلخلة لزيادة وزنها الحجمي لتكون قادرة على تحمل الحمولات المطبقة عليها هذا من جهة، ومن جهة ثانية لتكون قيم الهبوط تحت أساسات المنشآت الهندسية بمختلف أنواعها في حدها الأدنى. إن عملية الرص للتربة تزيد من خواص مقاومتها، ومن قدرة تحمل الأساسات التي تستند عليها، كما أن عملية رص التربة تقلل من هبوط المنشآت ويزيد من استقرار المنحدرات الترابية.

تستخدم عادة في مجال رص التربة مجموعة من المداخل وهي : المداخل ذات الدواليب الملساء، مداخل ذات أرجل الغنم، مداخل بدواليب مطاطية ومداخل راججة. المداخل الراججة تستخدم بكثرة في أعمال رص الترب الحبيبية. أما بالنسبة للترب الحبيبية الرخوة، لا بد من استخدام آلات رص راججة وتسمى عملية رص التربة بهذه الحالة الرص بالاهتزاز (vibroflotation). يناقش هذا الفصل بشيء من التفصيل مبادئ رص التربة في المخبر والحقل.

1.6 الرص - مبادئ عامة

الرص بشكل عام هو عبارة عن تكثيف لتراكب الأجزاء الصلبة للتربة عن طريق إزالة الهواء من الفراغات المتواجدة ضمن جسم التربة، هذه العملية تتطلب طاقة ميكانيكية. إن درجة الرص للتربة تقاس من خلال مصطلح **الوزن الحجمي الجاف**. عندما يتم إضافة الماء للتربة خلال عملية الرص، فإنه يتصرف كعامل تطرية لحبيبات التربة. أثناء عملية الرص، تنزلق حبيبات التربة على بعضها

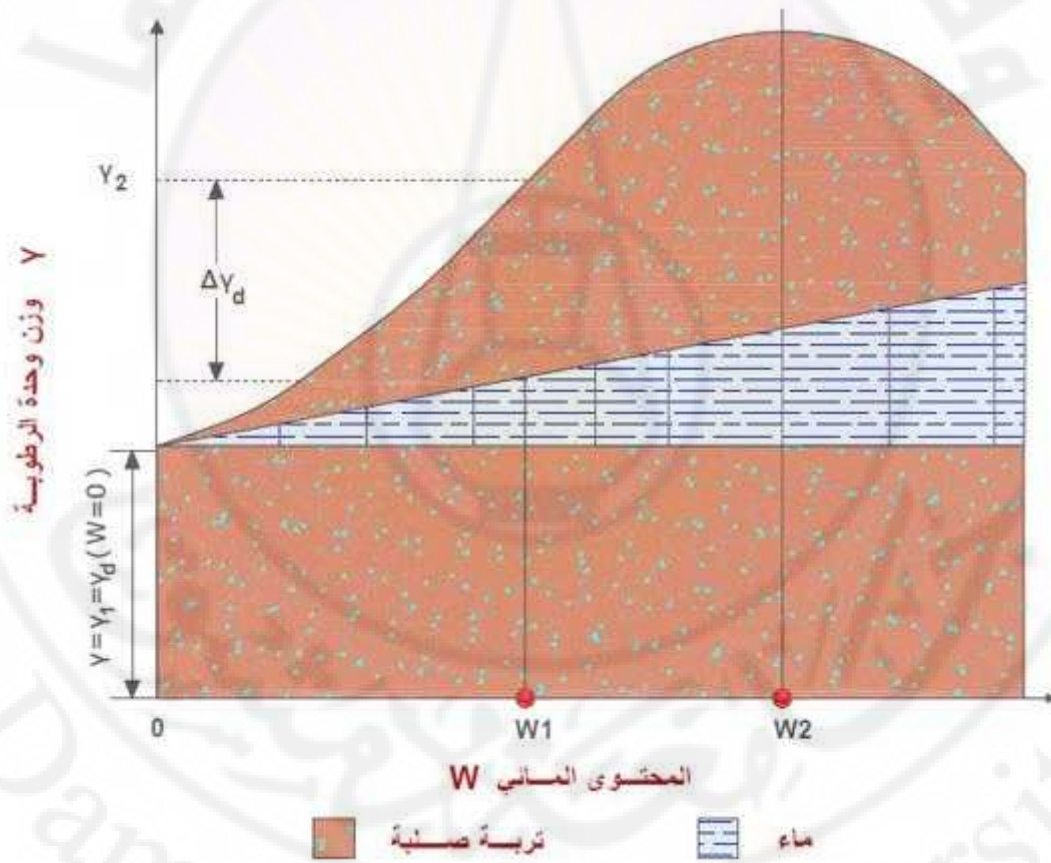
وتتحرك لموضع تصبح فيه أكثر استقراراً وبالتالي تزداد كثافتها. إن قيم الوزن الحجمي للتربة بعد عملية الرص تزداد كلما زادت قيم محتوى الرطوبة وهذا ما يوضحه الشكل (1.6) .

في هذا الشكل، لاحظ أنه عند محتوى الرطوبة مساوي للصفر $w = 0$ فإن قيم الوزن الحجمي الرطب (γ) يكون مساوي للوزن الحجمي الجاف (γ_d) :

$$\gamma = \gamma_d(w=0) = \gamma_1$$

عندما يزداد محتوى الرطوبة تدريجياً ومن أجل نفس طاقة الرص المستخدمة لرص التربة، فإن وزن واحدة الحجم للأجزاء الصلبة يزداد تدريجياً. فمثلاً عند رطوبة التربة : $w = w_1$ ، فإن :

$$\gamma = \gamma_2$$



الشكل (1.6) : مبادئ الرص

□

وبالتالي فإن قيمة الوزن الحجمي الجاف عند محتوى رطوبة محدد ($w = w_1$) يعطى بالعلاقة :

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

لكن وبعد محتوى رطوبة معين $w = w_2$ (الشكل 1.6)، نلاحظ أن أي زيادة في قيم محتوى الرطوبة تؤدي إلى نقصان في قيم الوزن الحجمي الجاف. هذه الظاهرة تنشأ بسبب أن الماء أصبح يملأ الفراغات التي يمكن أن تملأ بواسطة الحبيبات الصلبة. إن محتوى الرطوبة الموافق للوزن الحجمي الجاف الأعظمي المطلوب عادة يشار له بمحتوى الرطوبة الأمثلي w_{opt} .

التجارب المخبرية التي تستخدم لحساب قيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي للرص وقيم محتوى الرطوبة الأمثلي تسمى بتجربة بروكتور (Proctor 1933). والعملية اللازمة للقيام بهذه التجربة مشروحة بالفقرة التالية.

2.6 تجربة بروكتور القياسية (النظامية)

في تجربة بروكتور القياسية (النظامية)، يتم رص التربة ضمن قالب حجمه 944 سم³ ، أما قطره فهو 101.6 mm. خلال التجربة، يتم تركيب القالب على صفيحة معدنية تسمى القاعدة كما هو مبين في الشكل (2.6 a). في البداية، يتم إحضار التربة ونبدأ بترطيبها مع كميات مختلفة من الماء وبعد ذلك يتم رصها ضمن القالب من خلال ثلاث طبقات متساوية السماكة، الرص يتم بواسطة مطرقة (الشكل 2.6 b) بعدد ضربات 25 ضربة لكل طبقة، وزن المطرقة المستخدم بهذه التجربة حوالي 2.5 Kg وهذه المطرقة تسقط سقوط حر من مسافة 30.5 mm. الشكل رقم 2.6 c هو عبارة عن صورة للمعدات المستخدمة في المخبر للقيام بتجربة الرص القياسية.

من أجل كل تجربة ، يمكن حساب الوزن الحجمي الرطب γ من خلال العلاقة:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}} \quad (1.6) \square$$

حيث:

W = وزن التربة المرصوفة في القالب .

$V_{(m)}$ = حجم القالب.

ومن أجل كل تجربة فإن محتوى الرطوبة في التربة المرصودة يحدد في المخبر. ومع معرفة قيم محتوى الرطوبة يمكن حساب قيم الوزن الحجمي الجاف من خلال العلاقة:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (2.6)$$

حيث $w(\%)$ = النسبة المئوية لمحتوى الرطوبة .

إن قيم الوزن الحجمي الجاف γ_d والتي تم حسابها من خلال المعادلة (2.6)، يتم رسمها مع تغير قيم محتوى الرطوبة. هذا الرسم يعطينا منحنى يسمى بمنحنى الرص لتجربة بركتور النظامية. من خلال هذا المنحنى، يمكننا الحصول على قيمة الوزن الحجمي الجاف الأعظمي وقيمة محتوى الرطوبة الأمثلي للتربة. الشكل (3.6) يظهر مخطط تجربة بركتور القياسية لتربة سلتية - غضارية.

إن خطوات تجربة بركتور القياسية (النظامية) موجودة في المواصفات الأمريكية والتي تشرح هذه التجربة سواء من خلال المواصفة : ASTM - D-698 (2007) أو من خلال مواصفة الآشتو AASHTO - T-99 (1982) .

فمن أجل محتوى الرطوبة المعطى w ودرجة الإشباع S ، يمكن حساب الوزن الحجمي الجاف كالتالي: بالعودة إلى الفصل الثالث (المعادلة 16.3) ومن أجل أي تربة لدينا العلاقة التالية :

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

حيث :

γ_d = الوزن الحجمي الجاف للأجزاء الصلبة.

G_s = الوزن النوعي النسبي للتربة.

γ_w = الوزن الحجمي الرطب.

e = معامل المسامية.

أيضاً ومن الفصل الثالث ومن خلال المعادلة (18.3) لدينا :

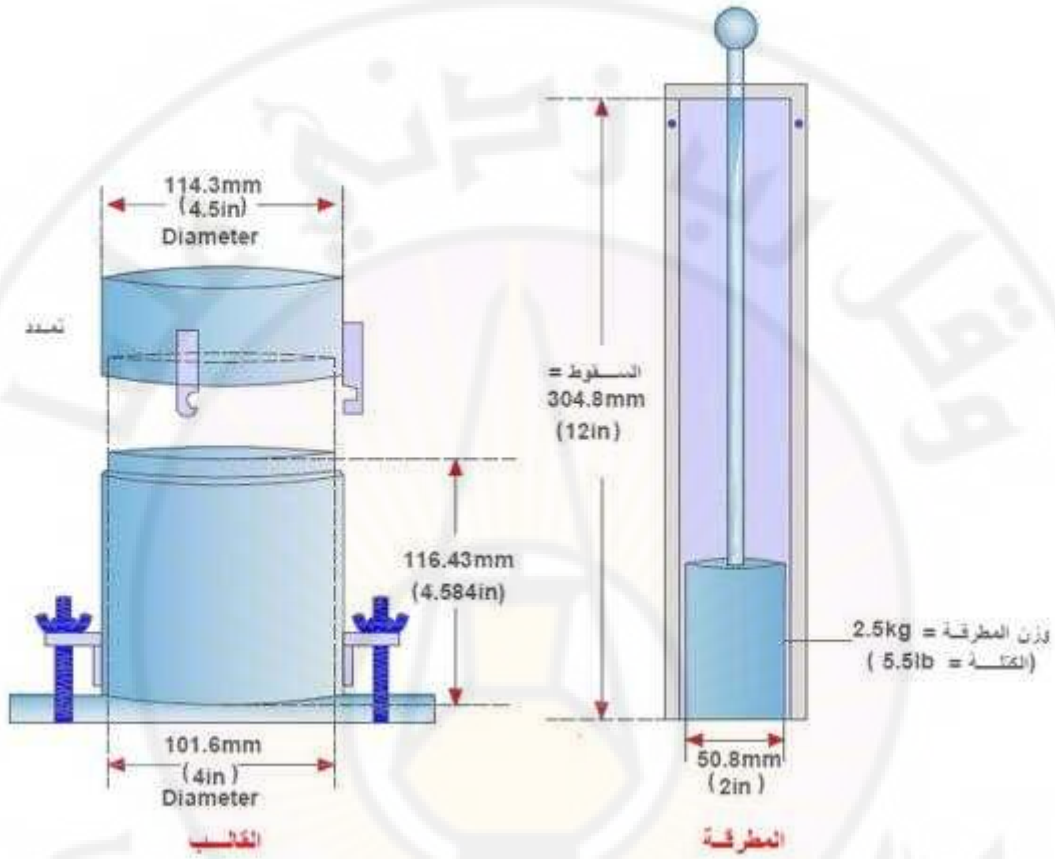
$$S \cdot e = G_s \cdot w$$

أو :

$$e = \frac{G_s \cdot w}{S}$$

نجد أن قيم الوزن الحجمي الجاف يعطى بالعلاقة التالية:

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + \frac{G_s \cdot w}{s}} \quad (3.6)$$



الشكل (2.6) : أبعاد القالب لتجربة بركتور القياسية (النظامية) المطرقة والقالب مع أبعاده



الشكل (2.6 c) : صورة للمعدات المستخدمة بالتجربة

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

من جهة أخرى، ومن أجل محتوى رطوبة معلوم لتربة معينة، فإن قيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي النظري لهذه التربة يتحقق عندما تكون درجة الإشباع مساوية للقيمة $S = 100\%$ ، أي عندما لا يوجد هواء ضمن فراغات التربة. لذلك فإن قيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي من أجل محتوى رطوبة مع فراغات هواء معدومة ضمن جسم التربة يمكن حسابه من خلال تعويض درجة الإشباع في المعادلة 3.6 بالقيمة: $(S = 1)$ ، فنجد العلاقة التالية :

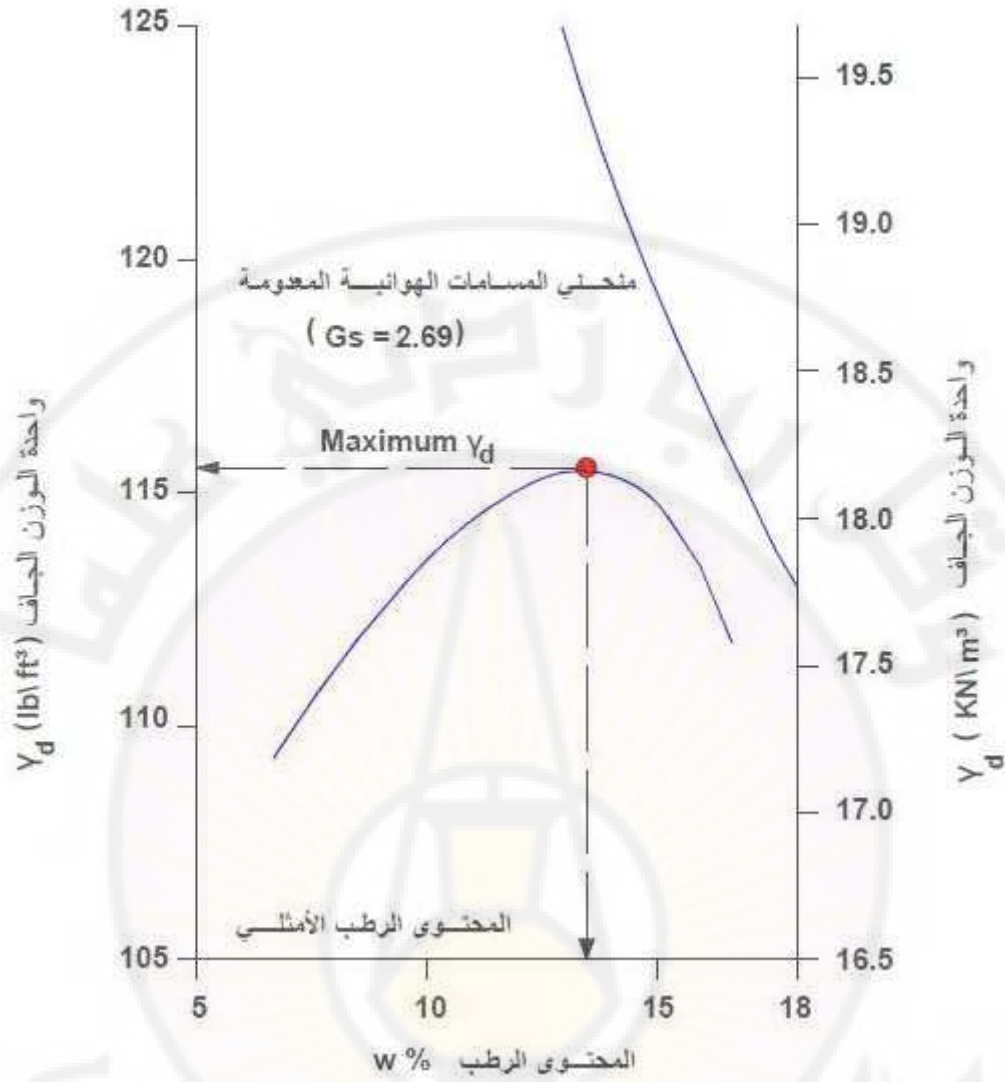
$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + w \cdot G_s} = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_s}} \quad (4.6)$$

حيث : γ_{zav} = الوزن الحجمي لفراغات هواء مساوية للصفر (المسامات الهوائية معدومة).
وللحصول على قيم مختلفة لقيم γ_{zav} مع تغير محتوى الرطوبة، يتم استخدام الخطوات التالية :

1. يتم تحديد الوزن الحجمي للأجزاء الصلبة.
2. معرفة الوزن الحجمي للماء (γ_w) .
3. نفترض قيم مختلفة للرطوبة (w) مثل 5%، 10%، 15% وهكذا ...
4. نستخدم المعادلة (4.6) لحساب γ_{zav} من أجل قيم مختلفة للرطوبة.

الشكل (3.6) المبين أظهر أيضاً تغيير γ_{zav} مع محتوى الرطوبة وموقعها النسبي بالنسبة لمنحني الرص.

يجب أن نعلم أنه وتحت أي ظرف يجب أن لا يقع أي جزء من منحني الرص على يمين منحني المسامات الهوائية المعدومة.



الشكل (3.6) : نتائج تجربة الرص القياسية (النظامية) لترب سلتية

3.6 العوامل المؤثرة على الرص

في الفقرة السابقة، وجدنا أن محتوى الرطوبة له تأثير كبير على درجة الرص اللازم تحقيقها لتربة معينة. لكن بالإضافة لمحتوى الرطوبة هناك عوامل أخرى هامة تؤثر على نتائج الرص وهي : نوع التربة وطاقة الرص (الطاقة لواحدة الحجم). وأهمية هذين العاملين مشروحة بشكل مفصل في الفقرتين التاليتين.

1.3.6 تأثير نوع التربة

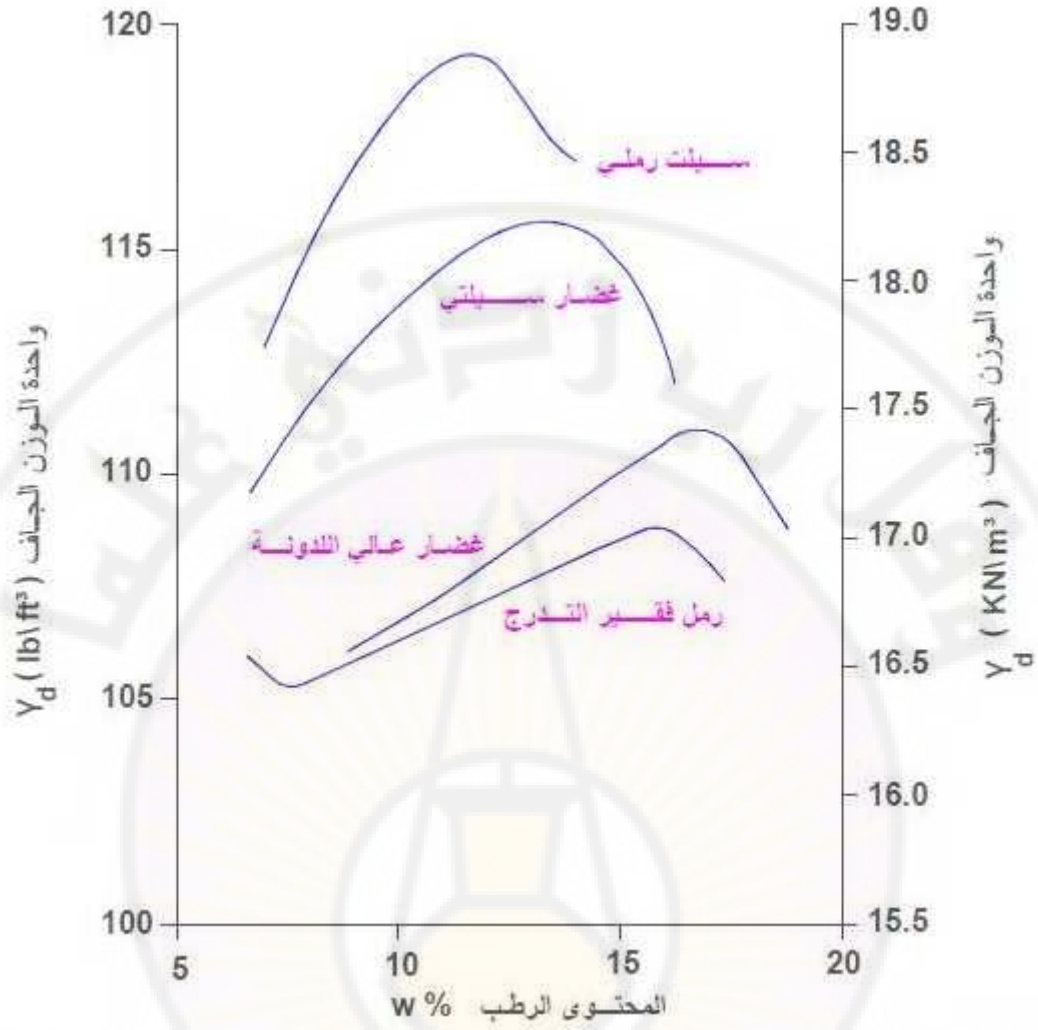
نوع التربة - والذي نعبر عنه من خلال : توزيع التدرج الحبي، شكل حبيبات التربة، الوزن النوعي للأجزاء الصلبة وكمية الفلزات الغضارية الموجودة في التربة - لها تأثير كبير على قيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي ومحتوى الرطوبة الأمثلي الناتجين من خلال تجربة الرص.

الشكل (4.6) يظهر منحنيات رص نموذجية لأربع أنواع مختلفة من الترب. إن نتائج التجارب المخبرية على هذه الترب تمت حسب المواصفة ASTM- D-698.

رأينا في الشكل (3.6) أن منحنى الرص للترب الغضارية يكون بشكل الجرس. أما في الشكل (4.6) يظهر منحنى الرص من أجل الترب الرملية، هذا المنحنى يبين أن الوزن الحجمي الجاف يميل بالنسبة للرمل بالبداية إلى النقصان مع زيادة محتوى الرطوبة ومن ثم يزداد إلى قيمة عظمى مع ازدياد الرطوبة.

النقصان الأولي للوزن الحجمي الجاف مع زيادة محتوى الرطوبة يعود إلى تأثير قوى الشد الناتجة من الخاصية الشعرية. وعند محتوى رطوبة منخفض فإن خاصية الشد الشعري في الماء المسامي تقلل من إمكانية حركة حبيبات التربة وبالتالي ترتص بشكل أكبر.

درس السيدان Lee and Suedkamp في العام (1972) منحنيات الرص لأكثر من 35 عينة من عينات التربة. وقاما باستنتاج أربع أنواع مختلفة من منحنيات الرص. هذه المنحنيات مبينة في الشكل (5.6). الجدول المبين قبل الشكل (5.6) يلخص أنواع منحنيات الرص التي يمكن أن نواجهها في مختلف أنواع الترب بالاعتماد على الشكل (5.6).

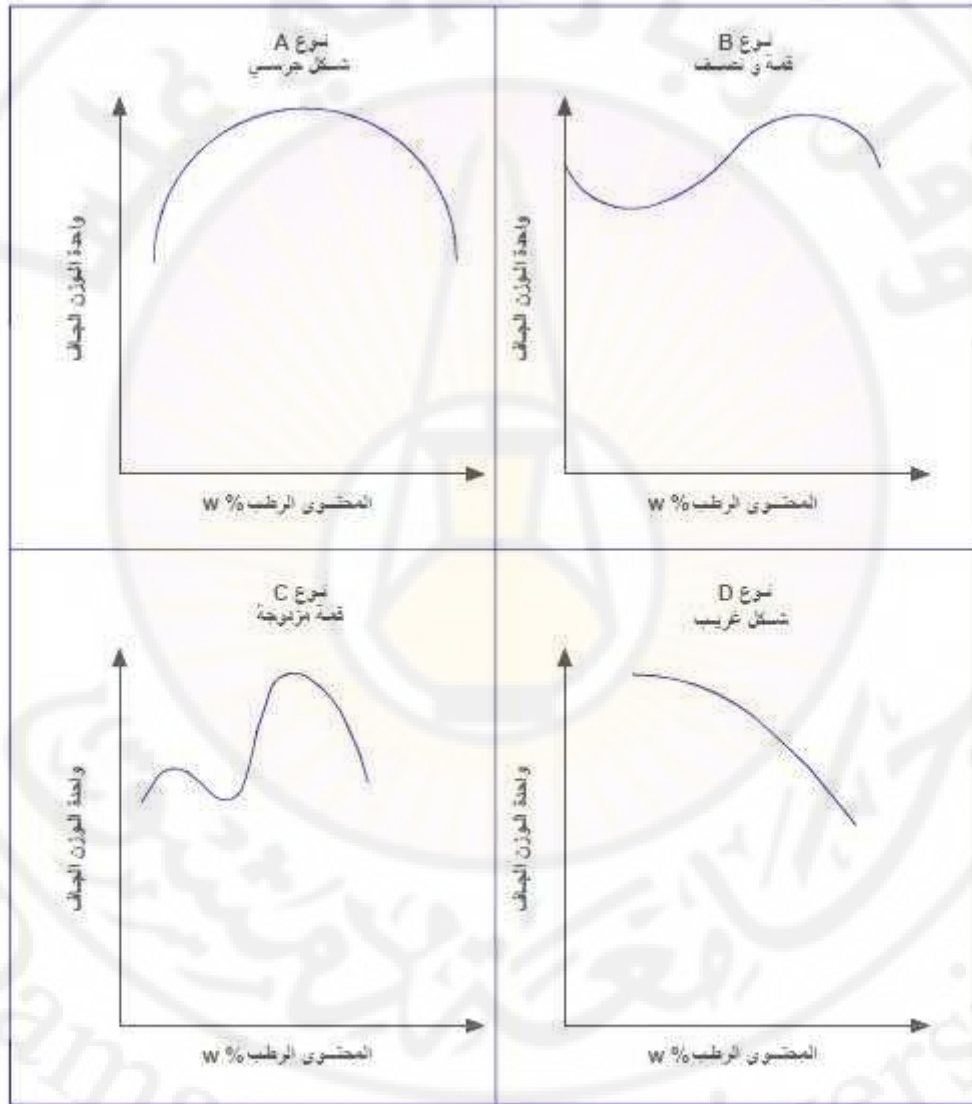


الشكل (4.6) : منحنيات نموذجية لتجربة بركتور القياسية

وفق المواصفة القياسية (ASTM - D698)

□

حد السيولة (%)	تسمية المنحني	نموذج منحني الرص بحسب الشكل (5.6)
ما بين 30 و 70	قمة المنحني واضحة (جرسي)	A
أقل من 30	قمتين للمنحني (اصغرية) و (أعظمية)	B
أقل من 30 وأكثر من 70	قمتين أعظمتين (مزوجة)	C
أكثر من 70	منحني متناقص (غريب)	D



الشكل 5-6 : أشكال مختلفة لمنحنيات انضغاطية لتربة مختلفة

□

الشكل (5.6) : منحنيات الرص الممكنة التي يمكن أن تظهر لنا أثناء التجارب

(a) قمة واحدة، (b) قمتين أصغرية وقمة أعظمية، (c) قمتين أعظمتين، (d) منحني متناقص

2.3.6 تأثير طاقة الرص

إن طاقة الرص لوادة الحجم من التربة المستخدمة في تجربة بروكتور القياسية والمشروحة في الفقرة 2.6 يمكن أن تعطى بالمعادلة :

$$E = \frac{(\text{مسافة سقوط المطرقة}) \times (\text{وزن المطرقة}) \times (\text{عدد الطبقات}) \times (\text{عدد الضربات})}{\text{حجم القالب}} \quad (5.6)$$

وهي بالوحدات الدولية :

$$E = \frac{(25) \times (3) \times \left(\frac{2.5 \times 9.81}{1000} \text{ kN}\right) \times (0.305 \text{ m})}{9.44 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 594 \text{ kN} - \frac{\text{m}}{\text{m}^3}$$

$$= 600 \text{ kN} - \text{m}/\text{m}^3$$

أو بالوحدات الانكليزية :

$$E = \frac{(25) \times (3) \times (5.5) \times (1)}{\left(\frac{1}{30}\right)} = 12.375 \text{ ft} - \text{lb}/\text{ft}^3$$

$$= 12.4 \text{ ft} - \text{lb}/\text{ft}^3$$

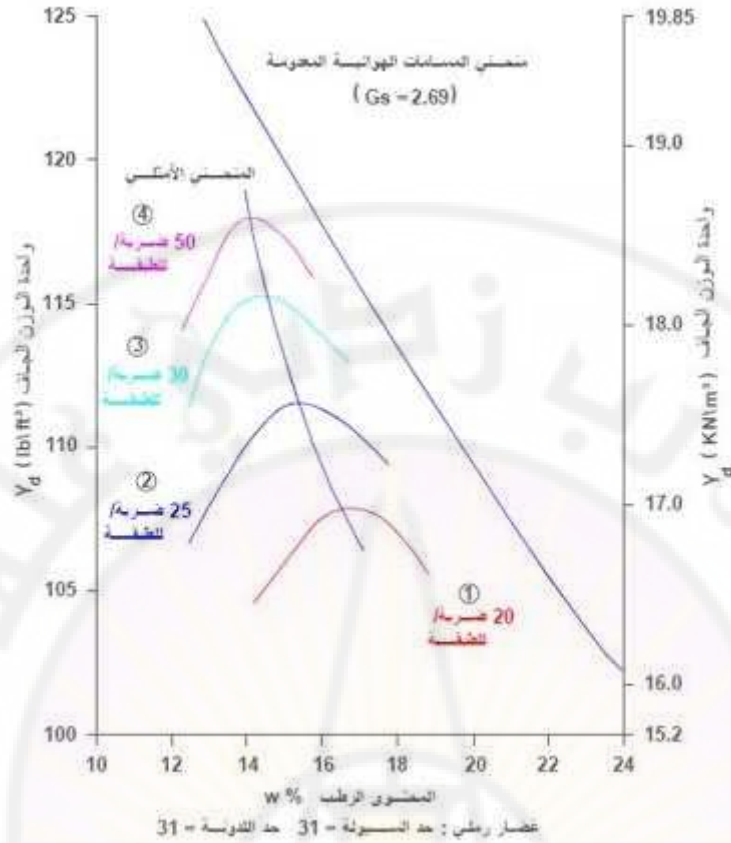
في حال تغير طاقة الرص لوادة الحجم من التربة، فإن منحنى الرطوبة - الوزن الحجمي سوف يتغير أيضاً. ويمكننا أن نشرح هذه الحقيقة بمساعدة الشكل (6.6).

هذا الشكل يظهر أربع منحنيات رص لتربة رملية غضارية. إن قالب ومطرقة بروكتور القياسية (النظامية) تم استخدامهما للحصول على منحنيات الرص هذه. إن عدد طبقات التربة المستخدمة للرص هي ثلاثة طبقات لكل الحالات وعدد ضربات المطرقة لكل طبقة يتراوح بين 20 إلى 50 ضربة، والتي تتغير حسب طاقة الرص لوادة الحجم.

من خلال الشرح السابق والشكل (6.6) نجد أنه :

1. عندما تزداد طاقة الرص فإن الوزن الحجمي الجاف الأعظمي للرص يزداد أيضاً.
 2. عندما تزداد طاقة الرص فإن محتوى الرطوبة الأمثلي يتناقص بعض الشيء.
- هذين الأمرين صحيحين لكل أنواع الترب، وعلى كلٍ فإن درجة الرص ليست تابعة فقط لطاقة الرص.

□



الشكل (6.6) : أثر طاقة الرص على رص التربة الرملية الغضارية

4.6 تجربة بروكتور المعدلة

مع تطور المداخل الثقيلة واستخدامها في مجال رص التربة، فإن تجربة بروكتور القياسية تم تعديلها لتعطي تمثيل أفضل للحالة الحقلية. تسمى هذه النسخة المحدثة من التجربة بتجربة بروكتور المعدلة (ASTM Test Designation D-1557) و (AASHTO Test Designation T-180). من أجل إجراء تجربة بروكتور المعدلة يتم استخدام نفس القالب بحجم (1/30 ft³) 944 cm³، كما في تجربة بروكتور القياسية، ولكن يتم رص التربة على خمس طبقات متساوية السماكة بواسطة مطرقة وزنها لهذه التجربة هو : 4.54 Kg وارتفاع سقوطها الحر 457 mm، وعدد ضربات المطرقة لكل طبقة هو 25 ضربة كما في تجربة بروكتور القياسية. الشكل (7.6) يظهر مقارنة بين المطارق المستخدمة في تجارب بروكتور القياسية والمعدلة .

□



الشكل (7.6) : مقارنة بين مطارق تجارب بركتور القياسية (النظامية) وتجارب بركتور المعدل

إن طاقة الرص لهذا النوع من تجارب الرص يمكن اعتمادها من خلال :

$$\square 2700 \text{ kN} - \text{m/m}^3 (56,000 \text{ ft-lb/lb}^3)$$

إن تجربة بروكتور المعدلة تزيد من طاقة الرص، وبالتالي فإن تجربة بركتور المعدل تعطي زيادة في قيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي. هذه الزيادة في قيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي يرافقها نقصان في محتوى الرطوبة الأمثلي.

في النقاشات السابقة، وجدنا أن المواصفات المعطاة من أجل تجارب بروكتور والمعتمدة من قبل ASTM و AASHTO والخاصة بحجم القالب وعدد الضربات، هي التي يتم اعتمادها للترب الحبيبية الناعمة المارة من المنخل الأمريكي رقم 4.

□

هناك ثلاث نظريات مقترحة من أجل حجم القالب وعدد الضربات لكل طبقة وقطر الحبيبات الأعظمي للتربة المستخدمة في التجربة وذلك بحسب المواصفة المستخدمة. ملخص لهذه النظريات معطى في الجدول (1.6).

الجدول (1.6) : ملخص نظريات الرص لتجارب بركتور القياسية (النظامية) وبركتور المعدلة

Description		Method A	Method B	Method C
Physical data for the tests	Material	Passing No. 4 sieve	Passing 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) sieve	Passing 19 mm ($\frac{3}{4}$ in.) sieve
	Use	Used if 20% or less by weight of material is retained on No. 4 (4.75 mm) sieve	Used if more than 20% by weight of material is retained on No. 4 (4.75 mm) sieve and 20% or less by weight of material is retained on 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) sieve	Used if more than 20% by weight of material is retained on 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) sieve and less than 30% by weight of material is retained on 19 mm ($\frac{3}{4}$ in.) sieve
	Mold volume	944 cm ³ ($\frac{1}{30}$ ft ³)	944 cm ³ ($\frac{1}{30}$ ft ³)	2124 cm ³ ($\frac{1}{133}$ ft ³)
	Mold diameter	101.6 mm (4 in.)	101.6 mm (4 in.)	152.4 mm (6 in.)
Standard Proctor test	Mold height	116.4 mm (4.584 in.)	116.4 mm (4.584 in.)	116.4 mm (4.584 in.)
	Weight of hammer	24.4 N (5.5 lb)	24.4 N (5.5 lb)	24.4 N (5.5 lb)
	Height of drop	305 mm (12 in.)	305 mm (12 in.)	305 mm (12 in.)
	Number of soil layers	3	3	3
Modified Proctor test	Number of blows/layer	25	25	56
	Weight of hammer	44.5 N (10 lb)	44.5 N (10 lb)	44.5 N (10 lb)
	Height of drop	457 mm (18 in.)	457 mm (18 in.)	457 mm (18 in.)
	Number of soil layers	5	5	5
	Number of blows/layer	25	25	56

وفيما يلي نعرض نتائج بعض الأبحاث التجريبية التي أجريت على عدة أنواع من الترب والتي قدمت علاقات تجريبية تربط ما بين الرطوبة أو الكثافة الجافة مع تغير الخواص الفيزيائية للتربة مثل حد السيولة أو حد اللدونة هذه النتائج للإطلاع فقط.

□

من هذه الأبحاث :

- الباحث **Omar** ورفاقه في العام (2003)، قدموا حديثاً نتائج لتجارب رص بروكتور المعدلة لمجموعة من عينات التربة وعددها 311 عينة. وكانت هذه العينات كتالي :

○ 45 عينة منها ترب بحصية GP، GP-GM، GW، GW-GM، GM،

○ 264 عينة كانوا لترب رملية :

SP-SM، (and SM، SC، SC-SM، SW، SP SW-SM)

○ اثنان منها كانت لتربة غضارية مع لدونة منخفضة (CL) .

كل تجارب الرص تم إجراؤها باستخدام المواصفة ASTM - 1557 (النظرية C) لتجنب معامل تصحيح كبير للقطر. وبناءً على هذه التجارب، تم تطوير العلاقات التالية :

$$\rho_d(kg/m^3) (kg/m^2) = [4.804.574G_s - 195.55(LL)^2 + 156.971(R \neq 4)^{0.5} - 9.527.830]^{0.5} \quad (6.6)$$

$$\ln(w_{opt}) = 1.195 \times 10^{-4}(LL)^2 - 1.964G_s - 6.617 \times 10^{-5}(R \neq 4) + 7.651 \quad (7.6)$$

حيث :

$\rho_{d(max)}$ = الكثافة الجافة العظمى (Kg/m^3)

W_{opt} = محتوى الرطوبة الأمثل (%) .

G_s = الوزن النوعي للأجزاء الصلبة.

LL = حد السيولة بالنسبة المئوية.

$R\#4$ = نسبة المحجوز على المنخل رقم 4.

- الباحث **Gurtug and Sridharan (2004)** عرض علاقات لتغير قيم محتوى الرطوبة الأمثل وقيم الوزن الحجمي الجاف الأعظمي مع تغير قيم حد اللدونة (PL) للترب المتماسكة. وهذه العلاقات يمكن التعبير عنها بالتالي :

$$w_{opt}(\%) = [1.95 - 0.38(\log CE)](PL) \quad (8.6)$$

$$\gamma_{d(max)} \left(\frac{kN}{m^3} \right) = 22.68e^{-0.0183w_{opt}(\%)} \quad (9.6)$$

حيث : PL = حد اللدونة (%) ، CE = طاقة الرص (KN-m/m³) .

ومن أجل تجربة البروكتور المعدلة، CE = 2700 KN/m³ .

لذلك يمكننا كتابة :

$$\gamma_{d(max)} \left(\frac{kN}{m^3} \right) = 22.68e^{-0.012(PL)} \quad \square$$

□

$$\gamma_{d(max)} \left(\frac{kN}{m^3} \right) = 22.68e^{-0.012(PL)} \quad \square$$

□

المثال 1.6 :

نتائج تجربة بركتور القياسية معطاه في الجدول التالي :

رطوبة التربة (w %)	وزن التربة بالقالب (ليبرة)	حجم القالب (بالقدم المكعب)
10	3.78	1/30
12	4.01	1/30
14	4.14	1/30
16	4.12	1/30
18	4.01	1/30
20	3.90	1/30

والمطلوب :

(a) تحديد الوزن الحجمي الجاف الأعظمي للرص ومحتوى الرطوبة الأمثلي .

(b) احسب وارسم γ_d مقابل محتوى الرطوبة من أجل درجة إشباع :

$S = 80, 90, 100 \%$ (مثل، γ_{zav}) . ومعطى $G_s = 2.7$.

الحل :

الطلب الأول :

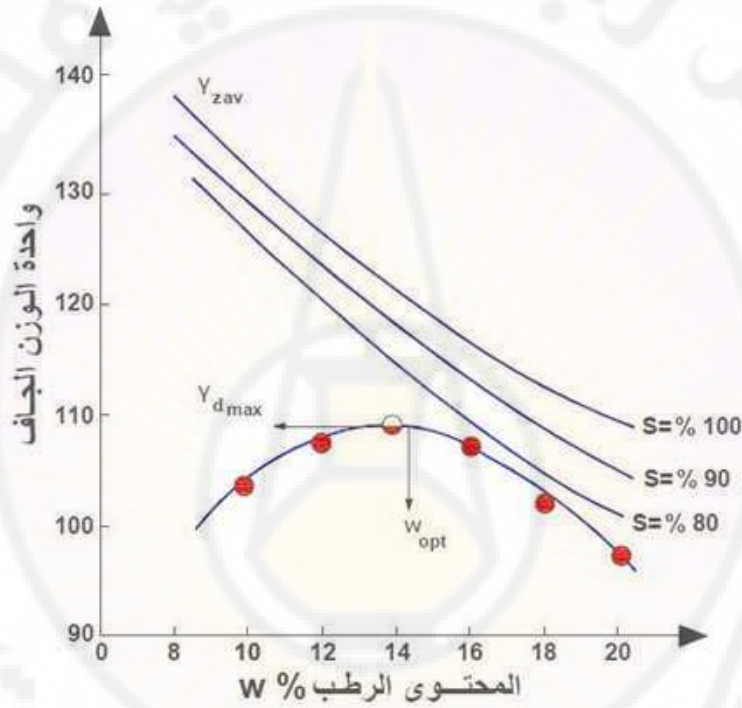
يتم تنظيم الجدول التالي :

الوزن الحجمي الجاف γ_d (lb/ft ³)	الرطوبة (w %)	الوزن الحجمي للتربة (γ (lb/ft ³))	وزن التربة (W (lb))	حجم القالب V (ft ³)
103.1	10	113.4	3.78	1/30
107.4	12	120.3	4.01	1/30
108.9	14	124.3	4.14	1/30
106.6	16	123.6	4.12	1/30
101.9	18	120.3	4.01	1/30
97.5	20	117	3.90	1/30

$$^a\gamma = \frac{W}{V}$$

$$^b\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\%}{100}}$$

المخطط الذي يربط تغيرات قيم γ_d مقابل تغيرات قيم الرطوبة w يظهر في أسفل الشكل (8.6). من المخطط نستطيع أن نرى أن قيمة الوزن الحجمي الجاف الأعظمي $\gamma_{d(max)} = 109 \text{ lb/ft}^3$ ومحتوى الرطوبة الأمثلي هو 14.4 % .



الشكل 8-6 : منحنيات توضح العلاقة بين المحتوى المائي - وحدة الوزن

الطلب الثاني :

من المعادلة (3.6) :

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{G_s w}{s}}$$

□

يمكن أن ننظم الجدول التالي :

γ_d (lb/ft ³)				
Gs	w (%)	S = 80 %	S = 90 %	S = 100 %
2.7	8	132.7	135.9	138.6
2.7	10	126.0	129.6	132.7
2.7	12	119.9	123.9	127.3
2.7	14	114.4	118.6	122.3
2.7	16	109.4	113.8	117.7
2.7	18	104.8	109.4	113.4
2.7	20	100.6	105.3	109.4

إن مخطط تغيرات قيم γ_d مقابل تغيرات قيم الرطوبة w من أجل درجات إشباع مختلفة موضحة أيضاً من الشكل (8.6).

المثال 6.2 :

من أجل تربة حبيبية، معطى التالي :

- $G_s = 2.6$
- حد السيولة من أجل الجزيئات المارة من المنخل رقم 40 = 20
- نسبة المحجوز على المنخل رقم 4 = 20 .

وباستخدام المعادلات (6.6) و (7.6). قدر الكثافة الجافة الأعظمية للرص ومحتوى الرطوبة الأمثلي بناءً على تجربة بروكتور المعدلة .

الحل :

من المعادلة (6.6) :

$$\rho_d(max) \left(\frac{kg}{m^3} \right) = [4804.574G_s - 195.55(LL)^2 + 156.971(R \# 4)^{0.5} - 9527.830]^{0.5}$$

$$= [4804.574(2.6) - 195.55(20)^2 + 156.971(20)^{0.5} - 9527.830]^{0.5} \\ = 1894 \text{ kg/m}^3$$

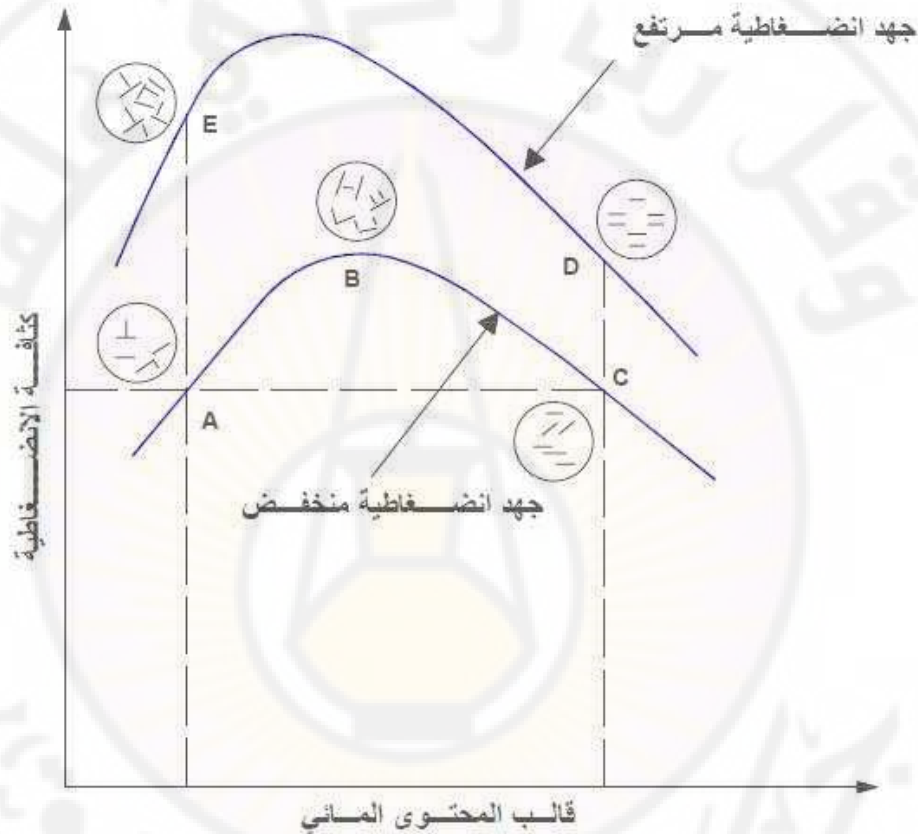
ومن المعادلة (7.6) :

$$\ln(w_{opt}) = 1.195 \times 10^{-4}(LL)^2 - 1.964G_s - 6.617 \times 10^{-5}(R \# 4) + 7.651 \\ = 1.195 \times 10^{-4}(20)^2 - 1.964(2.6) - 6.617 \times 10^{-5}(20) + 7.651 \\ = 2.591 \\ w_{opt} = 13.35 \%$$

□

5.6 بنية الترب الغضارية المرصوة

عند رص التربة، تتغير بنيتها وخاصة التربة الغضارية. أجرت العديد من الأبحاث من أجل فهم تأثير عملية الرص على بنية الترب الغضارية. ومن هذه الأبحاث، الدراسة التي قدمها المهندس Lambe في العام (1958) وكانت نتائج دراسته كما هي مبينة ومشروحة في الشكل (9.6).



الشكل 9-6 : تأثير الانضغاطية على منشأ مقام على ترب غضارية
Redrawn after Lambe 1958, a. With permission from ASCE

الشكل (9.6) : أثر عملية الرص على بناء وهيكل الترب الغضارية

الدراسة أثبتت، أنه في حال تم رص التربة الغضارية مع محتوى رطوبة في الجانب الجاف من الرطوبة الأمثلية، والذي تمثله النقطة A، سوف تعطي تربة ذات بنية صوفية flocculent وسبب هذه البنية هو أنه عند قيم محتوى رطوبة منخفض، فإن الطبقات المزدوجة المنتشرة من الأيونات المحيطة بحبيبات الغضار لا يمكن أن تتطور بشكل كامل، لذلك فإن التناثر الداخلي للحبيبات سوف

يقول. إن تناقص التنافر سيؤدي إلى ميلان عشوائي إضافي لحبيبات الغضار وبالتالي سوف نحصل على وزن حجمي جاف أقل.

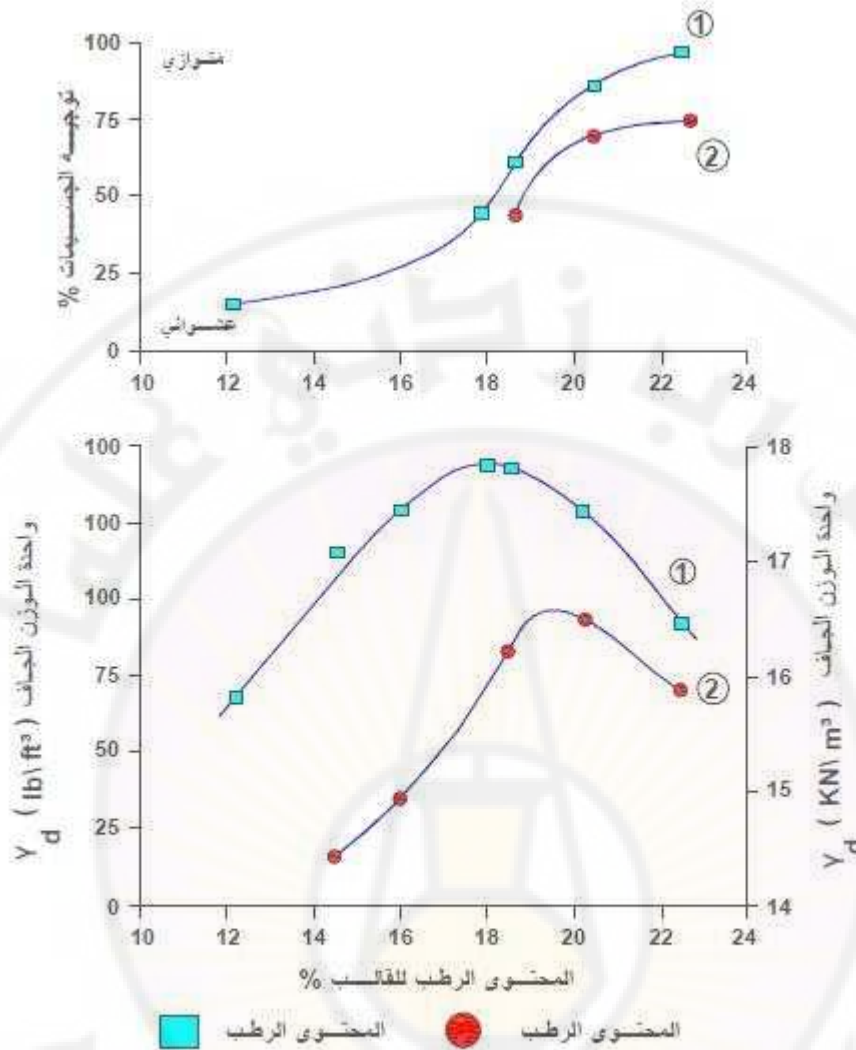
عندما يزداد محتوى الرطوبة للرص، كما تمثله النقطة B فإن الطبقات المزدوجة المنتشرة والمحيطه بحبيبات الغضار تتوسع، هذا الأمر يزيد من التنافر بين حبيبات الغضار وبالتالي يعطي درجة تلبد flocculation ووزن حجمي جاف أعلى.

الزيادة المستمرة في محتوى الرطوبة من النقطة B إلى C يعطي توسع أكثر في الطبقات المزدوجة. التوسع هذا يؤمن زيادة مستمرة في التنافر بين الحبيبات وبالتالي تبقى درجة إمالة كبيرة للحبيبات والتي تسبب بنية مشتتة بشكل أكبر أو أقل. في هذه الحالة فإن الوزن الحجمي الجاف يتناقص لأن إضافة الماء يقلل من تركيز الجزيئات الصلبة للتربة بالنسبة لواحدة الحجم.

عند محتوى رطوبة معطى، فإن طاقة رص كبيرة يمكن أن تعطي إمالة متوازنة لحبيبات الغضار وهذا الأمر يساعد على تشكل بيئة مشتتة أكثر. ضمن هذا الوضع نجد أن الحبيبات تقترب من بعضها بشكل أكبر ويكون لها وزن حجمي أعلى عند الرص. هذه الظاهرة يمكن أن ترى من خلال المقارنة بين النقطة A والنقطة E في الشكل (9.6).

أما في الشكل (10.6) نبين أثر تغير درجة إمالة الحبيبات مع محتوى الماء اللازم لرص غضار بوسطن الأزرق. ونفس النتائج أكدتها أعمال الباحث (Seed and Chan 1959) من أجل غضار الكاؤولين المرصوص.

□



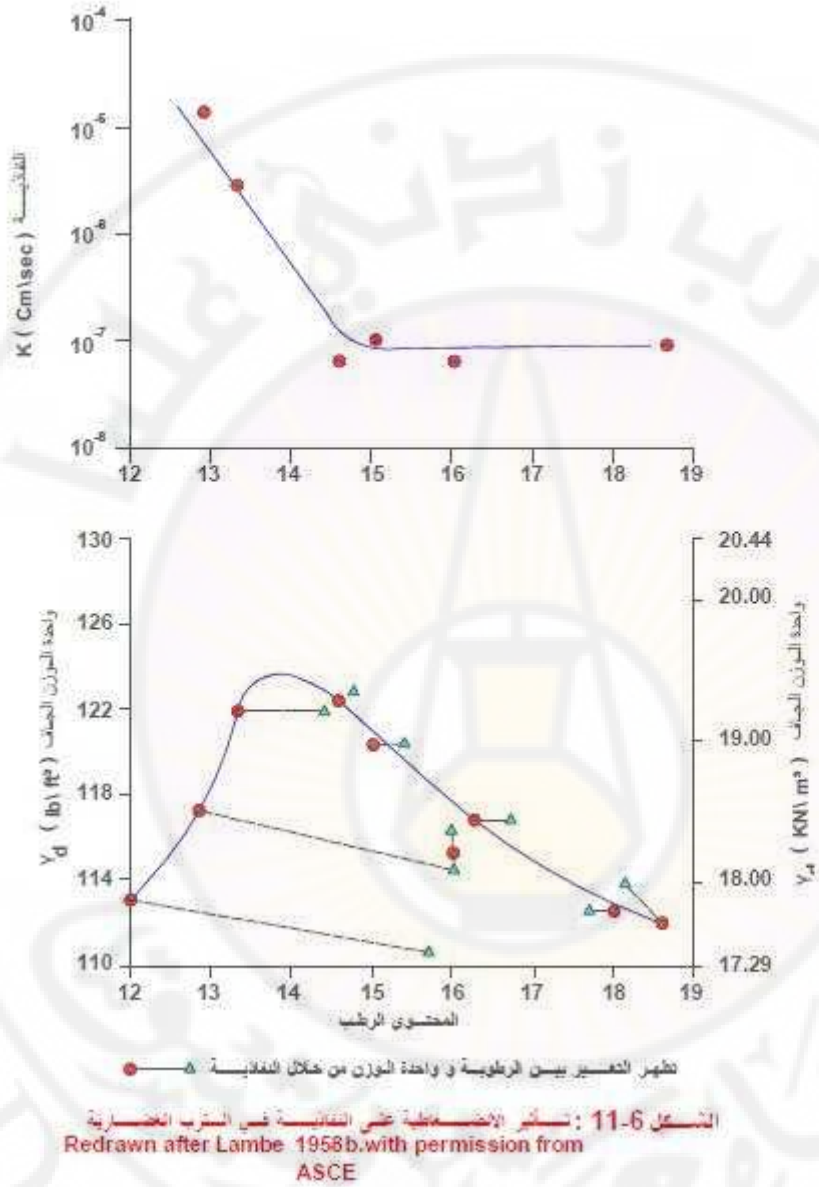
الشكل 10-6 : التوجيه مقابل المحتوى الرطب لغضار بوسطن الأزرق
After Lambe 1958,a.With permission from ASCE

الشكل (10.6) : أثر تغير درجة إمالة الحبيبات مع محتوى الماء اللازم لرص غضار بوسطن الأزرق

6.6 تأثير الرص على خواص الترب المتماسكة

إن عملية الرص تعطي تغير في بنية الترب المتماسكة. ونتيجة لهذا التغير في البنية، نجد تغير في الكثير من خواص التربة مثل : خواص الناقلية الهيدروليكية (النفاذية)، خواص الانضغاطية والمقاومة. الشكل (11.6) يظهر نتائج تجارب نفاذية (الفصل 7) على عينات رملية غضارية من جامايكا. العينات المستخدمة في التجربة تم رصها عند محتويات رطوبة مختلفة ولكن لنفس طاقة الرص.

الناقلية الهيدروليكية، والتي تقيس سهولة جريان الماء خلال التربة، نلاحظ أنها تتناقص مع ازدياد محتوى الرطوبة.



الشكل (11.6) : يظهر نتائج تجارب نفاذية (الفصل 7) على عينات رملية غضارية من جامايكا ويظهر أثر قوة الرص

ونلاحظ أننا نصل إلى قيمة دنيا تقريباً عند محتوى الرطوبة الأمثلي. وبعد محتوى الرطوبة الأمثلي، تزداد الناقلية الكهربائية قليلاً. إن قيمة الناقلية الكهربائية العالية على الجانب الجاف من محتوى الرطوبة الأمثلي هو بسبب الميلان العشوائي لحبيبات الغضار والتي تعطي فراغات أكبر.

خواص الانضغاطية أحادية البعد (سندرها في مقرر ميكانيك التربة 2) للترب الغضارية المرصوصة على الجانب الجاف من محتوى الرطوبة الأمثلي المبين في الشكل (12.6). وتحت ضغط منخفض، نجد أن التربة المرصوصة على الجانب الرطب من محتوى الرطوبة الأمثلي هو أكثر قابلية للانضغاط من التربة المرصوصة على الجانب الجاف من محتوى الرطوبة الأمثلي، وهذا ما يظهر في الشكل (12.6 a). وتحت ضغط مرتفع، الاتجاه يكون بالعكس تماماً، وهذا ما يظهر في الشكل (12.6 b). من أجل عينات مرصوصة على الجانب الجاف من محتوى الرطوبة الأمثلي، يميل الضغط إلى إمالة الحبيبات بشكل عمودي على اتجاه تطبيقها. الفراغات بين حبيبات الغضار تتناقص أيضاً بنفس الوقت. وبكل الأحوال، ومن أجل عينات مرصوصة على الجانب الرطب من الرطوبة الأمثلية، يمكننا الحصول على تشكيل للتربة متطابقة من أجل عينات مرصوصة على الجانب الجاف من الأمثلية. إن مقاومة الترب الغضارية المرصوصة (سندرها في مقرر ميكانيك التربة 2) تتناقص مع زيادة محتوى الرطوبة اللازمة. وهذا ما يظهر في الشكل (13.6)، ومبرر هذه النتيجة ظهرت بإجراء العديد من تجارب مقاومة الضغط غير المحصور على عينات مرصوصة لتربة سلتية غضارية. تم تحضير عينات التربة عن طريق الرص بالعجن. الشكل (13.6) يظهر العلاقة بين الوزن الحجمي الجاف ومحتوى الرطوبة للتربة. لاحظ أن العينات A، B، C تم رصها على التوالي على الجانب الجاف من محتوى الرطوبة الأمثلي بجانب محتوى الرطوبة الأمثلي، وعلى الجانب الرطب بالقرب من محتوى الرطوبة الأمثلي. نجد من الشكل أن مقاومة الضغط غير المحصور للينة المرصوصة q_u تتناقص بشكل كبير على الجانب الرطب من محتوى الرطوبة الأمثلي.

بعض الترب الانتفاخية الغضارية في الحقل لا تبقى مرصوصة ولكن تتوسع ويكبر حجمها عند دخول الماء وتتقلص وينقص حجمها عند فقدان الرطوبة. هذا التقلص والانتفاخ للتربة يمكن أن يسبب أجهادات خطيرة على أساسات المنشآت.

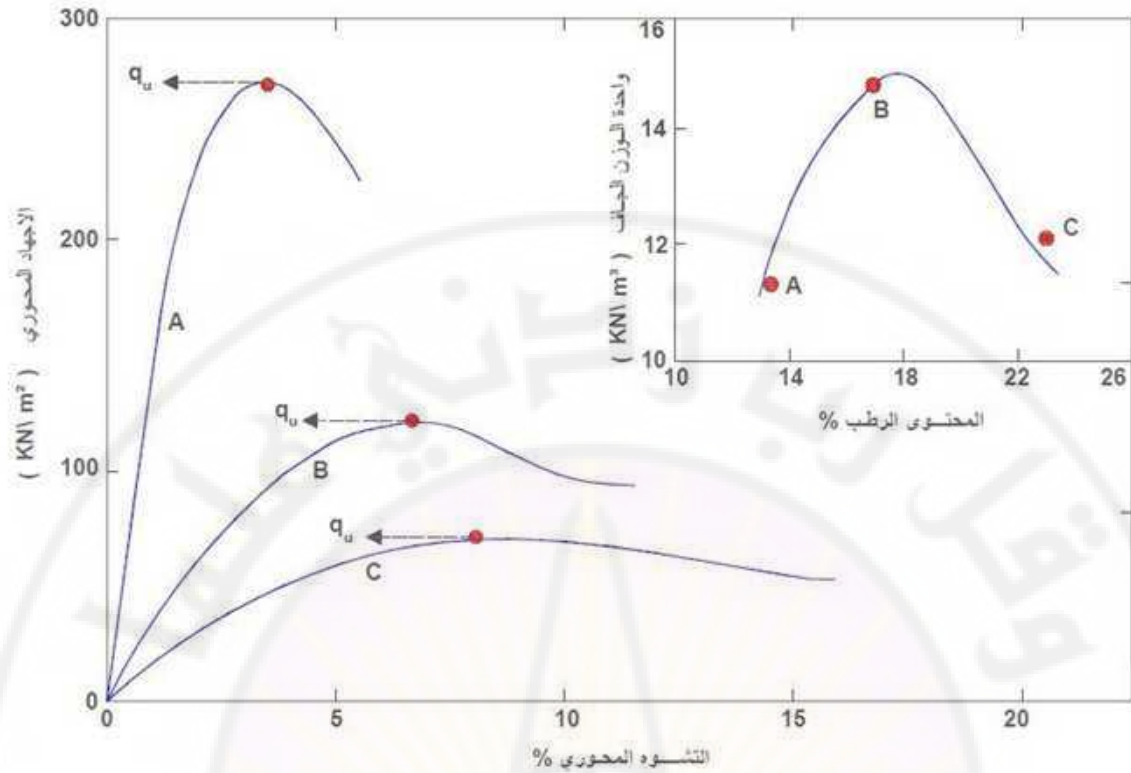
طبيعة التغير بين الانتفاخ والتقلص للترب الانتفاخية يظهر في الشكل (14.6). إن نتائج مخبرية كهذه ممكن أن تساعد مهندسي التربة على اختيار محتوى الرطوبة الأمثلي للرص لتقليل أثر الانتفاخ والتقلص للتربة.



الشكل 12-6 : تأثير الرصد على الانضغاطية باتجاه واحد في الترب الغضارية
Redrawn after Lambe 1958,a .With permission from
ASCE

الشكل (12.6) : خواص الانضغاطية أحادية البعد للترب الغضارية المرصودة على الجانب الجاف من محتوى الرطوبة الأمثل تحت تأثير ضغط تشديد منخفض وضغط تشديد مرتفع

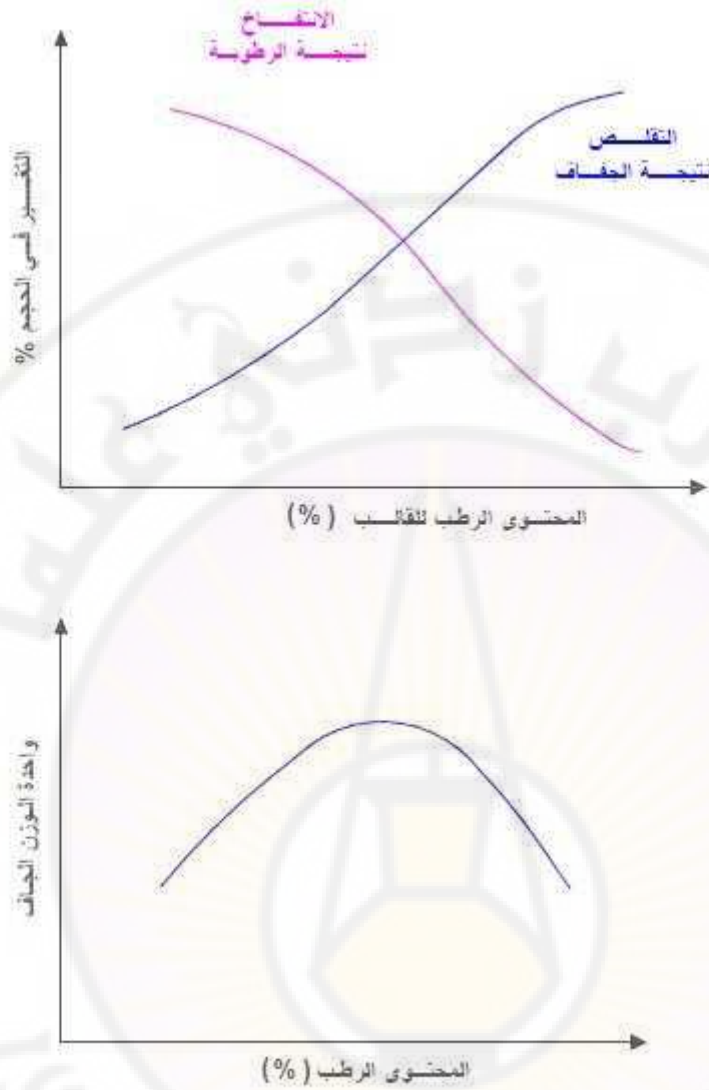
□



الشكل 6-13 : تجربة الاتضاغطية غير المحصورة على عينات
مرصوفة من الغضار السلتية

الشكل (13.6) : تجربة الضغط الحر وإظهار تناقص مقاومة الترب الغضارية المرصوصة مع زيادة محتوى الرطوبة اللازمة

1



الشكل 14-6 : أنواع طبيعية للتمدد و تقلص التربة الطبيعية

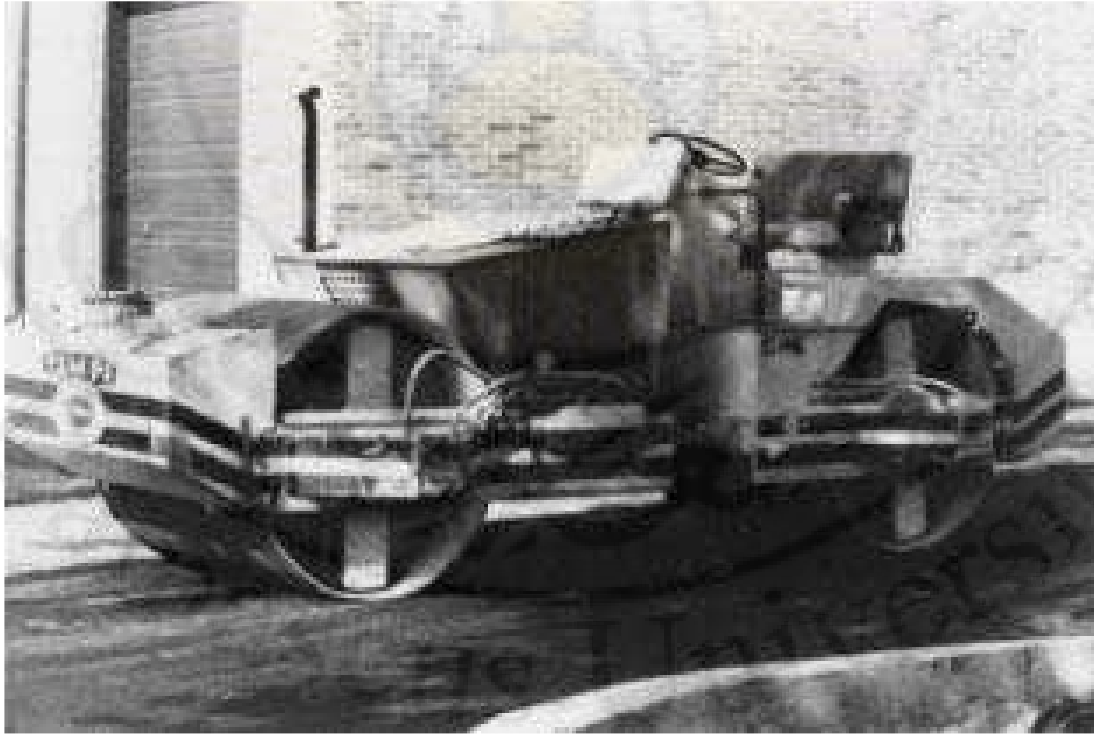
الشكل (14.6) : طبيعة التغير بين الانتفاخ والتقلص للتربة الانتفاخية

□

7.6 الرص الحقلي

معظم عمليات رص التربة بالحقل تتم بواسطة المداخل. الأنواع الأربعة من المداخل والأكثر شيوعاً والمستخدمه في الحقل هي :

1. مداخل ذات الدواليب الملساء (أو مداخل الاسطوانة الملساء).
 2. مداخل دواليب المطاط الهوائية.
 3. مداخل أرجل الغنم.
 4. المداخل الزجاجية .
- **المداحل ذات الدواليب الملساء (الشكل 15.6)** هي مداخل ملائمة لأعمال دحل طبقات التأسيس وأعمال التشطيب للردم بالترب الرملية والترب الغضارية. هذه المداخل تؤمن تلامس 100% ما بين التربة والدواليب، وخاصة مع تطبيق ضغط على الأرض بقيمة أعلى من 310 إلى 380 kN/m^2 . ولكنها غير ملائمة لإنتاج وزن حجمي عالي للرص عندما تستخدم لطبقات سميكة.



الشكل (15.6) : المداخل ذات الدواليب الملساء

- **مداخل دواليب المطاط الهوائية (الشكل 16.6)** تكون أفضل في العديد من الحالات من المداخل ذات الدواليب الملساء. هذه المداخل لها أحمال ثقيلة مع عدة صفوف من الدواليب. هذه الدواليب تكون قريبة من بعضها - أربع إلى ست دواليب في الصف الواحد . الضغط المطبق على الأرض تحت الدواليب يمكن أن يتراوح من 600 إلى 700 kN/m^2 ، وهي تعطي نسبة تغطية من 70 إلى 80 % . إن مداخل دواليب المطاط الهوائية يمكن استخدامها من أجل رص التربة الرملية والتربة الغضارية. ويتم تحقيق الرص عن طريق تراكم الضغط والعجن.

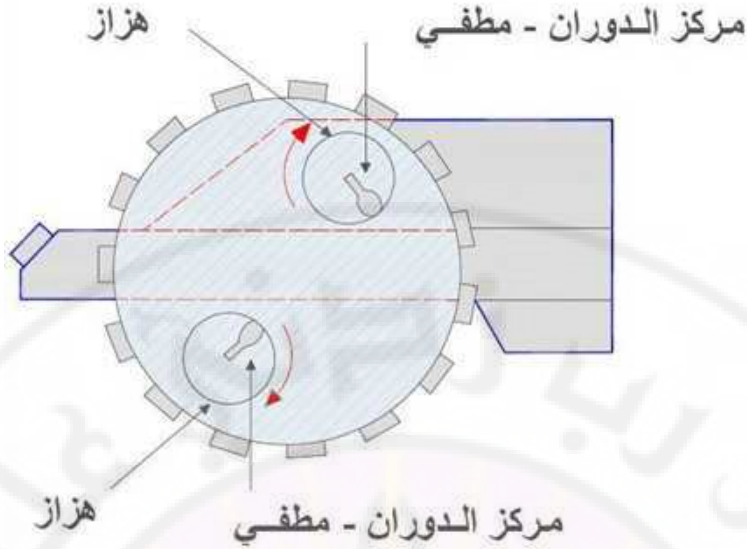


الشكل (16.6) : مداخل دواليب المطاط الهوائية



الشكل (17.6) : مداحل أرجل الغنم

- **مداحل أرجل الغنم (الشكل 17.6)** هي عبارة عن اسطوانة مع عدد كبير من النتوءات. مساحة كل نتوء تتراوح بين 25 إلى 85 cm^2 . هذه المداحل هي الأكثر كفاءة في رص التربة الغضارية. الضغط الواصل للأرض تحت النتوءات يمكن أن يتراوح بين 1400 إلى 7000 Kn/m^2 . خلال عملية الرص في الحقل، الأشواط الأولية ترص الجزء الأسفل من الطبقات، أما رص الطبقات العلوية والوسطى يتم بالمرحلة اللاحقة.
- **المداحل الرجاجة** تكون فعالة بشكل ممتاز في رص التربة الحبيبية. الهزاز ممكن أن يتصل مع اسطوانة ملساء ذات دواليب هواء مطاطية أو ذات أرجل غنم بحيث يعطي الهزاز فعالية رص أكبر للتربة. الشكل (18.6) يشرح مبادئ المداحل الرجاجة. تتم عملية الرج عن طريق دوران أنقال حول المركز.



الشكل 18-6 : مبدأ البكرة الاهتزازية

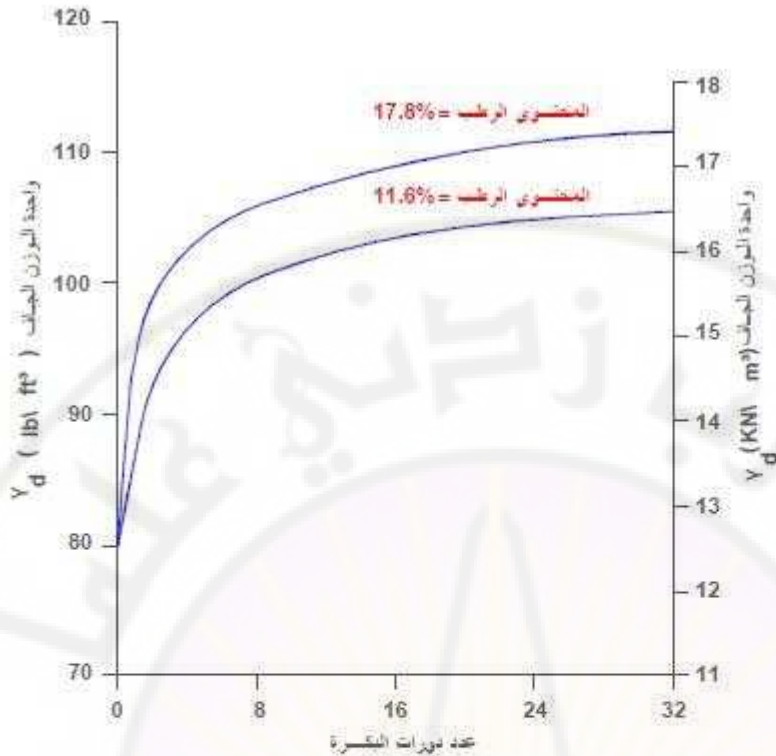
الشكل (18.6) : المداخل الرجاجة

- يمكن استخدام المداخل ذات الصفائح الرجاجة اليدوية لرص فعال للترب الحبيبية في حالة المساحات الضيقة ويمكن أن نصل مجموعة الصفائح الرجاجة المركبة على آليات. حيث يمكن استخدام الصفائح في حالة المناطق الأكثر حرية بالعمل .

ما هي العوامل التي تؤثر على الرص الحقلي

بالإضافة لنوع التربة ومحتوى الرطوبة، هناك عوامل أخرى يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار لتحقيق الوزن الحجمي للرص المطلوب بالحقل. هذه العوامل تتضمن : سماكة الطبقة، كثافة الضغط المطبق من آلة الرص، والمساحة المطبق عليها الضغط. هذه العوامل هامة لأن الضغط المطبق عند السطح يتناقص مع العمق، وهذا الأمر يسبب نقصان في درجة الرص.

خلال الرص، الوزن الحجمي الجاف للتربة يتأثر أيضاً بعدد الأشواط التي تقوم بها المدحلة. الشكل (19.6) يظهر مراحل تطور منحنى الرص لتربة سلتية غضارية. في هذا الشكل نلاحظ أن قيم الوزن الحجمي الجاف لتربة عند محتوى رطوبة محدد يزداد بشكل لا خطي حتى قيمة معينة مع زيادة عدد الأشواط. بعد هذه القيمة، نجد أن قيم الوزن الحجمي الجاف لتربة عند محتوى رطوبة محدد يبقى ثابت تقريباً. في معظم الحالات، حوالي 10 وحتى 15 شوطاً يمكن أن تعطي الوزن الحجمي الجاف الأعظمي الممكن الوصول له اقتصادياً.



غضار سلتني : حد السيولة = 43 قريضة الدواسة = 19

الشكل 19-6 : منحنيات النمو للغضار السلتني - علاقة بين واحدة الوزن الجاف و عدد الدورات - وزنها 84.5 كيلو نيوتن لثلاثة دواليب . عندما ترص التربة تكون بمقدار 229 ملم و ذلك للطبقات المفككة لحالة درجات مختلفة الترطيب

From Full-Scale Field Tests on - 3Wheel Power Rollers In
high way Research Bulletin ,272high way Research Board
.National Research Council
,Washington,D.C,1960.Figure,15p 23reproduced with
permission of the Transportation Reseach Board

الشكل (19.6) : مراحل تطور منحنى الرص لتربة سلتية غضارية

الشكل (20.6 a) يظهر تغير قيم الوزن الحجمي للرص مع العمق من أجل تربة رملية فقيرة التدرج الحبي حيث تم الرص بواسطة مدحلة رجاجة اسطوانية. تتم عملية الرج بواسطة تحرك وزن لا مركزي على مسنن وحيد الدوار مع الاسطوانة الرجاجة. وزن المدحلة المستخدمة في الرص هو 55.6 kN وقطر الاسطوانة بحدود 1.19 mm . الطبقات Lifts بقيت عند 2.44 m .

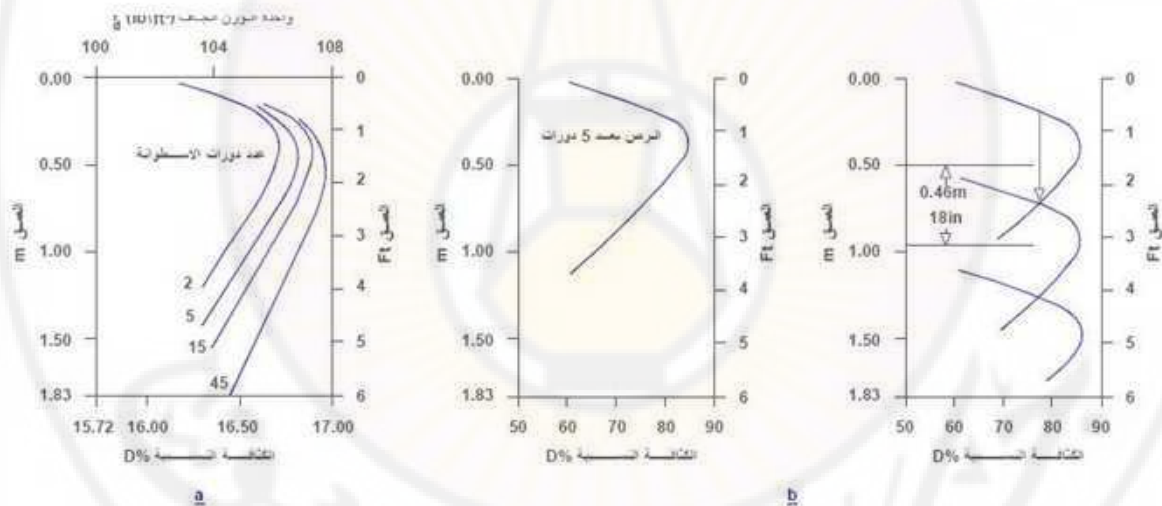
لاحظ أنه عند عمق معطى، الوزن الحجمي الجاف للرص يزداد مع ازدياد عدد أشواط المدحلة. ولكن وبعد عمق معين نلاحظ أن نسبة زيادة الوزن الحجمي تتناقص تدريجياً بعد 15 شوط وهذا ما

يظهره الشكل (a 6.20) الذي يوضح تغير الوزن الحجمي الجاف مع العمق من أجل عدد اشواط مدحلة معطى.

التجارب أثبتت أن تغير قيم الوزن الحجمي الجاف والكثافة النسبية D_r ، تصل إلى قيمة عظمى عند عمق حوالي 0.5m ويتناقص تدريجياً عند أعماق أكبر. هذا التناقص يظهر بسبب نقصان الضغط المحصور بالنسبة للسطح.

عندما يتم تحديد العلاقة بين العمق والكثافة النسبية (أو الوزن الحجمي الجاف) من أجل تربة معطاة مع عدد أشواط مدحلة معلوم، فإن تقدير السماكة التقريبية لكل طبقة هو تقريباً سهل. هذه النتائج مبينة في الشكل (b 20.6) وذلك حسب :

D'Appolonia، Whitman، and D'Appolonia، 1969.



الشكل 20-6 (a) : رص الرمل بالاهتزاز - التفسير في واحدة الوزن الجاف مع عدد دورات ، ارتفاع السقوط 2.44 متر .

(b) : تفسير سمك رقع المضغوط للحد الأدنى المطلوب لكثافة نسبية تساوي 75% مع خمس عدد دورات

After D'Appolonia, Whitman, and D'Appolonia, 1969, With permission from ASCE

الشكل (20.6) : (a) تغير قيم الوزن الحجمي للرص مع العمق من أجل رمل فقير التدرج الحبي حيث تم الرص بواسطة

مدحلة رجاجة اسطوانية

(b) : استنتاج سماكة الرص مع تغير الكثافة النسبية

8. 6 مواصفات الرص الحقلي

من أجل الأعمال الترابية وفي معظم المواصفات التنفيذية، يطلب من المنفذ تحقيق درجة رص حقلي محددة بوزن حجمي جاف نسبته محصورة من 90% إلى 95% من قيمة الوزن الحجمي الجاف الأعظمي المحدد في المخبر وفق تجربة بروكتور القياسية أو المعدلة. هذه العملية تعتبر توصيف للرص النسبي الذي يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية :

$$R\% = \frac{\gamma_{d(\text{حقلي})}}{\gamma_{d(\text{max - مخبر})}} \quad (10.6)$$

حيث R : الرص النسبي .

ومن أجل رص الترب الحبيبية، يمكن التعبير عن المواصفات من خلال الكثافة النسبية D_r أو الرص النسبي المطلوب. حيث لا يجب الخلط بين الرص النسبي والكثافة النسبية. وبالعودة إلى الفصل الثالث وبحسب مفهوم الكثافة النسبية، نستطيع أن نكتب :

$$D_r = \left[\frac{\gamma_{d(\text{حقلي})} - \gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})} - \gamma_{d(\text{min})}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(\text{max})}}{\gamma_{d(\text{حقلي})}} \right] \quad (11.6)$$

وبالمقارنة مع المعادلة (10.6) و (11.6) نستطيع القول أن :

$$R = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)} \quad (12.6)$$

حيث :

$$R_0 = \frac{\gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})}} \quad (13.6)$$

وبناءً على الاستنتاجات المقدمة من الباحثين (Lee and Singh 1971) المتعلقة بدراسة 47 عينة تربة، وجدوا أن هناك علاقة تربط ما بين القيمة R والقيمة D_r للترب الحبيبية مبينة بالعلاقة:

$$R = 80 + 0.2D_r \quad (14.6)$$

إن مواصفات الرص الحقلي والمحددة بناءً على الكثافة النسبية أو الرص النسبي تعتبر مواصفة مهمة ومطلوبة عند نهاية الأعمال الترابية. حيث على المنفذ أن يحقق وزن حجمي جاف مطلوب بغض النظر عن العملية الحقلية المتبعة لذلك.

أكثر ظروف الرص اقتصادية يمكن التعبير عنها بمساعدة الشكل (21.6)، الذي يبين ثلاث منحنيات رص وهي المنحنيات : C,B,A هذه المنحنيات هي لنفس التربة ولكن مع تغيير طاقة الرص.

من خلال تحليل النتائج نلاحظ أن المنحني A والذي يمثل حالة أكبر طاقة رص يمكن أن نحصل عليها من خلال الآلة الموجودة في الموقع. ولكي نحقق المواصفات، يجب أن نلزم المنفذ أثناء عمليات الرص للتربة في الحقل أن يحقق وزن حجمي جاف أصغري بقيمة :

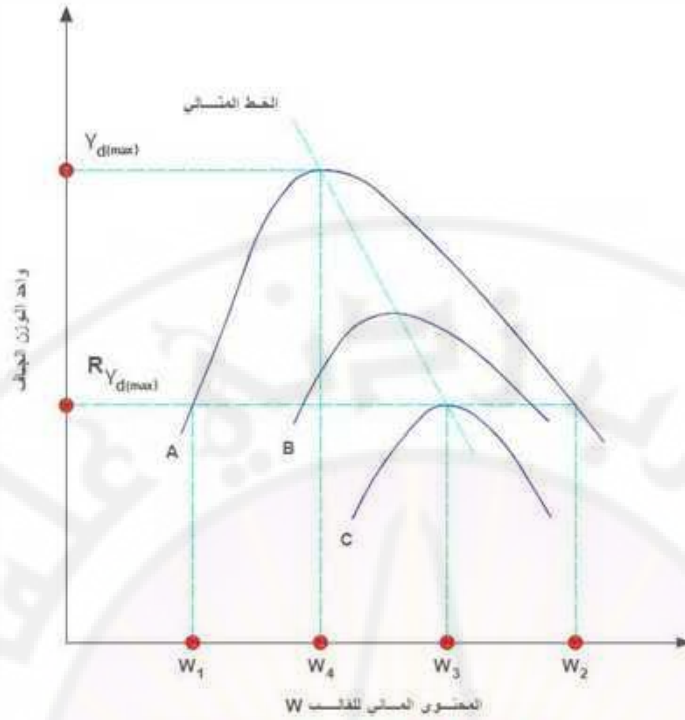
$$\gamma_{d(\text{حقلي})} = R \cdot \gamma_{d(\text{max})}$$

في هذه الحالة ، يجب على المنفذ أن يتأكد من أن محتوى الرطوبة W يقع بين W_1 و W_2 .

أما بالنسبة لمنحني الرص في الحالة C، نجد أن القيمة المطلوبة للوزن الحجمي الجاف $\gamma_{d(\text{حقلي})}$ يمكن أن تتحقق بطاقة رص أقل عند محتوى رطوبة $W = W_3$. على كل حال، ومن أجل أكثر الحالات نجد أن قيمة الوزن الحجمي الجاف لتربة مرصوصة حقلياً $\gamma_{d(\text{حقلي})} = R \cdot \gamma_{d(\text{max})}$ لا يمكن أن تتحقق بقيمة دنيا لطاقة الرص. هذا الأمر يمكننا أن نلاحظه من أجل منحني الرص B الذي يمثل هذه الحالة.

من الشكل 21.6 نستطيع أن نرى أن أكثر محتوى رطوبة اقتصادي هو بين W_3 و W_4 . مع ملاحظة أن محتوى الرطوبة $W = W_4$ هي محتوى الرطوبة الأمثل من أجل المنحني A، والذي هو من أجل طاقة رص عظمى.

إن هذا المبدأ والذي تم شرحه في الفقرة السابقة، والموضح في الشكل (21.6) يعود تاريخياً إلى Seed (1964) وتم تفصيله بشكل أكبر من قبل Holtz and Kovacs (1981) .



الشكل 21-6 : أغلب حالات الرص الاقتصادية

الشكل (21.6) : شروط الرص الاقتصادية

في الجدول (2.6) نبين بعض المتطلبات اللازمة لتحقيق نسبة رص % 95 - 100 انطلاقاً من نتائج تجربة بروكتور القياسية للوزن الحجمي الجاف الأعظمي عن طريق مختلف معدات الرص المتوفرة في الحقل U.S. Department of Navy، (1971).

□

الجدول (6.2) يبين بعض المتطلبات اللازمة لتحقيق نسبة رص % 100 - 95 انطلاقاً من نتائج تجربة بروتكتور القياسية للوزن الحجمي الجاف الأعظمي عن طريق مختلف معدات الرص المتوفرة في الحقل.

(U.S. Department of Navy, 1971)..

Requirements for compaction of 95 to 100% standard Proctor maximum dry unit weight						
Equipment type	Applicability	Compacted lift thickness	Passes or coverages	Dimensions and weight of equipment		Possible variations in equipment
Sheepsfoot rollers	For fine-grained soils or dirty coarse-grained soils with more than 20% passing the No. 200 sieve. Not suitable for clean, coarse-grained soils. Particularly appropriate for compaction of impervious zone for earth dam or linings where bonding of lifts is important.	150 mm (6 in.)	4 to 6 passes for fine-grained soil	Soil type		
				Fine-grained soil, $PI > 30$	Foot contact area 30 to 80 cm ² (5 to 12 in ²)	Foot contact pressures 1700 to 3400 kN/m ² (250 to 500 psi)
			6 to 8 passes for coarse-grained soil	Fine-grained soil, $PI < 30$	45 to 90 cm ² (7 to 14 in ²)	1400 to 2800 kN/m ² (200 to 400 psi)
				Coarse-grained soil	65 to 90 cm ² (10 to 14 in ²)	1000 to 1800 kN/m ² (150 to 250 psi)
Efficient compaction of soils on the wet side of the optimum requires less contact pressure than that required by the same soils at lower moisture contents.						
Rubber-tired rollers	For clean, coarse-grained soils with 4 to 8% passing the No. 200 sieve.	250 mm (10 in.)	3 to 5 coverages	Tire inflation pressures of 400 to 550 kN/m ² (60 to 80 psi) for clean granular material or base course and subgrade compaction. Wheel load, 80 to 110 kN (18,000 to 25,000 lb.)		A wide variety of rubber-tired compaction equipment is available. For cohesive soils, light-wheel loads, such as provided by wobble-wheel equipment, may be substituted for heavy-wheel loads if lift thickness is decreased. For cohesionless soils, large-size tires are desirable to avoid shear and rutting.
	For fine-grained soils or well-graded, dirty, coarse-grained soils with more than 8% passing the No. 200 sieve.	150 to 200 mm (6 to 8 in.)	4 to 6 coverages	Tire inflation pressures in excess of 450 kN/m ² (65 psi) for fine-grained soils of high plasticity. For uniform clean sands or silty fine sands, use larger-size tires with pressures of 280 to 350 kN/m ² (40 to 50 psi.)		
Smooth-wheel rollers	Appropriate for subgrade or base course compaction of well-graded sand-gravel mixtures.	200 to 300 mm (8 to 12 in.)	4 coverages	Tandem-type rollers for base-course or sub-grade compaction, 90 to 135 kN (10 to 15 ton) weight, 53 to 88 kN per linear meter (300 to 500 lb per linear in.) of width of rear roller.		Three-wheel rollers are obtainable in a wide range of sizes. Two-wheel tandem rollers are available in the 9 to 180 kN (1- to 20-ton) weight range. Three-axle tandem rollers are generally used in the 90 to 180 kN (10- to 20-ton) weight range. Very heavy rollers are used for proof rolling of subgrade or base course.
	May be used for fine-grained soils other than in earth dams. Not suitable for clean, well-graded sands or silty, uniform sands.	150 to 200 mm (6 to 8 in.)	6 coverages	Three-wheel roller for compaction of fine-grained soil; weights from 45 to 55 kN (5 to 6 tons) for materials of low plasticity to 90 kN (10 tons) for materials of high plasticity.		
Vibrating baseplate compactors	For coarse-grained soils with less than about 12% passing the No. 200 sieve. Best suited for materials with 4 to 8% passing the No. 200 sieve, placed thoroughly wet.	200 to 250 mm (8 to 10 in.)	3 coverages	Single pads or plates should weigh no less than 0.9 kN (200 lb). May be used in tandem where working space is available. For clean, coarse-grained soil, vibration frequency should be no less than 1600 cycles per minute.		Vibrating pads or plates are available, hand-propelled or self-propelled, single or in gangs, with width of coverage from 0.45 to 4.5 m (1½ to 15 ft). Various types of vibrating-drum equipment should be considered for compaction in large areas.
Crawler tractor	Best suited for coarse-grained soils with less than 4 to 8% passing the No. 200 sieve, placed thoroughly wet.	250 to 300 mm (10 to 12 in.)	3 to 4 coverages	No smaller than D8 tractor with blade, 153 kN (34,500 lb) weight, for high compaction.		Tractor weights up to 265 kN (60,000 lb.)
Power tamper or rammer	For difficult access, trench backfill. Suitable for all inorganic soils.	100 to 150 mm (4 to 6 in.) for silt or clay; 150 mm (6 in.) for coarse-grained soils	2 coverages	130 N (30 lb) minimum weight. Considerable range is tolerable, depending on materials and conditions.		Weights up to 1.1 kN (250 lb); foot diameter, 100 to 250 mm (4 to 10 in.)

* After U.S. Navy (1971). Published by U.S. Government Printing Office

9.6 تحديد الوزن الحجمي للتربة المرصوصة حقلياً

خلال تقدم أعمال الرص في الحقل، فإن معرفة إذا ما تم تحقيق المواصفات اللازمة والمطلوبة للوزن الحجمي هو أمر مفيد جداً للمهندس المنفذ. ولتحقيق ذلك لا بد من إجراء تجارب قياسية تحدد لنا الوزن الحجمي للرص حقلياً. هذه التجارب يمكن أن تتم بعدة طرق منها :

1. طريقة مخروط الرمل .
2. طريقة بالون المطاط.
3. طريقة الكثافة النووية.

وفي الفقرات التالية سنقدم شرح مختصر لكل من هذه الطرق.

1.9.6 طريقة مخروط الرمل (ASTM Designation D-1556)

في هذه الطريقة نستخدم جهاز يسمى مخروط الرمل. هذا الجهاز يتكون من وعاء زجاجي أو بلاستيكي مع مخروط معدني موصول في الأعلى (الشكل 22.6).



الشكل (22.6) : جهاز مخروط الرمل

□

لأجراء العمل لا بد من خطوات وهي :

1. نقوم بملء الوعاء برمل جاف ومنتظم. ويتم تحديد وزن الوعاء مع المخروط والرمل المملوء

معاً وهذه القيمة هي : (W_1) .

2. في الحقل، نقوم بحفر حفرة صغيرة في المساحة التي تم رصها ويتم أخذ كل التربة التي تمّ

حفرها كاملة (بدون ترك أي نواعم) ويتم قياس وزن التربة الرطبة المحفورة من الحفرة وهذه

القيمة هي : (W_2) .

3. يتم قياس محتوى الرطوبة للتربة التي تمّ أخذها من الحفرة في الموقع وهي القيمة w .

4. نقوم بحساب وزن التربة الجاف للتربة التي تمّ أخذها من الحفرة في الموقع من خلال العلاقة

التالية :

$$W_3 = \frac{W_2}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (15.6) \square$$

حيث w = محتوى الرطوبة المقاس في الخطوة (3) .

5. بعد حفر الحفرة، نقوم بقلب الوعاء المملوء بالرمل مع المخروط ووضعها فوق الحفرة التي

تمّ حفرها بالخطوة (2) (الشكل 23.6). ونسمح للرمل بالتدفق من الوعاء وذلك حتى يتم

ملء الحفرة بشكل كامل.

6. نقوم الآن بوزن كمية الرمل المتبقي وهي ضمن الوعاء مع المخروط وهذه القيمة هي (W_4) :

$$W_5 = W_1 - W_4 \quad (16.6) \square$$

حيث W_5 = وزن الرمل اللازم لملء الحفرة والمخروط.

7. نقوم بحساب حجم الحفرة التي تم حفرها في الموقع وذلك من خلال المعادلة :

$$V = \frac{W_5 - W_c}{\gamma_{d(\text{للمرمل المستخدم})}} \quad (17.6) \square$$

حيث:

W_c = وزن الرمل اللازم لملء المخروط فقط.

$\gamma_{d(\text{sand})}$ = الوزن الحجمي الجاف لرمل Ottawa المستخدم.

إن القيم W_c و $\gamma_{d(sand)}$ يتم تحديدها بشكل دقيق في المختبر.

8. نقوم الآن بتحديد قيمة الوزن الحجمي الجاف للرص الحقلي من خلال العلاقة التالية :

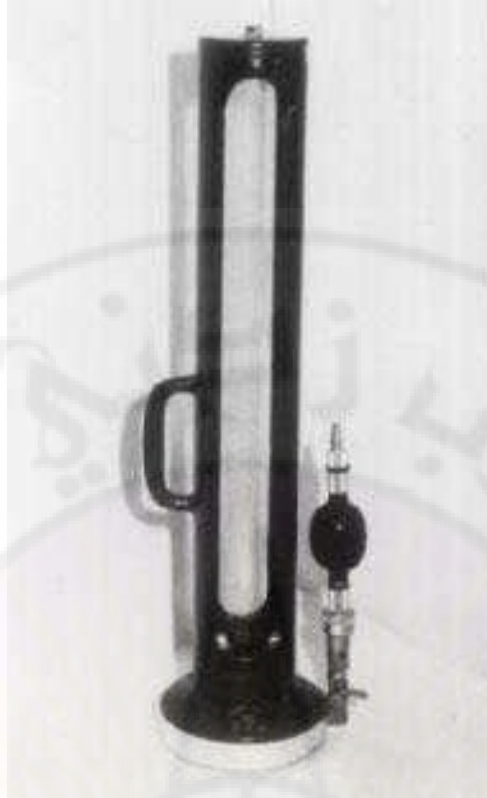
$$\gamma_{d(حقلي)} = \frac{W_3}{V} \quad (18.6)$$



الشكل (22.6) : جهاز مخروط الرمل عند ملئ الحفرة بالرمل

2.9.6 طريقة بالون المطاط (ASTM Designation D-2167)

العملية المتبعة في هذه الطريقة هي مشابهة لطريقة مخروط الرمل؛ حيث يتم عمل حفرة وإزالة التربة الرطبة من الحفرة ويتم تحديد رطوبتها. أما حجم الحفرة يتم تحديده عن طريق ملأها بالون المطاط المملوء بالماء من وعاء معاير يمكننا من قراءة الحجم مباشرة. الوزن الحجمي الجاف للتربة المرصوة يمكن أن يحدد من خلال المعادلة (18.6). الشكل (24.6) يظهر وعاء معاير والذي ممكن أن يستخدم مع بالون المطاط.



الشكل (24.6) : جهاز بالون المطاط

3.9.6 طريقة الكثافة النووية

مقياس الكثافة النووي يتم استخدامه غالباً لتحديد الوزن الحجمي الجاف للتربة المرصوفة. يعمل مقياس الكثافة النووي إما من خلال ثقوب محفورة ضمن الطبقة المرصوفة أو من على سطح الأرض التي تم رصها. نستخدم في هذه الطريقة مصدر لنظائر مشعة. تعطي هذه النظائر أشعة غاما والتي تنعكس بدورها إلى كاشف المقياس. ونحن نعلم أن التربة الكثيفة والمرصوفة جيداً تمتص أشعة بشكل أكبر من التربة المخلخلة. تقوم الآلة بقياس وزن التربة الرطبة نسبة لوحدية الحجم وأيضاً تقوم بقياس وزن الماء الموجود في وحدة الحجم. يمكن أن يحدد الوزن الحجمي الجاف للتربة المرصوفة من خلال طرح وزن الماء من الوزن الحجمي الرطب للتربة. الشكل (25.6) يظهر صورة لمقياس الكثافة النووي.

□



الشكل (25.6) : صورة لمقياس الكثافة النووي

□

مثال 3.6 :

أجريت تجربة الرص في المخبر على عينة تربة غضارية سلتية ونتائج هذه التجربة معطاة في الجدول التالي :

الوزن الحجمي الجاف (kN/m^3)	رطوبة التربة (%)
14.8	6
17.45	8
18.52	9
18.9	11
18.5	12
16.9	14

وفيما يلي نقدم نتائج لقيم الوزن الحجمي التي قيست حقلياً والتي تمّ تحديدها من خلال طريقة مخروط الرمل على نفس عينة التربة :

- الكثافة الجافة المعاييرة للرمل الجاف المستخدم $= 1570 \text{ kg/m}^3$
 - الكتلة المعاييرة لرمل للرمل المستخدم اللازمة لملء المخروط $= 0.545 \text{ kg}$.
 - كتلة الوعاء + المخروط + الرمل (قبل الاستخدام) $= 7.59 \text{ kg}$.
 - كتلة الوعاء + المخروط + الرمل (بعد الاستخدام) $= 4.78 \text{ kg}$.
 - كتلة التربة الرطبة من الحفرة التي نفذت في المنطقة المرصوفة $= 3.007 \text{ kg}$.
 - محتوى الرطوبة للتربة الرطبة $= 10.2\%$
- والمطلوب : تحديد :

a. الوزن الحجمي الجاف للرص حقلياً .

b. الرص النسبي حقلياً .

الحل :

الطلب الأول :

في الحقل لدينا :

$$7.59 \text{ kg} - 4.8 \text{ kg} = 2.81 \text{ kg} = \text{كتلة الرمل المستخدم لملء الحفرة والمخروط}$$

$$2.81 \text{ kg} - 0.545 \text{ kg} = 2.265 \text{ kg} = \text{كتلة الرمل المستخدم لملء الحفرة}$$

$$V = \frac{2.265}{\gamma_{d(\text{للمرمل المستخدم})}}$$

$$V = \frac{2.265}{1750} = 0.0014426 \text{ m}^3$$

$$\text{الوزن الحجمي للتربة المرصودة} = \frac{3.007}{0.0014426} \times \frac{9.81}{1000} = 20.45 \text{ kN/m}^3$$

وبالتالي :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} = \frac{20.45}{1 + \frac{10.2}{100}} = 18.65 \text{ kN/m}^3$$

الطلب الثاني :

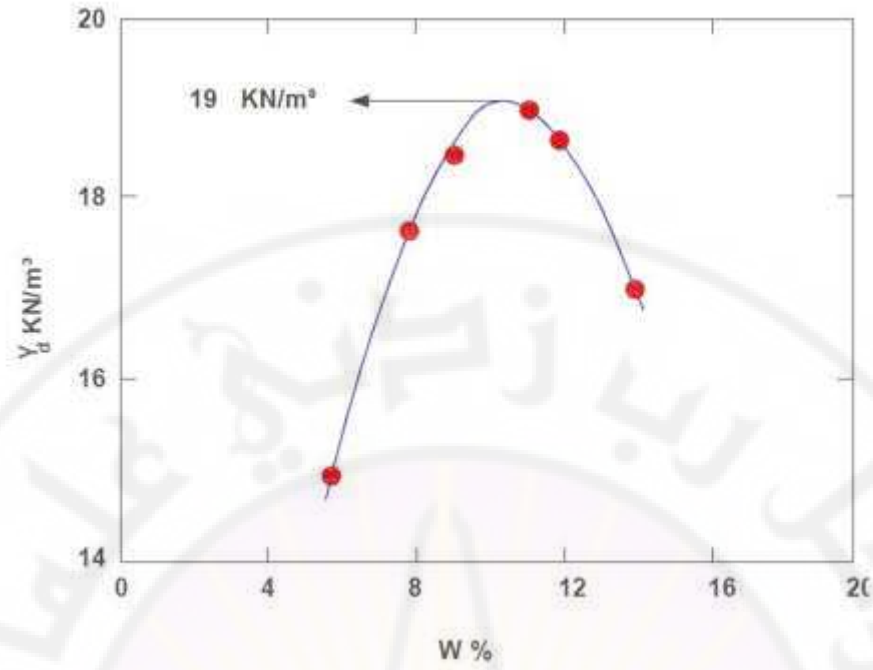
إن نتائج التجارب المخبرية التي أجريت لرص التربة مبينة على الشكل (26.6)، ومن هذا

$$\gamma_{d(\text{sand})} = 19 \text{ KN/m}^3 \text{ نجد}$$

لذلك ومن خلال استخدام المعادلة (6.10) نجد :

$$R \% = \frac{\gamma_{d(\text{حقلي})}}{\gamma_{d(\text{مخبر - max})}} = \frac{18.56}{19.00} = 97.7 \%$$

□



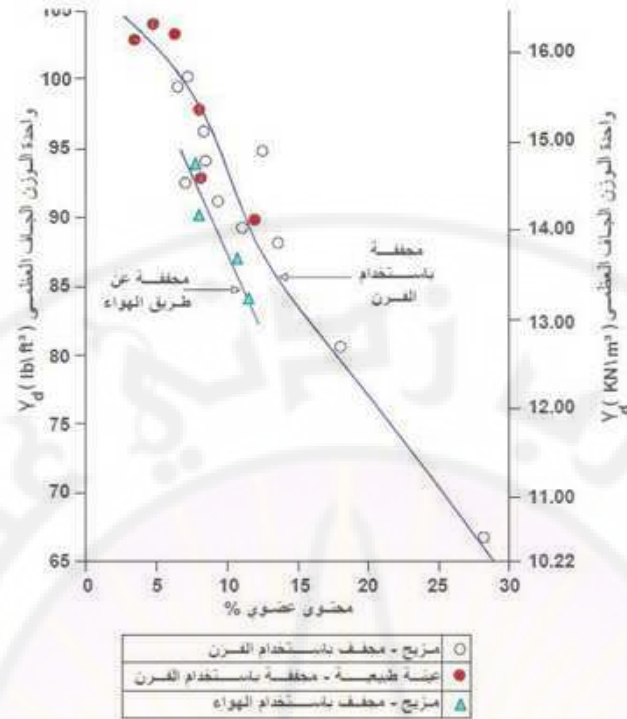
الشكل (26.6) : مخطط مخبري لنتائج تجربة الرص

10.6 رص الترب العضوية ومواد المخلفات

إن وجود المواد العضوية في التربة تقلل من مقاومتها. وفي العديد من الحالات، نجد أن الترب الحاوية على نسبة عالية من محتوى الرطوبة هي عادة ترفض كمواود ردم. لكن وفي بعض الظروف الاقتصادية يمكن قبول رص الترب الحاوية على نسب قليلة من المواد العضوية. في الحقيقة، الترب العضوية مفضلة في العديد من الحالات (مثل : الزراعة، الزحف الصحراوي، mitigation ، والتخطيط العمراني)، وبسبب أن كلفة التخلص من هذه المخلفات عالية، فإن هذا الأمر شكل اهتماماً للمهندسين في كيفية الاستفادة من مواد المخلفات (مثل : الرماد الناتج عملية حرق الفحم، بقايا النحاس، بقايا طواحن الورق، بقايا الدوايب الممزقة الممزوجة مع الترب اللاعضوية وهكذا...) للاستخدام في العديد من من عمليات الردم. إن استخدام مثل هذه البقايا هو حالياً الاهتمام الأكبر لمهندسي الجيوتكنيك. إن الفقرات التالية هي لمناقشة خواص الرص لبعض هذه المواد.

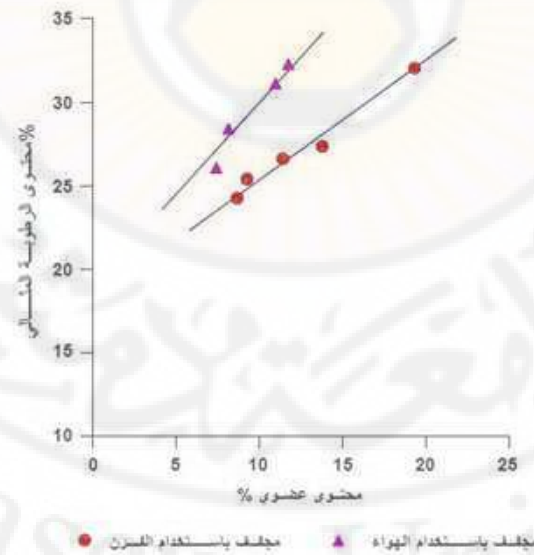
1.10.6 الترب العضوية

قام كلاً من السيد فرانكلين ومساعديه Franklin, Orozco and Semrau في العام (1973) بإجراء العديد من التجارب المخبرية لاستنتاج تأثير محتوى الرطوبة على خواص الرص للتربة. خلال المنهج التجريبي، تم إجراء عدة تجارب على العديد من الترب الطبيعية وخلائط التربة. الشكل (27.6) يظهر تأثير المواد العضوية على الوزن الحجمي الجاف الأعظمي. من الشكل نجد أنه عندما تتخطى نسبة المواد العضوية المجال من 8 % إلى 10 % فإن الوزن الحجمي الجاف الأعظمي يتناقص بشكل كبير. وبالعكس فإن محتوى الرطوبة الأمثل من أجل طاقة رص معطاة يزداد مع ازدياد محتوى المواد العضوية، وهذه ما يظهره الشكل (28.6). وبشكل مشابه نجد أن مقاومة الضغط غير المحصور الأعظمية (مقرر ميكانيك التربة 2) المأخوذة لعينة تربة مرصوطة (مع طاقة رص معطاة) تتناقص مع ازدياد محتوى المواد العضوية في التربة. ومن خلال هذه الحقائق، نستطيع أن نرى أن الترب مع محتوى رطوبة أعلى من 10 % غير مفضلة لأعمال الرص.



شكل 27-6 : تفسير وزن واحد الحجم الجاف العظمى مع محتوى عضوي
After Franklin, Orozco, and Semrau, 1973, With permission from ASCE

الشكل (27.6) : تأثير المواد العضوية على الوزن الحجمي الجاف الأعظمي



الشكل 28-6 : تفسير محتوى الرطوبة المثالي مع المحتوى العضوي
After Franklin, Orozco, and Semrau, 1973, With permission from ASCE

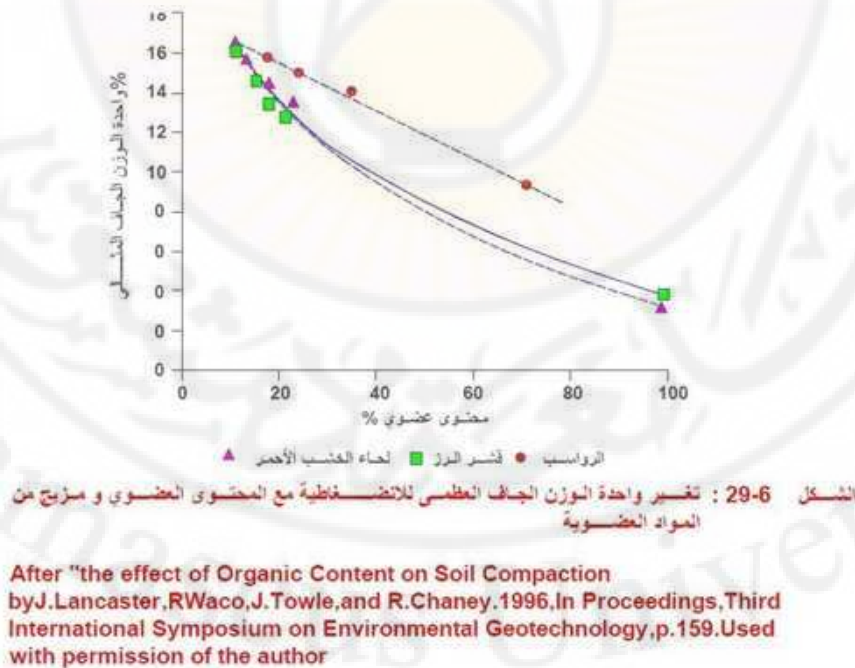
الشكل (28.6) : تغير محتوى الرطوبة المثالي مع ازدياد محتوى المواد العضوية

□

2.10.6 التربة وخليط المواد العضوية

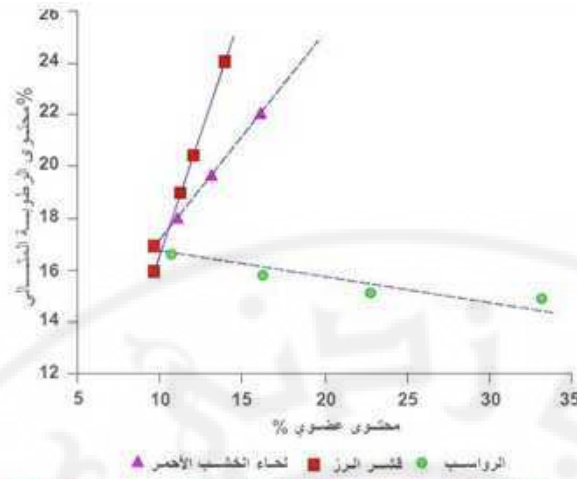
قام السادة Lancaster et al في العام (1996) بإجراء تجارب بروكتور معدلة عديدة من أجل تحديد تأثير محتوى المواد العضوية على الوزن الحجمي الجاف الأعظمي ومحتوى الرطوبة الأمثلي للتربة وخليط المواد العضوية. الترب المستخدمة للتجربة تتألف من رمل فقير التدرج الحبي (SP-SM) ممزوج مع بقايا لحاء الخشب الأحمر، بقايا قشور الأرز، حمأة مياه الصرف الصحي. الشكلين (29.6) و (30.6) يظهران تغير الوزن الحجمي الجاف الأعظمي ومحتوى الرطوبة الأمثلي على التوالي مع تغير محتوى الرطوبة. وكما في الشكل (27.3)، نجد أن الوزن الحجمي الجاف الأعظمي يتناقص مع تغير محتوى المواد العضوية في العديد من الحالات (انظر الشكل 29.6).

وبالعكس فإن محتوى الرطوبة الأمثلي يزداد مع ازداد محتوى الرطوبة من أجل التربة المخلوطة مع بقايا لحاء الخشب الأحمر أو قشور الأرز (انظر الشكل 30.6). وبشكل مشابه للنمط الظاهر في الشكل (28.6)، نجد أنه من أجل خليط لتربة مع حمأة مياه الصرف الصحي، فإن محتوى الرطوبة يبقى ثابت عملياً (انظر الشكل 30.6).



الشكل (29.6) : تغير الوزن الحجمي الجاف الأعظمي مع تغير المحتوى العضوي

□



الشكل 30-6 : تغير محتوى الرطوبة الأمثلي مع المحتوى العضوي و مزيج من المواد العضوية
After "the effect of Organic Content on Soil Compaction
by J.Lancaster, R.Waco, J.Towle, and R.Chaney, 1996, In Proceedings, Third
International Symposium on Environmental Geotechnology, p.159. Used
with permission of the author

الشكل (30.6) : تغير محتوى الرطوبة الأمثلي على التوالي مع تغير المحتوى العضوي

3.10.6 الرماد الناتج من عملية حرق الفحم وبقايا النحاس

نتائج تجارب بروكتور القياسية للرماد الناتج من حرق الفحم power plants وبقايا النحاس أيضاً يمكن استخدامها لتحسين عمليات الرص. أظهرت هذه البقايا أنها صديقة للبيئة عندما تستخدم كرميات. إن ملخص لبعض نتائج تجارب هذه المواد مشروحة في الجدول (3.6).

الجدول (3.6) : نتائج تجارب بروكتور القياسية للرماد الناتج من حرق الفحم power plants وبقايا النحاس

Type	Location	Maximum dry unit weight		Optimum moisture content (%)	Source
		kN/m ³	lb/ft ³		
Bottom ash— bituminous coal (West Virginia)	Fort Martin	13.4	85	24.8	Seals, Moulton, and Ruth (1972)
	Kammer	16.0	102	13.8	
	Kanawha River	11.4	72.6	26.2	
	Mitchell	18.3	116.6	14.6	
	Muskingham	14.3	91.1	22.0	
	Willow Island	14.5	92.4	21.2	
Bottom ash— lignite coal	Big Stone Power Plant, South Dakota	16.4	104.4	20.5	Das, Selim, and Pfeifle (1978)
Copper slag	American Smelter and Refinery Company, El Paso, Texas	19.8	126	18.8	Das, Tarquin, and Jones (1983)

11.6 تقنيات رص خاصة

تم تطوير العديد من تقنيات الرص المختلفة من أجل رص التربة العميقة في المكان. هذه التقنيات تستخدم في الحقل في أعمال الرص بشكل واسع. ومن الطرق الأكثر شيوعاً في الاستخدام هي:

- الرص بالاهتزاز vibroflotation،
- الرص الديناميكي Dynamic compaction،
- التفجير Blasting.

تفاصيل هذه الطرق مشروحة في الفقرات التالية.

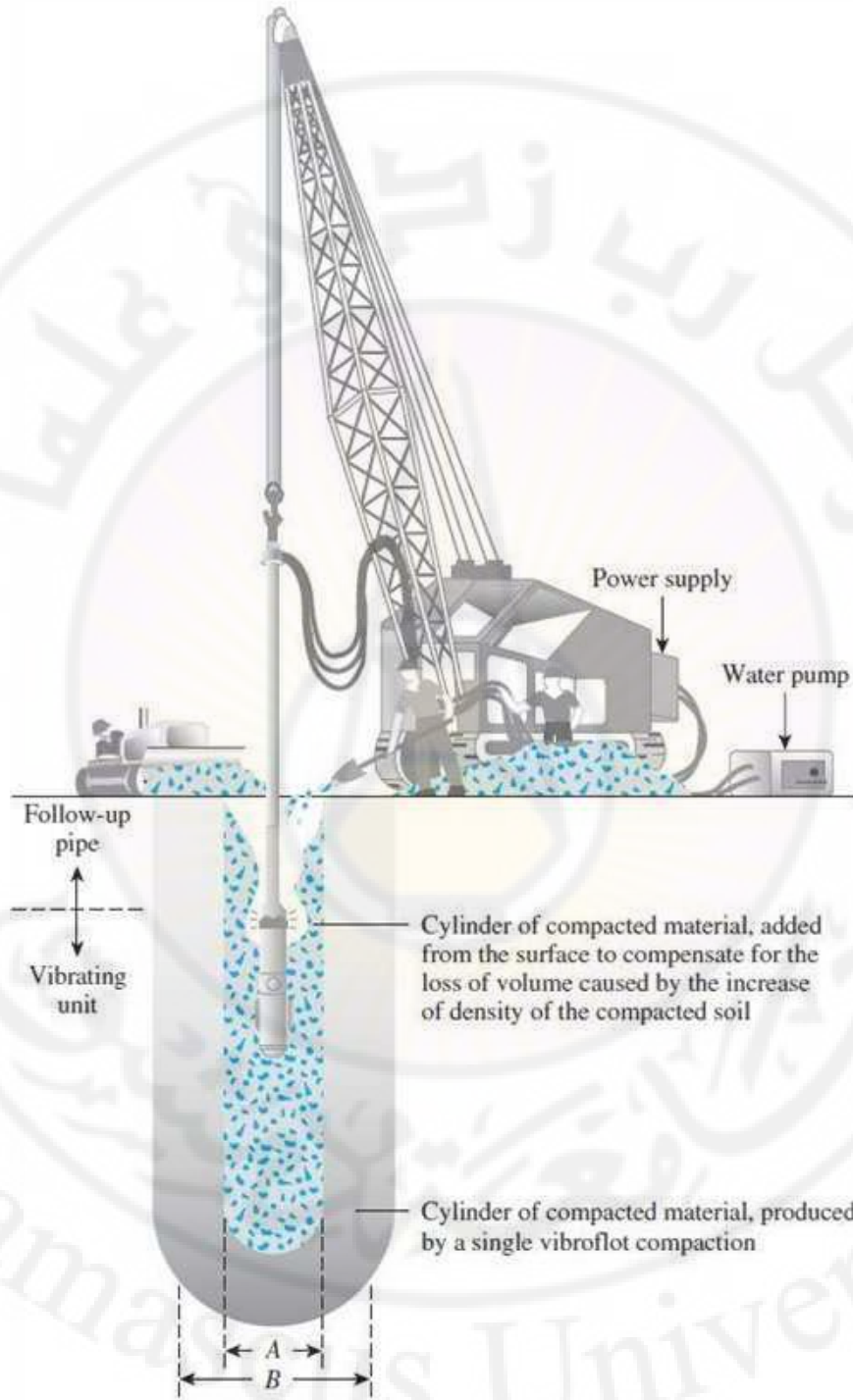
1.11.6 الرص بالاهتزاز Vibroflotation

الرص بالاهتزاز هي عبارة عن تقنية رص بالمكان تستخدم بحال وجود طبقات سميكة من تربة مخلخة حبيبية مترسبة. هذه الطريقة تم وضع أسسها في ألمانيا بثلاثينيات القرن الماضي، وتم استخدام أول جهاز للرص بالاهتزاز في الولايات المتحدة بعد عشر سنوات. العملية تتضمن استخدام وحدة *Vibroflot* (تسمى أيضاً وحدة اهتزاز)، والتي طولها حوالي 2.1 m (كما يظهره الشكل 31.6). إن وحدة الاهتزاز تحتوي بداخلها على وزن موضوع بشكل لامركزي لكي يؤمن تطبيق قوة طرد مركزية. هذا الأمر يعطي لوحدة الاهتزاز إمكانية تطبيق اهتزاز أفقي. كما أن وحدة الاهتزاز هذه تمتلك فتحات بأسفلها وأعلاها من أجل ضخ الماء (تسمى النفثات). توصل وحدة الاهتزاز مع أنبوب علوي. الشكل (31.6) يظهر التجميع الكامل للمعدة اللازمة للقيام بالرص الحقلي.

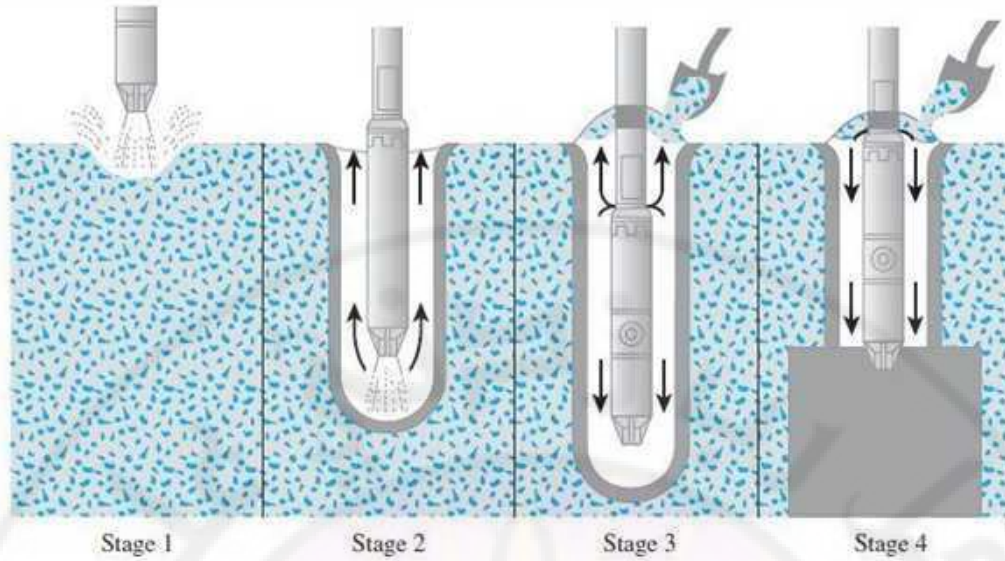
يمكن أن تقسم عملية الرص بالاهتزاز في الحقل إلى أربع مراحل (الشكل 32.6) وهي:

- **المرحلة 1 :** تتضمن تنزيل النفثات أسفل وحدة الاهتزاز إلى الأرض والبدء بضخ الماء.
- **المرحلة 2 :** يشكل ضخ الماء ظروف جيدة للتربة التي تسمح لوحدة الاهتزاز بالدخول بالأرض.
- **المرحلة 3 :** يتم إلقاء المواد الحبيبية من أعلى الحفرة. الماء الخارج من النفثات السفلي يتم تحويله إلى النفثات العلوي أعلى وحدة الاهتزاز. حيث أن هذا الماء يحمل المواد الحبيبية إلى أسفل الحفرة.

- المرحلة 4 : يتم رفع وحدة الاهتزاز تدريجياً حوالي 0.3 m مع بقاء وحدة الاهتزاز لحوالي 30 ثانية لكل رفعة. ترص هذه العملية التربة للوزن الحجمي المطلوب.



الشكل (31.6) : أول جهاز للرص بالاهتزاز تم استخدامه في الولايات المتحدة في عام 1940.



الشكل (32.6) : مراحل عملية الرص بالاهتزاز في الحقل

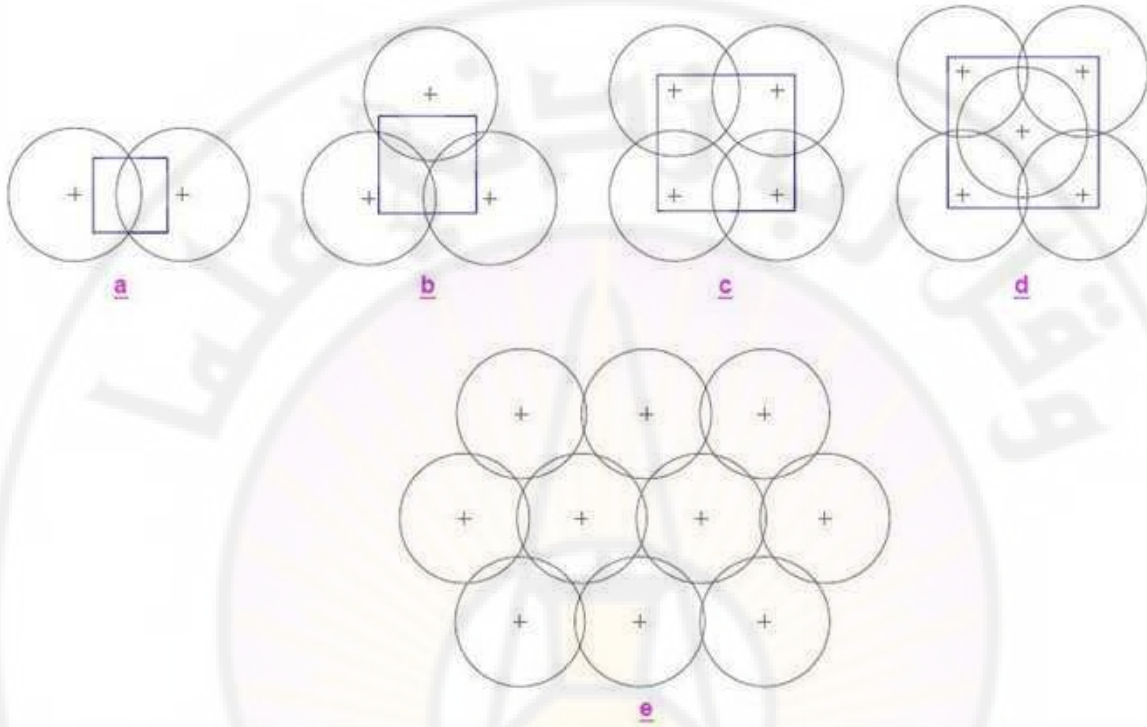
إن تفاصيل وحدات الاهتزاز المختلفة المستخدمة في الولايات المتحدة معطاة في الجدول 4.6. لاحظ أن 23 kW (100-hp) تم إنتاجها في أوائل العام 1970 . إن منطقة الرص حول وحدة مجس اهتزاز واحد تتغير مع تغير نوع وحدة الاهتزاز المستخدم. المنطقة المرصوفة من التربة بهذه الوحدة لها شكل اسطواني قطر حوالي 2 m من أجل 23 kW(30-hp). ويمكن أن يتوسع القطر إلى 3 m من أجل الوحدة 75 kW(100-hp).

الجدول (4.6) : تفاصيل وحدات الاهتزاز المختلفة المستخدمة في الولايات المتحدة

Motor type	75 kW electric and hydraulic	23 kW electric
a. Vibrating tip		
Length	2.1 m (7.0 ft)	1.86 m (6.11 ft)
Diameter	406 mm (16 in.)	381 mm (15 in.)
Weight	17.8 kN (4000 lb)	17.8 kN (4000 lb)
Maximum movement when full	12.5 mm (0.49 in.)	7.6 mm (0.3 in.)
Centrifugal force	160 kN (18 ton)	89 kN (10 ton)
b. Eccentric		
Weight	1.2 kN (260 lb)	0.76 kN (170 lb)
Offset	38 mm (1.5 in.)	32 mm (1.25 in.)
Length	610 mm (24 in.)	390 mm (15.25 in.)
Speed	1800 rpm	1800 rpm
c. Pump		
Operating flow rate	0–1.6 m ³ /min (0–400 gal/min)	0–0.6 m ³ /min (0–150 gal/min)
Pressure	700–1050 kN/m ² (100–150 lb/in ²)	700–1050 kN/m ² (100–150 lb/in ²)
d. Lower follow-up pipe and extensions		
Diameter	305 mm (12 in.)	305 mm (12 in.)
Weight	3.65 kN/m (250 lb/ft)	3.65 kN/m (250 lb/ft)

*After Brown 1977. With permission from ASCE.

يظهر الشكل (33.6) الأنماط الشائعة لفراغات وحدة الاهتزاز. ويمكننا القول أن الأنماط المربعة والمستطيلة عادة تستخدم لرص التربة تحت الأساسات المفردة السطحية. أما أنماط المثلث متساوي الأضلاع تستخدم عادة لرص مساحات واسعة.

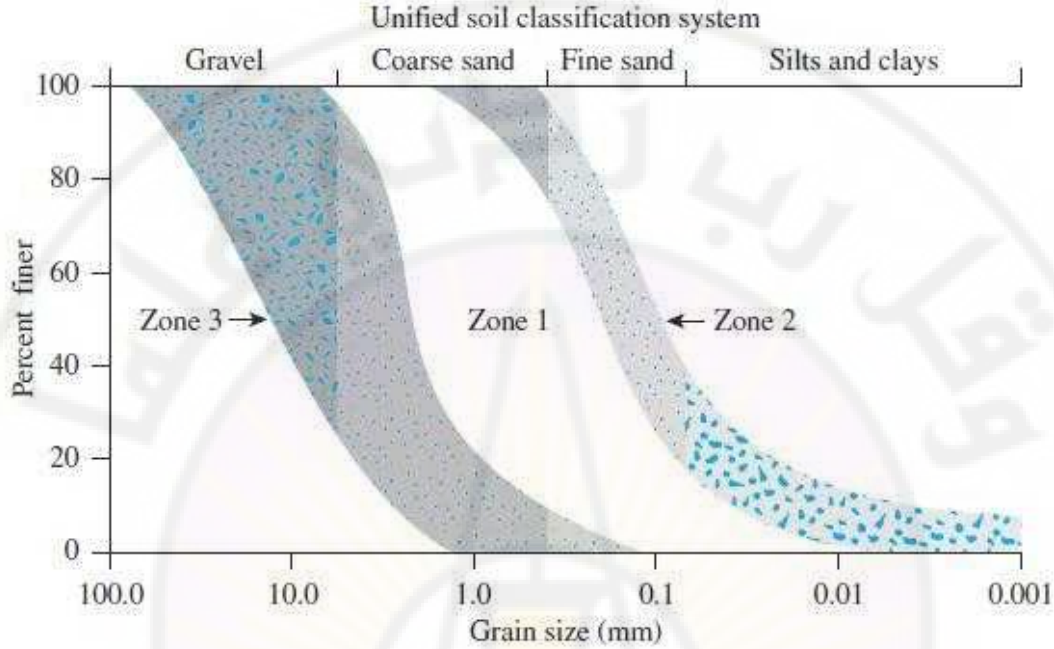


الشكل 33-6 : أنماط نموذجية من تباعدات المسبار للأساسات الأعمدة a,b,c and d و الضغط على مساحة واسعة e

الشكل (33.6) : الأنماط الشائعة للفراغات وحدة الاهتزاز

ويجب أن نعلم أن قدرة الرص الناجح في المكان تعتمد على عدة عوامل، وأهم العوامل هي: توزيع التدرج الحبي للتربة ونوع الردميات المستخدمة لملء الحفر أثناء عملية الاهتزاز. إن توزيع التدرج الحبي لتربة حقلية والمحددة بالمنطقة 1 في الشكل (34.6) تعتبر أكثر ملائمة من أجل الرص بالاهتزاز. أما التربة التي تحتوي على كميات كبيرة من الرمل الناعم والسلت الناعم تكون صعبة الرص ونحتاج إلى طاقة رص كبيرة للوصول إلى الكثافة النسبية المطلوبة للرص. إن المنطقة 2 في الشكل (34.6) تعتبر الحد الأدنى لتوزيع التدرج الحبي والتي تكون طريقة الرص بالاهتزاز فعالة عنده.

أما رواسب التربة والتي يقع تدرجها الحبي في المنطقة 3 والتي تحوي كمية صغيرة من البحص، فمن أجل هذه التربة، فإن سرعة اختراق المجس سوف تكون أقل ويمكن أن تصبح غير اقتصادية في حالة التشغيل الطويل.



الشكل (34.6) : توزيع التدرج الحبي لتربة حقلية محددة بالمنطقة 1 والذي يعتبر أكثر ملائمة من أجل الرص بالاهتزاز

إن توزيع التدرج الحبي للمواد المستخدمة بالردم يعتبر عامل هام وذلك لأنه يتحكم بسرعة الرص. عرف (Brown 1977) عدداً يسمى بعدد الملائمة من أجل مواد الردم وهو :

$$S_N = 1.7 \times \left(\sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}} \right) \quad (19.6)$$

حيث D_{10}, D_{20}, D_{50} هي الأقطار مقدرة بالميليمتر والتي تعطي على التوالي ما نسبته 50%، 20%، 10% من المواد المارة.

وبحسب هذه العلاقة فإنه كلما صغرت قيمة S_N كلما كانت مواد الردم ملائمة أكثر.

وقام السيد Brown بوضع تصنيف لملائمة التربة المستخدمة في أعمال الردم حسب العدد S_N كما هو مبين بالجدول التالي:

تصنيف المواد المستخدمة بالردم	مجال تغير قيم S_N
ممتازة للردم	0 - 10
جيدة للردم	10 - 20
مقبولة للردم	20 - 30
سيئة للردم	30 - 50
مرفوضة للإستخدام في الردم	> 50

2.11.6 الرص الديناميكي

الرص الديناميكي هي تقنية اكتسبت شعبية كبيرة في الولايات المتحدة وذلك من أجل رص رواسب التربة الحبيبية. تتألف عملية الرص هذه بشكل أساسي من إسقاط حمل ثقيل بشكل متكرر على الأرض بأشواط منتظمة. وزن المطرقة المستخدمة يتراوح ما بين 80 إلى 360 kN، وارتفاع سقوط المطرقة يتراوح بين 7.5 و 30.5 m. إن أمواج الإجهادات المتولدة من إسقاطات المطرقة على الأرض تساعد في عملية الرص. إن درجة الرص تحقق من أجل موقع معطى ومحددة بالعوامل الثلاث التالية:

1. وزن المطرقة.

2. ارتفاع سقوط المطرقة.

3. الفراغات بين أماكن إسقاط المطرقة.

اقترح كل من Cutter، Leonards and Holtz ، في العام (1980) أن عمق تأثير الرص الفعال يمكن أن يقدر باستخدام المعادلة التالية :

$$D = \left(\frac{1}{2}\right) \sqrt{W_H \times h} \quad (20.6)$$

حيث :

D = عمق الرص الفعال.

W_H = الوزن الساقط (مقدر بالطن).

$$h = \text{ارتفاع السقوط (m)}.$$

وفي الواحدات الانكليزية ، يمكن أن تأخذ المعادلة السابقة الشكل التالي :

$$D = 0.61\sqrt{W_H \times h} \quad (21.6)$$

حيث D ، h بالوحدة ft و W_H بالوحدة Kip .

اقترح Poran and Rodriguez في العام 1992 نظرية منطقية من أجل الرص الديناميكي في الحقل تستخدم للترب الحبيبية. ووفقاً لهذه النظرية ومن أجل مطرقة بقطر D ووزن W_H وارتفاع سقوط h ، فإن الشكل التقريبي لمساحة الرص سوف تكون كما في الشكل 35.6 (مثال : نصف قطع ناقص كروي). لاحظ أنه في هذا الشكل $b = DI$ (حيث DI العمق الفعال للرص).

هذه النظرية تستخدم من خلال الخطوات التالية :

الخطوة 1 : نحدد العمق الفعال المطلوب للرص ($b = DI$).

الخطوة 2 : نحدد وزن المطرقة (W_H)، ارتفاع السقوط (h)، أبعاد المقطع العرضي، وأيضاً المساحة A والعرض D .

الخطوة 3 : نحدد $DI/D = b/D$.

الخطوة 4 : نقوم باستخدام الشكل (36.6) ونحدد قيمة NW_Hh/Ab من أجل قيمة b/D الناتجة من الخطوة 3.

الخطوة 5 : بما أن قيمة W_H ، h ، A ، b معلومة (أو مفروضة) من الخطوة 2، فإن عدد مرات سقوط المطرقة يمكن أن يقدر من القيمة NW_Hh/Ab المقدرة من الخطوة 4.

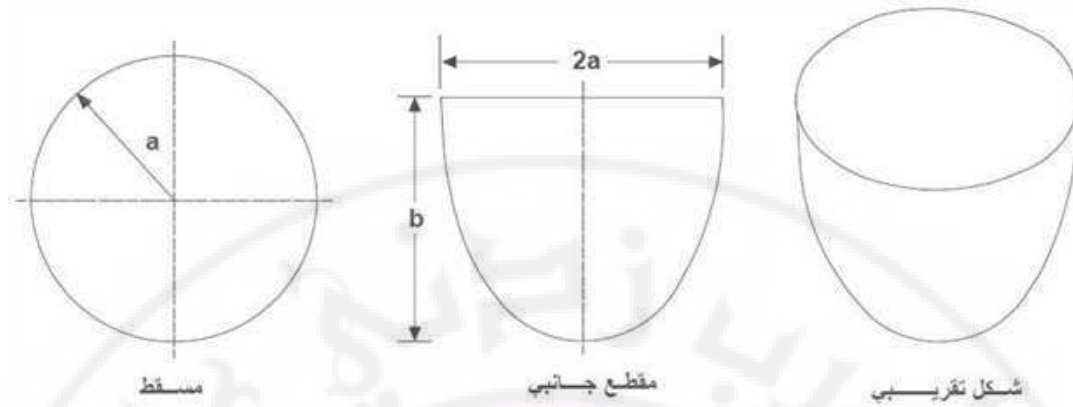
الخطوة 6 : مع القيم المعلومة للمتغير NW_Hh/Ab ، نحدد من خلالها القيم a/D و a من الشكل (6.36).

الخطوة 7 : التباعد بين الفراغات S_g ، من أجل الرص الديناميكي يمكن أن نفرضه مساوي أو تقريباً لقيمة أقل من a (انظر الشكل 37.6).

أما الشكل (36.6) فيعطي المخططات التصميمية للقيم a/D و b/D مقابل NW_Hh/Ab .

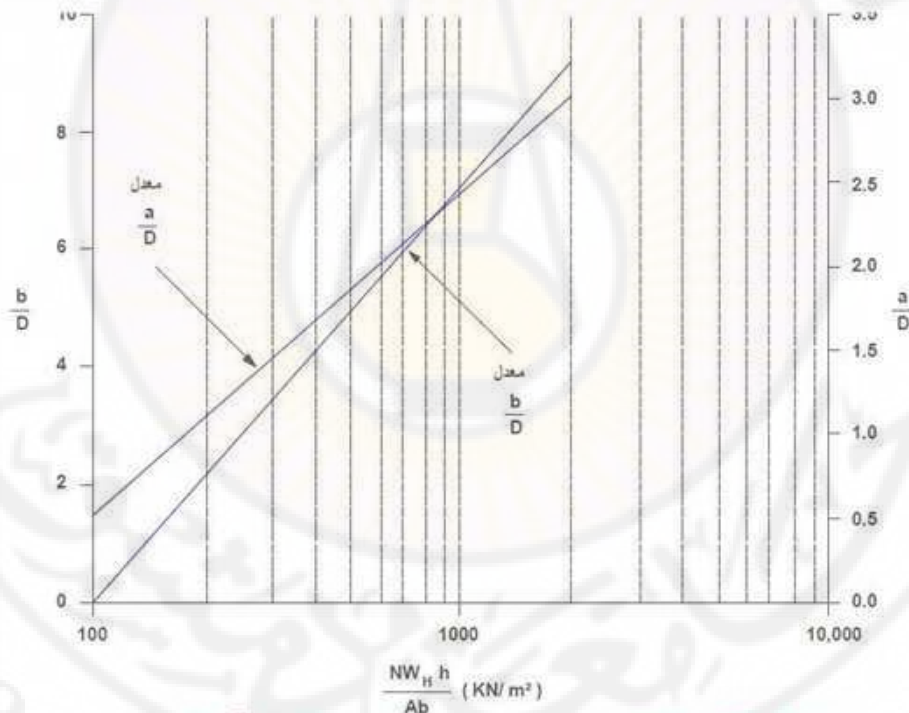
D = عرض المطرقة إذا لم تكن دائرية المقطع العرضي ،

A = مساحة المقطع العرضي للمطرقة، N = عدد مرات سقوط المطرقة المطلوب).



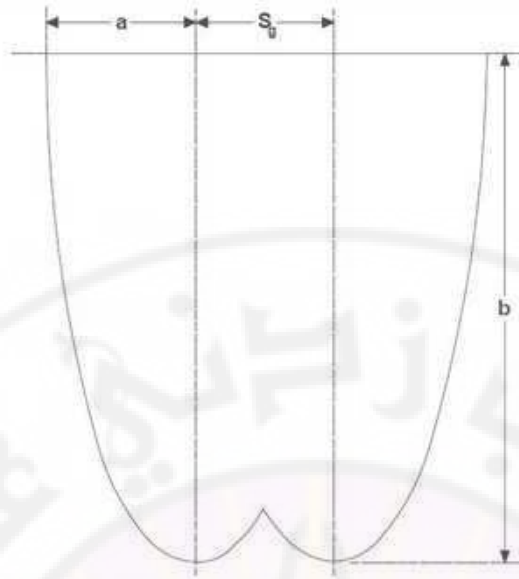
الشكل 6-35 : شكل تقريبي للمنطقة المرصصة نتيجة الرص الديناميكي

الشكل (35.6) : المخططات التصميمية : a/D و b/D مقابل $NW_H h / Ab$



الشكل 36-6 : مخططات بورات و رودرايجيز من أجل $NW_H h / Ab$ VS $a/D, b/D$

الشكل (36.6) : تغير القيم $NW_H h / Ab$ ، مع القيم b/D و a/D



الشكل 37-6 : تباعدات شبكة تقريبية لحالة الرص الديناميكي

الشكل (37.6) : التباعد بين الفراغات S_g ، من أجل الرص الديناميكي
يمكن أن نفرضه مساوي أو تقريباً لقيمة أقل من a

3.11.6 التفجير

التفجير هو عبارة عن تقنية تم استخدامها بنجاح في العديد من المشاريع (Mitchell، 1970) من أجل رص الترب الحبيبية. التدرج الحبي العام الملائم لهذا النوع من الرص هو نفسه الذي يستخدم بحالة الرص بالاهتزاز vibroflotation.

العملية تتضمن تفجير شحنات متفجرة، حيث نضع 60 % ديناميت عند عمق معين أسفل سطح الأرض في الترب المشبعة بحيث تكون المسافة بين الشحنات تتراوح بين 3 إلى 9 m. إن تنفيذ ثلاثة من أصل خمس تفجيرات تكون عادة ضرورية من أجل نجاح عملية الرص المطلوبة.

إن كثافة نسبية تصل لحوالي 80% وعلى عمق حوالي 18 m من مساحة واسعة ممكن أن تتحقق بسهولة باستخدام هذه الطريقة. عادة الشحنات المتفجرة يتم وضعها عند عمق يساوي ثلثي سماكة طبقة التربة المراد رصها. التأثير الكروي للرص بواسطة 60 % ديناميت يمكن أن يعطى كالتالي وذلك حسب (Mitchell 1970) :

$$r = \sqrt{\frac{W_{EX}}{C}} \quad (22.6)$$

حيث :

$r =$ دائرة التأثير.

$W_{EX} =$ وزن المتفجرات - 60 % ديناميت.

$C = 0.0122$ عندما تكون W_{EX} محددة بالكيلوغرام و r بالمتر.

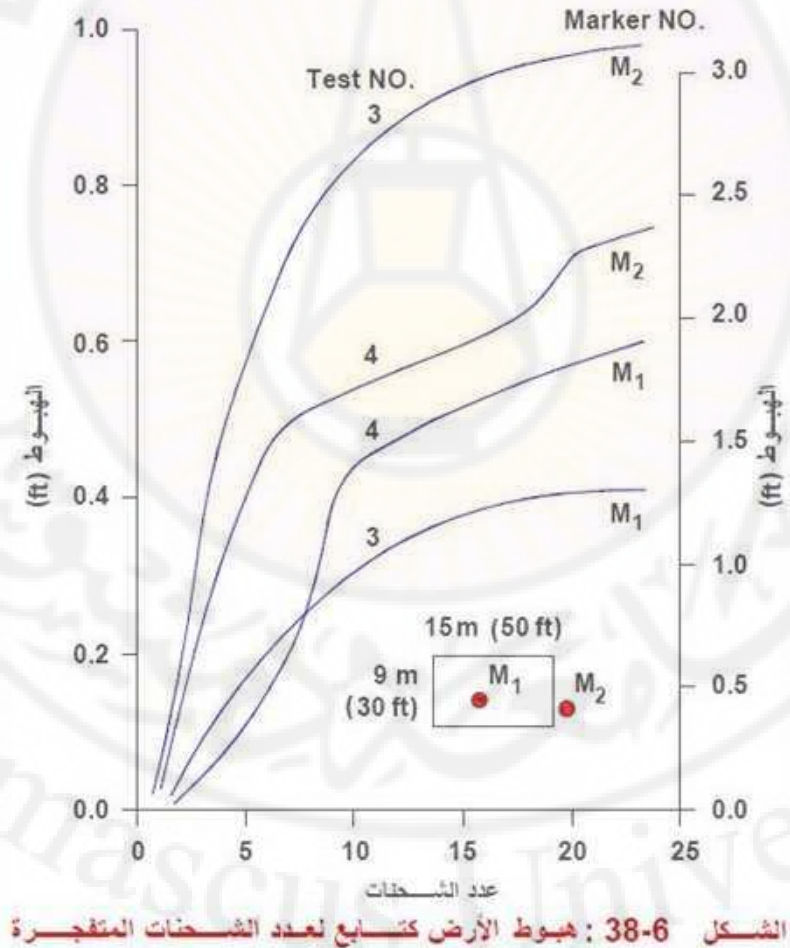
$C = 0.0025$ عندما تكون W_{EX} محددة بالليبرة lb و r بالقدم ft .

الشكل 38.6 يظهر نتائج تجارب لرصد التربة عن طريق التفجير بمساحة 15 m و 9 m

(Mitchell, 1970). ولهذه التجارب، تم استخدام 2.09 Kg من شحنات :

□ (Gelamite No.1 Hercules) Powder Company, Wilmington, Delaware. □

□



الشكل 38-6 : هبوط الأرض كتابع لعدد الشحنات المتفجرة

الشكل (38.6) : نتائج تجارب لرصد التربة عن طريق التفجير

□

مثال 4.6:

التالي هو تفاصيل لمواد ردمية مستخدمة في مشروع vibroflotation :

$$0.36 \text{ mm} = D_{10} \bullet$$

$$0.52 \text{ mm} = D_{20} \bullet$$

$$1.42 \text{ mm} = D_{500} \bullet$$

والمطلوب : تحديد عدد الملائمة S_N . وماذا ممكن أن تكون رتبة مواد الردم .

الحل :

من المعادلة 6.19 :

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

$$= 1.7 \sqrt{\frac{3}{(1.42)^2} + \frac{1}{(0.52)^2} + \frac{1}{(0.36)^2}} = 6.1$$

الرتبة : ممتازة .

□

12.6 ملخص وملاحظات عامة

إن نتائج تجارب بروكتور القياسية والمعدلة المخبرية المشروحة في هذا الفصل هي ضرورية من أجل تنفيذ الرص الديناميكي للتربة. من المهم معرفة أن رص الترب الغضارية يمكن تحقيقه باستخدام مداحل في الحقل وهو عبارة عن عملية من عمليات العجن. إن علاقات الوزن الحجمي الجاف (γ_d) ومحتوى الرطوبة (w) الناتجة من الرص الديناميكي والعجن ليست نفسها المستخدمة بحال الرص الستاتيكي. يجب العلم أن نتائج تجارب الرص للتربة والمستنتجة من التجارب المخبرية (بركتور القياسي والمعدل) تستخدم بشكل أساسي لتحديد فيما إذا كانت عملية الرص باستخدام المدحلة فعلاً أم لا. عملية الرص تؤثر على الخواص الفيزيائية، مثل الناقلية الهيدروليكية، الانضغاطية والمقاومة. من أجل معظم عمليات الردم، الاختيار النهائي في الموقع يعتمد على عدة عوامل مثل نوع التربة و كلفة الحفر والترحيل.

□

13.6 مسائل غير محلولة

1. بفرض لدينا تربة قيمة الوزن النوعي النسبي لها $G_s = 2.75$ ، احسب الوزن الحجمي لفراغات هواء معدومة من أجل قيم الرطوبة التالية : عند $w = 5\%$ ، 8% ، 10% ، 12% ، 15% . الحساب بالوحدة (lb/ft^3) .
2. أعد المسألة 1 مع استخدام $G_s = 2.65$.
3. احسب تغير الكثافة الجافة (Kg/m^3) لتربة ($G_s = 2.67$) عند قيم الرطوبة : 20% ، $w = 10\%$ من أجل عدة درجة إشباع $(S) = 80\%$ ، 90% ، 100% .
4. نتائج تجربة بروكتور القياسية معطاة في الجدول التالي . المطلوب تحديد الوزن الحجمي الجاف الأعظمي للرص ومحتوى الرطوبة الأمثل.

الرطوبة المستخدمة (%)	الوزن الصافي للتربة في القالب (lb)	حجم قالب بروكتور (ft^3)
8.4	3.26	1/30
10.2	4.15	1/30
12.3	4.67	1/30
14.6	4.02	1/30
16.8	3.63	1/30

5. من أجل التربة المشروحة في المسألة 4 ، في حال كان $G_s = 2.72$ ، المطلوب تحديد معامل المسامية ودرجة الإشباع عند محتوى الرطوبة الأمثل.
6. نتائج تجربة بروكتور القياسية معطاة في الجدول التالي . المطلوب تحديد الوزن الحجمي الجاف الأعظمي (Kg/m^3) للرص ومحتوى الرطوبة الأمثل .
7. نتائج الوزن الحجمي المحدد حقياً للتربة المشروحة في المسألة 6 أعطت التالي :
محتوى الرطوبة = 10.5% والكثافة الرطبة = $1705 Kg/m^3$. المطلوب تحديد الكثافة النسبية.

الرطوبة المستخدمة (%)	الوزن الصافي للتربة في القالب (kg)	حجم قالب بركتور (cm ³)
9.9	1.68	943.3
10.6	1.71	943.3
12.1	1.77	943.3
13.8	1.83	943.3
15.1	1.86	943.3
17.4	1.88	943.3
19.4	1.87	943.3
21.2	1.85	943.3

8. محتوى الرطوبة الحقلي لتربة كان 18% والوزن الحجمي الرطب لها 105 lb/ft³ . أما الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة لهذه التربة فكان 2.75 . يجب أن يتم حفر هذه التربة ونقلها إلى موقع البناء الجديد للاستخدام كمواد ردم ورصها. في حال كانت المواصفات تتطلب ان يتم الرص للوصول إلى وزن حجمي جاف بحد أدنى 103.5 lb/ft³ عند نفس محتوى الرطوبة 18%، ما هو عدد الأمتار المكعبة التي يجب حفرها من موقع الحفر لتأمين 10.000 m³ من الردم المرصوص في الموقع ؟ كم شاحنة محملة بوزن 20 – ton نحتاج لنقل التربة المحفورة.

9. إن كمية الردم الواجب نقلها والمطلوبة لتأمين تربة مرصوصة في موقع البناء الجديد هي 8000 m³. فإذا كانت قيمة معامل المسامية للتربة المرصوصة محدد بالقيمة 0.7 ، ويتوفر لمهندس التنفيذ أربع مواقع إستعارة للتربة المطلوبة كما هو موضح في الجدول التالي، والذي يحدد معامل المسامية للتربة الطبيعية وكلفة المتر المكعب لنقل التربة إلى موقع البناء المحدد. قم بالحسابات اللازمة لتحديد الحفرة والتي يمكن أن يتم شراء التربة منها بأقل تكلفة . افرض G_s نفسها لكل الحفر.

□

الحفر الأربعة	معامل المسامية	الكلفة لكل متر مكعب
A	0.82	8
B	1.1	5
C	0.9	9
D	0.78	12

10. الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والأصغري لتربة رملية تمّ تحديدهما في المخبر بالقيم التالية: 104 lb/ft^3 و 93 lb/ft^3 على التوالي. ما هي كثافة الرص في الحقل في حال كانت الكثافة النسبية 78% .

11. الكثافات الجافة الأعظمية والأصغرية لتربة رملية محدد من المخبر بالقيم التالية : 1682 Kg/m^3 و 1510 Kg/m^3 على التوالي. ما هي كثافة الرص في الحقل (%) وما هي الكثافة الجافة (%) في حال كانت الكثافة النسبية للرص ولنفس التربة الرملية هي 70% .

12. الرص النسبي لتربة رملية في الحقل كان 90% . الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والأصغري لهذه التربة كان: 810 lb/ft^3 و 93 lb/ft^3 على التوالي. من أجل الشروط الحقلية، المطلوب تحديد:

- الوزن الحجمي الجاف .
 - الكثافة النسبية للرص .
 - الوزن الحجمي الرطب عند محتوى رطوبة 12% .
13. التالي هي نتائج تجربة تحديد الوزن الحجمي الحقلية لتربة باستخدام نظرية مخروط الرمل:

- الكثافة الجافة المعاييرة لرمـل Ottawa 1667 kg/m^3 .
- الكتلة المعاييرة لرمـل Ottawa اللازمة لملء المخروط 0.117 kg .
- كتلة الوعاء + المخروط + الرمل (قبل الاستخدام) 5.99 kg .
- كتلة الوعاء + المخروط + الرمل (بعد الاستخدام) 2.81 kg .

- كتلة التربة الرطبة من الحفرة = 3.331 kg .
 - محتوى الرطوبة للتربة الرطبة = 11.6% .
- المطلوب تحديد الوزن الحجمي الجاف للرص الحقلي.

14. من أجل مواد ردم لمشروع vibroflotation لها قطر حبيبات :

- $D_{10} = 0.11 \text{ mm}$
- $D_{20} = 0.19 \text{ mm}$
- $D_{50} = 1.3 \text{ mm}$

المطلوب تحديد عدد الملائمة S_N لكل السابق.

15. أعد المسألة 14 باستخدام القيم التالية :

- $D_{10} = 0.09 \text{ mm}$
- $D_{20} = 0.25 \text{ mm}$
- $D_{50} = 0.61 \text{ mm}$

14.6 المراجع

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1982). AASHTO Materials, Part II, Washington, D.C.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007). Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08, West Conshohocken, Pa.
3. D'APPOLONIA, E. (1953). "Loose Sands—Their Compaction by Vibroflotation," Special Technical Publication No. 156, ASTM, 138–154.
4. BROWN, E. (1977). "Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT12, 1437–1451.
5. D'APPOLONIA, D. J., WHITMAN, R. V., and D'APPOLONIA, E. D. (1969). "Sand Compaction with Vibratory Rollers," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, No. SM1, 263–284.
6. DAS, B. M., SELIM, A. A., and PFEIFLE, T. W. (1978). "Effective Use of Bottom Ash as a Geotechnical Material," Proceedings, 5th Annual UMR-DNR Conference and Exposition on Energy, University of Missouri, Rolla, 342–348.
7. DAS, B. M., TARQUIN, A. J., and JONES, A. D. (1983). "Geotechnical Properties of a Copper Slag," Transportation Research Record No. 941, National Research Council, Washington, D.C., 1–4.
8. FRANKLIN, A. F., OROZCO, L. F., and SEMRAU, R. (1973). "Compaction of Slightly Organic Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM7, 541–557.
9. GURTUG, Y., and SRIDHARAN, A. (2004). "Compaction Behaviour and Prediction of Its Characteristics of Fine Grained Soils with Particular Reference to Compaction Energy," Soils and Foundations, Vol. 44, No. 5, 27–36.
10. HOLTZ, R. D., and KOVACS, W. D. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

11. JOHNSON, A. W., and SALLBERG, J. R. (1960). "Factors That Influence Field Compaction of Soil," Highway Research Board, Bulletin No. 272.
12. LAMBE, T. W. (1958a). "The Structure of Compacted Clay," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, 1654-1 to 1654-35.
13. LAMBE, T. W. (1958b). "The Engineering Behavior of Compacted Clay," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, 1655-1 to 1655-35.
14. LANCASTER, J., WACO, R., TOWLE, J., and CHANEY, R. (1996). "The Effect of Organic Content on Soil Compaction," Proceedings, 3rd International Symposium on Environmental Geotechnology, San Diego, 152-161.
15. LEE, K. W., and SINGH, A. (1971). "Relative Density and Relative Compaction," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM7, 1049-1052.
16. LEE, P. Y., and SUEDKAMP, R. J. (1972). "Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils," Highway Research Record No. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1-9.
17. LEONARDS, G. A., CUTTER, W. A., and HOLTZ, R. D. (1980). "Dynamic Compaction of Granular Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT1, 35-44.
18. MITCHELL, J. K. (1970). "In-Place Treatment of Foundation Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM1, 73-110.
19. OMAR, M., ABDALLAH, S., BASMA, A., and BARAKAT, S. (2003). "Compaction Characteristics of Granular Soils in United Arab Emirates," Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 21, No. 3, 283-295.
20. PORAN, C. J., and RODRIGUEZ, J. A. (1992). "Design of Dynamic Compaction," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 5, 796-802.

21. PROCTOR, R. R. (1933). "Design and Construction of Rolled Earth Dams , "Engineering News Record, Vol. 3, 245–248, 286–289, 348–351, 372–376.
22. SEALS, R. K. MOULTON, L. K., and RUTH, E. (1972). "Bottom Ash: An Engineering Material , "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98 ,No. SM4, 311–325.
23. SEED, H. B. (1964). Lecture Notes, CE 271, Seepage and Earth Dam Design, University of California, Berkeley.
24. SEED, H. B., and CHAN, C. K. (1959). "Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays , "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 85 ,No. SM5, 87–128.
25. U.S. DEPARTMENT OF NAVY (1971). "Design Manual—Soil Mechanics, Foundations, and Structures , "NAVFAC DM-7, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

7 الفصل السابع: النفاذية

تعتبر الترب نفوذة بسبب وجود فراغات متصلة داخلياً، هذه الفراغات تسمح للماء بالجريان ضمن كتلة التربة، من النقاط ذات الطاقة العالية إلى النقاط ذات الطاقة المنخفضة. لذلك، إن دراسة جريان الماء خلال التربة النفوذة هام في ميكانيك التربة. هذه الأهمية تظهر عند القيام بأعمال هندسية تحت الأرض وخاصة إذا كانت التربة نفوذة، هنا لا بد من تقدير كمية المياه اللازم ضخها كي تبقى إمكانية العمل تحت الأرض ممكنة. هذا من جهة، ومن جهة ثانية وبحال المنشآت الترابية مثل السدود، فإننا نحتاج لأمرين هامين في آن معاً هما الكتامة والاستقرار، ويلعب جريان الماء دوراً كبيراً في ذلك. كما أن موضوع النفاذية يعتبر من الأمور المهمة جداً من أجل تأمين توازن الجدران الاستنادية بحال كانت التربة خلفها نفوذة.

لدراسة خاصية النفاذية للتربة لا بد من معرفة مجموعة من المفاهيم والقوانين الأساسية بالإضافة لفرضيات خاصة بالوسط المدروس ونقصد هنا التربة. في الفقرات التالية سنقدم شرح مفصل للوصول إلى فهم كامل لظاهرة النفاذية في التربة.

1.7 معادلة برنولي

من ميكانيك الموائع، نعلم وبناءً على معادلة برنولي، أن قيمة الضاغط الكلي عند نقطة ما في الماء المتحرك ضمن جسم التربة يمكن أن تعطى من خلال ثلاث مركبات وهي: ضاغط الضغط، ضاغط السرعة وضاغط الارتفاع وهذا مبين بالمعادلة التالية :

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (1.7)$$

$\uparrow$ $\uparrow$ $\uparrow$
 ضاغط ضاغط ارتفاع
 الضغط السرعة الضاغط

حيث: h = الضاغط الكلي.

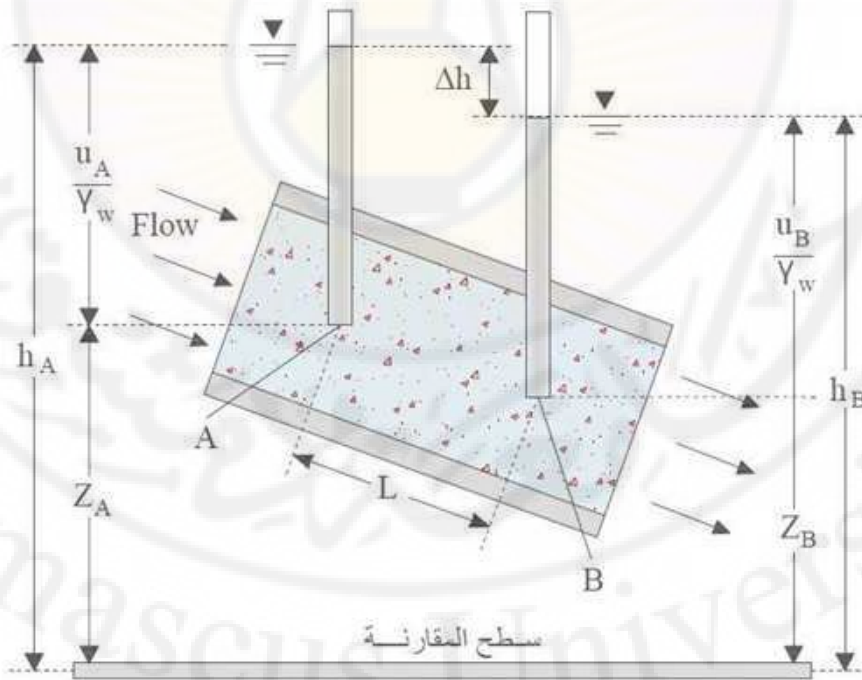
u = الضغط.

v = السرعة.

g = تسارع الجاذبية الأرضية.

γ_w = الوزن الحجمي للماء.

لاحظ في الشكل (1.7) أن قيمة ارتفاع الضاغط Z هي عبارة عن المسافة الشاقولية لنقطة معطاة عن مستوي المقارنة المختار. أما قيمة ضاغط الضغط هو عبارة عن قيمة ضغط الماء u عند النقطة المعطاة مقسوم على الوزن الحجمي للماء γ_w .



الشكل 1-7 : الضغط، الارتفاع، و الضاغط الكلي لغزارة المياه المارة ضمن التربة

الشكل (1.7): يوضح قيم: الضغط، الارتفاع والضاغط الكلية والضغط الكلي للماء الجاري ضمن التربة

إذا ما تمّ تطبيق معادلة برنولي على جريان الماء خلال جسم تربة يمتلك مسامية متوسطة، فإننا نجد أن الحد المتضمن ضاغط السرعة يمكن أن يهمل بسبب أن سرعة الارتشاح ستكون صغيرة جداً، وقيمة الضاغط الكلي في هذه الحالة عند أي نقطة يمكن أن تساوي إلى القيمة المحددة بالمعادلة:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z \quad (2.7) \square$$

لدراسة وقياس منسوب الماء في نقطة معينة ضمن جسم التربة، يمكننا أن نقوم بتركيب أنابيب صغيرة القطر مفتوحة من الجهتين، هذه الأنابيب تسمى بالأنابيب البيزومترية كما هو مبين بالشكل (1.7) عند النقطتين A و B.

إن منسوب الماء ضمن الأنبوب البيزومتري يمكنه أن يرتفع لحد معين وبعد ذلك يستقر. عند الاستقرار يمكننا أن نعرف قيمة ضاغط الضغط بأنها المسافة الشاقولية لعمود الماء في الأنبوب البيزومتري ما بين مكان النقطة المدروسة ومنسوب الماء في الأنبوب البيزومتري.

بحال وجود فرق بمنسوب الماء ما نقطتين كما هو الحال ما بين النقطتين A, B في الشكل (1.7) عندها نقول أن هناك فقدان لضغط الضغط ما بين النقطتين A و B ونعبر عن ذلك بالعلاقة التالية:

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \right) \quad (3.7)$$

ويمكن التعبير عن Δh بشكل لا بعدي بالعلاقة التالية:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (4.7)$$

حيث: i = التدرج الهيدروليكي أو الميل الهيدروليكي.

L = المسافة ما بين النقطة A و B وهي عبارة عن طول خط الجريان ضمن جسم التربة والذي

حسب من أجله فقدان الضاغط.

عموماً، إذا أردنا دراسة العلاقة ما بين تغير السرعة v مع قيم التدرج الهيدروليكي i ، يمكننا ملاحظة الشكل (2.7). هذا الشكل يبين لنا أن العلاقة ما بين السرعة والميل الهيدروليكي تقسم إلى ثلاث مجالات أو مناطق وهي:

1. منطقة الجريان الصفحي (المنطقة I).
2. المنطقة الانتقالية (المنطقة II).
3. منطقة الجريان المضطرب (المنطقة III).



الشكل 2-7 : العلاقة بين السرعة و الميل الهيدروليكي

الشكل (2.7): يوضح طبيعة تغير السرعة v مع التدرج الهيدروليكي i من خلال ثلاث مناطق

من الشكل، نلاحظ أنه عندما تكون قيم التدرج الهيدروليكي منخفضة، تكون تغيرات قيم السرعة بشكل خطي مع زيادة قيم i ضمن المنطقتين (I, II) أي أن طبيعة الجريان ضمن جسم التربة في هذه الحالة هي جريان صفحي. أما بحال كانت قيم تدرج هيدروليكي i عالياً، نلاحظ أن العلاقة تصبح لا خطية أي يصبح الجريان ضمن جسم التربة مضطرب (المنطقة III).

في معظم الترب الناعمة، هناك فرضية مهمة وهي أننا نعتبر جريان الماء ضمن فراغات التربة جريان صفحي، لذلك يمكننا القول أن العلاقة ما بين السرعة والتدرج الهيدروليكي موضحة بالمعادلة:

$$v \propto i \quad (5.7)$$

أما في حالة الصخر المتشقق، الأحجار، البحص والرمل الخشن يمكن أن تظهر فيها ظروف الجريان المضطرب، والمعادلة (5.7) لم تعد قابلة للاستخدام.

2.7 قانون دارسي

في عام 1856 نشر السيد دارسي معادلة بسيطة للعلاقة ما بين سرعة الماء خلال الترب المشبعة، والتدرج الهيدروليكي والتي يمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية :

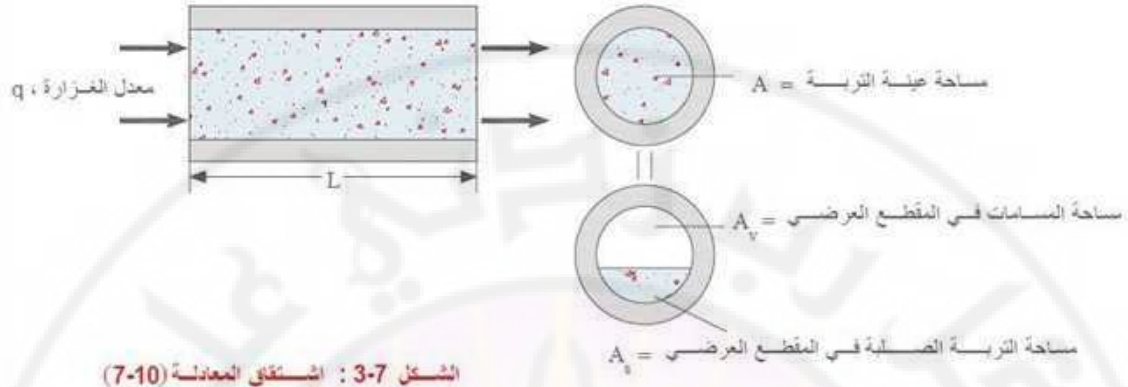
$$v = k \cdot i \quad (6.7)$$

حيث:

v = السرعة discharge والتي تعبر عن كمية الماء الجارية خلال واحدة الزمن ضمن واحدة المساحة للمقطع العرضي للتربة المشبعة المتعامد مع اتجاه الجريان.
 k = الناقلية الهيدروليكية (والتي تعرف أيضاً بمعامل النفاذية).

هذه المعادلة مبينة بشكل أساسي على استنتاجات دارسي لجريان الماء خلال الترب الرملية الصافية. لو نظرنا إلى المعادلة (6.7) سنجد أن هناك تشابه كبير مع ما قدمته المعادلة (5.7)، مع التأكيد أن كلا المعادلتين صالحتين فقط لحالة الجريان الصفحي والتي يمكن تطبيقها على مجال واسع من الترب المشبعة.

في المعادلة (6.7)، نجد أن v هي discharge تعبر عن سرعة الماء ضمن جسم التربة على أساس أن كامل المقطع العرضي A للتربة المشبعة يمرر الماء. ولكن في الحقيقة نجد أن هذا المقطع يحتوي على ذرات صلبة تمثل الأجزاء الصلبة للتربة وفيما بينها توجد فراغات (مسامات) التي وحدها تسمح للماء بالمرور وتمثل هذه المسامات المساحة الفعلية A_v . على كل حال، إن قيم السرعة الفعلية لجريان الماء (والتي هي سرعة الرشح) خلال الفراغات هي أكبر من قيم السرعة v .



الشكل (3.7): يوضح فرضيات واستنتاج المعادلة (10.7)

يمكننا أن نعطي علاقة ما بين السرعة discharge v وسرعة الرش v_s من خلال الشكل 3.7. الشكل يظهر لنا كتلة تربة بطول L مقطوعها العرضي A . لهذا المقطع، يمكننا القول أن كمية الماء الجارية ضمنها خلال واحدة الزمن هي q ، ونعبر عن ذلك بالمعادلة التالية :

$$q = v \cdot A = A_v \cdot v_s \quad (7.7)$$

حيث:

$$v_s = \text{سرعة الرش.}$$

$$A_v = \text{مساحة الفراغات في المقطع العرضي لعينة التربة.}$$

ولكن ومن خلال الشكل يمكننا كتابة أن:

$$A = A_v + A_s \quad (7.8)$$

حيث:

$$A_s = \text{مساحة الأجزاء الصلبة في المقطع العرضي للعينة.}$$

وبدمج المعادلات (7.7) و (8.7) نحصل على العلاقة التالية :

$$q = v(A_v + A_s) = A_v \cdot v_s$$

أو العلاقة :

$$v_s = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} = \frac{v(A_v + A_s)L}{A_v L} = \frac{v(V_v + A_s)}{V_v} \quad (9.7) \square$$

حيث:

V_v = حجم الفراغات في العينة.

V_s = حجم الأجزاء الصلبة في العينة.

المعادلة (9.7) يمكن إعادة صياغتها بشكل آخر وهو التالي:

$$v_s = v \left[\frac{1 + \left(\frac{V_v}{V_s} \right)}{\frac{V_v}{V_s}} \right] = v \left(\frac{1 + e}{e} \right) = \frac{v}{n} \quad (10.7) \square$$

حيث:

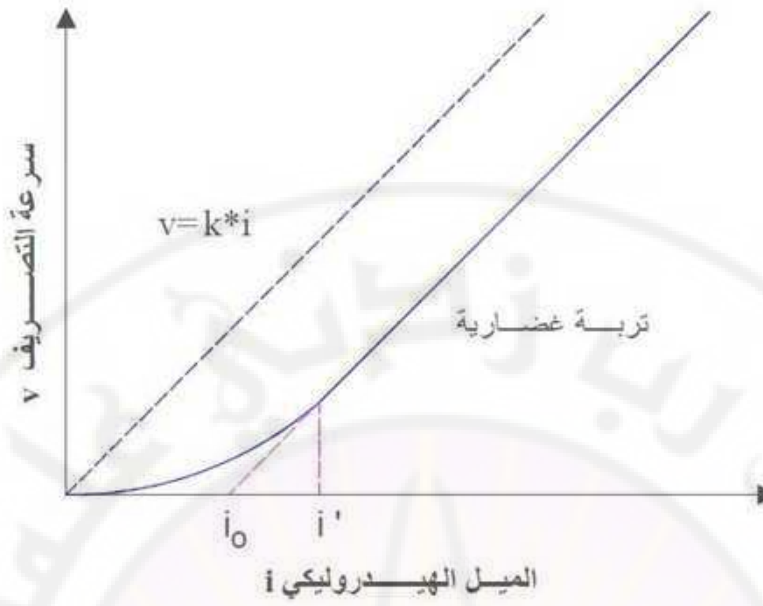
e = معامل المسامية.

n = المسامية.

قانون دارسي المعروف والمبين في المعادلة (6.7) يفترض وكما قلنا سابقاً أن السرعة discharge

v ترتبط بعلاقة خطية مع التدرج الهيدروليكي ويمر هذا الخط من المبدأ كما هو مبين في الشكل

4.7.



الشكل 4-7 : العلاقة بين سرعة التصريف و الميل الهيدروليكي في الترب الغضارية

الشكل (4.7): يبين تغير السرعة discharge مع التدرج الهيدروليكي في الغضار

ولكن، التجارب العملية التي أجريت من قبل السيد Hansbo في العام (1960) على أربع عنيات غير مضطربة لغضار طبيعي، بينت أن قيم التدرج الهيدروليكي i' (انظر الشكل 4.7) تلعب دوراً هاماً في شكل المعادلة (6.7) من خلال العلاقات التالية :

$$v = k(i - i_0) \quad (\text{for } i \geq i') \quad (11.7)$$

وأيضاً :

$$v = k \cdot i^m \quad (\text{for } i < i') \quad (12.7)$$

هذا يعني أنه عند تدرج هيدروليكي منخفض جداً تصبح العلاقة بين i و v غير خطية. ووجد أن قيمة m في المعادلة (12.7) من أجل أربع عينات غضارية سويدية تساوي 1.5.

على كل حال وهذا هو المهم، العديد من الدراسات أثبتت صحة النتائج السابقة. وخاصة السيد (1976) Mitchell الذي عالج هذا الموضوع بكثير من التفصيل وأخذ بعين الاعتبار كل النقاط والفرضيات وأثبت أن قانون دارسي يبقى صحيحاً.

3.7 الناقلية الهيدروليكية (معامل النفذية)

يعبر عن الناقلية الهيدروليكية أو معامل النفذية عادة بالوحدة cm/sec أو m/sec بالوحدات الدولية و ft/min أو ft/day بالوحدات الانكليزية.

إن قيم الناقلية الهيدروليكية للترب تعتمد على عدة عوامل: سرعة الجريان، تدرج حجم المسامات، تدرج حجم الحبيبات، معامل المسامية، خشونة حبيبات الفلزات ودرجة الإشباع للتربة.

في الترب الغضارية، تلعب البنية أيضاً دوراً هاماً في الناقلية الهيدروليكية. عوامل هامة أخرى تؤثر على النفذية في الغضار مثل تركيز الأيونات وسماكة طبقات الماء المتصلة بحبيبات الغضار.

إن قيمة الناقلية الهيدروليكية (k) تتغير بشكل كبير من أجل الترب المختلفة. الجدول (1.7) يبين بعض القيم للناقلية الهيدروليكية (k) لحالة الترب المشبعة. ويجب معرفة أن الناقلية الهيدروليكية للترب غير المشبعة هي بقيم أقل مما وارد بالجدول ولكنها تزداد بشكل كبير مع زيادة درجة الإشباع.

إن الناقلية الهيدروليكية لتربة تتعلق أيضاً بخواص السائل المتدفق خلال مقطع التربة المدروس، وهذا الأمر يمكننا أن نوضحه من خلال العلاقة :

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \bar{K} \quad (13.7) \square$$

حيث:

γ_w = الوزن الحجمي للماء.

η = لزوجة الماء.

$\bar{K}$ = النفذية المطلقة.

يعبر عن النفذية المطلقة بالوحدة L^2 (والتي هي أيضاً، cm^2 ، ft^2 ، وهكذا).

الجدول (1.7): بعض قيم الناقلية الهيدروليكية (معامل النفذية) للترب المشبعة

نوعية التربة	k	
	cm/sec	ft/min
بحص	100 – 1.0	200 – 2.0
رمل خشن	1.0 – 0.01	2.0 – 0.02
رمل ناعم	0.01 – 0.001	0.02 – 0.002
سيلت غضاري	0.001 – 0.00001	0.002 – 0.00002
غضار	< 0.000001	< 0.000002

المعادلة (13.7) تبين لنا أن الناقلية الهيدروليكية هي تابع للوزن الحجمي وسرعة جريان الماء، كما أن سرعة جريان الماء خلال كتلة التربة تكون تابعة لدرجة الحرارة التي أجريت خلالها التجربة. لذلك، ومن المعادلة (13.7) نستطيع أن نكتب:

$$\frac{k_{T_1}}{k_{T_2}} = \left(\frac{\eta_{T_2}}{\eta_{T_1}} \right) \left(\frac{\gamma_w(T_1)}{\gamma_w(T_2)} \right) \quad (14.7) \square$$

حيث:

K_{T_1}, K_{T_2} = الناقلية الهيدروليكية عند درجات حرارة T_1 و T_2 على التوالي.

η_{T_1}, η_{T_2} = لزوجة الماء عند درجات حرارة T_1 و T_2 على التوالي.

$\gamma_w(T_1), \gamma_w(T_2)$ = الوزن الحجمي للماء عند درجات حرارة T_1 و T_2 على التوالي.

عملياً يمكننا أن نعبر عن قيم k عند درجة حرارة $20^\circ C$ ، أخذين بعين الاعتبار تغير قيم لزوجة الماء مع تغير درجات الحرارة. ومع فرضية أن $\gamma_w(T_1) \simeq \gamma_w(T_2)$ عندها نجد ومن خلال المعادلة (14.7) أنه بإمكاننا كتابة المعادلة :

$$k_{20^{\circ}C} = \left(\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}} \right) k_{T^{\circ}C} \quad (15.7) \square$$

عملياً نجد أن تغير القيمة $(\eta_{T^{\circ}C} / \eta_{20^{\circ}C})$ مع تغير درجة حرارة التجربة T والتي حصرت ما بين 15 إلى 30 °C معطاة في الجدول 2.7.

الجدول (2.7): تغير القيمة $(\eta_{T^{\circ}C} / \eta_{20^{\circ}C})$ مع تغير درجة حرارة التجربة T

درجة الحرارة (T) بالدرجات	$\eta_{T^{\circ}C} / \eta_{20^{\circ}C} \square$	درجة الحرارة (T) بالدرجات	$\eta_{T^{\circ}C} / \eta_{20^{\circ}C}$
15	1.135	23	0.931
16	1.106	24	0.910
17	1.077	25	0.889
18	1.051	26	0.869
19	1.025	27	0.850
20	1.000	28	0.832
21	0.976	29	0.814
22	0.953	30	0.797

4.7 تحديد قيمة النافذية الهيدروليكية مخبرياً

يتم استخدام تجربتين قياسيتين لتحديد النافذية الهيدروليكية لتربة وهما:

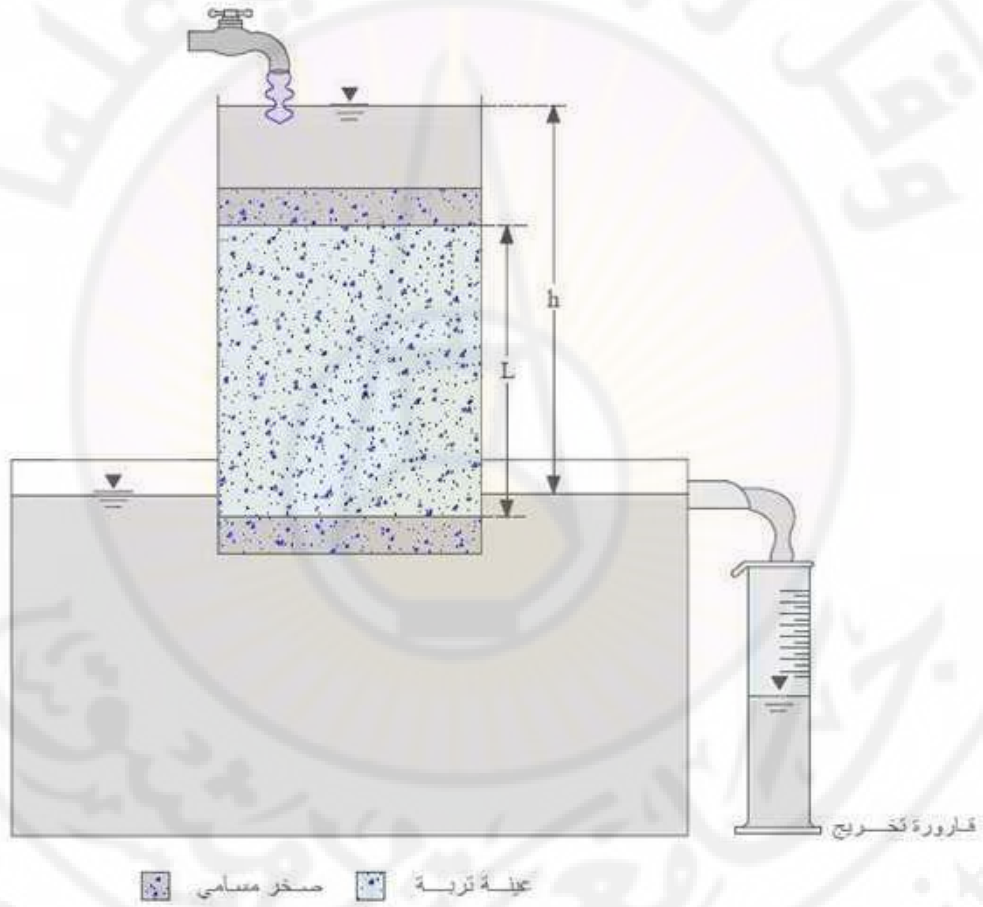
1. تجربة الضاغط الثابت.

2. تجربة الضاغط المتغير.

وسنقدم فيما يلي ملخص يشرح التجريبتين.

1.4.7 تجربة الضاغط الثابت

إجراءات تجربة الضاغط الثابت موضحة في الشكل (5.7). في هذا النوع من الإعداد المخبري، الماء المزود عند المدخل يتم معايرته بحيث يكون الفرق بالضغط بين المدخل والمخرج ثابت خلال فترة التجربة. فبعد أن تشبع التربة، يحدث جريان الماء خلال العينة، هنا نبدأ بجمع الماء في حنجور مدرج وبمدة معلومة ومحددة.



الشكل 5-7 : تجربة النفاذية - الضغط ثابت

الشكل (5.7): تجربة النفاذية بطريقة الضاغط الثابت

في هذه اللحظة، يمكننا القول أن الحجم الكلي للماء المجمع خلال الزمن المحدد يمكن التعبير عنه بالمعادلة:

$$Q = A \cdot v \cdot t = A \cdot (k \cdot i) t \quad (16.7)$$

حيث:

Q = حجم الماء المجمع.

A = مساحة المقطع العرضي لعينة التربة.

t = زمن تجميع الماء.

نعلم أن قيمة التدرج الهيدروليكي i تعطى بالمعادلة:

$$i = \frac{h}{L} \quad (17.7) \square$$

حيث L = طول العينة، وبتعويض المعادلة (7.17) في المعادلة (16.7) فنحصل على المعادلة:

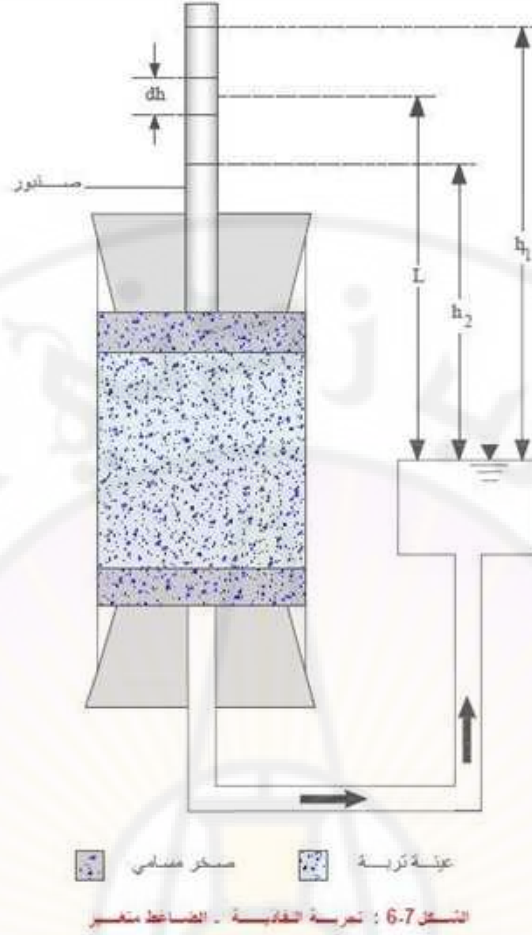
$$Q = A \left(k \frac{h}{L} \right) t \quad (18.7) \square$$

من المعادلة (18.7) نستطيع أن نستنتج قيمة الناقلية الهيدروليكية للتربة k من خلال المعادلة:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (19.7) \square$$

2.4.7 تجربة الضاغط المتغير

إجراءات تجربة الضاغط المتغير موضحة في الشكل (6.7). من خلال الشكل، نلاحظ أن تدفق الماء إلى عينة التربة يتم من خلال أنبوب شاقولي، أما أخذ الماء الخارج من العينة فيتم عبر أنبوب ويجمع الماء ضمن وعاء. بعد إشباع العينة، نقوم بتحديد الضاغط البدائي h_1 عند زمن $t = 0$ بداية التجربة، ويتم السماح للماء بالتدفق عبر عينة التربة فينخفض الضاغط عند زمن $t = t_2$ ليصبح h_2 في نهاية التجربة.



الشكل (6.7): تجربة نفاذية بطريقة الضاغط المتغير

بهذه الحالة، يمكننا حساب غزارة الجريان للماء المار عبر العينة عند أي وقت t من خلال العلاقة:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt} \quad (20.7) \square$$

حيث: q = غزارة الجريان.

a = مساحة المقطع العرضي للأنبوب الشاقولي.

A = مساحة المقطع العرضي لعينة التربة.

وبإعادة تنظيم المعادلة (20.7) نستطيع أن نكتب المعادلة التالية:

$$dt = \frac{a \cdot L}{A \cdot K} \left(-\frac{dh}{h} \right) \quad (21.7) \square$$

ويمكاملة الحد اليساري للمعادلة (21.7) بالنسبة للزمن من الزمن $t = 0$ وحتى الزمن t وأما الحد اليميني نكامله بالنسبة لفرق الضاغط من القيمة h_1 عند $t = 0$ وحتى القيمة h_2 عند الزمن t ، فنحصل على المعادلة:

$$t = \frac{a.L}{A.k} \log_e \frac{h_1}{h_2} \quad \square$$

وبإصلاح هذه المعادلة يمكننا أن نحسب قيمة الناقلية الهيدروليكية بالمعادلة:

$$k = 2.303 \frac{a.L}{A.t} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \square \quad (22.7)$$

□

المثال 1.7:

أجريت تجربة قياس الناقلية الهيدروليكية بطريقة الضاغط الثابت المبين في الشكل (5.7). وكانت نتائج التجربة كالتالي:

- $L = 30 \text{ cm}$.
- $A = \text{مساحة العينة} = 177 \text{ cm}^2$.
- فرق الضاغط الثابت، $h = 50 \text{ cm}$.
- الماء المجمع خلال فترة زمنية 5 دقائق $= 350 \text{ cm}^3$.
- احسب الناقلية الهيدروليكية بالوحدة cm/sec .

الحل:

من خلال المعادلة (19.7) نجد أن الناقلية الهيدروليكية وهي :

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$$

وبمعرفة متغيراتها والمحددة من خلال معطيات المسألة وهي :

$$Q = 350 \text{ cm}^3, L = 30 \text{ cm}, A = 177 \text{ cm}^2, h = 50 \text{ cm} \text{ و } t = 5 \text{ min}$$

نستطيع الحساب فيكون لدينا:

$$k = \frac{(350)(30)}{(177)(50)(5)(60)} = 3.95 \times 10^3 \text{ cm/sec}$$

□

المثال 2.7:

من أجل تجربة النفذية بطريقة الضاغط المتغير، لدينا القيم التالية:

- طول العينة = 8 in.
- مساحة عينة التربة = 1.6 in².
- مساحة الأنبوب الشاقولي = 0.06 in².
- فرق الضاغط عند الزمن t = 0 = 20 in.
- فرق الضاغط عند الزمن t = 180 sec = 12 in.

المطلوب تحديد الناقلية الهيدروليكية للتربة بالوحدة in/sec.

الحل:

من المعادلة (22.7):

$$k = 2.303 \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \square$$

وبمعرفة متغيراتها وهي:

$$a = 0.06 \text{ in}^2, L = 8 \text{ in}, A = 1.6 \text{ in}^2, \square$$

$$t = 180 \text{ sec}, h_1 = 20 \text{ in}, h_2 = 300 \text{ mm} \square$$

نستطيع الحساب وتكون النتيجة:

$$k = 2.303 \frac{(0.06)(8)}{(1.6)(180)} \log_{10} \left(\frac{20}{12} \right) = 8.52 \times 10^{-4} \text{ in/sec} \square$$

المثال 3.7:

إذا كانت الناقلية الهيدروليكية لتربة غضارية هي $3 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ ولزوجة الماء الجاري في هذه التربة عند درجة حرارة 25°C هي $0.0911 \times 10^{-4} \text{ g.sec/cm}^2$ احسب النفاذية المطلقة $\bar{K}$ للتربة.

الحل:

من خلال المعادلة (13.7) وبالتعويض نجد أن:

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \bar{K} = 3 \times 10^{-7} \text{ cm/sec} \quad \square$$

وعليه نستطيع أن النفاذية المطلقة من خلال:

$$3 \times 10^{-7} = \left(\frac{1 \text{ g/cm}^3}{0.0911 \times 10^{-4}} \right) \bar{K} \quad \square$$

$$\bar{K} = 0.2733 \times 10^{-11} \text{ cm}^2 \quad \square$$

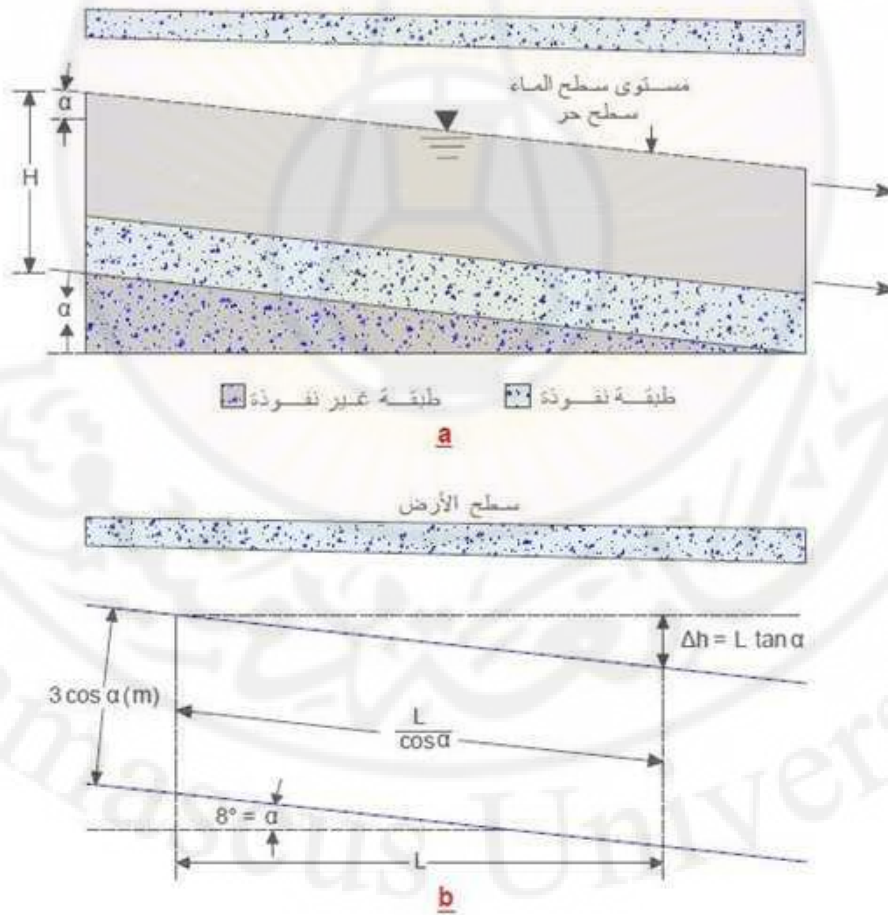
المثال 4.7:

لدينا في الشكل (7.7 a) توضع لطبقة تربة نفوذة فوق طبقة من تربة كثيمة. فإذا كانت الناقلية الهيدروليكية للتربة النفوذة هي : $K = 5.3 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ ، احسب غزارة الرشح خلالها بالوحدة عرضي $\text{m}^3/\text{hr}/\text{m}$. مع العلم أن : $H=3 \text{ m}$ و $\alpha = 8^\circ$.

الحل:

من الشكل (7.7b)، نستطيع أن نحدد التدرج الهيدروليكي من خلال:

$$i = \frac{\text{النقص بالضاغط}}{\text{الطول}} = \frac{L \tan \alpha}{\left(\frac{L}{\cos \alpha}\right)} = \sin \alpha$$



الشكل 7-7

الشكل (7.7): مقطع في التربة المدروسة

حيث يتوفر لدينا المعطيات اللازمة لحساب الغزارة وهي:

$$q = k \cdot i \cdot A = (k)(\sin \alpha)(3 \cos \alpha)(1) \square$$

$$k = 5.3 \times 10^{-5} \text{ m/sec} \square$$

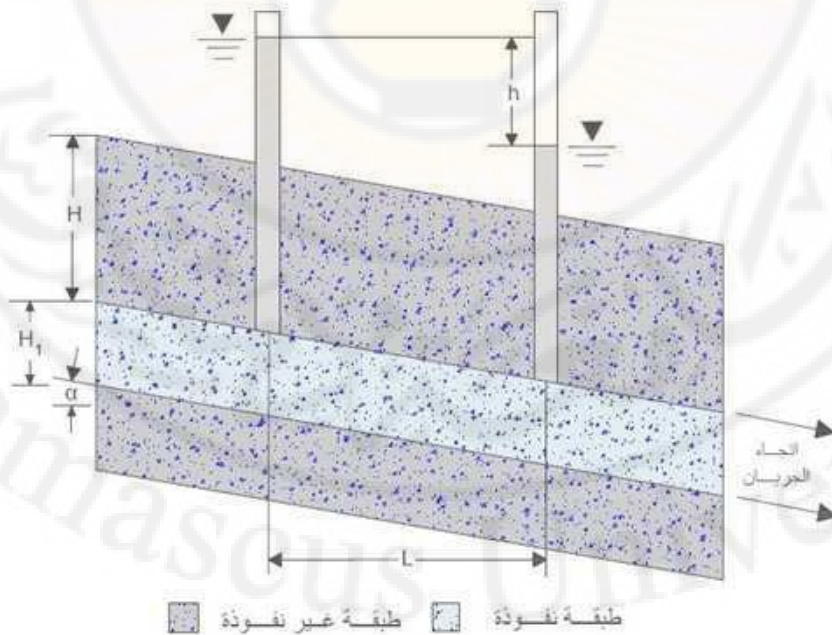
$$q = (5.3 \times 10^{-5})(\sin 8^\circ)(3 \cos 8^\circ)(3600) = 0.0789 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} / \text{m} \square$$

↑
للتحويل إلى
m/hr

المثال 5.7:

أوجد غزارة التدفق بالوحدة $\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ (عند النقاط المناسبة للمقطع العرضي المبين) خلال طبقة التربة النفوذة المبينة في الشكل (8.7). معطيات المسألة هي :

$$H = 8\text{ m}, H_1 = 3 \text{ m}, h = 4\text{ m}, L = 50 \text{ m}, \alpha = 8^\circ, K = 0.08 \text{ cm/sec}$$



الشكل 8-7 : الجريان خلال طبقة نفوذة

الشكل (8.7): الجريان خلال طبقة نفوذة

الحل:

إن قيمة التدرج الهيدروليكي يمكن حسابها ومن الشكل كما يلي:

$$(i) = \frac{h}{\frac{L}{\cos \alpha}}$$

ومن المعادلة (17.7)، (18.7) نستطيع أن نكتب:

$$q = k \cdot i \cdot A = k \left(\frac{h \cdot \cos \alpha}{L} \right) (H_1 \cdot \cos \alpha \times 1) \square$$

$$\begin{aligned} q &= (0.08 \times 10^{-2} \text{ m/sec}) \left(\frac{4 \cos 8^\circ}{50} \right) (3 \cos 8^\circ \times 1) \\ &= 0.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} / \text{m} \square \end{aligned}$$

□

5.7 العلاقات التجريبية للنفاذية الهيدروليكية في الترب الحبيبية

من أجل الترب الرملية المعتدلة الانتظام (أي، لدينا تربة رملية معامل تجانسها صغير)، قدم السيد Hazen في العام (1930) علاقة تجريبية للنفاذية الهيدروليكية وهي معطاه بالشكل:

$$k(cm/sec) = c \cdot D_{10}^2 \quad (23.7)$$

حيث:

c = ثابت يتراوح بين 1.0 وحتى 1.5.

D_{10} = القطر الفعال بالمم.

إن المعادلة (23.7) مبينة بشكل أساسي على استنتاج Hazen لتربة رملية استخدمت كفلتر مخلخل صافي. بحال تواجد كمية قليلة من السلت والغضار في الترب الرملية يمكن القول أن هناك تغير في قيم النفاذية الهيدروليكية وسيكون هذا التغير جوهري.

شكل آخر لعلاقة تجريبية للنفاذية الهيدروليكية وتعطي نتائج جيدة للترب الرملية قدمها كلاً من: (Kozeny, 1927, Carman, 1938, 1956) وهي بالشكل:

$$k = \frac{1}{C_s \cdot S_s^2 \cdot T^2} \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{e^3}{1 + e} \quad (24.7)$$

حيث:

C_s = معامل الشكل، والذي هو تابع لشكل قناة الجريان.

S_s = مساحة السطح النوعي نسبة لواحدة الحجم للحبيبات.

T = تعرج قناة الجريان.

γ_w = الوزن الحجمي للماء.

η = لزوجة السائل permeant.

e = معامل المسامية.

وللاستخدام العملي من قبل المهندسين، عدل Carrier في العام (2003) المعادلة (24.7) وأخذ بعين الاعتبار أنه عند درجة حرارة 20°C فإن القيمة γ_w/η للماء هي حوالي 9.93×10^4 $(\frac{1}{\text{cm.s}})$. وأن القيمة $(C_s T^2)$ هي تقريباً تساوي 5. وبالتعويض بالمعادلة (24.7) نجد أن:

$$k = 1.99 \times 10^4 \left(\frac{1}{S_s} \right)^2 \frac{e^3}{1+e} \quad (25.7) \square$$

ومع اعتبار أن:

$$(26.7)$$

$$S_s = \frac{SF}{D_{eff}} \left(\frac{1}{\text{cm}} \right) \quad (26.7) \square$$

ومع فرضية:

$$D_{eff} = \frac{100\%}{\sum \left(\frac{f_i}{D_{(av)i}} \right)} \quad (27.7) \square$$

حيث: f_i = نسبة الحبيبات بين قطري منخلين بالنسبة المئوية (ملاحظة: المنخل الكبير l والمنخل الصغير s).

سنجد المعادلة:

$$D_{(av)i}(\text{cm}) = [D_{li}(\text{cm})]^{0.5} \times [D_{si}(\text{cm})]^{0.5} \quad (28.7)$$

حيث: SF = معامل الشكل.

وبتعويض المعادلات (25.7), (26.7), (27.7), (28.7) نجد أن المعادلة:

$$k = 1.99 \times 10^4 \left[\frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{li}^{0.5} \times D_{si}^{0.5}}} \right]^2 \left(\frac{1}{SF} \right)^2 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (29.7) \square$$

إن قيمة SF ممكن أن تتراوح بين 6 إلى 8، بناءً على زاوية حبيبات التربة.

أيضاً اقترح Carrier (2003) تعديل ببسط على المعادلة (29.7)، حيث يمكن كتابتها بالشكل التالي:

$$k = 1.99 \times 10^4 \left[\frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}}} \right]^2 \left(\frac{1}{SF} \right)^2 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (30.7) \square$$

المعادلة (30.7) تقترح أن هناك علاقة ما بين الناقلية الهيدروليكية وقيم معامل المسامية:

$$k \propto \frac{e^3}{1+e} \quad (31.7) \square$$

نقترح على المهندسين استخدام المعادلة (30.7) و(31.7). ومن المهم ملاحظة أن المعادلات (23.7) و(31.7) تفترض أن الجريان الصفحي موجود فعلاً.

حديثاً، قدم السيد Chapuis في العام (2004) علاقة تجريبية لقيم K نسبة للمعادلة (31.7) كالتالي:

$$k(cm/s) = 2.4622 \left[D_{10}^2 \frac{e^3}{(1+e)} \right]^{0.7825} \quad (32.7) \square$$

حيث: D_{10} = القطر الفعال (mm).

المعادلة السابقة صالحة للرمل والبحص الطبيعي المنتظم لتقدير k والتي تتراوح بين 10^{-1} cm/s إلى 10^{-3} . ويمكن تطبيق ذلك للترب السلتية الرملية الطبيعية من دون لدونة. وليست صالحة من أجل المواد المطحونة من الترب السلتية مع بعض اللدونة.

وبناءً على نتائج التجارب المخبرية، قدم Amer and Awad (1974) العلاقة التالية لقيم k من أجل الترب الحبيبية:

$$k = 3.5 \times 10^{-4} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} D_{10}^{2.32} \left(\frac{\rho_w}{\eta} \right) \quad (33.7) \square$$

حيث:

k = واحدتها cm/sec.

C_u = معامل التجانس.

D_{10} = القطر الفعال (mm).

ρ_w = كثافة الماء (g/cm³).

η = الزوجة (g.s/cm²).

وعند الفرضيات التالية:

درجة حرارة 20°C، $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ و $\eta \approx 0.1 \times 10^{-4} \text{ g.s/cm}^2$ ، فإن قيمة k تعطى بالمعادلة:

$$k = 3.5 \times 10^{-4} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} C_{10}^{2.32} \left(\frac{1}{0.1 \times 10^{-4}} \right) \square$$

أو:

$$k(\text{cm/sec}) = 35 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} (D_{10})^{2.32} \quad (34.7) \square$$

تم الإشارة في نهاية الفقرة 1.7 أن ظروف الجريان المضطرب ممكن أن توجد في الترب الرملية والبحصية الخشنة والتي قد لا تصلح معادلة دارسي لهذه المواد. على كل حال، وتحت تأثير قيم تدرج هيدروليكي منخفض نفترض تواجد لظروف الجريان الصفحي.

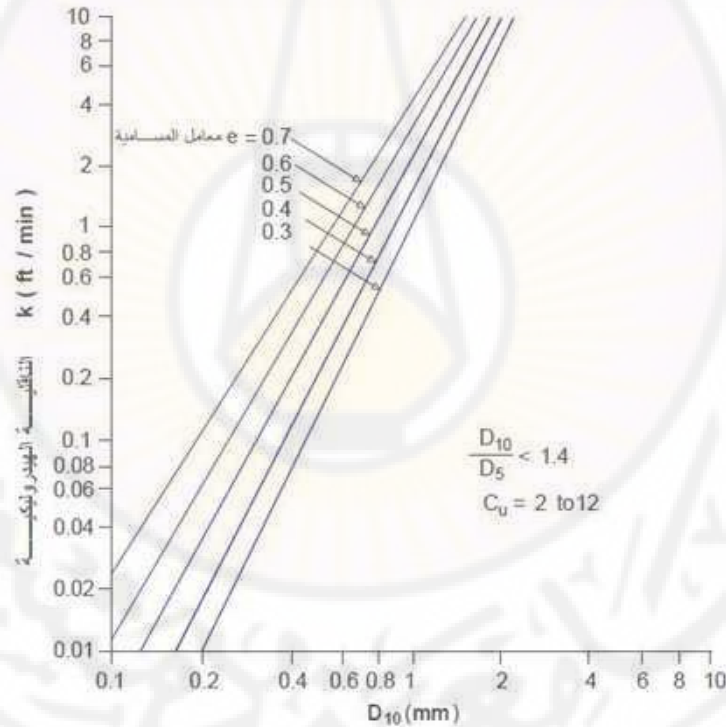
أجرى كل من Kenney, Lau and Ofoegbu في العام (1984) تجارب مخبرية على الترب الحبيبية حيث تراوحت أقطار الحبيبات للعينات المختلفة من 0.074 وحتى 25.4 مم. أما قيم معامل التجانس C_u لهذه العينات فتراوحت ما بين 1.04 وحتى 12. كل تجارب النفاذية التي تم

إجراءها كانت من أجل كثافة نسبية بقيمة 80% أو أكبر. هذه التجارب أظهرت أنه من أجل ظروف الجريان الصفحي يمكننا حساب قيم النفذية المطلقة كما هو مبين بالمعادلة:

$$\bar{K}(mm^2) = (0.05 \text{ to } 1)D_5^2 \quad (35.7)$$

حيث D_5 = القطر (mm) والذي تمر من خلاله 5% من العينة المختبرة.

وأخيراً وبناءً على التجارب المخبرية، قدمت U.S. Department of Navy (1971) ترابط افتراضي بين k (ft/min) و D_{10} (mm) من أجل الترب الحبيبية مع معامل تجانس متراوح بين 2 و 12 و $D_{10}/D_5 < 1.4$ هذا الترابط ظاهر في الشكل 9.7.



الشكل 9-7 : الترابط الهيدروليكي للترب الحبيبية
After U.S. Department of Navy 1971

الشكل 9.7: الناقلية الهيدروليكية للترب الحبيبية (من قبل U.S. Department of Navy، 1971).

□

مثال 6.7:

الناقلية الهيدروليكية لتربة رملية معامل مساميتها 0.5 هي 0.02 cm/sec. المطلوب حساب الناقلية الهيدروليكية عندما يكون معامل المسامية لهذه التربة 0.65.

الحل: باستخدام المعادلة 7.31:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\frac{e_1^3}{1 + e_1}}{\frac{e_2^3}{1 + e_2}}$$

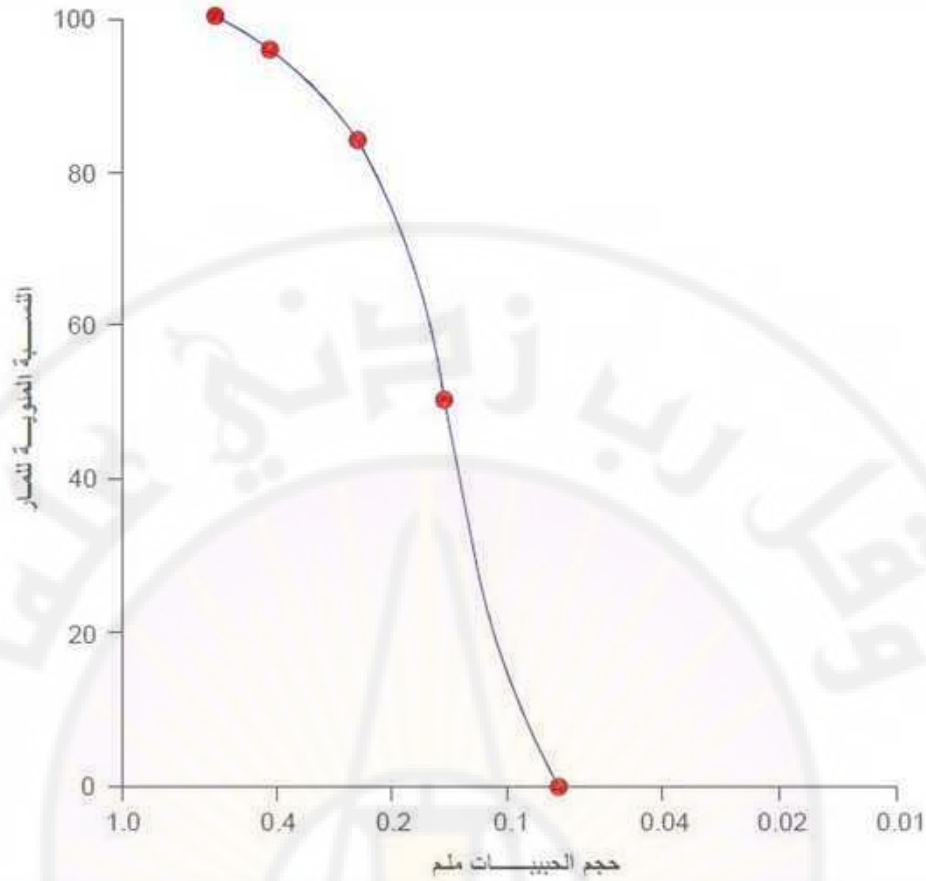
$$\frac{0.02}{k_2} = \frac{\frac{0.5^3}{1 + 0.5}}{\frac{0.65^3}{1 + 0.65}} \Rightarrow k_2 = 0.04 \text{ cm/sec}$$

مثال 7.7:

إن منحنى التدرج الحبي للتربة الرملية المدروسة مبين في الشكل (10.7). المطلوب حساب الناقلية الهيدروليكية باستخدام المعادلة (30.7)، معطى: معامل المسامية للرمل = 0.6، و SF = 7.

الحل: من الشكل (10.7) يمكن الحصول على الجدول التالي:

الفرق ما بين القيم (%)	نسبة المار (%)	قطر المهزة (cm)	رقم المهزة
	100	0.06	30
4	96	0.0425	40
12	84	0.02	60
34	50	0.015	100
50	0	0.0075	200



الشكل (10.7): منحنى التحليل الحبي للرمال المدروس.

من أجل الحبيبات للتربة ما بين المناخل رقم 30 و 40 يكون لدينا :

$$\frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}} = \frac{4}{(0.06)^{0.404} \times (0.0425)^{0.595}} = 81.62 \square$$

من أجل الحبيبات للتربة ما بين المناخل رقم 40 و 60 يكون لدينا :

$$\frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}} = \frac{12}{(0.0425)^{0.404} \times (0.02)^{0.595}} = 440.76 \square$$

وبشكل مشابه، من أجل الحبيبات للتربة ما بين المناخل رقم 60 و 100 يكون لدينا:

$$\frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}} = \frac{34}{(0.02)^{0.404} \times (0.015)^{0.595}} = 2009.5 \square$$

□

أما من أجل الجبيبات للتربة ما بين المناخل رقم 100 و 200 يكون لدينا:

$$\frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}} = \frac{50}{(0.015)^{0.404} \times (0.0075)^{0.595}} = 5013.8$$

$$\frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}}} = \frac{100}{81.62 + 440.76 + 2009.5 + 5013.8} \approx 0.0133$$

ومن المعادلة (30.7) نحسب النافذية الهيدروليكية للتربة الرملية من خلال العلاقة:

$$k = (1.99 \times 10^4)(0.0133)^2 \left(\frac{1}{7}\right)^2 \left(\frac{0.6^3}{1 + 0.6}\right) = 0.0097 \text{ cm/s}$$

المثال 8.7:

حل المثال 7.7 باستخدام المعادلة (32.7).

الحل:

من الشكل 10.7، $D_{10} = 0.09 \text{ mm}$ ومن المعادلة (32.7):

$$k = 2.4622 \left[D_{10}^2 \frac{e^3}{1 + e} \right]^{0.7825} = 2.4622 \left[(0.09)^2 \frac{0.6^3}{1 + 0.6} \right]^{0.7825} \\ = 0.0119 \text{ cm/sec}$$

□

المثال 9.7:

حل المثال 7.7 باستخدام المعادلة (34.7).

من الشكل (10.7) $D_{60} = 0.16 \text{ mm}$ و $D_{10} = 0.09 \text{ mm}$ لذلك:

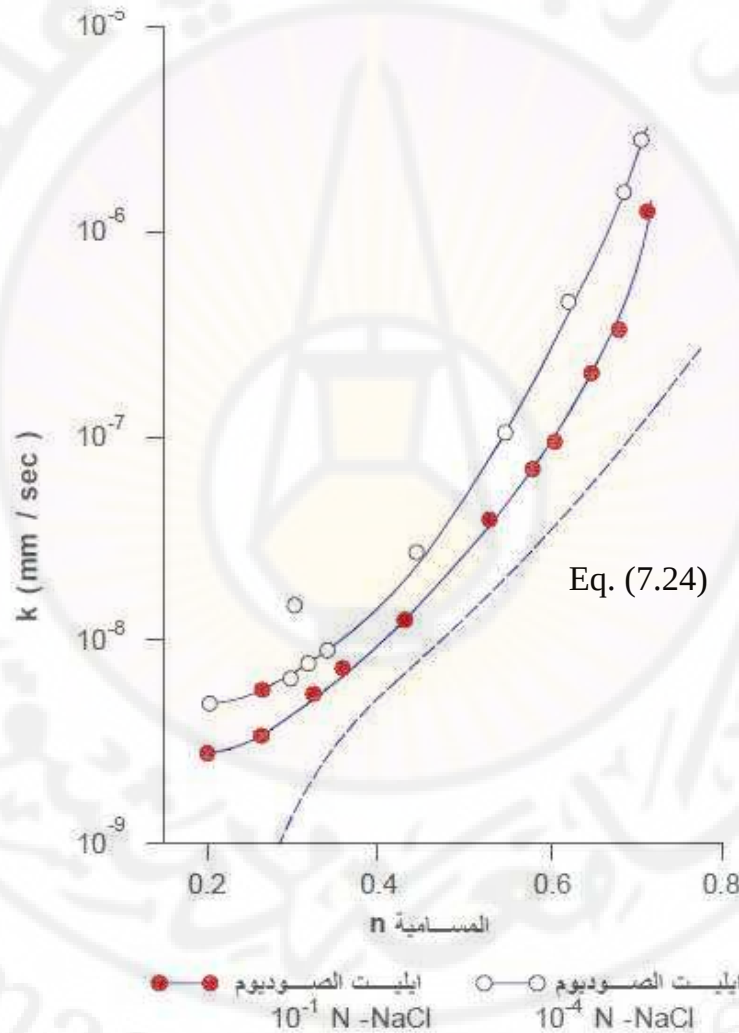
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.16}{0.09} = 1.78$$

ومن المعادلة (34.7):

$$\begin{aligned} k &= 35 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} (D_{10})^{2.32} = 35 \left(\frac{0.6^3}{1+0.6} \right) (1.78)^{0.6} (0.09)^{2.32} \\ &= 0.025 \text{ cm/sec} \\ &\square \end{aligned}$$

6.7 العلاقات التجريبية للناقلية الهيدروليكية في الترب المتماسكة

تم استخدام المعادلة (24.7) من قبل Kozeny-Carman في الماضي لمعرفة هل هي صالحة للترب المتماسكة أم لا. لهذا الأمر أجرى السيد Olsen (1961) تجارب الناقلية الهيدروليكية على إيليت الصوديوم وقارن النتائج مع ما أعطته المعادلة (24.7). هذه المقارنة موضحة في الشكل 11.7.



الشكل 11-7 : معامل المسامية لإيليت الصوديوم
Based on Olsen 1961

الشكل (11.7): تغير قيم معامل الناقلية مع تغير قيم المسامية

من أجل إيليت الصوديوم (Based on Olsen, 1961)

إن الاختلاف الواضح بين القيم النظرية والعملية في الشكل (11.7)، يعود لعدة عوامل، منها الانحراف عن قانون دارسي، لزوجة عالية لماء المسامات، أقطار مسامات غير المتساوية. لهذا الأمر قدم Taylor (1948) في العام علاقة خطية بين لوغاريتم k ومعامل المسامية موضحة بالمعادلة:

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (36.7)$$

حيث K_0 = الناقلية الهيدروليكية الأصلية عند معامل مسامية e_0 .

K = الناقلية الهيدروليكية عند معامل مسامية e .

C_K = معامل تغير الناقلية الهيدروليكية.

المعادلة السابقة تظهر ترابط جيد عندما تكون e_0 أصغر من 2.5. وفي هذه المعادلة، نعتبر أن قيمة C_K تقريباً $0.5 e_0$.

من أجل مجال واسع لقيم معامل المسامية، اقترح Mesri and Olson في العام (1971) استخدام علاقة خطية ما بين $\log K$ و $\log e$ كما هي موضحة بالمعادلة التالية:

$$\log k = A' \log e + B' \quad (37.7)$$

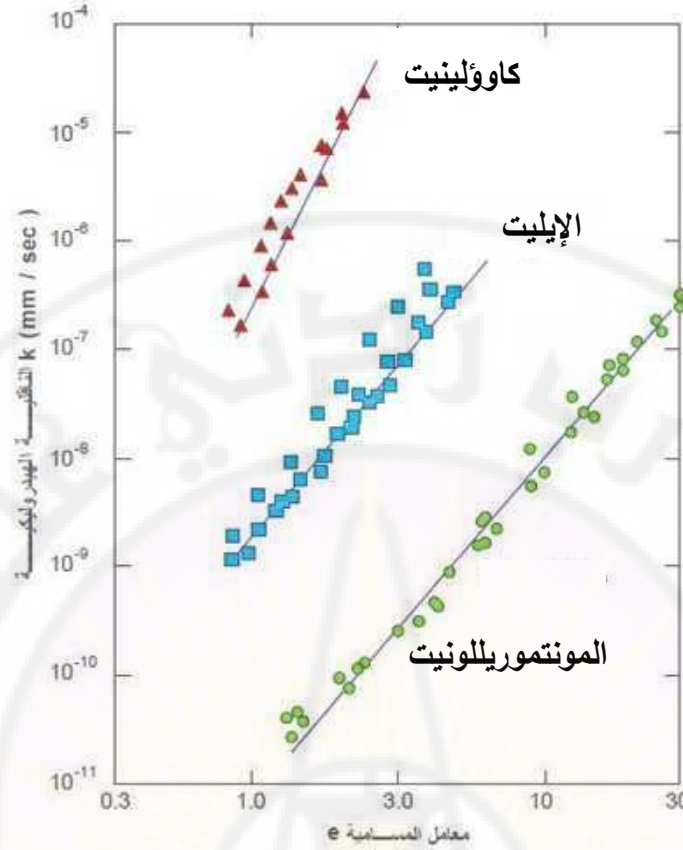
الشكل 12.7 يظهر منحنيات للعلاقة ما بين $\log K$ مقابل $\log e$ المستنتجة من التجارب بناءً على المعادلة (37.7).

أما الباحث Samarasinghe، وشركاه في العام (1982) أجروا تجارب مخبرية على ترب غضارية (New Liskeard) وقدموا نتائج بينت أنه من أجل الغضار المنضغط طبيعياً يمكننا كتابة المعادلة:

$$K = C \left(\frac{e^n}{1 + e} \right) \quad (38.7) \square$$

حيث C و n عبارة عن ثوابت يمكن تحديدها مخبرياً.

□



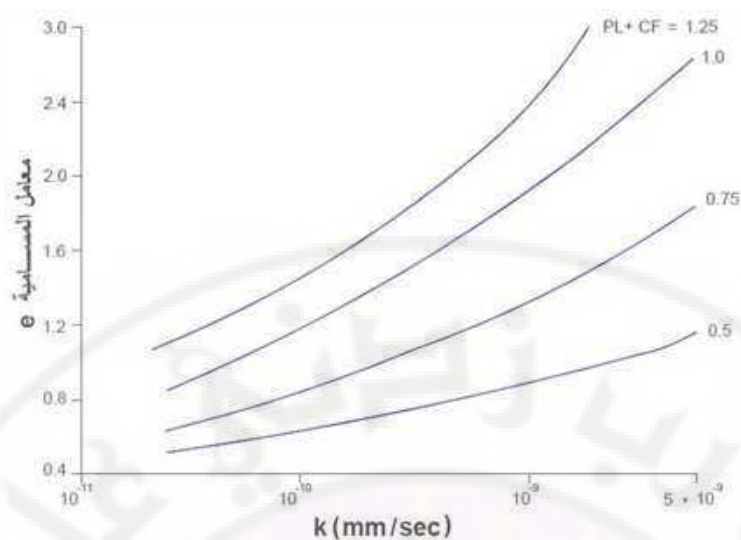
الشكل 12-7: تغير الناقلية الهيدروليكية لمسرالات صوديوم الغضار

Based on Mesri and Olson 1971

الشكل (12.7): تغير الناقلية الهيدروليكية مع تغير منرال الغضار

(Based on Mesri and Olson, 1971)

أما الباحثان: Tavenas et al، في العام (1983) قدما أيضاً نتيجة توضح أن هناك ترابط بين معامل المسامية والناقلية الهيدروليكية للترب الغضارية. هذا الترابط مبين في الشكل (13.7). نقطة هامة يجب الإشارة إليها، هي أنه في الشكل (13.7)، وجد أن قيم قرينة اللدونة CF و PI وأقطار حبيبات الغضار في التربة هي بالكسور (العشرية). عملياً يجب الأخذ بعين الاعتبار أن أي معادلة تجريبية هي معادلة تعطي قيم تقديرية فقط، لأن قيمة k تتغير بشكل كبير ويعتمد هذا على عدة عوامل.



الشكل 13-7 : تغير معامل المسامية مع النفاذية الهيدروليكية للتربة الغضارية
Based on Tavenas and Olson 1983

الشكل (13.7): تغير معامل المسامية مع تغير النفاذية الهيدروليكية للتربة الغضارية

□

المثال 10.7:

من أجل تربة غضارية منضغطة طبيعياً، لدينا المعطيات التالية:

معامل المسامية (e)	K (cm/sec)
1.1	0.302×10^{-7}
0.9	0.12×10^{-7}

المطلوب حساب الناقلية الهيدروليكية للغضار عند معامل مسامية 0.75. استخدم المعادلة (38.7).

الحل:

من المعادلة (38.7) وهي:

$$k = C \left(\frac{e^n}{1 + e} \right)$$

نستطيع ومن خلال معطيات المسألة أن نكتب ونوجد القيم n كما يلي:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\left(\frac{e_1^n}{1 + e_1} \right)}{\left(\frac{e_2^n}{1 + e_2} \right)}$$

$$\frac{0.302 \times 10^{-7}}{0.12 \times 10^{-7}} = \frac{\frac{(1.1)^n}{1 + 1.1}}{\frac{(0.9)^n}{1 + 0.9}}$$

$$2.517 = \left(\frac{1.9}{2.1} \right) \left(\frac{1.1}{0.9} \right)^n$$

$$2.782 = (1.222)^n$$

$$n = \frac{\log(2.782)}{\log(1.222)} = \frac{0.444}{0.087} = 5.1$$

لذلك وبعد إيجاد n نستطيع إيجاد القيمة C من خلال المعادلة:

$$k = C \left(\frac{e^{5.1}}{1 + e} \right) \square$$

ولإيجاد C نعوض:

$$0.302 \times 10^{-7} = C \left[\frac{(1.1)^{5.1}}{1 + 1.1} \right] = \left(\frac{1.626}{2.1} \right) C \square$$

$$C = \frac{(0.302 \times 10^{-7})(2.1)}{1.626} = 0.39 \times 10^{-7} \square$$

وبالتالي:

$$k = (0.39 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}) \left(\frac{e^n}{1 + e} \right) \square$$

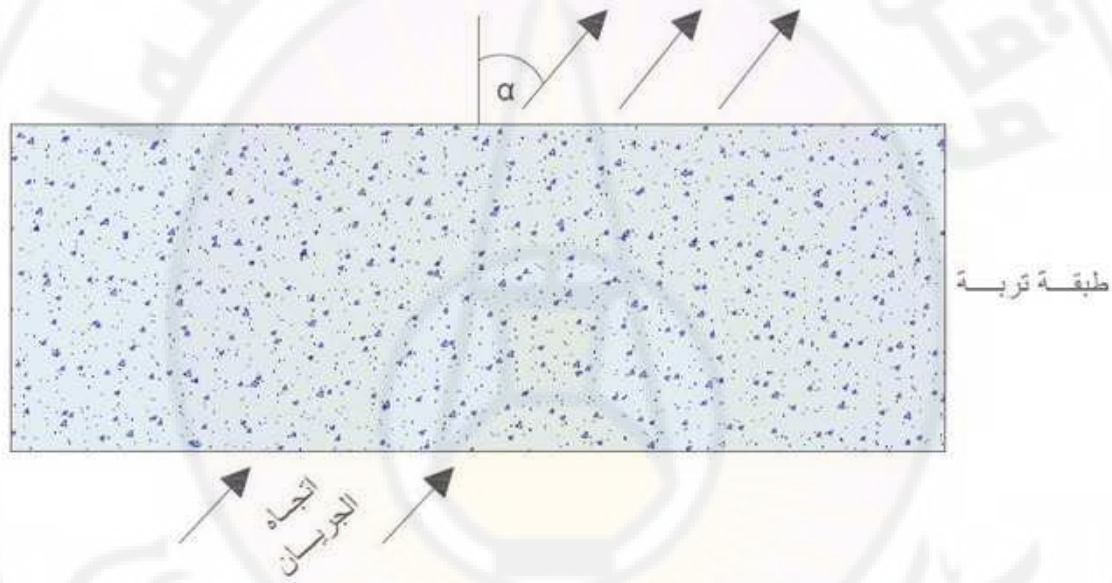
وعند معامل مسامية 0.75 تكون قيم الناقلية الهيدروليكية k هي:

$$k = (0.39 \times 10^{-7}) \left(\frac{0.75^{5.1}}{1 + 0.75} \right) = 0.514 \times 10^{-8} \text{ cm/sec} \square$$

$\square$

7.7 تغير النفاذية وفق الاتجاه

معظم الترب تعتبر غير متجانسة بالنسبة للنفاذية. وبحسب طريقة تشكل التربة ورواسبها، فإن قيمة k تتغير حسب اتجاه الجريان. الشكل (7.14) يظهر لنا طبقة تربة يجري الماء عبرها في اتجاه مائل بزاوية α مع الشاقول. فإذا كانت الناقلية الهيدروليكية للتربة بالاتجاه الشاقولي ($\alpha = 0$) والاتجاه الأفقي ($\alpha = 90^\circ$) هي K_H و K_V على التوالي. فإن قيمة كل من K_H و K_V في تربة معطاة يعتمد على عدة عوامل، منها طريقة الترسيب التي حصلت في الحقل لتشكيل التربة.



الشكل 7-14 : تغيرات الاتجاه للمسامية

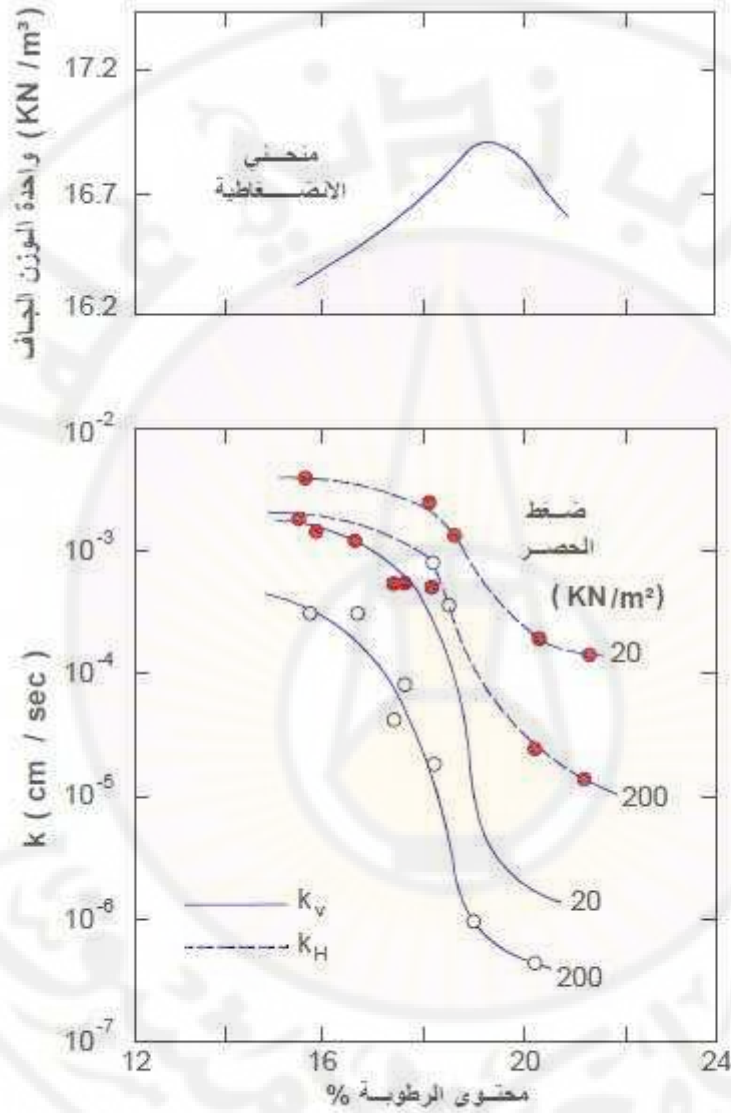
الشكل (14.7): اتجاه تغير النفاذية

لتحديد قيم K_H و K_V أجرى كلاً من السيدين Fukushima and Ishii في العام (1986) تجارب مخبرية على تربة من نوع Masa-do المرصوصة (غرانيت weathered). إن نتائج هذه التجارب مبينة بالشكل (15.7).

العينات تم رصها بشكل أولي عند محتوى رطوبة معين، وبعد ذلك تم حساب قيم الناقلية الهيدروليكية عند درجة إشباع 100%.

نلاحظ من الشكل (15.7)، أنه ومن أجل أي محتوى رطوبة فإن قيم K_H أكبر من قيم K_V تبعاً لضغط الحصر المطبق على العينة.

ولو عدنا إلى الدراسات العديدة لوجدنا مجموعة من النتائج التي أعطت نتائج لترب ناعمة التدرج الحبي وأظهرت هذه الدراسات أن قيمة النسبة K_H/K_V ممكن أن تتغير ضمن مجال واسع. الجدول 3.7 يعطي ملخص لبعض هذه الدراسات.



الشكل 15-7: تغير معامل k_v , k_H للترب المنضغطة في المخبر
Based on the result of Fukushima and Ishii 1986

الشكل 15.7: تغير كل من K_H و K_V لتربة من نوع Masa -do المرصوفة في المخبر
بناءً على نتائج 1986 Fukushima and Ishii

□

الجدول (3.7): بعض القيم للنسبة K_H/K_V للتربة الناعمة

Soil type	k_H/k_V	Reference
Organic silt with peat	1.2 to 1.7	Tsien (1955)
Plastic marine clay	1.2	Lumb and Holt (1968)
Soft clay	1.5	Basett and Brodie (1961)
Varved clay	1.5 to 1.7	Chan and Kenney (1973)
Varved clay	1.5	Kenney and Chan (1973)
Varved clay	3 to 15	Wu, et al. (1978)
Varved clay	4 to 40	Casagrande and Poulos (1969)

8.7 الناقلية الهيدروليكية المكافئة في التربة المتوضعة على طبقات

في التربة المتطبقة المترسبة حيث الناقلية الهيدروليكية من أجل جريان ضمن اتجاه معطى يتغير من طبقة لأخرى. يمكن حساب الناقلية الهيدروليكية المكافئة لكثلة التربة ككل من خلال حسابات بسيطة.

الاستنتاج البسيط الذي سنقوم به يتعلق بالناقلية الهيدروليكية من أجل جريان بالاتجاه الأفقي وجريان بالاتجاه الشاقولي خلال طبقات تربة متعددة، أما توضع طبقات التربة يكون بشكل أفقي كما مبين في الشكل (16.7).

الشكل (16.7) يظهر لنا n طبقة من طبقات التربة، ونفترض أولاً أن جريان الماء يكون بالاتجاه الأفقي ضمن هذه الطبقات. فلو أخذنا مقطع عرضي لواحدة الطول يمر من جميع الطبقات n وعمودي على اتجاه جريان الماء. في هذه الحالة يكون بإمكاننا القول أن الجريان الكلي خلال المقطع العرضي في واحدة الزمن يمكن التعبير عنه بالمعادلة:

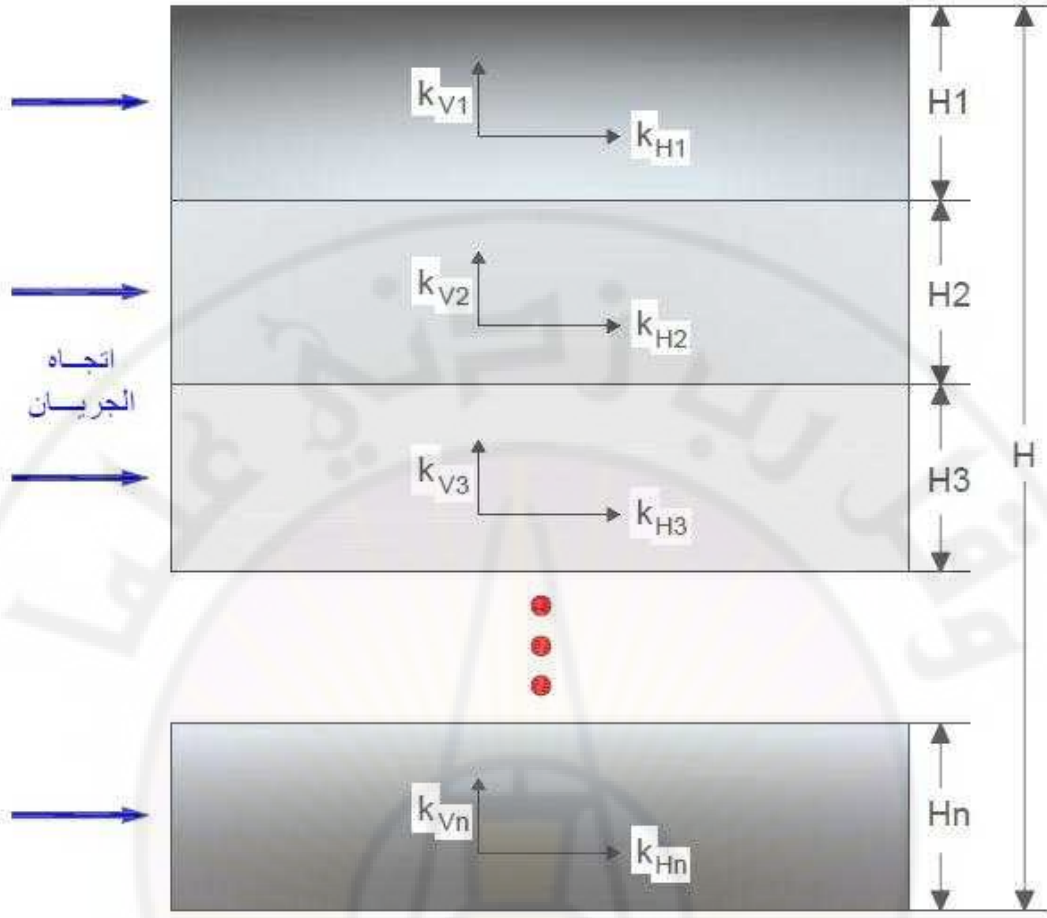
$$q = v \cdot 1 \cdot H \quad (39.7)$$

$$= v_1 \cdot 1 \cdot H_1 + v_2 \cdot 1 \cdot H_2 + v_3 \cdot 1 \cdot H_3 + \dots + v_n \cdot 1 \cdot H_n$$

حيث:

v = السرعة الجريان المتوسطة.

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ = سرعات الجريان خلال الطبقات بالترتيب.



الشكل 16-7 : المكافئ الهيدروليكي للنفاذية يحدد الجريان الأفقي في التربة الطبقيّة

الشكل 16.7: تحديد النفاذية الهيدروليكية المكافئة - جريان أفقي ضمن طبقات التربة.

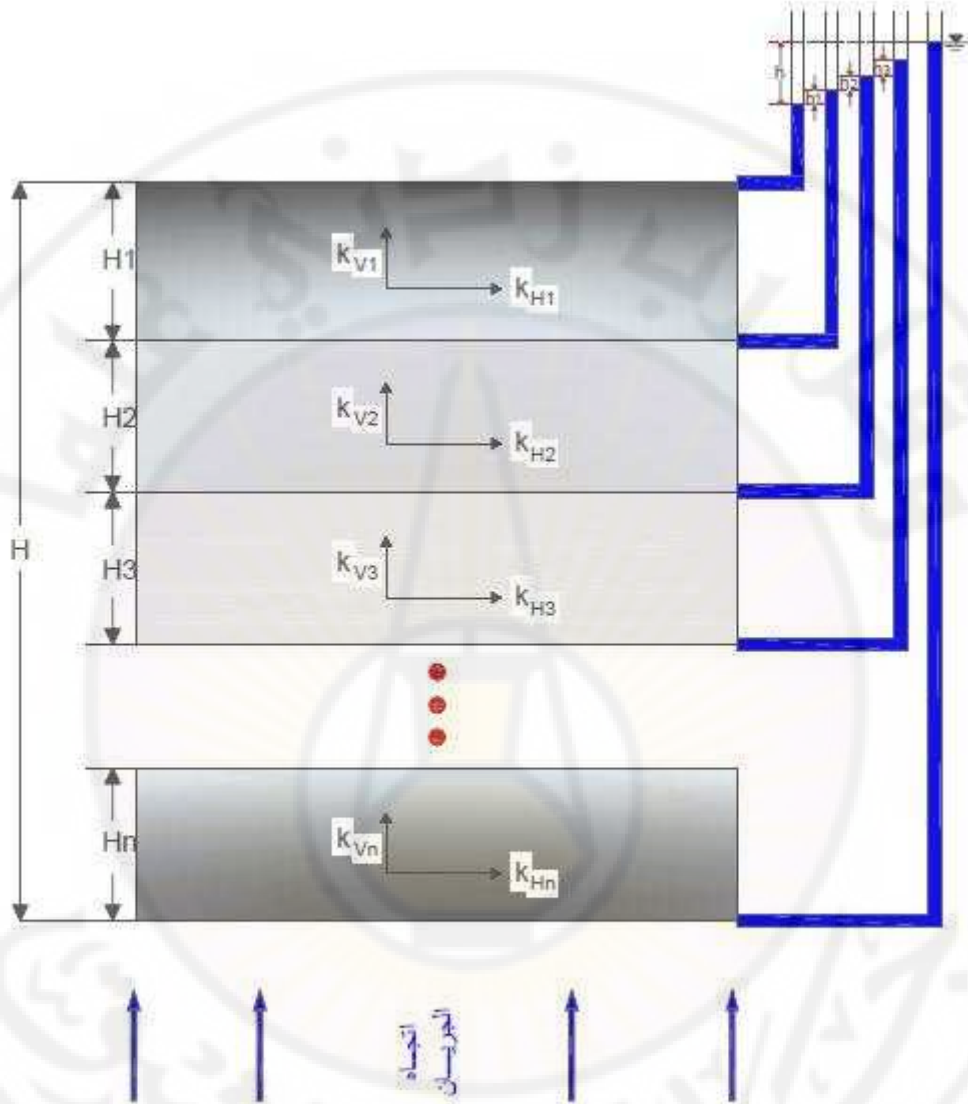
في حال كان $K_{H1}, K_{H2}, K_{H3}, \dots, K_{Hn}$ هي قيم النفاذية الهيدروليكية للطبقات المتعددة في الاتجاه الأفقي و $K_{H(eq)}$ هي قيمة النفاذية الهيدروليكية المكافئة لكتلة التربة ولجميع الطبقات في الاتجاه الأفقي، لذلك، وبحسب قانون دارسي نستطيع أن نكتب المعادلة:

$$v = K_{H(eq)} i_{eq}; \quad v_1 = K_{H1} i_1; \quad v_2 = K_{H2} i_2; \quad v_3 = K_{H3} i_3; \quad v_n = K_{Hn} i_n \dots \square$$

وبتعويض العلاقة السابقة للسرعات بحسب قانون دارسي في المعادلة (7.39) ومع ملاحظة أن $(i_{eq} = i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_n)$ يمكننا الحصول على المعادلة:

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H1} H_1 + k_{H2} H_2 + k_{H3} H_3 + \dots + k_{Hn} H_n) \quad (40.7) \square$$

ولنفس توضع طبقات التربة السابقة سنفترض الآن أن هناك جريان بالاتجاه الشاقولي والمبين ذلك بالشكل (17.7).



الشكل 17-7 : المكافئ الهيدروليكي للنفاذية يحدد الجريان الشاقولي في التربة الطبقاتية

الشكل (17.7) : تحديد النفاذية الهيدروليكية بالاتجاه الشاقولي - الجريان شاقولي ضمن طبقات التربة في هذه الحالة نفترض أن سرعة الجريان خلال جميع الطبقات هو نفسه. ضمن هذه الظروف نلاحظ أن فقدان الضاغط الكلي h هو مساوي لمجموع فقدان الضغوط بكل الطبقات، لذلك يمكننا كتابة المعادلات:

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = \dots v_n \quad (41.7)$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n \quad (42.7)$$

وباستخدام قانون دارسي، يمكن إعادة كتابة المعادلة (7.41) بالتالي:

$$k_{V(eq)} \left(\frac{h}{H} \right) = k_{V_1} i_1 = k_{V_2} i_2 = k_{V_3} i_3 = \dots k_{V_n} i_n \quad (43.7)$$

حيث $K_{V_1}, K_{V_2}, K_{V_3}, \dots, K_{V_n}$ هي قيم الناقلية الهيدروليكية لكل طبقة في الاتجاه الشاقولي و $k_{V(eq)}$ هي قيمة الناقلية الهيدروليكية المكافئ لكتلة التربة كاملة.

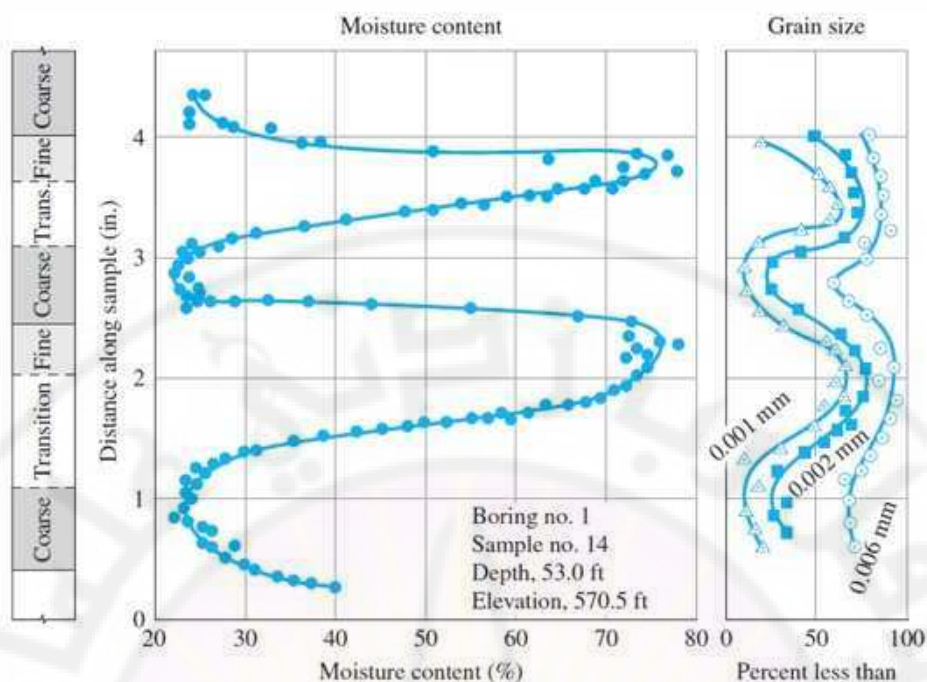
مجدداً ومن المعادلة (42.7) نستطيع كتابة المعادلة:

$$h = H_1 i_1 + H_2 i_2 + H_3 i_3 + \dots + H_n i_n \quad (44.7) \square$$

ويحل المعادلتين (43.7) و (44.7) يمكننا الحصول على المعادلة:

$$k_{V(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{V_1}} \right) + \left(\frac{H_2}{k_{V_2}} \right) + \left(\frac{H_3}{k_{V_3}} \right) + \dots + \left(\frac{H_n}{k_{V_n}} \right)} \quad (45.7) \square$$

ومن أفضل الأمثلة عن الترب المترسبة طبيعياً هي تربة varved. وهذه التربة هي عبارة عن طبقات متواترة من المواد الناعمة والخشنة. إن تربة varved تشكلت بظروف الترسيب في البحيرات الجليدية وكذلك بظروف التغيرات الفصيلة السنوية. الشكل 18.7 يظهر لنا تغير محتوى الرطوبة مع توزع التدرج الحبي في التربة المدروسة (varved soil، Canada، New Liskeard). كل طبقة varve هي بسماكة متغيرة من 41 إلى 51 مم، والتربة ككل مؤلفة من طبقات متجانسة من التربة (واحدة خشنة والأخرى ناعمة - مع طبقات انتقالية بينهم).



الشكل 18.7: تغير محتوى الرطوبة مع توزع التدرج الحبي في تربة المصدر:

New Liskeard varved "Laboratory Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard Varved Clay." by H. T. Chan and T. C. Kenney, 1973, *Canadian Geotechnical Journal*, 10(3), p. 453–472. ©2008 NRC Canada or its licensors. Reproduced with permission

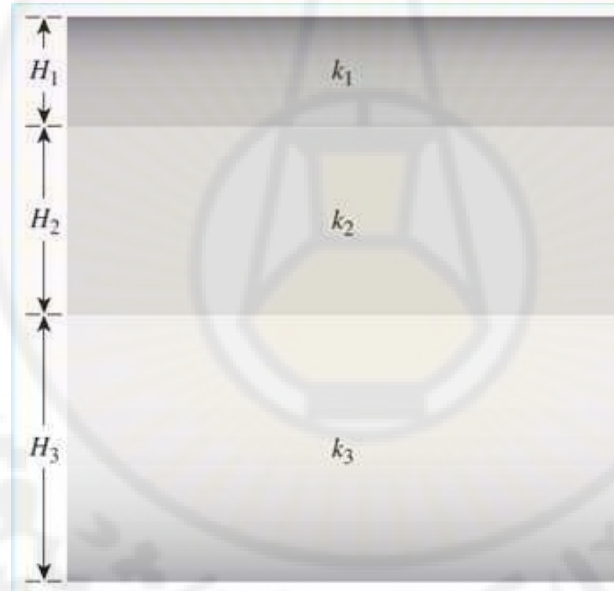
مثال 11.7:

تربة متطبقة مبينة في الشكل (19.7)، ولدينا المعطيات التالية:

H_1	$= 2 \text{ m}$	K_1	$= 10^{-4} \text{ cm/sec}$
H_2	$= 3 \text{ m}$	K_2	$= 3.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$
H_3	$= 4 \text{ m}$	K_3	$= 4.1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$

أحسب نسبة الناقلية الهيدروليكية المكافئة الأفقية والناقلية والنسبة:

$$\frac{k_{H(eq)}}{k_{V(eq)}}$$



الشكل 19.7: بروفيل تربة متطبقة

الحل:

باستخدام المعادلة (40.7) وبحسب المعطيات المتوفرة لدينا نستطيع كتابة:

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H1}H_1 + k_{H2}H_2 + k_{H3}H_3)$$

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{(2 + 3 + 4)} [(1 \times 10^{-4})(2) + (3.2 \times 10^{-2})(3) + (4.1 \times 10^{-5})(4)]$$

$$k_{H(eq)} = 107.07 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

وبنفس الطريقة أيضاً من المعادلة (7.45) يكون لدينا:

$$k_{V(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{V1}}\right) + \left(\frac{H_2}{k_{V2}}\right) + \left(\frac{H_3}{k_{V3}}\right)}$$

$$k_{V(eq)} = \frac{(2 + 3 + 4)}{\left(\frac{2}{10^{-4}}\right) + \left(\frac{3}{3.2 \times 10^{-2}}\right) + \left(\frac{4}{4.1 \times 10^{-5}}\right)} = 0.765 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

لذلك نستطيع الآن حساب:

$$\frac{k_{H(eq)}}{k_{V(eq)}} = \frac{107.07 \times 10^{-4}}{0.765 \times 10^{-4}} = 139.96$$

المثال 12.7:

الشكل (20.7) يظهر ثلاث طبقات من التربة في أنبوب مقطعه العرضي مربع أبعاد 100 mm x 100 mm. يتم التزود بالماء للحفاظ على فرق ضاغط ثابت مقداره 300 mm عبر العينة. الناقلية الهيدروليكية للتربة في اتجاه الجريان مبينة بالجدول التالي. والمطلوب إيجاد غزارة الماء المزود بالوحدة cm³/hr.

التربة	K (cm/sec)
A	10 ⁻²
B	3×10 ⁻³
C	4.9×10 ⁻⁴

الحل:

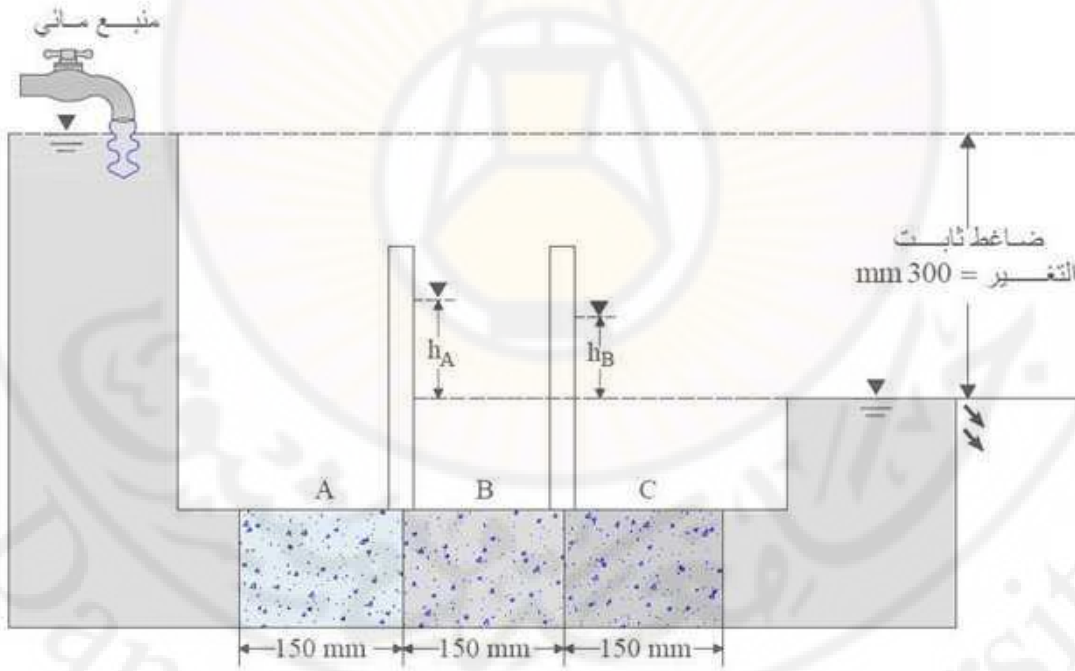
من المعادلة (45.7) وبحسب المعطيات يمكننا كتابة:

$$k_{V(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{V1}}\right) + \left(\frac{H_2}{k_{V2}}\right) + \left(\frac{H_3}{k_{V3}}\right)}$$

$$k_{V(eq)} = \frac{(150 + 150 + 150)}{\left(\frac{150}{10^{-2}}\right) + \left(\frac{150}{3 \times 10^{-3}}\right) + \left(\frac{150}{409 \times 10^{-4}}\right)} = 0.001213 \text{ cm/sec}$$

$$q = k_{V(eq)} i . A = 0.001213 \left(\frac{300}{450}\right) \left(\frac{100}{10} \times \frac{100}{10}\right) = 0.0809 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$= 291.24 \text{ cm}^3/\text{hr}$$



الشكل 20-7: ثلاث طبقات من التربة في أنبوب مقطعه العرضي 100 mm * 100 mm

الشكل 20.7: ثلاث طبقات من التربة في أنبوب مقطعه العرضي مربع 100 mm x 100 mm

□

9.7 تجربة النفاذية في الحقل بواسطة الضخ من الآبار

في الحقل، يمكن تحديد الناقلية الهيدروليكية المتوسطة لرواسب التربة في اتجاه الجريان بواسطة تجربة الضخ من الآبار. الشكل (21.7) يظهر لنا حالة طبقة علوية لتربة نفوذة والتي يجب تحديد الناقلية الهيدروليكية لها، وهي طبقة غير محصورة وبدورها تتركز على طبقة كتيمة.

في البداية نقوم بحفر بئر مركزي يسمى بئر التجربة، سيتم ضخ الماء منه للخارج وبغزارة ثابتة والحاوي على قميص مثقب. كما نقوم أيضاً بتنفيذ عدة آبار مراقبة بمسافات قطرية مختلفة حول بئر التجربة.

عند بدء الضخ من بئر التجربة، نقوم بمراقبة دائمة لمنسوب الماء في بئر التجربة وآبار المراقبة الأخرى وذلك حتى الوصول لحالة استقرار وثبات منسوب الماء. يتم الوصول لحالة الاستقرار عندما يصبح منسوب الماء لبئر التجربة وآبار المراقبة ثابت.

ضمن هذه الظروف فإن هناك تساوي ما بين غزارة الجريان للمياه الجوفية الواردة إلى البئر، وغزارة الماء المسحوبة من بئر الضخ، ونعبر عن ذلك بالمعادلة:

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) 2\pi \cdot r \cdot H \quad (46.7) \square$$

أو بالمعادلة:

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \left(\frac{2\pi k}{q} \right) \int_{h_2}^{h_1} h dh \square$$

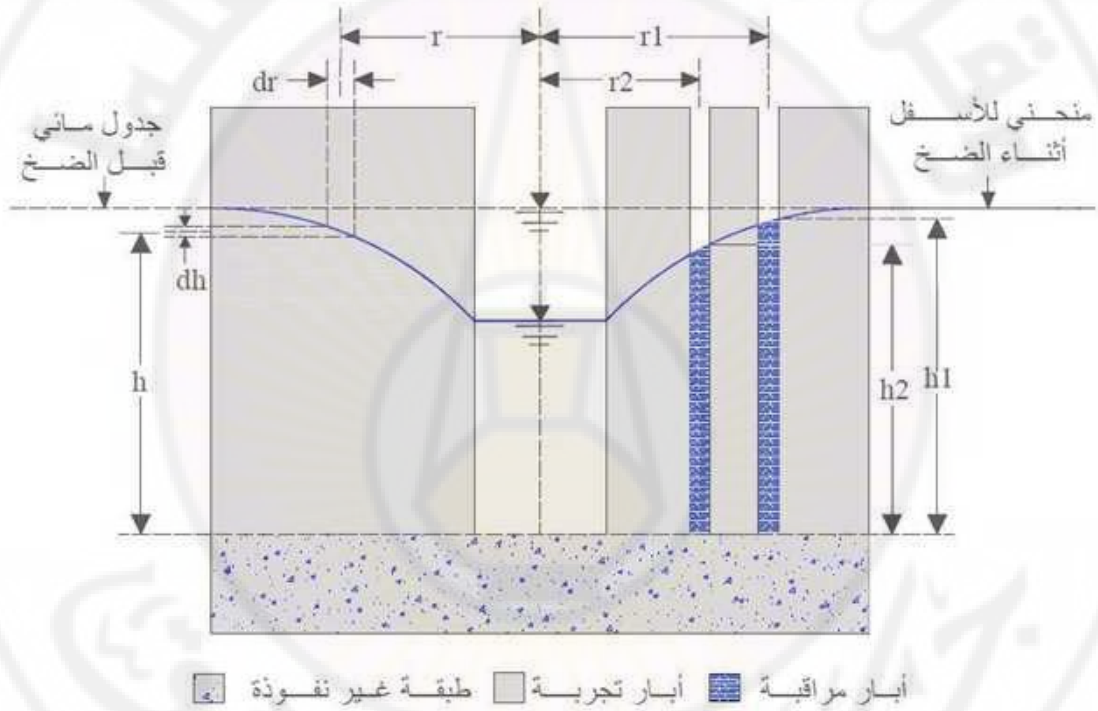
لذلك نحصل على القيمة k من المعادلة:

$$k = \frac{2.303q \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}{\pi(h_1^2 - h_2^2)} \quad (47.7) \square$$

ومن القياسات الحقلية، وبحال كانت q, r_1, r_2, h_1, h_2 قيم معلومة فيمكن حساب الناقلية الهيدروليكية من العلاقة البسيطة المقدمة في المعادلة (47.7). هذه المعادلة يمكن كتابتها بشكل آخر:

$$k(cm/sec) = \frac{2.303q \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}{14.7\pi(h_1^2 - h_2^2)} \quad (48.7)$$

حيث q هي بالوحدة gpm، h_1 و h_2 بالقدم ft.



الشكل 21-7 : تجربة الضخ من بئر في تربة غير محصورة و غير نفوذة

الشكل (21.7) : تجربة الضخ من البئر ضمن طبقة غير محصورة نفوذة متوضعة على طبقة كتيفة

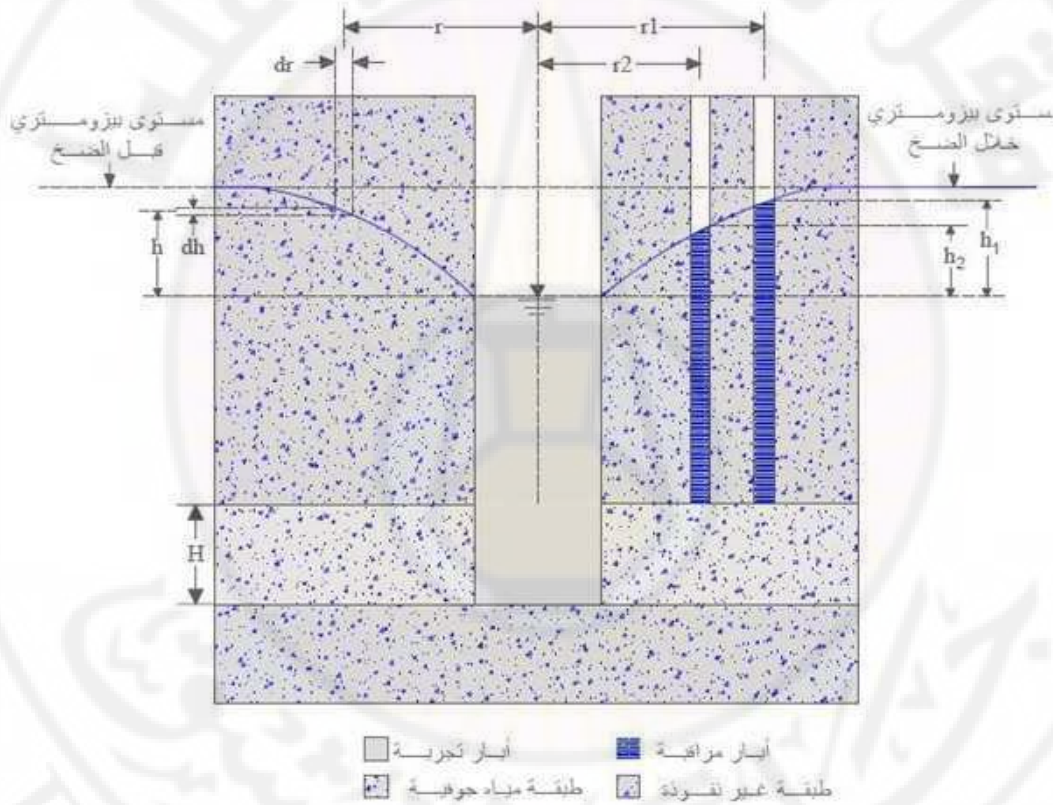
من جهة أخرى، فإن الناقلية الهيدروليكية المتوسطة من أجل المياه الجوفية المحصورة يمكن تحديدها من خلال تجربة الضخ من بئر مع قميص مثقب والتي يخترق العمق الكلي لطبقة المياه الجوفية المحصورة ومراقبة منسوب الماء في الأنابيب البيزومترية لعدد من آبار المراقبة عند مسافات قطرية مختلفة (الشكل 22.7). هنا نستمر بالضخ وبغزارة منتظمة q حتى يتم الوصول لحالة من الاستقرار.

في هذه الحالة يمكن للماء أن يدخل لبئر التجربة من طبقة المياه الجوفية المحصورة فقط وسماكتها H ، وعليه فإن غزارة السحب بحالة الاستقرار هي:

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) 2\pi \cdot r \cdot H \quad (49.7) \square$$

أو:

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{2\pi k h}{q} dh \square$$



الشكل 22-7: تجربة الضخ من البئر التي تخترق بالكامل طبقة المياه الجوفية المحصورة في طبقة تحوي على مياه جوفية محصورة

الشكل (22.7) : تجربة الضخ من البئر التي تخترق بالكامل طبقة المياه الجوفية المحصورة

وهذا ما يمكننا من حساب الناقلية الهيدروليكية في اتجاه الجريان من خلال المعادلة:

$$k = \frac{q \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}{2.727 H (h_1 - h_2)} \quad (50.7) \square$$

10.7 الناقلية الهيدروليكية في الترب الغضارية المرصوصة

قدم السيد Daniel في العام (1989) مراجعة ممتازة لتسع نظريات لتقدير الناقلية الهيدروليكية الطبيعية لطبقات الغضار المرصوصة. في هذه الفقرة سيتم عرض ثلاثة من هذه النظريات فقط وهي للإطلاع وكمراجع للباحثين.

Boutwell Permeameter 1.10.7

إن المخطط التوضيحي لنظرية Boutwell Permeameter مبينة في الشكل (23.7). هذه النظرية تعتمد على إجراء تجربة حقلية من خلال الخطوات التالية:

1. تنفيذ حفرة ضمن التربة المراد قياس قيمة k لها.
2. يتم تغليف هذه الحفرة بقميص كما هو مبين (الشكل 23.7 a).
3. يتم ملء القميص بالماء ويتم إجراء تجربة النفاذية بطريقة الضاغط المتغير.

وبناءً على نتائج التجربة فإن الناقلية الهيدروليكية k_1 يمكن حسابها بالتالي:

$$k_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{\pi \cdot D(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (51.7) \square$$

حيث:

d = قطر الأنبوب الشاقولي.

D = قطر القميص.

h_1 = الضاغط عند الزمن t_1 .

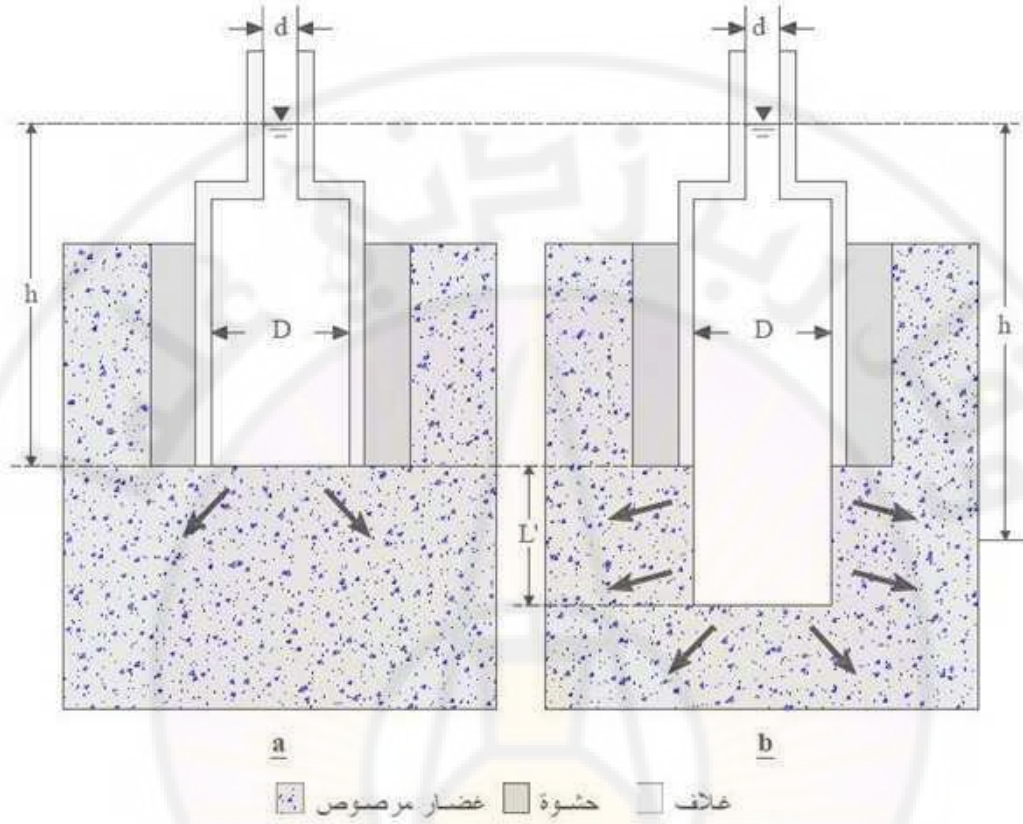
h_2 = الضاغط عند الزمن t_1 .

4. وبعد تحديد الناقلية الهيدروليكية يتم تعميق الحفرة السابقة بواسطة الثقب، ويتم تركيب

permeameter كما في الشكل (23.7 b). ويتم أيضاً عمل تجربة النفاذية بطريقة

الضاغط المتغير مرة ثانية. في هذه الحالة فإن الناقلية الهيدروليكية يتم حسابها من المعادلة:

$$k_2 = \frac{A'}{B'} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (52.7) \square$$



الشكل 23-7 : اختبار النفاذية باستخدام بارامترات باوتويل

الشكل (23.7) : تجربة النفاذية مع Boutwell permeameter

حيث:

$$A' = d^2 \left\{ \ln \left[\frac{L'}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L'}{D} \right)^2} \right] \right\} \quad (53.7) \square$$

$$B' = 8D \frac{L'}{D} (t_2 - t_1) \left\{ 1 - 0.562 \exp \left[-1.57 \left(\frac{L'}{D} \right) \right] \right\} \quad (54.7) \square$$

إن النسبة ما بين القيمتين يتم تحديدها بالإستعانة بالشكل (24.7)، والذي يظهر لنا مخطط لتغير قيم النسبة K_2/K_1 مقابل تغير القيمة m حيث أن القيمة m تعطى بالعلاقة: $(m = \sqrt{K_H/K_V})$

وذلك من أجل قيم مختلفة للمتغير L'/D . الشكل (24.7) يمكن استخدامه لتحديد قيم m باستخدام القيم التجريبية لقيم k_2/k_1 و L'/D . هذا العمل يتم وفق:

أولاً: حساب القيمة

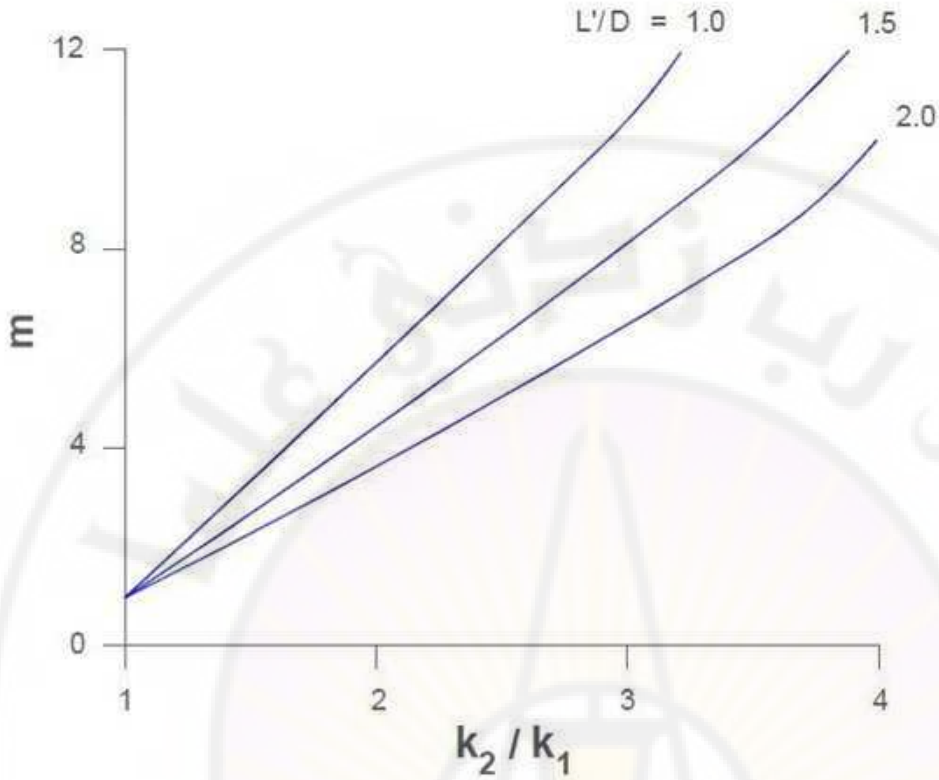
$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{\ln[(L'/D) + \sqrt{1 + (L'/D)^2}]}{\ln[(m \cdot L'/D) + \sqrt{1 + (m \cdot L'/D)^2}]} m \quad (55.7)$$

ثانياً: وبعد تحديد m من الشكل (24.7)، نستطيع حساب k_H

$$k_H = m \cdot k_1 \quad (56.7)$$

ثالثاً: وبعد تحديد m من الشكل (24.7)، نستطيع حساب k_V

$$k_V = \frac{k_1}{m} \quad (57.7)$$



الشكل 24-7 : تغير k_2/k_1 مع m

الشكل (24.7) : تغير k_2/k_1 مع m (المعادلة 55.7)

Constant-Head Borehole Permeameter 2.10.7

الشكل (25.7) يبين لنا أسس نظرية Constant-head borehole permeameter. في هذه النظرية، يتم إجراء تجربة حقلية للنفاذية بطريقة الضاغط الثابت حيث يتم تثبيت الضاغط h عن طريق التزود المستمر بالماء، وفي هذه الحالة يتم قياس غزارة الجريان q . الناقلية الهيدروليكية يمكن حسابها من المعادلة:

$$k = \frac{q}{r^2 \sqrt{R^2 - 1} [F_1 + (F_2/A'')]} \quad (58.7) \square$$

حيث:

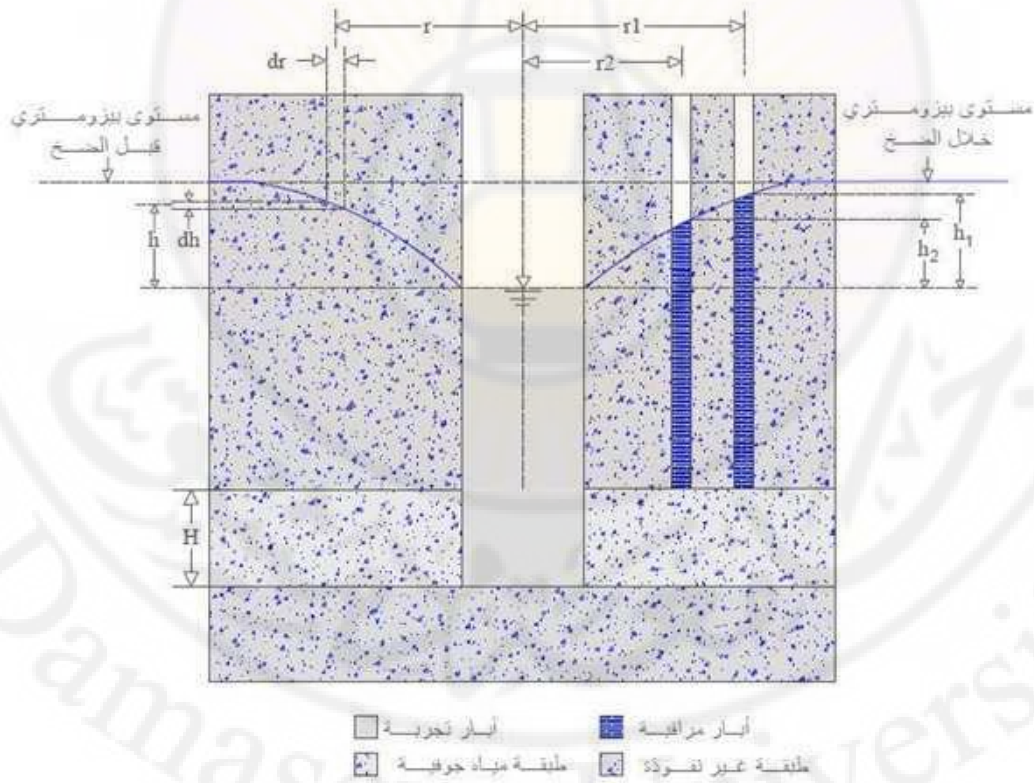
$$R = \frac{h}{r} \quad (59.7)$$

$$F_1 = \frac{4.117(1 - R^2)}{\ln(R + \sqrt{R^2 - 1}) - [1 - (1/R^2)]^{0.5}} \quad (60.7)$$

$$F_2 = \frac{4.280}{\ln(R + \sqrt{R^2 - 1})} \quad (61.7)$$

$$A'' = \frac{1}{2} \propto r \quad (62.7)$$

تتراوح قيم α من 0.002 إلى 0.01 cm^{-1} من أجل الترب الحبيبية الناعمة.



الشكل 25-7 : تجربة الضخ من بئر يخترق العنق بشكل كامل في طبقة تحتوي على مياه جوفية محصورة

الشكل (25.7): تجربة Borehole مع منسوب ماء ثابت

Porous Probes 3.10.7

وفق هذه النظرية، يتم تنفيذ تجربة حقلية لقياس النفاذية من خلال دفع أو دق مجسات مسامية كما هو مبين في الشكل (27.7) ضمن التربة. وبالتالي يمكننا إجراء تجارب النفاذية بطريقة الضاغط الثابت أو طريقة الضاغط المتغير بحسب هذه النظرية. أما عن حساب الناقلية الكهربائية سيكون كما يلي:

- بطريقة الضاغط الثابت تعطى قيمة k بالمعادلة:

$$k = \frac{q}{Fh} \quad (63.7) \square$$

- أما بطريقة الضاغط المتغير فإن قيمة k يعطى بالمعادلة:

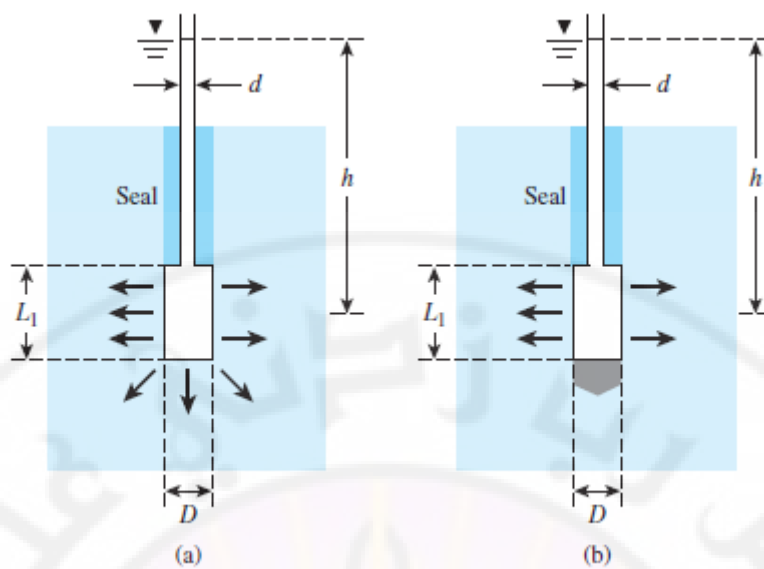
$$k = \frac{\pi \cdot d^2 / 4}{F(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (64.7) \square$$

وبحال كانت المجسات مع وجود قاعدة نفوذة (الشكل 26.7 b) فإن القيمة F تعطى بالعلاقة:

$$F = \frac{2\pi \cdot L_1}{\ln[(L_1/D) + \sqrt{1 + (L_1/D)^2}]} \quad (65.7) \square$$

وبحال كانت المجسات مع وجود قاعدة غير نفوذة (الشكل 26.7 b) فإن القيمة F تعطى بالعلاقة:

$$F = \frac{2\pi \cdot L_1}{\ln[(L_1/D) + \sqrt{1 + (L_1/D)^2}]} - 2.8D \quad (66.7) \square$$



الشكل (26.7): المجسات المسامية (a) مع قاعدة نفوذة (b) مع قاعدة نفوذة

11.7 ملخص وملاحظات عامة

في هذا الفصل تم مناقشة قانون دارسي، تعريف الناقلية الهيدروليكية، التجارب المخبرية اللازمة لتحديد الناقلية الهيدروليكية والعلاقات التجريبية لها. كما تمّ تحديد الناقلية الهيدروليكية حقلياً من أجل أنواع مختلفة من الترب.

ناقش هذا الفصل قيم الناقلية الهيدروليكية المكافئة لعدة طبقات من التربة. كما قدم مجموعة من العلاقات التجريبية لحساب الناقلية الهيدروليكية والتي يمكن اعتبارها كمرشد عام لكل الاعتبارات العملية خاصة للباحثين.

أظهر هذا الفصل أن الدقة في قيم k المحددة من التجارب تعتمد على عدة عوامل:

1. درجة حرارة السائل.
2. لزوجة السائل.
3. فقاعات الهواء الحبيسة الموجودة في عينة التربة.
4. درجة الإشباع لعينة التربة.
5. فقدان النواجم خلال التجربة.
6. مطابقة الظروف الحقلية في المخبر.

إن قيم الناقلية الهيدروليكية للترب المتماسكة المشبعة يمكن أن تحدد من تجارب الانضغاطية المخبرية.

القيم الفعلية للناقلية الهيدروليكية في الحقل ممكن أن تتغير لحد ما عما هو مقاس في المخبر بسبب عدم تجانس التربة. لذلك، يجب أخذ الحيطة عند تحديد قيمة k لكل الاعتبارات التصميمية.

□

12.7 أمثلة غير محلولة

1. بالإشارة إلى تجربة الضاغط الثابت في الشكل (5.7) ، لنفترض لدينا المعطيات التالية:

- $L = 18 \text{ in}$

- $A = \text{مساحة عينة التربة} = 3.5 \text{ in}^2$

- فرق الضاغط الثابت $h = 28 \text{ in}$

- الماء المجمع خلال 3 دقائق $= 21.58 \text{ in}^3$

احسب الناقلية الهيدروليكية (in/sec).

2. بالإشارة إلى الشكل (5.7)، ومن أجل تجربة النفذية بطريقة الضاغط الثابت في الرمل، معطى لدينا التالي:

- $L = 300 \text{ mm}$

- $A = 175 \text{ cm}^2$

- $H = 500 \text{ mm}$

- الماء المجمع خلال 3 دقائق $= 620 \text{ cm}^3$

- معامل المسامية للرمل $= 0.58$

والمطلوب تحديد:

1. الناقلية الهيدروليكية (cm/sec) K.

2. سرعة الرش.

3. في تجربة النفذية بطريقة الضاغط الثابت في المخبر. معطى لدينا التالي:

$$L = 12 \text{ in}, A = 15 \text{ in}^2$$

في حال كانت قيمة $k = 0.006 \text{ in./sec}$ وغزارة الجريان $= 450 \text{ in}^3/\text{hr}$ يجب أن تبقى ثابتة ضمن التربة.

ما هو فرق الضاغط h في العينة. وأحسب سرعة التصريف تحت ظروف التجربة.

4. من أجل تجربة نفذية بطريقة الضاغط المتغير، معطى لدينا التالي:

- طول العينة $= 20 \text{ in}$

- مساحة عينة التربة $= 4 \text{ in}^2$

- مساحة الأنبوب الشاقولي $= 0.2 \text{ in}^2$

- فرق الضاغط عند الزمن $t = 0 = 30 \text{ in}$

- فرق الضاغط عند الزمن $t = 10 \text{ min} = 12 \text{ in}$ والمطلوب:

1. تحديد الناقلية الهيدروليكية للتربة (in./min).

2. ما هو الفرق في الضاغط عند الزمن $t = 5 \text{ min}$.

5. من أجل تجربة نفاذية بطريقة الضاغط المتغير، معطى لدينا التالي:

• طول العينة = 380 mm .

• مساحة العينة = 6.5 cm^2 .

• $k = 0.175 \text{ cm/min}$.

ماذا يجب أن تكون مساحة الأنبوب الشاقولي من أجل نقصان الضاغط من 650 cm وحتى 300 cm في 8 دقائق.

6. من أجل تجربة نفاذية بطريقة الضاغط المتغير، معطى التالي:

• طول العينة = 700 mm .

• مساحة عينة التربة = 20 cm^2 .

• مساحة الأنبوب الشاقولي = 1.05 cm^2 .

• فرق الضاغط عند الزمن $t = 0 = 800 \text{ mm}$.

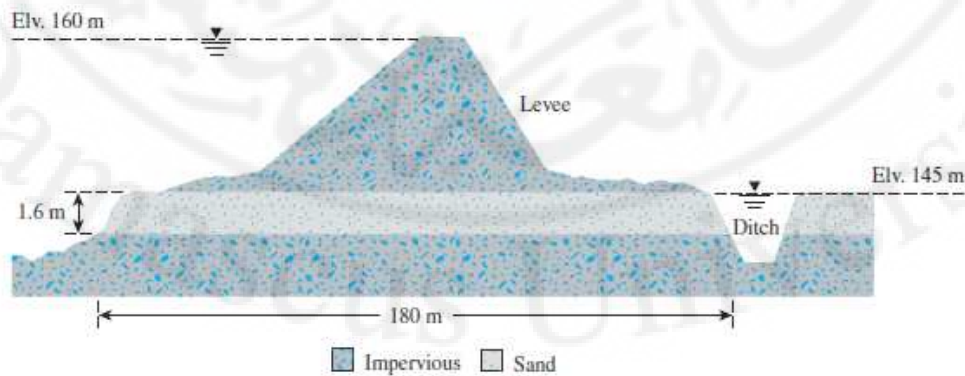
• فرق الضاغط عند الزمن $t = 8 \text{ min} = 500 \text{ mm}$ والمطلوب:

1. تحديد الناقلية الهيدروليكية المطلقة للتربة.

2. ما الفرق في الضاغط عند الزمن $t = 6 \text{ min}$.

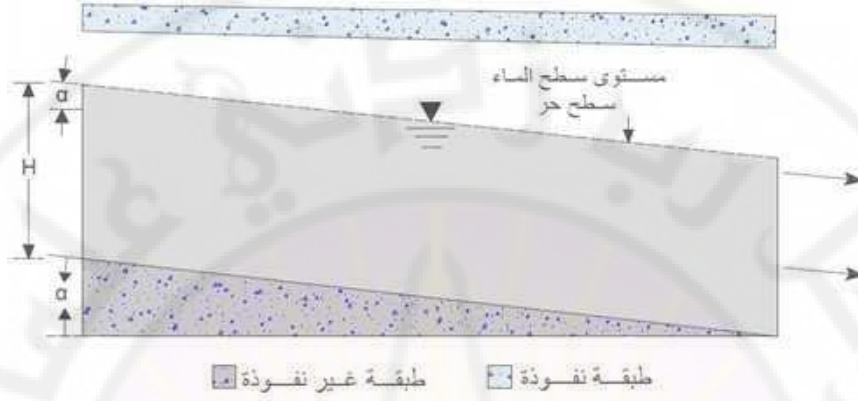
افترض أن التجربة تمت عند 20°C وعند 20°C كانت $\gamma_w = 9.789 \text{ kN/m}^3$ و $\eta = 1.005 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$.

7. طبقة رملية لها مساحة المقطع العرضي المبين في الشكل (27.7) تم بناء سد ترابي بطول 800 m فوق الطبقة الرملية. فإذا كانت الناقلية الهيدروليكية للرمل هي 2.8 m/day . المطلوب تحديد كمية الماء التي تجري في المصرف المبين جانباً بالوحدة: m^3/min .



الشكل (27.7): معطيات المسألة

8. طبقة نفوذة متوضعة على طبقة كثيفة كما في الشكل (7.28). مع اعتبار أن الناقلية الهيدروليكية $k = 5.2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ من أجل الطبقة النفوذة، احسب غزارة الرش خلالها بالوحدة: $\text{m}^3/\text{hr/m}$. إذا كان $H = 3.8 \text{ m}$ و $\alpha = 8^\circ$.



الشكل 28-7

الشكل (28.7): معطيات المسألة

9. بالإشارة للشكل (29.7)، أوجد غزارة الجريان بالوحدة $\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}'$ (عند زاوية مناسبة للمقطع العرضي الموضح) خلال التربة النفوذة. معطى:

$$k = 0.05 \text{ cm/sec}, \alpha = 5^\circ, L = 60 \text{ m}, h = 3.1 \text{ m}, H_1 = 2.8 \text{ m}, H = 5 \text{ m}$$

10. الناقلية الهيدروليكية لرمل عند معامل مسامية 0.5 هي 0.022 cm/sec . قدر الناقلية الهيدروليكية لهذا الرمل عند معامل مسامية 0.7. استخدم المعادلة (31.7).

11. من أجل رمل، معطى التالي: المسامية $n = 0.31$ ، $k = 0.2 \text{ ft/min}$. المطلوب تحديد k عندما تكون $n = 0.4$. استخدم المعادلة (31.7).

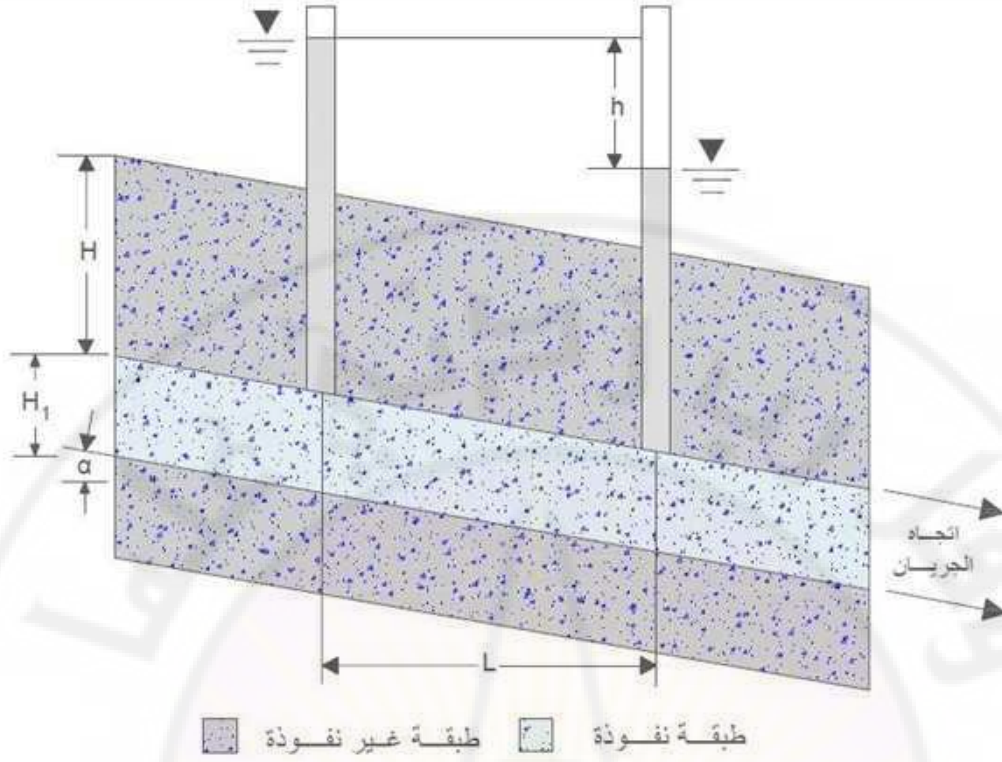
12. الوزن الحجمي الجاف الأعظمي المحدد من المخبر من أجل رمل كوارتز هو 1800 kg/m^3 . في الحقل، وبحال كان الرص النسبي 80%، حدد الناقلية الهيدروليكية للرمل في الحقل بالحالة المرصوفة.

(معطى $D_{10} = 0.15 \text{ mm}$ ، $C_u = 2.2$ ، $G_s = 2.66$). استخدم المعادلة (34.7).

13. من أجل تربة رملية، معطى التالي:

- معامل المسامية الأعظمي $= 0.7$.
- معامل المسامية الأصغري $= 0.46$.
- $D_{10} = 0.2 \text{ mm}$

المطلوب تحديد الناقلية الهيدروليكية من أجل الرمل عند كثافة نسبية 60%، استخدم المعادلة (32.7)



الشكل 29-7

الشكل (29.7): معطيات المسألة

14. أعطى التحليل الحبي بطريقة التحليل المنخلي لترية رملية النتائج المبينة بالجدول التالي. قدر الناقلية الهيدروليكية لهذه التربة عند معامل مسامية 0.5. استخدم المعادلة (30.7) و $SF = 6.5$.

نسبة المار (%)	رقم المهزة (US)
100	30
80	40
68	60
28	100
0	200

15. من أجل تربة غضارية منضغطة طبيعياً، معطى التالي:

K (cm/sec)	معامل المسامية (e)
1.2×10^{-6}	0.8
3.6×10^{-6}	1.4

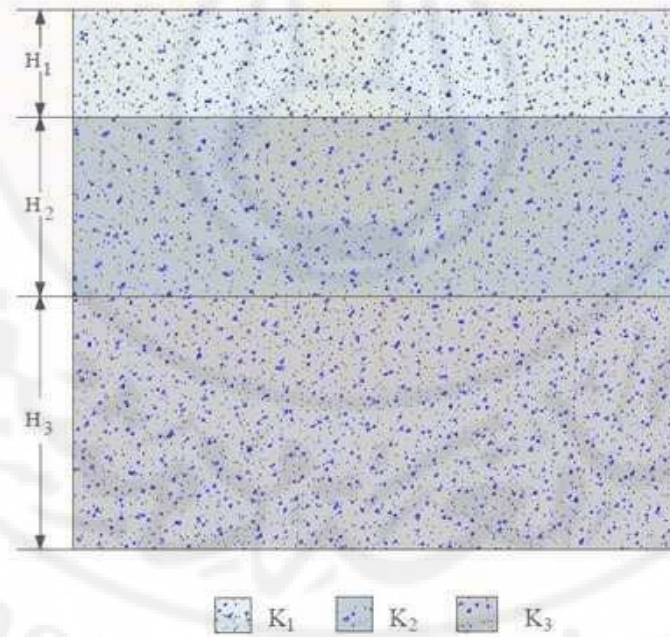
المطلوب حساب الناقلية الهيدروليكية للغضار عند معامل مسامية $e = 0.9$. استخدم المعادلة (38.7).

16. معامل المسامية الطبيعي لرواسب غضارية طرية هو 2.1. والناقلية الهيدروليكية للغضار عند ضمن هذه الشروط هي $0.91 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$. ما هي الناقلية الهيدروليكية للغضار إذا تم رصه لتصبح قيمة معامل المسامية 1.1. استخدم المعادلة (7.36).

17. تربة متطبقة موضحة في الشكل (7.30)، معطى التالي:

- $H_1 = 1.5 \text{ m}$
- $H_2 = 2.5 \text{ m}$
- $H_3 = 3.0 \text{ m}$
- $k_1 = 10^{-5} \text{ cm/sec}$
- $k_2 = 3.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$
- $k_3 = 3.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$

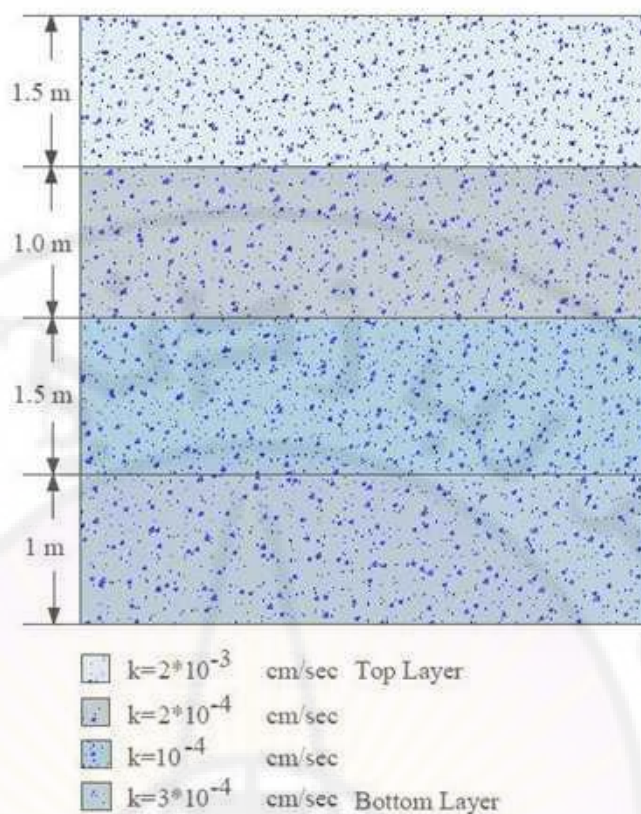
أحسب النسبة ما بين قيمة الناقلية الهيدروليكية المكافئة الأفقية إلى قيمة الناقلية الهيدروليكية المكافئة الشاقولية.



الشكل 30-7

الشكل (30.7): معطيات المسألة

18. تربة متطبقة مبينة في الشكل (31.7). المطلوب حساب النسبة $k_{H(eq)}/k_{V(eq)}$



الشكل 31-7

الشكل (31.7): معطيات المسألة

□

13.7 المراجع

1. AMER, A. M., and AWAD, A. A. (1974). "Permeability of Cohesionless Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT12, 1309–1316.
2. BASETT, D. J., and BRODIE, A. F. (1961). "A Study of Matabitchuan Varved Clay," Ontario Hydroelectric Research News, Vol. 13, No. 4, 1–6.
3. CARMAN, P. C. (1938). "The Determination of the Specific Surface of Powders." J. Soc. Chem. Ind. Trans., Vol. 57, 225.
4. CARMAN, P. C. (1956). Flow of Gases through Porous Media, Butterworths Scientific Publications, London.
5. CARRIER III, W. D. (2003). "Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 11, 1054–1056.
6. CASAGRANDE, L., and POULOS, S. J. (1969). "On the Effectiveness of Sand Drains," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, 287–326.
7. CHAN, H. T., and KENNEY, T. C. (1973). "Laboratory Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard Varved Soil," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10, No. 3, 453–472.
8. CHAPUIS, R. P. (2004). "Predicting the Saturated Hydraulic Conductivity of Sand and Gravel Using Effective Diameter and Void Ratio," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, No. 5, 787–795.
9. CHAPUIS, R. P., GILL, D. E., and BAASS, K. (1989). "Laboratory Permeability Tests on Sand: Influence of Compaction Method on Anisotropy," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, 614–622.
10. DANIEL, D. E. (1989). "In Situ Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Clay," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 9, 1205–1226.
11. DARCY, H. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
12. FUKUSHIMA, S., and ISHII, T. (1986). "An Experimental Study of the Influence of Confining Pressure on Permeability Coefficients of Filldam Core Materials," Soils and Foundations, Vol. 26, No. 4, 32–46.

13. HANSBO, S. (1960). "Consolidation of Clay with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains," Swedish Geotechnical Institute, Proc. No. 18, 41–61.
14. HAZEN, A. (1930). "Water Supply," in American Civil Engineers Handbook, Wiley, New York.
15. KENNEY, T. C., and CHAN, H. T. (1973). "Field Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard Varved Soil," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10, No. 3, 473–488.
16. KENNEY, T. C., LAU, D., and OFOEGBU, G. I. (1984). "Permeability of Compacted Granular Materials," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, No. 4, 726–729.
17. KOZENY, J. (1927). "Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden." Wien, Akad. Wiss., Vol. 136, No. 2a, 271.
18. KRUMBEIN, W. C., and MONK, G. D. (1943). "Permeability as a Function of the Size Parameters of Unconsolidated Sand," Transactions, AIMME (Petroleum Division), Vol. 151, 153–163.
19. LUMB, P., and HOLT, J. K. (1968). "The Undrained Shear Strength of a Soft Marine Clay from Hong Kong," Geotechnique, Vol. 18, 25–36.
20. MESRI, G., and OLSON, R. E. (1971). "Mechanism Controlling the Permeability of Clays," Clay and Clay Minerals, Vol. 19, 151–158.
21. MITCHELL, J. K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior, Wiley, New York.
22. OLSEN, H. W. (1961). "Hydraulic Flow Through Saturated Clay," Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
23. SAMARASINGHE, A. M., HUANG, Y. H., and DRNEVICH, V. P. (1982). "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, No. GT6, 835–850.
24. TAVENAS, F., JEAN, P., LEBLOND, F. T. P., and LEROUEIL, S. (1983). "The Permeability of Natural Soft Clays. Part II: Permeability Characteristics," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4, 645–660.
25. TSIEN, S. I. (1955). "Stabilization of Marsh Deposit," Highway Research Record, Bulletin 115, 15–43.

- 26.U.S. DEPARTMENT OF NAVY (1971). “Design Manual—Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures,” NAVFAC DM-7, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 27.Wu, T. H., Chang, N. Y., AND Ali, E. M. (1978). “Consolidation and Strength Properties of a Clay,” Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT7, 899–905.

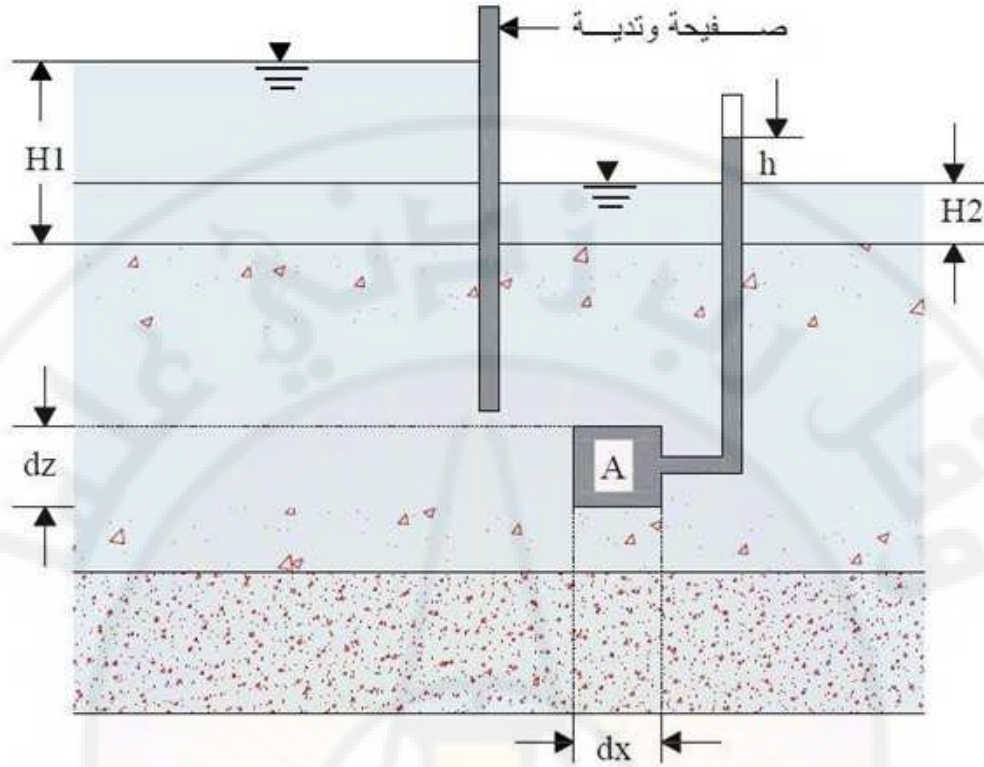


8 الفصل الثامن: الشرح

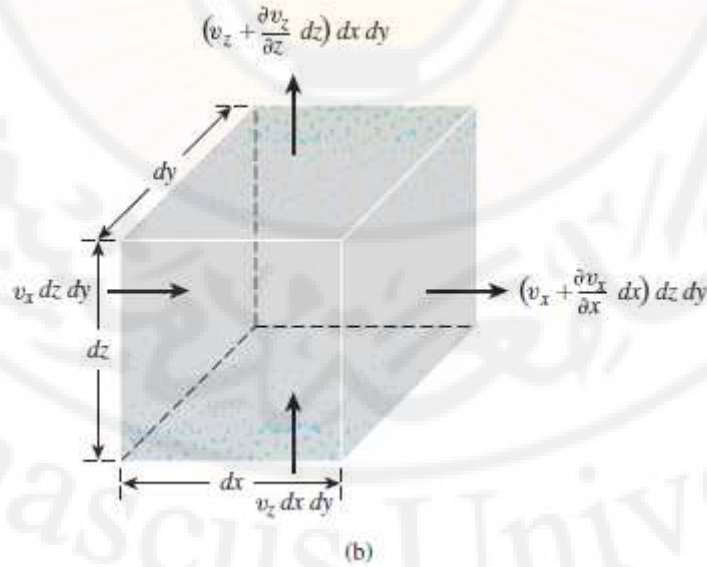
في هذا الفصل، سنعتمد على بعض الحالات البسيطة والتي هي عبارة عن تطبيق مباشر لقانون دارسي لحساب جريان الماء خلال جسم التربة. بشكل عام، نلاحظ أن جريان الماء خلال جسم التربة لا يمكن أن يتم باتجاه واحد فقط، كما أنه ليس منتظم على كامل مساحة المقطع المتعامد مع اتجاه الجريان. في مثل هذه الحالات، يتم حساب جريان المياه الجوفية ضمن جسم التربة من خلال استخدام ما يعرف بشبكات الجريان. إن مفهوم شبكة الجريان مبني بشكل أساسي على معادلة لابلاس للاستمرارية، والتي تغطي حالة الجريان المستقر من أجل نقطة معطاة في كتلة التربة. في الفقرات التالية من هذا الفصل، سيتم استنتاج معادلة لابلاس للاستمرارية وذلك من خلال تطبيقها لمسائل الشرح.

1.8 معادلة لابلاس للاستمرارية

لاستنتاج معادلة لابلاس التفاضلية للاستمرارية، سنقوم وكما هو موضح بالشكل (a1.8) بفرض وجود كتلة لتربة نفوذة، ضمن هذه الكتلة قمنا بوضع ستائر وتدية، هذه الستائر موجودة على صف واحد بالمستوي المتعامد مع مستوي الورقة ونعتبر أن هذه الستائر التودية غير نفوذة. هذا الوضع سيخلق فرق بمنسوب الماء ما بين يمين ويسار صف الستائر التودية. وكما نعلم أن جريان الماء المستقر خلال طبقة التربة النفوذة يتم من منطقة الضاغط المرتفع إلى منطقة الضاغط المنخفض وهو جريان ثنائي البعد أي يتم في المستوي (X,Z) .



الشكل 1-8 : صف وحيد من الأوتاد الصفائح المدفونة في تربة نفوذة



الشكل (1.8): (a) صف واحد من الستائر الوتدية المدفونة في طبقة نفوذة،

(b) - الجريان في النقطة A

لو أخذنا نقطة مثل A في المستوي (Z,X) الموضحة في الشكل (a1.8) ونريد تقدير كمية الماء المارة خلالها. لهذا الأمر سوف نفترض أن النقطة A هي عبارة عن جزء من كتلة التربة، هذه الكتلة لها الأبعاد dx, dy, dz (الطول dy عمودي على مستوي الورقة). وهذه الكتلة الممثلة بالنقطة A مبنية بالمقياس المكبر في الشكل (b 1.8). سوف نعتبر أن القيم v_x, v_z هي عبارة عن مكونات سرعة التدفق في الاتجاهات الشاقولية والأفقية على التوالي. ضمن هذه الفرضيات، واستناداً لنتائج الفصل السابع يمكننا القول أن غزارة المياه الداخلة عبر هذا الجزء من التربة في الاتجاه الأفقي مساوية للقيمة $v_x \cdot dz \cdot dy$ ، أما في الاتجاه الشاقولي فتكون قيمة الغزارة الداخلة عبر هذا الجزء من التربة معطاه بالعلاقة $v_z \cdot dx \cdot dy$. في حين أن غزارة التصريف الخارجة من الكتلة في الاتجاه الأفقي والاتجاه الشاقولي هي على التوالي:

$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx\right) dz \cdot dy \square$$

و

$$\left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx \cdot dy \square$$

وبافتراض أن الماء غير قابل للانضغاط ولا يوجد أي تغير بالحجم في كتلة التربة، هنا نستطيع القول أن الغزارة الكلية الداخلة يجب أن تساوي الغزارة الكلية الخارجة، ونعبر عن هذا الأمر رياضياً بالمعادلة:

$$\left[\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx\right) dz \cdot dy + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx \cdot dy\right] - [v_x dz \cdot dy + v_z dx \cdot dy] = 0$$

وبتبسيط هذه المعادلة سنجد المعادلة التالية:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1.8) \square$$

وباستخدام قانون دارسي، يمكن التعبير عن سرعة الجريان وبكلا الإتجاهين بالمعادلات التالية:

$$v_x = k_x \cdot i_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.8)$$

$$v_z = k_z \cdot i_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.8) \square$$

حيث k_x, k_z هي الناقلية الهيدروليكية في الاتجاهات الشاقولية والأفقية على التوالي. ومن المعادلات (1.8)، (2.8)، (3.8)، وبالتعويض يمكن الحصول على المعادلة:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.8) \square$$

وبحال كانت التربة متجانسة بالنسبة للناقلية الهيدروليكية، أي $k_x = k_z$ ، فإن معادلة الاستمرارية السابقة من أجل الجريان ثنائي البعد يمكن تبسيطها إلى الشكل النهائي وهو:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (5.8) \square$$

2.8 معادلة الاستمرارية من أجل مسائل الجريان البسيطة

معادلة الاستمرارية المعطاة في العلاقة (5.8) يمكن استخدامها لحل مسائل الجريان البسيطة. ولشرح هذا الأمر، سوف نعتبر مسألة جريان أحادية البعد، كما يظهر في الشكل 2.8، بحيث يبقى الضاغط ثابت على طول المقطع لطبقتين من التربة بحالة جريان الماء. إن فرق الضاغط بين أعلى طبقة التربة رقم 1 وأسفل طبقة التربة رقم 2 هو h_1 . ولأن الجريان هو فقط باتجاه واحد أي الإتجاه Z فإن معادلة الاستمرارية (5.8) يتم تبسيطها لتصبح بالشكل:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (6.8) \square$$

نستطيع القول أن الضاغط h ما بين الأنابيب البيزومترية المبينة بالشكل (2.8) تساوي إلى القيمة التالية:

$$h = A_1 \cdot z + A_2 \quad (7.8)$$

حيث A_1, A_2 هي ثوابت.

ولإيجاد قيم A_1, A_2 من أجل جريان الماء خلال طبقة التربة 1، يجب معرفة الشروط الحدية، وهي كالتالي:

• الشرط 1: عند $z = 0$ فإن $h = h_1$

• الشرط 2: عند $z = H_1$ فإن $h = h_2$

بدمج المعادلة (7.8) مع الشرط 1 نجد:

$$A_2 = h_1 \quad (8.8)$$

وبشكل مشابه، وبدمج المعادلة (7.8) مع الشرط 2 مع المعادلة (8.8) نجد:

$$h_2 = A_1 \cdot H_1 + h_1 \quad \square$$

أو بشكل آخر:

$$A_1 = -\left(\frac{h_1 - h_2}{H_1}\right) \quad (9.8) \quad \square$$

وبدمج المعادلات (9.8)، (8.8)، (7.8)، يمكن أن نستنتج أن:

$$h = -\left(\frac{h_1 - h_2}{H_1}\right)z + h_1 \quad \text{for } 0 \leq z \leq H_1 \quad (10.8) \quad \square$$

ومن أجل جريان الماء خلال طبقة التربة رقم 2، ومع وجود الشروط الحدية التالية:

• الشرط 1: عند $z = H_1$ فإن $h = h_2$

• الشرط 2: عند $z = H_1 + H_2$ فإن $h = 0$

وبتحقيق الشرط 1 مع المعادلة (7.8) نجد:

$$A_2 = h_2 - A_1 \cdot H_1 \quad (11.8)$$

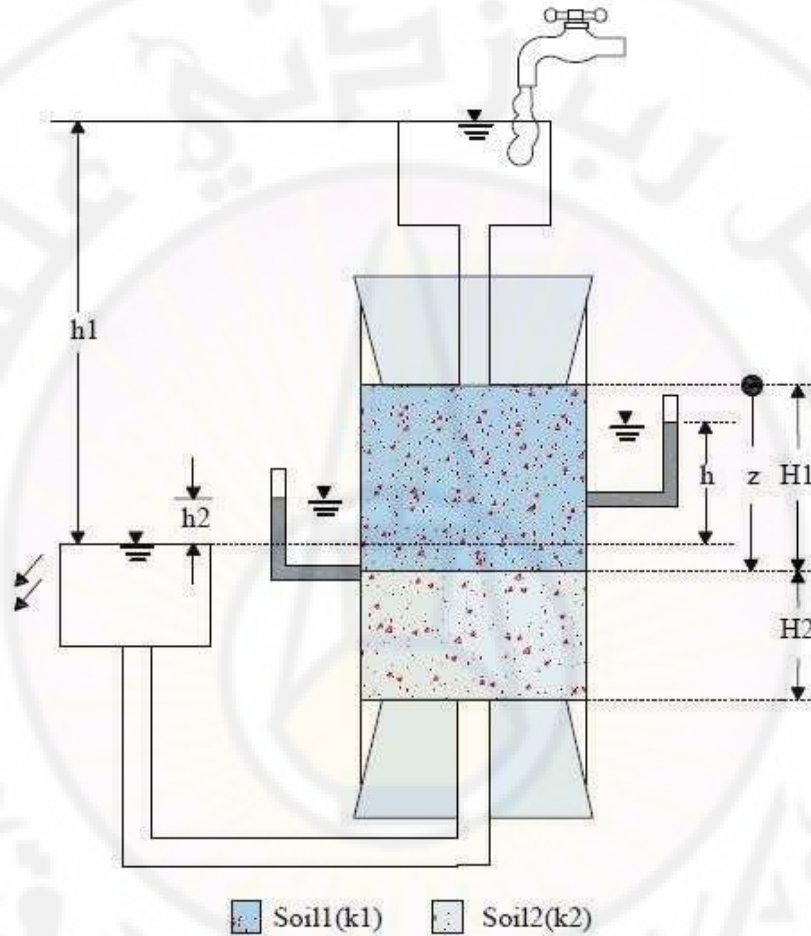
أيضاً وبتحقيق الشرط 2 ومن المعادلات (7.8)، (11.8)، نستطيع أن نكتب:

$$0 = A_1(H_1 + H_2) + (h_2 - A_1 \cdot H_1)$$

$$A_1 \cdot H_1 + A_1 \cdot H_2 + h_2 - A_1 \cdot H_1 = 0$$

أو:

$$A_1 = -\frac{h_2}{H_2} \quad (12.8) \square$$



الشكل 2-8 : الجريان خلال طبقتين من التربة

الشكل (2.8): الجريان خلال طبقتي تربة

لذلك، ومن المعادلات (7.8)، (11.8)، (12.8) نحدد:

$$h = -\frac{h_2}{H_2}z + h_2 \left(1 + \frac{H_1}{H_2}\right) \quad \text{for } H_1 \leq z \leq H_1 + H_2 \quad (13.8) \square$$

وعند أي زمن معطى، فإن العزارة خلال الطبقة رقم 1 يساوي الجريان في الطبقة رقم 2، لذلك نستطيع كتابة العلاقة:

$$q = k_1 \left(\frac{h_1 - h_2}{H_1} \right) A = k_2 \left(\frac{h_2 - 0}{H_2} \right) A \quad \square$$

حيث: A = مساحة المقطع العرضي للتربة.

k_1 = الناقلية الهيدروليكية لطبقة التربة رقم 1.

k_2 = الناقلية الهيدروليكية لطبقة التربة رقم 2.

أو:

$$h_2 = \frac{h_1 \cdot k_1}{H_1 \left(\frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2} \right)} \quad (14.8) \quad \square$$

وبتعويض المعادلة (14.8) بالمعادلة (10.8)، نجد أن:

$$h = h_1 \left(1 - \frac{k_2 \cdot z}{k_1 \cdot H_2 + k_2 \cdot H_1} \right) \quad \text{for } 0 \leq z \leq H_1 \quad (15.8) \quad \square$$

وبشكل مشابه، بدمج المعادلات (13.8) و (14.8)، نجد أن:

$$h = h_1 \left[\left(\frac{k_1}{k_1 \cdot H_2 + k_2 \cdot H_1} \right) (H_1 + H_2 - z) \right] \quad \text{for } H_1 \leq z \leq H_1 + H_2 \quad (16.8) \quad \square$$

$\square$

المثال 1.8:

بالإشارة للشكل 2.8. وبفرض لدينا المعطيات التالية:

$$z = 8 \text{ in} , h = 20 \text{ in} , h_1 = 24 \text{ in} , H_2 = 20 \text{ in} , H_1 = 12 \text{ in}$$

$$k_1 = 0.026 \text{ in./sec} \text{ وقطر عينة التربة هو } D = 3 \text{ in}$$

والمطلوب حساب غزارة الجريان للماء خلال طبقتي التربة بالوحدة (in³./hr).

الحل:

بما أن $z = 8 \text{ in}$ متوضعة عند طبقة التربة 1، فالمعادلة (8.15) صالحة، لذلك يمكننا كتابة:

$$h = h_1 \left(1 - \frac{k_2 \cdot z}{k_1 \cdot H_2 + k_2 \cdot H_1} \right) = h_1 \left[1 - \frac{z}{\left(\frac{k_1}{k_2} \right) H_2 + H_1} \right] \square$$

$$20 = 24 \left[1 - \frac{8}{\left(\frac{k_1}{k_2} \right) 20 + 12} \right] \square$$

$$\frac{k_1}{k_2} = 1.795 \approx 1.8 \square$$

ومعطى لدينا : $k_1 = 0.026 \text{ in./sec}$ ، بالتالي:

$$k_2 = \frac{k_1}{1.8} = \frac{0.026}{1.8} = 0.0144 \text{ in./sec} \square$$

ونعلم أن غزارة الجريان تعطى بالعلاقة:

$$q = k_{eq} \cdot i \cdot A \square$$

$$i = \frac{h_1}{H_1 + H_2} = \frac{24}{12 + 20} = 0.75 \square$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (3)^2 = 7.069 \text{ in}^2 \square$$

$$k_{eq} = \frac{H_1 + H_2}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2}} = \frac{12 + 20}{\frac{12}{0.026} + \frac{20}{0.0144}} = 0.0173 \text{ in/sec} = 62.28 \text{ in/hr} \square$$

لذلك، فإن قيمة غزارة الجريان للماء خلال طبقتي التربة هي:

$$q = k_{eq} i . A = (62.28)(0.75)(7.069) = 330.19 \text{ in}^3/\text{hr} \square$$

□

3.8 شبكات الجريان

إن معادلة الاستمرارية (5.8) في وسط مشكلة من تربة متجانسه يمكن أن تمثل في المستوي بمنحنيين متعامدين وهذين المنحنيين هما، خطوط الجريان (الغزارة) وخطوط تساوي الكمون.

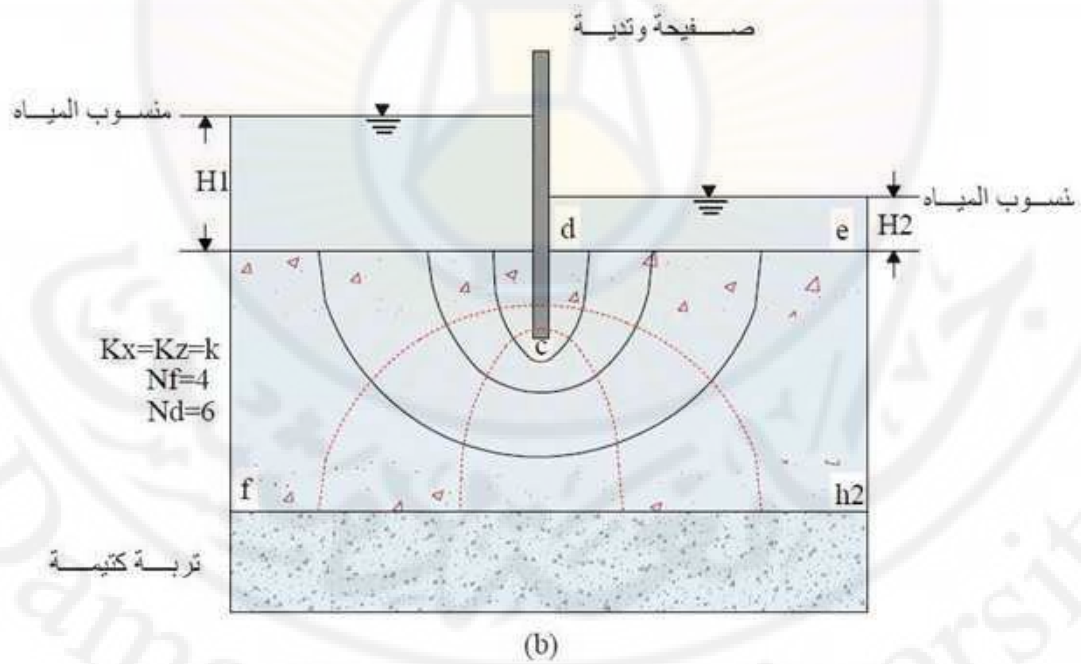
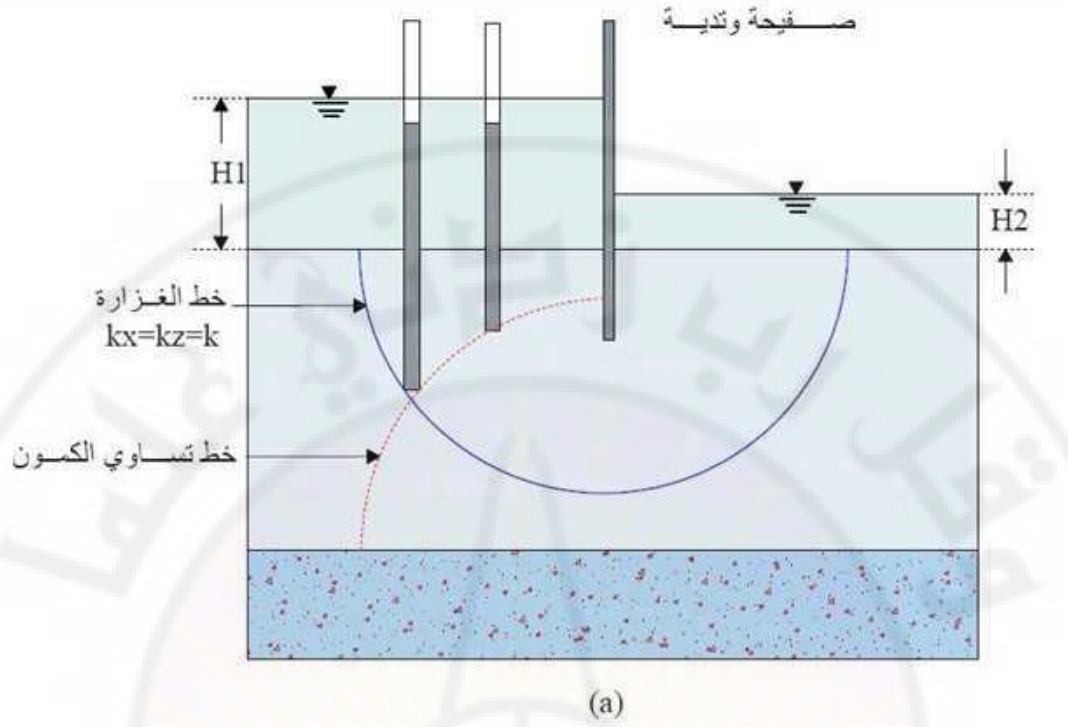
خط الجريان (خط الغزارة) هو الخط الذي يمثل جزيئات الماء التي تنتقل من جانب الضاغط المرتفع إلى جانب الضاغط المنخفض ضمن طبقة التربة متوسطة النفوذية.

خط الكمون هو الخط الذي يمثل تساوي قيم الضاغط المحتمل عند كل نقطة من نقاطه ضمن جسم التربة. لذلك في حال تم وضع أنبوب بيزوميتر في عدة نقاط مختلفة على طول خط الكمون، فإن منسوب الماء سوف يرتفع وفي كافة الأنابيب إلى نفس المنسوب. الشكل (3.8 a) يشرح لنا تعريف خطوط الجريان وخطوط الكمون في طبقة تربة نفوذة حول صف من الستائر الوتدية المبينة في الشكل 1.8. (هذا مع افتراض أن $k_x = k_z = k$). هذه المجموعة من خطوط الجريان وخطوط الكمون تسمى بشبكة الجريان.

وكما تم ذكره في المقدمة، يتم بناء شبكات الجريان لحساب جريان المياه الجوفية ومناسيب الضواغط في الوسط. ولبناء شبكة الجريان، لابد من توفر القواعد التالية:

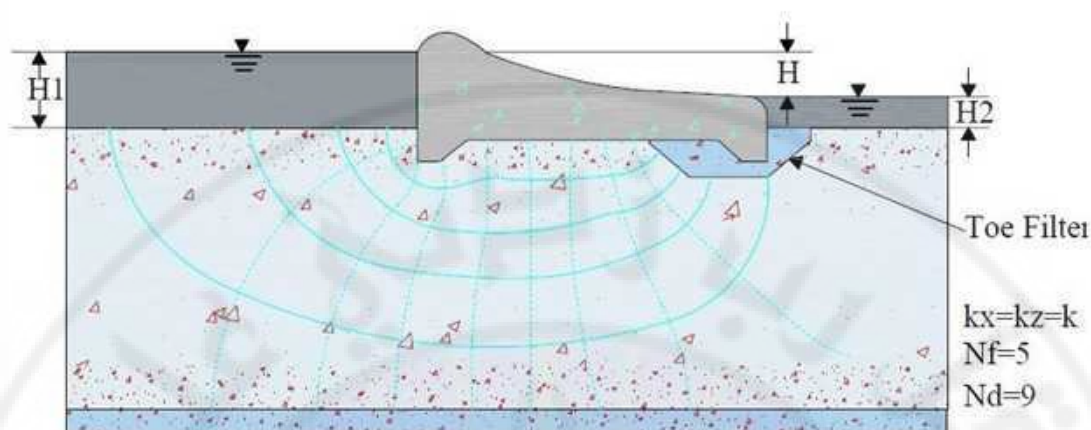
1. يجب أن أن تتقاطع خطوط الجريان مع خطوط الكمون في زوايا مناسبة.
2. يجب أن تشكل عناصر الجريان أشكالاً مربعة تقريباً.

الشكل (3.8 b) يظهر مثال لشبكة جريان كاملة. ومثال آخر عن شبكة الجريان في طبقة متجانسة نفوذة معطاة في الشكل (4.8). في هذه الأشكال، نعرف العدد N_f بأنه عدد قنوات الجريان في شبكة الجريان المتشكلة والمرسومة، أما العدد N_d فيمثل عدد المربعات المتشكلة ضمن خط جريان واحد والتي تعبر عن انخفاض الضاغط من القيمة العظمى إلى القيمة الصغرى (والمشروحة في هذا الفصل لاحقاً).



الشكل 3-8 : a خطوط الجريان و خطوط تساوي الكمون .
b عقد غزارة كاملة.

الشكل (3.8): (a) تعريف خطوط الجريان والكمون (b) شبكة جريان كاملة



الشكل 4-8 : عقد الغزارة تحت السد بوجود فلتر

الشكل (4.8): شبكة جريان تحت سد مع فلتر toe filter

إن رسم شبكة الجريان يحتاج لعدة محاولات. وعندما يتم بناء شبكة الجريان من قبل المهندس لحل مشكلة هندسية، يجب أخذ الشروط الحدية بعين الاعتبار. هذه الشروط تنطلق من فهم المشكلة المراد دراستها من جهة، ومن جهة ثانية من فهم سلوك جسم التربة.

مثلاً، ومن أجل رسم شبكة الجريان المبينة والمشروحة في الشكل (3.8 b)، تم أخذ الشروط الحدية الأربعة التالية بعين الاعتبار:

- الشرط 1: السطوح العلوية والسفلية للطبقة النفوذة (أي الخطوط ab و de) هي خطوط الكمون.
- الشرط 2: لأن ab و de هي خطوط كمون، بالتالي فإن كل خطوط الجريان تتقاطع معهم بزاوية مناسبة.
- الشرط 3: حدود الطبقة الكتيمة - والتي هي، الخط fg - هي خط جريان، وأيضاً سطح الستارة الوتدية الكتيم، الخط acd هو خط جريان.
- الشرط 4: خطوط الكمون تتقاطع مع acd و fg عند زوايا مناسبة.

4.8 حساب الرشح من شبكة الجريان

في أي شبكة جريان، نلاحظ أن الشريحة بين أي خطي جريان معينين تسمى بقناة الجريان. في الشكل (5.8) يظهر لنا قناة جريان مع خطوط الكمون والتي تشكل عنصر مربع. وإذا كانت كان لدينا :

$h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ تمثل مناسيب الماء في الأنابيب البيزومترية الموافق لخطوط الكمون. فإن غزارة الرشح خلال قناة الجريان لواحدة الطول (بشكل عمودي على المقطع العرضي خلال الطبقة النفوذة) يمكن حسابها كالتالي:

بسبب عدم وجود جريان للماء بشكل متعامد مع خطوط الجريان نستطيع أن نكتب (الشكل 5.8):

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \dots = \Delta q \quad (17.8)$$

وبتطبيق قانون دارسي، نجد أن غزارة الجريان يمكن كتابتها، من المعادلة (17.8) كالتالي:

$$\Delta q = k \left(\frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) l_1 = k \left(\frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) l_2 = k \left(\frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) l_3 = \dots \quad (18.8) \square$$

المعادلة (18.8) تظهر أنه في حال تم رسم عنصر الجريان تقريباً كمربع، فإن الهبوط في منسوب الماء ضمن الأنابيب البيزومييري بين أي خطي كمون معينين هو نفسه. وهذا ما يسمى بالهبوط الكموني.

لذلك نستطيع أن نعبر عن هذا الأمر بالمعادلة:

$$h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_4 = \frac{H}{N_d} \quad (19.8) \square$$

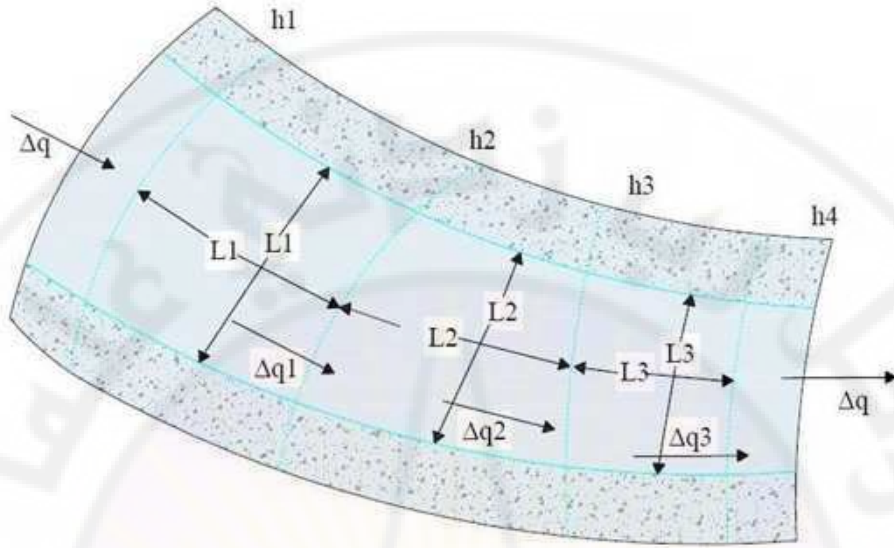
وبالتعويض بالمعادلة (18.8) نجد أن:

$$\Delta q = k \frac{H}{N_d} \quad (20.8) \square$$

حيث:

H = فرق الضاغط بين الجانبين العلوي والسفلي.

$N_d =$ عدد الهبوطات الكمونية.



الشكل 5-8 : التسرب من خلال التدفق من قناة مع عناصر مربعة

الشكل (5.8): الرشح خلال قناة جريان مع عنصر مربع

في الشكل (3.8 b)، ومن أجل أي قناة جريان نلاحظ أن: $H = H_1 - H_2$ و $N_d = 6$.

في حال كان عدد قنوات الجريان في شبكة الجريان مساوي للقيمة N_f ، فإن غزارة الجريان الكلية خلال القناة لواحدة الطول يمكن أن تعطى بالعلاقة:

$$q = k \frac{H.N_f}{N_d} \quad (21.8)$$

على الرغم من أن رسم عناصر مربعة في شبكة الجريان مناسبة جداً، إلا أنها ليست دائماً ضرورية. بديل، أنه يمكن رسم شبكة مستطيلة من أجل قناة الجريان وكما يظهر في الشكل (6.8)، حيث أن نسبة العرض إلى الطول لكل العناصر المستطيلة ليست نفسها. في هذه الحالة المعادلة (18.8) من أجل غزارة الجريان خلال القناة يمكن أن تعدل كالتالي:

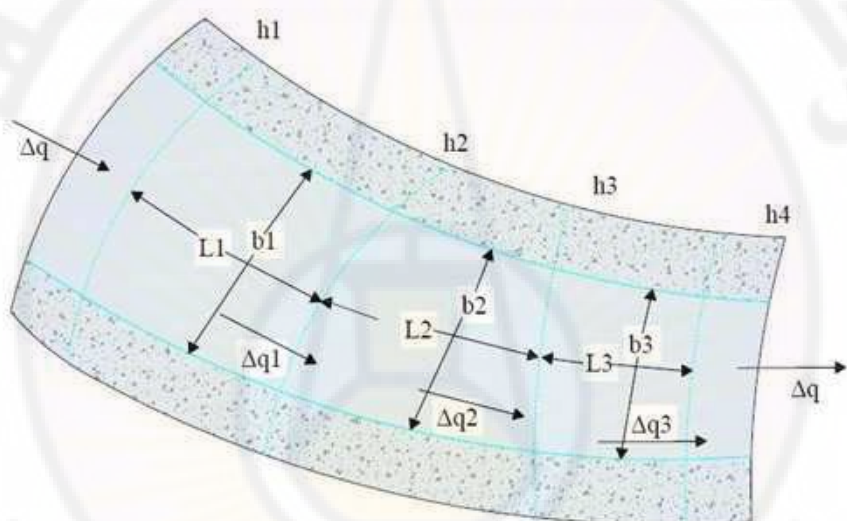
$$\Delta q = k \left(\frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) b_1 = k \left(\frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) b_2 = k \left(\frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) b_3 = \dots \quad (22.8) \square$$

وفي حال $b_1/l_1 = b_2/l_2 = b_3/l_3 = \dots = n$ (أي أن كل العناصر ليست مربعة)، المعادلات (20.8) و (21.8) يمكن تعديلها لتصبح كالتالي:

$$\Delta q = k \cdot H \frac{n}{N_d} \quad (23.8) \square$$

و:

$$q = k \cdot H \left(\frac{N_f}{N_d} \right) \cdot n \quad (24.8) \square$$



الشكل 6-8 : التسرب من خلال التدفق من قناة مع عناصر مستطيلة

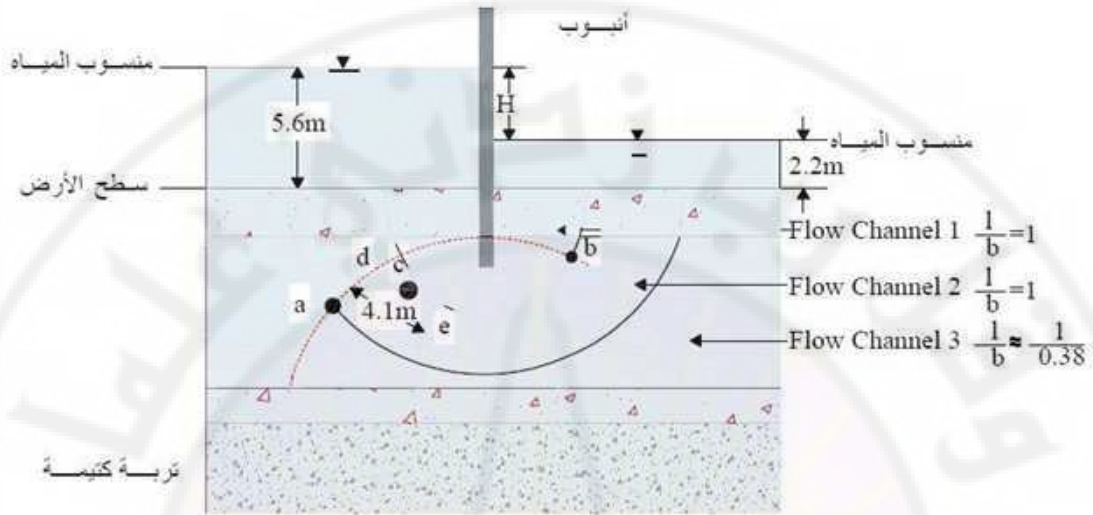
الشكل (6.8): الرشح خلال قناة جريان بعناصر مستطيلة

الشكل (7.8) يظهر شبكة جريان من أجل رشح حول صف واحد من الستائر الوتدية. لاحظ أن قنوات الجريان 1 و 2 لها عناصر مربعة. لذلك فإن غزارة الجريان خلال هذه القنوات يمكن أن نحسبها من خلال المعادلة (20.8):

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = \frac{k}{N_d} H + \frac{k}{N_d} H = \frac{2k \cdot H}{N_d} \square$$

على كل حال، قناة الجريان 3 لها عنصر مستطيل. هذا العنصر له نسبة عرض لطول مساوية للقيمة 0.38، لذلك، نجد من المعادلة (23.8).

$$\Delta q_3 = \frac{k}{N_d} H(0.38)$$



الشكل 7-8: التدفق الصافي للتسرب حول صف من الصفائح الوتدية

الشكل (7.8): شرح إنشاء شبكة الجريان حول صف واحد من الستائر الوتدية

لذلك، غزارة الرشح الكلية يمكن أن تعطى بالعلاقة:

$$\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3 = 2.38 \frac{k \cdot H}{N_d} \quad (25.8) \square$$

□

مثال 2.8:

من أجل شبكة الجريان حول صف واحد من السناثر الوتدية الموضوعة ضمن طبقة تربة نفوذة والمبينة في الشكل 7.8. معطى لدينا التالي:

$$k_x = k_z = k = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

(a) ما هو أعلى ارتفاع (فوق سطح الأرض) ممكن أن يصل له الماء إذا تم وضع الأنابيب البيزومترية عند النقاط a و b.

(b) ما هي غزارة الرشح الكلية خلال طبقة التربة النفوذة نسبة لواحدة الطول.

(c) ما هي قيمة التدرج الهيدروليكي المتوسط التقريبي عند c.

الحل:

الطلب a:

من الشكل 7.8، لدينا $N_d = 6$, $H_1 = 5.6 \text{ m}$, $H_2 = 2.2 \text{ m}$ ، وبالتالي نجد أن فقدان الضغط لكل هبوط كموني هو:

$$\Delta H = \frac{H_1 - H_2}{N_d} = \frac{5.6 - 2.2}{6} = 0.567 \text{ m}$$

عند النقطة a، ومع هبوط كموني واحد. سيرتفع منسوب الماء في الأنبوب البيزومتري إلى المنسوب التالي:

- أعلى من منسوب سطح الأرض بمقدار: $(5.6 - 0.567) = 5.033 \text{ m}$.
- وعند النقطة b، لدينا خمس هبوطات كمونية. لذلك سوف يرتفع منسوب الماء إلى المنسوب التالي:

$$[5.6 - (5)(0.567)] = 2.765 \text{ m}$$

□

الطلب b:

من المعادلة (25.8) : غزارة الرشح الكلية خلال طبقة التربة النفوذة نسبة لواحدة الطول

$$q = 2.38 \frac{k(H_1 - H_2)}{N_d} = \frac{(2.38)(5 \times 10^{-5} \text{ m/sec})(5.6 - 2.2)}{6}$$

$$= 6.74 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$$

الطلب C:

التدرج الهيدروليكي المتوسط عند C يمكن أن يعطى كما يلي:

$$i = \frac{\text{الفاقد في الضاغط}}{\text{طول الجريان المتوسط بين d و e}} = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{0.567 \text{ m}}{4.1 \text{ m}} = 0.138$$

(لاحظ أن طول الجريان المتوسط تم وضعه بمقياس).

5.8 شبكات الجريان في الترب غير المتجانسة

إن بناء شبكة الجريان المشروحة حتى الآن والمعادلات الناتجة (21.8) و (24.8) لحسابات الرشح مبنية على افتراضات أن التربة متجانسة. ولكن، في الطبيعة، نعلم أن معظم الترب تبدي بعض عدم التجانس. ولأخذ عدم تجانس التربة بعين الاعتبار مع الناقلية الهيدروليكية، يجب تعديل بناء شبكة الجريان.

ضمن هذه الافتراضات، فإن المعادلة التفاضلية للاستمرارية من أجل جريان ثنائي البعد (المعادلة 4.8) هي:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

ومن أجل الترب الغير متجانسة، $k_x \neq k_z$. في هذه الحالة، المعادلة تمثل مجموعتين من المنحنيات والتي تلتقي عند نقاط تقاطع 90° . بالعموم، نستطيع إعادة كتابة المعادلة السابقة كالتالي:

$$\frac{\partial^2 h}{(k_z/k_x)\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (26.8)$$

وبتعبير $x' = \sqrt{k_z/k_x} x$ يمكن أن نعبر عن المعادلة (26.8) بالمعادلة:

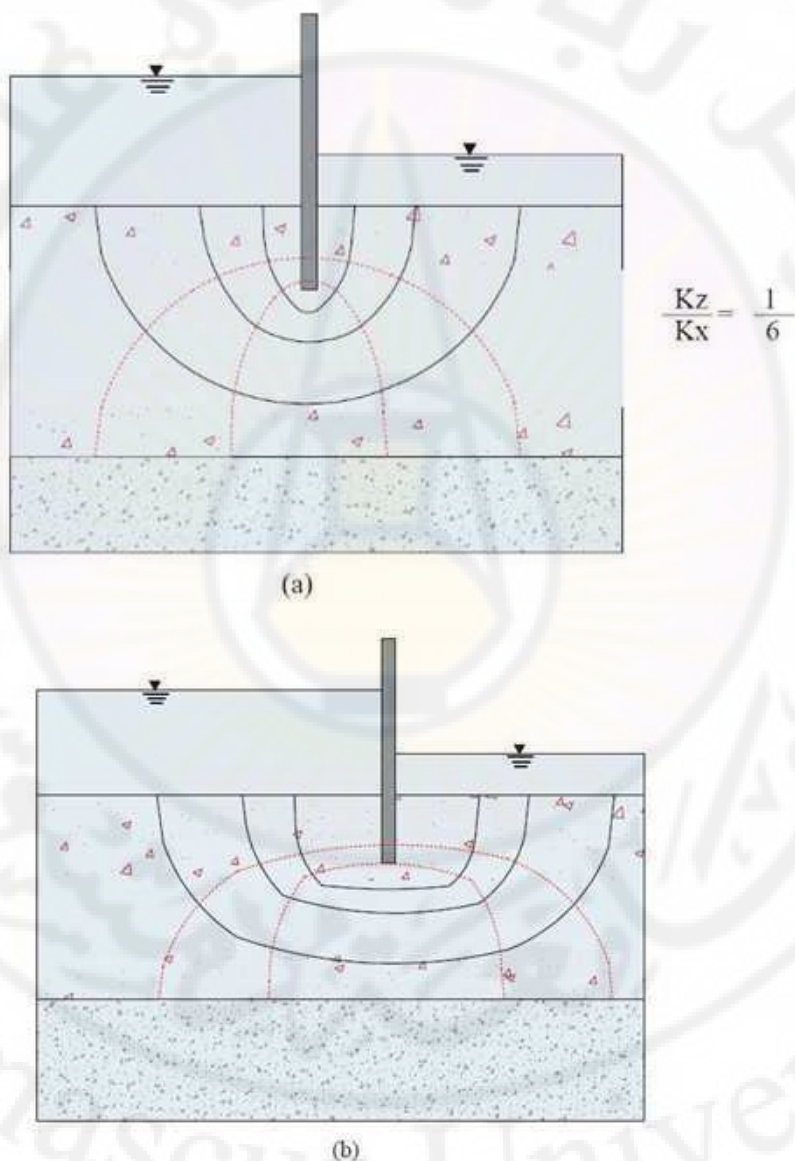
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (27.8)$$

الآن وبالنظر إلى المعادلة (27.8) نجدها أنها مشابهة من حيث الشكل للمعادلة (5.8)، مع تبديل القيمة x بالقيمة x' ، والتي هي الإحداثيات المتحولة الجديدة. ولبناء شبكة الجريان هذه، يمكننا استخدام الخطوات التالية:

- الخطوة 1: نختار مقياس رسم شاقولي (والذي هو المحور z) من أجل رسم المقطع العرضي.
- الخطوة 2: نختار مقياس رسم أفقي (والذي هو المحور x) وهو:

$$\text{المقياس الأفقي} = (\sqrt{k_z/k_x}) \times \text{المقياس الشاقولي}.$$

- الخطوة 3: مع المقاييس المعتمدة في الخطوتين 1 و 2، نرسم المقطع الشاقولي خلال الطبقة النفوذة بشكل موازي لاتجاه الجريان.
- الخطوة 4: نرسم شبكة الجريان للطبقة النفوذة على المقطع الناتج من الخطوة 3، ومع خطوط الجريان المتقاطعة مع خطوط الكمون عند زوايا مناسبة، تنشأ عناصر بشكل مربع تقريباً.



الشكل 8-8 : a عنصر الجريان في الترب المتباينة حالة مقطع متحول
b عنصر الجريان في الترب المتباينة حالة مقطع حقيقي

الشكل (8.8): عنصر جريان بتربة غير متجانسة: (a) في مقطع معدل، (b) في مقطع حقيقي

ولحساب غزارة الرشح نسبة لواحدة الطول باستخدام المعادلة (21.8) ومع تعديل بسيط كما هو مبين بالمعادلة:

$$q = \sqrt{k_x k_z} \frac{H \cdot N_f}{N_d} \quad (28.8) \square$$

حيث:

H = الفاقد الكلي للضاغط.

N_d و N_f = عدد قنوات الجريان وهبوطات الكمون على التوالي (من شبكة الجريان المرسومة في الخطوة 4).

لاحظ أنه عندما يتم رسم شبكات الجريان في مقاطع معدلة (في الترب الغير متجانسة)، فإن خطوط الجريان وخطوط الكمون تكون عمودية. ولكن، عندما يتم رسم شبكات الجريان في المقطع الحقيقي، تكون الزوايا بين الخطوط غير مناسبة بالنسبة لبعضها. وهذه الحقيقة ظاهرة في الشكل (8.8). في هذا الشكل، تم فرض أن $k_x = 6k_z$. الشكل (8.8 a) يظهر عنصر جريان في المقطع المعدل. عنصر الجريان تم إعادة رسمه في المقطع الحقيقي في الشكل (8.8 b).

□

المثال 3.8:

لدينا مقطع في سد موضح في الشكل (9.8 a). فإذا كانت الناقلية الهيدروليكية لطبقة تربة نفوذة في الاتجاه الشاقولي والأفقي هي $2 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ و 4×10^{-2} على التوالي. ارسم شبكة الجريان واحسب فاقد الرشح في السد بالوحدة $\text{ft}^3/\text{day}/\text{ft}$

الحل:

من البيانات المعطاة:

$$k_z = 2 \times 10^{-2} \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 5.67 \text{ ft/day} \square$$

$$k_x = 4 \times 10^{-2} \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 11.34 \text{ ft/day} \square$$

و $h = 20 \text{ ft}$. ومن أجل رسم شبكة الجريان، لا بد من اختيار مقياس رسم أفقي لجسم السد كما يلي:

$$\text{(المقياس الشاقولي)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\text{المقياس الشاقولي} \right) = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-2}}} = \text{المقياس الأفقي}$$

وبناءً على ذلك، يتم إعادة رسم مقطع السد، وشبكة الجريان كما في الشكل (9.8 b)

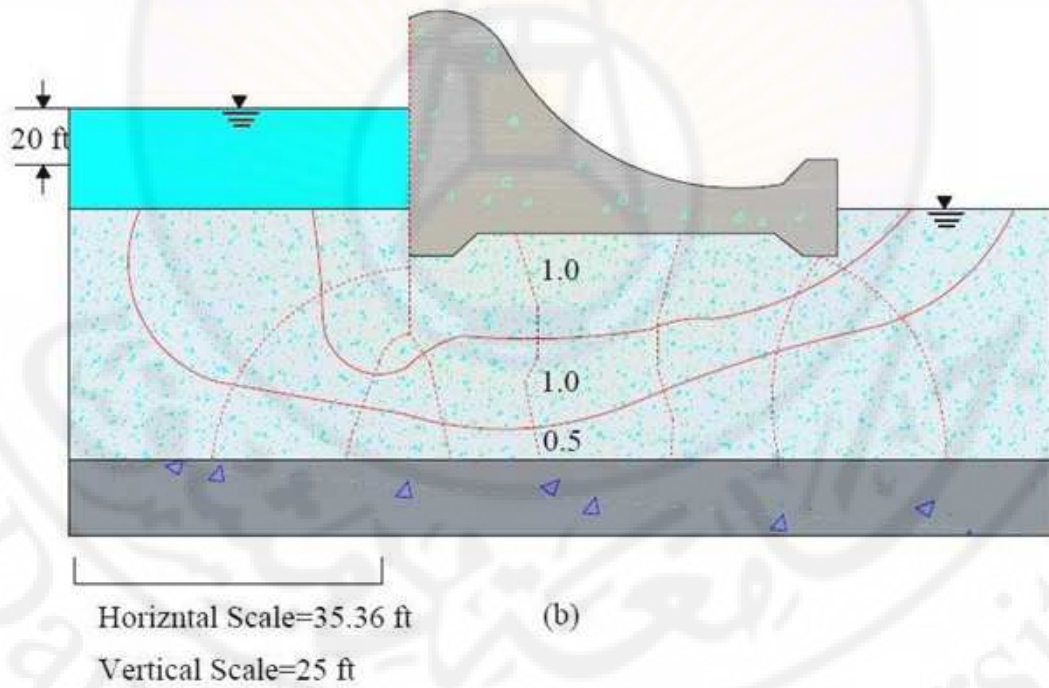
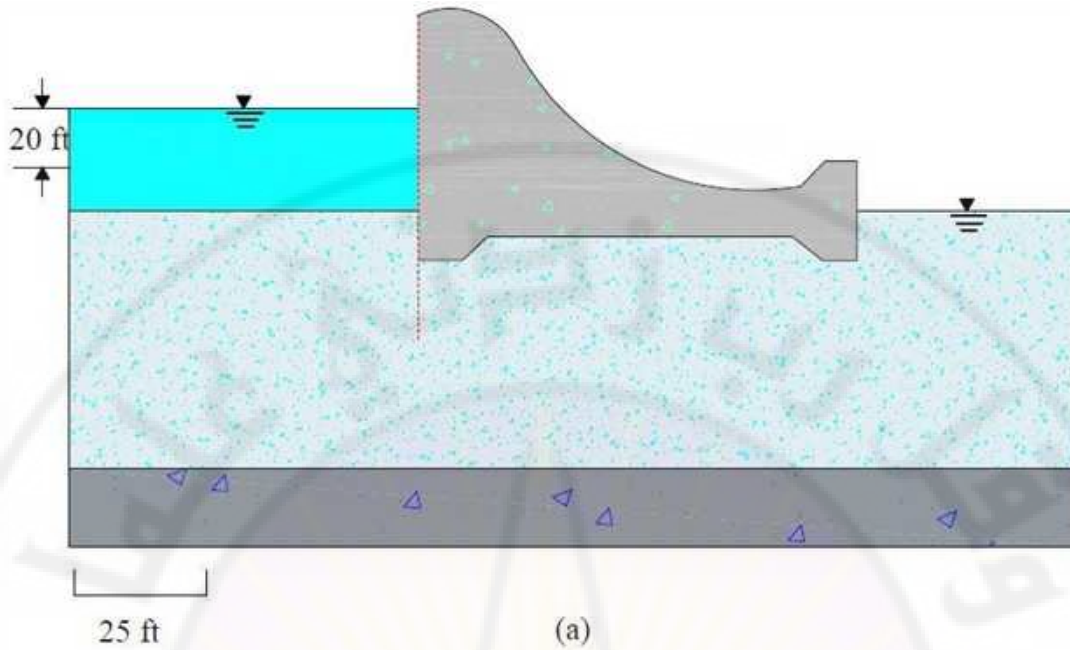
$$q = \sqrt{k_x k_z} H (N_f / N_d) : \text{غزارة الجريان معطاة بالعلاقة}$$

من الشكل (9.8 b)، نجد أن: $N_d = 8$ و $N_f = 2.5$

(حيث أخفض قناة جريان لها نسبة عرض إلى طول تساوي 0.5)، لذلك فإن غزارة الرشح نسبة لواحدة الطول من جسم السد هي:

$$q = \sqrt{(5.67)(11.34)}(20) \left(\frac{2.5}{8} \right) = 50.12 \frac{\text{ft}^3}{\text{day}}/\text{ft} \square$$

□



الشكل 9-8

الشكل (9.8)

□

6.8 ضغط الرفع أسفل المنشآت الهيدروليكية

يمكن استخدام شبكات الجريان لتحديد الضغط التي تتعرض له قواعد المنشآت الهيدروليكية. هذا المفهوم العام يمكن شرحه بمثال بسيط.

الشكل (12.8a) يظهر لنا هدار، عمق قاعدته 2 متر تحت سطح الأرض. شبكة الجريان الضرورية تم رسمها (بفرض أن $k_x = k_z = k$). ومخطط توزيع الضغط عند قاعدة الهدار يمكن استنتاجها من خطوط الكمون كالتالي:

يوجد سبع هبوطات كمونية (N_d) في شبكة الجريان، والفرق في مناسيب الماء بين الجانبين العلوي والسفلي هو $H = 7\text{ m}$. الفاقد في الضغط لكل هبوط كموني هو:

$$H/7 = 7/7 = 1\text{ m}$$

ضغط الرفع عند القاعدة وفي النقطة a هو:

$$a \text{ (الزاوية اليسارية للقاعدة)} = (\text{ضغط الضاغط}) \cdot x \cdot (\gamma_w) = [(7 + 2) - 1] \gamma_w = 8 \cdot \gamma_w$$

وبشكل مشابه، فإن ضغط الرفع عند النقطة b هو:

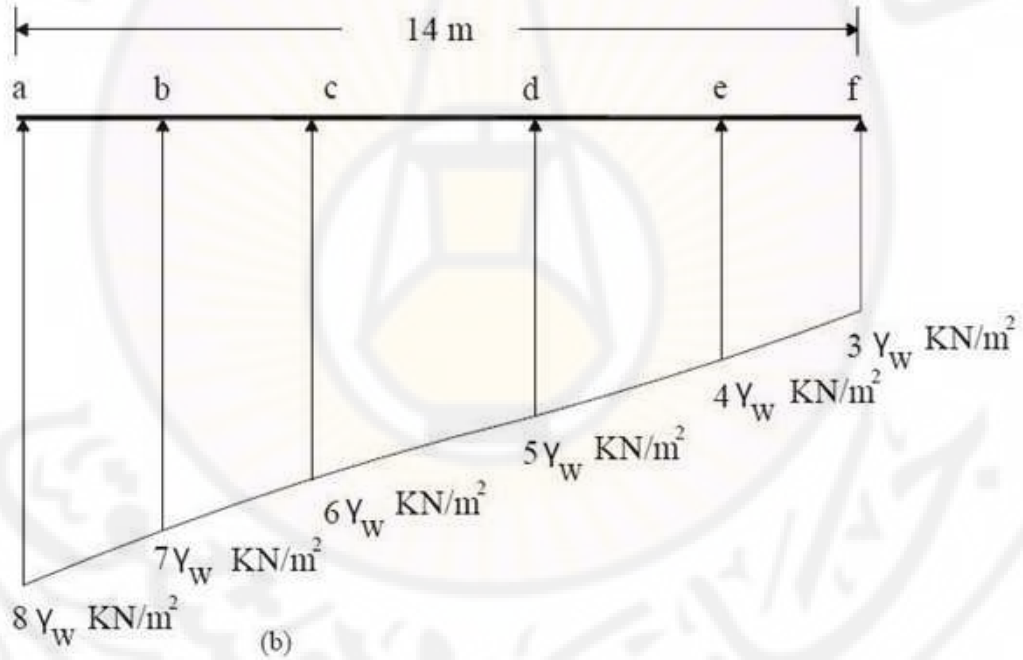
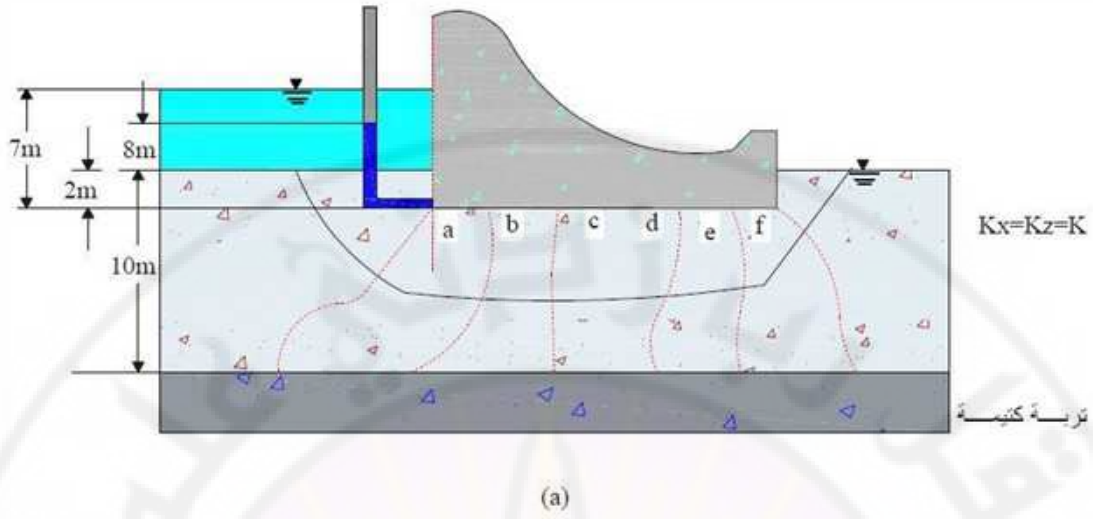
$$b = [9 - (2)(1)] \cdot \gamma_w = 7 \cdot \gamma_w$$

وعند f هو:

$$f = [9 - (6)(1)] \cdot \gamma_w = 3 \cdot \gamma_w$$

تم رسم ضغط الرفع في الشكل (12.8b).

إن قوة ضغط الرفع لواحدة الطول المقاسة على طول محور الهدار يمكن أن تحسب بإيجاد مساحة مخطط الضغط المرسوم.



الشكل 12-8 : (a) هدار

(b) رفع القوة تحت تأثير القوة الهيدروليكية

الشكل (12.8): (a) السد، (b) قوى الرفع تحت المنشأة الهيدروليكية

□

7.8 الرشح خلال جسم سد ركامي مبني على قاعدة كتية

الشكل (13.8) يظهر لنا سد ركامي متجانس مستند على قاعدة كتية. وبفرض أن الناقلية الهيدروليكية للمواد المرصوفة والتي تم بناء السد منها مساوية للقيمة k . السطح الحر للماء المار خلال السد معطى بالخط $abcd$. وإذا فرضنا أن $a'bc$ هو قطع مكافئ. فإن ميل السطح الحر يمكن افتراضه مساوي للتدرج الهيدروليكي. وتم فرضه كذلك. ولأن التدرج الهيدروليكي ثابت مع العمق يمكننا كتابة المعادلة التالية:

$$i \cong \frac{dz}{dx} \quad (29.8) \square$$

وباعتبار المثلث cde ، يمكن أن نعطي غزارة الرشح لوادة الطول للسد (عند الزوايا المناسبة للمقطع العرضي الموضح في الشكل 8.13) كالتالي:

$$q = k \cdot i \cdot A \square$$

$$i = \frac{dz}{dx} = \tan \alpha \square$$

$$A = (\overline{ce})(1) = L \cdot \sin \alpha \square$$

لذلك:

$$q = k \cdot (\tan \alpha)(L \cdot \sin \alpha) = k \cdot L \cdot \tan \alpha \sin \alpha \quad (30.8)$$

ايضاً، إن غزارة الرشح (نسبة لوادة الطول للسد) خلال المقطع bf هي:

$$q = k \cdot i \cdot A = k \left(\frac{dz}{dx} \right) (z \times 1) = k \cdot z \left(\frac{dz}{dx} \right) \quad (31.8) \square$$

ومن أجل جريان مستمر فإن:

$$q_{Eq.(8.30)} = q_{Eq.(8.31)}$$

أو بشكل آخر:

$$k \cdot z \frac{dz}{dx} = k \cdot L \cdot \tan \alpha \cdot \sin \alpha$$

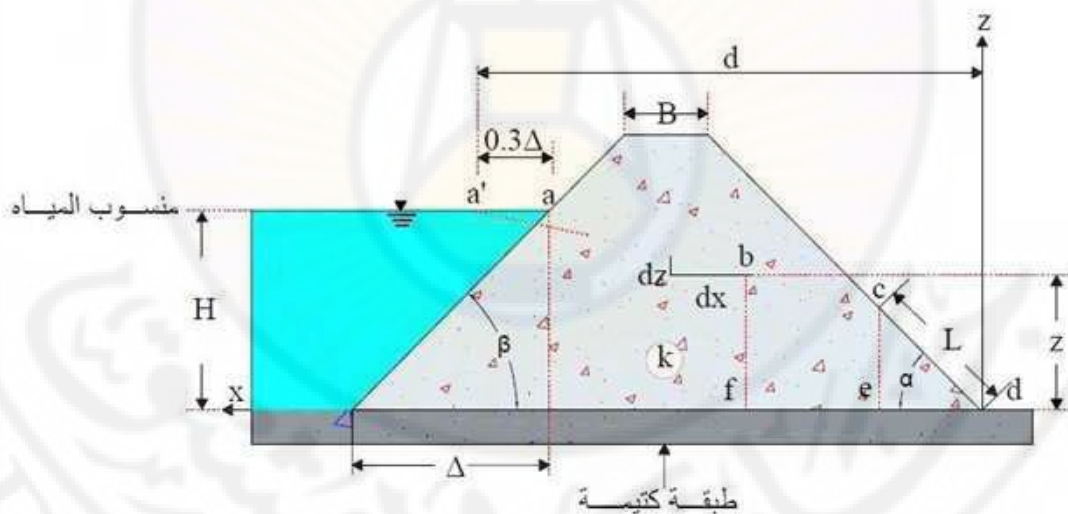
أو بالشكل:

$$\int_{z=L \sin \alpha}^{z=H} k \cdot z \cdot dz = \int_{x=L \cos \alpha}^{x=d} (k \cdot L \tan \alpha \cdot \sin \alpha) dx$$

$$\frac{1}{2} (H^2 - L^2 \sin^2 \alpha) = L \cdot \tan \alpha \cdot \sin \alpha (d - L \cdot \cos \alpha)$$

$$\frac{H^2}{2} - \frac{L^2 \sin^2 \alpha}{2} = L \cdot d \left(\frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) - L^2 \sin^2 \alpha$$

$$\frac{H^2 \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \sin^2 \alpha} - \frac{L^2 \cdot \cos \alpha}{2} = L \cdot d - L^2 \cdot \cos \alpha$$



الشكل 13-8: التسدق خلال سد ركامي يستند إلى تربة كتامة

الشكل (13.8): خط الجريان ضمن سد ركامي

وعليه فإن:

$$L^2 \cdot \cos \alpha - 2 \cdot L \cdot d + \frac{H^2 \cdot \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} = 0$$

وبالتالي نحصل على المعادلة:

$$L = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (32.8) \square$$

ونقدم فيما يلي الخطوات خطوة - خطوة لتحديد وحساب غزارة الرشح q (نسبة لواحدة الطول للسد):

- الخطوة 1: أوجد α .
 - الخطوة 2: احسب Δ (انظر الشكل 13.8) وبعدها 0.3Δ .
 - الخطوة 3: احسب d .
 - الخطوة 4: مع القيم المعلومة للمتغيرات α و d ، نستطيع حساب L من المعادلة (32.8).
 - الخطوة 5: مع القيم المعلومة للقيمة L ، نستطيع حساب الغزارة q من المعادلة (30.8).
- هذا الحل عادة يشار له بحل *Schaffernak* في العام 1917 مع تصحيح *Casagrande*، والتي أظهرت نتائجه المخبرية أن سطح القطع الناقص الحر يبدأ من a' وليس a . (الشكل 13.8).

□

المثال 5.8:

بالإشارة للسد الركامي المبين في الشكل (13.8) معطى لدينا التالي:

$$\beta = 45^\circ, \alpha = 30^\circ, B = 10 \text{ ft}, H = 20 \text{ ft}, \text{ ارتفاع السد} = 25 \text{ ft},$$

$$K = 2 \times 10^{-4} \text{ ft/min}$$

احسب غزارة الرشح q بالوحدة $\text{ft}^3/\text{day}/\text{ft}$.

الحل:

نعلم أن $\alpha = 30^\circ$ و $\beta = 45^\circ$ ، لذلك:

$$\Delta = \frac{H}{\tan \beta} = \frac{20}{\tan 45^\circ} = 20 \text{ ft}, 0.3\Delta = (0.3)(20) = 6 \text{ ft}$$

$$\begin{aligned} d &= 0.3\Delta + \frac{(25 - 20)}{\tan \beta} + B + \frac{25}{\tan \alpha} \\ &= 6 + \frac{(25 - 20)}{\tan 45^\circ} + 10 + \frac{25}{\tan 30^\circ} = 64.3 \text{ ft} \end{aligned}$$

ومن المعادلة (32.8):

$$\begin{aligned} L &= \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \\ L &= \frac{64.3}{\cos 30} - \sqrt{\left(\frac{64.3}{\cos 30}\right)^2 - \left(\frac{20}{\sin 30}\right)^2} = 11.7 \text{ ft} \end{aligned}$$

ومن المعادلة (30.8):

$$q = kL \tan \alpha \sin \alpha = (2 \times 10^{-4})(11.7)(\tan 30)(\sin 30)$$

$$q = 6.745 \times 10^{-4} \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} / \text{ft} = 0.973 \frac{\text{ft}^3}{\text{day}} / \text{ft}$$

8.8 حل L. Casagrande من أجل الرشح خلال جسم سد ترابي

المعادلة (32.8) مشتقة بناءً على افتراض Dupuit (مثال: $i \approx d_z/d_x$)، وأظهر كزاغراند (Casagrande) في العام (1932) أنه، عندما تصبح زاوية ميل الجانب السفلي α في الشكل 13.8 أكبر من 30° ، فإن الاشتقاق من افتراض Dupuit يصبح غير مقبول رياضياً، لذلك (انظر الشكل 13.8) اقترح السيد L. Casagrande في العام (1932) تعديل من خلال المعادلة التالية:

$$i = \frac{dz}{ds} = \sin \alpha \quad (33.8) \square$$

حيث:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dz^2} \square$$

لذلك يمكن تعديل المعادلة (30.8) كالتالي:

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \sin \alpha (L \cdot \sin \alpha) = k \cdot L \cdot \sin^2 \alpha \quad (34.8) \square$$

وأيضاً:

$$q = k \cdot i \cdot A = k \left(\frac{dz}{ds} \right) (1 \times z) \quad (35.8) \square$$

ویدمج المعادلات (34.8) مع (35.8) نحصل على المعادلة:

$$\int_{L \sin \alpha}^H z \cdot dz = \int_L^s \sin^2 \alpha \cdot ds \quad (39.8) \square$$

حيث s = طول المنحني a`bc.

$$\frac{1}{2} (H^2 - L^2 \cdot \sin^2 \alpha) = L \sin^2 \alpha \cdot (s - L) \square$$

أو:

$$L = s - \sqrt{s^2 - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (37.8)$$

ومع نسبة خطأ من 4 إلى 5 %، يمكن كتابة العلاقة التالية:

$$s = \sqrt{d^2 + H^2} \quad (38.8)$$

وبدمج المعادلات (37.8) و(38.8) نحصل على المعادلة التالية:

$$L = \sqrt{d^2 + H^2} - \sqrt{d^2 - H^2 \cdot \cot^2 \alpha} \quad (39.8)$$

وطالما قمنا بتحديد قيمة L ، فإن غزارة الرش يمكن حسابها من المعادلة (39.8):

$$q = k \cdot L \cdot \sin^2 \alpha$$

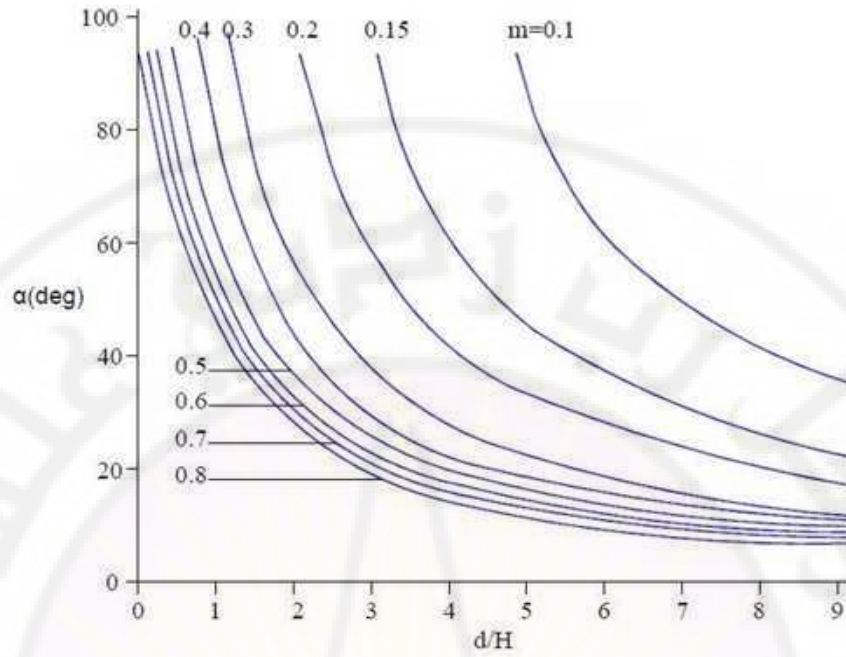
ولتجنب التقريب الموجود في المعادلة (38.8) و(39.8)، تم تقديم حل آخر من قبل Gilboy (1934). وهذا الحل مبين بشكل تخطيطي في الشكل 14.8. لاحظ، في هذا المخطط أن:

$$m = \frac{L \cdot \sin \alpha}{H} \quad (40.8)$$

ومن أجل استخدام الشكل لا بد من الخطوات التالية:

- الخطوة 1: نحدد القيمة d/H .
- الخطوة 2: من أجل d/H ، α معطاة نحدد القيمة m .
- الخطوة 3: احسب :
- الخطوة 4: احسب $k \cdot L \cdot \sin^2 \alpha$.

$$L = \frac{m \cdot H}{\sin \alpha}$$



الشكل 14-8 : مخطط لإيجاد قيمة L بطريقة كازاغراندي المعتمدة على حل جيبسوي

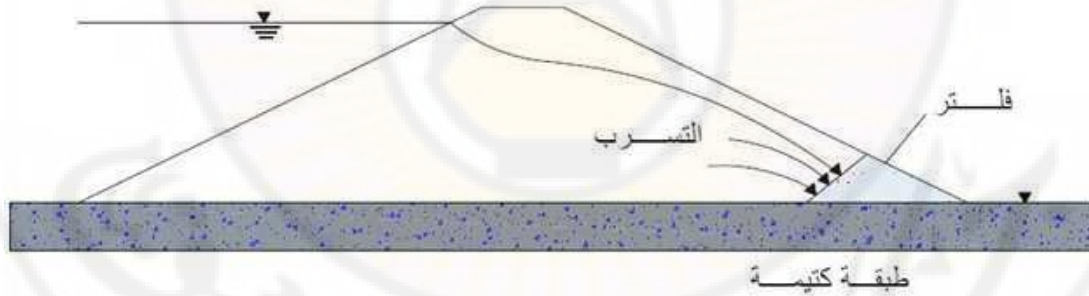
الشكل (14.8): مخططات الحل لنظرية L. Casagrande's بناءً على حل Gilboy

□

9.8 تصميم الفلتر

عندما يجري الماء الراشح من تربة ذات تدرج حبي ناعم نسبياً إلى تربة ذات تدرج حبي خشن، هناك خطر مهم جداً وهو إمكانية فقدان هذه النواعم وإنسحابها إلى المواد الخشنة. هذه الحادثة نسميها **الجرف الداخلي**. وخلال فترة من الزمن، ممكن لهذه العملية أن تسبب بإغلاق الفراغات فيما بين المواد الخشنة. لذلك، لا بد من دراسة توزع التدرج الحبي للمادة الخشنة بشكل جيد من أجل تجنب وقوع مثل هذه المشكلة والتي تسبب في كثير من الأحيان انهيار في جسم السد.

تسمى المواد الخشنة المصممة جيداً والتي تمنع تشكل هذه الظاهرة بالفلتر. الشكل (15.8) يظهر لنا ظروف الرشح بحالة الاستقرار خلال سد ترابي يحوي عند قدمه على الوجه الخلفي كعب من مواد خشنة وصممة جيداً تسمى الفلتر.



الشكل 15-8: حالة تسرب ثابت في سد ركامي مع وجود فلتر

الشكل (15.8): الرشح بحالة الاستقرار لسد ترابي مع وجود فلتر عند قدمه الخلفي

من أجل اختيار جيد لمواد الفلتر، يجب وضع الشرطين التاليين بعين الاعتبار:

- الشرط 1: حجم الفراغات في مواد الفلتر يجب أن تكون صغيرة كفاية لتجعل الحبيبات الأكبر للمادة الحامية في مكانها ومستقرة.

- الشرط 2: مادة الفلتر يجب أن تملك ناقلية هيدروليكية عالية لتمنع تشكل قوى رشح كبيرة وضغط هيدروستاتيكي في الفلتر.

تجريبياً، يمكن أن نبين وبحال كانت لدينا مثلاً ثلاث كرات كاملة لها قطر أكبر من 6.5 مرة لقطر أصغر كرة، يمكن أن تتحرك الكرة الأصغر خلال الفراغات المتشكلة ما بين الكرات الأكبر (الشكل 16.8 a).

عموماً، في تربة معطاة، إن حجم الحبيبات يتغير وضمن مجال واسع. وفي حال كانت المسامات في مادة الفلتر صغيرة بشكل كافٍ لتمسك حبيبات D_{85} للتربة الواجب حمايتها، فإن الحبيبات الناعمة للتربة سوف يتم حمايتها أيضاً (الشكل 16.8 b). هذه يعني أن القطر الفعال للمسامات في مادة الفلتر يجب أن يكون أقل من $\frac{1}{5} D_{15}$.

وبأخذ هذا بالحسبان وبناءً على التحريات المخبرية للفلتر، قدم الباحثان Terzaghi and Peck في العام (1948) المعيار التالي لتحقيق الشرط 1:

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}} \leq 4 \text{ to } 5 \quad (\text{to satisfy condition 1}) \quad (41.8) \square$$

ولتحقيق الشرط 2، اقترح أن تكون لدينا:

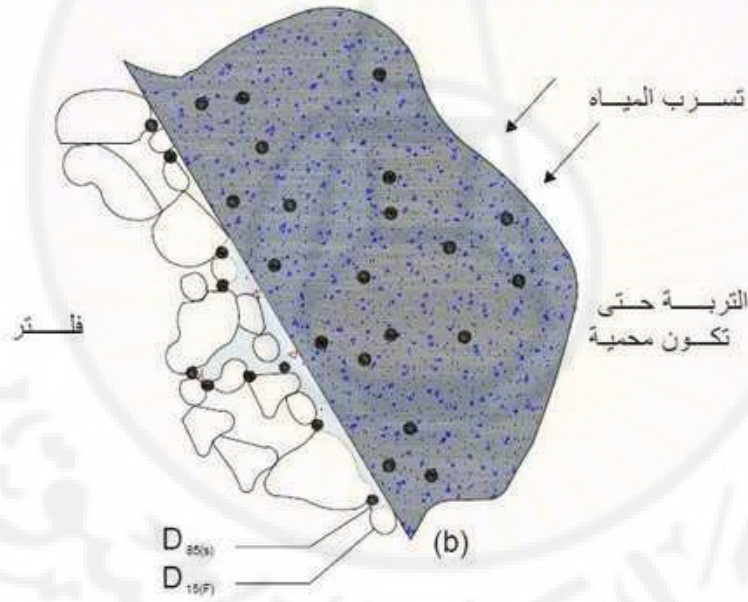
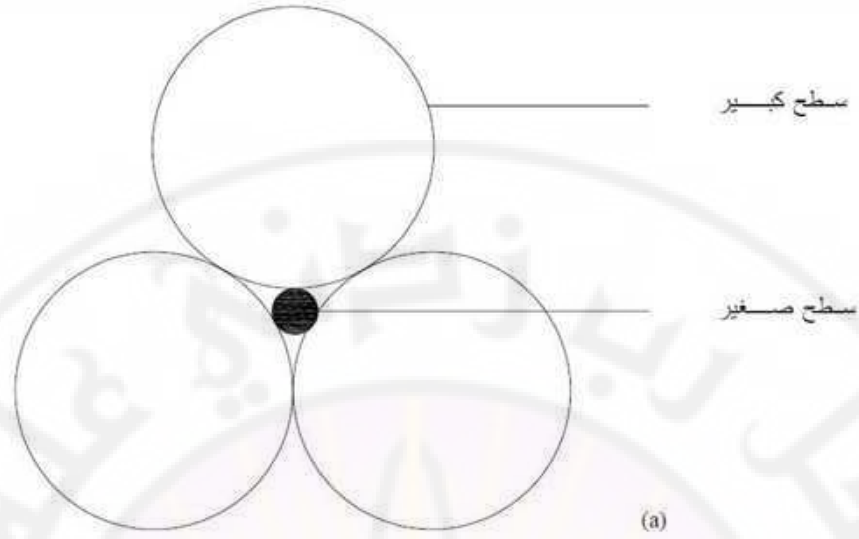
$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \geq 4 \text{ to } 5 \quad (\text{to satisfy condition 2}) \quad (42.8) \square$$

حيث: $D_{15(F)}$ = القطر الذي يمرر 15% من مواد الفلتر.

$D_{15(S)}$ = القطر الذي يمرر 15% من مواد التربة المراد حمايتها.

$D_{85(S)}$ = القطر الذي يمرر 85% من مواد التربة المراد حمايتها.

الاستخدام الأمثل للمعادلات (41.8) و (42.8) لتحديد توزيع التدرج الحبي للتراب المستخدمة كفلتر مبين في الشكل (17.8).

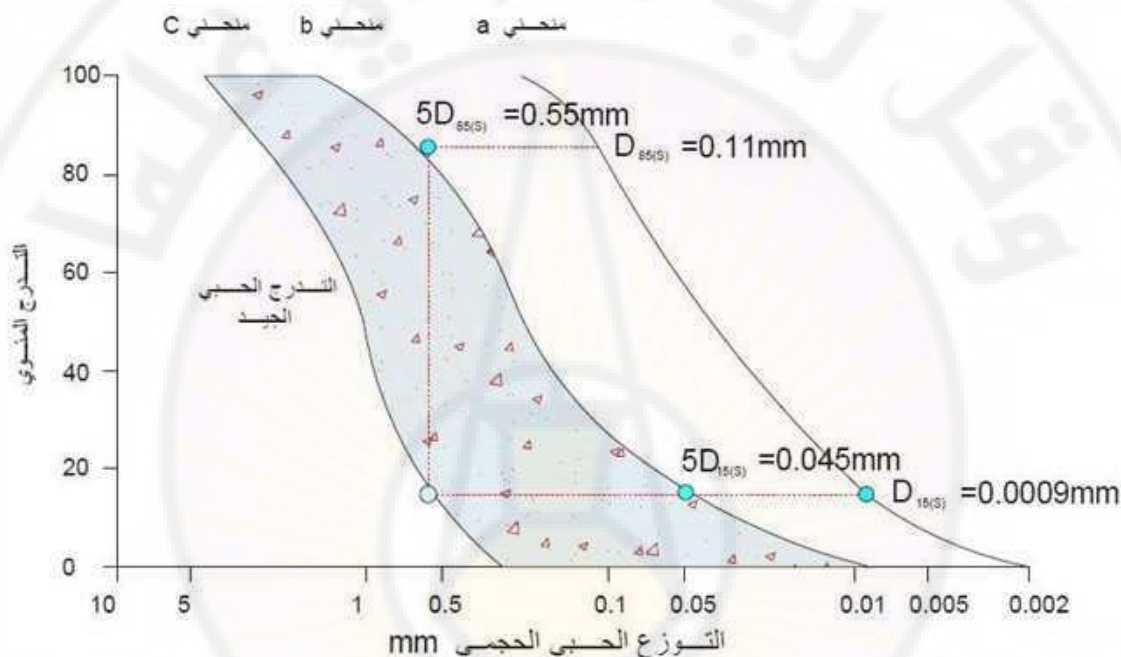


الشكل 16-8 : a سطح كبير بقطر أكبر ب 6.5 مرة من قطر السطح الصغير
b الحدود بين الفلتر و التربة حتى تكون محمية

الشكل (16.8): (a) الكرات الأكبر ب 6.5 مرة من قطر أصغر كرة (b) الحد بين الفلتر والتربة اللازم حمايتها

□

ومع اعتبار التربة المستخدمة لبناء السد المبين في الشكل (15.8). وليكون منحنى التدرج الحبي لهذه التربة ممثل بالمنحنى a في الشكل (17.8). يمكن تحديد $5D_{85(S)}$ و $5D_{15(S)}$ ورسمهم كما في الشكل (17.8). يجب لمنحنى التدرج الحبي لمادة الفلتر المقبول أن يتوضع ضمن المنطقة المظللة (ملاحظة: شكل المنحنيات b و c هي تقريباً نفسها للمنحنى a).



الشكل 17-8 : تحديد التوزيع الحبي للفلتر

الشكل (17.8): تحديد منحنى التدرج الحبي للفلتر باستخدام المعادلات (41.8) و (42.8)

من جهة أخرى، تتطلب الشروط الأمريكية (U.S. Navy 1971) من أجل تصميم الفلاتر تحقيق مجموعة من الشروط وهي:

- **الشرط 1:** لتجنب حركة الحبيبات للتربة المراد حمايتها، يجب أن يتحقق ما يلي:

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}} < 5$$

$$\frac{D_{50(F)}}{D_{50(S)}} < 25$$

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} < 20\%$$

في حال كان معامل التجانس C_u للتربة المحمية أقل من 1.5، وبالتالي يمكن أن تزداد $D_{15(F)}/D_{85(S)}$ إلى 6. أيضاً في حال كانت C_u للتربة المحمية أكبر من 4، $D_{15(F)}/D_{15(S)}$ يمكن أن تزداد إلى 40.

- **الشرط 2:** من أجل تجنب تشكل قوى رشح كبيرة في الفلتر:

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} < 4\%$$

- **الشرط 3:** مواد الفلتر يجب أن لا تحوي تدرج حبي أكبر من 76.2 mm (3 in). (وهذا الشرط لتجنب فصل الحبيبات في الفلتر).

- **الشرط 4:** لتجنب الحركة الداخلية للنوع في الفلتر، يجب أن لا يحوي الفلتر على أكثر من 5% مار من المنخل رقم 200.

- **الشرط 5:** عندما يتم استخدام أنابيب مثقبة من أجل جمع الماء الراشح، يتم استخدام الفلاتر حول الأنابيب لحماية المواد الناعمة من حركتها إلى الأنابيب. ولتجنب حركة مادة الفلتر إلى أنبوب التصريف المثقب، يجب تحقيق الشروط الإضافية التالية:

$$\frac{D_{85(F)}}{\text{slot width}} > 1.2 \text{ to } 1.4\%$$

$$\frac{D_{85(F)}}{\text{hole diameter}} > 1.0 \text{ to } 1.2\%$$

□

10.8 ملخص

في هذا الفصل، تم دراسة معادلة لابلاس للاستمرارية وتطبيقاتها في حل المسائل المتعلقة بحسابات الرشح. إن معادلة الاستمرارية هي القاعدة الأساسية لمفهوم رسم شبكات الجريان.

إن شبكات الجريان هي أدوات قوية في حساب الرشح كما في حساب ضغط الرفع تحت قواعد مختلف المنشآت الهيدروليكية.

كما تم في هذا الفصل مناقشة عملية حساب الرشح خلال جسم سد ترابي منشأ على قاعدة كتيمة. ومن جهة أخرى، تم عرض علاقة الرشح بناءً على افتراض *Dupuit* والذي اعتبر أن التدرج الهيدروليكي ثابت مع العمق.

الفصل تطرق أيضاً إلى عملية مطولة (حل *L. Casagrande's*) من أجل حساب الرشح. وعرضنا أيضاً مبادئ تصميم فلتر حماية المنشآت المائية.

□

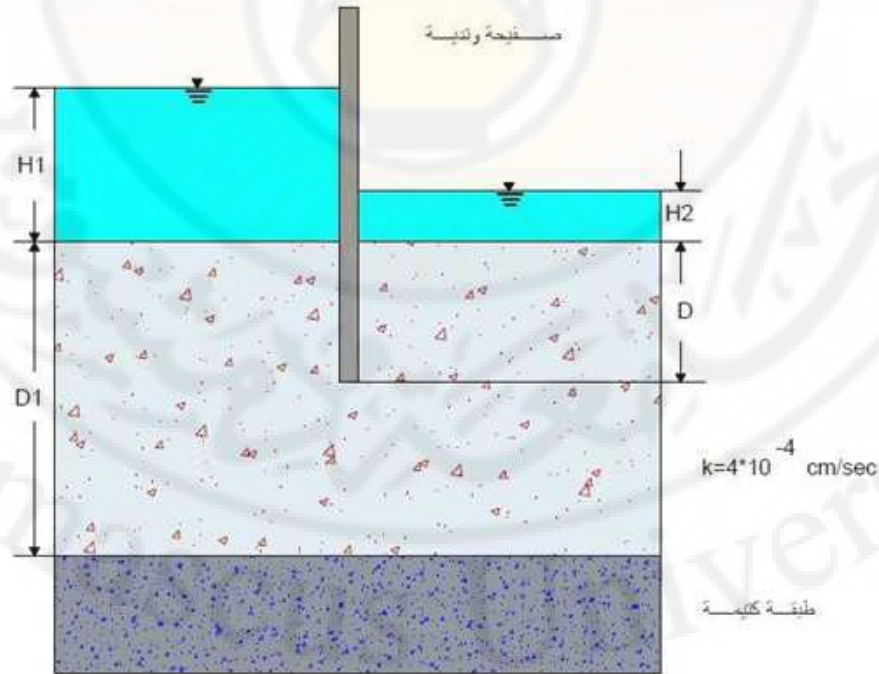
11.8 الأمثلة غير المحلولة

1. بالإشارة لتجربة النفاذية بطريقة الضاغط الثابت في طبقتي التربة كما هو مبين في الشكل 2.8. وخلال التجربة، تم ملاحظة أنه عندما ثبت الضاغط h_1 عند القيمة: $h_1 = 200 \text{ mm}$ فإن قيمة الضاغط h_2 كانت 80 mm . وإذا كانت $k_1 = 0.004 \text{ cm/sec}$ ، والمطلوب تحديد قيمة k_2 ومعطى لدينا: $H_1 = 100 \text{ mm}$, $H_2 = 150 \text{ mm}$.

2. بالإشارة للشكل 18.8 ، وبفرض المعطيات التالية:

- $H_1 = 6 \text{ m}$
- $H_2 = 1.5 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $D_1 = 6 \text{ m}$

المطلوب : ارسم شبكة الجريان، واحسب فاقد الرشح لواحدة الطول للستارة الوتدية (عند زاوية مناسبة للمقطع العرضي المبين).



الشكل 18-8

الشكل (18.8): معطيات المسألة

3. ارسم شبكة الجريان لصف واحد من الستائر الوتدية المدقوقة في طبقة تربة نفوذة كما هو مبين في الشكل 18.8 . بفرض لدينا المعطيات التالية:

$$\begin{aligned} H_1 &= 3 \text{ m} \\ H_2 &= 0.5 \text{ m} \\ D &= 1.5 \text{ m} \\ D_1 &= 3.75 \text{ m} \end{aligned}$$

والمطلوب : احسب فاقد الرشح لواحدة الطول للستارة الوتدية (عند زاوية مناسبة للمقطع العرضي الموضح).

4. بالإشارة للشكل 18.8 . بفرض لدينا المعطيات التالية:

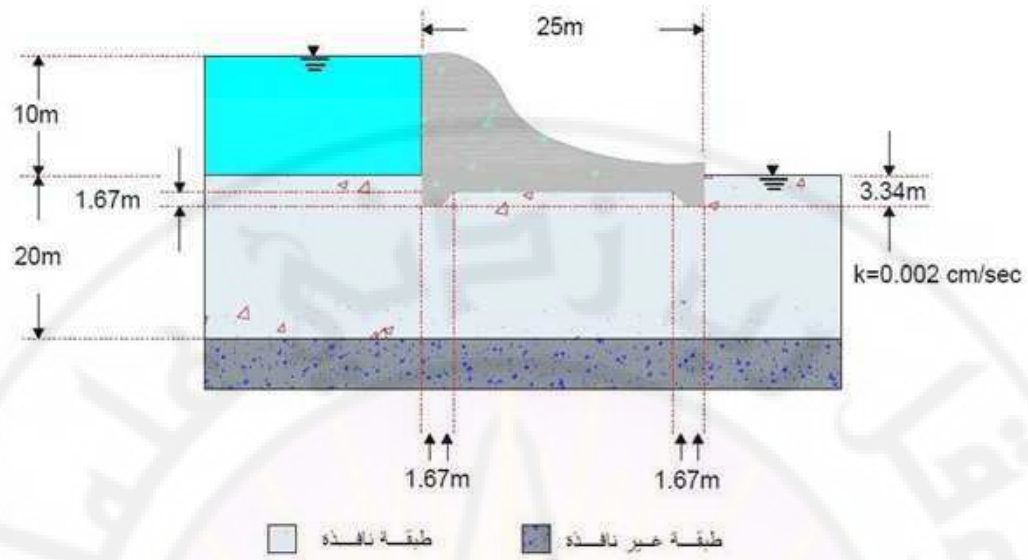
$$\begin{aligned} H_1 &= 4 \text{ m} \\ H_2 &= 1.5 \text{ m} \\ D &= 3.6 \text{ m} \\ D_1 &= 6 \text{ m} \end{aligned}$$

احسب فاقد الرشح بالوحدة m^3/day لكل متر طولي للستارة الوتدية (عند زاوية مناسبة للمقطع العرضي الموضح).

5. من أجل المنشأة الهيدروليكية المبينة في الشكل 19.8، ارسم شبكة جريان الماء خلال طبقة التربة النفوذة واحسب فاقد الرشح بالوحدة $m^3/day/m$.

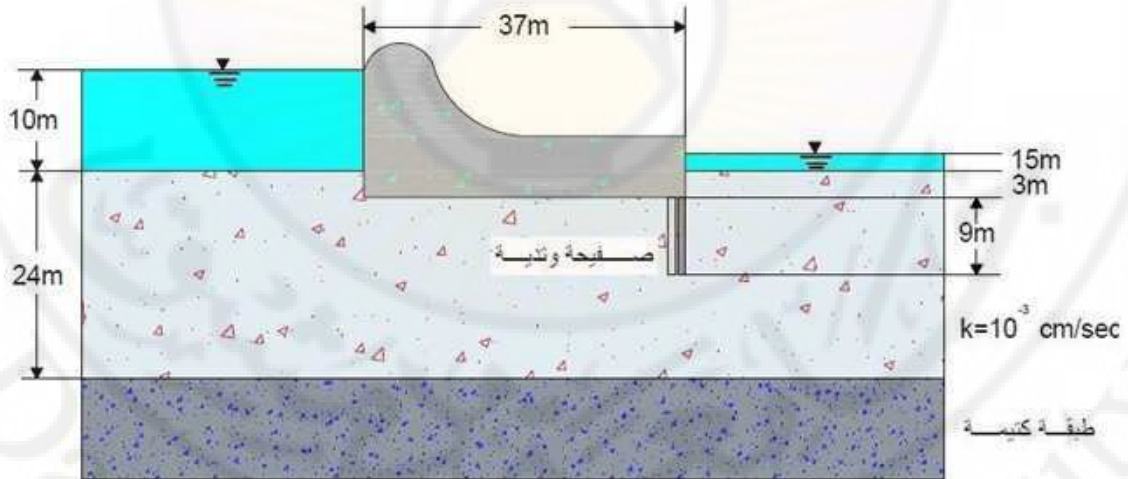
6. بالإشارة للمسألة 5 وباستخدام شبكة الجريان المرسومة، احسب قوى الرفع الهيدروليكية عند قاعدة المنشأة الهيدروليكية لكل متر طولي (مقاسة على طول محور المنشأة).

7. ارسم شبكة الجريان للهدار الموضح بالشكل 20.8. واحسب غزارة الرشح تحت الهدار.



الشكل 19-8

الشكل (19.8)



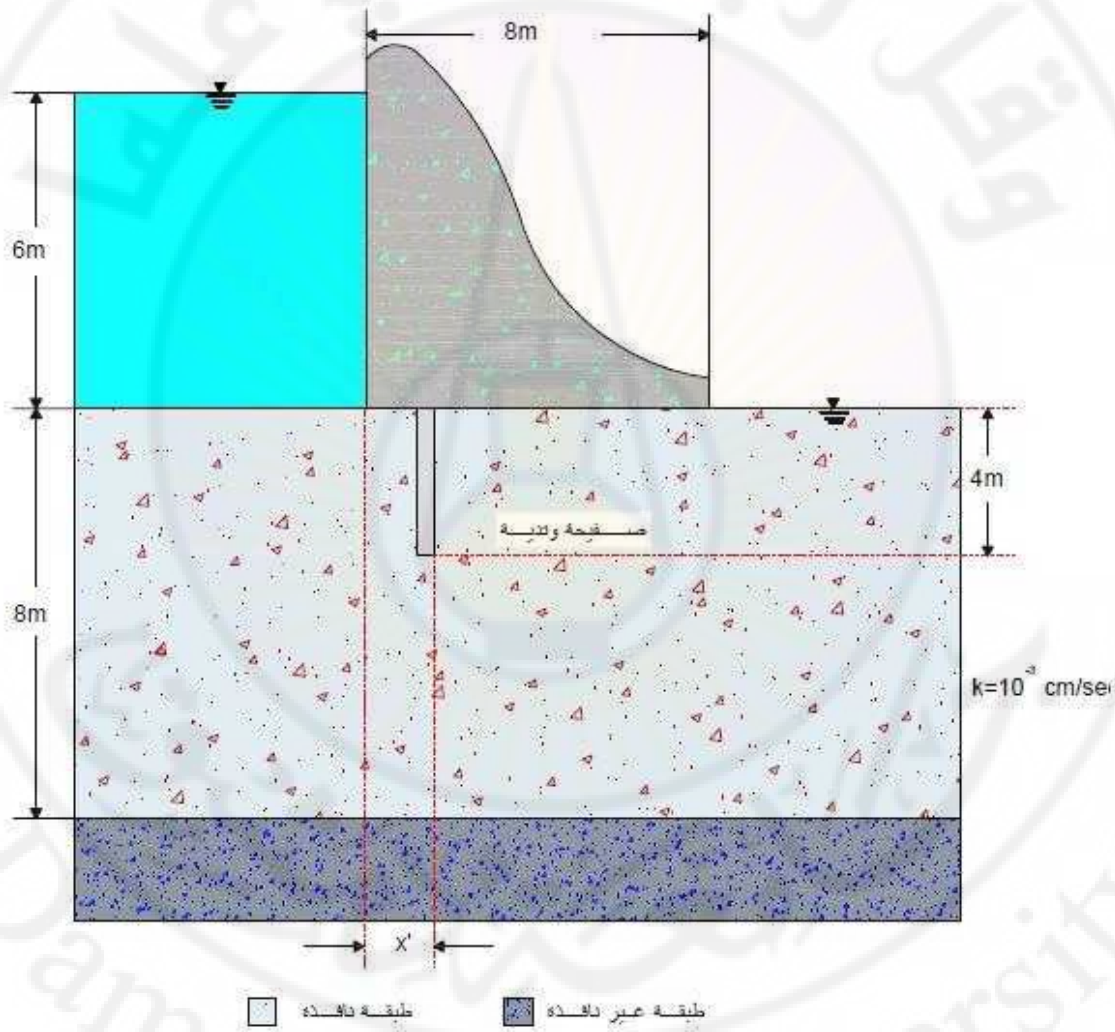
الشكل 20-8

الشكل (20.8): معطيات المسألة

8. من أجل الهدار الموضح في الشكل 21.8، احسب الرشح في طبقة التربة النفوذة بالوحدة $m^3/day/m$ من أجل الحالتين:

(a) $x' = 1 m$

(b) $x' = 2 m$



الشكل 21-8

الشكل (21.8): معطيات المسألة

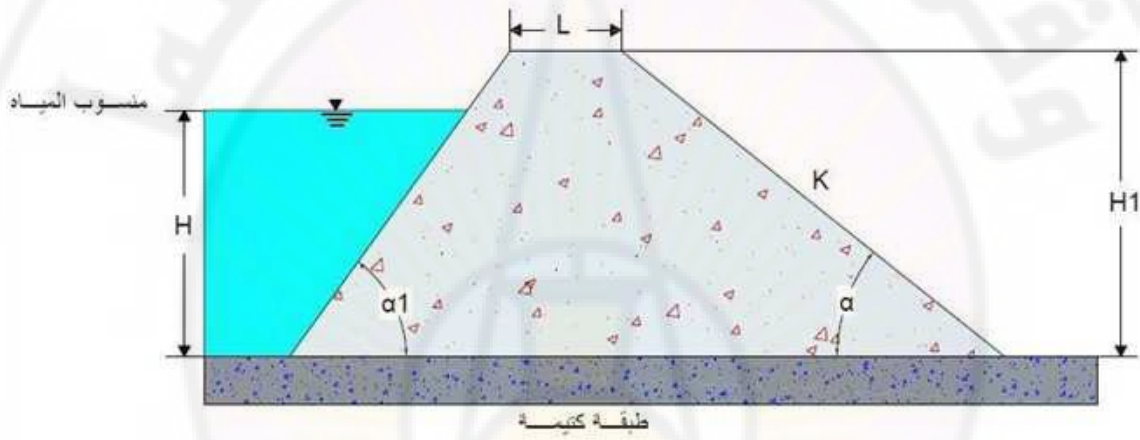
9. للسد الترابي المبين في الشكل 22.8. حدد غزارة الرشح q بالوحدة $m^3/day/m$. معطى لدينا:

$$\alpha_1 = 35^\circ, \alpha_2 = 40^\circ, L_1 = 5m, H = 7m, H_1 = 10m, \square$$

$$.k = 3 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

استخدم حل Schaffernak.

10. أعد حل المسألة 9 باستخدام طريقة L. Casagrande.



الشكل 22-8

الشكل (22.8)

□

12.8 المراجع

1. CASAGRANDE, L. (1932). "Naeherungs method en zur Bestimmung von Art und Menge der Sickerung durch geschuettete Daemme," Thesis, Technische Hochschule, Vienna.
2. DUPUIT, J. (1863). Etudes Theoriques et Practiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Decouverts et a Travers les Terrains Permeables, Dunod, Paris.
3. GILBOY, G. (1934). "Mechanics of Hydraulic Fill Dams," in Contributions to Soil Mechanics 1925–1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston.
4. HARR, M. E. (1962). Ground Water and Seepage, McGraw-Hill, New York.
5. SCHAFFERNAK, F. (1917). "ber die Standicherheit durchlaessiger geschuetteter Dümme," Allgem. Bauzeitung.
6. TERZAGHI, K., and PECK, R. B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York.
7. U.S. DEPARTMENT OF THE NAVY, Naval Facilities Engineering Command (1971). "Design Manual—Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures," NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

9 الفصل التاسع: الإجهادات في التربة

(ناتجة عن الوزن الذاتي للتربة)

في الفصل الثالث، وجدنا أن التربة تتشكل من عدة أطوار. ولحجم معطى للتربة، تتوزع حبيباتها بشكل عشوائي مشكلة فراغات فيما بينها. ومن بين هذه الفراغات هناك إمكانية لحالة وجود فراغات مستمرة ومملوءة بالماء و/أو الهواء. ضمن هذه الشروط وتحليل المسائل المتعلقة بسلوك التربة مثل الانضغاطية، قدرة التحمل للتربة، استقرار المنحدرات، والضغط الجانبي على المنشآت الأرضية الساندة، لا بد من معرفة طبيعة توزع الإجهاد على طول المقطع العرضي المعطى لتوضعات التربة. ولدراسة هذه المواضيع نفترض أن التربة مشبعة وبدون رشح.

1.9 الإجهادات في الترب المشبعة وبحالة عدم وجود رشح ضمن التربة

لو نظرنا إلى الشكل (1.9) الذي يظهر لنا عمود من كتلة تربة مشبعة وبدون رشح للماء في أي اتجاه. ضمن هذه الفرضيات يمكننا أن نحدد الإجهاد الكلي عند أي نقطة واقعة على عمق z بالنسبة لسطح الأرض كالنقطة A مثلاً وعمقها H_A والناتج عن الوزن الذاتي للتربة فوق هذه النقطة من خلال معرفة الوزن الحجمي المشبع للتربة والوزن الحجمي للماء فوقها، وبعبارة أخرى يمكننا أن نكتب:

$$\sigma = H \cdot \gamma_w + (H_A - H) \cdot \gamma_{sat} \quad (1.9)$$

حيث:

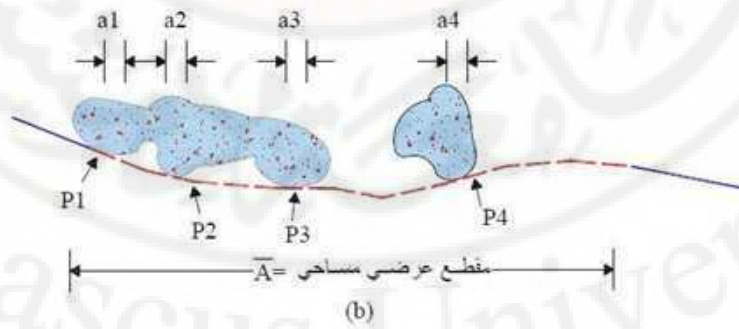
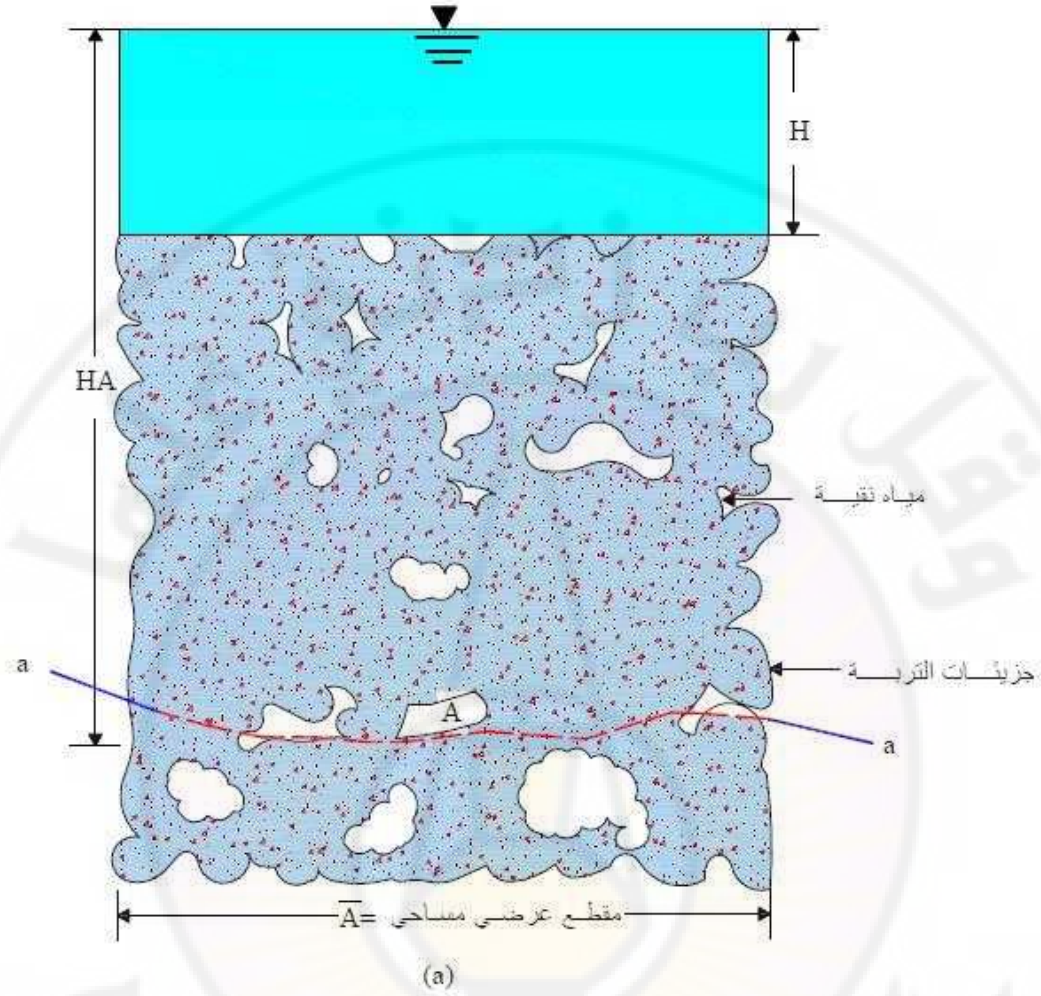
σ = الإجهاد الكلي عند منسوب النقطة A .

γ_w = الوزن الحجمي للماء.

γ_{sat} = الوزن الحجمي المشبع للتربة.

H = ارتفاع منسوب الماء من أعلى عمود التربة.

H_A = المسافة بين النقطة A و منسوب الماء.



الشكل 1-9: a الضغط الفعال لعمود من التربة المشبعة بدون تسرب
b القوى المؤثرة في نقاط الاتصال من جسيمات التربة في مستوى النقطة A

الشكل (1.9): (a) الإجهادات الفعالة من أجل عمود تربة مشبعة بدون رشح،

(b) القوى المطبقة بين اتصال حبيبات التربة الصلبة عند النقطة A

الإجهاد الكلي σ المعطى بالعلاقة (1.9) يمكن أن يقسم إلى قسمين:

1. قسم يسببه الماء الموجود ضمن الفراغات المستمرة. هذا القسم يؤثر بقيمة متساوية وبكل الاتجاهات ويكون عمودي على السطح. وهذا ما نسميه **بضغط الماء المسامي**.
2. القسم الثاني وهو الجزء الباقي من الإجهاد الكلي وتسببه قوى الاحتكاك ما بين الجزيئات الصلبة للتربة عند نقاط اتصالها. مجموع المركبات الشاقولية للقوى الناشئة عند نقاط الاتصال للجزيئات الصلبة لوأحدة مساحة المقطع العرضي لكتلة التربة تسمى بالإجهادات **الفعالة**.

يمكن أن نرى هذا في الشكل (1.9)، من خلال رسم خط موجي، $a-a$ مار من خلال النقطة A وكذلك يمر من خلال نقاط الاتصال ما بين الجزيئات الصلبة فقط. ولتكن $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ القوى التي تؤثر عند نقاط الاتصال للجزيئات الصلبة للتربة (الشكل 1.9 b). مجموع مركبات كل القوى الشاقولية لوأحدة مساحة المقطع العرضي هو ما نعبّر عنه بالإجهاد الفعال σ' ، ونكتب ذلك رياضياً بالمعادلة:

$$\sigma' = \frac{P_{1(v)} + P_{2(v)} + P_{3(v)} + \dots + P_{n(v)}}{\bar{A}} \quad (2.9) \square$$

حيث $P_{1(v)}, P_{2(v)}, P_{3(v)}, \dots, P_{n(v)}$ هي المركبات الشاقولية لـ $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ على التوالي، و $\bar{A}$ هي مساحة المقطع العرضي لكتلة التربة المعتبرة. أيضاً، في حال كانت a_s تمثل مساحة المقطع العرضي الناتج من مجموع مساحات الاتصال ما بين الأجزاء الصلبة للتربة فيما بينها والتي هي $(a_s = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n)$ ، عندها ستكون مساحة الفراغات المشغولة أو المملوءة بالماء تساوي $(\bar{A} - a_s)$. لذلك يمكن كتابة المعادلة:

$$\sigma = \sigma' + \frac{u(\bar{A} - a_s)}{\bar{A}} = \sigma' + u(1 - a'_s) \quad (3.9)$$

حيث:

- $u = H_A \cdot \gamma_w$ = ضغط الماء المسامي (والذي يمثل الضغط الهيدروستاتيكي عند النقطة A).

• $a'_s = a_s / \bar{A}$ = جزء واحدة المساحة للمقطع العرضي لكتلة التربة والناتجة من اتصال

سطوح التماس ما بين الأجزاء الصلبة للتربة مع بعضها البعض.

إن قيمة a'_s صغيرة جداً ويمكن إهمالها من أجل مجالات الضغوط التي نواجهها في المسائل العملية. لذلك المعادلة (3.9) يمكن تقريبها إلى المعادلة:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (4.9)$$

حيث u يشار لها أيضاً بالاجهاد الحيادي. وبتعويض المعادلة (1.9) من أجل σ في المعادلة (4.9) نجد المعادلة:

$$\begin{aligned} \sigma' &= [H \cdot \gamma_w + (H_A - H) \gamma_{sat}] - H_A \gamma_w & \square \\ \sigma' &= (H_A - H) (\gamma_{sat} - \gamma_w) & \square \\ \sigma' &= (\text{Height of the soil column}) \times \gamma' & (5.9) \end{aligned}$$

حيث أن القيمة: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ تساوي إلى الوزن الحجمي المغمور للتربة، لذلك، يمكن أن نرى أنه عند أي نقطة A فإن الإجهادات الفعالة مستقلة عن عمق الماء H أعلى التربة المغمورة. الشكل (2.9 b) يظهر لنا طبقة من تربة مغمورة في خزان حيث لا يوجد رشح. قمنا وفي الأشكال من (2.9 b) وحتى (2.9 d) برسم مخطط لتغير الإجهادات الكلية، ضغط الماء المسامي والإجهادات الفعالة على التوالي، مع العمق لطبقة التربة المغمورة والموضوعة في خزان ولكن بدون رشح ضمن جسم التربة (أي لا يوجد أي خروج للماء خارج الخزان).

إن مبدأ الإجهادات الفعالة المبين في المعادلة (4.9) تم تطويرها بشكل مبني من قبل ترزاكي Terzaghi، (1925- 1936). ثم وسع الباحث Skempton في العام (1960) عمل ترزاكي وقدم علاقة بين الإجهادات الفعالة والفعالية كما هو مبين سابقاً في المعادلة (3.9).

نلخص ما سبق بالقول، أن الإجهاد الفعال هو تقريباً القوة لواحدة المساحة الآتية من هيكل التربة. هذه الإجهادات الفعالة في كتلة التربة تتحكم بسلوكها وتؤثر على قيم التغير الحجمي لها، ومقاومتها. وزيادة قيم الإجهادات الفعالة في كتلة التربة يؤدي إلى تحرك جزيئات التربة الصلبة لتعطي حالة كثافة وارتصاص أكبر.

إن مبدأ الإجهادات الفعالة هو تقريباً أهم مفهوم بالهندسة الجيوتكنيكية، ودراسة ظاهرة الانضغاطية ومقاومة القص لتربة تعتمد بشكل كبير على هذا المبدأ. لذلك، يعتبر مبدأ الإجهادات الفعالة هام

في حل مسائل الهندسة الجيوتكنيكية، مثل ضغط التربة الجانبي على المنشآت الساندة، قدرة تحمل التربة، هبوط الأساسات واستقرار المنحدرات الأرضية.

في المعادلة (2.9)، الإجهادات الفعالة σ' ، تعرف بأنها مجموع المركبات الشاقولية لكل قوى الاتصال الداخلية بين الجزيئات الصلبة للتربة على مساحة مقطع عرضي واحد. هذا التعريف هو أكثر صحة من أجل الترب الحبيبية. على كل حال، ومن أجل الترب الحبيبية الناعمة، الاتصال الداخلي بين الحبيبات قد لا يكون فيزيائياً موجود، لأن حبيبات الغضار مثلاً محاطة بشريط مائي ضيق ومحكم. وبمعنى آخر، المعادلة (3.9) يمكن إعادة كتابتها بالنسبة للغضار كالتالي:

$$\sigma = \sigma_{ig} + u(1 - a'_s) - A' + R' \quad (6.9)$$

حيث:

σ_{ig} = الإجهادات بين الحبيبات الداخلية.

A' = قوى التجاذب الالكتروني نسبة لواحدة المقطع العرضي للتربة.

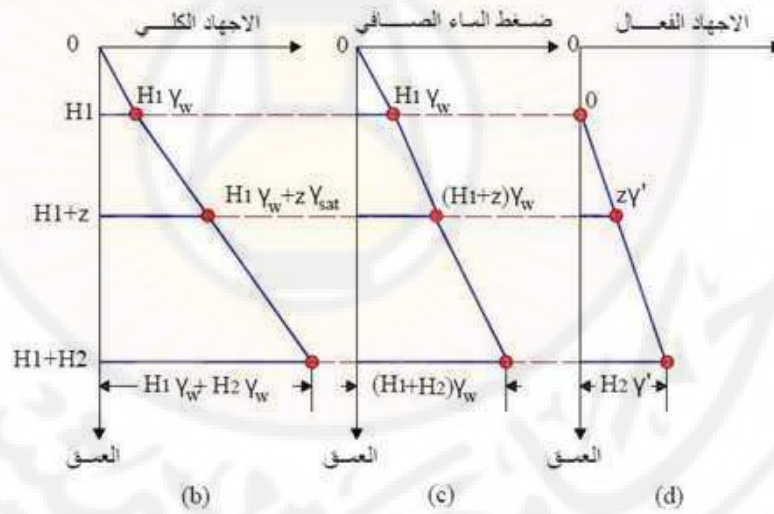
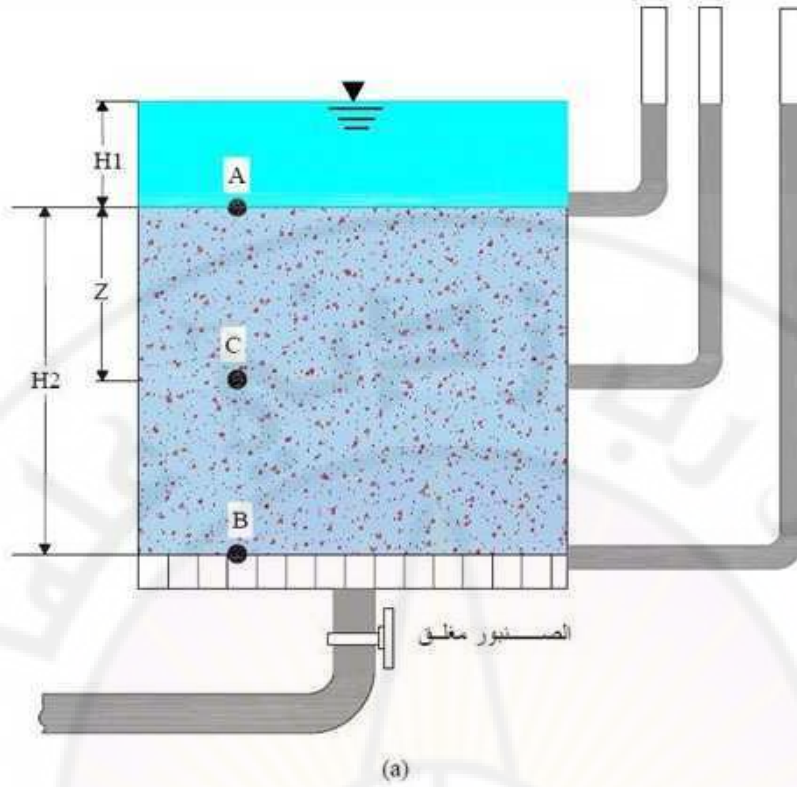
R' = قوى التنافر الالكتروني نسبة لواحدة المقطع العرضي للتربة.

من أجل الترب الحبيبية الناعمة، مثل السلت، والغضار منخفض اللدونة، تكون قيمة A' و R' صغيرة، لذلك ومن أجل أغراض عملية في الحياة الهندسية يمكننا القول أن:

$$\sigma_{ig} = \sigma' = \sigma - u$$

لكن، إذا كانت $A' - R'$ كبيرة، عندها سيكون $\sigma_{ig} \neq \sigma'$ ، ومثل هذه الحالات يمكن مصادفتها في الترب الغضارية المترسبة العالية اللدونة.

تم تقديم العديد من التفسيرات في الماضي للتمييز بين الإجهادات الفعالة والأجهادات بين الحبيبات الداخلية. ولكن وبشكل عام يبقى مبدأ الإجهادات الفعالة هو تقريب ممتاز في حل المسائل الهندسية.



الشكل 2-9 : a) طبقة من التربة الموجودة في خزان بحيث لا يوجد تسرب

b) الاجهاد الكلي مع العمق لطبقة من التربة المغمورة بالماء بدون تسرب

c) ضغط الماء الصافي مع العمق لطبقة من التربة المغمورة بالماء بدون تسرب

d) الاجهاد الفعال مع العمق لطبقة من التربة المغمورة بالماء بدون تسرب

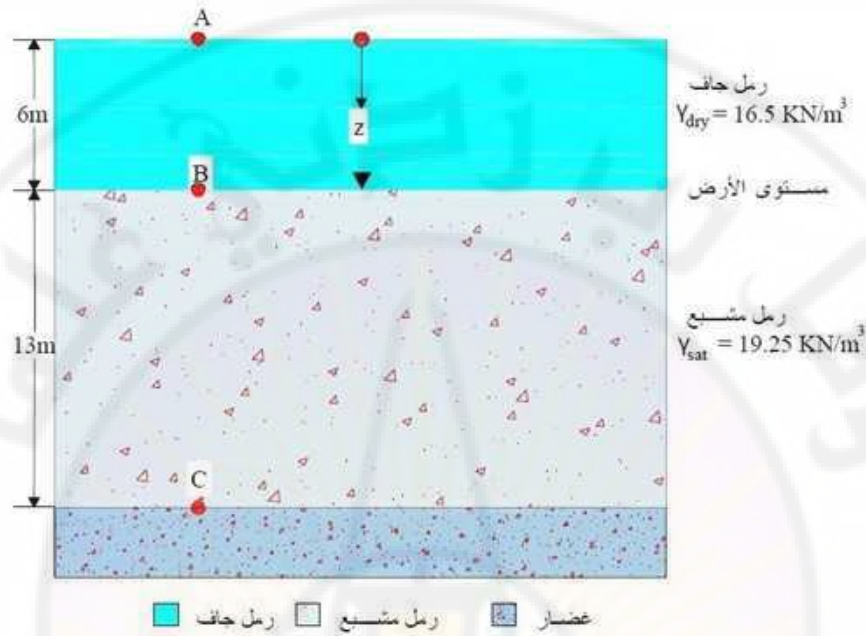
الشكل (2.9): (a) طبقة التربة في الخزان بدون رشح، (b) تغير الإجهادات الكلية، (c) ضغط الماء

المسامي، (d) الإجهاد الفعال مع العمق من أجل تربة مغمورة بدون رشح.

□

المثال 1.9:

لدينا مقطع تربة مبين بالشكل (3.9). والمطلوب حساب الإجهادات الكلية، ضغط الماء المسامي، الإجهادات الفعالة عند النقاط A، B، C.



3-9 : مقطع في التربة

الشكل (3.9): مقطع التربة

الحل:

عند النقطة A:

$$\begin{aligned}\sigma_A &= 0 \text{ الضغط الكلي} \\ u_A &= 0 \text{ ضغط الماء المسامي} \\ \sigma'_A &= 0 \text{ الضغط الفعال}\end{aligned}$$

عند النقطة B:

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 6\gamma_{dry}(\text{للرمل}) = 6 \times 16.5 = 99 \text{ kN/m}^2 \\ u_B &= 0 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_B &= 99 - 0 = 99 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

عند النقطة C:

$$\begin{aligned}\sigma_C &= 6\gamma_{dry}(\text{للرمل}) + 13\gamma_{sat}(\text{للغضار}) = 6 \times 16.5 + 13 \times 19.25 \\ &= 349.25 \text{ kN/m}^2 \\ u_C &= 13\gamma_w = 13 \times 9.81 = 127.53 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_C &= 349.25 - 127.53 = 221.72 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

2.9 الإجهادات في الترب المشبعة ولكن مع وجود إمكانية لرشح الماء

ضمن كتلة التربة نحو الأعلى

عندما يرشح الماء ضمن كتلة التربة، سوف تتغير الإجهادات الفعالة عند أي نقطة من نقاطها عما هو عليه في حالة الاستقرار. هذا التغير سيكون بالازدياد أو النقصان بناءً على اتجاه الرشح الحالي للماء ضمن كتلة التربة.

الشكل (4.9 a) يظهر لنا طبقة لتربة حبيبية في خزان، مع إمكانية وجود رشح للماء نحو الأعلى خلال هذه الطبقة. هذا الرشح مؤمن من خلال إضافة الماء عبر سكر موجود عند أسفل الخزان بحيث تبقى غزارة الماء التي تزود الخزان ثابتة. إن الفاقد في الضاغط لمناسيب الماء في الأنابيب البيزومترية ما بين النقاط A و B والمتشكل نتيجة رشح الماء للأعلى هو h . إذا أخذنا بعين الاعتبار أن الإجهادات الكلية عند أي نقطة في كتلة التربة هي فقط بسبب الوزن الذاتي للتربة ووزن الماء فوقها، يمكننا إيجاد الإجهادات الفعالة عند النقاط A، B كالتالي:

عند النقطة A:

الإجهاد الكلي	$\sigma_A = H_1 \cdot \gamma_w$
ضغط الماء المسامي	$u_A = H_1 \cdot \gamma_w$
الإجهاد الفعال	$\sigma'_A = \sigma_A - u_A$

عند النقطة B:

الإجهاد الكلي	$\sigma_B = H_1 \cdot \gamma_w + H_2 \cdot \gamma_{sat}$
ضغط الماء المسامي	$u_B = (H_1 + H_2 + h) \cdot \gamma_w$
الإجهاد الفعال	$\sigma'_A = \sigma_B - u_B = H_2(\gamma_{sat} - \gamma_w) - h \cdot \gamma_w$ $= H_2 \cdot \gamma' - h \cdot \gamma_w$

وبشكل مشابه، فإن الإجهادات الفعالة عند النقطة C المتوضعة عند العمق z أسفل سطح التربة يمكن حسابه كالتالي:

عند النقطة C:

الإجهاد الكلي	$\sigma_C = H_1 \cdot \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}$
ضغط الماء المسامي	$u_C = (H_1 + z + \frac{h}{H_2} z) \cdot \gamma_w$
الإجهاد الفعال	$\sigma'_C = \sigma_C - u_C = z(\gamma_{sat} - \gamma_w) - \frac{h}{H_2} z \cdot \gamma_w = z \cdot \gamma' - \frac{h}{H_2} z \cdot \gamma_w$

لاحظ أن h/H_2 هي التدرج الهيدروليكي i الناتج عن الجريان ولذلك يمكننا كتابة المعادلة:

$$\sigma'_c = z \cdot \gamma' - i \cdot z \cdot \gamma_w \quad (7.9)$$

إن تغير الإجهادات الكلية، ضغط الماء المسامي، والإجهادات الفعالة مع العمق مرسومة في الأشكال (b 4.9) وحتى (d 4.9) على التوالي.

من خلال المقارنة ما بين الشكل (d 2.9) و (d 4.9) نلاحظ أن قيمة الإجهادات الفعالة عند النقطة المتوضعة على العمق Z والمقاسة من سطح طبقة التربة تتناقص مع تغير قيمة $i \cdot z \cdot \gamma_w$ بسبب رشح الماء للأعلى.

ولكن، إذا كانت غزارة الرشح وأيضاً التدرج الهيدروليكي i يزدادان بشكل تدريجي، فإننا سوف نصل لحالة حدية ضمن جسم التربة نعبر عنها بالمعادلة:

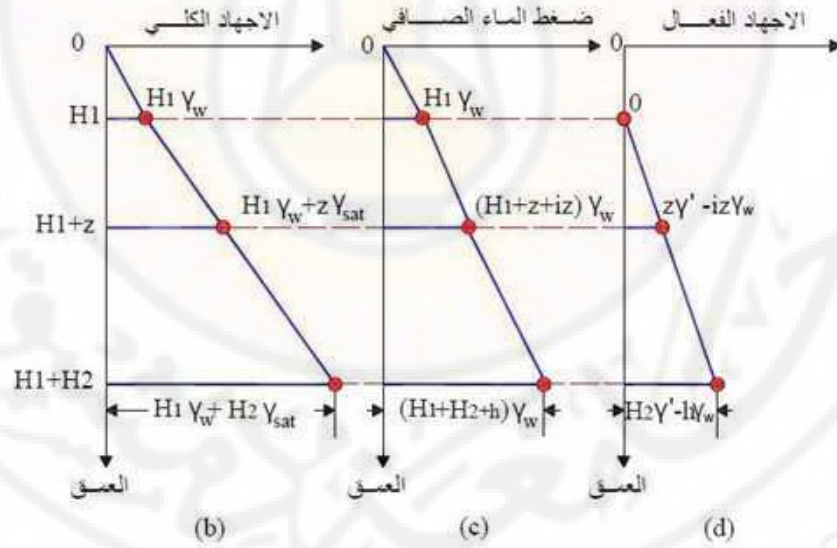
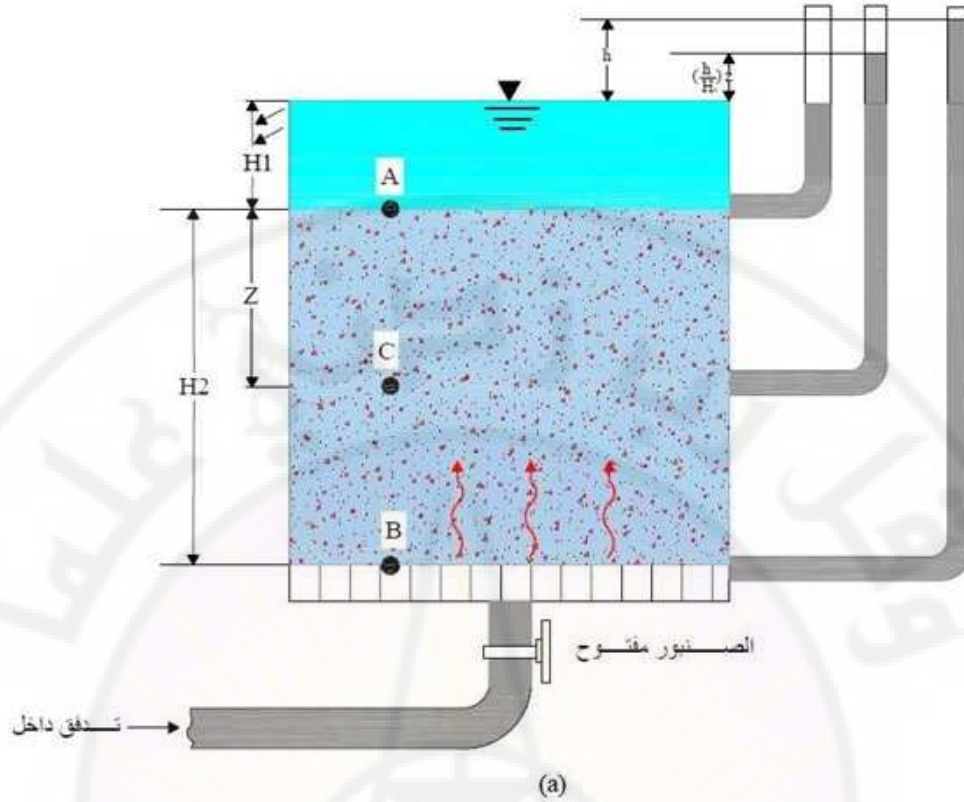
$$\sigma'_c = z \cdot \gamma' - i_{cr} z \cdot \gamma_w = 0 \quad (8.9)$$

حيث i_{cr} = التدرج الهيدروليكي الحرج (من أجل إجهادات فعالة تساوي الصفر). بهذه الحالة ومثيلاتها، يفقد جسم التربة استقراره. وتعرف هذه الحالة بحادثة الغليان في جسم التربة أو الفوران في جسم التربة أو الظرف السريع.

من المعادلة (8.9) نستطيع أن نوجد قيمة الميل الهيدروليكي الحرج أو شرط عدم الاستقرار ضمن جسم التربة بالمعادلة التالية:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (9.9)$$

من أجل معظم الترب، قيمة i_{cr} تتراوح بين 0.9 إلى 1.1 مع متوسط مساوي للقيمة 1.



الشكل 4-9 : a طبقة من التربة الموجودة في خزان مع تسرب علوي
b الاجهاد الكلي مع العمق لطبقة من التربة مع تسرب علوي
c ضغط الماء الصافي مع العمق لطبقة من التربة مع تسرب علوي
d الاجهاد الفعال مع العمق لطبقة من التربة مع تسرب علوي

الشكل (4.9): (a) طبقات التربة التي يتم عبورها الجريان نحو الأعلى، (b) تغير الاجهاد الكلي،

(c) تغير الضغط المسامي، (d) تغير الاجهاد الفعال

□

مثال 2.9:

لدينا طبقة من الغضار المشبع القاسي سماكتة 20 ft متوضعة على طبقة من الرمل (الشكل 5.9). الرمل يخضع لضغط ارتوازي، ومع العلم أن $H_1 = 12$ ft . يطلب حساب العمق الأعظمي للحفيرة H والذي ممكن حفره في الغضار .

الحل:

بسبب الحفر، سوف يحصل تخفيف للحمل unloading أي انخفاض في قيمة الضغط الناتج عن الوزن الذاتي عند المنسوب الجديد، وبما أننا نقوم بحفر حفرة عمقها H، وبسبب انخفاض الضغط، سوف يحصل انتفاخ في التربة الغضارية. وبالتالي سيكون استقرار النقطة A في هذه الوقت محقق من خلال العلاقات التالية:

$$\sigma_A = (20 - H) \cdot \gamma_{sat(\text{للغضار})}$$

$$u_A = 12 \cdot \gamma_w$$

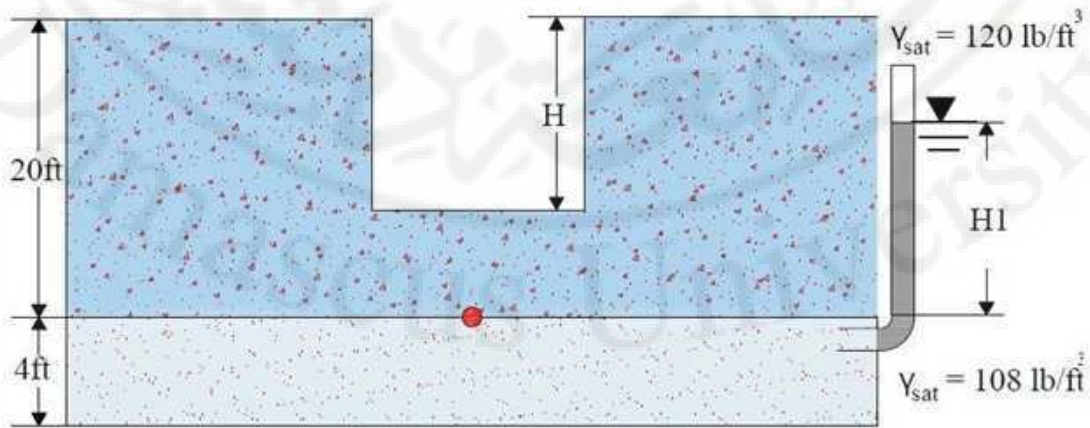
أما بحال ظهور الانتفاخ، فإن الاجهادات الفعالة عند النقطة A وهي σ'_A يجب أن تكون مساوية للصفر لكي تبقى الطبقة بحالة استقرار، لذلك يمكننا أن نكتب العلاقة:

$$\sigma_A - u_A = (20 - H) \cdot \gamma_{sat(\text{للغضار})} - 12 \cdot \gamma_w$$

$$(20 - H)120 - (12)62.4 = 0$$

ومنه نستطيع أن نحدد الإرتفاع الأعظمي للحفيرة H من خلال:

$$H = \frac{(20)120 - (12)62.4}{120} = 13.76 \text{ ft}$$



رمل □ غضار مشبع ■

الشكل 5-9

الشكل (5.9)

3.9 الإجهادات في الترب المشبعة ولكن مع وجود إمكانية لرشح للماء

ضمن كتلة التربة نحو الأسفل

في حالة رشح الماء للأسفل ضمن كتلة التربة المبينة في الشكل (6.9 a). ومع فرضية أن منسوب الماء في الخزان يبقى ثابت عن طريق تعديل التزود بالماء من الأعلى بحيث يكون جريان الماء للأسفل.

ضمن هذه الشروط، فإن التدرج الهيدروليكي الناتج بسبب رشح الماء للأسفل يساوي إلى:

$$i = h/H_2$$

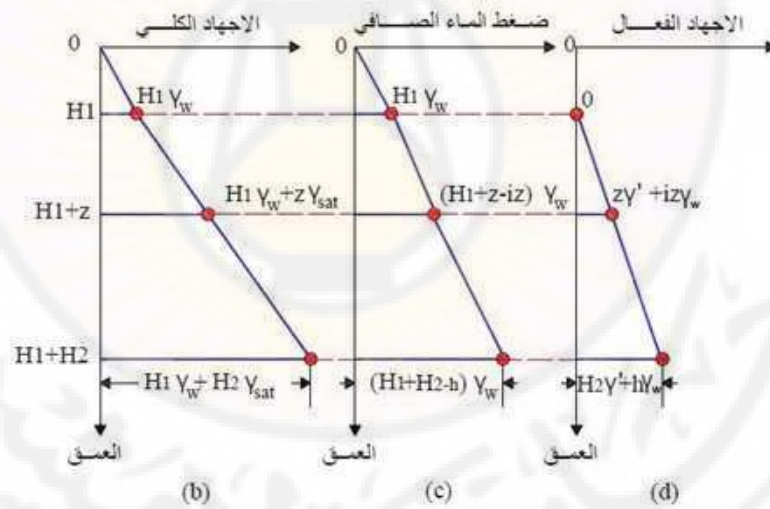
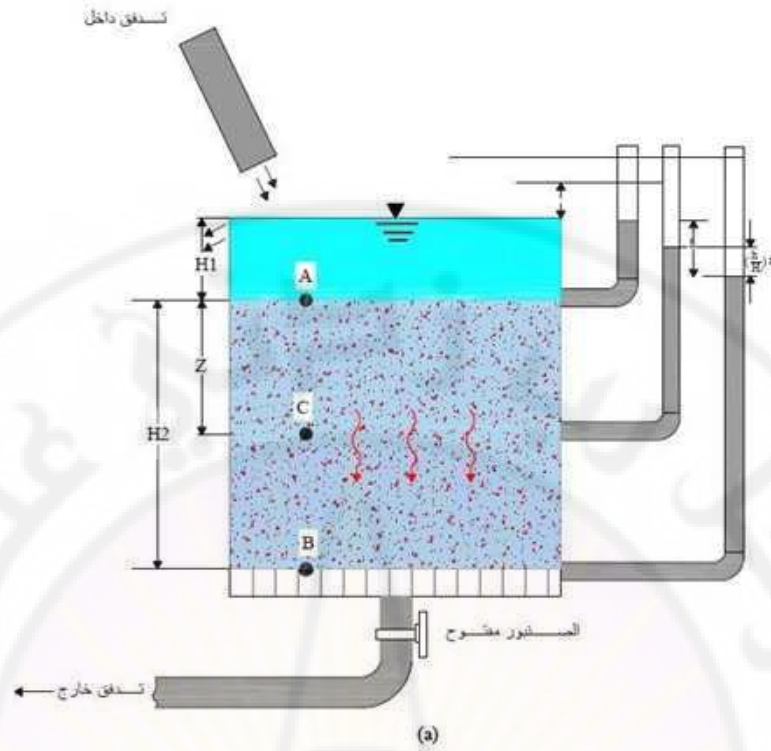
وعليه فإن الإجهادات الكلية، ضغط الماء المسامي والإجهادات الفعالة عند أي نقطة مثل C هي على التوالي:

$$\sigma_c = H_1 \gamma_w + z \cdot \gamma_{sat}$$

$$u_c = (H_1 + z - i \cdot z) \gamma_w$$

$$\sigma'_c = (H_1 \gamma_w + z \cdot \gamma_w) - (H_1 + z - i \cdot z) \cdot \gamma_w = z \cdot \gamma' + i \cdot z \cdot \gamma_w$$

أما تغير قيم الإجهادات الكلية، قيم ضغط الماء المسامي وقيم الإجهادات الفعالة مع العمق ظاهر أيضاً في الأشكال من (6.9 b) وحتى (6.9 d).



الشكل 9-6 : a طبقة من التربة الموجودة في خزان مع تسرب سفلي
b الاجهاد الكلي مع العمق لطبقة من التربة مع تسرب سفلي
c ضغط الماء الصافي مع العمق لطبقة من التربة مع تسرب سفلي
d الاجهاد الفعال مع العمق لطبقة من التربة مع تسرب سفلي

4.9 قوى الرشح

الفقرة السابقة أظهرت أن تأثير الرشح ضمن كتلة التربة، سيسبب إما زيادة أو نقصان في قيم الإجهادات الفعالة عند نقطة معينة ضمن كتلة التربة المدروسة. غالباً، ما يتم التعبير عن قوى الرشح بوحدة الحجم للتربة.

في الشكل (2.9)، تم إظهار أنه من دون وجود حالة رشح ضمن كتلة التربة، فإن قيم الإجهادات الفعالة عند العمق z مقاس من سطح التربة في الخزان مساوي إلى القيمة $z \cdot \gamma'$. لذلك إن القوى الفعالة والمطبقة على المساحة A هي عبارة عن:

$$P'_1 = z \cdot \gamma' \cdot A \quad (10.9)$$

(اتجاه القوة P'_1 ظاهر في الشكل 7.9 a).

أيضاً، وفي حال وجود رشح للأعلى خلال نفس طبقة التربة (الشكل 4.9)، فإن القوى الفعالة المطبقة على مساحة A عند عمق z تعطى بالعلاقة:

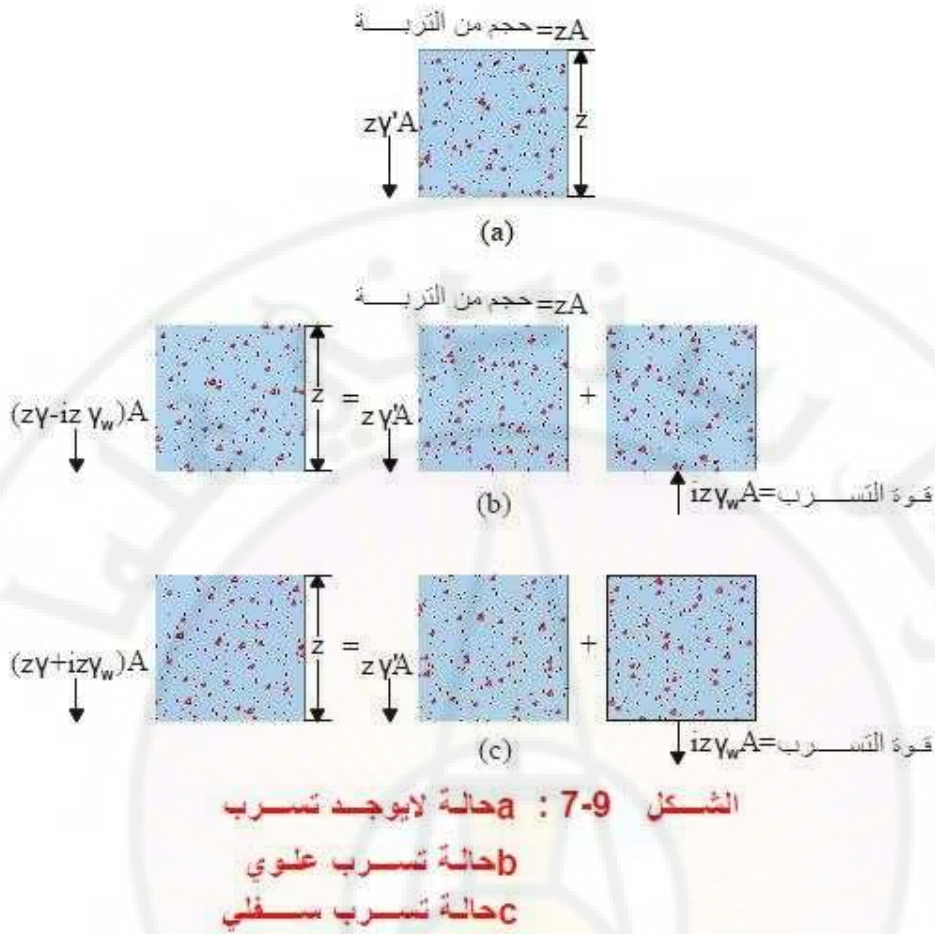
$$P'_2 = (z \cdot \gamma' - i \cdot z \cdot \gamma_w) A \quad (11.9)$$

وعليه، يمكننا أن نجد أن النقص الحاصل في القوى الكلية نتيجة الرشح نحو الأعلى ضمن كتلة التربة من خلال العلاقة:

$$P'_1 - P'_2 = i \cdot z \cdot \gamma_w \cdot A \quad (12.9)$$

وبما أن حجم التربة المساهمة في القوى الفعالة مساوي إلى $z \cdot A$ ، فإن قوى الرشح خلال واحدة الحجم من التربة تعطى بالعلاقة التالية:

$$\frac{P'_1 - P'_2}{(\text{حجم التربة : Volume of soil})} = \frac{i \cdot z \cdot \gamma_w \cdot A}{z \cdot A} = i \cdot \gamma_w \quad (13.9)$$



الشكل (7.9): القوى على حجم التربة بسبب (a) بدون رشح (b) مع رشح للأعلى (c) مع رشح للأسفل.

إن القوى لواحدة الحجم، $i \cdot \gamma_w$ ، لهذه الحالة تؤثر في الاتجاه العلوي - والذي هو اتجاه الجريان. هذه القوى العلوية مشروحة في الشكل (7.9 b).

بشكل مشابه، من أجل حالة رشح الماء للأسفل، يمكن أن نظهر أن قوى الرشح في الاتجاه السفلي نسبة لواحدة الحجم التربة هي $i \cdot \gamma_w$ (الشكل 7.9 c).

من المناقشة السابقة، يمكن استنتاج أن قوى الرشح خلال واحدة الحجم مساوية للقيمة $i \cdot \gamma_w$ ، وأيضاً في الترب المتجانسة فإن القوة تؤثر في نفس اتجاه الجريان. وهذا صحيح من أجل الجريان في أي اتجاه. وعليه فإن شبكات الجريان يمكن استخدامها لإيجاد التدرج الهيدروليكي عند أي نقطة ضمن كتلة التربة وبالتالي نستطيع تحديد قوى الرشح لواحدة الحجم للتربة.

المثال 3.9:

لنعتبر أن جريان الماء نحو الأعلى عبر طبقة من الرمل في خزان والمبينة في الشكل (8.9). ويفرض أن خواص الرمل هي كالتالي:

معامل المسامية $e = 0.52$ والوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة $G_s = 2.67$. والمطلوب:

a. احسب الإجهادات الكلية، ضغط الماء المسامي، الإجهادات الفعالة عند النقاط A, B.

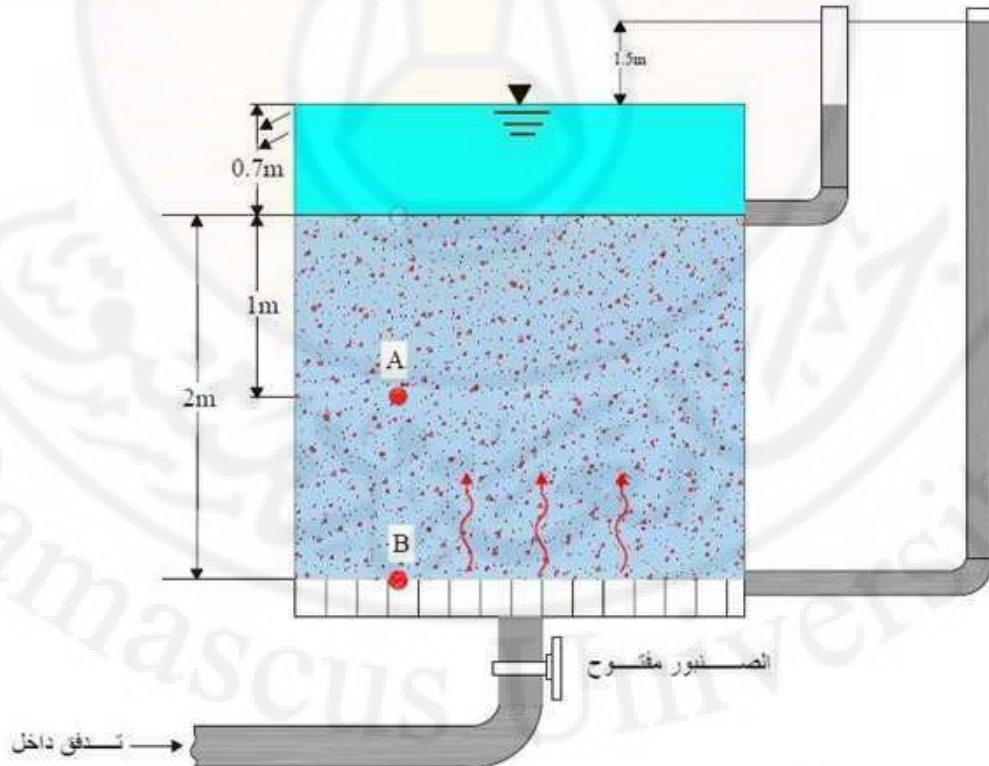
b. ماهي قوى الرشح العلوية نسبة لوحدية الحجم للتربة.

الحل:

الطلب a:

الوزن الحجمي المشبع للرمل محسوب كالتالي:

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.67 + 0.52)9.81}{1 + 0.52} = 20.59 \text{ kN/m}^3$$



الشكل 8-9 : حالة جريان مياه خلال طبقة من الرمل في خزان

الشكل (8.9): جريان الماء نحو الأعلى ضمن طبقة الرمل.

□

الآن، نقوم بإعداد الجدول التالي:

النقطة	الاجهاد الكلي σ (kN/m ²)	الضغط المسامي u (kN/m ²)	الاجهاد الفعال $\sigma' = \sigma - u$ (kN/m ²)
A	$0.7\gamma_w + 1\gamma_{sat} = 0.7 \times 9.81 + 1 \times 20.59 = 27.46$	$\left[(1 + 0.7) + \left(\frac{1.5}{2} \right) (1) \right] \gamma_w = (2.45)(9.81) = 24.03$	3.43
B	$0.7\gamma_w + 2\gamma_{sat} = (0.7)(9.81) + (2)(20.59) = 48.05$	$(2 + 0.7 + 1.5)\gamma_w = (4.2)(9.81) = 41.2$	6.85

الطلب b:

الميل الهيدروليكي i يمكن حسابه من خلال العلاقة التالية:

$$i = \frac{1.5}{2} = 0.75$$

ومنه نحسب قوى الرشح نحو الأعلى من خلال العلاقة التالية:

$$i \cdot \gamma_w = 0.75 \times 9.81 = 7.36 \text{ kN/m}^3$$

□

5.9 الانتفاخ في التربة نتيجة الجريان حول الستائر الوتدية

يمكن استخدام قوى الرش لواحدة الحجم من أجل التحقيق من احتمال انهيار منشآت الصفائح الوتدية والتي ممكن أن تحدث بسبب انتفاخ التربة على الجانب السفلي لهذه الصفائح الوتدية (الشكل 9.9 a).

بعد إجراء العديد من النماذج للتجارب، استنتج ترزاكي في العام (1922) أن الانتفاخ عادة يظهر عند العمق المحدد بالقيمة $D/2$ من طول الصفائح الوتدية مع إعتبار أن القيمة D تمثل العمق المدفون من طول الصفائح الوتدية في طبقة التربة النفوذة. لذلك، نحتاج للتحقق من استقرار التربة في هذه المنطقة والمحددة بالعرض D على عمق $D/2$ والمقطع العرضي لهذا الأمر مبين في الشكل (9.9 b).

إن عامل الأمان ضد الانتفاخ للتربة يمكن أن يعطى بالعلاقة التالية:

$$FS = \frac{W'}{U} \quad (14.9) \square$$

حيث:

FS = عامل الأمان.

W' = الوزن المغمور للتربة في منطقة الانتفاخ لكل واحدة الطول للصفحة الوتدية ويساوي إلى:

$$W' = D \cdot (D/2) (\gamma_{sat} - \gamma_w) = \left(\frac{1}{2}\right) D^2 \cdot \gamma' \square$$

U = قوى الرفع نتيجة الرش على نفس حجم التربة.

من المعادلة (13.9):

$$U = (\text{حجم التربة}) \times (i_{av} \cdot \gamma_w) = \frac{1}{2} D^2 i_{av} \cdot \gamma_w \square$$

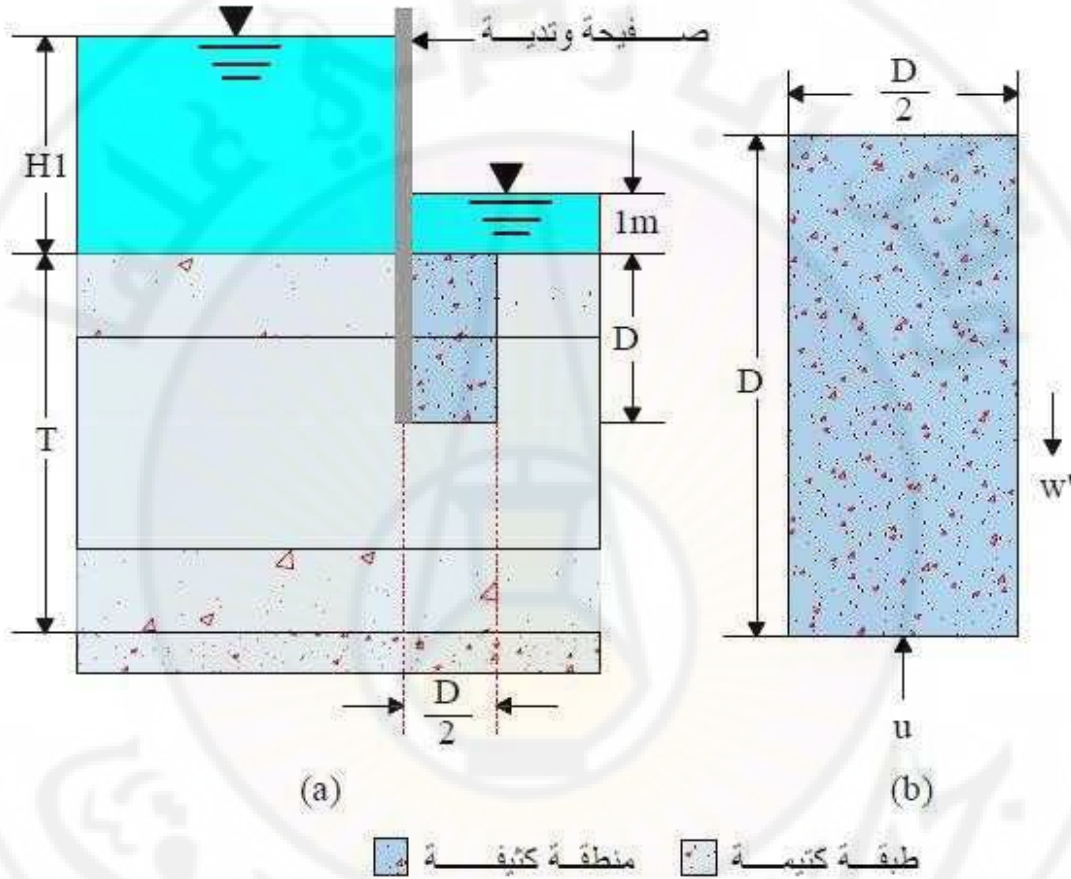
حيث i_{av} = التدرج الهيدروليكي المتوسط عند أسفل كتلة التربة (انظر المثال 4.9).

وبتعويض قيم W' و U في المعادلة (14.9). يمكن كتابة عامل الأمان من جديد بالشكل:

$$FS = \frac{\gamma'}{i_{av} \cdot \gamma_w} \quad (15.9) \square$$

ومن أجل حالة الجريان حول الستارة الوتدية في تربة متجانسة، كما هو ظاهر في الشكل 9.9، يمكن كتابة المعادلة:

$$\frac{U}{0.5\gamma_w \cdot D(H_1 - H_2)} = C_0 \quad (16.9) \square$$



**الشكل 9-9 : a حالة لا يوجد تسرب
b حالة تسرب علوي**

الشكل (9.9): (a) التحقق من احتمال انهيار منشآت الصفائح الوتدية في منطقة تثبيتها، (b) مقطع التربة غير النفوذ

حيث C_0 هي تابعة للقيمة D/T (انظر الجدول 1.9)، لذلك ومن المعادلة (14.9) نستطيع أن نستنتج قيمة عامل الأمان وفق الشكل التالي:

$$FS = \frac{W'}{U} = \frac{0.5D^2 \cdot \gamma'}{0.5C_0 \cdot \gamma_w \cdot D(H_1 - H_2)} = \frac{D \cdot \gamma'}{C_0 \cdot \gamma_w (H_1 - H_2)} \quad (17.9) \square$$

حيث T تمثل ارتفاع طبقة التربة النفوذة.

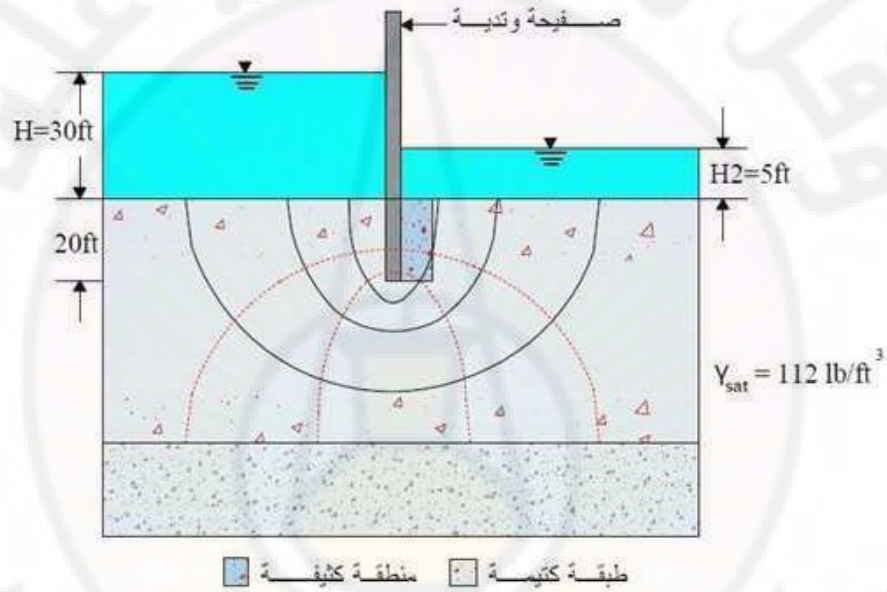
الجدول (1.9): تغير C_0 تبعاً لتغير للقيمة D/T .

D/T	C_0
0.1	0.385
0.2	0.365
0.3	0.359
0.4	0.353
0.5	0.347
0.6	0.339
0.7	0.327
0.8	0.309
0.9	0.274

المثال 4.9:

الشكل (10.9) يبين لنا شبكة جريان لرشح الماء حول صف واحد من الستائر الوتدية المدقوقة في طبقة تربة نفوذة. والمطلوب حساب عامل الأمان ضد الانتفاخ على الجانب السفلي من الستارة الوتدية.

معطى لدينا : من أجل الطبقة النفوذة $\gamma_{sat} = 112 \text{ lb/ft}^3$
(ملاحظة: سماكة طبقة التربة النفوذة هي : $T = 60 \text{ ft}$).



الشكل 10-9 : عقد الغزارة لحالة تسرب للمياه حول أوتاد محفورة في طبقة نفوذة
الشكل (10.9): شبكة الجريان للماء حول الستائر الوتدية المدقوقة في الطبقة النفوذة

الحل:

من الأبعاد المعطاة في الشكل (10.9)، يمكن اعتبار أن المقطع العرضي لموشور التربة مساوي للقيمة: $20 \text{ ft} \times 10 \text{ ft}$.

موشور التربة مرسوم على مقياس مكبر في الشكل (11.9). وباستخدام شبكة الجريان، يمكن حساب الفاقد في الضاغط خلال الموشور كالتالي:

• عند b ، الضاغط الناشئ =

$$\frac{3}{6} (H_1 - H_2)$$

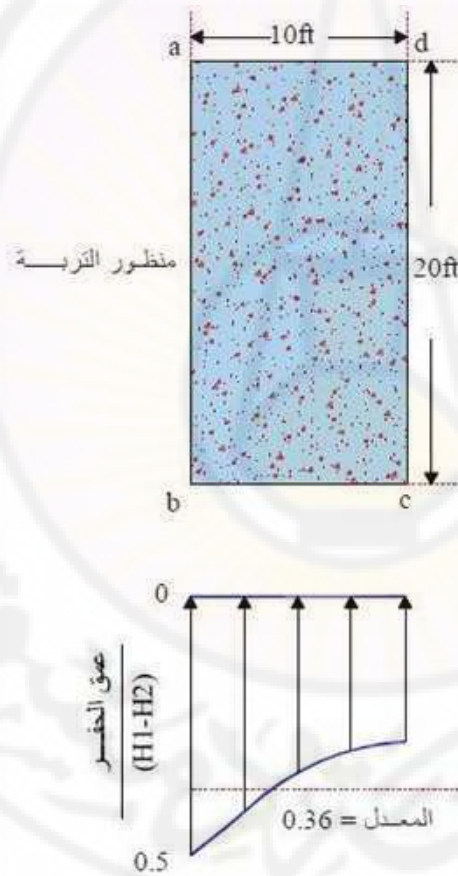
• عند C ، الضاغط الناشئ =

$$\frac{1.6}{6}(H_1 - H_2)$$

وبشكل مشابه، من أجل النقاط المتوسطة الأخرى على طول bc، الضاغط الناشئ التقريبي تم حسابه ورسمه في الشكل (11.9).

القيم المتوسطة لفاقد الضاغط في المؤشر هي: $0.36(H_1 - H_2)$ ، والتدرج الهيدروليكي المتوسط هو:

$$i_{av} = \frac{0.36(H_1 - H_2)}{D}$$



الشكل 11-9: منظور للتربة - مقياس موسع

الشكل (11.9): مؤشر التربة - مقياس مكبر

ولذلك، فإن قيمة عامل الأمان (من المعادلة 9.15) هو:

$$FS = \frac{\gamma'}{i_{av}\gamma_w} = \frac{\gamma' D}{0.36(H_1 - H_2)\gamma_w} = \frac{(112 - 62.4)20}{0.36(30 - 5) \times 62.4} = 1.77$$

□



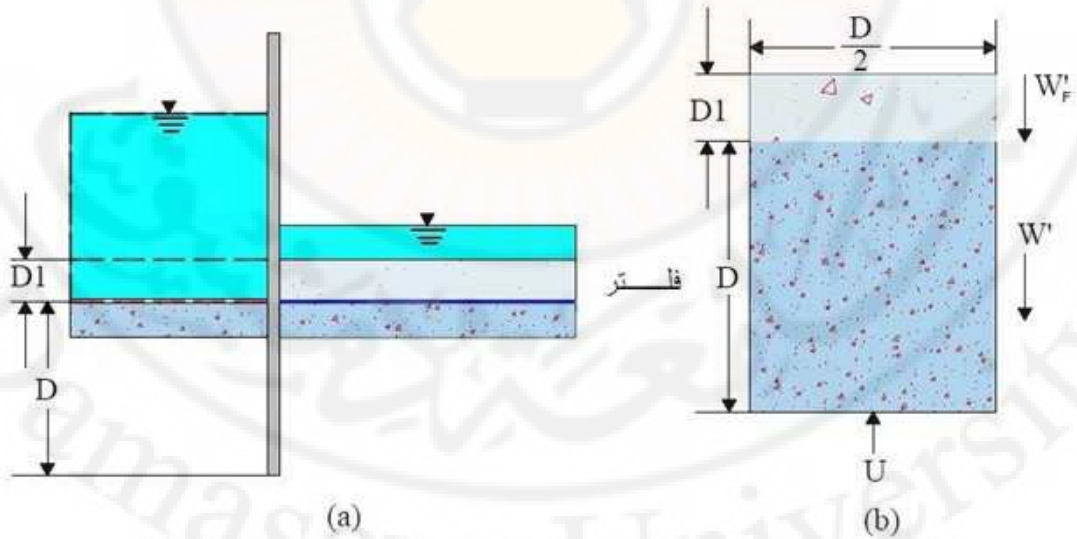
حل بديل:

من أجل حالة $D/T = 1/3$. من الجدول 1.9، ومن أجل $D/T=1/3$ ، قيمة $C_0 = 0.357$ ،
لذلك وباستخدام المعادلة (17.9) نجد أن عامل الأمان:

$$FS = \frac{D\gamma'}{C_0\gamma_w(H_1 - H_2)} = \frac{(20)(112 - 62.4)}{(0.357)(62.4)(30 - 5)} = 1.78$$

6.9 استخدام الفلاتر لزيادة عامل الأمان ضد ظاهرة الفوران Heave

إن قيمة عامل الأمان الذي تم حسابه في المثال 4.9 منخفض. عملياً يجب أن يكون عامل الأمان الأصغري المطلوب من أجل آمان المنشآت الهندسية محصور ما بين 4 - 5. مثل هذه القيم لعامل الأمان ينصح بها بشكل أساسي بسبب عدم الدقة الموجودة في التحليل، والطريقة لزيادة عامل الأمان ضد الفوران هو أن نستخدم فلتر على الجانب الأيمن من منشأة الستارة الوتدية ونضع هذا الفلتر عند سطح الأرض كما هو مبين بالشكل 12.9 a. الفلتر هو عبارة عن خليط من تربة مكونة من مواد حبيبية لها تدرج حبي يمنع ويشكل كافي حادثة الجرف الداخلي للتربة، أي يمنع حركة حبيبات التربة المتوضعة أسفل الفلتر نحو الأعلى، وفي نفس الوقت، هذا الفلتر يجب أن يمتلك عامل ناقلية هيدروليكية تمكنه من تأمين ممانعة قليلة للرشح خلاله (انظر الفقرة 10.9). في الشكل (a 12.9)، نجد أن سماكة مواد الفلتر هي D_1 . في هذه الحالة، عامل الأمان ضد الفوران يمكن حسابه كالتالي (الشكل 12.9b):



الشكل 12-9 : عامل الأمان مقابل الجيوشان بوجود فلتر

الشكل (12.9): عامل الأمان ضد الانتفاخ، مع فلتر

إن قيم الوزن الحجمي المغمور للتربة والفلتر في منطقة الفوران نسبة لواحدة الطول من الستارة الوتدية مساوي للقيمة $W' + W'_F$: حيث أن:

$$W' = (D) \left(\frac{D}{2} \right) (\gamma_{sat} - \gamma_w) = \frac{1}{2} D^2 \gamma' \quad \square$$

$$W'_F = (D_1) \left(\frac{D}{2} \right) (\gamma'_F) = \frac{1}{2} D_1 D \gamma'_F \quad \square$$

حيث γ'_F = الوزن الحجمي الفعال للفلتر.

وقوى الرفع نتيجة الرشح على نفس حجم التربة معطى بالعلاقة:

$$U = \frac{1}{2} D^2 i_{av} \gamma_w \quad \square$$

العلاقة السابقة تم إيجادها في الفقرة 5.9. وعليه، فإن عامل الأمان ضد الفوران يعطى بالشكل:

$$FS = \frac{W' + W'_F}{U} = \frac{\frac{1}{2} D^2 \gamma' + \frac{1}{2} D_1 D \gamma'_F}{\frac{1}{2} D^2 i_{av} \gamma_w} = \frac{\gamma' + \left(\frac{D_1}{D} \right) \gamma'_F}{i_{av} \gamma_w} \quad (18.9) \quad \square$$

إن مبدأ اختيار مواد الفلتر تم إعطاؤها في الفقرة 10.8، وبحال تم استخدام المعادلة (16.9) يمكننا ولحساب عامل الأمان أن نكتب العلاقة التالية:

$$FS = \frac{\frac{1}{2} D^2 \gamma' + \frac{1}{2} D_1 D \gamma'_F}{0.5 C_0 \gamma_w D (H_1 - H_2)} = \frac{D \gamma' + D_1 \gamma'_F}{C_0 \gamma_w (H_1 - H_2)} \quad (19.9) \quad \square$$

إن قيمة C_0 معطاة في الجدول 1.9.

7.9 الإجهادات الفعالة في الترب المشبعة جزئياً

في الترب المشبعة جزئياً، حيث أن الماء في الفراغات غير مستمر، ومع العلم أن كتلة التربة مشكلة من ثلاثة أطوار هي: الصلب، الماء المسامي والهواء المسامي (الشكل 13.9). لذلك، فإن قيم الإجهادات الكلية عند أي نقطة في مقطع التربة تتألف من الضغوط الداخلية بين الحبيبات وضغط الماء المسامي وضغط الهواء المسامي.

ومن خلال نتائج التجارب المخبرية، أعطى Bishop *et al*، في العام (1960) المعادلة التالية للإجهادات الفعالة في الترب المشبعة جزئياً:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (20.9)$$

حيث:

$\sigma' =$ الإجهادات الفعالة.

$\sigma =$ الإجهادات الكلية.

$u_a =$ ضغط الهواء المسامي.

$u_w =$ ضغط الماء المسامي.

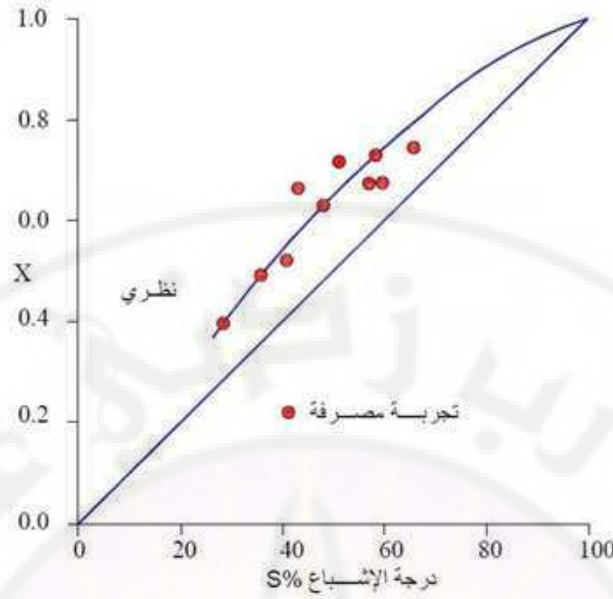
في المعادلة (20.9)، χ تمثل جزء من مساحة المقطع العرضي الواحد للترربة المشغولة بالماء.

ومن أجل التربة الجافة، تكون $\chi = 0$ ، أما من أجل التربة المشبعة فإن: $\chi = 1$.



الشكل (13.9): التربة المشبعة جزئياً

أشار Bishop ورفاقه، إلى أن القيم المتوسطة للمتغير χ تعتمد بشكل أساسي على درجة الإشباع S . على كل حال، هذه القيم أيضاً سوف تتأثر بعدة عوامل مثل هيكلية التربة. إن طبيعة تغير χ مع درجة الإشباع من أجل التربة السلتية يمكن أن نوضحها في الشكل (14.9).



الشكل 9-14 : العلاقة بين العامل X وبين درجة الإشباع

الشكل (9-14): العلاقة بين البارامتر X ودرجة الإشباع من أجل سلت المنحني النظري والنقاط التجريبية بحالة تجربة التصريف

Bearhead Bishop et al. 1960. With permission from ASCE.

8.9 الخاصية الشعرية في الترب

الفراغات المستمرة في كتلة التربة ممكن أن تشكل حزم من الأنابيب الشعرية متغيرة المقطع. وبسبب قوى الشد السطحية، ممكن أن يصعد الماء باتجاه السطح. الشكل (9-15) يظهر مفهوم ارتفاع الماء في الأنبوب الشعري. إن ارتفاع صعود الماء في الأنبوب الشعري يمكن أن يعطى بجمع القوى في الاتجاه الشاقولي ونوضح ذلك بالمعادلة:

$$\left(\frac{\pi}{4}d^2\right)h_c \cdot \gamma_w = \pi \cdot d \cdot T \cdot \cos \alpha$$

$$h_c = \frac{4 \cdot T \cdot \cos \alpha}{d \cdot \gamma_w} \quad (21.9) \square$$

حيث:

T = الشد السطحي (قوة/مسافة).

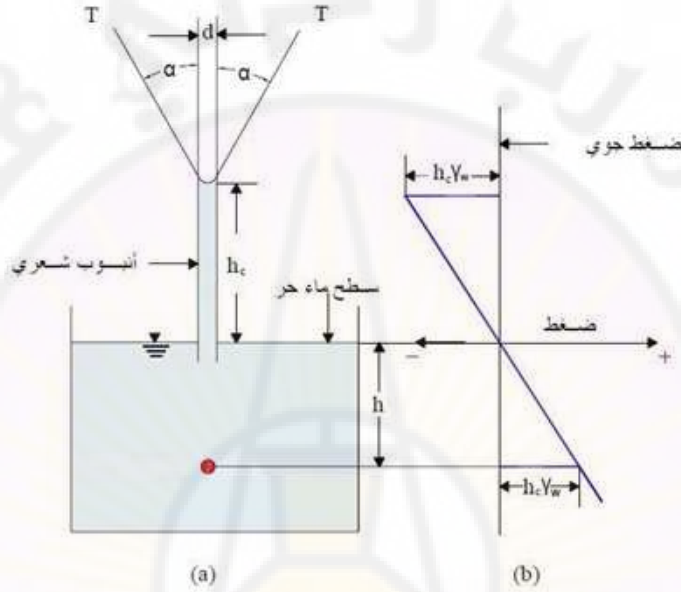
α = زاوية الاتصال.

d = قطر الانبوب الشعري.

γ_w = الوزن الحجمي للماء.

ومن أجل الماء الصافي وكأس نظيف، $\alpha = 0$. لذلك ومن المعادلة (21.9) تصبح لدينا المعادلة:

$$h_c = \frac{4.T}{d.\gamma_w} \quad (22.9) \square$$



الشكل 15-9 : a) الارتفاع في منسوب المياه في أنبوب شعري
b) الضغط مع الارتفاع في الأنبوب الشعري

الشكل (15.9): (a) ارتفاع الماء في الأنبوب الشعري (b) الضغط مع ارتفاع الصعود للأنبوب الشعري
(الضغط الجوي يأخذ للاستدلال)

من أجل الماء وبأخذ القيمة $T = 72 \text{ mN/m}$. وبالتعويض بالمعادلة (22.9). يمكن أن نحصل

على العلاقة التي تحدد لنا قيمة الارتفاع h_c للماء بسبب الخاصية الشعرية وهي:

$$h_c = \alpha \frac{1}{d} \quad (23.9) \square$$

هذه المعادلة تظهر لنا أنه، كلما كان قطر الأنبوب الشعري أصغر كلما كان ارتفاع الصعود الشعري أكبر.

على الرغم من أن مبدأ الخاصة الشعرية كما تم شرحه من أجل أنبوب شعري مثالي يمكن تطبيقه على الترب، حيث أن الأنابيب الشعرية المشكلة في التربة هي بسبب استمرارية الفراغات ضمن مقاطع عرضية مختلفة.

هنا وضمن كتلة التربة، يمكن أن نشاهد عدم انتظام في الارتفاع الشعري وهذا ما تم إثباته عندما تتم وضع عمود تربة رملية في الماء (الشكل 16.9). فبعد انقضاء فترة معينة من الزمن، لوحظ أن هناك تغير في درجة الإشباع مع ارتفاع الماء ضمن عمود التربة نتيجة الخاصية الشعرية وهي تقريباً كما هو مبين في الشكل (b 16.9). إن درجة الإشباع هي تقريباً 100%. وفي هذه الحالة نجد أن الارتفاع الأعظمي للخاصية الشعرية يوافق وجود الفراغات الأكبر.

بعد الارتفاع h_2 ، يمكن أن يشغل الماء فقط الفراغات الأصغر، لذلك درجة الإشباع تكون أقل من 100%. إن الارتفاع الأعظمي للخاصية الشعرية يتوافق مع وجود الفراغات الأصغر. أعطى الباحث Hazen في العام (1930) علاقة من أجل الارتفاع الناتج من الخاصية الشعرية في الترب وهي بشكل تقريبي العلاقة التالية:

$$h_1(mm) = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad (24.9) \quad \square$$

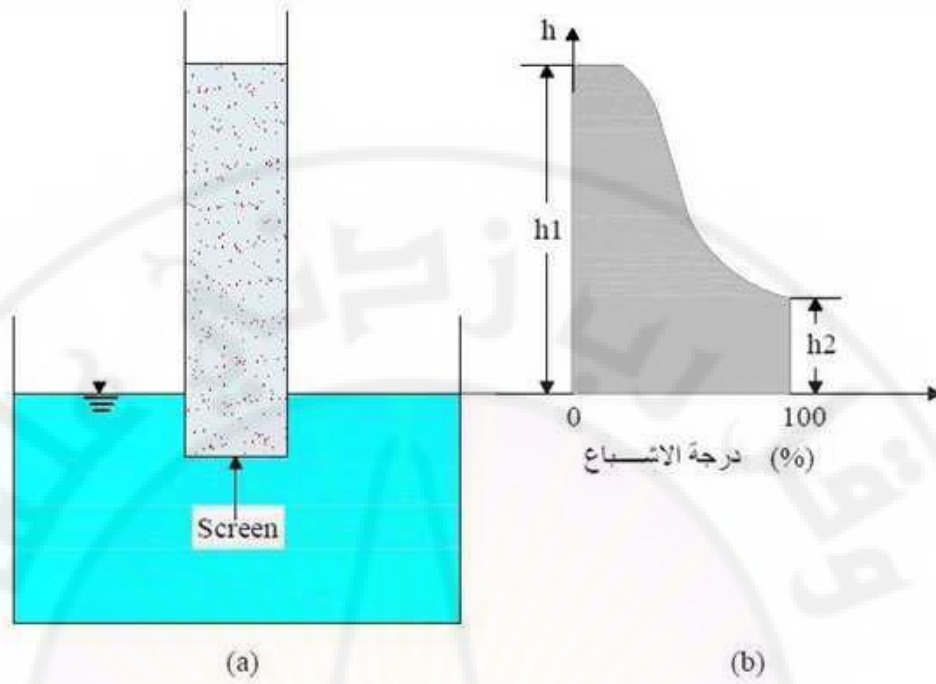
حيث D_{10} = القطر الفعال (mm).

e = معامل المسامية.

C = ثابت يتغير من 10 إلى 50 mm².

المعادلة (24.9) لها نفس التقريب المستخدم في المعادلة (23.9). فمع نقصان القيمة D_{10} ، يتناقص قطر المسامات في التربة، وهذا ما يسبب خاصية شعرية أكبر.

في الجدول 2.9 نبين المجال التقريبي لتغير قيم إرتفاع الماء بسبب الخاصية الشعرية الممكن مصادفته في أنواع مختلفة من الترب.



مياه تربة رملية

الشكل 16-9: تأثير خاصية الشعيرية في الترب الرملية
a عمود من التربة على تماس مع الماء
b تغير درجة الإشباع في عمود التربة

الشكل (16.9): تأثير الخاصية الشعيرية في الترب الرملية

(a) عمود تربة بتماس مع الماء (b) تغير درجة الإشباع في عمود التربة.

الجدول (2.9): المجال التقريبي لتغير قيم للخاصية الشعيرية الممكن مصادفته في الأنواع المختلفة من الترب

نوعية التربة	قيم إرتفاع الماء التقريبي بسبب الخاصية الشعيرية	
	m	ft
رمل خشن	0.1 – 0.2	0.3 – 0.6
رمل ناعم	1.2 – 0.3	1 – 4
سيلت	7.5 – 0.75	2.5 – 25
غضار	23 – 7.5	25 – 75

9.9 الإجهادات الفعالة في منطقة الخاصية الشعرية

نعلم أن العلاقة العامة للإجهادات الكلية والإجهادات الفعالة وضغط الماء المسامي تم إعطائها بالمعادلة (4.9) وهي:

$$\sigma = \sigma' + u$$

إن قيمة ضغط الماء المسامي u عند نقطة معينة في طبقة التربة المشبعة كلياً بالماء نتيجة الخاصية الشعرية مساوي إلى $\gamma_w h$ (h = ارتفاع النقطة المدروسة من منسوب المياه الجوفية) مع اعتبار أن الضغط الجوي مأخوذ datum. وبحال نتج في التربة إشباع جزئي نتيجة فعل الخاصية الشعرية، عندها يمكن تقريب قيمة ضغط الماء المسامي إلى القيمة المعطاه بالعلاقة:

$$u = -\left(\frac{S}{100}\right)\gamma_w \cdot h \quad (25.9)$$

حيث: S = درجة الإشباع بالنسبة المئوية.

□

المثال 5.9:

لدينا مقطع للتربة الموضح في الشكل (17.9).

ولدينا المعطيات التالية:

$H_1 = 6ft, H_2 = 3ft, H_3 = 6ft$ ، المطلوب رسم تغير القيم σ, u, σ' مع العمق.

الحل:

أولاً : تحديد الوزن الحجمي

الرمل الجاف:

$$\gamma_d(\text{للرمل}) = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.65)(62.4)}{1 + 0.5} = 110.24 \text{ lb/ft}^3$$

الرمل الرطب:

$$\gamma(\text{للرمل}) = \frac{(G_s + Se)\gamma_w}{1 + e} = \frac{[2.65 + (0.5)(0.5)](62.4)}{1 + 0.5} = 120.64 \text{ lb/ft}^3$$

الغضار المشبع:

$$e = \frac{G_s \cdot w}{S} = \frac{(2.71)(0.42)}{1.0} = 1.1382$$

$$\gamma_{sat}(\text{للغضار}) = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} = \frac{[2.71 + 1.1382](62.4)}{1 + 1.1382} = 112.3 \text{ lb/ft}^3$$

ثانياً : حساب الإجهادات

عند سطح الأرض (مثل: النقطة A):

$$\sigma = 0, \quad u = 0, \quad \sigma' = \sigma - u = 0$$

عند العمق H_1 (مثل: النقطة B):

$$\sigma = \gamma_d(\text{للرمل})(6) = (110.24)(6) = 661.44 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0 \text{ (مباشرة فوق)}$$

$$u = -(S\gamma_w H_2) = -(0.5)(62.4)(3) = -93.6 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \text{ (مباشرة أسفل)}$$

$$\sigma' = 661.44 - 0 = 661.44 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \text{ (مباشرة فوق)}$$

$$\sigma' = 661.44 - (-93.6) = 755.04 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \text{ (مباشرة أسفل)}$$

□

عند العمق $H_1 + H_2$ (مثل: النقطة C):

$$\sigma = (110.24)(6) + (120.64)(3) = 1023.36 \text{ lb/ft}^2$$

$$u = 0$$

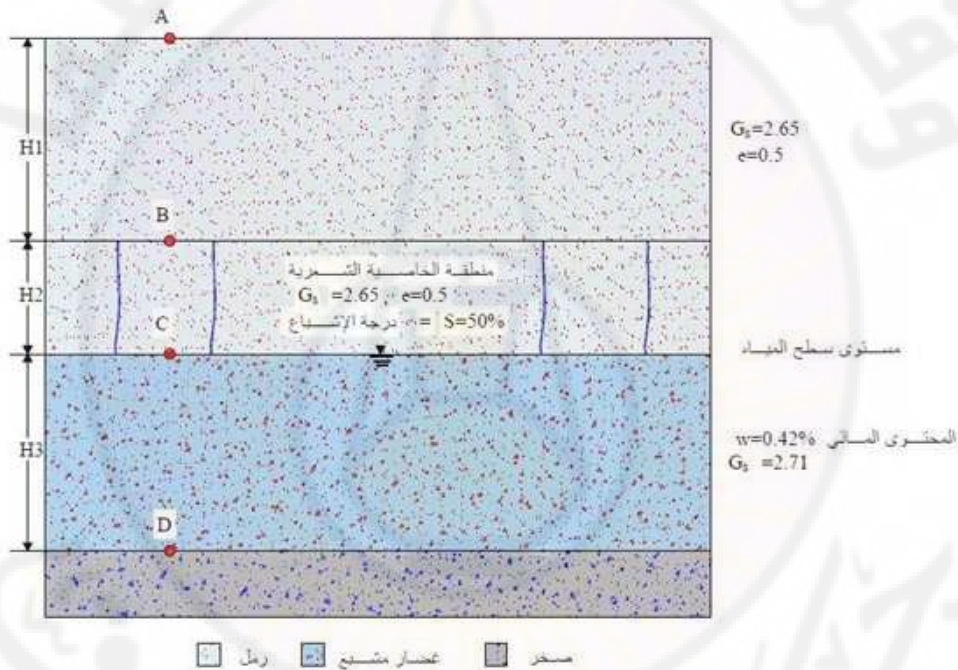
$$\sigma' = 1023.36 - 0 = 1023.36 \text{ lb/ft}^2$$

عند العمق $H_1 + H_2 + H_3$ (مثل: النقطة D):

$$\sigma = 1023.36 + (112.3)(6) = 1697.17 \text{ lb/ft}^2$$

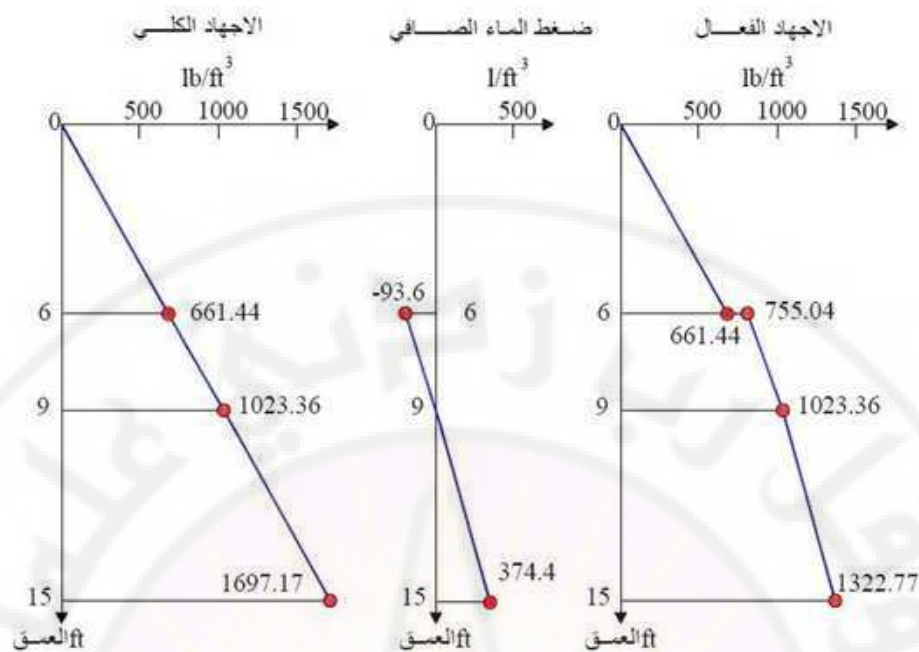
$$u = 6\gamma_w = (6)(62.4) = 374.4 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma' = 1697.17 - 374.4 = 1322.77 \text{ lb/ft}^2$$



الشكل 17-9

مخطط تغير الإجهادات مبين في الشكل 18.9:



الشكل 18-9

□

1.9 ملخص وملاحظات عامة

الإجهاد الفعال يعتبر من أهم المفاهيم في الهندسة الجيوتكنيكية. الانضغاطية ومقاومة القص للتربة تعتمد إلى حد كبير على قيم الإجهادات الفعالة. لذلك، فإن مفهوم الإجهادات الفعالة هام في حل المسائل الهندسية الجيوتكنيكية خاصة: ضغط التربة الجانبي على المنشآت الساندة، قدرة تحمل التربة وهبوط الأساسات، استقرار المنحدرات.

في المعادلة (2.9)، وجدنا أن الإجهاد الفعال σ' معرف بأنه مجموع المركبات الشاقولية لكل القوى بين اتصال الحبيبات الداخلية ضمن مساحة واحدة للمقطع العرضي. هذا التعريف هو الأكثر ملائمة في حالة الترب الحبيبية، وبشكل عام ومن أجل الترب الناعمة، الاتصال الداخلي للحبيبات قد لا يكون فيزيائياً موجوداً، وبسبب أن حبيبات الغضار محيطة بشريط مائي محكم، لذلك وفي معظم الحالات العامة نستعين بالمعادلة (3.9) لإعادة كتابتها كالتالي:

$$\sigma = \sigma_{ig} + u(1 - a'_s) - A' + R' \quad (25.9)$$

حيث σ_{ig} = الإجهادات بين الحبيبات الداخلية.

$A' =$ قوى التجاذب الالكتروني نسبة لواحدة المقطع العرضي للتربة.

$R' =$ قوى التناثر الالكتروني نسبة لواحدة المقطع العرضي للتربة.

ومن أجل الترب الحبيبية، السلت، الغضار منخفض اللدونة، تكون قيمة A' و R' صغيرة، لذلك ومن أجل أغراض عملية:

$$\sigma_{ig} = \sigma' \approx \sigma - u$$

على كل حال، وإذا كانت $A' - R'$ كبيرة، عندها $\sigma_{ig} \neq \sigma'$. مثل هذه الحالات يمكن مصادفتها في الغضار المترسب العالي اللدونة.

تم تقديم العديد من التفسيرات في الماضي للتمييز بين الإجهادات الفعالة والإجهادات بين الحبيبات الداخلية. ولكن يبقى مبدأ الإجهادات الفعالة تقريب ممتاز في حل المسائل الهندسية.

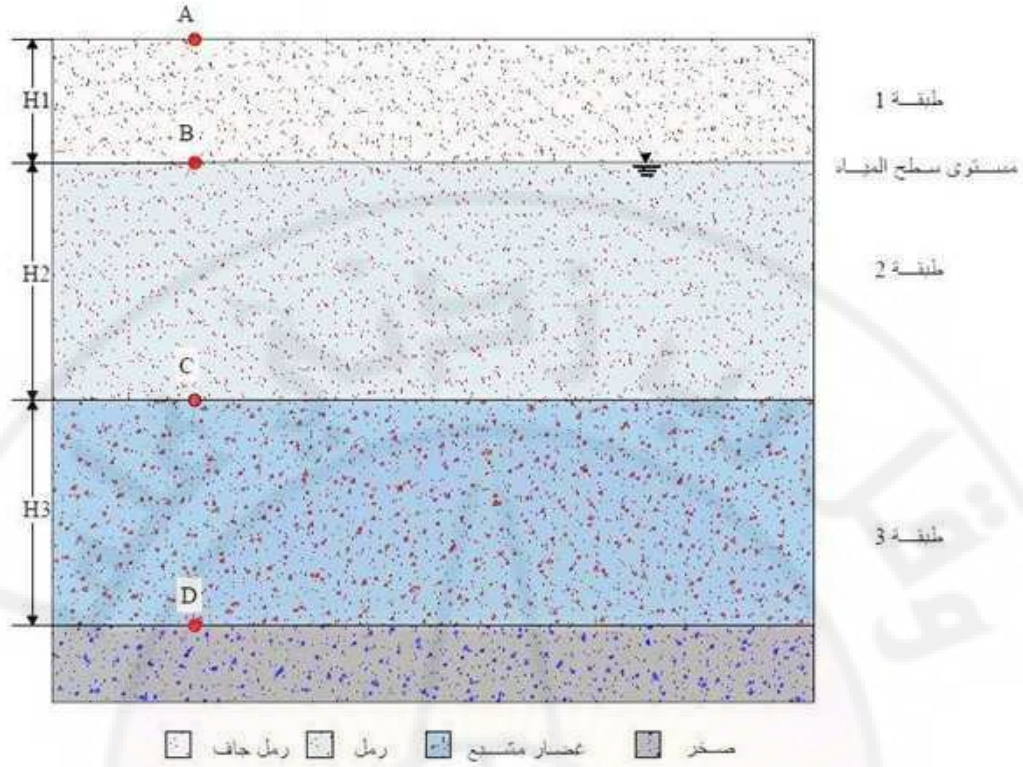
□

11.9 الأمثلة غير المحلولة

المسائل من 1 وحتى 5 معطياتها حسب الشكل (19.9) موضحة بالجدول المبين جانباً. والمطلوب: احسب σ, u, σ' عند النقاط A، B، C، D مع رسم تغير هذه القيم مع العمق. لاحظ أن:

معامل المسامية e ، محتوى الرطوبة w ، الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة G_s ،
الوزن الحجمي الجاف γ_d ، γ_{sat} = الوزن الحجمي المشبع.

المسألة	مواصفات طبقات التربة		
	I	II	III
1	$H_1 = 5 \text{ ft}$	$H_2 = 6 \text{ ft}$	$H_3 = 8 \text{ ft}$
	$\gamma_d = 112 \text{ lb/ft}^3$	$\gamma_{sat} = 120 \text{ lb/ft}^3$	$\gamma_{sat} = 125 \text{ lb/ft}^3$
2	$H_1 = 5 \text{ ft}$	$H_2 = 10 \text{ ft}$	$H_3 = 9 \text{ ft}$
	$\gamma_d = 100 \text{ lb/ft}^3$	$\gamma_{sat} = 116 \text{ lb/ft}^3$	$\gamma_{sat} = 122 \text{ lb/ft}^3$
3	$H_1 = 3 \text{ m}$	$H_2 = 4 \text{ m}$	$H_3 = 5 \text{ m}$
	$\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{sat} = 16 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$
4	$H_1 = 4 \text{ m}$	$H_2 = 5 \text{ m}$	$H_3 = 3 \text{ m}$
	$s = 2.62$	$G_s = 2.68$	$G_s = 2.73$
	$e = 0.4$	$e = 0.6$	$e = 0.81$
5	$H_1 = 4 \text{ m}$	$H_2 = 3 \text{ m}$	$H_3 = 1.5 \text{ m}$
	$s = 2.65$	$G_s = 2.68$	$w = 40\%$
	$e = 0.6$	$e = 0.52$	$e = 1.1$

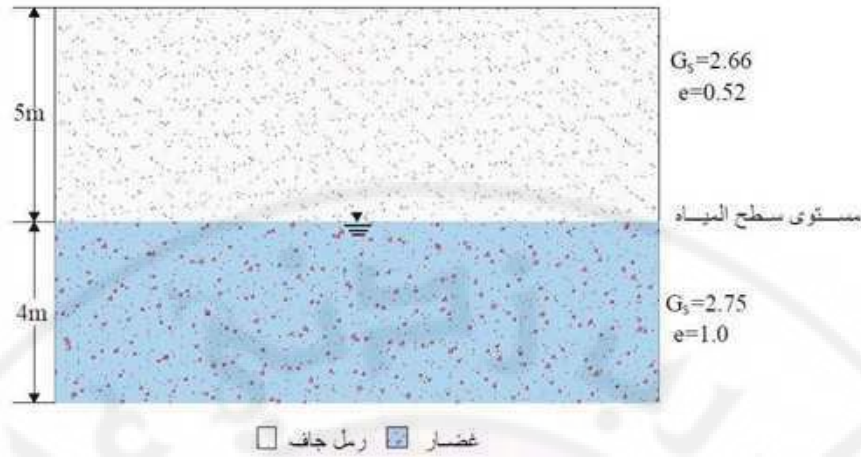


الشكل 19-9

الشكل (19.9)

6. بالإشارة لمقطع التربة المبين في الشكل (20.9)، المطلوب:

- احسب تغير σ, u, σ' مع العمق.
- في حال ارتفع منسوب الماء إلى أعلى سطح الأرض، ما هو التغير في الإجهادات الفعالة عند أسفل الطبقة الغضارية.
- كم هو عدد الأمطار التي يجب على منسوب المياه الجوفية أن يرتفع لكي يتم تقليل الإجهادات الفعالة بقيمة 15 kN/m^2 عند أسفل طبقة الغضار.

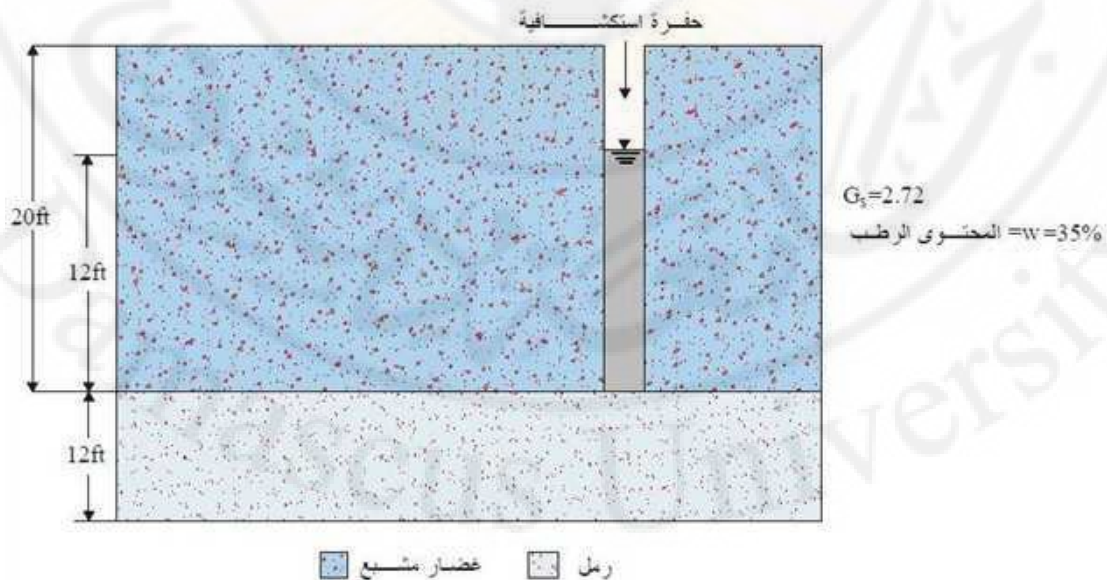


الشكل 20-9

الشكل (20.9)

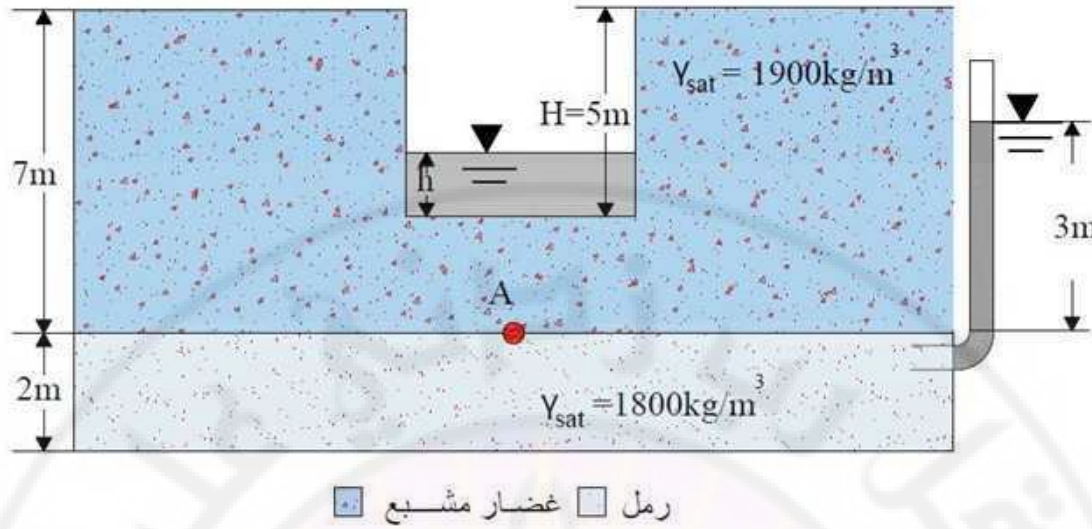
7. تم عمل حفرة استكشافية في طبقة غضارية مشبعة قاسية (انظر الشكل 21.9). ووجد أن هناك طبقة من الرمل متوضعة تحت الغضار وتبين أنها تحت الضغط الارتوازي. الماء في الحفرة ارتفع إلى منسوب 12 ft أعلى سطح طبقة الرمل. في حال تم عمل حفرة مكشوفة في الغضار، ما هو العمق الممكن الوصول له قبل أن تنتفخ قاعدة الحفرة.

8. تم عمل حفرة في غضار مشبع قاسي والمتوضع على طبقة رمل (انظر الشكل 22.9) ماذا يجب أن يكون ارتفاع الماء h في الحفرة بحيث تبقى الحفرة في الغضار المشبع بحالة استقرار.



الشكل 21-9

الشكل (21.9)



الشكل 22-9

الشكل (22.9)

9. بالإشارة للشكل (4.9 a). في حال كانت $h = 1.5 m$, $H_2 = 2.5 m$, $H_1 = 1.5 m$ ، $\gamma_{sat} = 18.6 kN/m^3$ ، الناقلية الهيدروليكية للرمل $(k) = 0.12 cm/sec$ ، ومساحة الخزان $0.45 m^2$. ما هي غزارة الرشح العلوي للماء (m^3/min) .

10. بالإشارة للشكل (4.9 a). معطى $h = 1.2 m$, $H_2 = 2 m$, $H_1 = 1 m$ ، معامل المسامية للرمل $(e) = 0.55$ ، الوزن النوعي النسبي للأجزاء الصلبة $(G_s) = 2.68$ ، مساحة الخزان $0.5 m^2$ ، والناقلية الهيدروليكية للرمل $0.1 cm/sec$.

a. ما هي غزارة الرشح العلوي.

b. إذا كان $h = 1.2 m$ ، هل سوف يظهر فوران؟ ولماذا.

c. ماذا يجب أن تكون قيمة h لتسبب الفوران.

11. أوجد معامل الأمان ضد الانتفاخ في الجانب السفلي لصف واحد من الستائر الوتدية الظاهر في الشكل (8.7).

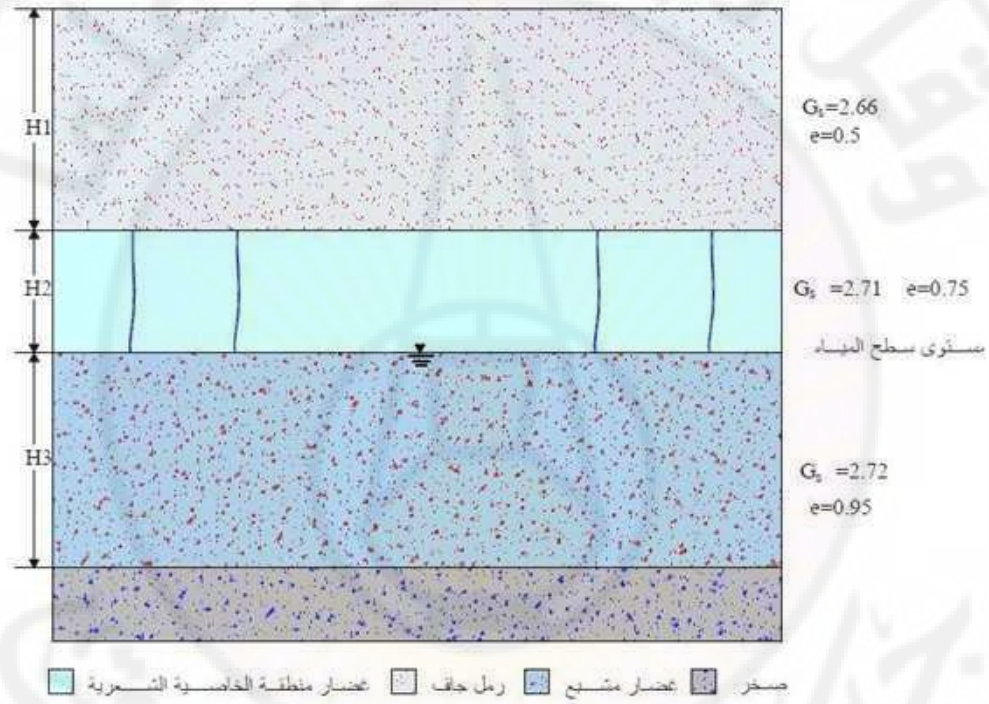
(ملاحظة: سماكة الطبقة النفوذة $10 m$ ، وعمق الاختراق للصفحة الوتدية $6 m$). افترض أن $\gamma_{sat} = 19 kN/m^2$.

المسائل من 12.9 وحتى 13.9 وحسب الشكل (23.9)، ومن أجل المتغيرات المبينة بالجدول التالي، يطلب حساب ورسم كلاً من σ , u , σ' مع العمق.

□



المسألة	H ₁	H ₂	H ₃	درجة الإشباع في منطقة الشد الشعري (S %)
12.9	8 ft	4 ft	7 ft	50
13.9	5 m	3 m	3.5 m	65



الشكل 23-9

الشكل (22.9)

□

12.9 المراجع

1. BISHOP, A. W., ALPAN, I., BLIGHT, G. E., and DONALD, I. B. (1960). "Factors Controlling the Strength of Partially Saturated Cohesive Soils," Proceedings, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, 502–532.
2. HAZEN, A. (1930). "Water Supply," in American Civil Engineering Handbook, Wiley, New York.
3. SKEMPTON, A. W. (1960). "Correspondence," Geotechnique, Vol. 10, No. 4, 186.
4. TERZAGHI, K. (1922). "Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung," Die Wasserkraft, Vol. 17, 445–449.
5. TERZAGHI, K. (1925). Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage, Dueticke, Vienna.
6. TERZAGHI, K. (1936). "Relation Between Soil Mechanics and Foundation Engineering: Presidential Address," Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Boston, Vol. 3, 13–18.
7. TERZAGHI, K., and PECK, R. B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York.

10 الفصل العاشر: الإجهادات في التربة

(بسبب الأحمال الخارجية المطبقة على سطح التربة)

عند بناء أساس معين وعلى منسوب محدد من سطح الأرض، نلاحظ أن هذا الأمر يسبب تغير في الوضع الإجهادي ضمن كتلة التربة الواقعة أسفل الأساس. هذا التغير سيكون من خلال زيادة إضافية في قيم الاجهادات ضمن جسم التربة والناجمة من تأثير الحمولات الخارجية بمختلف أشكالها والمطبقة على الأساس. إن الزيادة الصافية في الإجهادات ضمن كتلة التربة تعتمد على عدة عوامل منها:

القوة لواحدة المساحة والمعرض لها الأساس، العمق أسفل الأساس والمطلوب تقدير الإجهادات عنده، شكل الاساس الهندسي وعوامل أخرى.

من الضروري تقدير الزيادة الصافية في الإجهادات الشاقولية ضمن جسم التربة والتي تظهر نتيجة إنشاء الأساس بحيث تمكننا من حساب قيم الهبوط عند أي نقطة من نقاط جسم التربة والواقعة اسفل الأساس. إن مفهوم الهبوط وحساب الهبوطات سيتم مناقشتها بشكل مفصل في مقرر ميكانيك التربة للفصل الثاني.

هذا الفصل يناقش المبادئ الأساسية التي تمكننا من حساب الزيادة الصافية لقيم الإجهادات الشاقولية نتيجة الأنواع المختلفة من الحمولات التي يمكن أن تطبق على سطح الأرض وذلك اعتماداً على مبادئ نظرية المرونة والتي تتضمن أن جسم التربة هو وسط مرن خطي، متجانس ومتماثل الخواص. بالرغم من أن طبيعة رواسب التربة، في معظم الحالات، ليست مرنة بالكامل أو أن التربة غير متجانسة المواد أو متماثلة الخواص، إلا أن حسابات تقدير الزيادة الصافية في قيم الإجهادات الشاقولية تعطي نتائج جيدة للأغراض العملية.

1.10 الإجهادات الناعمية والإجهادات المماسية (القص) على مستوى

يجب على طلاب السنة الثالثة في مادة ميكانيك التربة أن يكونوا على دراية كاملة بالمبادئ الأساسية لميكانيك المواد الصلبة القابلة للتشوه. في هذه الفقرة سنقدم ملخص لمراجعة المفاهيم الأساسية للإجهادات الناعمية والإجهادات المماسية على مستوي والتي يمكن مصادفتها في أي مادة لميكانيك المواد.

الشكل (a1.10) يظهر لنا عنصر من جسم التربة ثنائي البعد، هذا العنصر معرض لإجهادات ناعمية ومماسية وبفرض أن: $(\sigma_y > \sigma_x)$ ، ولتحديد الإجهادات الناعمية والمماسية على مستوى ما مثل المستوي EF والذي يشكل زاوية θ مع المستوي AB، ولتوضيح ذلك قمنا في الشكل (b1.10) برسم مخطط الجسم الطليق للجسم المتشكل EFB وبشكل مكبر، ولتكن σ_n و τ_n الإجهادات الناعمية والمماسية على التوالي المطبقة على المستوي EF، من الهندسة الفراغية نعلم أن:

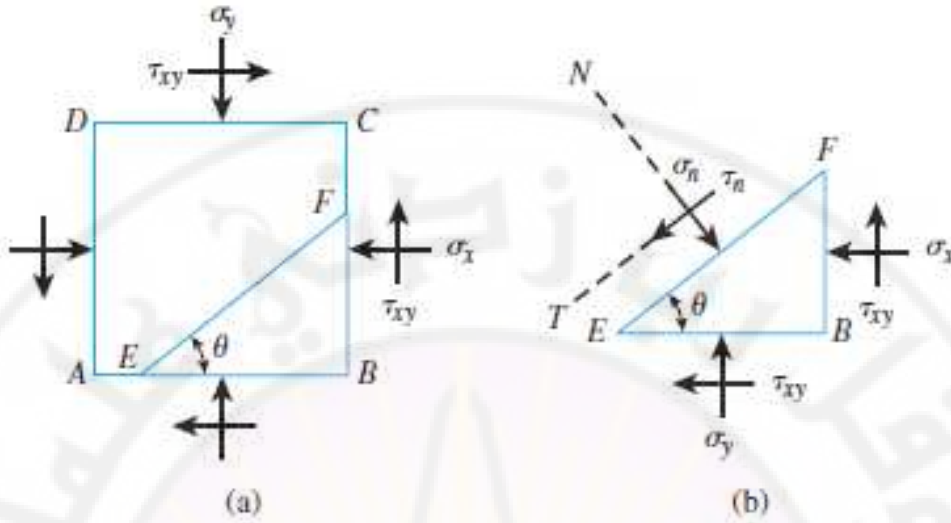
$$\overline{EB} = \overline{EF} \cos \theta \quad (1.10)$$

وكذلك:

$$\overline{FB} = \overline{EF} \sin \theta \quad (2.10)$$

وبجمع مركبات القوى التي تؤثر على العنصر في الاتجاه N والاتجاه T نجد:

$$\sigma_n(\overline{EF}) = \sigma_x(\overline{EF}) \sin^2 \theta + \sigma_y(\overline{EF}) \cos^2 \theta + 2\tau_{xy}(\overline{EF}) \sin \theta \cos \theta$$



الشكل (1.10): (a) عنصر تربة مع الإجهادات الناعمية والمماسية المطبقة عليه

(b) مخطط الجسم الطليق EFB المبين في الشكل (a)

بتبسيط المعادلة السابقة نحصل على المعادلة التي تعطي الاجهاد الناعمي:

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

أو بشكل آخر:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3.10)$$

أيضاً وب نفس الطريقة نحصل على الاجهاد المماسي:

$$\tau_n(\overline{EF}) = -\sigma_x(\overline{EF}) \sin \theta \cos \theta + \sigma_y(\overline{EF}) \sin \theta \cos \theta - \tau_{xy}(\overline{EF}) \cos^2 \theta + \tau_{xy}(\overline{EF}) \sin^2 \theta$$

أو:

$$\tau_n = \sigma_y \sin \theta \cos \theta - \sigma_x \sin \theta \cos \theta - \tau_{xy}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

أو بشكل مبسط:

$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (4.10)$$

من المعادلة (4.10) يمكننا رياضياً أن نختار قيمة معينة للزاوية θ بحيث تكون قيمة الإجهاد المماسي τ_n مساوية للصفر، ولتحقيق هذا الشرط نقوم بتعويض $\tau_n = 0$ في هذه المعادلة فنحصل على المعادلة التالية:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \quad (5.10)$$

من أجل قيم معطاة للمتغيرات $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ سيكون للمعادلة (5.10) حلين. أي يوجد قيمتين للزاوية θ بفارق بينهما مقداره 90° (apart). هذا يعني أنه يوجد مستويين متعامدين بالنسبة لبعضهما البعض تكون قيمة الإجهادات المماسية معدومة على كلاهما، مثل هذه المستويات تسمى بالمستويات الرئيسية، والإجهادات الشاقولية المؤثرة على المستويات الرئيسية هذه تعرف بالإجهادات الرئيسية. إن قيم هذه الإجهادات الرئيسية يمكن أن نوجدها بتعويض حلول المعادلة (5.10) في المعادلة (3.10)، فنحصل على المعادلات التالية:

الإجهادات الرئيسية الاعظمية:

$$\sigma_n = \sigma_1 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left[\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (6.10)$$

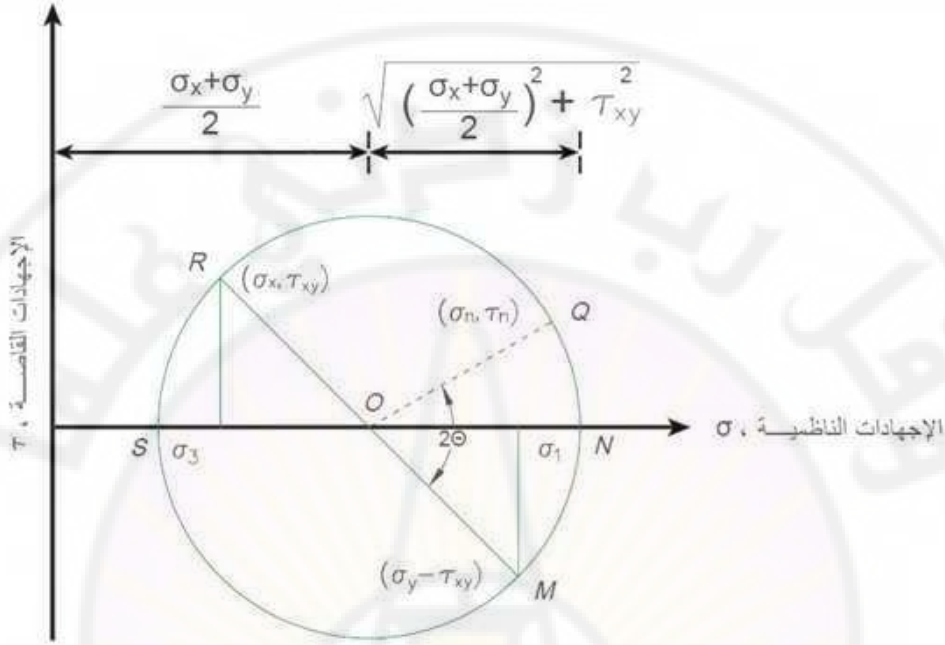
الإجهادات الرئيسية الأصغرية:

$$\sigma_n = \sigma_3 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left[\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (7.10)$$

الإجهادات الناعظمية والإجهادات المماسية (القاصة) والتي تؤثر على أي مستوي يمكن أن تحدد أيضاً من خلال رسم دائرة مور، كما هو مبين في الشكل (2.10). إن مصطلح الإشارة التي تم استخدامه في رسم دائرة مور هو التالي:

- الإجهادات الشاقولية الضاغطة تؤخذ موجبة.

- الإجهادات المماسية (القاصة) تؤخذ موجبة إذا كانت تؤثر على أوجه متقابلة بحيث تسبب دوران بعكس عقارب الساعة.



الشكل (2.10): مبادئ دائرة مور

من أجل المستوي AD لعنصر التربة المبين في الشكل (1a. 10)، فإن الإجهادات الشاقولية تساوي $+\sigma_x$ والإجهادات المماسية (القاصة) تساوي $+\tau_{xy}$ فنحصل على النقطة (R) المبينة في الشكل (2.10)، أما من أجل المستوي AB، فإن الإجهادات الشاقولية تساوي $+\sigma_y$ والإجهادات المماسية (القاصة) تساوي $-\tau_{xy}$ فنحصل على النقطة (M) المبينة في الشكل (2.10).

لو نظرنا إلى النقاط R و M في الشكل (2.10) والتي تمثل توضع الإجهادات على المستويات AD و AB على التوالي، وباعتبار أن النقطة O هي نقطة تقاطع محور الإجهادات الناعمية مع الخط RM، فنتشكل لدينا الدائرة MNQRS المرسومة بالمركز O ونصف القطر OR، هذه الدائرة تعرف على أنها دائرة مور لحالة الإجهادات المدروسة، نصف قطر هذه الدائرة يساوي إلى:

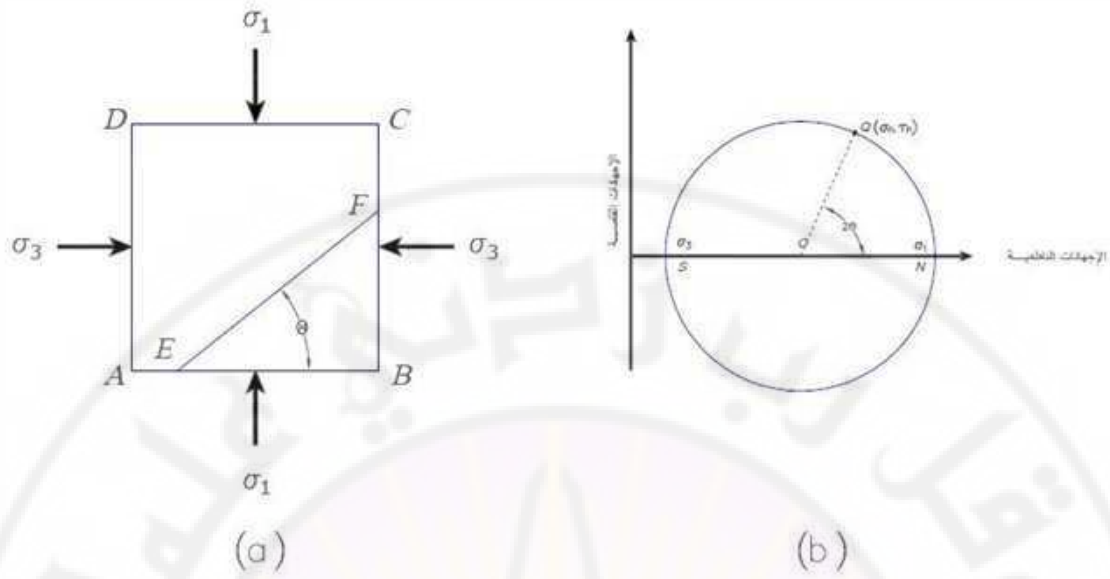
$$R = \sqrt{\left[\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2}$$

من خلال دائرة مور المبينة في الشكل (2.10)، يمكننا أن نحدد الإجهادات على المستوى EF بتحريك النقطة M بزاوية قيمتها 2θ عكس عقارب الساعة على طول محيط دائرة مور حتى الوصول إلى النقطة Q، وهذا ما يمثل ضعف الزاوية الذي يشكلها المستوى EF مع المستوى AB الموضحة في الشكل (a1.10) (عملاً بخواص الزوايا في الدائرة). إن الإحداثيات الأفقية والשאقولية للنقطة Q على التوالي تعطينا قيم الإجهادات الشاقولية σ_n وقيم الإجهادات المماسية (القص) τ_n على المستوى EF. ولأن الإحداثيات الشاقولية (وهي إجهادات مماسية) للنقاط N و S مساوية للصفر، فإنها تمثل قيم الإجهادات على المستويات الرئيسية، هنا وبحسب الشكل نجد أن الإحداثي الأفقي للنقطة N مساوية للقيمة σ_1 (المعادلة 6.10)، والإحداثي الأفقي للنقطة S مساوية للقيمة σ_3 (المعادلة 7.10). وكحالة خاصة، في حال كانت المستويات AB و AD مستويات رئيسية، فإن الإجهاد النازمي والإجهاد المماسي على المستوى EF يمكن أن نوجده بتعويض $\tau_{xy} = 0$ في المعادلات 3.10 و 4.10 فيظهر لدينا أن $\sigma_y = \sigma_1$ و $\sigma_x = \sigma_3$ (الشكل a3.10)، لذلك يمكننا أن نكتب:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (8.10) \square$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (9.10)$$

إن دائرة مور تمثل هذه الحالة المبينة في الشكل (b3.10)، نجد أن الإحداثيات الأفقية والإحداثيات الشاقولية للنقطة Q تعطي قيم الإجهاد الشاقولي والإجهاد المماسي (القص) على التوالي على المستوى EF.



الشكل (3.10): (a) عنصر تربة مع مستويات رئيسية AB وثنوية AD

(b) دائرة مور لعنصر التربة الظاهر في (a)

المثال 1.10:

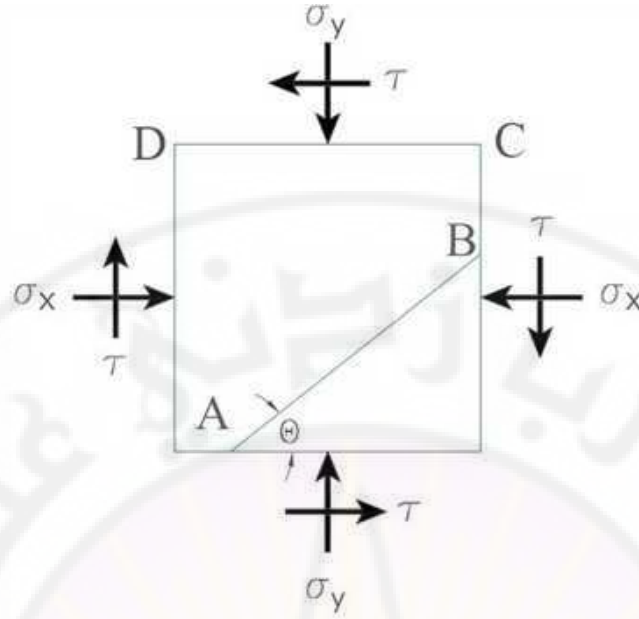
ليكن لدينا عنصر من جسم تربة والمبين في الشكل (4.10) فإذا كانت قيمة الإجهادات:
 $\sigma_x = 2000 \text{ lb/ft}^2$, $\tau = 800 \text{ lb/ft}^2$, $\sigma_y = 2500 \text{ lb/ft}^2$ وبفرض أن: $\theta = 20^\circ$.

المطلوب حساب:

a. قيمة الإجهادات الرئيسية.

b. الإجهادات النازمية وإجهادات القص على المستوي AB، استخدم المعادلات (3.10) -

(4.10 - 6.10 - 7.10)



الشكل 4.10 عنصر التربة مع الإجهادات المؤثرة عليه.

الحل:

الطلب a:

من المعادلات (6.10 – 7.10)، نستطيع حساب القيم التالية:

$$\begin{aligned} \{\sigma_3\} &= \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right]^2 + \tau_{xy}^2} \\ &= \frac{2500 + 2000}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{2500 - 2000}{2}\right]^2 + (-800)^2} \end{aligned}$$

$$\sigma_1 = 3088.15 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma_3 = 1411.85 \text{ lb/ft}^2$$

الطلب b:

من المعادلة (3.10) يمكننا تحديد قيمة الإجهاد الناظمي:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\theta + \tau \sin 2\theta$$

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{2500 + 2000}{2} + \frac{2500 - 2000}{2} \cos(2 \times 20) \\ &\quad + (-800) \sin(2 \times 20) \\ \sigma_n &= 1927.28 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

ومن المعادلة (4.10) يمكننا أن نحدد قيمة الاجهاد المماسي:

$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau \cos 2\theta$$

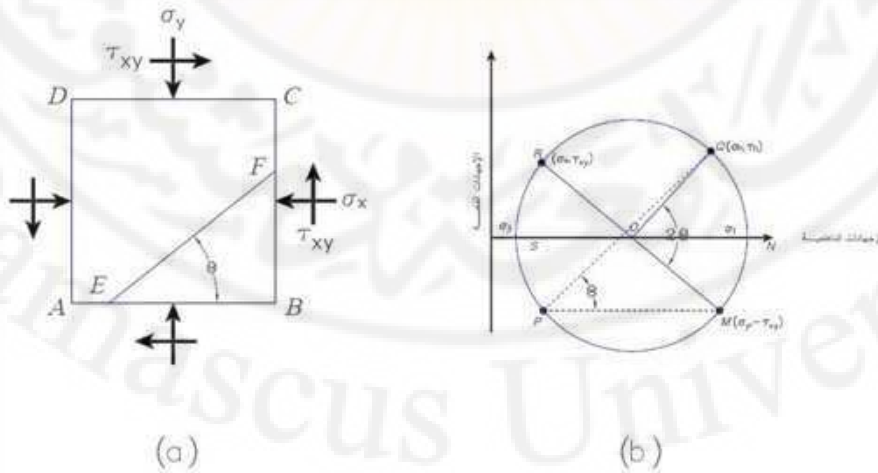
$$\tau_n = \frac{2500 - 2000}{2} \sin(2 \times 20) - (-800) \cos(2 \times 20) = 773.5 \text{ lb/ft}^2$$

2.10 نظرية القطب في إيجاد الإجهادات على طول مستوى

تقنية أخرى هامة تعتمد على دائرة مور تستخدمها في إيجاد الإجهادات على طول مستوى محدد ألا وهي نظرية القطب، أو نظرية مبدأ المستويات. هذه النظرية مشروحة في الشكل (5.10). الشكل (a5،10) يبين لنا نفس عنصر التربة والخاضع للإجهادات المطبقة في الشكل (a1.10).

الشكل (b5.10) هي دائرة مور من أجل تحديد حالة الإجهادات المؤثرة، ووفقاً لنظرية القطب، نرسم خط من نقطة معلومة من دائرة مور بشكل موازي للمستوي الذي تؤثر عليه الإجهادات، النقطة التي تتقاطع مع هذا الخط من محيط دائرة مور تسمى بالقطب، وهي نقطة وحيدة من أجل حساب الإجهادات المعتبرة.

مثال، من أجل النقطة M الواقعة على محيط دائرة مور المبينة في الشكل (b5.10) الممثلة للإجهادات المطبقة على المستوي AB، نقوم برسم الخط MP بشكل موازي للمستوي AB الأفقي، لذلك النقطة P هي القطب (أصل المستويات) في هذه الحالة، وإذا كنا نريد إيجاد الإجهادات على المستوي EF، يمكن أن نرسم من القطب P خط وبشكل موازي للمستوي EF، نقطة تقاطع هذا الخط مع محيط دائرة مور هي Q، إن إحداثيات النقطة Q تعطينا قيم الإجهادات المطبقة على المستوي EF، (ملاحظة: هندسياً، الزاوية QOM هي ضعف الزاوية QPM).



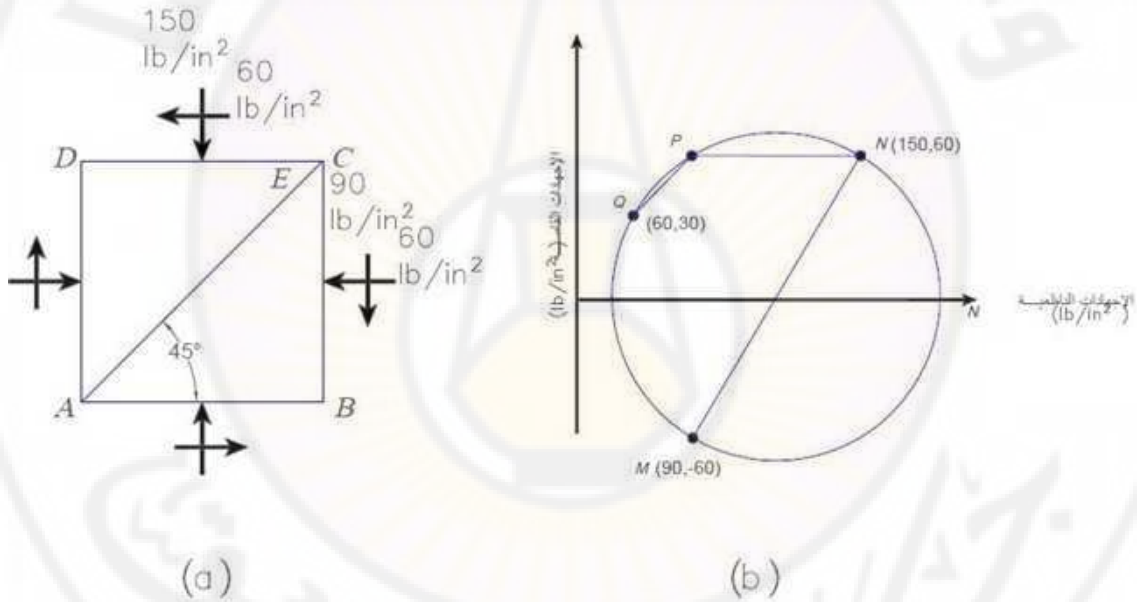
الشكل (5.10): (a) عنصر من التربة مبين عليه الإجهادات الناعظمية واجهادات القص المؤثرة عليه

(b) استخدام نظرية القطب في إيجاد الإجهادات على طول مستوى معين

المثال 2.10:

من أجل العنصر من جسم التربة والخاضع للإجهادات المبينة في الشكل (6a.10)، المطلوب تحديد:

- الإجهادات الأساسية الرئيسية.
 - الإجهادات الأساسية الثانوية.
 - الإجهادات النازمية والقاصة على المستوي AE.
- استخدم نظرية القطب للحل.



الشكل (6.10): (a) عنصر التربة مع الإجهادات المؤثرة عليه (b) دائرة مور.

الحل:

على المستوي AD:

$$\text{الإجهادات النازمية} = 90 \text{ lb/in}^2$$

$$\text{الإجهادات القاصة} = -60 \text{ lb/in}^2$$

على المستوي AB:

$$\text{الإجهادات النازمية} = 150 \text{ lb/in}^2$$

$$\text{الإجهادات القاصة} = 60 \text{ lb/in}^2$$

دائرة مور مرسومة في الشكل (6b.10)، ومن المخطط نجد:

الطلب a:

$$\square = 187.1 \text{ lb/in}^2 \text{ الاجهادات الأساسية الرئيسية}$$

الطلب b:

$$= 52.9 \text{ lb/in}^2 \text{ الاجهادات الأساسية الثانوية}$$

الطلب c:

الخط NP هو خط مرسوم بشكل موازي للمستوي CD، أما النقطة P فهي القطب، PQ مرسوم بشكل موازي للمستوي AE (انظر الشكل 6a.10)، إحداثيات النقطة Q يعطي الإجهادات على المستوي AE، لذلك:

$$= 60 \text{ lb/in}^2 \text{ الإجهادات الناعمة}$$

$$\square = 30 \text{ lb/in}^2 \text{ الإجهادات القاسية}$$

□

3.10 الإجهادات الناتجة بسبب حمل نقطي أو حمولة مركزة

قام السيد بوسينسك Boussinesq في العام (1883) بحل مسألة تحديد الإجهادات الناتجة عند أي نقطة في وسط ما يحقق الافتراضات التالية (الوسط المدروس هو وسط متجانس، مرن، متماثل الخواص) كنتيجة لحمل نقطي (مركز) مطبق على سطح كبير لا نهائي نصف فراغي.

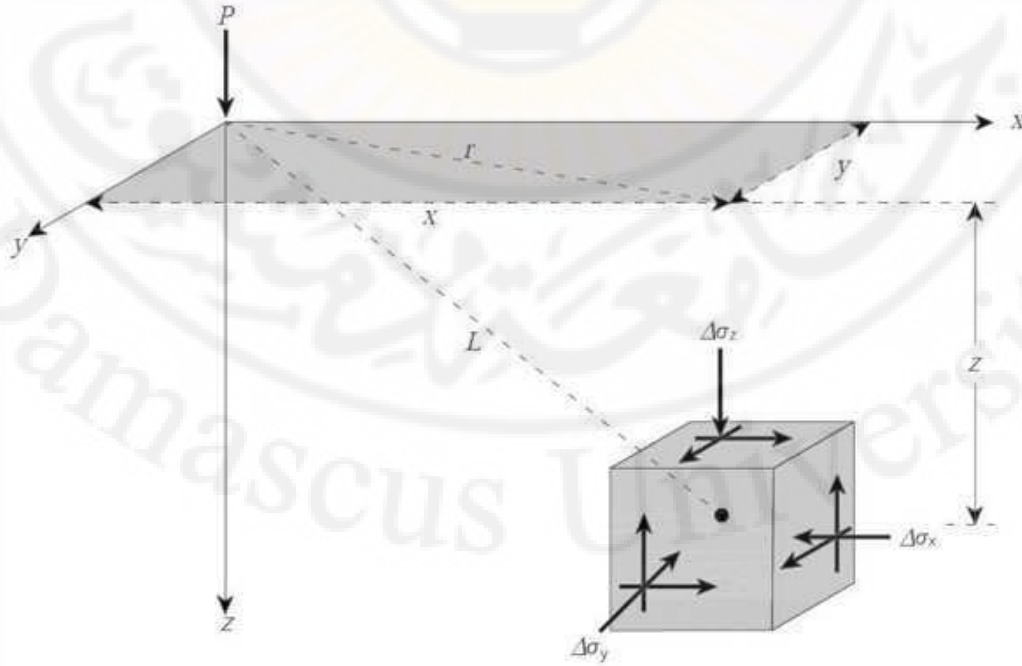
فوفقاً للشكل (7.10)، فإن حل بوسينسك Boussinesq لحساب الإجهادات الأفقية بكلا الإتجاهين وكذلك الإجهادات الشاقولية عند أي نقطة من نقاط الوسط بسبب هذا الحمل النقطي المركز والمطبق عند سطح الأرض يعطى بالمعادلات التالية:

$$\Delta\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3x^2z}{L^5} - (1 - 2\mu) \left[\frac{x^2 - y^2}{Lr^2(L + z)} + \frac{y^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad (10.10) \square$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3y^2z}{L^5} - (1 - 2\mu) \left[\frac{y^2 - x^2}{Lr^2(L + z)} + \frac{x^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad (11.10) \square$$

أما قيمة الاجهاد الشاقولي فتعطى بالمعادلة التالية:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{L^5} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (12.10) \square$$



الشكل (7،10): الإجهادات في أي نقطة من نقاط وسط مرن بسبب حمل نقطي (مركز)

حيث:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{r^2 + z^2}$$

معامل بواسون μ

وبملاحظة أن المعادلات (10.10 و 11.10) حسبت بناءً على قيم معامل بواسون للوسط المرن المدروس من التربة، في حين أن العلاقة التي تعطينا قيم الإجهادات الشاقولية الناعمية $\Delta\sigma_z$ ، كما هو مبين في المعادلة (12.10)، هي مستقلة عن قيم معامل بواسون، لذلك يمكننا إعادة كتابة علاقة $\Delta\sigma_z$ بالشكل التالي:

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{z^2} \left\{ \frac{3}{2\pi} \frac{1}{[(r/z)^2 + 1]^{5/2}} \right\} = \frac{P}{z^2} I_1 \quad (13.10)$$

حيث:

$$I_1 = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{[(r/z)^2 + 1]^{5/2}} \quad (14.10)$$

تغير القيمة اللابعدية I_1 من أجل قيم مختلفة للنسبة r/z مبينة في الجدول (1.10):

الجدول (1.10): تغير القيمة اللابعدية I_1 من أجل قيم مختلفة للنسبة r/z

r/z	I_1	r/z	I_1	r/z	I_1
0	0.4775	0.36	0.3521	1.80	0.0129
0.02	0.4770	0.38	0.3408	2.00	0.0085
0.04	0.4765	0.40	0.3294	2.20	0.0058
0.06	0.4723	0.45	0.3011	2.40	0.0040
0.08	0.4699	0.50	0.2733	2.60	0.0029
0.10	0.4657	0.55	0.2466	2.80	0.0021
0.12	0.4607	0.60	0.2214	3.00	0.0015
0.14	0.4548	0.65	0.1978	3.20	0.0011
0.16	0.4482	0.70	0.1762	3.40	0.00085
0.18	0.4409	0.75	0.1565	3.60	0.00066
0.20	0.4329	0.80	0.1386	3.80	0.00051
0.22	0.4242	0.85	0.1226	4.00	0.00040
0.24	0.4151	0.90	0.1083	4.20	0.00032
0.26	0.4050	0.95	0.0956	4.40	0.00026
0.28	0.3954	1.00	0.0844	4.60	0.00021
0.30	0.3849	1.20	0.0513	4.80	0.00017
0.32	0.3742	1.40	0.0317	5.00	0.00014
0.34	0.3632	1.60	0.0200		

المثال 3.10:

باعتبار لدينا حمل نقطي (مركز) قيمته $P = 5 \text{ kN}$ مطبق عند سطح الأرض (الشكل 7.10)، احسب الزيادة في الإجهادات الشاقولية ($\Delta\sigma_z$) عند الأعماق:

$$z = 0, 2 \text{ m}, 4 \text{ m}, 6 \text{ m}, 10 \text{ m}, 20 \text{ m}$$

ومعطى لدينا: $x = 3 \text{ m}$ ، $y = 4 \text{ m}$.

الحل:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ m}$$

وممكن الآن تنظيم الجدول التالي:

				$\Delta\sigma_z = \left(\frac{P}{z^2}\right) I_1$
$r \text{ (m)}$	$Z \text{ (m)}$	$\frac{r}{z}$	I_1	kN/m^2
5	0	∞	0	0

2	2.5	0.0034	0.0043
4	1.25	0.0424	0.0133
6	0.83	0.1295	0.0180
10	0.5	0.2733	0.0137
20	0.25	0.4103	0.0051

4.10 الإجهادات الشاقولية نتيجة حمل خطي شاقولي

الشكل (8.10) يظهر لنا حالة حمل خطي شاقولي مرن بطول لا نهائي وبشدة (واحدة الطول/q) مطبق على سطح كتلة تربة نصف لا نهائية.

إن زيادة الإجهادات الصافية الشاقولية $\Delta\sigma_z$ ، ضمن كتلة التربة وعند أي عمق (Z)، يمكن تحديدها باستخدام مبادئ نظرية المرونة من خلال المعادلة التالية:

$$\Delta\sigma_z = \frac{2q \cdot z^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (15.10)$$

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بالشكل:

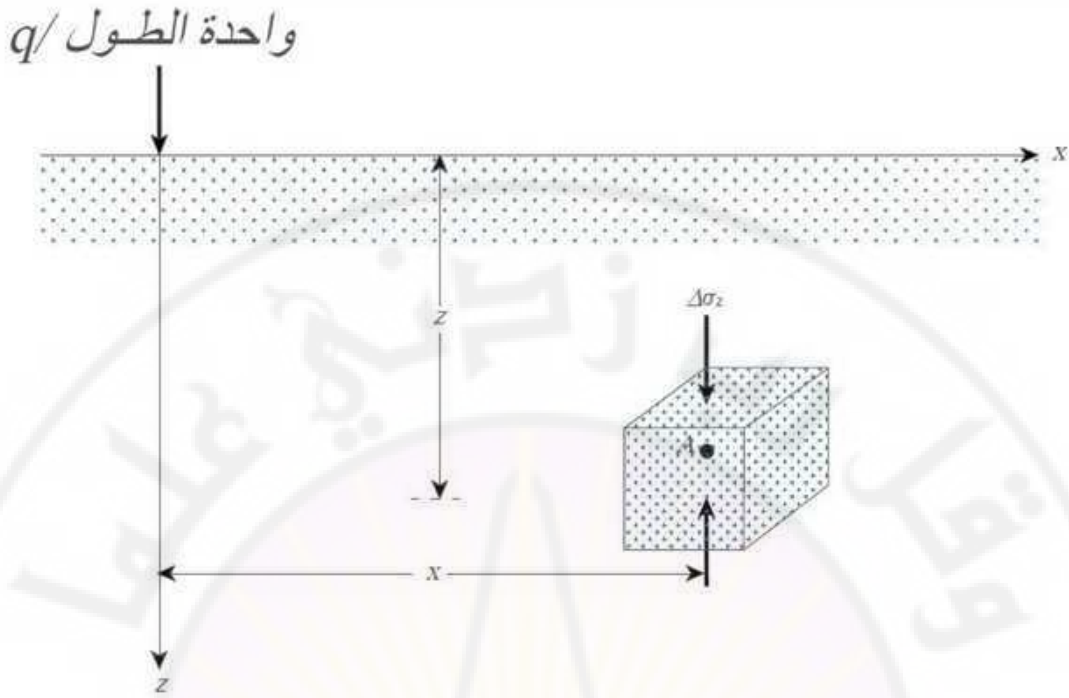
$$\Delta\sigma_z = \frac{2q}{\pi \cdot z \left[\left(\frac{x}{z} \right)^2 + 1 \right]^2} \square$$

أو بالشكل:

$$\frac{\Delta\sigma_z}{(q/z)} = \frac{2}{\pi[(x/z)^2 + 1]^2} \quad (16.10) \square$$

لاحظ أن المعادلة (16.10) هي بشكل لا بعدي، وباستخدام هذه المعادلة، يمكن حساب تغير النسبة $\Delta\sigma_z/(q/z)$ مع تغيرات النسبة x/z وهذا ما هو مبين في الجدول 2.10.

يجب علينا معرفة أن قيمة الزيادة الصافية للإجهاد الشاقولي $\Delta\sigma_z$ المحسوبة باستخدام المعادلة (16.10) هي قيمة الإجهاد الإضافية نتيجة الحمل الخطي المطبق عند سطح الأرض فقط، أي أن هذه القيمة $\Delta\sigma_z$ لا تتضمن الإجهاد الناتج عن الوزن الذاتي للتربة أعلى النقطة A.



الشكل (8.10): حمل خطي على سطح نصف لانهائي لكتلة تربة.

الجدول (2.10): تغير النسبة $\Delta\sigma_z/(q/z)$ مع تغير النسبة x/z

x/z	$\Delta\sigma_z/(q/z)$	x/z	$\Delta\sigma_z/(q/z)$
0	0.637	1.3	0.088
0.1	0.624	1.4	0.073
0.2	0.589	1.5	0.060
0.3	0.536	1.6	0.050
0.4	0.473	1.7	0.042
0.5	0.407	1.8	0.035
0.6	0.344	1.9	0.030
0.7	0.287	2.0	0.025
0.8	0.237	2.2	0.019
0.9	0.194	2.4	0.014
1.0	0.159	2.6	0.011
1.1	0.130	2.8	0.008
1.2	0.017	3.0	0.006

المثال 4.10:

الشكل (a9.10) يبين حملين مطبقين بشكل خطي على سطح التربة. والمطلوب حساب الزيادة في الإجهاد الشاقولي عند النقطة A الواقعة على عمق 4 ft من سطح الأرض.

الحل:

بالإشارة للشكل (b9.10)، فإن الإجهاد الكلي عند A هو:

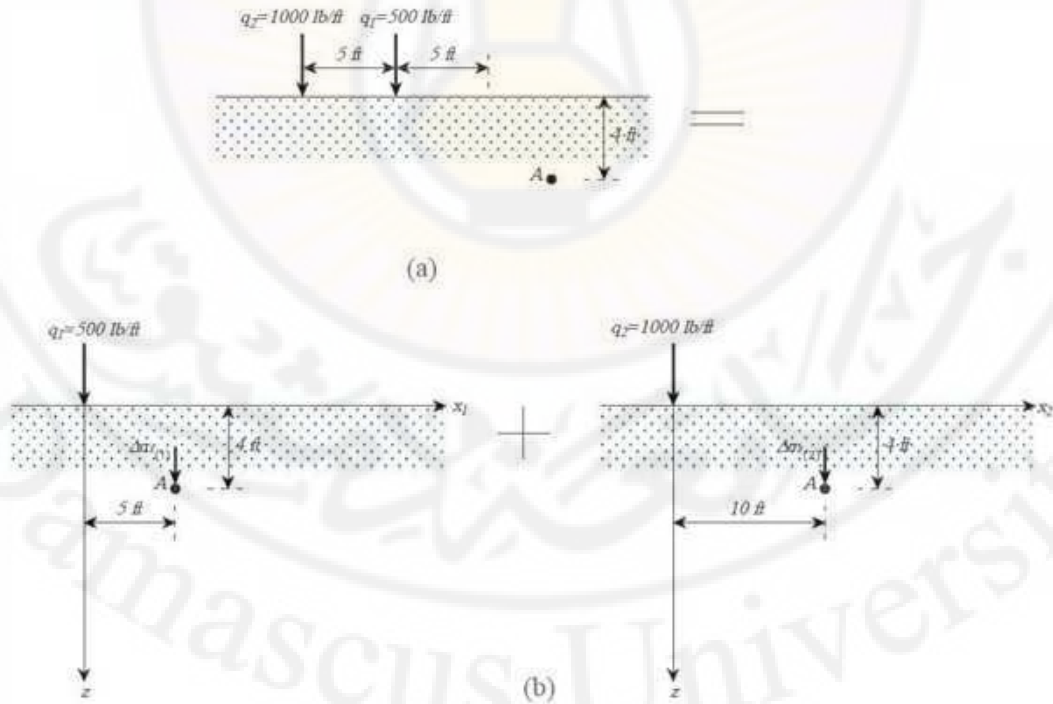
$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} + \Delta\sigma_{z(2)}$$

$$\Delta\sigma_{z(1)} = \frac{2q_1 z^3}{\pi(x_1^2 + z^2)^2} = \frac{(2)(500)(4)^3}{\pi(5^2 + 4^2)^2} = 12.12 \text{ lb/ft}^2$$

$$\Delta\sigma_{z(2)} = \frac{2q_2 z^3}{\pi(x_2^2 + z^2)^2} = \frac{(2)(1000)(4)^3}{\pi(10^2 + 4^2)^2} = 3.03 \text{ lb/ft}^2$$

وعليه، فإن الزيادة الكلية للإجهاد الشاقولي عند النقطة A ونتيجة الحملين الخطيين معاً هي:

$$\Delta\sigma_z = 12.12 + 3.03 = 15.15 \text{ lb/ft}^2$$



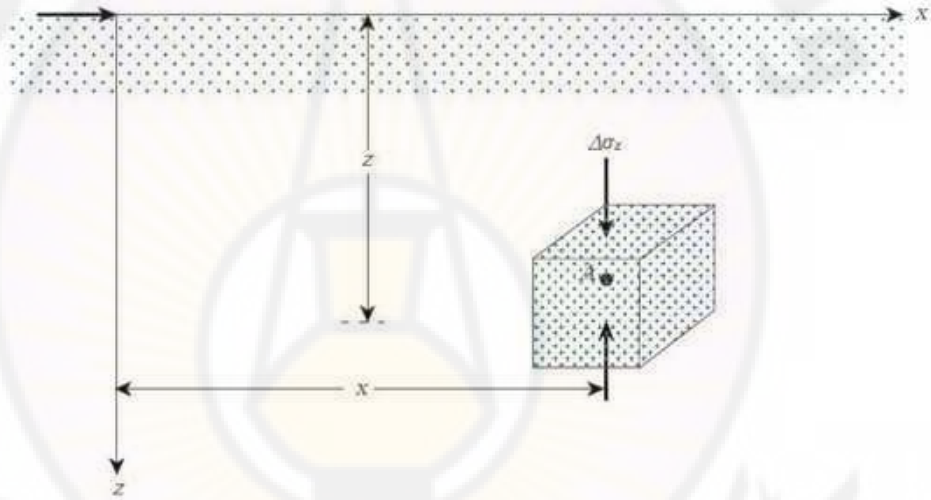
الشكل (9.10): (a) حملين خطيين على سطح التربة (b) استخدام مبدأ التظابق لتحديد الإجهاد عند النقطة A

5.10 الإجهادات الشاقولية نتيجة حمل خطي أفقي

الشكل (10.10) يظهر لنا حالة حمل خطي مرن أفقي مطبق على كتلة تربة من سطح نصف لا نهائي، في هذه الحالة من حالات التحميل، تعطى الزيادة الصافية لقيم الإجهاد الشاقولي عند أي نقطة A والواقعة ضمن كتلة التربة المدروسة وعلى عمق Z من سطح الأرض بالعلاقة التالية:

$$\Delta\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \frac{x \cdot z^2}{(x^2 + z^2)^2} \quad (17.10) \square$$

واحدة الطول / q



الشكل (10.10): حمولة خطية أفقية تؤثر على سطح نصف لا نهائي لكتلة التربة

أما في الجدول (3.10) فنبين تغير النسبة $\Delta\sigma_z/(q/z)$ مع تغير النسبة x/z لتحديد الزيادة الصافية في قيم الإجهاد الشاقولي عند أي نقطة من نقاط الوسط بطريقة جدولية.

□

الجدول (3.10): الجدول يظهر تغير $\Delta\sigma_z/(q/z)$ مع x/z

x/z	$\Delta\sigma_z/(q/z)$	x/z	$\Delta\sigma_z/(q/z)$
0	0	0.1	0.201
0.1	0.062	0.8	0.198
0.2	0.118	0.9	0.175
0.3	0.161	1.0	0.159
0.4	0.189	1.5	0.09
0.5	0.204	2.0	0.051
0.6	0.207	3.0	0.019

المثال 5.10:

لدينا حمل خطي مطبق بشكل مائل على سطح الأرض قيمته 1000 lb/ft كما هو مبين في الشكل (11.10). المطلوب، تقدير الزيادة في الإجهادات الشاقولية $\Delta\sigma_z$ عند النقطة A المبينة بالشكل وذلك بسبب تأثير هذا الحمل الخطي المائل.

الحل:

هنا لا بد من إيجاد مركبات هذا الحمل وهي:

- المركبة الشاقولية للحمل المائل: $q_v = 1000 \cos 20 = 939.7 \text{ lb/ft}$
- المركبة الأفقية للحمل المائل: $q_H = 1000 \sin 20 = 342 \text{ lb/ft}$

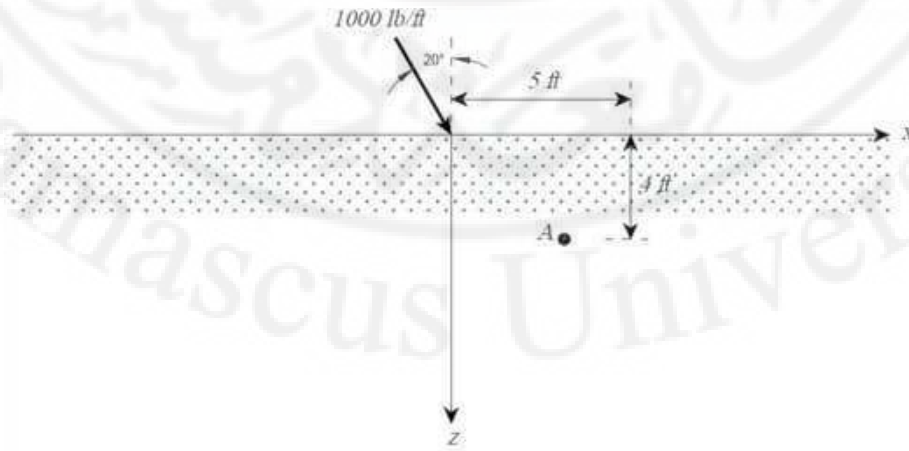
إحداثيات النقطة A : $x/z = 5/4 = 1.25$ ، وباستخدام الجدول (2.10)، (3.10)، نجد أن الزيادة في قيم الإجهاد الشاقولي عند النقطة A بسبب q_H ، q_v هي وكما هو مبين بالعلاقات التالية:

$$\frac{\Delta\sigma_{z(v)}}{\left(\frac{q_v}{z}\right)} = 0.098, \quad \Delta\sigma_{z(v)} = (0.098) \left(\frac{q_v}{z}\right) = (0.098) \left(\frac{939.7}{4}\right) = 23 \text{ lb/ft}^2 \square$$

$$\frac{\Delta\sigma_{z(H)}}{\left(\frac{q_H}{z}\right)} = 0.125, \quad \Delta\sigma_{z(H)} = (0.125) \left(\frac{q_H}{z}\right) = (0.125) \left(\frac{342}{4}\right) = 10.7 \text{ lb/ft}^2 \square$$

وبجمع الاثرين (الحمل الخطي الشاقولي، الحمل الخطي الأفقي) نحصل على الزيادة الصافية لقيم الاجهاد الشاقولي عند النقطة A من تأثير الحمل الخطي المائل :

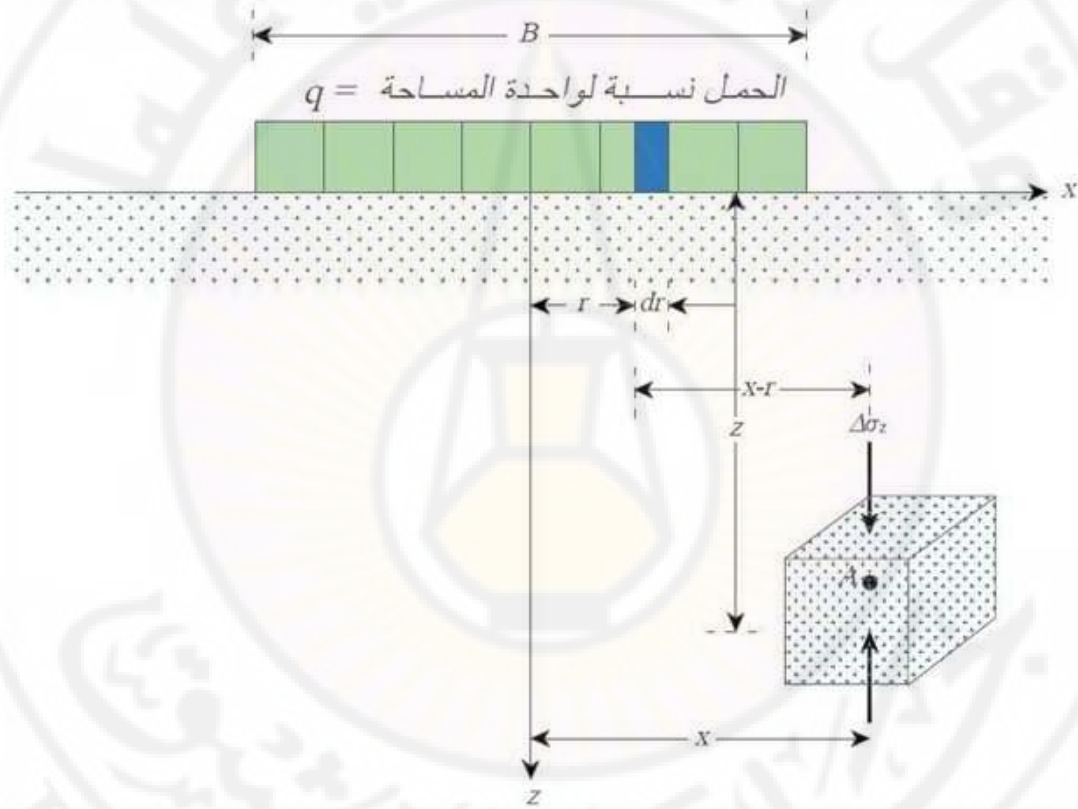
$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(v)} + \Delta\sigma_{z(H)} = 23 + 10.7 = 33.7 \text{ lb/ft}^2 \square$$



الشكل (11.10): حمل خطي مائل

6.10 الإجهاد الشاقولي نتيجة شريحة حمل شاقولي (بعرض محدد وطول غير محدد)

المعادلة الأساسية من أجل الزيادة الصافية في الإجهاد الشاقولي عند نقطة ما ضمن كتلة التربة نتيجة حمل خطي (انظر الفقرة 4.10) يمكن استخدامها لتحديد الإجهاد الشاقولي عند نقطة ما من خلال أخذ شريحة حمل مرنة بعرض B ، (انظر الشكل 12.10).



الشكل (12.10): الإجهاد الشاقولي نتيجة شريحة حمل مرنة

لنكن الحمولة لواءة المساحة للشريحة المبينة في الشكل (12.10) تساوي q ، وفي حال اعتبرنا شريحة لعنصر بعرض dr ، فإن الحمل لواءة الطول لهذه الشريحة مساوي إلى القيمة $dr \cdot q$ ، هذا العنصر (الشريحة) يمكن أن نعتبره حمل خطي مطبق على السطح.

وعليه فإن المعادلة (15.10) تمكننا من حساب زيادة الإجهادات الشاقولية $d\sigma_z$ عند النقطة A داخل كتلة التربة نتيجة الحمل ضمن الشريحة dr . ولحساب زيادة الإجهادات الشاقولية، نحتاج إلى تعويض:

q بدل q و $(x-r)$ بدل x ، لذلك نجد العلاقة التالية:

$$d\sigma_z = \frac{2(q \cdot dr)z^3}{\pi[(x-r)^2 + z^2]^2} \quad (18.10) \square$$

إن الزيادة الكلية في الإجهادات الشاقولية ($\Delta\sigma_z$) عند النقطة A نتيجة حمل الشريحة الكلي وبعرض B يمكن أن يحدد بمكاملة المعادلة (18.10) مع الحدود للقيمة r من $-B/2$ إلى $+B/2$ ، وعليه نحصل على المعادلة:

$$\Delta\sigma_z = \int d\sigma_z = \int_{-B/2}^{+B/2} \left(\frac{2q}{\pi} \right) \left\{ \frac{z^3}{[(x-r)^2 + z^2]^2} \right\} dr \square$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{z}{x - (B/2)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{z}{x + (B/2)} \right] \right. \\ \left. - \frac{Bz[x^2 - z^2 - (B^2/4)]}{[x^2 + z^2 - (B^2/4)]^2 + B^2z^2} \right\} \quad (19.10) \square$$

والجدول (4.10) يظهر لنا تغير القيم $\Delta\sigma_z/q$ مع تغير القيم $2x/B$ ، وهذا الجدول يمكن أن يستخدم بشكل ملائم لحسابات الإجهادات الشاقولية عند نقطة معينة بسبب حمل شريحة مرنة منتظم.

□

الجدول (4.10): يظهر لنا تغير القيم $\Delta\sigma_z/q$ مع تغير القيم $2x/B$.

يستخدم من أجل الحمولات الخطية الموزعة بانتظام

	2x/B										
2z/B	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
0.10	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.993	0.980	0.909	0.500
0.20	0.997	0.997	0.996	0.995	0.992	0.988	0.979	0.959	0.909	0.775	0.500
0.30	0.990	0.989	0.987	0.984	0.978	0.967	0.947	0.908	0.833	0.697	0.499
0.40	0.977	0.976	0.973	0.966	0.955	0.937	0.906	0.855	0.773	0.651	0.498
0.50	0.959	0.958	0.953	0.943	0.927	0.902	0.864	0.808	0.727	0.620	0.497
0.60	0.937	0.935	0.928	0.915	0.896	0.866	0.825	0.767	0.691	0.598	0.495
0.70	0.910	0.908	0.899	0.885	0.863	0.831	0.788	0.732	0.662	0.581	0.492
0.80	0.881	0.878	0.869	0.853	0.829	0.797	0.755	0.701	0.638	0.566	0.489
0.90	0.850	0.847	0.837	0.821	0.797	0.765	0.724	0.675	0.617	0.552	0.485
1.00	0.818	0.815	0.805	0.789	0.766	0.735	0.696	0.650	0.598	0.540	0.480
1.10	0.787	0.783	0.774	0.758	0.735	0.706	0.670	0.628	0.580	0.529	0.474
1.20	0.755	0.752	0.743	0.728	0.707	0.679	0.646	0.607	0.564	0.517	0.468
1.30	0.725	0.722	0.714	0.699	0.679	0.654	0.623	0.588	0.548	0.506	0.462
1.40	0.696	0.693	0.685	0.672	0.653	0.630	0.602	0.569	0.534	0.495	0.455
1.50	0.668	0.666	0.658	0.646	0.629	0.607	0.581	0.552	0.519	0.484	0.448
1.60	0.642	0.639	0.633	0.621	0.605	0.586	0.562	0.535	0.506	0.474	0.440
1.70	0.617	0.615	0.608	0.598	0.583	0.565	0.544	0.519	0.492	0.463	0.433
1.80	0.593	0.591	0.585	0.576	0.563	0.546	0.526	0.504	0.479	0.453	0.425
1.90	0.571	0.569	0.564	0.555	0.543	0.528	0.510	0.489	0.467	0.443	0.417
2.00	0.550	0.548	0.543	0.535	0.524	0.510	0.494	0.475	0.455	0.433	0.409
2.10	0.530	0.529	0.524	0.517	0.507	0.494	0.479	0.462	0.443	0.423	0.401
2.20	0.511	0.510	0.506	0.499	0.490	0.479	0.465	0.449	0.432	0.413	0.393
2.30	0.494	0.493	0.489	0.483	0.474	0.464	0.451	0.437	0.421	0.404	0.385
2.40	0.477	0.476	0.473	0.467	0.460	0.450	0.438	0.425	0.410	0.395	0.378
2.50	0.462	0.461	0.458	0.452	0.445	0.436	0.426	0.414	0.400	0.386	0.370
2.60	0.447	0.446	0.443	0.439	0.432	0.424	0.414	0.403	0.390	0.377	0.363
2.70	0.433	0.432	0.430	0.425	0.419	0.412	0.403	0.393	0.381	0.369	0.355
2.80	0.420	0.419	0.417	0.413	0.407	0.400	0.392	0.383	0.372	0.360	0.348
2.90	0.408	0.407	0.405	0.401	0.396	0.389	0.382	0.373	0.363	0.352	0.341
3.00	0.396	0.395	0.393	0.390	0.385	0.379	0.372	0.364	0.355	0.345	0.334
3.10	0.385	0.384	0.382	0.379	0.375	0.369	0.363	0.355	0.347	0.337	0.327
3.20	0.374	0.373	0.372	0.369	0.365	0.360	0.354	0.347	0.339	0.330	0.321
3.30	0.364	0.363	0.362	0.359	0.355	0.351	0.345	0.339	0.331	0.323	0.315
3.40	0.354	0.354	0.352	0.350	0.346	0.342	0.337	0.331	0.324	0.316	0.308
3.50	0.345	0.345	0.343	0.341	0.338	0.334	0.329	0.323	0.317	0.310	0.302
3.60	0.337	0.336	0.335	0.333	0.330	0.326	0.321	0.316	0.310	0.304	0.297
3.70	0.328	0.328	0.327	0.325	0.322	0.318	0.314	0.309	0.304	0.298	0.291
3.80	0.320	0.320	0.319	0.317	0.315	0.311	0.307	0.303	0.297	0.292	0.285
3.90	0.313	0.313	0.312	0.310	0.307	0.304	0.301	0.296	0.291	0.286	0.280
4.00	0.306	0.305	0.304	0.303	0.301	0.298	0.294	0.290	0.285	0.280	0.275
4.10	0.299	0.299	0.298	0.296	0.294	0.291	0.288	0.284	0.280	0.275	0.270
4.20	0.292	0.292	0.291	0.290	0.288	0.285	0.282	0.278	0.274	0.270	0.265
4.30	0.286	0.286	0.285	0.283	0.282	0.279	0.276	0.273	0.269	0.265	0.260
4.40	0.280	0.280	0.279	0.278	0.276	0.274	0.271	0.268	0.264	0.260	0.256
4.50	0.274	0.274	0.273	0.272	0.270	0.268	0.266	0.263	0.259	0.255	0.251
4.60	0.268	0.268	0.268	0.266	0.265	0.263	0.260	0.258	0.254	0.251	0.247
4.70	0.263	0.263	0.262	0.261	0.260	0.258	0.255	0.253	0.250	0.246	0.243
4.80	0.258	0.258	0.257	0.256	0.255	0.253	0.251	0.248	0.245	0.242	0.239
4.90	0.253	0.253	0.252	0.251	0.250	0.248	0.246	0.244	0.241	0.238	0.235
5.00	0.248	0.248	0.247	0.246	0.245	0.244	0.242	0.239	0.237	0.234	0.231

□

تابع الجدول (4.10)

$2z/B$	$2x/B$									
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.091	0.020	0.007	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
0.20	0.225	0.091	0.040	0.020	0.011	0.007	0.004	0.003	0.002	0.002
0.30	0.301	0.165	0.090	0.052	0.031	0.020	0.013	0.009	0.007	0.005
0.40	0.346	0.224	0.141	0.090	0.059	0.040	0.027	0.020	0.014	0.011
0.50	0.373	0.267	0.185	0.128	0.089	0.063	0.046	0.034	0.025	0.019
0.60	0.391	0.298	0.222	0.163	0.120	0.088	0.066	0.050	0.038	0.030
0.70	0.403	0.321	0.250	0.193	0.148	0.113	0.087	0.068	0.053	0.042
0.80	0.411	0.338	0.273	0.218	0.173	0.137	0.108	0.086	0.069	0.056
0.90	0.416	0.351	0.291	0.239	0.195	0.158	0.128	0.104	0.085	0.070
1.00	0.419	0.360	0.305	0.256	0.214	0.177	0.147	0.122	0.101	0.084
1.10	0.420	0.366	0.316	0.271	0.230	0.194	0.164	0.138	0.116	0.098
1.20	0.419	0.371	0.325	0.282	0.243	0.209	0.178	0.152	0.130	0.111
1.30	0.417	0.373	0.331	0.291	0.254	0.221	0.191	0.166	0.143	0.123
1.40	0.414	0.374	0.335	0.298	0.263	0.232	0.203	0.177	0.155	0.135
1.50	0.411	0.374	0.338	0.303	0.271	0.240	0.213	0.188	0.165	0.146
1.60	0.407	0.373	0.339	0.307	0.276	0.248	0.221	0.197	0.175	0.155
1.70	0.402	0.370	0.339	0.309	0.281	0.254	0.228	0.205	0.183	0.164
1.80	0.396	0.368	0.339	0.311	0.284	0.258	0.234	0.212	0.191	0.172
1.90	0.391	0.364	0.338	0.312	0.286	0.262	0.239	0.217	0.197	0.179
2.00	0.385	0.360	0.336	0.311	0.288	0.265	0.243	0.222	0.203	0.185
2.10	0.379	0.356	0.333	0.311	0.288	0.267	0.246	0.226	0.208	0.190
2.20	0.373	0.352	0.330	0.309	0.288	0.268	0.248	0.229	0.212	0.195
2.30	0.366	0.347	0.327	0.307	0.288	0.268	0.250	0.232	0.215	0.199
2.40	0.360	0.342	0.323	0.305	0.287	0.268	0.251	0.234	0.217	0.202
2.50	0.354	0.337	0.320	0.302	0.285	0.268	0.251	0.235	0.220	0.205
2.60	0.347	0.332	0.316	0.299	0.283	0.267	0.251	0.236	0.221	0.207
2.70	0.341	0.327	0.312	0.296	0.281	0.266	0.251	0.236	0.222	0.208
2.80	0.335	0.321	0.307	0.293	0.279	0.265	0.250	0.236	0.223	0.210
2.90	0.329	0.316	0.303	0.290	0.276	0.263	0.249	0.236	0.223	0.211
3.00	0.323	0.311	0.299	0.286	0.274	0.261	0.248	0.236	0.223	0.211
3.10	0.317	0.306	0.294	0.283	0.271	0.259	0.247	0.235	0.223	0.212
3.20	0.311	0.301	0.290	0.279	0.268	0.256	0.245	0.234	0.223	0.212
3.30	0.305	0.296	0.286	0.275	0.265	0.254	0.243	0.232	0.222	0.211
3.40	0.300	0.291	0.281	0.271	0.261	0.251	0.241	0.231	0.221	0.211
3.50	0.294	0.286	0.277	0.268	0.258	0.249	0.239	0.229	0.220	0.210
3.60	0.289	0.281	0.273	0.264	0.255	0.246	0.237	0.228	0.218	0.209
3.70	0.284	0.276	0.268	0.260	0.252	0.243	0.235	0.226	0.217	0.208
3.80	0.279	0.272	0.264	0.256	0.249	0.240	0.232	0.224	0.216	0.207
3.90	0.274	0.267	0.260	0.253	0.245	0.238	0.230	0.222	0.214	0.206
4.00	0.269	0.263	0.256	0.249	0.242	0.235	0.227	0.220	0.212	0.205
4.10	0.264	0.258	0.252	0.246	0.239	0.232	0.225	0.218	0.211	0.203
4.20	0.260	0.254	0.248	0.242	0.236	0.229	0.222	0.216	0.209	0.202
4.30	0.255	0.250	0.244	0.239	0.233	0.226	0.220	0.213	0.207	0.200
4.40	0.251	0.246	0.241	0.235	0.229	0.224	0.217	0.211	0.205	0.199
4.50	0.247	0.242	0.237	0.232	0.226	0.221	0.215	0.209	0.203	0.197
4.60	0.243	0.238	0.234	0.229	0.223	0.218	0.212	0.207	0.201	0.195
4.70	0.239	0.235	0.230	0.225	0.220	0.215	0.210	0.205	0.199	0.194
4.80	0.235	0.231	0.227	0.222	0.217	0.213	0.208	0.202	0.197	0.192
4.90	0.231	0.227	0.223	0.219	0.215	0.210	0.205	0.200	0.195	0.190
5.00	0.227	0.224	0.220	0.216	0.212	0.207	0.203	0.198	0.193	0.188

□

المثال 6.10:

بالإشارة للشكل (12.10)، وبفرض المعطيات التالية:

$$z = 3 \text{ m}, B = 6 \text{ m}, q = 200 \text{ kN/m}^2$$

المطلوب حساب الزيادة في الإجهادات الشاقولية عند : $x = \pm 9, \pm 6, \pm 3, 0 \text{ m}$ وارسم المخطط

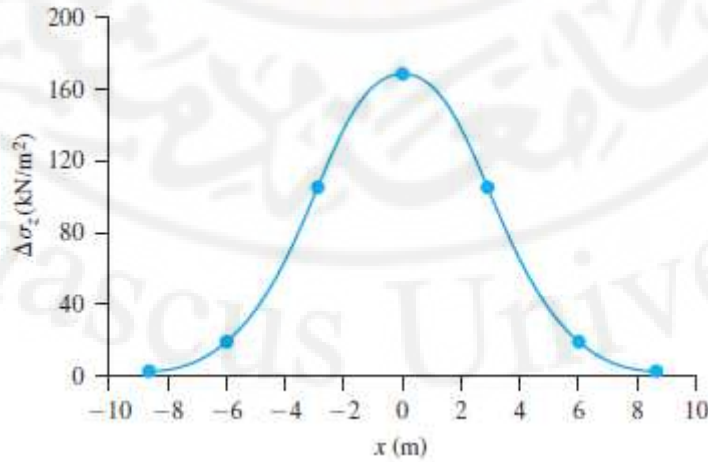
لتغير قيم $\Delta\sigma_z$ مقابل x .

الحل:

يمكن تنظيم الجدول التالي:

$X(\text{m})$	$2x/B$	$2z/B$	$\frac{\Delta\sigma_z}{q^a}$	$\Delta\sigma_z^b \text{ (kN/m}^2\text{)}$
± 9	± 3	1	0.017	3.4
± 6	± 2	1	0.084	16.8
± 3	± 1	1	0.480	96.0
0	0	1	0.818	163.6
من الجدول (4.10)		$b_q = 200 \text{ kN/m}^2$		

ومخطط $\Delta\sigma_z$ مقابل تغير المسافة x معطى في الشكل (13.10).



الشكل (13.10): مخطط $\Delta\sigma_z$ مع المسافة x

□

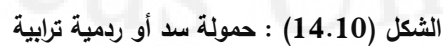


الشكل (14.10) يظهر لنا مقطع عرضي لسد ترابي بارتفاع H ، ومن أجل حالة هذا الحمل ثنائي البعد فإن الزيادة الصافية للإجهادات الشاقولية يمكن التعبير عنها بالشكل التالي:

حیث:

γ = الوزن الحجمي لتربة السد أو الردمية الترابية.

$H =$ ارتفاع السد أو الردمية الترابية.



أما المتغيرات α_1 ، α_2 ، فتحسب من خلال العلاقات التالية:

$$\alpha_1(\text{radians}) = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 + B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (21.10) \quad \square$$

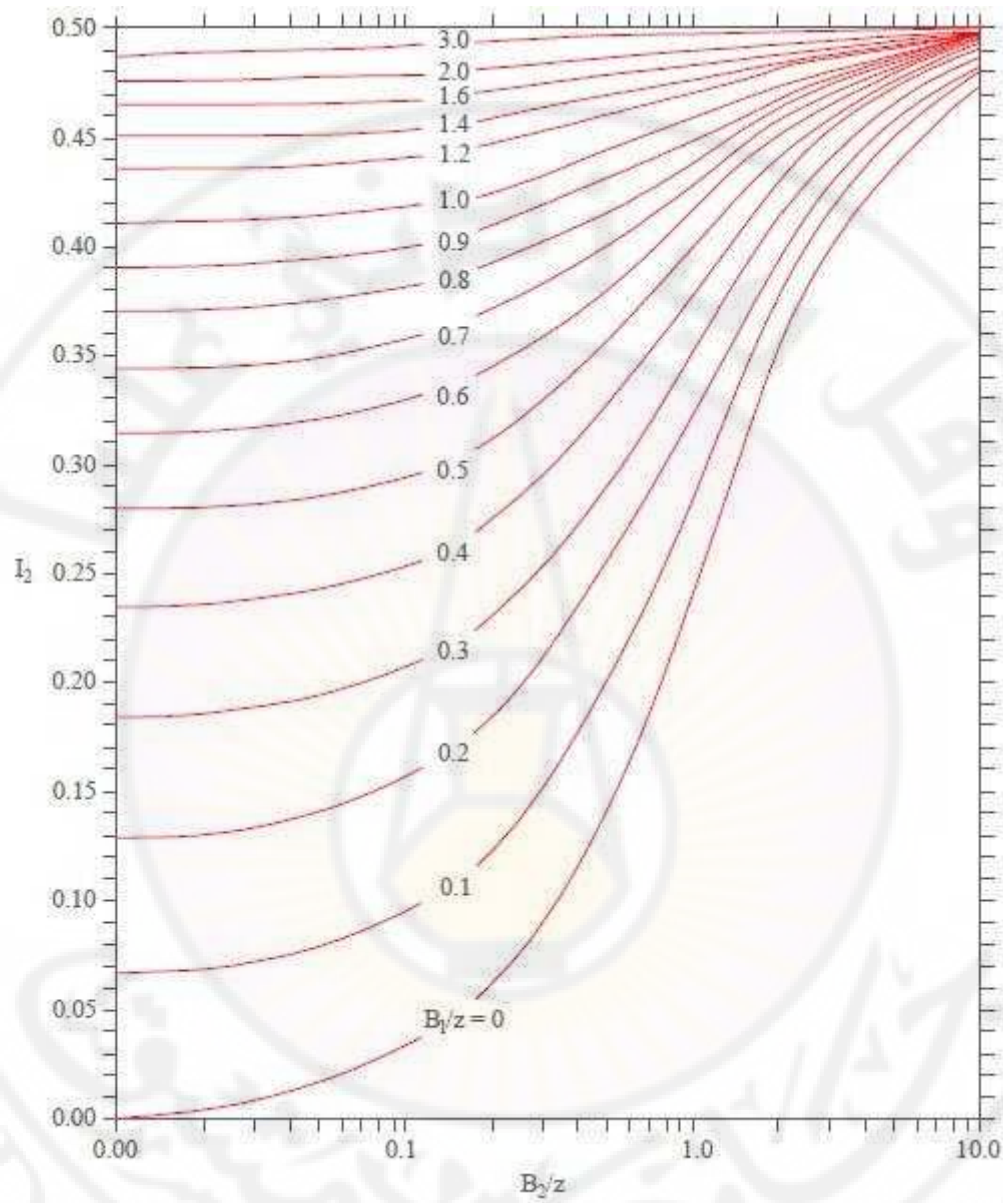
$$\alpha_2(\text{radians}) = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (22.10) \quad \square$$

ومن أجل معرفة وشرح مفصل أكثر لإيجاد المعادلة، انظر المرجع (Das (2008)، حيث تم عرض شرح وشكل مفصل أكثر للمعادلة (20.10) وهي:

$$\Delta\sigma_z = q_0 \cdot I_2 \quad (23.10)$$

حيث I_2 = تابع للمتغيرين B_1/z و B_2/z ، وهنا يمكننا استخدام الطريقة الجدولية لتحديد الاجهاد الشاقولي الناتج من حمولة السد أو الردمية الترابية. وتغير I_2 مع B_1/z و B_2/z مبين في الشكل (15.10) حسب (Osterberg)، (1957).

□

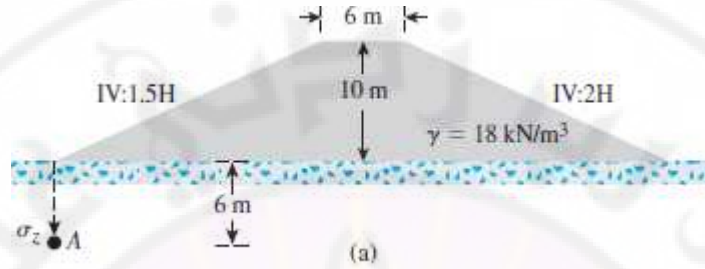


الشكل (15.10): مخطط Osterberg لتحديد الإجهادات الشاقولية بسبب حمل السد أو الردمية الترابية

□

المثال 7.10:

لدينا سد ترابي مبين في الشكل (16.10)، المطلوب تحديد زيادة الإجهادات الشاقولية تحت السد عند النقطة A.



الشكل (16.10)

الحل:

بالإشارة للشكل (b,c 16.10)

عند النقطة A:

$$\Delta\sigma_z = \sigma_{z(1)} - \sigma_{z(2)} \square$$

$$q_{0(1)} = q_{2(2)} = (10)(18) = 180 \text{ kN/m}^2$$

من الشكل (b16,10)، لدينا الأبعاد: $B_1 = 21 \text{ m}$ ، $B_2 = 20 \text{ m}$ ، لذلك نحصل على النسب التالية:

$$\frac{B_1}{z} = \frac{21}{6} = 3.5, \quad \frac{B_2}{z} = \frac{20}{6} = 3.33 \square$$

وبالتالي من الشكل (15,10)، نستطيع الحصول على القيمة: $I_{2(1)} \approx 0.495$.

أيضاً من الشكل (c16,10)، لدينا الأبعاد: $B_1 = 0$ و $B_2 = 15 \text{ m}$ ، لذلك نحصل على النسب التالية:

$$\frac{B_1}{z} = \frac{0}{6} = 0, \quad \frac{B_2}{z} = \frac{15}{6} = 2.5 \square$$

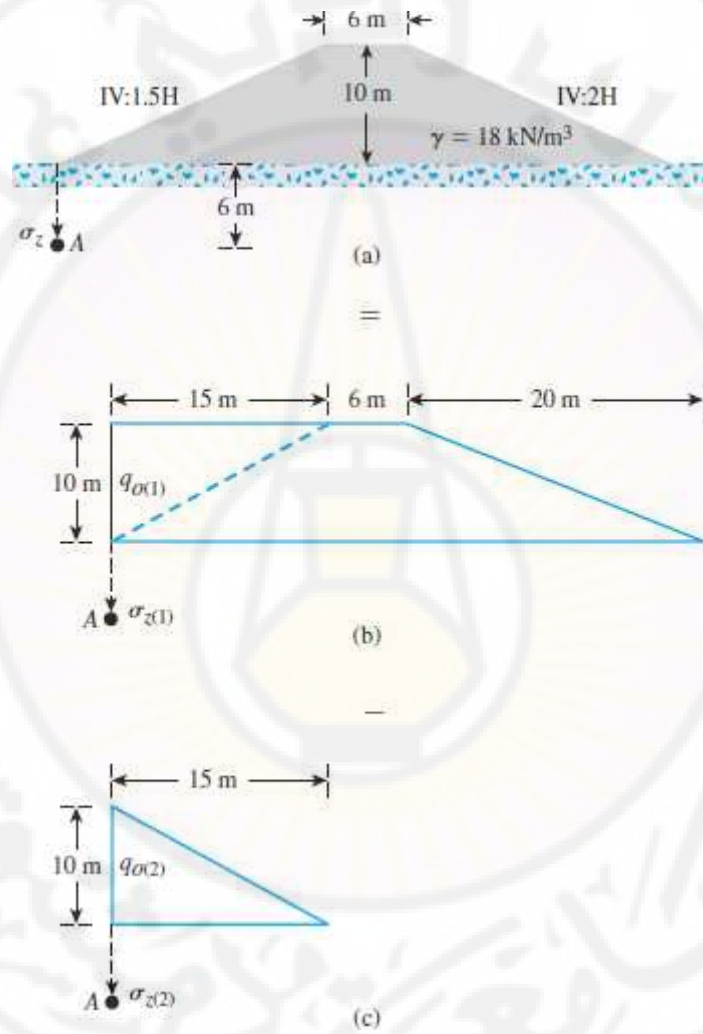
ومن الشكل (15,10)، نستطيع الحصول على القيمة: $I_{2(2)} \approx 0.39$.

□



وعليه، يمكننا الآن حساب الزيادة في قيمة الاجهاد الشاقولي عند النقطة A من خلال:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_{z(1)} - \sigma_{z(2)} = q_{0(1)}I_{2(1)} - q_{0(2)}I_{2(2)} = 180[0.490 - 0.39] \\ &= 18.9 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$



الشكل (16.10)

□

8.10 الإجهاد الشاقولي تحت مركز حمولة منتظمة مطبقة على أساس

دائري الشكل

باستخدام حل بوسينسك Boussinesq للإجهاد الشاقولي $\Delta\sigma_z$ نتيجة حمل نقطي مركز كما تمّ عرضه في المعادلة (12.10)، يمكن الانطلاق منه وتطوير علاقة أخرى لحساب الإجهاد الشاقولي تحت تأثير حمولة مرنة منتظمة بشكل دائري.

من الشكل (17.10)، ولتكن شدة الضغط الذي تسببه الحمولة الدائرية ذات نصف القطر R تساوي إلى q، فإن الحمل الكلي على العنصر المساحي (الجزء المظلل في الشكل) مساوي إلى القيمة $d\alpha.dr.qr$ ، وعليه فإن الزيادة في قيم الإجهاد الشاقولي $d\sigma_z$ عند النقطة A نتيجة الحمل على العنصر المساحي (والتي ممكن أن تفرض كحمل مركز) يمكن أن نجده من المعادلة (12.10) والتي تكتب بالشكل:

$$d\sigma_z = \frac{3(qr \cdot dr \cdot d\alpha)}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (24.10) \square$$

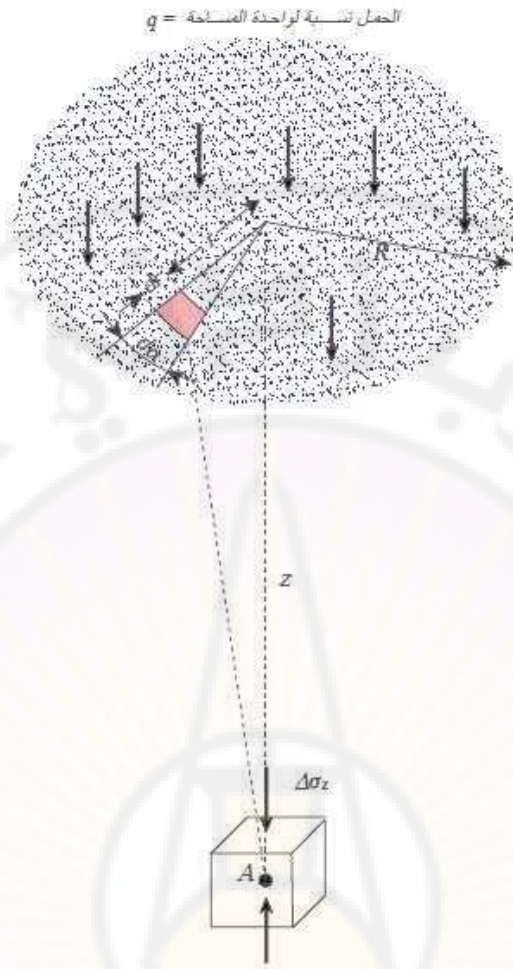
الزيادة في الإجهاد عند النقطة A بسبب كامل الحمل الدائري يمكن أن تحسب بمكاملة المعادلة (24.10) كما هو مبين بالعلاقة التالية:

$$\Delta\sigma_z = \int d\sigma_z = \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \int_{r=0}^{r=R} \frac{3q}{2\pi} \frac{z^3 r}{(r^2 + z^2)^{5/2}} dr \cdot d\alpha \square$$

لذلك نجد الشكل النهائي لقيم الزيادة في الإجهادات الشاقولية من خلال المعادلة:

$$\Delta\sigma_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}} \right\} \quad (25.10) \square$$

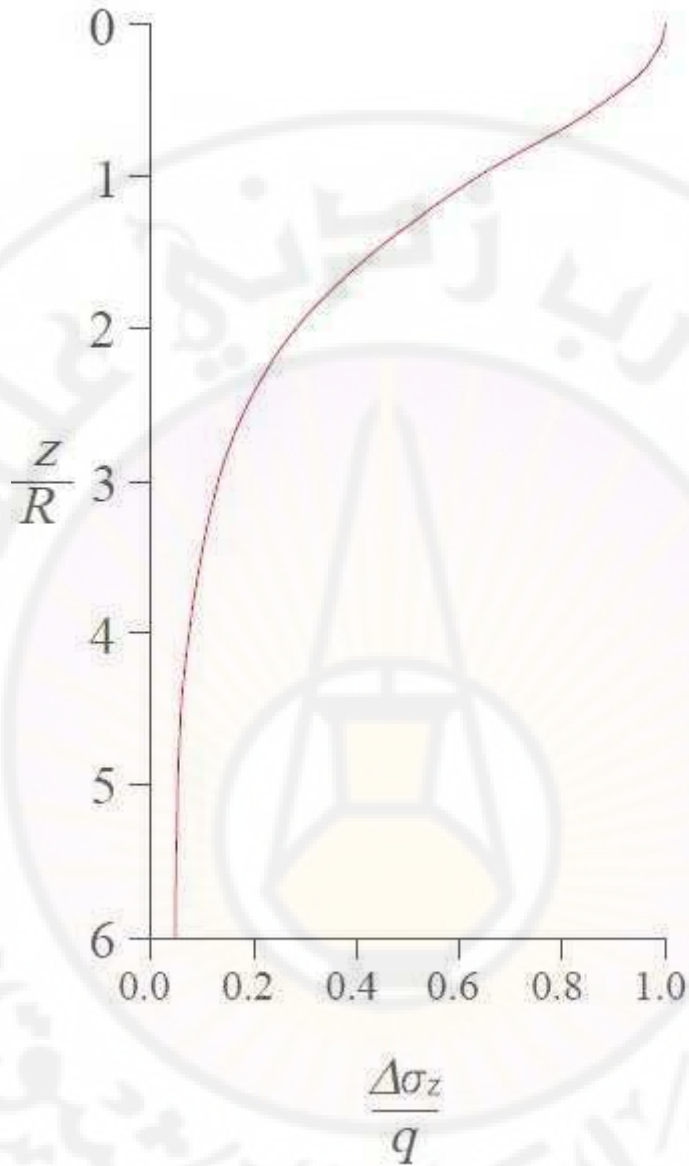
إن تغير قيم $\Delta\sigma_z/q$ مع تغير قيم z/R تم حسابه من المعادلة (25.10) والنتائج معطاة في الجدول (5.10).



الشكل (17.10): الإجهاد الشاقولي تحت حمل مساحي دائري منتظم مرن

الجدول (5.10): تغير قيم $\Delta\sigma_z/q$ مع تغير قيم z/R تم حسابه من المعادلة (25.10)

z/R	$\Delta\sigma_z/q$	z/R	$\Delta\sigma_z/q$
0	1.0000	1.0	0.6465
0.02	0.9999	1.5	0.4240
0.05	0.9998	2.0	0.2845
0.1	0.9990	2.5	0.1996
0.2	0.9925	3.0	0.14136
0.4	0.9488	4.0	0.0869
0.5	0.9106	5.0	0.0571
0.8	0.7562		



الشكل (18.10): الإجهاد تحت مركز حمل مساحي دائري مرن منتظم.

المخطط المبين في الشكل (18.10) يظهر أن قيمة $\Delta\sigma_z$ تتناقص بشكل سريع مع العمق، وعند العمق $z = 5R$ ، هي تقريباً 6% من قيمة q ، والتي هي شدة الضغط المطبق عند سطح الأرض.

□

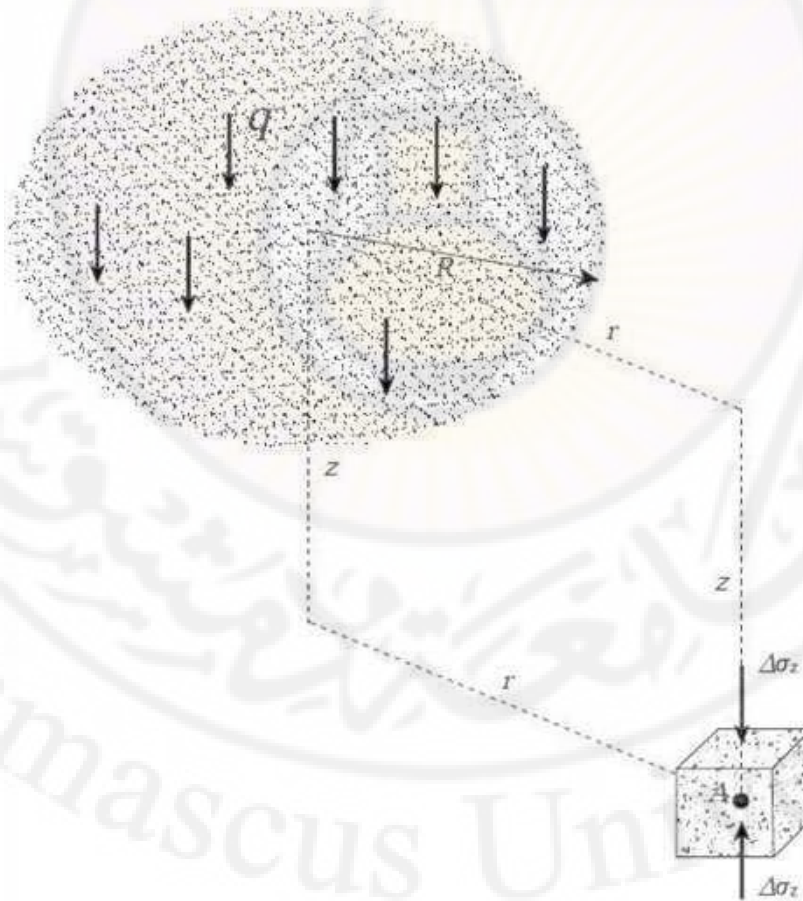
9.10 الإجهاد الشاقولي عند أي نقطة من الوسط وواقعة تحت أساس

دائري الشكل محمل بحمولة منتظمة

تم تقديم جداول مفصلة لحساب الإجهاد الشاقولي والنتائج من تأثير حمل مطبق بشكل منتظم على أساس مرن دائري الشكل من قبل Ahlvin and Ulery في العام (1962). وبالإشارة للشكل (19.10)، يمكن أن نجد أن $\Delta\sigma_z$ عن أي نقطة A متوضعة عند عمق Z وعند أي مسافة r من مركز الحمل المساحي يمكن أن يعطى بالعلاقة:

$$\Delta\sigma_z = q(A' + B') \quad (26.10)$$

حيث A' و B' هي تابعة للمتغيرين r/R و z/R (انظر الجداول 6.10 و 7.10).



الشكل (19.10): الإجهاد الشاقولي عند أي نقطة تحت حمل منتظم دائري المساحة.

□



الجدول (6.10): تغيرات A' مع تغير z/R و r/R

z/R	r/R								
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0	0	0
0.1	0.90050	0.89748	0.88679	0.86126	0.78797	0.43015	0.09645	0.02787	0.00856
0.2	0.80388	0.79824	0.77884	0.73483	0.63014	0.38269	0.15433	0.05251	0.01680
0.3	0.71265	0.70518	0.68316	0.62690	0.52081	0.34375	0.17964	0.07199	0.02440
0.4	0.62861	0.62015	0.59241	0.53767	0.44329	0.31048	0.18709	0.08593	0.03118
0.5	0.55279	0.54403	0.51622	0.46448	0.38390	0.28156	0.18556	0.09499	0.03701
0.6	0.48550	0.47691	0.45078	0.40427	0.33676	0.25588	0.17952	0.10010	
0.7	0.42654	0.41874	0.39491	0.35428	0.29833	0.21727	0.17124	0.10228	0.04558
0.8	0.37531	0.36832	0.34729	0.31243	0.26581	0.21297	0.16206	0.10236	
0.9	0.33104	0.32492	0.30669	0.27707	0.23832	0.19488	0.15253	0.10094	
1	0.29289	0.28763	0.27005	0.24697	0.21468	0.17868	0.14329	0.09849	0.05185
1.2	0.23178	0.22795	0.21662	0.19890	0.17626	0.15101	0.12570	0.09192	0.05260
1.5	0.16795	0.16552	0.15877	0.14804	0.13436	0.11892	0.10296	0.08048	0.05116
2	0.10557	0.10453	0.10140	0.09647	0.09011	0.08269	0.07471	0.06275	0.04496
2.5	0.07152	0.07098	0.06947	0.06698	0.06373	0.05974	0.05555	0.04880	0.03787
3	0.05132	0.05101	0.05022	0.04886	0.04707	0.04487	0.04241	0.03839	0.03150
4	0.02986	0.02976	0.02907	0.02802	0.02832	0.02749	0.02651	0.02490	0.02193
5	0.01942	0.01938				0.01835			0.01573
6	0.01361					0.01307			0.01168
7	0.01005					0.00976			0.00894
8	0.00772					0.00755			0.00703
9	0.00612					0.00600			0.00566
10								0.00477	0.00465

* Source: From Ahlvin, R. G., and H. H. Ulery. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space. In Highway Research Bulletin 342, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1962, Tables 1 and 2, p. 3. Reproduced with permission of the Transportation Research Board.

3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.00211	0.00084	0.00042						
0.00419	0.00167	0.00083	0.00048	0.00030	0.00020			
0.00622	0.00250							
0.01013	0.00407	0.00209	0.00118	0.00071	0.00053	0.00025	0.00014	0.00009
0.01742	0.00761	0.00393	0.00226	0.00143	0.00097	0.00050	0.00029	0.00018
0.01935	0.00871	0.00459	0.00269	0.00171	0.00115			
0.02142	0.01013	0.00548	0.00325	0.00210	0.00141	0.00073	0.00043	0.00027
0.02221	0.01160	0.00659	0.00399	0.00264	0.00180	0.00094	0.00056	0.00036
0.02143	0.01221	0.00732	0.00463	0.00308	0.00214	0.00115	0.00068	0.00043
0.01980	0.01220	0.00770	0.00505	0.00346	0.00242	0.00132	0.00079	0.00051
0.01592	0.01109	0.00768	0.00536	0.00384	0.00282	0.00160	0.00099	0.00065
0.01249	0.00949	0.00708	0.00527	0.00394	0.00298	0.00179	0.00113	0.00075
0.00983	0.00795	0.00628	0.00492	0.00384	0.00299	0.00188	0.00124	0.00084
0.00784	0.00661	0.00548	0.00445	0.00360	0.00291	0.00193	0.00130	0.00091
0.00635	0.00554	0.00472	0.00398	0.00332	0.00276	0.00189	0.00134	0.00094
0.00520	0.00466	0.00409	0.00353	0.00301	0.00256	0.00184	0.00133	0.00096
0.00438	0.00397	0.00352	0.00326	0.00273	0.00241			

□

الجدول (7.10): تغيرات B' مع تغيرات z/R و r/R

z/R	r/R								
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.09852	0.10140	0.11138	0.13424	0.18796	0.05388	-0.07899	-0.02672	-0.00845
0.2	0.18857	0.19306	0.20772	0.23524	0.25983	0.08513	-0.07759	-0.04448	-0.01593
0.3	0.26362	0.26787	0.28018	0.29483	0.27257	0.10757	-0.04316	-0.04999	-0.02166
0.4	0.32016	0.32259	0.32748	0.32273	0.26925	0.12404	-0.00766	-0.04535	-0.02522
0.5	0.35777	0.35752	0.35323	0.33106	0.26236	0.13591	0.02165	-0.03455	-0.02651
0.6	0.37831	0.37531	0.36308	0.32822	0.25411	0.14440	0.04457	-0.02101	
0.7	0.38487	0.37962	0.36072	0.31929	0.24638	0.14986	0.06209	-0.00702	-0.02329
0.8	0.38091	0.37408	0.35133	0.30699	0.23779	0.15292	0.07530	0.00614	
0.9	0.36962	0.36275	0.33734	0.29299	0.22891	0.15404	0.08507	0.01795	
1	0.35355	0.34553	0.32075	0.27819	0.21978	0.15355	0.09210	0.02814	-0.01005
1.2	0.31485	0.30730	0.28481	0.24836	0.20113	0.14915	0.10002	0.04378	0.00023
1.5	0.25602	0.25025	0.23338	0.20694	0.17368	0.13732	0.10193	0.05745	0.01385
2	0.17889	0.18144	0.16644	0.15198	0.13375	0.11331	0.09254	0.06371	0.02836
2.5	0.12807	0.12633	0.12126	0.11327	0.10298	0.09130	0.07869	0.06022	0.03429
3	0.09487	0.09394	0.09099	0.08635	0.08033	0.07325	0.06551	0.05354	0.03511
4	0.05707	0.05666	0.05562	0.05383	0.05145	0.04773	0.04532	0.03995	0.03066
5	0.03772	0.03760				0.03384			0.02474
6	0.02666					0.02468			0.01968
7	0.01980					0.01868			0.01577
8	0.01526					0.01459			0.01279
9	0.01212					0.01170			0.01054
10								0.00924	0.00879

*Source: From Ahlvin, R. G., and H. H. Ulery. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space. In Highway Research Bulletin 342, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1962, Tables 1 and 2, p. 3. Reproduced with permission of the Transportation Research Board.

3	4	5	6	7	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.00210	-0.00084	-0.00042						
-0.00412	-0.00166	-0.00083	-0.00024	-0.00015	-0.00010			
-0.00599	-0.00245							
-0.00991	-0.00388	-0.00199	-0.00116	-0.00073	-0.00049	-0.00025	-0.00014	-0.00009
-0.01115	-0.00608	-0.00344	-0.00210	-0.00135	-0.00092	-0.00048	-0.00028	-0.00018
-0.00995	-0.00632	-0.00378	-0.00236	-0.00156	-0.00107			
-0.00669	-0.00600	-0.00401	-0.00265	-0.00181	-0.00126	-0.00068	-0.00040	-0.00026
0.00028	-0.00410	-0.00371	-0.00278	-0.00202	-0.00148	-0.00084	-0.00050	-0.00033
0.00661	-0.00130	-0.00271	-0.00250	-0.00201	-0.00156	-0.00094	-0.00059	-0.00039
0.01112	0.00157	-0.00134	-0.00192	-0.00179	-0.00151	-0.00099	-0.00065	-0.00046
0.01515	0.00595	0.00155	-0.00029	-0.00094	-0.00109	-0.00094	-0.00068	-0.00050
0.01522	0.00810	0.00371	0.00132	0.00013	-0.00043	-0.00070	-0.00061	-0.00049
0.01380	0.00867	0.00496	0.00254	0.00110	0.00028	-0.00037	-0.00047	-0.00045
0.01204	0.00842	0.00547	0.00332	0.00185	0.00093	-0.00002	-0.00029	-0.00037
0.01034	0.00779	0.00554	0.00372	0.00236	0.00141	0.00035	-0.00008	-0.00025
0.00888	0.00705	0.00533	0.00386	0.00265	0.00178	0.00066	0.00012	-0.00012
0.00764	0.00631	0.00501	0.00382	0.00281	0.00199			

المثال 8.10:

باعتبار الحمل المنتظم لأساس مرن دائري الشكل على سطح الأرض، كما هو مبين في الشكل (19.10)، وبفرض المعطيات التالية:

$$R = 3\text{m}, \text{ وحمل منتظم } q = 100 \text{ kN/m}^2$$

احسب الزيادة في الإجهادات الشاقولية عند الأعماق : 1.5 m, 3m, 4.5m, 6m , 12m أسفل سطح الأرض للنقاط بفرض أن:

$$(a) r = 0, \square$$

$$(b) r = 4.5 \text{ m.} \square$$

الحل:

من المعادلة (26.10):

$$\Delta\sigma_z = q(A' + B') \square$$

معطى لدينا: $q = 100 \text{ kN/m}^2, R = 3\text{m}$

الجزء (a): (ملاحظة: $r/R = 0$ وقيم A', B' من الجداول 6.10، 7.10).

العمق: z (m)	Z/R	A'	B'	$\Delta\sigma_z \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \square$
1.5	0.5	0.553	0.358	91.1
3	1.0	0.293	0.354	64.7
4.5	1.5	0.168	0.256	42.4
6	2.0	0.106	0.179	28.5
12	4.0	0.03	0.057	8.7

$\square$

الجزء (b): (ملاحظة: $\frac{r}{R} = \frac{4.5}{3} = 1.5$ وقيم A', B' من الجداول 6.10، 7.10)

العمق: z (m)	Z/R	A'	B'	$\Delta\sigma_z \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \square$
1.5	0.5	0.095	-0.035	6.0
3	1.0	0.098	0.028	12.6
4.5	1.5	0.08	0.057	13.7
6	2.0	0.063	0.064	12.7
12	4.0	0.025	0.04	6.5

$\square$

10.10 الإجهاد الشاقولي نتيجة حمل مساحي مستطيل (طريقة النقاط الزاوية)

يمكن استخدام حل بوسينسك Boussinesq لحساب الزيادة في الإجهاد الشاقولي تحت تأثير حمل مساحي مستطيل مرن، كما في الشكل (20.10).

المساحة المحملة متوضعة على سطح الأرض بطول L وعرض B ، شدة الحمل الموزع بانتظام على واحدة المساحة يساوي إلى q .

لتحديد الزيادة في الإجهاد الشاقولي ($\Delta\sigma_z$) عند النقطة A ، والمتوضعة على عمق z أسفل زاوية الحمل المساحي المرن، نحتاج إلى اعتبار عنصر مساحي صغير $dx \cdot dy$ من المستطيل، (وهذا مبين في الشكل 20.10) الحمل على هذا العنصر المساحي يمكن أن يعطى بالعلاقة:

$$dq = q \cdot dx \cdot dy \quad (27.10)$$

الزيادة في الإجهاد ($d\sigma_z$) عند النقطة A نتيجة الحمل dq يمكن أن يحدد باستخدام المعادلة (12.10)، على كل، نحتاج إلى استبدال P بالقيمة $dq = q \cdot dx \cdot dy$ و r^2 بالقيمة $x^2 + y^2 + z^2$ ، لذلك نجد:

$$d\sigma_z = \frac{3q \, dx \, dy \, z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (28.10) \square$$

الزيادة في الإجهاد عند النقطة A بسبب كامل المساحة المحملة يمكن أن يحدد بمكاملة المعادلة السابقة، وعليه يمكن أن نجد:

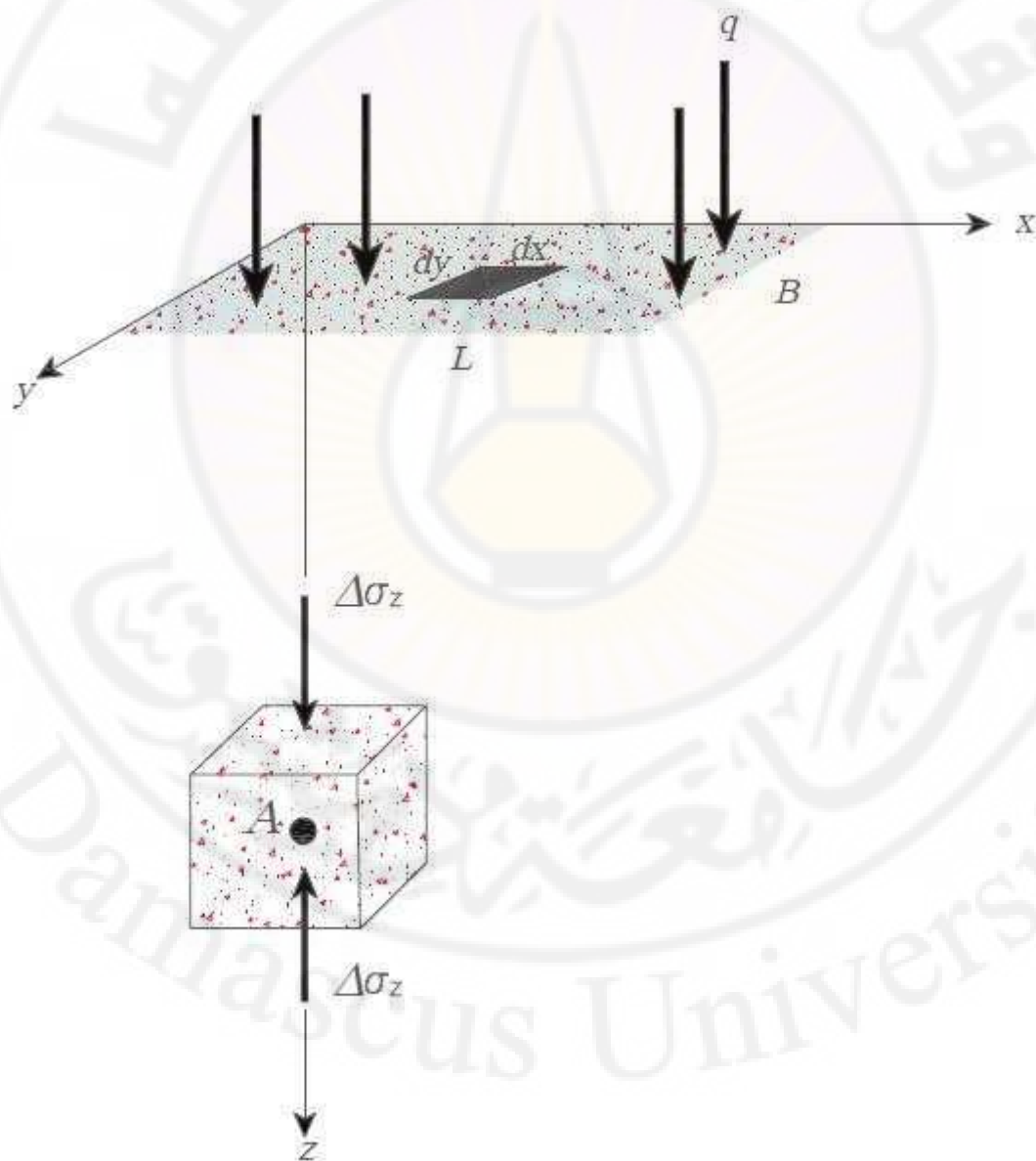
$$\Delta\sigma_z = \int d\sigma_z = \int_{y=0}^B \int_{x=0}^L \frac{3qz^3(dx \, dy)}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = qI_3 \quad (29.10) \square$$

حيث:

$$I_3 = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \left(\frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \right) \right] \quad (30.10)$$

$$m = \frac{B}{z} \quad (31.10) \quad \square$$

$$n = \frac{L}{z} \quad (32.10) \quad \square$$



الشكل (20.10): الإجهاد الشاقولي تحت زاوية حمل مرن منتظم مربع المساحة.

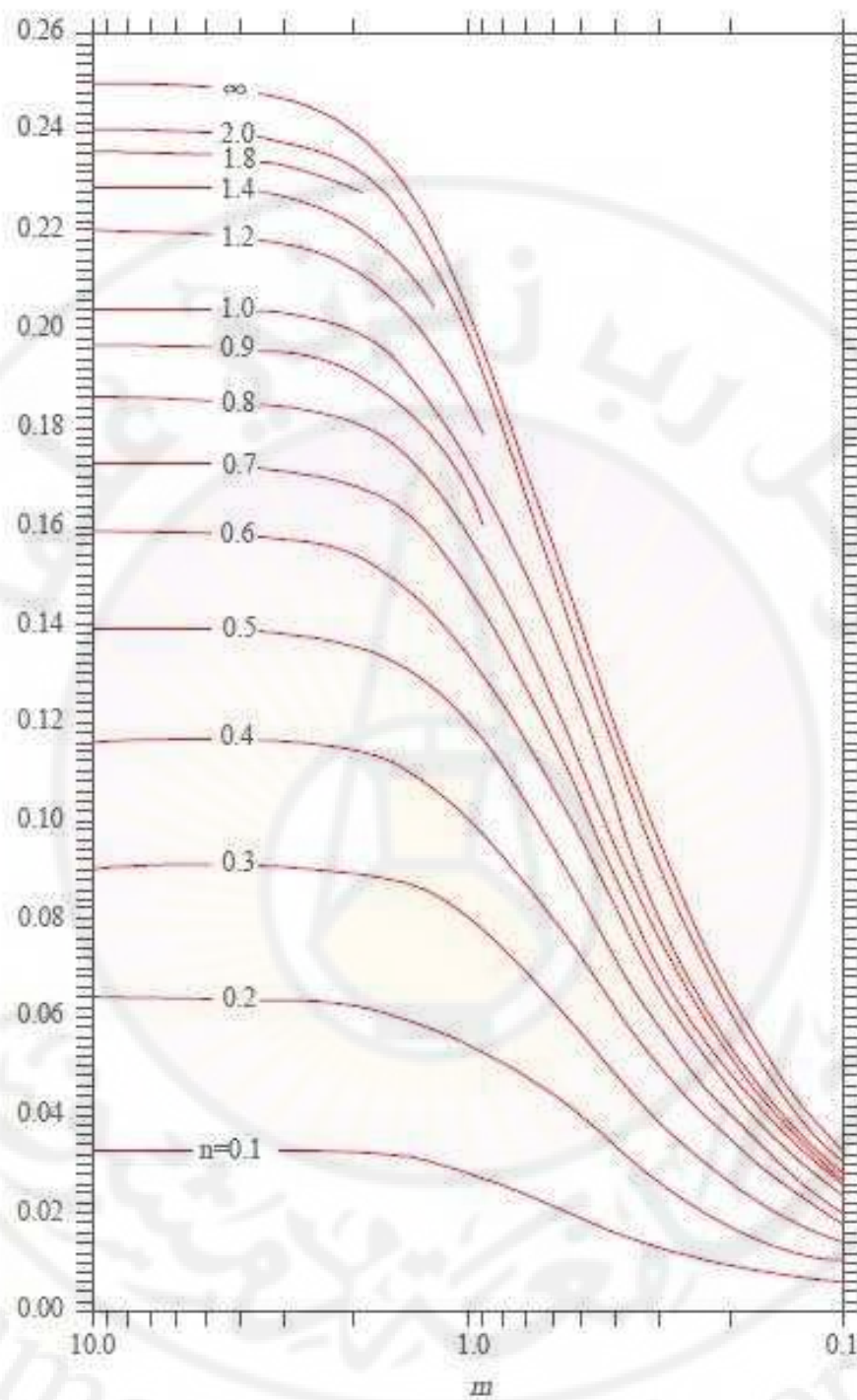
إن تغير I_3 مع m و n ظاهر في الجدول (8.10) والشكل (21.10).

الجدول (8.10): تغير I_3 مع m و n .

n	m									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.1	0.0047	0.0092	0.0132	0.0168	0.0198	0.0222	0.0242	0.0258	0.0270	0.0279
0.2	0.0092	0.0179	0.0259	0.0328	0.0387	0.0435	0.0474	0.0504	0.0528	0.0547
0.3	0.0132	0.0259	0.0374	0.0474	0.0559	0.0629	0.0686	0.0731	0.0766	0.0794
0.4	0.0168	0.0328	0.0474	0.0602	0.0711	0.0801	0.0873	0.0931	0.0977	0.1013
0.5	0.0198	0.0387	0.0559	0.0711	0.0840	0.0947	0.1034	0.1104	0.1158	0.1202
0.6	0.0222	0.0435	0.0629	0.0801	0.0947	0.1069	0.1168	0.1247	0.1311	0.1361
0.7	0.0242	0.0474	0.0686	0.0873	0.1034	0.1169	0.1277	0.1365	0.1436	0.1491
0.8	0.0258	0.0504	0.0731	0.0931	0.1104	0.1247	0.1365	0.1461	0.1537	0.1598
0.9	0.0270	0.0528	0.0766	0.0977	0.1158	0.1311	0.1436	0.1537	0.1619	0.1684
1.0	0.0279	0.0547	0.0794	0.1013	0.1202	0.1361	0.1491	0.1598	0.1684	0.1752
1.2	0.0293	0.0573	0.0832	0.1063	0.1263	0.1431	0.1570	0.1684	0.1777	0.1851
1.4	0.0301	0.0589	0.0856	0.1094	0.1300	0.1475	0.1620	0.1739	0.1836	0.1914
1.6	0.0306	0.0599	0.0871	0.1114	0.1324	0.1503	0.1652	0.1774	0.1874	0.1955
1.8	0.0309	0.0606	0.0880	0.1126	0.1340	0.1521	0.1672	0.1797	0.1899	0.1981
2.0	0.0311	0.0610	0.0887	0.1134	0.1350	0.1533	0.1686	0.1812	0.1915	0.1999
2.5	0.0314	0.0616	0.0895	0.1145	0.1363	0.1548	0.1704	0.1832	0.1938	0.2024
3.0	0.0315	0.0618	0.0898	0.1150	0.1368	0.1555	0.1711	0.1841	0.1947	0.2034
4.0	0.0316	0.0619	0.0901	0.1153	0.1372	0.1560	0.1717	0.1847	0.1954	0.2042
5.0	0.0316	0.0620	0.0901	0.1154	0.1374	0.1561	0.1719	0.1849	0.1956	0.2044
6.0	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1374	0.1562	0.1719	0.1850	0.1957	0.2045

تابع

	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
0.0293	0.0301	0.0306	0.0309	0.0311	0.0314	0.0315	0.0316	0.0316	0.0316	0.0316
0.0573	0.0589	0.0599	0.0606	0.0610	0.0616	0.0618	0.0619	0.0620	0.0620	0.0620
0.0832	0.0856	0.0871	0.0880	0.0887	0.0895	0.0898	0.0901	0.0901	0.0901	0.0902
0.1063	0.1094	0.1114	0.1126	0.1134	0.1145	0.1150	0.1153	0.1154	0.1154	0.1154
0.1263	0.1300	0.1324	0.1340	0.1350	0.1363	0.1368	0.1372	0.1374	0.1374	0.1374
0.1431	0.1475	0.1503	0.1521	0.1533	0.1548	0.1555	0.1560	0.1561	0.1562	0.1562
0.1570	0.1620	0.1652	0.1672	0.1686	0.1704	0.1711	0.1717	0.1719	0.1719	0.1719
0.1684	0.1739	0.1774	0.1797	0.1812	0.1832	0.1841	0.1847	0.1849	0.1850	0.1850
0.1777	0.1836	0.1874	0.1899	0.1915	0.1938	0.1947	0.1954	0.1956	0.1957	0.1957
0.1851	0.1914	0.1955	0.1981	0.1999	0.2024	0.2034	0.2042	0.2044	0.2045	0.2045
0.1958	0.2028	0.2073	0.2103	0.2124	0.2151	0.2163	0.2172	0.2175	0.2176	0.2176
0.2028	0.2102	0.2151	0.2184	0.2206	0.2236	0.2250	0.2260	0.2263	0.2264	0.2264
0.2073	0.2151	0.2203	0.2237	0.2261	0.2294	0.2309	0.2320	0.2323	0.2325	0.2325
0.2103	0.2183	0.2237	0.2274	0.2299	0.2333	0.2350	0.2362	0.2366	0.2367	0.2367
0.2124	0.2206	0.2261	0.2299	0.2325	0.2361	0.2378	0.2391	0.2395	0.2397	0.2397
0.2151	0.2236	0.2294	0.2333	0.2361	0.2401	0.2420	0.2434	0.2439	0.2441	0.2441
0.2163	0.2250	0.2309	0.2350	0.2378	0.2420	0.2439	0.2455	0.2461	0.2463	0.2463
0.2172	0.2260	0.2320	0.2362	0.2391	0.2434	0.2455	0.2472	0.2479	0.2481	0.2481
0.2175	0.2263	0.2324	0.2366	0.2395	0.2439	0.2460	0.2479	0.2486	0.2489	0.2489
0.2176	0.2264	0.2325	0.2367	0.2397	0.2441	0.2463	0.2482	0.2489	0.2492	0.2492



الشكل (21.10): تغير l_3 مع m و n .

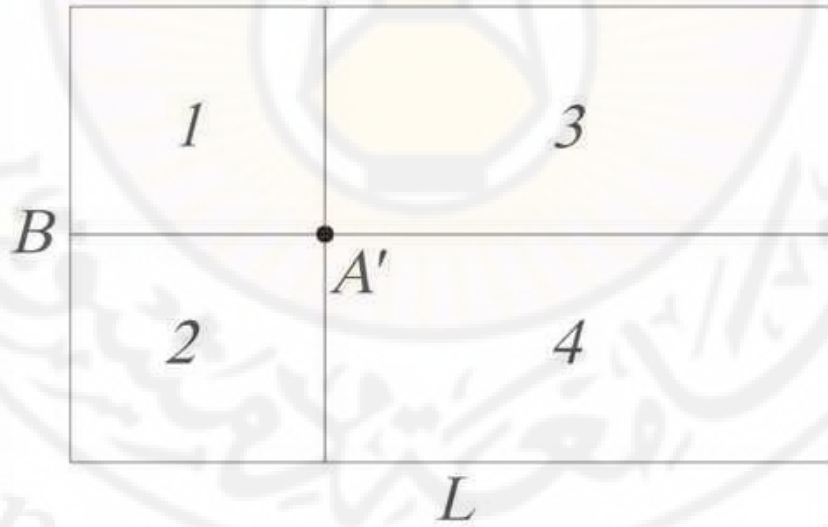
□

الزيادة في الإجهاد عند أي نقطة أسفل مساحة مستطيلة محملة بحمولة موزعة بانتظام، يمكن أن توجد باستخدام المعادلة (29.10)، ويمكن تفسير هذا بالاستعانة بالشكل (22.10).

لكي نحدد الإجهاد الشاقولي عند أي نقطة أسفل الأساس المستطيل مثل النقطة A' والواقعة على العمق z تحت الأساس، لا بد لنا من القول أن النقطة A' وبحسب طريقة النقاط الزاوية لا بد وأن تكون واقعة في زاوية المساحة المحملة. لهذا الأمر، يمكن أن نقسم المساحة وانطلاقاً من النقطة A' إلى أربع مستطيلات كما هو مبين في الشكل. النقطة A' هي الزاوية المشتركة لكافة المستطيلات الأربعة. الزيادة في الإجهاد الشاقولي عند العمق z أسفل النقطة A' بسبب كل مساحة مستطيلة يمكن حسابه الآن باستخدام المعادلة (29.10). وعليه فإن الزيادة الكلية في الإجهاد بسبب الحمل المساحي الكلي يمكن أن يعطى بالعلاقة:

$$\Delta\sigma_z = q[I_{3(1)} + I_{3(2)} + I_{3(3)} + I_{3(4)}] \quad (33.10)$$

حيث $I_{3(1)}, I_{3(2)}, I_{3(3)}, I_{3(4)}$ قيم I_3 للمستطيلات 1، 2، 3، 4 على التوالي:



الشكل (22.10): طريقة حساب الإجهادات عند أي نقطة أسفل مساحة الحمولة المربعة المستطيلة

في معظم الحالات الزيادة في الإجهاد الشاقولي تحت مركز الحمل المساحي (الشكل 23.10) تعتبر هامة، ويمكن أن تعطى الزيادة في الإجهاد بالعلاقة:

$$\Delta\sigma_z = q \cdot I_4 \quad (34.10) \square$$

حيث:

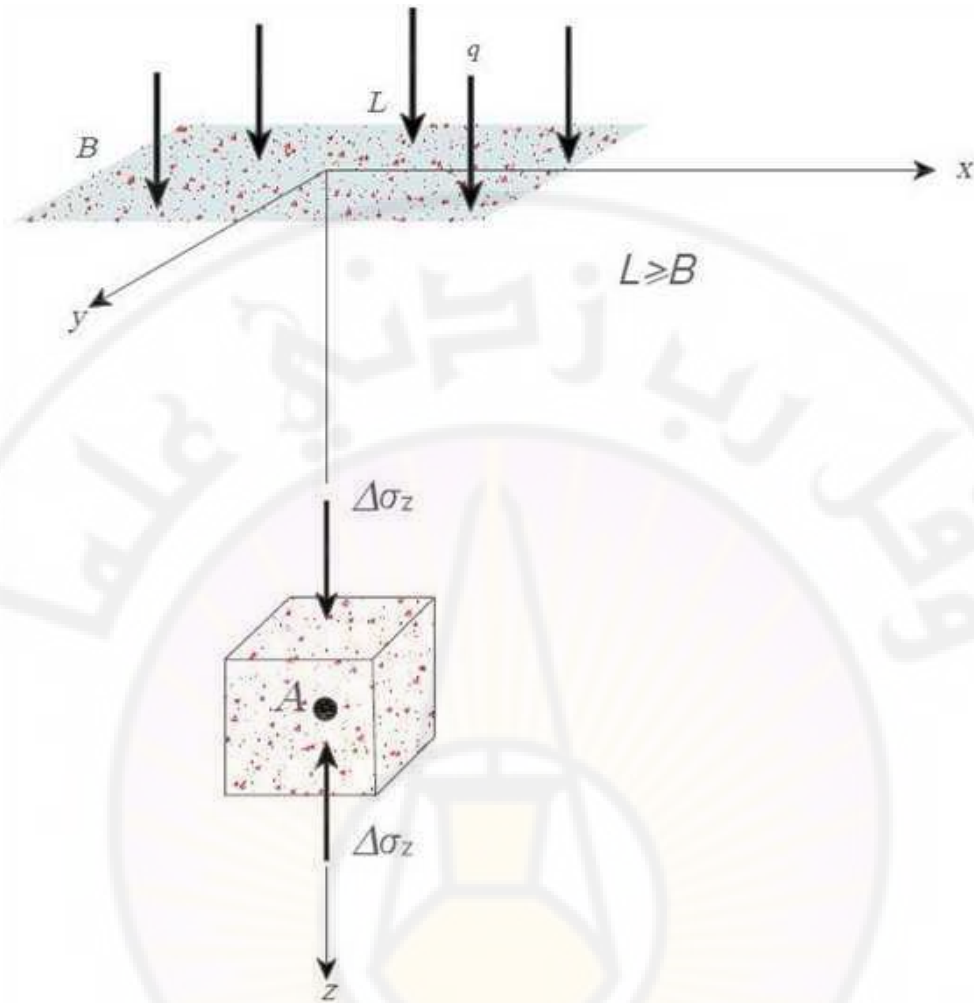
$$I_4 = \frac{2}{\pi} \left[\frac{m_1 n_1}{\sqrt{1 + m_1^2 + n_1^2}} \frac{1 + m_1^2 + 2n_1^2}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \sin^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right] \quad (35.10)$$

$$m_1 = \frac{L}{B} \quad (36.10)$$

$$n_1 = \frac{z}{b} \quad (37.10)$$

$$b = \frac{B}{2} \quad (38.10)$$

إن تغير I_4 مع تغيرات m_1, n_1 معطاه في الجدول (9.10).



الشكل (23.10): الإجهاد الشاقولي أسفل مركز حمل منتظم مرّن مستطيل المساحة

□

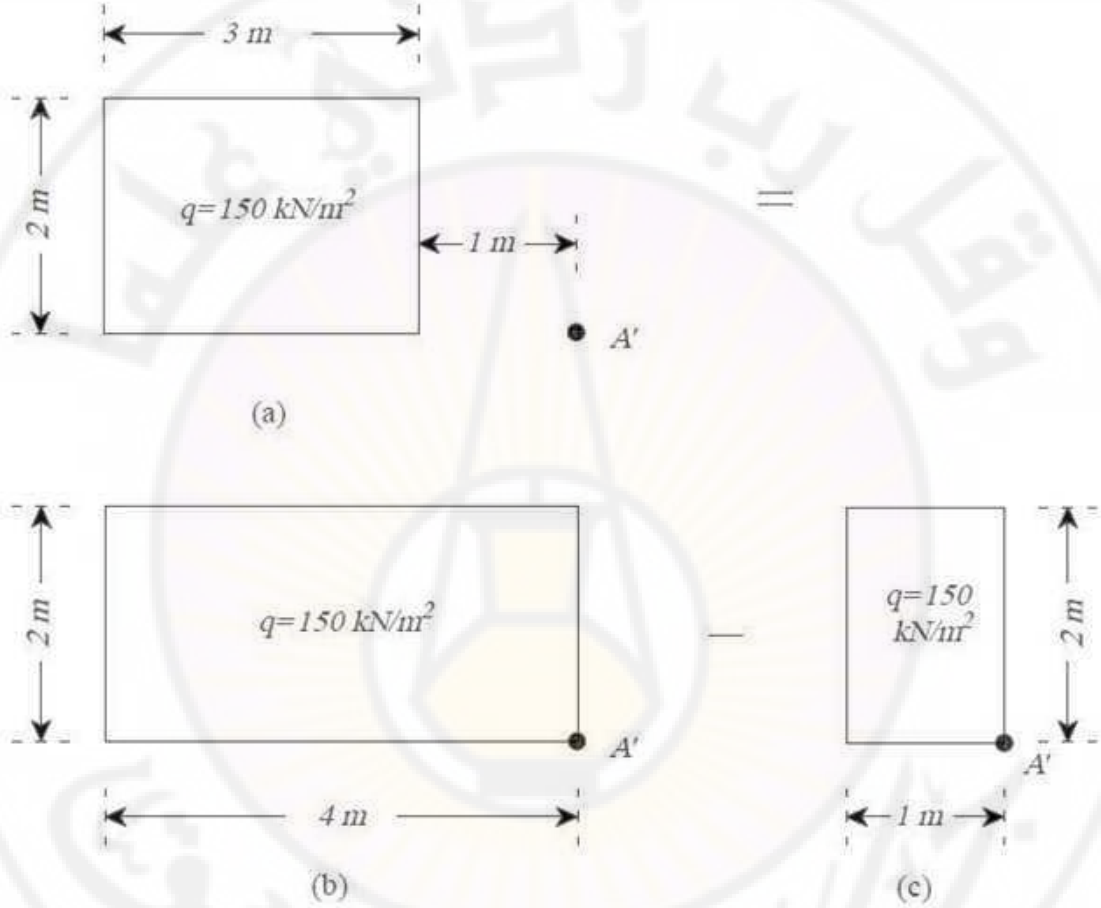
الجدول (9.10): تغيرات I_4 مع تغير m_1 , n_1

n_1	m_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.20	0.994	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
0.40	0.960	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
0.60	0.892	0.932	0.936	0.936	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
0.80	0.800	0.870	0.878	0.880	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881
1.00	0.701	0.800	0.814	0.817	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
1.20	0.606	0.727	0.748	0.753	0.754	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
1.40	0.522	0.658	0.685	0.692	0.694	0.695	0.695	0.696	0.696	0.696
1.60	0.449	0.593	0.627	0.636	0.639	0.640	0.641	0.641	0.641	0.642
1.80	0.388	0.534	0.573	0.585	0.590	0.591	0.592	0.592	0.593	0.593
2.00	0.336	0.481	0.525	0.540	0.545	0.547	0.548	0.549	0.549	0.549
3.00	0.179	0.293	0.348	0.373	0.384	0.389	0.392	0.393	0.394	0.395
4.00	0.108	0.190	0.241	0.269	0.285	0.293	0.298	0.301	0.302	0.303
5.00	0.072	0.131	0.174	0.202	0.219	0.229	0.236	0.240	0.242	0.244
6.00	0.051	0.095	0.130	0.155	0.172	0.184	0.192	0.197	0.200	0.202
7.00	0.038	0.072	0.100	0.122	0.139	0.150	0.158	0.164	0.168	0.171
8.00	0.029	0.056	0.079	0.098	0.113	0.125	0.133	0.139	0.144	0.147
9.00	0.023	0.045	0.064	0.081	0.094	0.105	0.113	0.119	0.124	0.128
10.00	0.019	0.037	0.053	0.067	0.079	0.089	0.097	0.103	0.108	0.112

□

المثال 9.10:

لدينا مسقط لحمل منتظم مساحي مستطيل من مبين في الشكل (a24،10)، والمطلوب تحديد الزيادة في الإجهادات الشاقولية $\Delta\sigma_z$ أسفل النقطة A' والواقعة على عمق $z = 4\text{ m}$.



الشكل (24.10)

الحل:

الزيادة في الإجهاد $\Delta\sigma_z$ يمكن أن تكتب كالتالي:

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} - \Delta\sigma_{z(2)}$$

حيث:

$$\Delta\sigma_{z(1)} = \text{الزيادة في الإجهاد بسبب الحمل المساحي المبين في الشكل (b24،10)}$$

$\Delta\sigma_{z(2)}$ = الزيادة في الإجهاد بسبب الحمل المساحي المبين في الشكل (c24،10)

من أجل الحمل المساحي المبين في الشكل (b24،10).

$$m = \frac{B}{z} = \frac{2}{4} = 0.5 , \quad n = \frac{L}{z} = \frac{4}{4} = 1$$

من الشكل (21.10) ومن أجل $m = 0.5$ و $n = 1$ ، نجد أن قيمة $I_3 = 0.1225$ ، لذلك:

$$\Delta\sigma_{z(1)} = qI_3 = (150)(0.1225) = 18.35 \text{ kN/m}^2$$

وبشكل مشابه، من أجل الحمل المساحي المبين في الشكل (c24،10) نجد أن:

$$m = \frac{B}{z} = \frac{1}{4} = 0.25 , \quad n = \frac{L}{z} = \frac{2}{4} = 0.5$$

لذلك $I_3 = 0.0473$ ، بالتالي:

$$\Delta\sigma_{z(2)} = qI_3 = (150)(0.0473) = 7.1 \text{ kN/m}^2$$

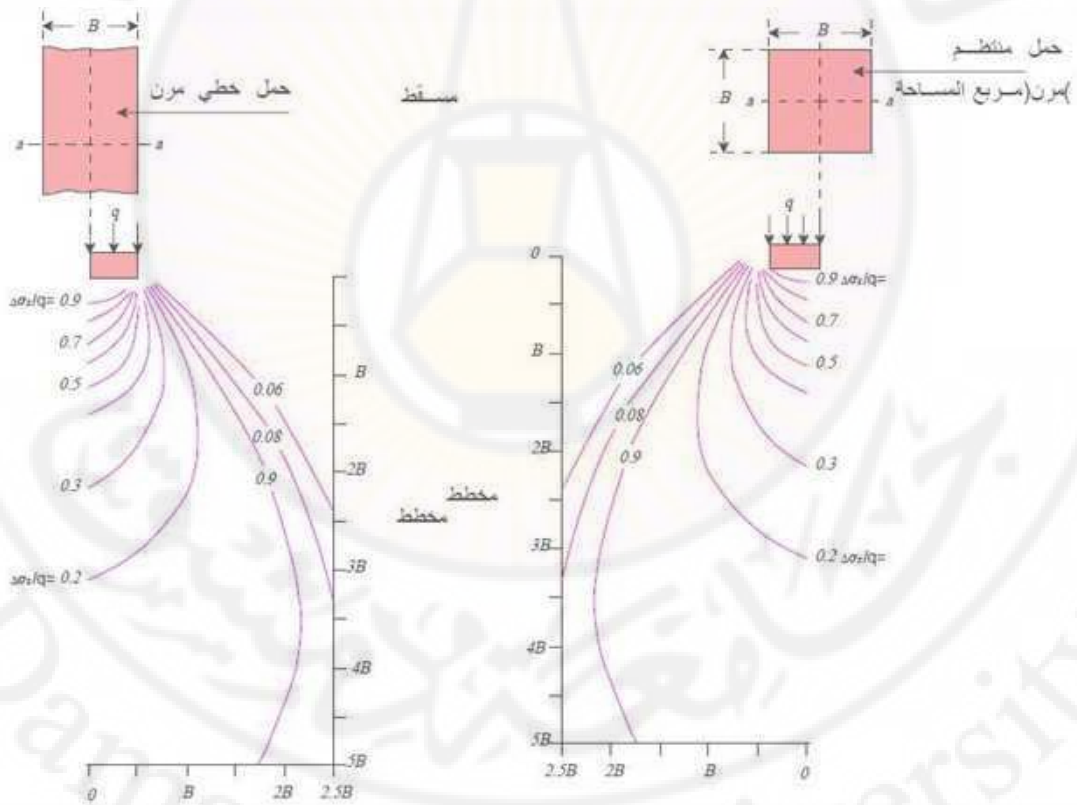
أخيراً فإن الزيادة في الإجهادات الشاقولية $\Delta\sigma_z$ أسفل النقطة A' والواقعة على عمق $z = 4\text{m}$ هي:

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} - \Delta\sigma_{z(2)} = 18.38 - 7.1 = 11.28 \text{ kN/m}^2$$

□

11.10 خطوط تساوي الإجهادات

في الفقرة 6.10 تم تطوير علاقة لتقدير $\Delta\sigma_z$ عند أي نقطة بسبب حمل شاقولي خطي، أيضاً الفقرة 10.10 أعطت العلاقات اللازمة لحساب $\Delta\sigma_z$ عند أي نقطة بسبب حمل منتظم مساحي مستطيل مرن. هذه العلاقات لقيم $\Delta\sigma_z$ يمكن استخدامها لحساب الزيادة في الإجهاد عند شبكة نقاط مختلفة أسفل هذا الحمل المساحي المرن. بناءً على الزيادة في الإجهادات المحسوبة هذه، يمكن أن نرسم مخطط نسميه مخطط تساوي الإجهادات. في الأشكال: (25،10) و (26،10) نبين خطوط تساوي الإجهادات ضمن جسم التربة من تأثير أحمال شاقولية منتظمة.



الشكل (25.10): (إلى اليسار) خطوط تساوي الضغط تحت أساس مرن مأخوذ عند المسقط a-a المبين بالمسقط.

الشكل (26.10): (إلى اليمين) خطوط تساوي الضغط الشاقولية تحت تأثير حمل منتظم مساحي مرن.

□

12.10 مخطط التأثير للضغط الشاقولي (مخطط نيومارك)

المعادلة (25.10) يمكن إعادة تنظيمها وكتابتها بالشكل:

$$\frac{R}{z} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta\sigma_z}{q}\right)^{-2/3} - 1} \quad (39.10)$$

ويمكننا أن ننظم جدول يبين تغير (R/z) مع تغير $\frac{\Delta\sigma_z}{q}$ كما هو مبين بالجدول (10.10).

الجدول (10.10): تغيرات (R/z) بحسب المعادلة (39.10)

(R/z)	$\frac{\Delta\sigma_z}{q}$	(R/z)	$\frac{\Delta\sigma_z}{q}$
0	0	0.55	0.8384
0.05	0.1865	0.60	0.9176
0.10	0.2698	0.65	1.0067
0.15	0.3383	0.70	1.1097
0.20	0.4005	0.75	1.2328
0.25	0.4598	0.80	1.3871
0.30	0.5181	0.85	1.5943
0.35	0.5768	0.90	1.9084
0.40	0.6370	0.91	2.5232
0.45	0.6997	1.00	∞
0.50	0.7664		

لاحظ أن R/z و $\Delta\sigma_z/q$ في هذه المعادلة هي كميات لابعدية، قيم R/z والتي توافق عدة نسب ضغوط متغيرة معطاة في الجدول (10.10).

باستخدام قيم R/z الناتجة من المعادلة (39.10) ومن أجل نسب ضغوط متغيرة، قدم Newmark في العام (1942) مخطط تأثير، هذا المخطط يمكن أن يستخدم لتحديد الزيادة الصافية في قيم الاجهادات الشاقولية عند أي نقطة أسفل حمل مرن مساحي منتظم بأي شكل كان.

الشكل (27.10) يظهر مخطط التأثير أو مخطط نيومارك، والذي تم بناءه من خلال رسم دوائر مركزية، أنصاف أقطار هذه الدوائر مساوية لقيم R/z الموافقة للقيم :

$$\Delta\sigma_z/q = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1$$

(ملاحظة: من أجل $\Delta\sigma_z/q = 0, R/z = 0$ ، ومن أجل $\Delta\sigma_z/q = 1, R/z = \infty$ ، لذلك تظهر تسع دوائر).

واحدة الطول لرسم الدوائر هي $\overline{AB}$ ، هذه الدوائر مقسمة إلى خطوط قطرية متساوية البعد، قيمة التأثير للمخطط معطاة بالنسبة $1/N$ ، حيث N هي مساوية لعدد العناصر في المخطط. في الشكل (27.10)، هناك 200 عنصر، لذلك، قيمة التأثير هي 0.005.

عملية تحديد الزيادة الصافية في قيم الاجهادات الشاقولية عند أي نقطة أسفل حمل مرن مساحي منتظم بأي شكل كان ستكون كالتالي:

1. نحدد قيمة العمق z أسفل الحمل المساحي المنتظم والمطلوب عنده حساب الزيادة في الإجهاد الشاقولي بسبب الحمل الخارجي.

2. نقوم برسم مسقط الحمل المساحي بمقياس z مساوي إلى واحدة الطول للمخطط ($\overline{AB}$).

3. نضع المسقط (المرسوم في الخطوة السابقة) على مخطط التأثير بحيث تكون النقطة المطلوب حساب الإجهاد عندها متوضعة في مركز المخطط.

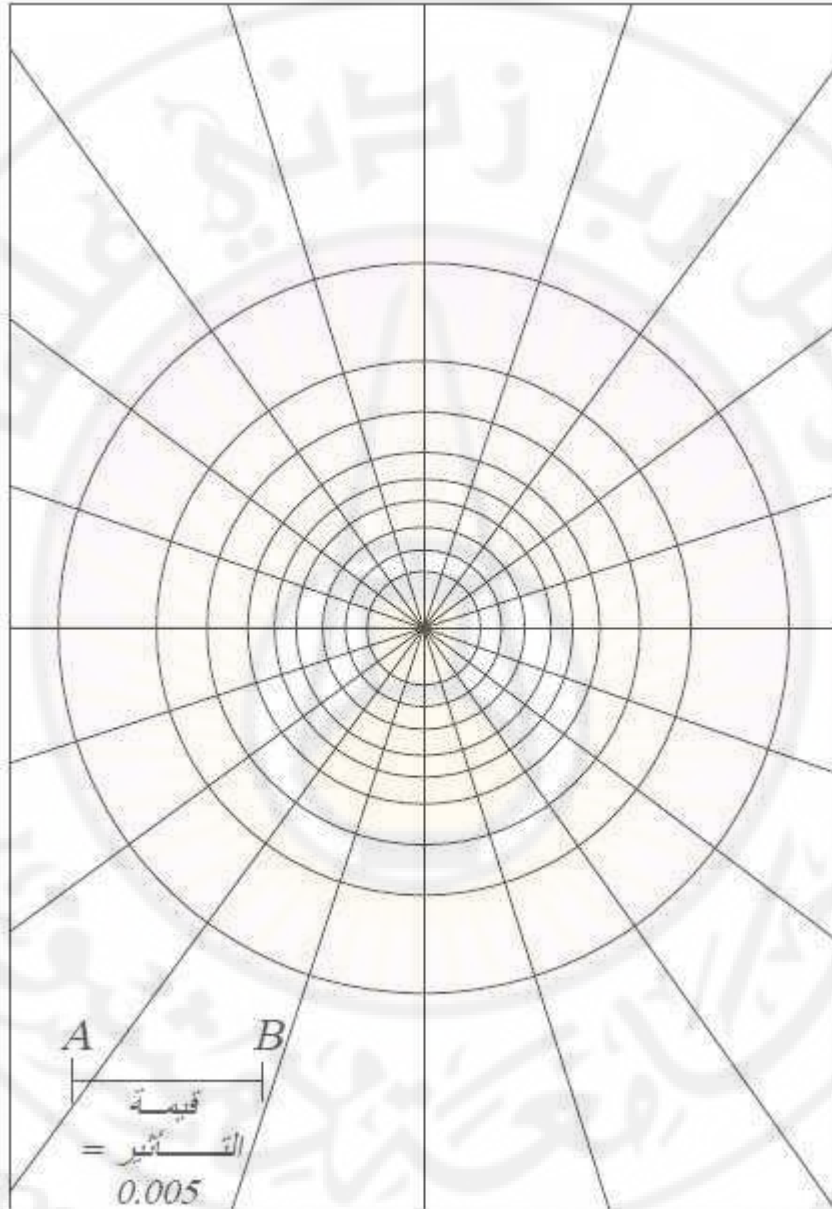
نقوم بإيجاد عدد العناصر (M) للمخطط المحاط بالمسقط للمساحة المحملة والمرسوم وفق المقياس ($\overline{AB}$).

الزيادة في الإجهاد عند النقطة المطلوبة تعطى بالتالي:

$$\Delta\sigma_z = (IV)q.M \quad (40.10)$$

حيث $IV = \text{قيمة التأثير}$.

$q = \text{الضغط على المساحة المحملة}$.

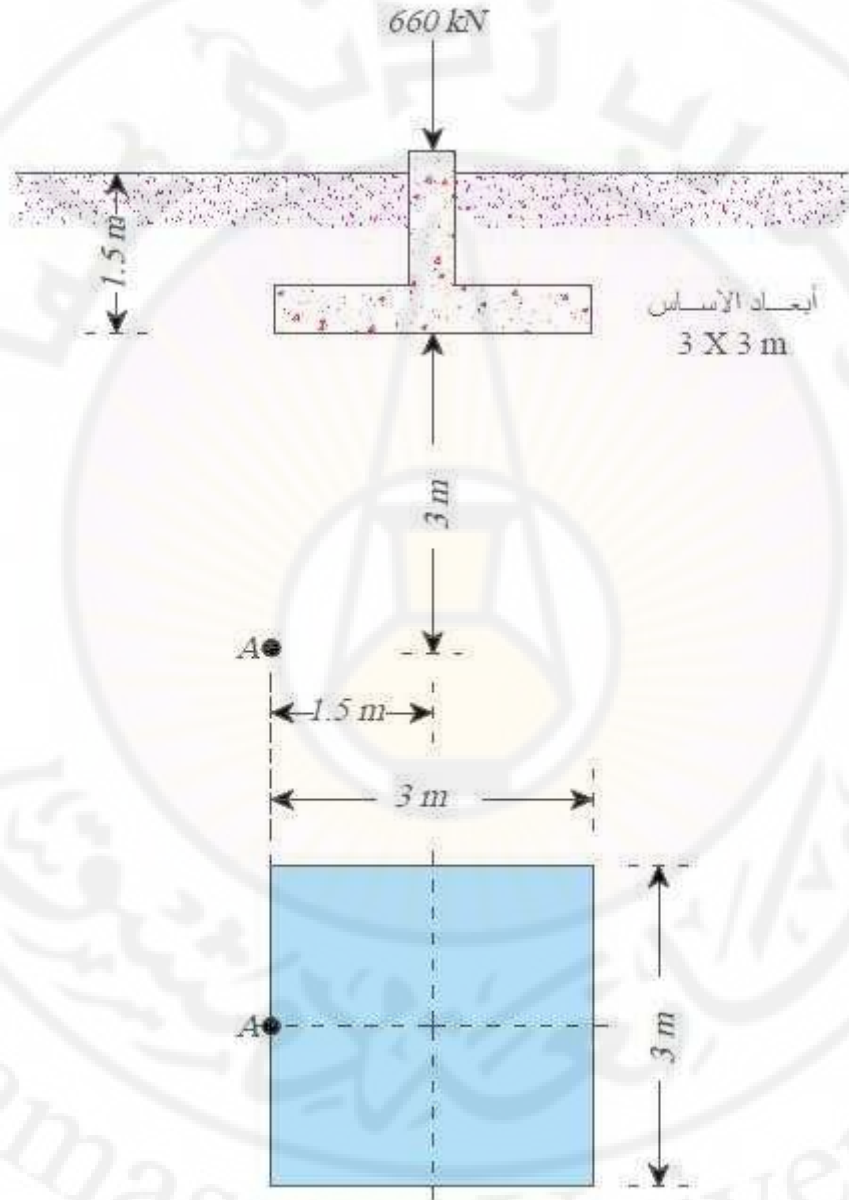


الشكل (27.10): مخطط التأثير لضغط شاقولي بناءً على نظرية

Boussinesq (Bulletin No. 338. Influence Charts for Computation of Stresse in Elastic Foundations, by Nathan M. Newmark, University of Illinois, 1942.)

المثال 10.10:

لدينا المقطع العرضي والمسقط لأساس عمود مبين في الشكل (28.10)، أوجد الزيادة في الإجهادات الشاقولية الناتجة عن أساس العمود عند النقطة A.

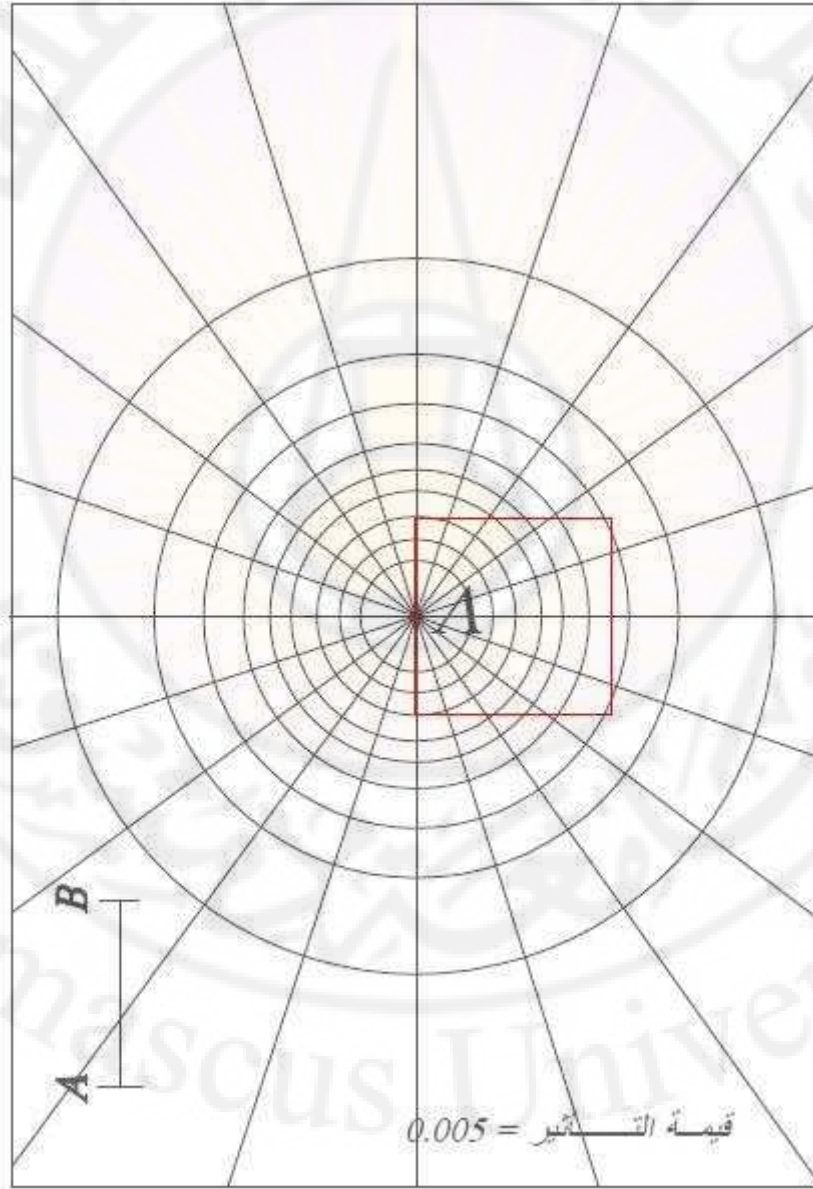


الشكل (28.10): المقطع العرضي والمسقط لأساس العمود

الحل:

النقطة A متوضعة على عمق 3 m أسفل الأساس، مسقط الأساس المربع تم رسمه على مقياس $\overline{AB} = 3 \text{ m}$ وتم وضع الأساس المرسوم بالمقياس السابق على مخطط التأثير (الشكل 29.10) بحيث تكون النقطة A المبينة على المسقط تقع بشكل مباشر على مركز المخطط، عندها سنجد أن عدد العناصر داخل حدود مسقط الأساس هي تقريباً 48.5، لذلك:

$$\Delta\sigma_z = (IV)qM = 0.005 \left(\frac{660}{3 \times 3} \right) 48.5 = 17.78 \text{ kN/m}^2$$



الشكل (29.10): تحديد الإجهادات عند أي نقطة باستخدام مخطط تأثير نيومارك.

13.10 ملخص وملاحظات عامة

في هذا الفصل تم تقديم العلاقات اللازمة لتحديد الزيادة الصافية في قيم الإجهاد الشاقولي عند نقطة معينة ضمن جسم التربة والنتيجة بسبب أنواع مختلفة من الحمولات مطبقة على سطح كتلة التربة.

أنواع الحمولات الذي تم أخذها بالاعتبار هي: نقطية، خطية، سد ترابي أو ردمية ترابية، دائرية، مستطيلة، هذه العلاقات تم ايجادها بتكامل معادلة *Boussinesq* لحمل نقطي (مركز).

المعادلات والمخططات المقدمة في هذا الفصل مبنية بشكل كامل على مبادئ نظرية المرونة، لكن لا بد من معرفة حدود هذه النظريات عندما يتم تطبيقها على وسط التربة، وذلك بسبب أن رواسب التربة عموماً غير متجانسة، غير مرنة بشكل تام، وغير متماثلة الخواص. لذلك، من الممكن توقع بعض الانحرافات في الحقل عند حساب الإجهاد النظرية فقط عدد محدد من الاستنتاجات النظرية ممكن استخدامها لأغراض المقارنة.

بناءً على هذه النتائج، تبين أنه علينا توقع فرق بمقدار $\pm 25\%$ إلى $\pm 30\%$ بين التقديرات النظرية والقيم الحقيقية الفعلية.

□

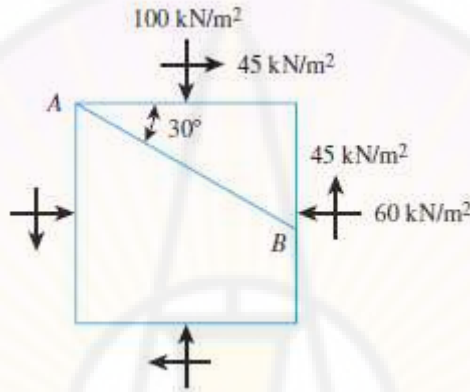
10.10 أمثلة غير محلولة

1. لدينا عنصر من تربة مبين في الشكل (30.10) . والمطلوب تحديد التالي:

(a) الإجهادات الأعظمية والأصغرية الأساسية.

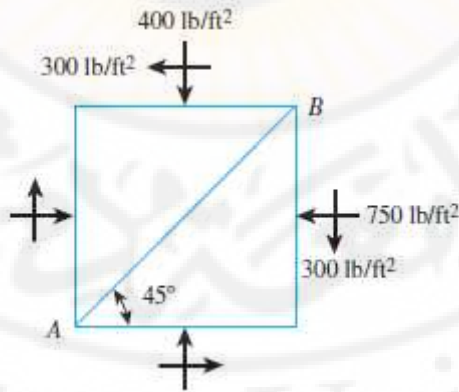
(b) الإجهادات النازمية والقاصة على المستوي AB ، باستخدام المعادلات (3.10) – (4.10)

– (6.10) – (7.10).



الشكل (30.10)

2. أعد حل المسألة 1 ولكن لعنصر التربة الموضح في الشكل (31.10).



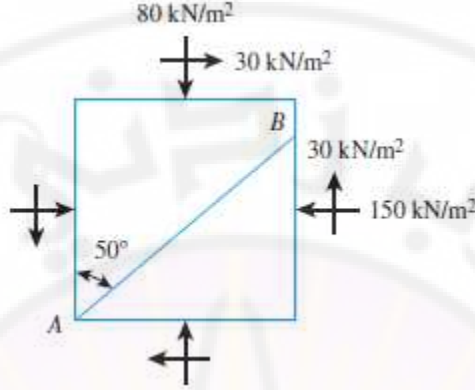
الشكل (31.10)

3. باستخدام مبادئ دوائر مور ولعنصر التربة الموضح في الشكل (32.10). المطلوب تحديد

التالي:

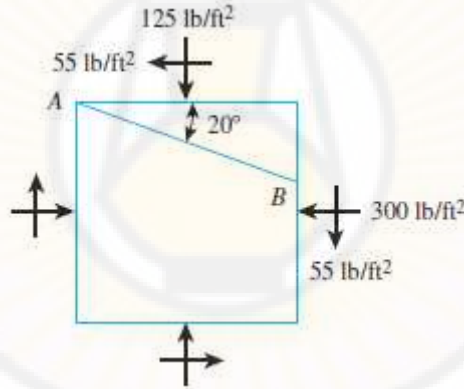
(c) الإجهادات الأعظمية والأصغرية الأساسية.

(d) الإجهادات الناعظمية والقاصة على المستوى AB .



الشكل (32.10)

4. أعد حل المسألة (3) من أجل عنصر التربة الموضح في الشكل (33.10).



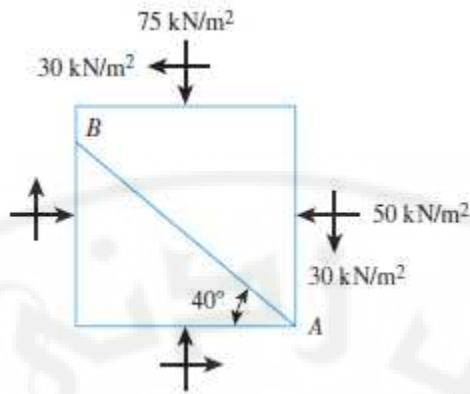
الشكل (33.10)

5. لدينا عنصر تربة موضح في الشكل (34.10)، والمطلوب تحديد التالي:

(a) الإجهادات الأعظمية والأصغرية الأساسية.

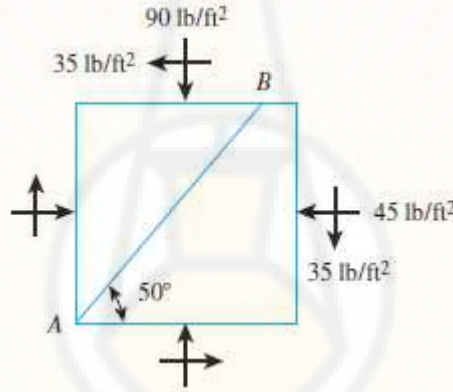
(b) الإجهادات الناعظمية والقاصة على المستوى AB .

استخدم نظرية القطب في الحل.



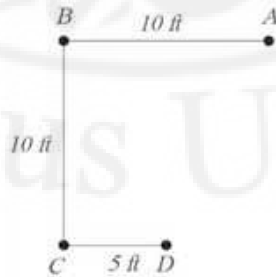
الشكل (34.10)

6. أعد حل المسألة 5 ولكن لعنصر التربة الموضح في الشكل (35.10).



الشكل (35.10)

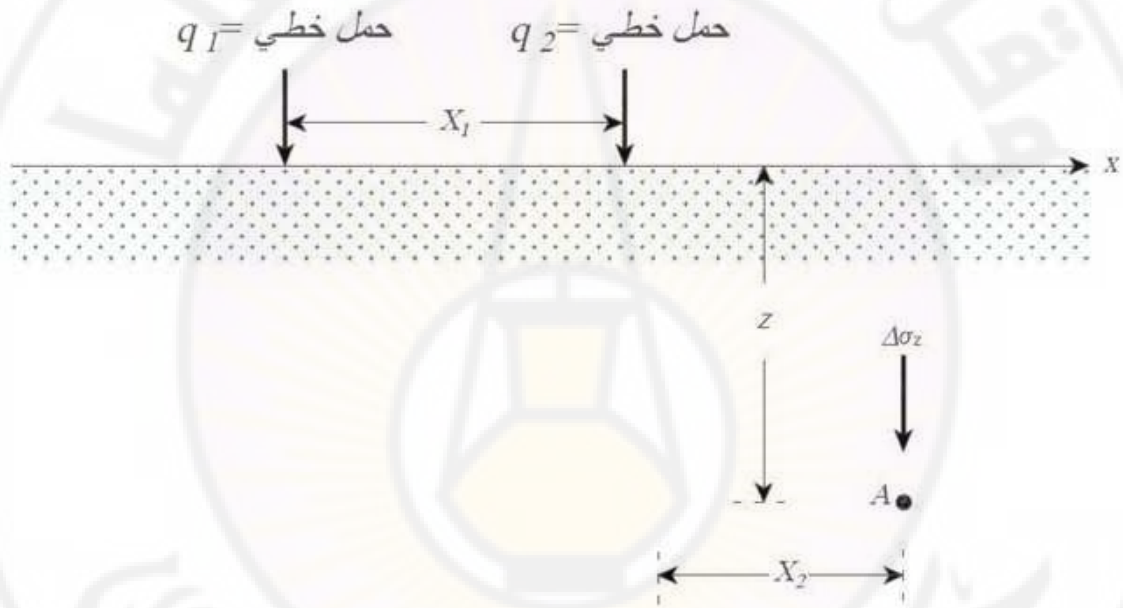
7. ثلاث أحمال نقطية (مركزة) قيمها : 2000، 4000، 6000 lb مؤثرة على النقاط A، B، C، على التوالي، (الشكل 36.10)، المطلوب تحديد الزيادة في الإجهادات الشاقولية عند العمق 10 ft أسفل النقطة D. استخدم معادلة Boussinesq.



الشكل (36.10)

8. بالإشارة للشكل (37.10)، المطلوب تحديد الزيادة في الإجهادات الشاقولية $\Delta\sigma_z$ عند النقطة A مع الأخذ بعين الاعتبار القيم التالية:

$q_1 = 75 \text{ kN/m}$	$X_1 = 2 \text{ m}$
$q_2 = 300 \text{ kN/m}$	$X_2 = 3 \text{ m}$
$Z = 2 \text{ m}$	



الشكل (37.10)

9. أعد حل المسألة 8 ولكن من أجل المعطيات التالية:

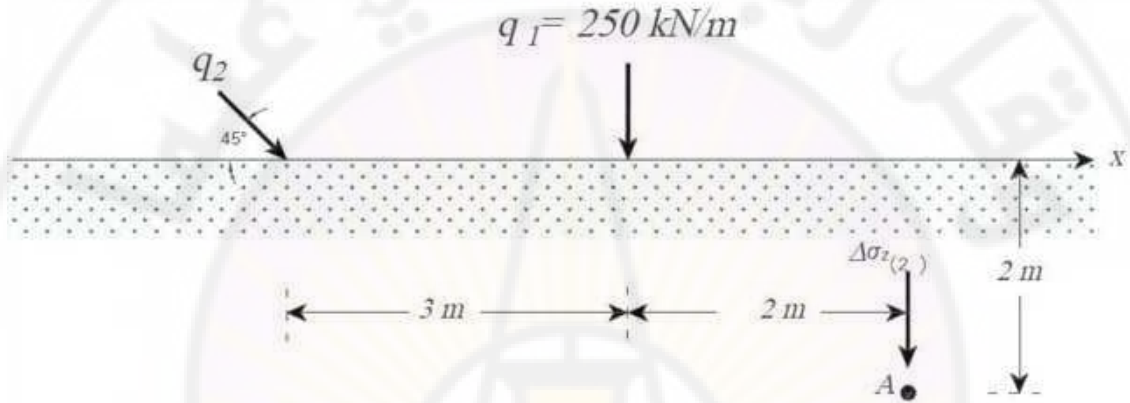
$q_1 = 300 \text{ kN/m}$	$X_1 = 4 \text{ m}$
$q_2 = 260 \text{ kN/m}$	$X_2 = 3 \text{ m}$
$Z = 3 \text{ m}$	

10. بالإشارة للشكل (37.10)، وبفرض لدينا المعطيات التالية:

$$z = 3 \text{ ft}, x_2 = 4 \text{ ft}, x_1 = 8 \text{ ft}, q_1 = 750 \text{ lb/ft},$$

وفي حال كانت الزيادة في الإجهادات الشاقولية عند النقطة A بسبب الحمل المبين في الشكل هي 35 lb/ft^2 ، المطلوب تحديد قيمة الحمولة الخطية q_2 الواجب تطبيقها على السطح.

11. بالإشارة للشكل (38.10)، وبسبب تطبيق الحمولات الخطية q_1, q_2 ، كانت الزيادة في الإجهاد الشاقولي $\Delta\sigma_z$ عند A هي 30 kN/m^2 ، والمطلوب تحديد قيمة الحمولة الخطية المائلة q_2 الواجب تطبيقها على السطح.



الشكل (38.10)

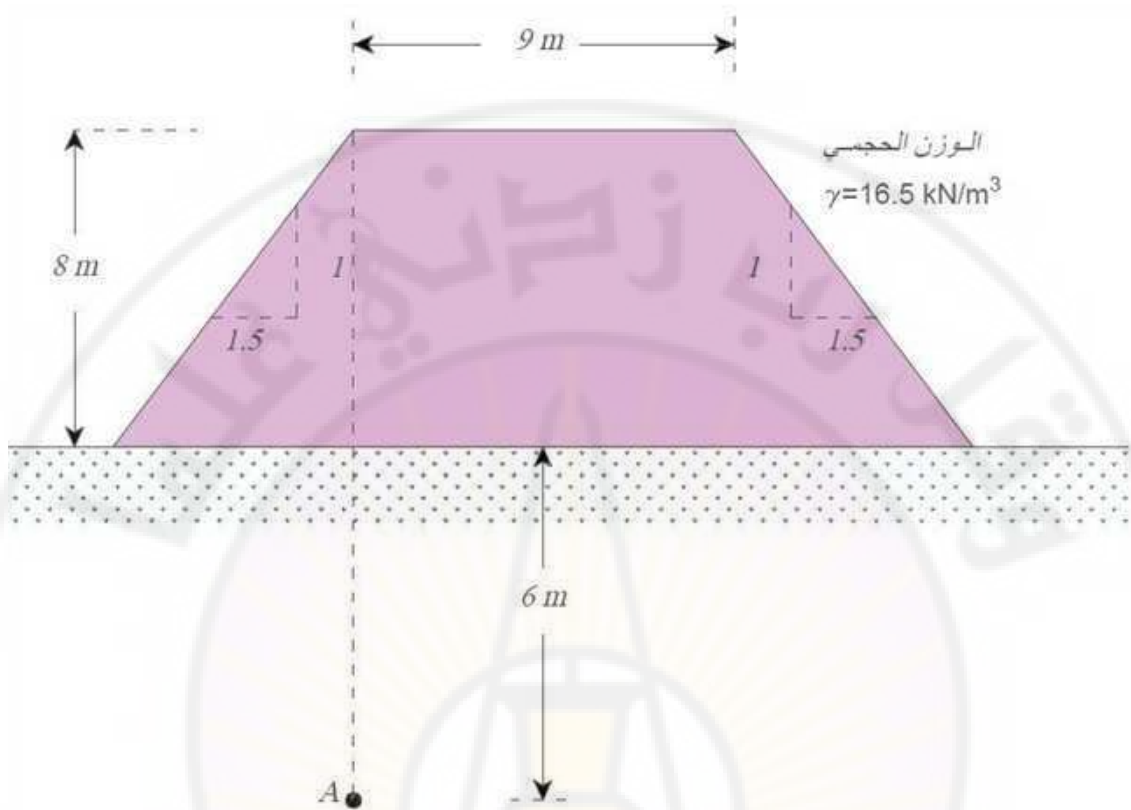
12. بالإشارة للشكل (12.10)، وبفرض المعطيات التالية:

$B = 12 \text{ ft}$ ، $q = 350 \text{ lb/ft}^2$ ، $x = 9 \text{ ft}$ ، $z = 5 \text{ ft}$. المطلوب تحديد الزيادة في الإجهادات الشاقولية $\Delta\sigma_z$ عند النقطة A .

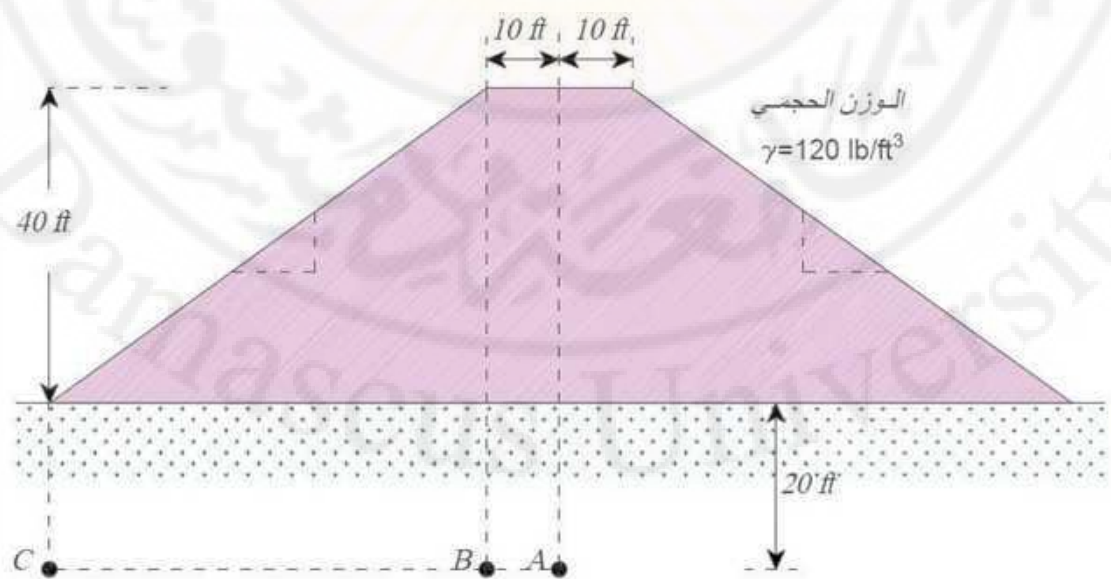
13. أعد حل المسألة 12 من أجل : $B = 3 \text{ m}$ ، $q = 60 \text{ kN/m}^2$ ، $x = 1.5 \text{ m}$ ، $z = 3 \text{ m}$.

14. مخطط لسد ترابي مبين في الشكل (39.10)، المطلوب تحديد الزيادة في الإجهادات الشاقولية عند النقطة A بسبب حمل السد الترابي.

15. الشكل (40.10) يظهر حمل سد ترابي مبني على طبقة من تربة سلتية غضارية، والمطلوب تحديد الزيادة في الإجهاد الشاقولي عند النقاط A, B, C .



الشكل (39.10) : سد ترابي



الشكل (40.10) : سد ترابي

□



16. اعتبر الحمل المرن المساحي المنتظم دائري الشكل والمطبق على سطح التربة والمبين في الشكل (41.10)، وبفرض أن نصف قطر المساحة الدائرية $R = 4 \text{ m}$ وشدة الحمل المنتظم الموزع هي $q = 200 \text{ kN/m}^2$ ، المطلوب حساب الزيادة في الإجهاد الشاقولي $\Delta\sigma_z$ ، عند النقاط :

1، 3، 5، 6، 9، 12 أسفل سطح التربة (بشكل مباشر أسفل مركز المساحة الدائرية).

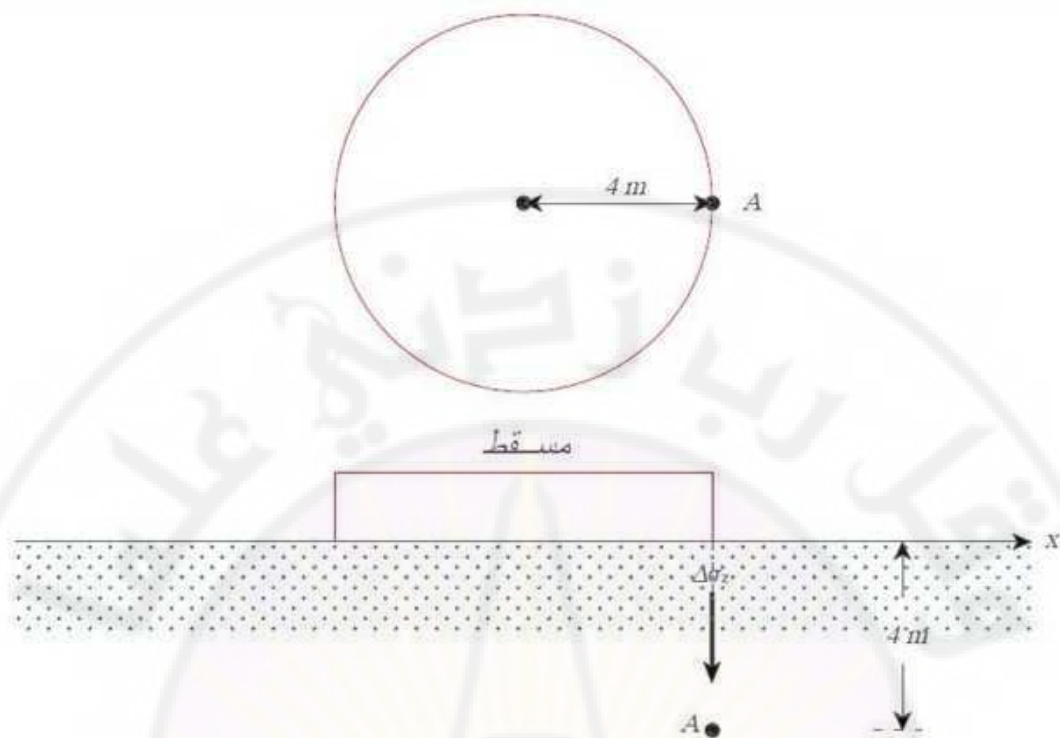
17. الشكل (19.10) يظهر مساحة دائرية مرنة بقطر $R = 10 \text{ ft}$ ، شدة الحمل المطبق على المساحة الدائرية هي 2000 lb/ft^2 ، احسب الزيادة في الإجهاد الشاقولي عند:

$r = 0, 2, 4, 8, 12 \text{ ft}$ وعند $z = 5 \text{ ft}$.

18. بالإشارة للشكل (41.10)، المساحة الدائرية المرنة مؤثر عليها حمل منتظم، فإذا كانت شدة هذه الحمولة هي $q = 300 \text{ kN/m}^2$ وباستخدام مخطط نيومارك، المطلوب تحديد الزيادة في الإجهادات الشاقولية $\Delta\sigma_z$ عند النقطة A.

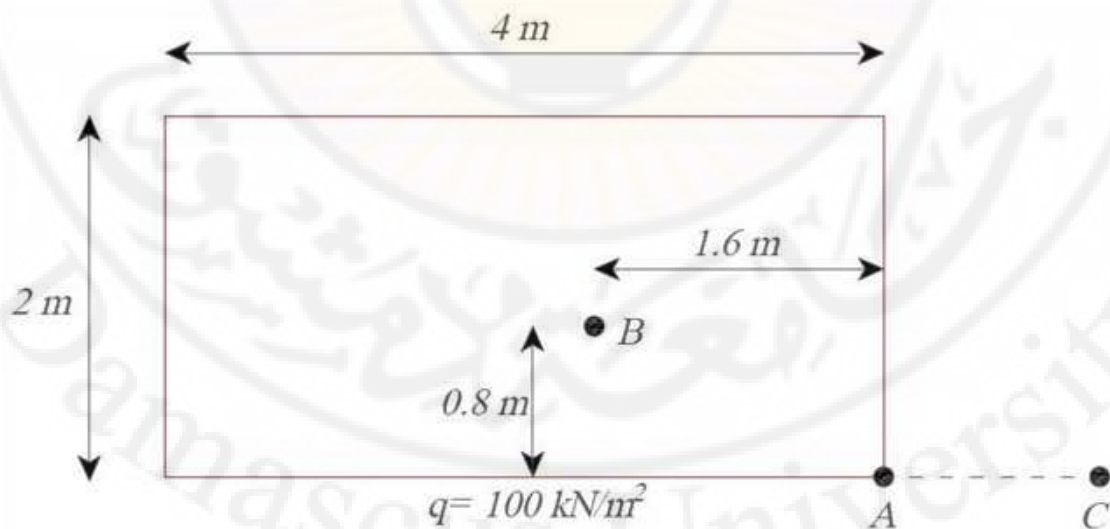
19. مسقط حمل مساحي مربع مرن مبين في الشكل (42.10)، فإذا كانت شدة الحمل الموزع على المساحة المرنة هي $q = 100 \text{ kN/m}^2$ ، المطلوب تحديد الزيادة في الإجهاد الشاقولي $\Delta\sigma_z$ عند العمق $z = 2 \text{ m}$ أسفل: النقطة A، النقطة B، النقطة C.

20. بالإشارة للحمل المساحي المستطيل المرن المبين في الشكل (42.10)، وباستخدام المعادلة (34.10) المطلوب تحديد الزيادة في الإجهاد الشاقولي أسفل مركز المساحة عند عمق 3.5 م.



مقطع عرضي

الشكل (41.10)



الشكل (42.10)

□

15.10 المراجع

1. AHLVIN, R, G, and ULERY, H, H, (1962), "Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space," in Highway Research Bulletin 342, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1–13.
2. BOUSSINESQ, J, (1883), Application des Potentials à L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
3. DAS, B, (2008), Advanced Soil Mechanics, 3rd ed, Taylor and Francis, London.
4. NEWMARK, N, M, (1942), "Influence Charts for Computation of Stresses in Elastic Soil," University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No, 338.
5. OSTERBERG, J, O, (1957), "Influence Values for Vertical Stresses in Semi-Infinite Mass Due to Embankment Loading," Proceedings, Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol, 1, 393–396.