الفصل الرابع : انضغاطية التربة

4. 1 مقدمة

عندما تتعرض التربة لأحمال إضافية فإنها سوف تتعرض للانضغاط , وهذا الانضغاط قد يكون ناتجاً عن خروج الهواء من التربة (هذا ما يحدث أثناء الرص) أو بسبب خروج الماء من فراغات التربة كما هو الحال في حالة تشديد التربة. بحسب ترزاكي (1943), يعرف التشديد بأنه انخفاض بالمحتوى المائي لعينة التربة المشبعة دون استبدال الماء بالهواء.

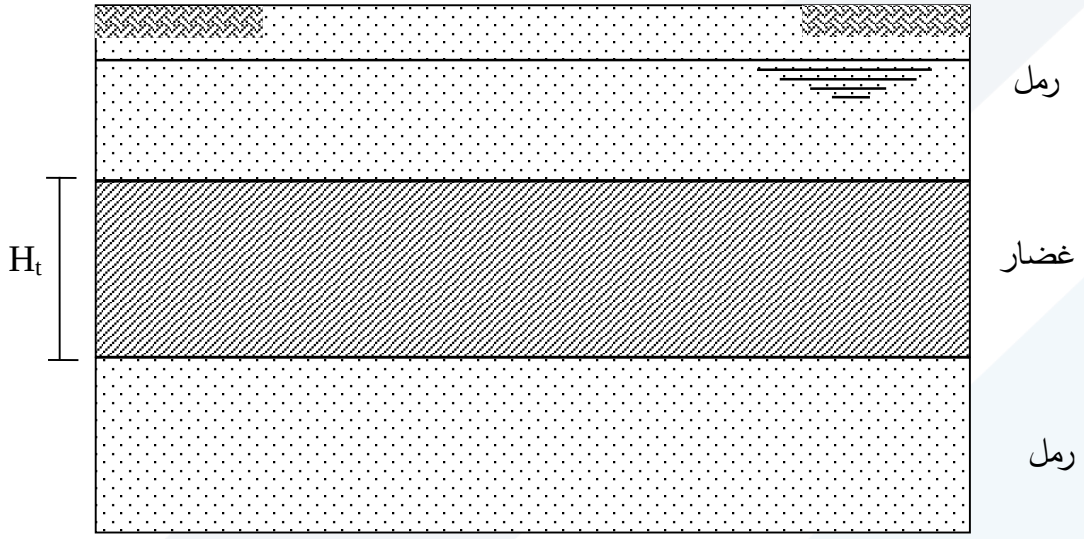
عندما تتعرض الترب الغضارية المشبعة لاجهادات ضاغطة فإن ضغط الماء المسامي سوف يزداد مباشرة , وفي حال وجود امكانية لخروج الماء خارج مسامات التربة فإنه سيحدث هبوط للتربة وهذا الهبوط مرتبط بالزمن وذلك نتيجة لخروج الماء وتبدد الزيادة في ضغط الماء المسامي المتشكل ضمن التربة الذي يستمر فترة طويلة نسبياً من الزمن وذلك بسبب النفاذية المنخفضة للتربة, أما الترب الخشنة فإنها تتشدد وتنضغط بسرعة نتيجة للحمولات الخارجية المنقولة إليها.

المصطلح العلمي باللغة العربية	المصطلح العلمي باللغة الانكليزية	الرمز	الواحدة
التشديد	The Consolidation		
التشديد أحادي البعد	One-dimensional Consolidation		
عامل الزمن	The Time Factor	Tv	-
التشديد الأولي	Primary Consolidation		
الانضغاط الثانوي	Secondary Copression		
خط التشديد الطبيعي	Normal Consolidation Line	NCL	
خط التفريغ–إعادة التحميل	Unloading-Reloading Line	URL	
عامل التشديد	Coefficient of Consolidation	CV	
تربة مشددة طبيعياً	Normally Consolidated Soil		
تربة مسبقة التشديد	Overconsolidated Soil		
عامل التشديد المسبق	Overconsolidation Ratio	OCR	
قرينة الانضغاط	Compression Index	Cc	-
قرينة الارتداد	Recompression Index	Cα	
عامل الانضغاط الحجمي	Modulus of volume compressibility	m_v	m^2/kN
عامل الارتداد الحجمي	Modulus of volume recompressibility	m_{vr}	m^2/kN

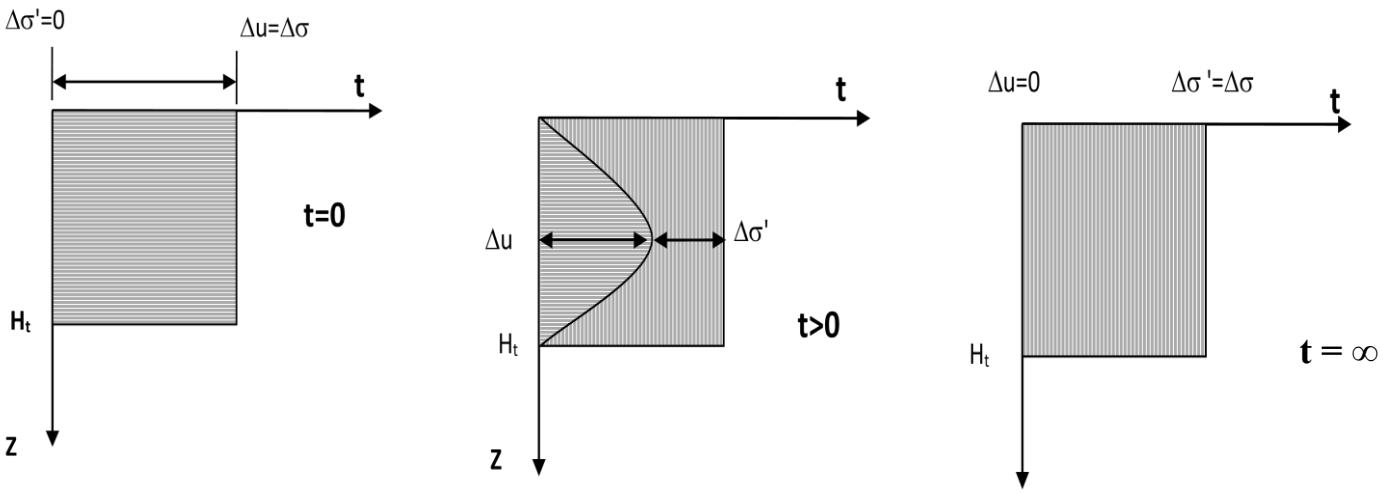
4. 2 أساسيات التشديد

لنفرض طبقة تربة غضارية سماكتها H_t واقعة تحت منسوب المياه الجوفية, ومتوضعة بين طبقتي رمل عالي النفاذية (الشكل 4.1). إذا تعرض سطح التربة لاجهاد إضافي شدته $\Delta\sigma$, فإن ضغط الماء المسامي سوف يزداد. إذا كان الاجهاد ممتد على مساحة كبيرة فإن زيادة ضغط الماء المسامي، تكون ثابتة على كامل ارتفاع الطبقة الغضارية ومقدارها Δu، وسوف تكون مساوية للاجهاد الكلي لحظة تطبيق الاجهاد $(t = 0 \Rightarrow \Delta u = \Delta\sigma)$, وبالتالي فإن الاجهاد الفعال على كامل الطبقة الغضارية سوف يكون مساوياً للصفر $(\Delta\sigma' = 0)$ (الشكل 4.2a). يجب التنويه إلى أنه إذا كان الاجهاد $\Delta\sigma$ ممتد على مساحة محدودة فإن الزيادة في ضغط الماء المسامي قد لاتساوي الزيادة في الاجهادات الكلية.

بعد تطبيق الحمولة ($t > 0$)، سوف يخرج الماء إلى طبقتي الرمل عالي النفاذية, وبالتالي فإن الضغط المسامي سوف ينخفض وتزداد الاجهادات الفعالة بمقدار $\Delta\sigma'$ ($\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u$). إذاً, من أجل ($t > 0$) يكون لدينا $\Delta u < \Delta\sigma$ و $\Delta\sigma' > 0$ (الشكل 4.2b). من الناحية النظرية, في اللحظة $t = \infty$ سوف تتبدد الزيادة في ضغط الماء المسامي على كامل ارتفاع الطبقة الغضارية نتيجة للتصريف التدريجي, حيث يصبح $\Delta\sigma' = \Delta\sigma$ و $\Delta u = 0$ (الشكل 4.2c).



الشكل 4.1 : طبقة تربة غضارية سماكتها H_t واقعة تحت منسوب المياه الجوفية, ومتوضعة بين طبقتي رمل عالي النفاذية.



الشكل 4.2 : تغير الاجهادات الفعالة وضغط الماء مع التحميل

يمكن تجزئة التشديد إلى مرحلتين:

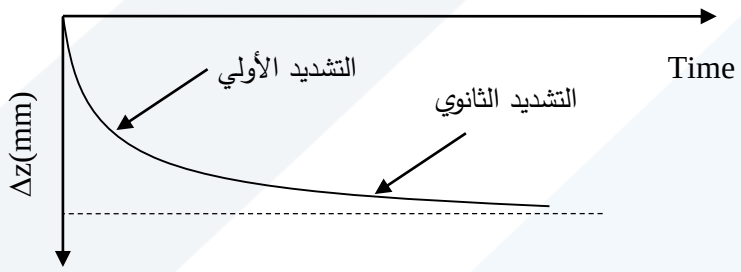
أ- مرحلة التشديد الأولي (Primary consolidation)

هبوط التربة غير خطي مع الزمن، ويحصل أغلب الهبوط خلال فترة وجيزة من التحميل مع السماح بالتصريف, حيث يتم إجبار الماء على الخروج من العينة وتبدد الزيادة في ضغط الماء المسامي نتيجة للضاغط الناتج عن التحميل. يعرف التغير في حجم التربة نتيجة لخروج الماء من فراغاتها ونقل الاجهادات من ماء المسامات إلى جزيئات التربة الصلبة بالتشديد الأولي.

ب- مرحلة الانضغاط الثانوي (Secondary compression)

ينتهي التشديد الأولي عندما تتبدد الزيادة في ضغط الماء المسامي الأولي ($\Delta u_0 = 0$)، ويسمى الهبوط الناتج بعد ذلك بالانضغاط الثانوي (الشكل 4.3). يعرف الانضغاط الثانوي بأنه التغير الحجمي للترب الناعمة نتيجة لإعادة ترتيب بنية التربة بعد انتهاء التشديد الأولي, ويكون عادة صغيراً مقارنة بالهبوط الناتج عن التشديد الأولي.

في الواقع, إن الفصل بين التشديد الأولي والتشديد الثانوي صعب وغير واضح وذلك لأن الانضغاط الثانوي يحدث كجزء من مرحلة التشديد الأولي, وخاصة في الغضار الرخو. إن ميكانيكية التشديد ليست مفهومة بشكل تام, ومن المفضل الفصل بين التشديد الأولي والانضغاط الثانوي من أجل تقدير هبوط التربة.



الشكل 4.3: التشديد الأولي والتشديد الثانوي

4. 3 التشديد الأولي (Primary consolidation)

4. 3. 1 عامل المسامية وتغير هبوط التشديد الأولي

نتيجة للحمولة الخارجية يحدث انخفاض في مسامية التربة مقداره ويصبح عامل المسامية :

$$e = e_0 - \Delta e = e_0 - \frac{\Delta V_v}{V_s} \qquad (4.2)$$

يعطى حجم العينة الأولي بالعلاقة :

$$V_0 = V_s + V_v = V_s + e_0 . V_s = V_s . (1 + e_0) \qquad (4.3)$$

حيث تمثل e_0 عامل المسامية الأولي, و Vs حجم الجزيئات الصلبة.

ويكون التغير في عامل المسامية $\Delta e = \frac{\Delta V_v}{Vs}$, حيث تمثل ΔVv التغير في حجم المسامات.

يمكن حساب التشوه الحجمي اعتماداً على التغير في عامل المسامية كما يلي :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_v}{V} = V\frac{\Delta e.V_s}{(1+e_0).V_s} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \qquad (4.4)$$

بما أنه من أجل التشديد أحادي البعد يكون $\varepsilon_v = \varepsilon_z$, فإنه يمكن كتابة العلاقة بين الهبوط وتغير عامل المسامية كما يلي :

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta z}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \qquad (4.5)$$

حيث تمثل H_0 الارتفاع الأولي للعينة، و ΔH هبوط العينة في مرحلة التشديد الأولي

ويكون هبوط التشديد الأولي ΔH مساوياً لـ :

$$\Delta H = H_0\frac{\Delta e}{1+e_0} \qquad (4.6)$$

و يكون التغير في عامل المسامية Δe مساوياً لـ :

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H_0}(1+e_0) \qquad (4.7)$$

وبالتالي يصبح عامل المسامية في نهاية التشديد الأولي تحت تأثير الحمولة F كالتالي :

$$e = e_0 - \Delta e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0}(1+e_0) \qquad (4.8)$$

ويمكن استخدام العلاقة السابقة لحساب عامل المسامية e_i في نهاية كل مرحلة i من مراحل التحميل خلال مرحلة التشديد الأولي كما يلي :

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta H_i}{H_0}(1+e_0) \qquad (4.9)$$

تمثل ΔH_i الهبوط الحاصل في نهاية المرحلة i

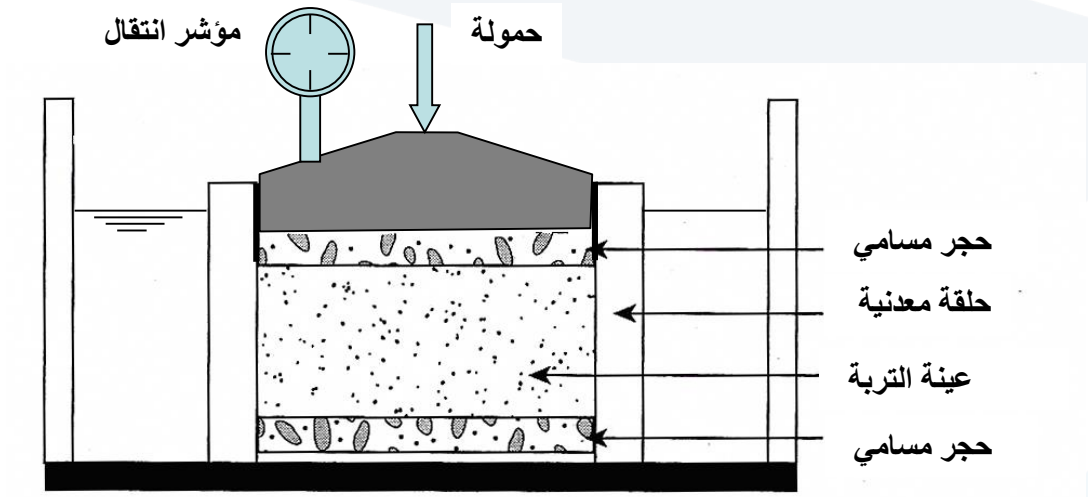
4. 3. 2 تجربة التشديد في جهاز الأودومتر لتحديد بارامترات التشديد الأولي

<u>الغاية من التجربة</u>

إن الغاية من تجربة التشديد هي تحديد معاملات التشديد C_v, C_c, m_v, a_v, E اللازمة لحساب هبوط التشديد للترب الغضارية المشبعة

الجهاز المستخدم

يبين الشكل 4.4 الجهاز المستخدم عادة في تجربة التشديد



الشكل 4.4: جهاز الأودومتر المستخدم في تجربة التشديد

خطوات الاختبار

يتم إجراء تجربة التشديد وفق المراحل الأساسية التالية:

1- تحضير عينة سليمة وقياس وزنها الحجمي ورطوبتها الأولية ووزنها النوعي

2- وضع العينة داخل جهاز التشديد وإشباعها لمدة لا تقل عن 24 ساعة مع منع التشوه الشاقولي للعينة

3- تحميل العينة بالاجهاد الشاقولي حيث نبدأ بـ $25\ kN/m^2$ وتسجيل تغير ارتفاع العينة مع الزمن حتى انتهاء هبوط العينة تحت تأثير الاجهاد المطبق على ألا تقل هذه المدة عن 24 ساعة, ويجب الانتباه إلى عدم انتفاخ العينة, وفي حال حصول ذلك فيتم إضافة حمولات صغيرة فور بدء الانتفاخ حتى توقف الانتفاخ وبدء هبوط العينة.

4- يتم زيادة الاجهادات على مراحل $(25, 50, 100, 200, 400, 800)kN/m^2$ ويتم تسجيل هبوط العينة لكل مرحلة تحميل.

5- يمكن تنفيذ مرحلة أو عدة مراحل تفريغ-إعادة تحميل, حيث تتم نزع جزء من الاجهاد المطبق ويتم الانتظار حتى ثبات التغير الحجمي ثم يعاد التحميل بنفس الوتيرة ويتم الانتظار أيضاً حتى نهاية هبوط العينة.

6- بعد انتهاء جميع مراحل التحميل يتم تفريغ الحمولات بشكل تدريجي بنفس وتيرة التحميل

جدول النتائج

يتم تسجيل نتائج تجربة التشديد في جدول كالتالي:

الاجهاد / الزمن	σ'_1	σ'_2	σ'_3			σ'_n
t=0	R_0	R_{1f}	R_{2f}			$R_{n-1,f}$
t_1	R_{11}	R_{21}	R_{31}			R_{f1}

إعداد الدكتور رامي اسطة

t_2	R_{12}	R_{22}	R_{32}			R_{f2}
t_3	R_{13}	R_{23}	R_{33}			R_{f3}
$t_f \geq 24$ساعة	R_{1f}	R_{2f}	R_{3f}			R_{nf}

حيث تمثل Rij قراءات ساعة الهبوط (i مرحلة التحميل و j لحظة القياس, f تعني آخر لحظة قياس لكل مرحلة)

وهكذا يمكن استنتاج قيمة هبوط العينة في نهاية كل مرحلة تحميل

σ'	0	σ'_1	σ'_2	σ'_3			σ'_n
القراءة النهائية للهبوط	R_0	R_{1f}	R_{2f}	R_{3f}			R_{nf}
الهبوط	$\Delta H_i = \left\| R_{i,f} - R_{i-1,f} \right\| \alpha,$ α ثابت يتعلق بساعة قياس الهبوط						
e_f	$e_i = e_0 - \frac{\Delta H_i}{H_0}(1+e_0)$						

كذلك نوجد تغير الهبوط مع الزمن لكل مرحلة تحميل كالتالي:

الزمن بالدقائق	0	0.25	0.5	1	2	4			1440 أو أكثر
Ri	R_{i1}	R_{i2}	R_{i3}	R_{i4}	R_{i5}	R_{i6}			R_{if}
ΔH	ΔH_{i1}	ΔH_{i2}	ΔH_{i3}	ΔH_{i4}	ΔH_{i5}	ΔH_{i6}			$\Delta H_{if} = \Delta H_i$

الجدول 4.1 : نتائج تجربة التشديد

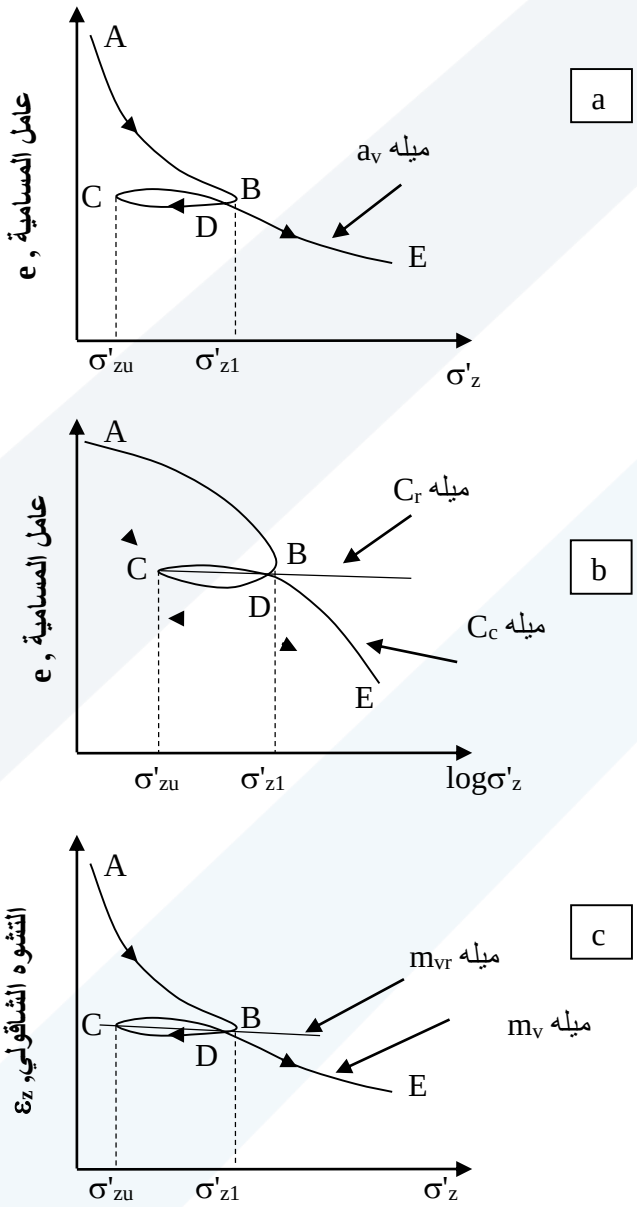
تحليل نتائج تجربة التشديد

يمكننا رسم نتائج تجربة التشديد كما هو مبين بالشكل 4.5. يبين الشكل ثلاثة منحنيات لرسم نتائج التجربة. الشكل 4.5a يربط الاجهاد الشاقولي الفعال بعامل المسامية بمقياس عادي. الشكل 4.5b مماثل للسابق باستثناء أن الاجهاد الشاقولي الفعال مرسوم بمقياس لوغاريتمي. الشكل 4.5c يمثل العلاقة بين الاجهاد الشاقولي الفعال والتشوه الشاقولي. إن الجزء AB من المنحنيات السابقة ليس خطياً وذلك لأن الهبوط الناتج عن كل مرحلة تحميل يؤدي إلى زيادة كثافة التربة ونقصان مساميتها. وبالتالي فإن مضاعفة الزيادة في الاجهاد اعتباراً من مرحلة التحميل السابقة لن يسبب مضاعفة الزيادة في الهبوط. يسمى الجزء AB بخط التشديد الطبيعي NCL (Normal Consolidation Line).

لنقم بتفريغ الحمولات عن التربة اعتباراً من قيمة ما للاجهاد الفعال σ'_{z1}. تنفذ كل مرحلة تفريغ بعد أن تستقر التربة تحت تأثير مرحلة التفريغ السابقة. عندما يتم نزع حمولة ما عن العينة فإن التربة سوف تبدأ بالانتفاخ وامتصاص

الماء من الانبوب المدرج (burette). نسبة الفراغ سوف تزداد ولكن هذه الزيادة أقل بكثير من انخفاض نسبة الفراغ من أجل نفس شدة الحمولة التي كانت مطبقة سابقاً.

لنعيد تحميل العينة بعد أن تم تفريغها حتى σ'_{zu}. إن مسار إعادة التحميل CD محدب على عكس مسار التفريغ المقعر BC. إن الميول الوسطية لمساري التفريغ وإعادة التحميل ليست متساوية ولكن الفرق بينهما طفيفاً. سوف نمثل مسار التفريغ–إعادة التحميل بالميل الوسطي BC, ويسمى بخط التفريغ–إعادة التحميل (URL).



الشكل 4.5 : منحنيات تجربة التشديد

ملاحظات :

1- نقول أن التربة مشددة طبيعيا عندما لا تكون التربة قد خضعت على الاطلاق في الماضي لاجهادات فعالة أكبر من الاجهادات الفعالة الناتجة عن وزن التربة الحالي.

2- نقول أن التربة مسبقة التشديد إذا كانت قد خضعت في الماضي لاجهادات فعالة أكبر من الاجهادات الفعالة الناتجة عن وزن التربة الحالي, ويدعى أكبر اجهاد فعال خضعت له التربة بالضغط المسبق σ'_p وهو يمثل حدود السلوك المرن للمادة.

3- يعرف خط التشديد الطبيعي (NCL) بمسار الاجهاد الناظمي- الهبوط الذي تسلكه التربة في تجربة التشديد أثناء التحميل, عندما تزيد الاجهادات المطبقة عن الضغط المسبق σ'_p .

4- يعرف خط التفريغ-إعادة التحميل (URL) بمسار الاجهاد الناظمي- الهبوط الذي تسلكه التربة في تجربة التشديد أثناء التفريغ وإعادة التحميل, أو أثناء التحميل عندما لا يزيد الاجهاد المطبق عن المسبق σ'_p .

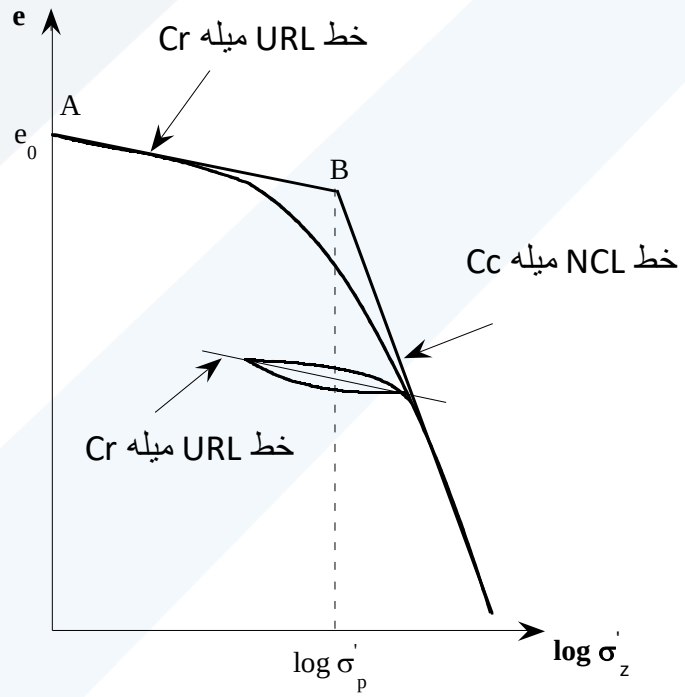
يبين الشكل 4.6 منحني لوغاريتم الاجهاد الناظمي- عامل المسامية لتجربة التشديد, مبيناً عليه خط NCL وخط URL .

5- تدعى نسبة الضغط المسبق والاجهاد الطبيعي الأولي بعامل التشديد المسبق OCR, ويعطى بالعلاقة :

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{z0}} \qquad (4.10)$$

إذا كان OCR = 1 فالتربة مشددة طبيعياً وتسلك مساراً مشابهاً للخط ABE (الشكل 4.6), أما إذا تجاوزت OCR قيمة 1 فالتربة مسبقة التشديد.

6- يكون سلوك التربة مرن (Elastic) على طول خط التفريغ-إعادة التحميل (URL) أو عندما يكون الاجهاد الفعال أصغر من الضغط المسبق، بينما يكون السلوك مرن-لدن (Elastoplastic) على طول خط خط التشديد الطبيعي (NCL) أو عندما تتجاوز قيمة الاجهاد الفعال الضغط المسبق



الشكل 4.6 : منحني لوغاريتم الاجهاد الناظمي- عامل المسامية لتجربة التشديد

4. 3. 3 تحديد الضغط المسبق (preconsolidation stress)

تستخدم عادة طريقة كازاغراند لتحديد الضغط المسبق اعتماداً على منحني $(e-\log\sigma'_z)$(الشكل 4.7) . ويمكن تلخيص مراحل هذه الطريقة كمايلي :

1- تحديد نقطة الانحناء الأعظمي (النقطة D)

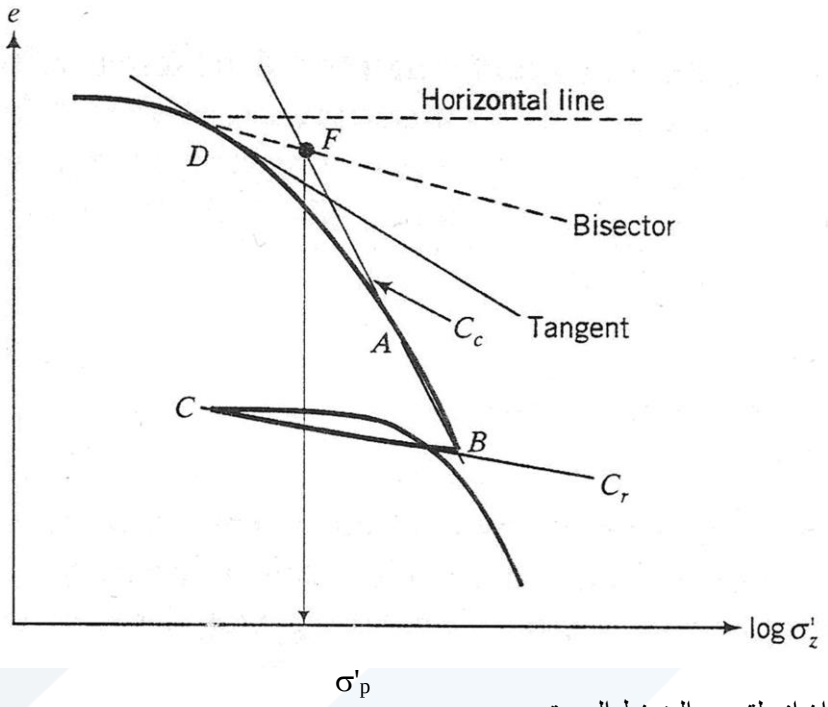
2- رسم خط أفقي مار من النقطة D

3- رسم مماساً للمنحني في النقطة D

4- رسم منصف للزاوية الواقعة بين المماس للمنحني والخط الأفقي المار من D

5- تمديد الجزء المستقيم من المنحني (الجزء BA) وتمديده حتى يقطع منصف الزاوية في النقطة F

6- يمثل الاحداثي الأفقي للنقطة للنقطة F الضغط المسبق σ'_p



الشكل 4.7 : طريقة كازاغراند لتحديد الضغط المسبق

4. 3. 4 بارامترات التشديد الأولي

يمكن التعبير عن هبوط التشديد الأولي للتربة (الهبوط الناتج على طول المسار AE في الشكل 4.5) بميول المنحنيات. سوف نعرف ميلين للتشديد الأولي؛ يدعى الأول قرينة الانضغاط Cc (Compression index), ويتم الحصول عليه من المنحني الذي يربط بين e و $\log\sigma'_z$ (الشكل 4.5b). تعطى قرينة الانضغاط Cc بالعلاقة :

$$C_c = -\frac{e_2 - e_1}{\log\frac{(\sigma'_z)_2}{(\sigma'_z)_1}} = \frac{|\Delta e|}{\log\frac{(\sigma'_z)_2}{(\sigma'_z)_1}} \qquad (4.11)$$

حيث الرموز السفلية 1 و 2 تدل على نقطتين من خط NCL, يتم انتقاؤهما بشكل كيفي.

يعرف الميل الآخر بعامل الانضغاط الحجمي m_v (Modulus of volume compressibility) , ويمكن الحصول عليه من منحني $(\varepsilon_z, \sigma'_z)$ (الشكل 4.5c).

يحسب عامل الانضغاط الحجمي بالعلاقة :

$$m_v = -\frac{(\varepsilon_z)_2 - (\varepsilon_z)_1}{(\sigma'_z)_2 - (\sigma'_z)_1} = \frac{|\Delta\varepsilon_z|}{\Delta\sigma'_z} \qquad (4.12)$$

بشكل مماثل, يمكن أن نعرف ميل الخط BC في الشكل 4.5b بقرينة الارتداد C_r (Recompression index),

ويمكن التعبير عنه بالعلاقة :

$$C_r = -\frac{e_2 - e_1}{\log\frac{(\sigma'_z)_2}{(\sigma'_z)_1}} = \frac{|\Delta e_{zr}|}{\log\frac{(\sigma'_z)_2}{(\sigma'_z)_1}} \qquad (4.13)$$

حيث الرموز السفلية 1 و 2 تدل على نقطتين يتم انتقاؤهما بشكل كيفي من خط URL.

يدعى ميل BC في الشكل 4.5c عامل الارتداد الحجمي m_{vr} (Modulus of volume recompressibility) , ويعبر عنه بالعلاقة :

$$m_{vr} = -\frac{(\varepsilon_{zr})_2 - (\varepsilon_{zr})_1}{(\sigma'_z)_2 - (\sigma'_z)_1} = \frac{|\Delta\varepsilon_{zr}|}{\Delta\sigma'_z} \qquad (4.14)$$

في تجربة التشديد نعتبر أن معامل المرونة يساوي :

$$E'_{oed} = \frac{\Delta\sigma'_z}{\Delta\varepsilon_z} \qquad (4.15)$$

حيث يعبر الرمز oed عن تقييد الحركة, حيث أننا أجبرناالتربة على الهبوط باتجاه z فقط (تشديد أحادي البعد).

يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل :

$$E'_{oed} = \frac{1}{m_v} \qquad (4.16)$$

4. 3. 5 تأثير الحالة الفراغية لانضغاط التربة

تعبر تجربة التشديد عن الانضغاط أحادي المحور $(\varepsilon_z \neq 0, \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0, \sigma'_x = \sigma'_y)$ وتكون فيها $E'_{oed} = \frac{\Delta\sigma'_z}{\Delta\varepsilon_z}$.

يكتب قانون هوك بالشكل التالي:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'}\begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' \\ -\nu' & 1 & -\nu' \\ -\nu' & -\nu' & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\sigma'_x \\ \Delta\sigma'_y \\ \Delta\sigma'_z \end{Bmatrix} \qquad (4.17)$$

كما يمكن كتابته بالشكل التالي:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma'_x \\ \Delta\sigma'_y \\ \Delta\sigma'_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu')(1-2\nu')}\begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \end{Bmatrix} \qquad (4.18)$$

بالتعويض بـ $\Delta\varepsilon_x = \Delta\varepsilon_y = 0$ نحصل على:

$$\Delta\sigma'_z = \frac{E'(1-\nu')}{(1+\nu')(1-2\nu')}\Delta\varepsilon_z \qquad (4.19)$$

لكن من تجربة التشديد لدينا $\Delta\sigma'_z = E'_{oed}\,\Delta\varepsilon_z$. بالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على:

$$E'_{oed} = \frac{E'(1-\nu')}{(1+\nu')(1-2\nu')} \qquad (4-20)$$

وبالتالي تكون:

$$E' = \left(1-\frac{2\nu'^2}{1-\nu'}\right)E'_c = \beta E'_{oed} \qquad (4.21)$$

حيث:

$$\beta = \left(1-\frac{2\nu'^2}{1-\nu'}\right) < 1 \qquad (4.22)$$

4. 3. 6 هبوط التشديد الأولي للترب الغضارية المشبعة المشددة طبيعياً

لنعتبر موقعاً تربته مشددة طبيعياً, ونريد إقامة منشأ عليه. سوف نفترض أن زيادة الاجهاد الشاقولي الناتجة عن المنشأ عند العمق z هي $\Delta\sigma_z$. يكون الاجهاد الفعال النهائي عند العمق z :

$$\sigma'_z = \sigma'_{z0} + \Delta\sigma_z$$

إن زيادة الاجهاد الشاقولي الفعال سوف يجعل التربة تهبط وفق خط NCL. من العلاقتين 4. 6 و 4. 11، يكون هبوط التشديد الأولي :

$$S_p = H_0\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{H_0}{1+e_0}C_c\log\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \qquad (4.23)$$

4. 3. 7 هبوط التشديد الأولي للترب الغضارية المشبعة مسبقة التشديد

إذا كانت التربة مسبقة التشديد, يتوجب اعتبار حالتين حسب شدة $\Delta\sigma_z$. لنقرب منحني $(e-\log\sigma'_{z0})$ ونعتبره مكون من مستقيمين كما هو مبين بالشكل 4.8 .

<u>الحالة الأولى</u>

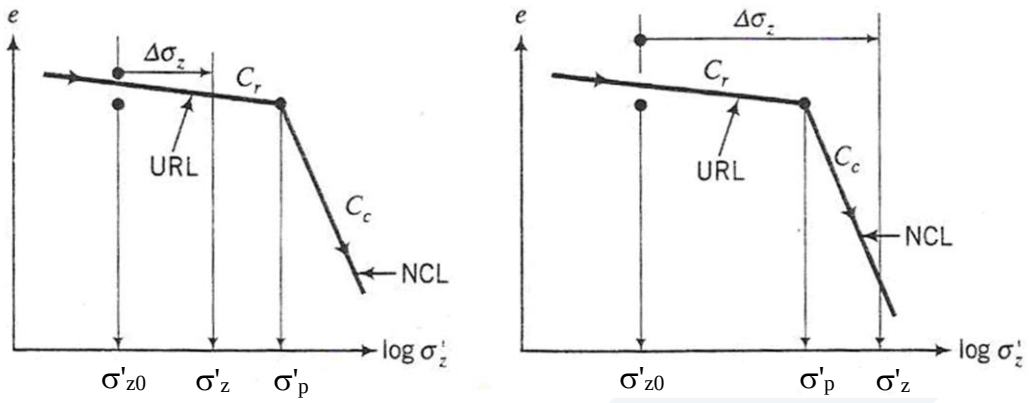
تكون فيها $\sigma'_z < \sigma'_p$ (الشكل 4.8a). في هذه الحالة يحصل التشديد وفق خط URL, ويكون الهبوط :

$$S_p = \frac{H_0}{1+e_0}C_r\log\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \qquad (4.24)$$

<u>الحالة الثانية</u>

تكون فيها $\sigma'_z > \sigma'_p$ (الشكل 4.8b). في هذه الحالة يتكون الهبوط من مركبتين؛ الأولى على طول URL؛ والثانية على طول NCL. يتم حساب الهبوط بالعلاقة :

$$S_p = \frac{H_0}{1+e_0}\left(C_r\log\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{z0}} + C_c\log\frac{\sigma'_z}{\sigma'_p}\right) \qquad (4.25)$$



الشكل 8. 4 : هبوط التشديد الأولي للترب الناعمة مسبقة التشديد

4. 4 هبوط الانضغاط الثانوي (Secondary compression settlement)

لقد ذكرنا سابقاً أن هبوط التشديد يتكون من جزأين؛ يدعى الأول التشديد الأولي ويحدث في البداية ولفترة قصيرة. أما الجزء الثاني فيدعى الانضغاط الثانوي, ويبدأ بعد التشديد الأولي ويستمر لفترة طويلة, ويحدث تحت تأثير اجهاد شاقولي فعال ثابت.

إن الأسباب الفيزيائية للانضغاط الثانوي غير مفهومة جيداً حتى الآن. هناك عدة أسباب محتملة لهذا الانضغاط؛ السبب الأول قد يكون خروج الماء من ميكرومسامات التربة, والسبب الثاني قد يكون التشوه اللزج للتربة.

يمكن رسم منحني (e - logt) اعتماداً على نتائج تجربة التشديد (الشكل 4.9). نفترض بأن التشديد الأولي ينتهي عند نقطة تقاطع الجزأين المستقيمين من المنحني. يعطى دليل الانضغاط الثانوي C_α بالعلاقة :

$$C_\alpha = -\frac{e_t - e_p}{\log\frac{t}{t_p}} = \frac{|\Delta e|}{\log\frac{t}{t_p}} \quad ; t > t_p \qquad (4.26)$$

حيث,

(t_p, e_p) تمثل احداثيات نقطة تقاطع مماسي جزأي التشديد الأولي و الانضغاط الثانوي من منحني (e - logt)

(t, e_t) تمثل احداثيات أية نقطة من منحني الانضغاط الثانوي (الشكل 4.9).

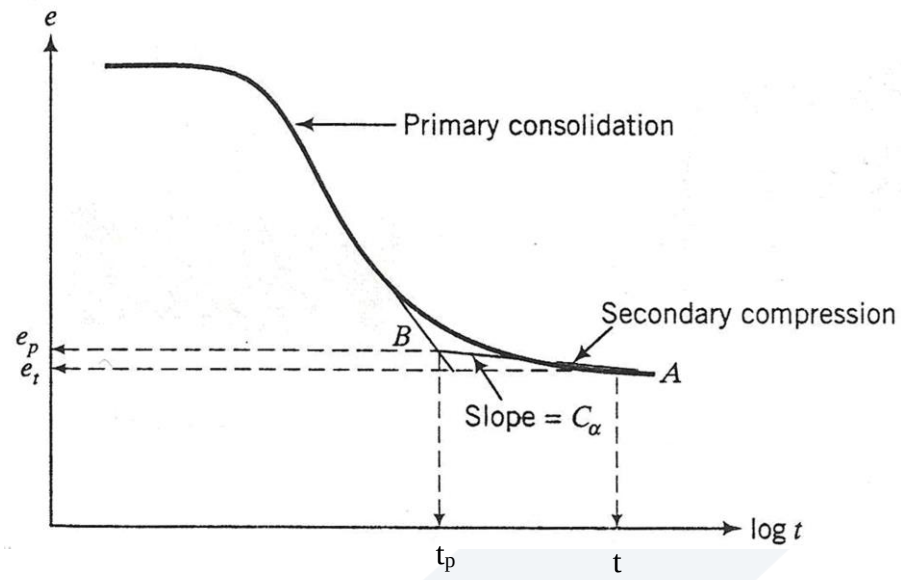
يحسب هبوط الانضغاط الثانوي بالعلاقة :

$$S_{s_t} = \frac{H_0}{1+e_p} C_\alpha \log(\frac{t}{t_p}) \qquad (4.27)$$

Ss_t هبوط التشديد الثانوي عند الزمن t

e_p عامل المسامية في بداية مرحلة التشديد الثانوي

يكون هبوط الانضغاط الثانوي مهملاً عادة في الترب مسبقة التشديد, بينما يمكن لهذا الهبوط أن يكون هاماً في بعض الترب المشددة طبيعياً.



الشكل 4.9: منحني الانضغاط الأولي والانضغاط الثانوي

4. 5 تحديد عامل التشديد (Coefficient of consolidation)

هناك طريقتين شائعتين لتحديد عامل التشديد Cv؛ الأولى تم اقتراحها من قبل تايلور عام 1942, وتدعى طريقة جذر الزمن (Root time method). أما الطريقة الثانية فقد اقترحت من قبل غازاغراند وفادوم عام 1940, وتدعى طريقة لوغاريتم الزمن (Log time method). تستخدم طريقة جذر الزمن سلوك التربة في الجزء الأول من الزمن. إذا رسمنا هبوط العينة بدلالة جذر الزمن فسيكون الجزء الأول من هذا المنحني من الناحية النظرية عبارة عن مستقيم.

4. 5. 1 طريقة جذر الزمن

لنختار بشكل كيفي نقطة ما C من منحني الهبوط بدلالة جذر الزمن (الشكل 4.10). سوف نفترض أن هذه النقطة تقابل درجة تشديد مقدارها 90% (U = 90%). من أجل درجة التشديد 90% يكون عامل الزمن Tv = 0.848, حيث أن :

$$T_v = \frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{100}\right)^2 \qquad for \quad U < 60\%$$

$$T_v = 1.781 - 0.933\log(100 - U) \qquad for \quad U \geq 60\% \qquad (4-28)$$

يعطى عامل التشديد بالعلاقة :

$$C_v = \frac{T_v . H_{dr}^2}{t_{90}} \qquad (4-29)$$

حيث تمثل H_{dr} طول مسار التصريف

$$H_{dr} = \frac{H_{av}}{2} = \frac{H_0 + H_f}{4} \qquad (4-30)$$

حيث,

H_{av} الارتفاع الوسطي للعينة

H_0 الارتفاع الأولي للعينة

H_f الارتفاع النهائي للعينة

ننوه إلى أنه إذا كان التصريف من جانب واحد فإن Hdr = Hav

بتبديل Tv بـ 0.848 في العلاقة السابقة نحصل على :

$$C_v = \frac{0.848.H_{dr}^2}{t_{90}} \qquad (4-31)$$

يمكن تلخيص مراحل تحديد عامل التشديد بطريقة جذر الزمن بالتالي :

1- رسم العلاقة بين هبوط العينة وجذر الزمن (الشكل 4.10)

2- رسم أفضل مماس للجزء الأولي من المنحني فيقطع المحور الشاقولي (محور الهبوط) في النقطة O, والمحور الأفقي (محور $\sqrt{t}$) في النقطة A, ولنرمز لها بـ $\sqrt{t_A}$.

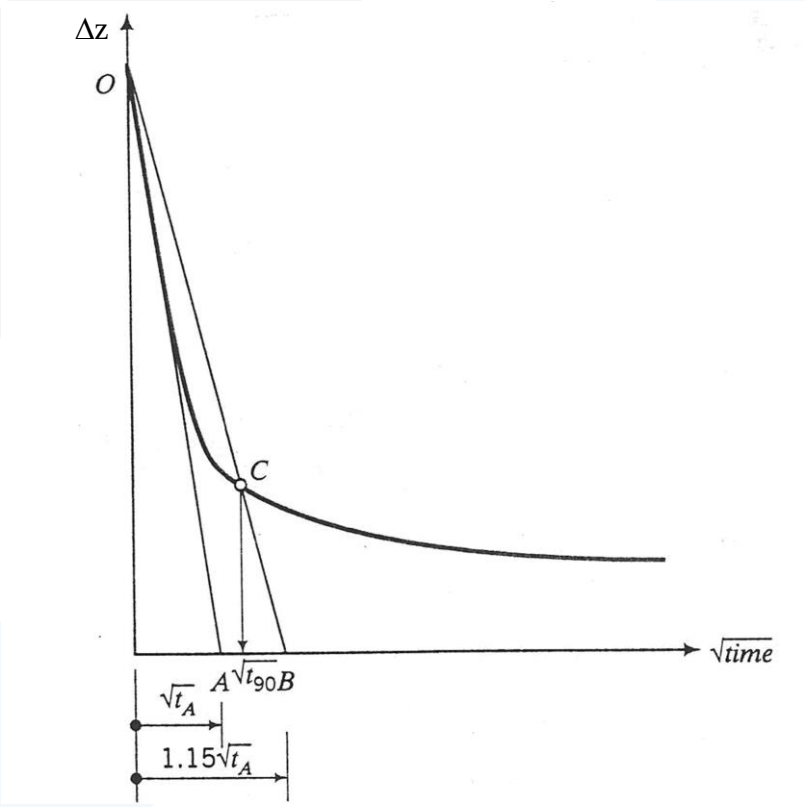
3- نحدد النقطة B على المحور الأفقي($1.15\sqrt{t_A}$)

4- وصل OB فيتقاطع مع المنحني في النقطة C التي تعطي الهبوط والزمن الموافق لدرجة تشديد (U = 90%) (90%, نشير إلى أن الاحداثي الأفقي للنقطة C هو $\sqrt{t_{90}}$, ومنها نحسب قيمة t90.

5- نحسب H_{dr}

6- حساب عامل التشديد بالعلاقة :

$$C_v = \frac{0.848.H_{dr}^2}{t_{90}}$$



الشكل 4.10 : طريقة جذر الزمن لتحديد عامل التشديد

4. 5. 2 طريقة لوغاريتم الزمن

يمكن تلخيص مراحل تحديد عامل التشديد بطريقة لوغاريتم الزمن بالتالي :

1- رسم العلاقة بين هبوط العينة ولوغاريتم الزمن (الشكل 4.11)

2- نمدد الجزأين شبه المستقيمين من المنحني فيلتقيان في نقطة A ويكون الانتقال الموافق لـ A (d_{100}) موافقاً لتشديد أولي 100%

3- نصحح الجزء الأولي من المنحني: يتم ذلك باختيار زمن t_1 (نقطة B) بالقرب من رأس الجزء الأولي من المنحني (U<60%), وزمن ثاني t_2 (نقطة C) بحيث يكون $t_2=4t_1$

4- نحدد فرق الانتقال $\Delta d=d_2-d_1$ على المنحني ونرسم النقطة D على مسافة شاقولية Δd فوق النقطة A فيكون الانتقال الموافق للنقطة D هو d_0 وهو يوافق بداية التشديد الأولي (U=0%).

5- ننصف المسافة الشاقولية بين d_0 وd_{100} فنحصل على d_{50} (أي الانتقال الموافق لـ 50% من التشديد الأولي)

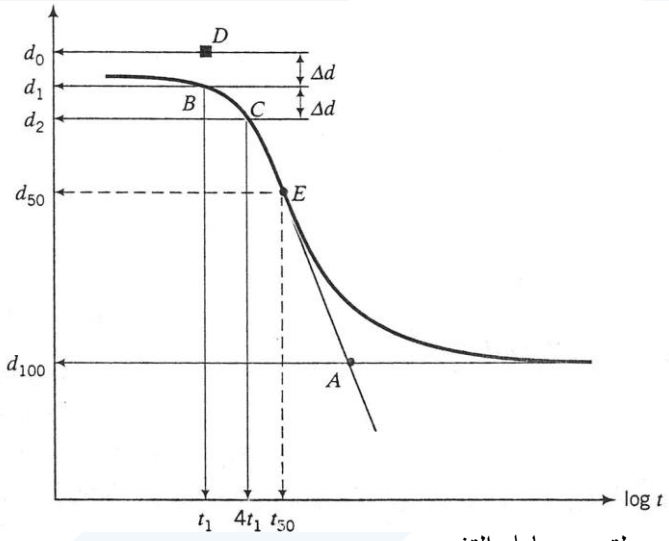
6- نأخذ الزمن الموافق لـ d_{50} فيكون هو t_{50} (أي الزمن الموافق لـ 50% من التشديد الأولي).

7- نحسب H_{dr}

8- نحسب عامل التشديد بالعلاقة :

$$C_v = \frac{0.197.H_{dr}^2}{t_{50}}$$

حيث يمثل الرقم 0.197 عامل الزمن الموافق لدرجة تشديد 50%



الشكل 4.11 : طريقة لوغاريتم الزمن لتحديد عامل التشديد

مسألة 1

أجريت تجربة الانضغاط (الأودومتر)على عينة تربة غضارية مشبعة ارتفاعها الأولي 20mm فكانت النتائج كالتالي:

الاجهاد المطبق kN/m^2	0	50	100	200	400
الهبوط الكلي ΔH (mm)	0	0.26	0.56	0.96	1.39
e					

إذا علمت أن رطوبة العينة الأولية $\omega_0=0.45$ ووزنها النوعي $G_s=2.72$, يطلب ما يلي:

1- إكمال الجدول السابق مع ذكر **القوانين وتفاصيل جميع العمليات الحسابية باستخدام دقة 3 أرقام مع التقريب**

2- رسم منحني الانضغاطية بالاحداثيات العادية

3- حساب قيمة قرينة اللدونة Cc وعامل الانضغاط a_v وعامل الانضغاط الحجمي m_v وعامل المرونة الأودومتري E'_{oed} و E' في المجال $(200\text{-}400)kN/m^2$ علماً بأن قيمة عامل بواسون $\nu'=0.3$.

الحل

الطلب الأول

رقم النقطة	0	1	2	3	4
الاجهاد المطبق kg/cm^2	0	50	100	200	400
الهبوط ΔH (mm)	0	0.26	0.56	0.96	1.39
e	1.224	1.195	1.162	1.117	1.069

$$e_0=\omega_0 * G_s=0.45*2.72=1.224$$

$$e_i=e_0-\frac{\Delta H}{H_0}(1+e_0)$$

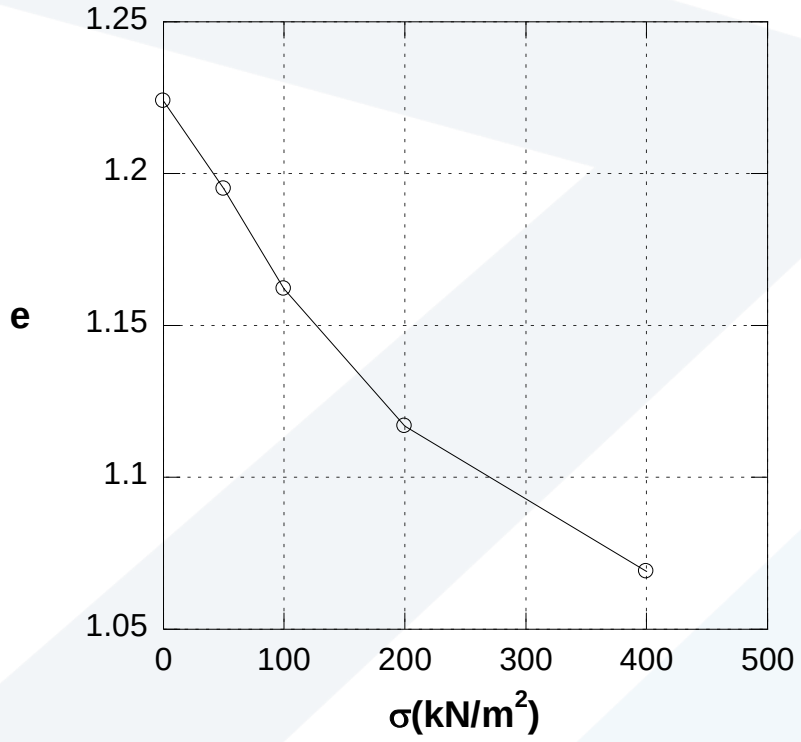
$$e_1=1.224-\frac{0.26}{20}(1+1.224)=1.195$$

$$e_2=1.224-\frac{0.56}{20}(1+1.224)=1.162$$

$$e_3=1.224-\frac{0.96}{20}(1+1.224)=1.117$$

$$e_4=1.224-\frac{1.39}{20}(1+1.224)=1.069$$

الطلب الثاني



الطلب الثالث

$$C_c = \frac{e_3 - e_4}{\log\frac{\sigma_4}{\sigma_3}} = \frac{1.117 - 1.069}{\log\frac{400}{200}} = 0.159$$

$$a_v = \frac{e_3 - e_4}{\sigma_4 - \sigma_3} = \frac{1.117 - 1.069}{400 - 200} = 0.00024 m^2 / kN$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} = \frac{0.00024}{1 + 1.224} = 0.00011 cm^2 / kg$$

$$E'oed = \frac{1}{m_v} = \frac{1}{0.00011} = 9091 kN / m^2$$

$$E' = \beta E'_{oed}$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu'^2}{1 - \nu'} = 1 - \frac{2 * 0.3^2}{1 - 0.3} = 0.743$$

$$E' = 0.743 * 9091 = 6755 kN / m^2$$

مسألة 2

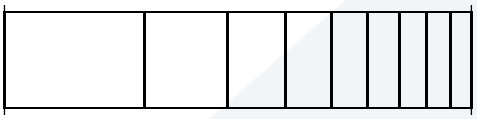
أجريت تجربة الانضغاط (الأودومتر) على عينة تربة غضارية ارتفاعها 20mm ووزنها الحجمي $18.5kN/m^3$ فكانت النتائج كالتالي:

الاجهاد المطبق kN/m^2	75	150	300	600	100
الهبوط ΔH (mm)	0.041	0.171	0.412	0.778	0.58
e					

إذا علمت أن رطوبة العينة الأولية $\omega_0=25.3\%$ ووزنها النوعي $G_s=2.7$, يطلب ما يلي :

1- حساب معامل المسامية لجميع مراحل التحميل المبينة بالجدول ووضعها ضمن الجدول.

2- رسم نتائج التجربة بالمقياس اللوغاريتمي باستخدام المقياس اللوغاريتمي المبين بالشكل التالي :



ملاحظة: يجب ذكر تفاصيل جميع العمليات الحسابية باستخدام دقة 3 أرقام مع التقريب

الحل

الطلب الأول

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{18.5}{1+0.253} = 14.76\ kN/m^3$$

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{27}{14.76} - 1 = 0.829$$

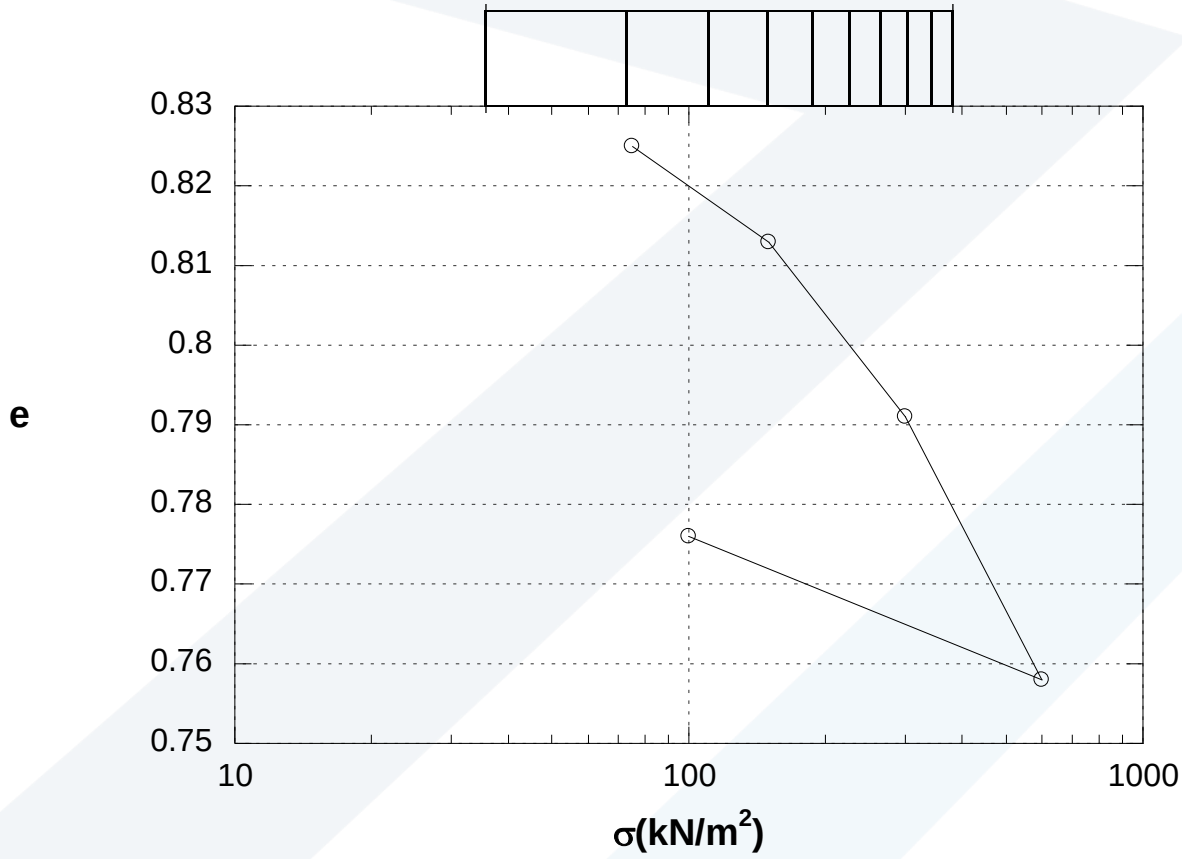
$$e_i = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0}(1+e_0) = 0.829 - \frac{\Delta H}{20}(1+0.829)$$

$$e_1 = 0.829 - \frac{0.041}{20}(1+0.829) = 0.825$$

$$e_2 = 0.829 - \frac{0.171}{20}(1+0.829) = 813$$

$$e_3 = 0.829 - \frac{0.412}{20}(1+0.829) = 0.791$$

$$e_4 = 0.829 - \frac{0.778}{20}(1+0.829) = 0.758$$

$$e_5 = 0.829 - \frac{0.58}{20}(1+0.829) = 0.776$$

الطلب الثاني