



INM 305

# Zemin Mekaniği

*Sıkışma ve Konsolidasyon Teorisi*

Doç.Dr. İnan KESKİN

[inaneskin@karabuk.edu.tr](mailto:inaneskin@karabuk.edu.tr), [inaneskin@gmail.com](mailto:inaneskin@gmail.com)

[www.inaneskin.com](http://www.inaneskin.com)

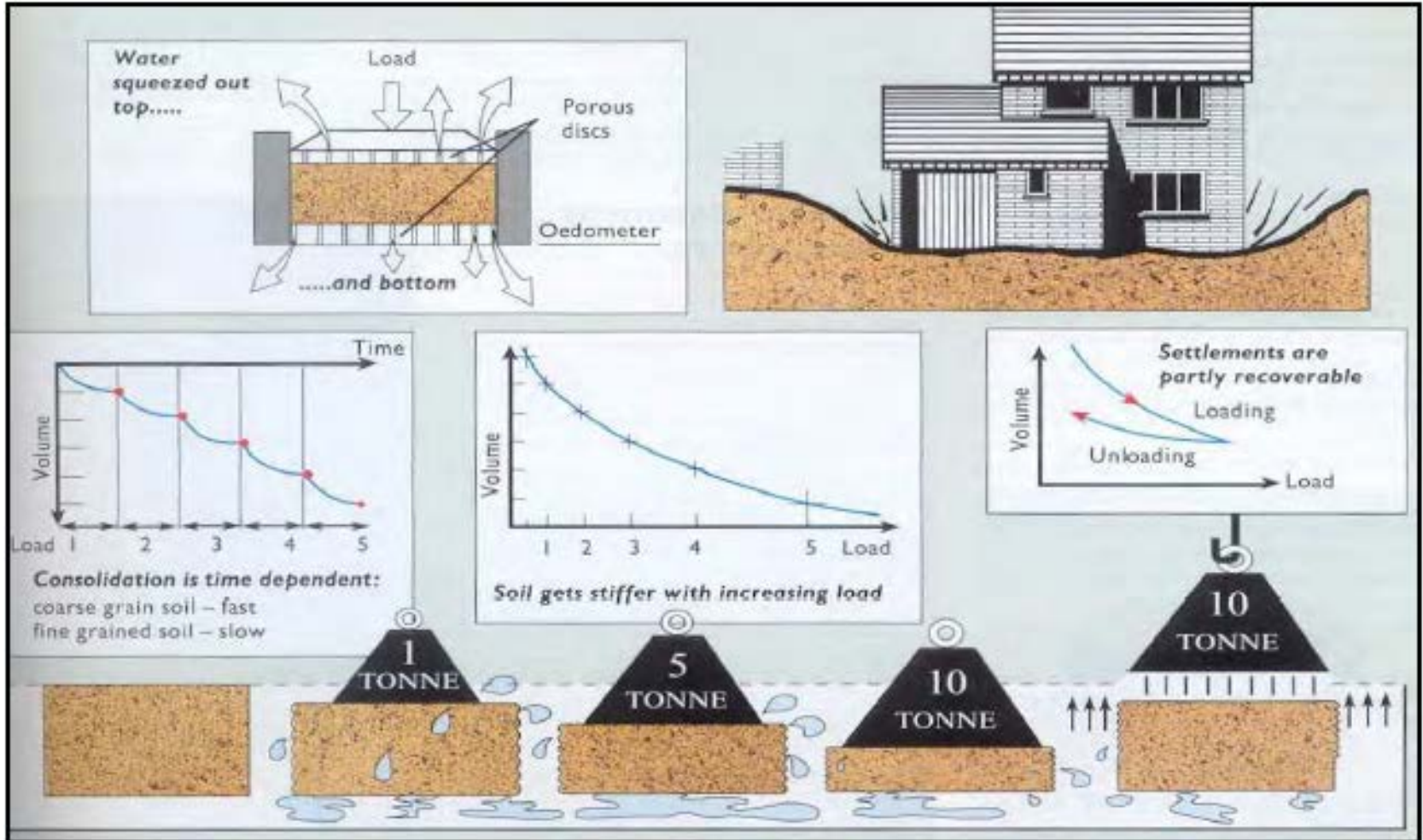
# Haftalık Konular

Hafta 1:	Zeminlerin Oluşumu
Hafta 2:	Zeminlerin Fiziksel ve Endeks Özelliklerinin Tanımlanması ve Problem Çözümleri
Hafta 3:	Zeminlerin Fiziksel ve Plastisite Özelliklerine Yönelik Deneyler
Hafta 4:	Zeminlerde Tane Dağılımı ve Analizi
Hafta 5:	Zeminlerin Sınıflandırılması
Hafta 6:	Zemin Sınıflama Sistemleri Uygulamaları ve Karşılaştırmalar
Hafta 7:	Zeminlerde Su
Hafta 8:	Yeraltı Gerilmeleri; Zemin kütlesi nedeniyle oluşan gerilmeler
Hafta 9:	Yeraltı Gerilmeleri; Düşey yükleme ile oluşan zemin kütlesindeki gerilmeler
Hafta 10:	Zeminlerin Kompaksiyonu
Hafta 11:	Standart Proktor Deneyi ve Modifiye Proktor Deneylerinin Uygulaması
Hafta 12:	Sıkışma ve Konsolidasyon Teorisi
Hafta 13:	Konsolidasyon Deneyi
Hafta 14:	Karışık Problem Çözümleri
Hafta 15:	Final Sınavı



# KONSOLIDASYON

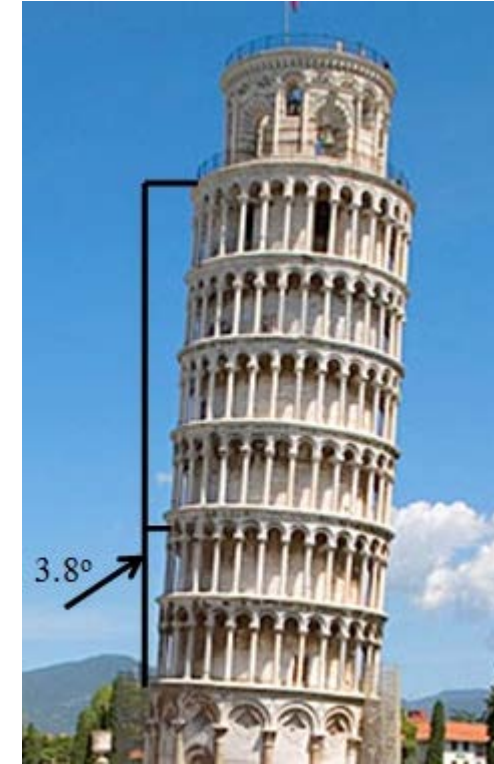
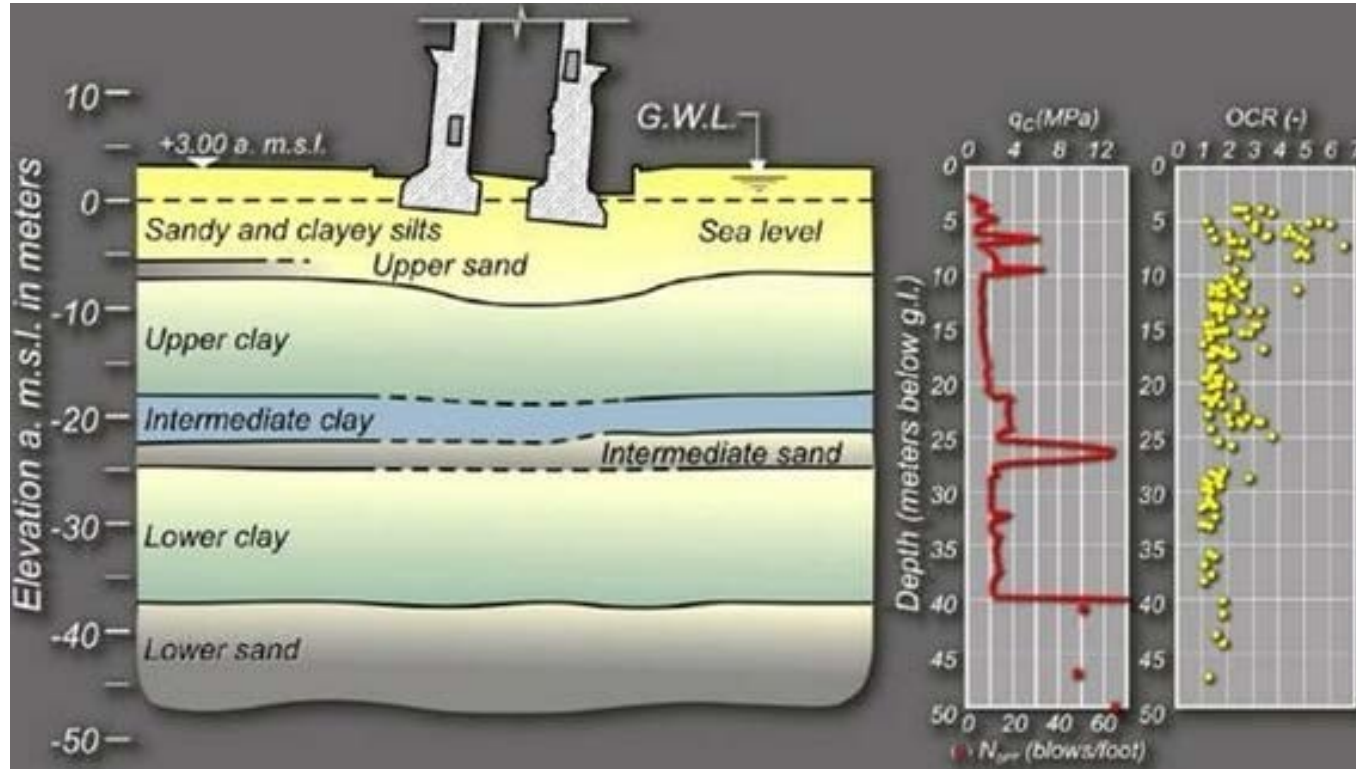
Herhangi bir zemin üzerine bina, baraj, köprü, yol ve buna benzer mühendislik yapılarından birinin yapılması, zeminin mevcut gerilme koşullarında önemli değişikliklere sebep olur. Gerilme koşullarında meydana gelen artışa bağlı olarak yapı altında bulunan zeminde sıkışmalar veya oturmalar meydana gelir. Gerilmelerin herhangi bir sebeple azalması sonucunda ise zeminde kabarmalar meydana gelir.



# KONSOLIDAYON

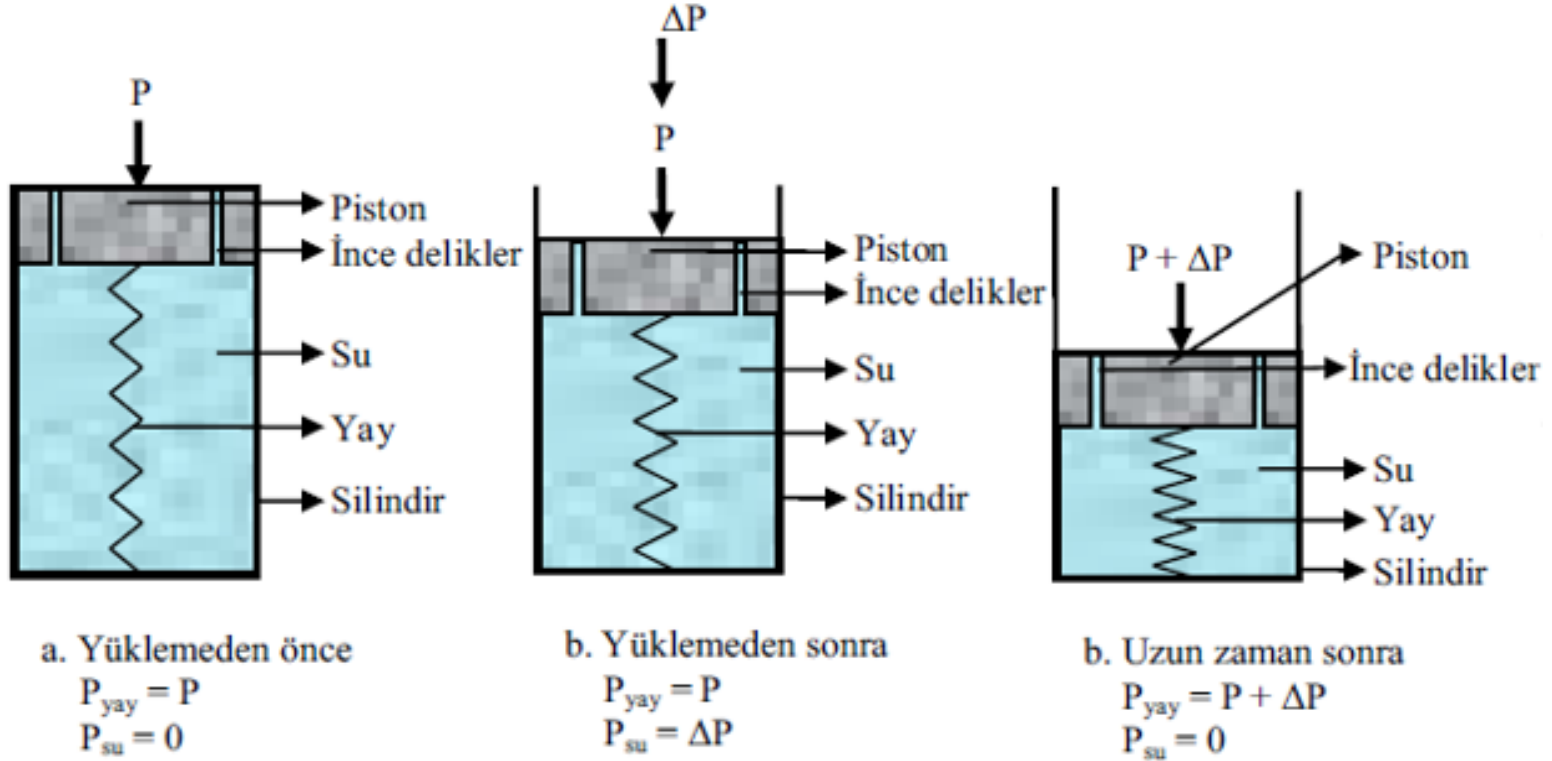
Zeminler lineer elastik bir malzeme olmadıkları için yük boşalımından sonraki hacimleri hiç bir zaman başlangıçtaki hacimlerine eşit olmaz. Zemin kütlesinin hacminde meydana gelen bu değişim, zeminle ilgili projelerin tasarımındaki en etkili faktördür.

Beton, çelik, ahşap ve plastik malzemelerin aksine, zeminlerde çok küçük oranlarda olan elastik davranış gerilmelerdeki belli değerlerin geçilmesinden sonra elastik olmaktan tamamen uzaktır. **Zeminlerde her yük boşalımından sonra geri dönüşümü olmayan deformasyonlar artmaktadır.**



# KONSOLİDAYON

**Konsolidasyon, zamana bağlı olarak zemin boşluklarındaki suyun dışarı atılması olayıdır.**  $\sigma'$  deki artış zemin boşluk oranında azalmaya ve deformasyonda artışa sebep olur. Süreç içerisinde de gözeneklerden su dışarı çıkar.



Konsolidasyon olayı, su dolu bir silindirdeki üzerlerinde çok ince delikleri olan ve bir yay üzerine oturan piston düzenine benzetilerek açıklanabilir. **İlk başta silindirdeki su herhangi bir yük taşımamaktadır.** Yük  $\Delta P$  kadar artırıldıktan sonra yük su tarafından taşınır yaya yük gelmez. Yük artıkça su deliklerden drene olur ve zamanla **da  $\Delta P$  yükü tamamen yay tarafından taşınır.**

# KONSOLIDAYON

Piston modelindeki su, zeminin içerisindeki boşluk suyuna; yay, zemin tane iskeletine; pistondaki delikler zeminin düşük geçirimsizliğine; pistonun düşey hareketide zeminin konsolidasyonuna karşılık gelir.

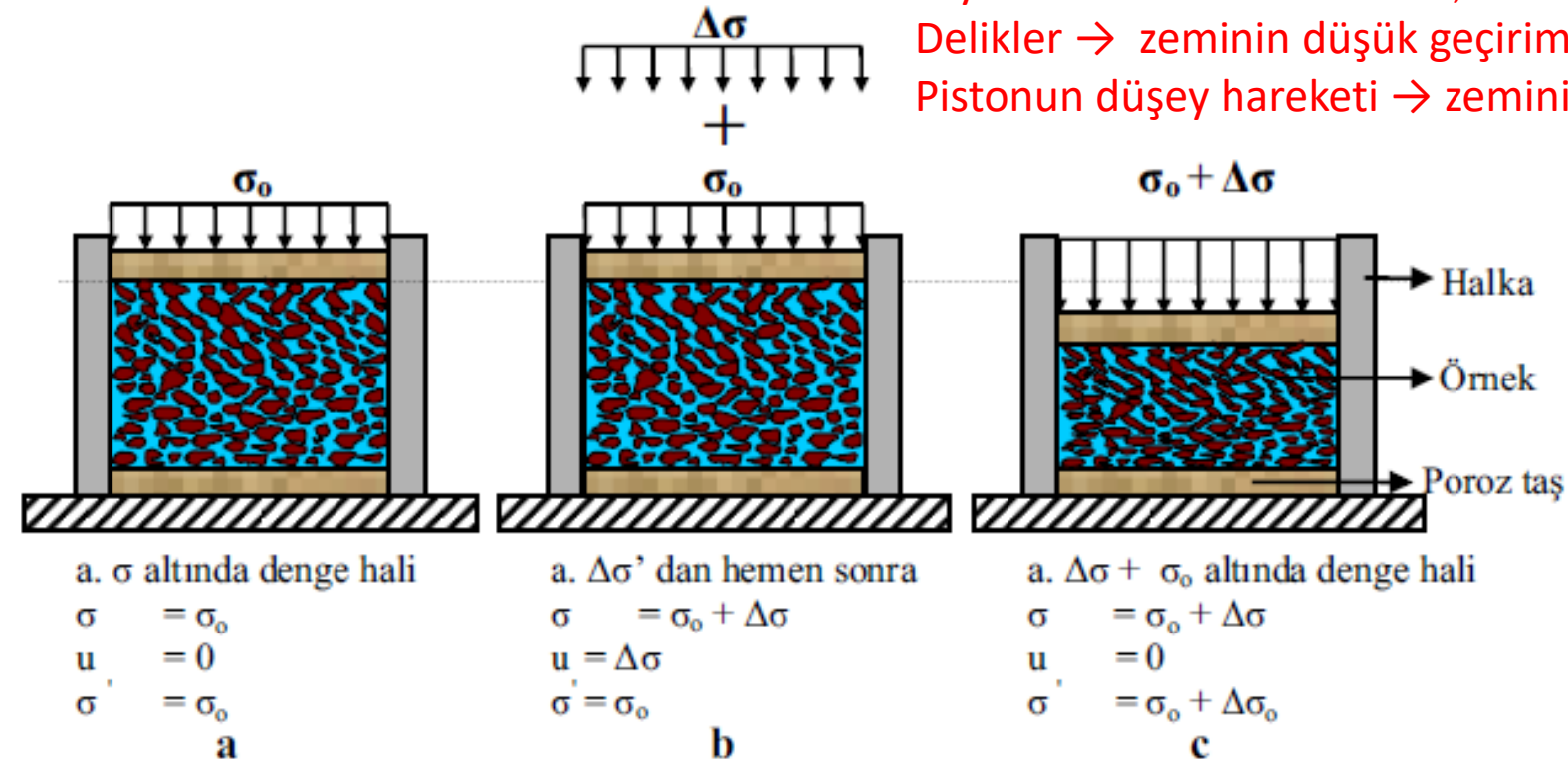
Dengede olan bir durumda (a), gerilme  $\Delta\sigma$  kadar artırıldıktan hemen sonra (b), ek gerilme artışı boşluk suyu tarafından taşınır ve boşluk suyu basıncı bir miktar artar. Zamanla, basınç altındaki su yavaşça dışarı akar ve uzun zaman sonra boşluk suyu ek basıncı 0 olur (c). Bu durumda zemin  $\Delta H$  kadar konsolidasyona uğrar.

Su → zeminin içerisindeki boşluk suyu

Yay → zemin tane iskeletine;

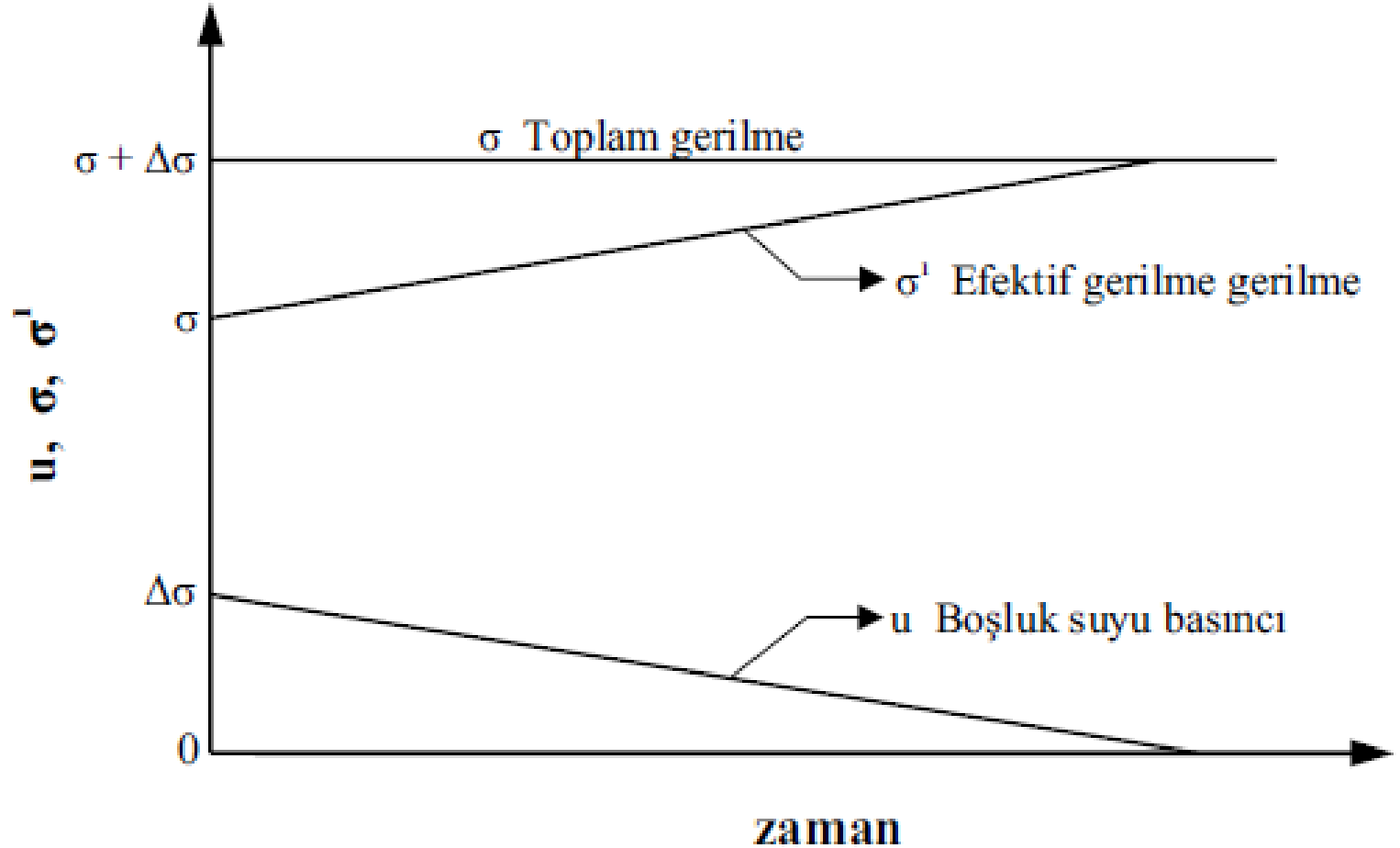
Delikler → zeminin düşük geçirimsizliğe;

Pistonun düşey hareketi → zeminin konsolidasyonu



# KONSOLIDAYON

Gerilme  $\Delta\sigma$  kadar artırıldıktan hemen sonra (b durumu), ek gerilme artışı boşluk suyu tarafından taşınır ve boşluk suyu basıncı bir miktar artar.

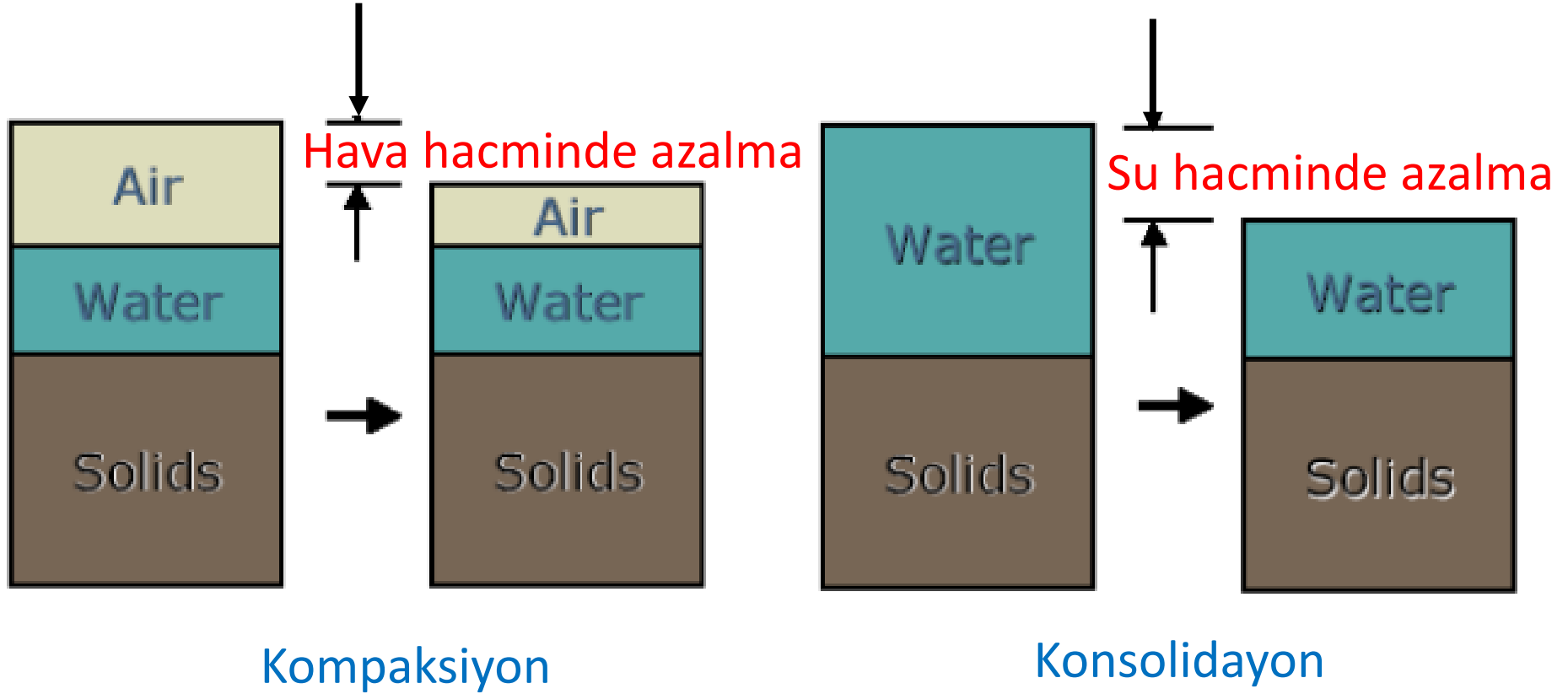


*Toplam gerilme ( $\sigma$ ) boşluk suyu basıncı ( $u$ ) ve efektif gerilme ( $\sigma'$ )'nin zamanla değişimi*



# KONSOLIDAYON - KOMPAKSİYON

Konsolidasyon ile kompaksiyon sıklıkla karıştırılan iki kavramdır.



# KONSOLIDAYON DENEYİ

## OEDOMETRE

deneyi, ince taneli zeminlerin bir boyutlu konsolidasyon davranışının belirlenmesinde kullanılan bir deneydir.

Deneyde; 20mm yükseklikte ve 75mm çapında örselenmemiş bir zemin örneği, düşey yönde etkiyen yük(lere) tabi tutulur.

Deney sonucunda,  $m_v$ ,  $c_v$ ,  $a_v$ ,  $C_c$ ,  $C_s$  vb zemin özellikleri tespit edilir.



a



b



c



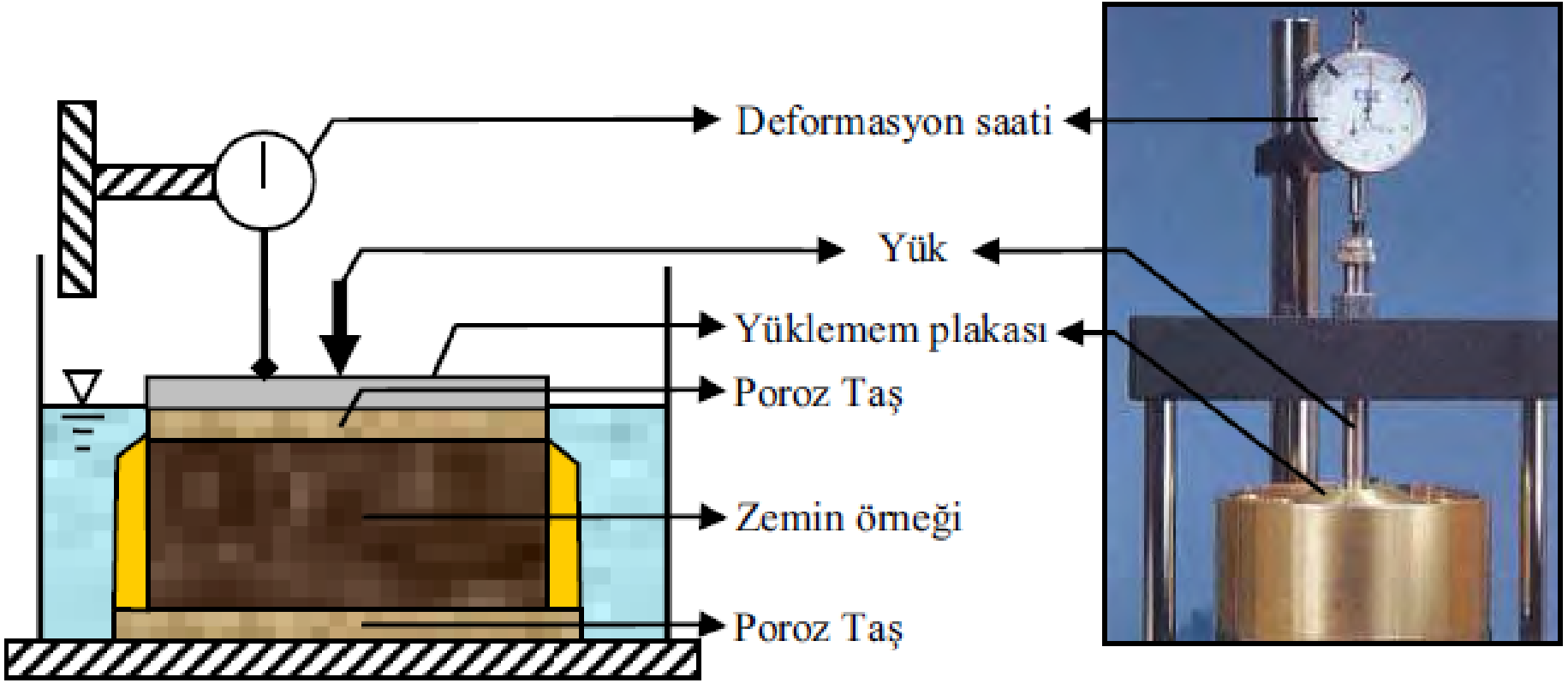
d



e

a) Ödometre cihazının genel görüntüsü, (b) konsolidasyon hücresi ve deformasyon saati, (c) hücre içi aparatlar, (d) numune ringleri (e) yükleme plakaları

# KONSOLIDAYON DENEYİ



*Konsolidasyon (ödometre) deneyinin şematik ve fotoraf görüntüsü*

- Uygulanan yükte artışa gidilerek (25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 kPa) deneye devam edilir.
- $\frac{1}{4}$ ',  $\frac{1}{2}$ ', 1', 2', 5', 10', 30', 1,2,4,8 ve 24 saatler de okuma yapılır
- Her bir yükleme sonucu oluşan oturma miktarı ve zaman değerleri kaydedilir.
- Her yükleme kademesinde 24 saat beklenir.



# KONSOLIDAYON DENEYİ



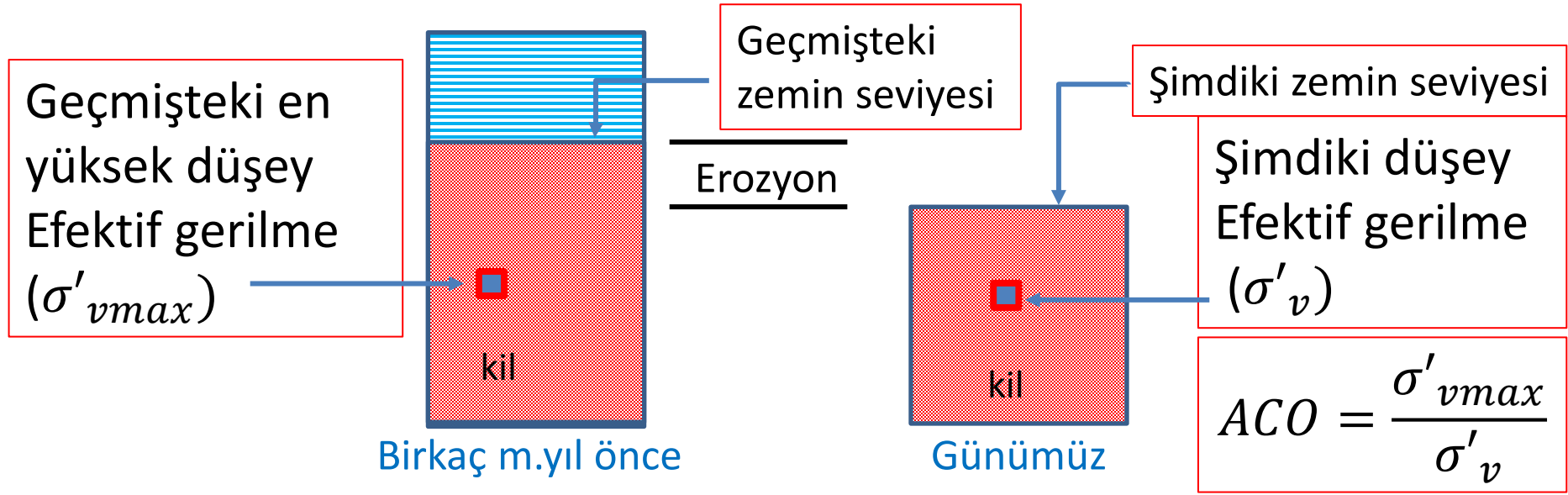
# KONSOLIDASYON/Karşılaştırma

İri Taneli zeminlerde  
oturmanın tamamlanma süresi

İnce Taneli zeminlerde  
oturmanın tamamlanma süresi



# NORMAL KONSOLİDE (NC) - AŞIRI KONSOLİDE KİLLER (OC)



**OCR**, geçmişte zeminin maruz kaldığı en yüksek etkin gerilmenin, güncel etkin gerilmeye oranı olarak tanımlanabilir.

*En yüksek geçmiş etkin gerilme ÖN KONSOLİDASYON BASINCI ( $\sigma'_c$ ) olarak da bilinir.*

**NORMAL KONSOLİDE killer (NC);** Güncel etkin gerilmeler yüksek bir etkin gerilmeye maruz kalmamış killer

OCR=1

düşük makaslama dayanımı

**AŞIRI KONSOLİDE killer (OC);** Geçmişte, bugünkü etkin gerilmeden yüksek etkin gerilmeye maruz kalmış killer (OC)

OCR>1

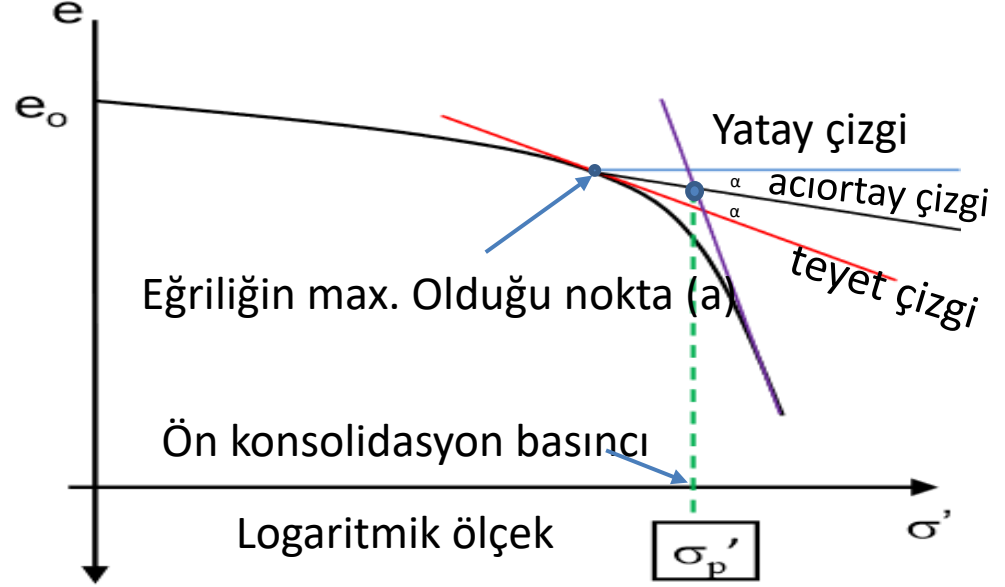
Yüksek makaslama dayanımı

# ÖN KONSOLIDASYON BASINÇLARININ BELİRLENMESİ

Geçmişte zemin tabakalarının maruz kaldığı en büyük gerilme değeridir.

Birçok araştırmacı ön konsolidasyon basıncının tayini için metodlar geliştirmişlerdir.

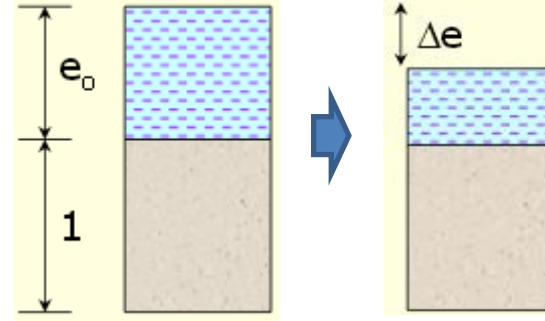
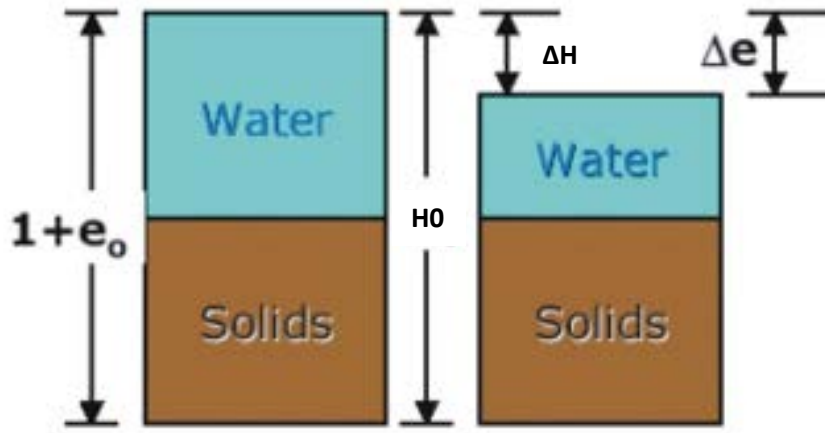
Ancak, bu yöntemler arasında şimdiye kadar en çok kabul göreni Casagrande (1936)'nın geliştirdiği grafik yöntemidir.



1. Göz kararı ile boşluk oranı - maksimum efektif gerilme eğrisinin en küçük yarıçap değerine sahip olduğu veya maksimum eğilme noktası (a noktası) belirlenir,
2. a noktasından geçecek yatay bir doğru çizilir,
3. a noktasından geçen ve eğriye teğet bir çizgi çizilir,
4. Bu iki doğrunun açıortayı olan doğru çizilir,
5. Boşluk oranı - efektif konsolidasyon basıncı eğrisinin doğrusal kısmı açı ortay doğrusu ile çakışacak şekilde uzatılır. Kesişme noktasından düşey olarak efektif konsolidasyon basıncı eksenine bir doğru indirdiğimizde bulacağımız değer numunenin ön konsolidasyon basıncını, (yani, geçmişte görmüş olduğu en yüksek efektif basınç değerini) verecektir.

# $\Delta H$ - $\Delta e$ İLİŞKİSİ

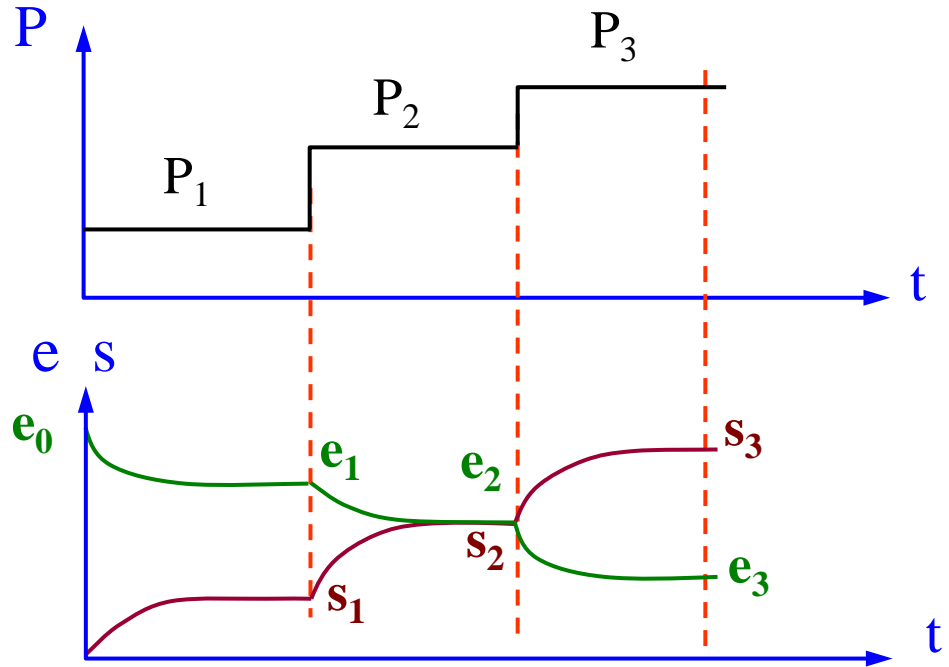
Sıkışma, boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu, zemin iskeletindeki hacim değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, boşluk oranındaki değişim büyük önem kazanmaktadır.



düşey şekil değiştirme

$$\frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

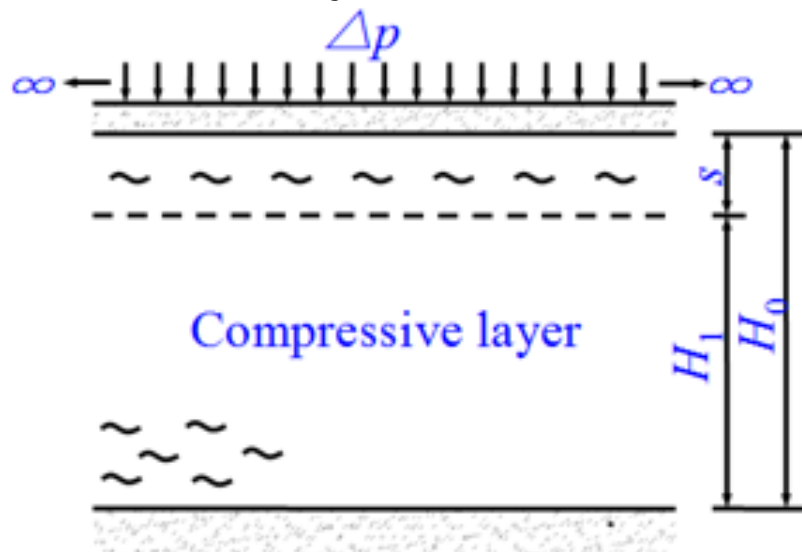


- $\Delta H$  Konsolidasyon oturması
- $H_0$  Kil tabakasının kalınlığı
- $\Delta e$  Boşluk oranındaki değişim
- $e_0$  Başlangıç boşluk oranı

# KONSOLİDASYON OTURMASI

Üç farklı konsolidasyon oturması tanımlanmıştır:  $S=S_i+S_c+S_s$

1. Ani Oturma ( $S_i$ ); Ani oturma kuru zeminlerde elastik deformasyonlar veya yarı doymun veya tamamıyla doymun zeminlerde su muhtevsından bir değişim olmadığı durumlarda meydana gelen oturma şeklidir,
2. Konsolidasyon oturması ( $s_c$ ); Birincil oturmalar veya konsolidasyon oturması olarak adlandırılan oturmalar; suya doymun kohezyonlu zeminlerde zemin boşluklarındaki suyun zemini terk etmesiyle hacimsel değişmeler sonucu oluşmaktadır,
3. İkincil (Sekonder) konsolidasyon ( $s_s$ ); İkincil konsolidasyon; suya doymun kohezyonlu zeminlerde zemin yapısında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler sonucu oluşmaktadır



Zemin Türü	Birincil Oturma	Konsolidasyon Oturması	İkincil Oturma
Kumlar	Evet	Hayır	Hayır
Killler	Mümkün	Evet	Mümkün
Organik Zeminler	Mümkün	Mümkün	Evet

*Zemin türlerine göre gözlenebilecek oturma bileşenleri (Fang, 1990).*

# KONSOLIDASYON OTURMASI

Konsolidasyon oturmalarını tahmin etmek için iki farklı yol kullanılabilir;

## 1. Hacimsel sıkışma katsayısı (mv) yöntemi (e-σ' grafiği)

$$\Delta H = H.mv . \Delta\sigma$$

## 2. Sıkışma indisini (Cc) kullanarak (e- logσ' grafiğini)

tabaka ortasında yüklemeye önce

gerilme artışı

$$\Delta H = H \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_1 + \Delta\sigma'}{\sigma'_1}$$

yüklemeye önceki boşluk oranı

$C_c = 0,009$  (LL-10) normal killer

$C_c = 0,0115 W_n$  organik zeminler, turba

$C_c = 0,007$  (LL-10) örselenmiş killer

$C_c = 0,75 (e_0 - 0,5)$  az plastik zeminler

$C_c = 0,156 e_0 + 0,0107$  tüm killer

$C_c = 0,2343 * LL * G_s$

# KONSOLIDASYON PARAMETRELERİ

Hacimsel sıkışabilirlik katsayısı ( $M_v$ ) ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )

Kil tabakasında birim gerilme artışına karşılık gelen hacimsel şekil değiştirme olarak tarif edilmektedir.

$$M_v = \frac{1}{1+e_0} \left( \frac{e_0 - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \right) = \frac{1}{H_0} \left( \frac{H_0 - H_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \right)$$

mv birimi:  $\text{m}^2/\text{kN}$ ,  $\text{cm}^2/\text{kg}$ ,  $\text{m}^2/\text{t}$

Konsolidasyon Yüzdesi (U)

$$(U) = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_1}$$

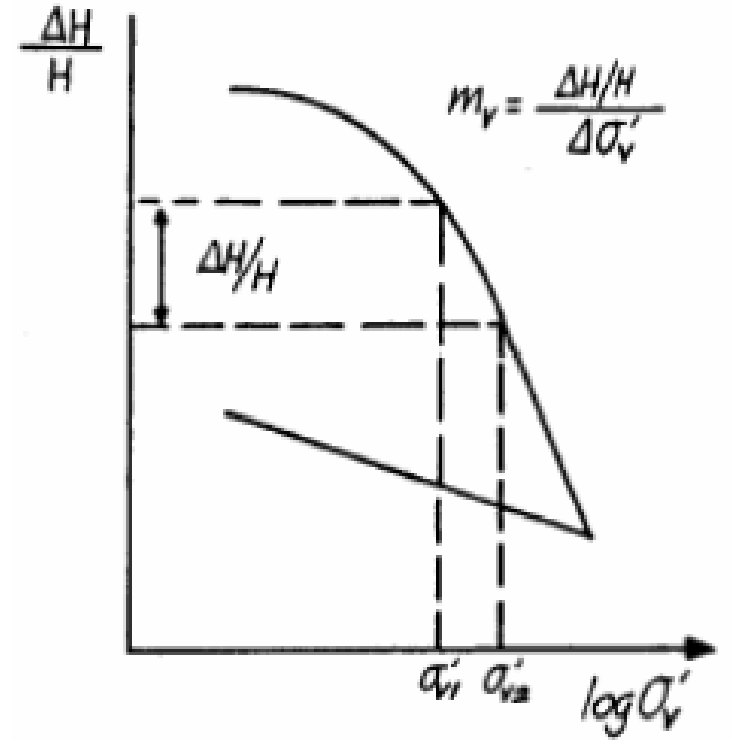
$e_0$  : ilksel boşluk oranı;

$e$  : konsolidasyon sırasındaki boşluk oranı;

$e_1$  : deney sonundaki boşluk oranı

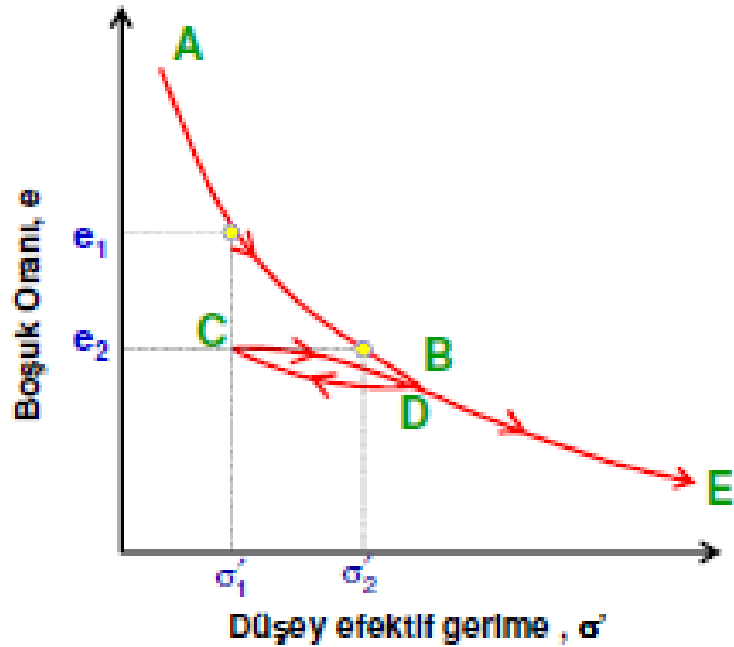
$$0 \leq U \leq 1$$

Zaman Faktörü ( $T_v$ ) =  $\frac{C_v * t}{d^2}$   $C_v$ : konsolidasyon katsayısı,  $t$  zaman,  $d$ : drenaj uzunluğu.  
Her iki yüzeyde geçirimli ise,  $d=H/2$ , tek yönde drenaj varsa  $d=H$  alınır.





# KONSOLIDASYON PARAMETRELERİ

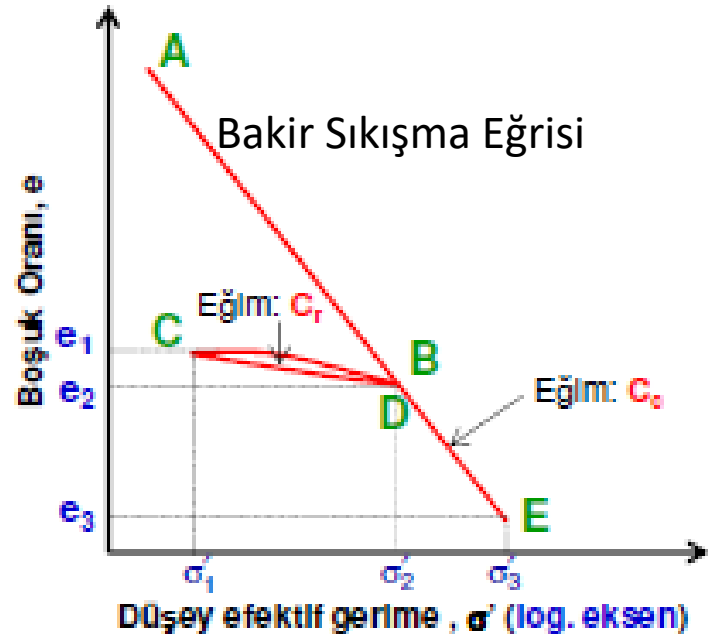


## Sıkışma Katsayısı

$$a_v = -\frac{(e_2 - e_1)}{(\sigma_2 - \sigma_1)}$$

$$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \bar{\sigma}} \quad (\text{m}^2 / \text{kN})$$

av birimi: m<sup>2</sup>/kN, cm<sup>2</sup>/kg, m<sup>2</sup>/t



## Sıkışma İndisi

$$C_c = -\frac{e_3 - e_2}{\log \sigma_3 - \log \sigma_2} = \frac{e_3 - e_2}{\log \frac{\sigma_3}{\sigma_2}}$$

## Yeniden Sıkışma İndisi

$$C_r = -\frac{e_2 - e_1}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} = \frac{e_2 - e_1}{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}$$



# KONSOLIDASYON PARAMETRELERİ

Konsolidasyon Katsayısı ( $C_v$ ) İki yol ile bulunabilir.

$$T_v = \frac{C_v * t}{d^2}$$

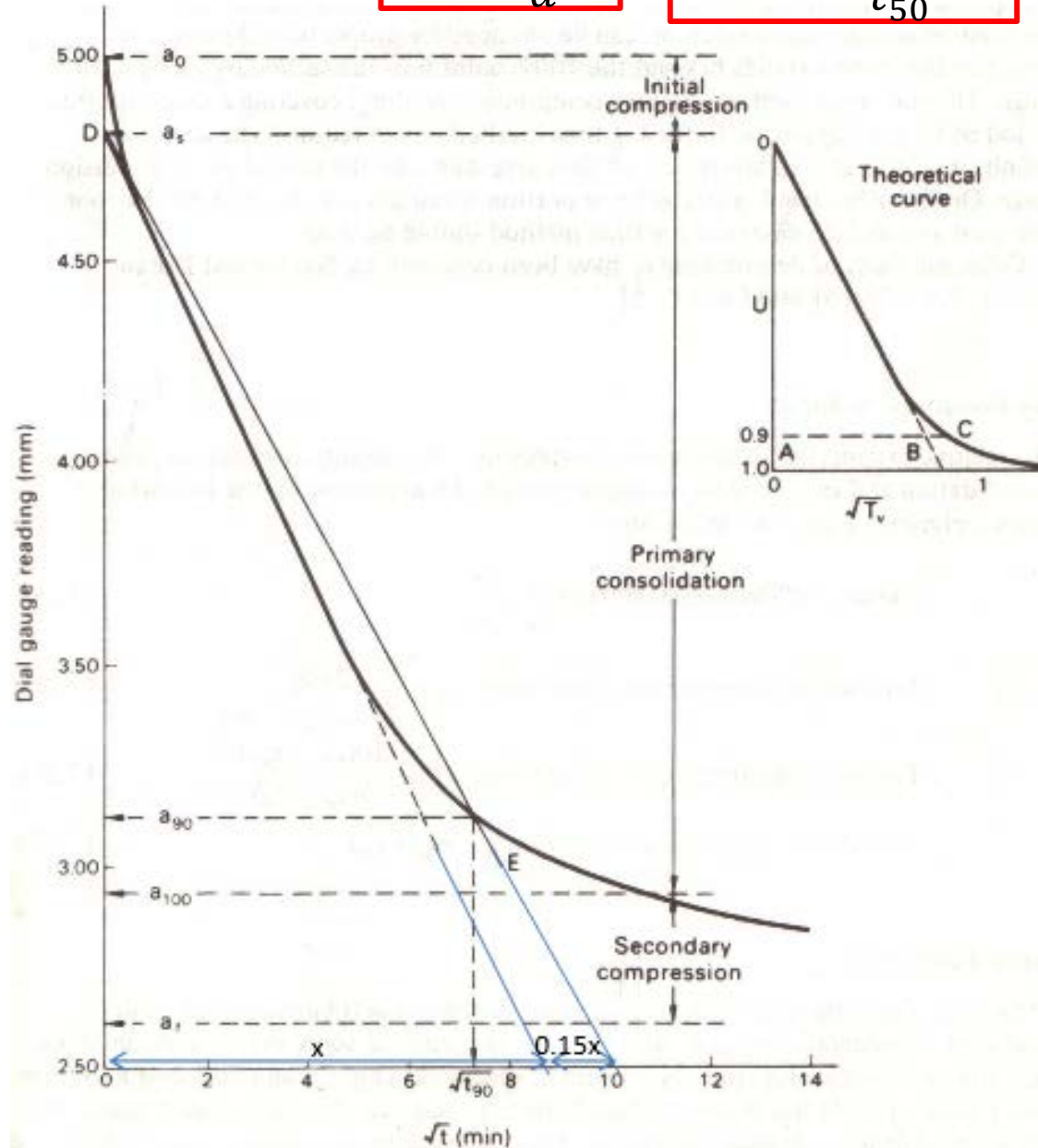
$$C_v = \frac{0.197 * d^2}{t_{50}}$$

- Log Time (Casagrande)
- Karekök Zaman yöntemi

## Karekök (t)

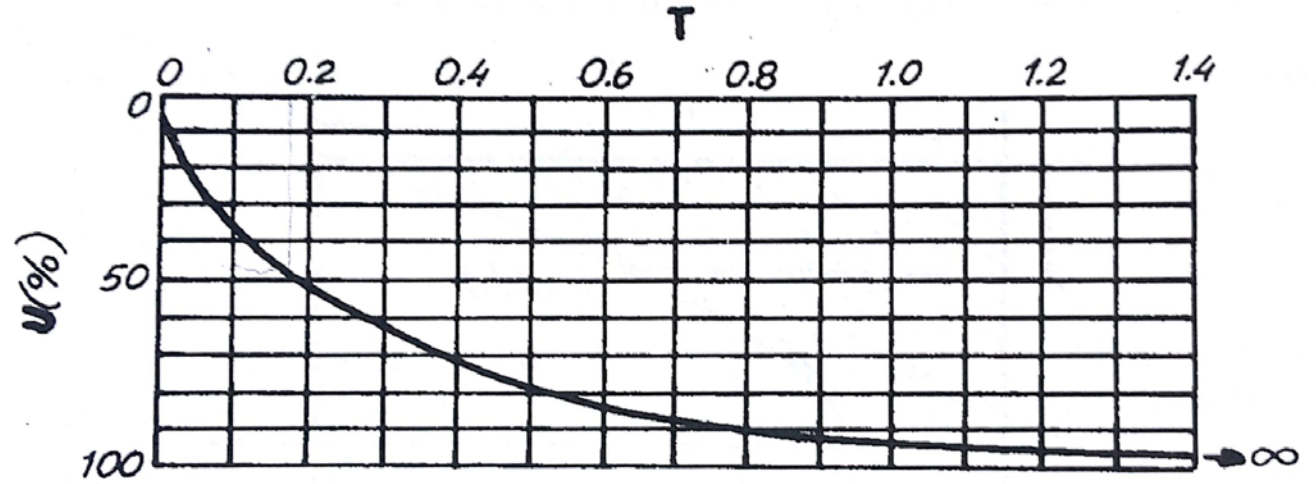
- Teorik eğrinin  $U = \%60$ 'a kadar doğrusal olduğu kabul edilir.
- Bu doğruyu uzatıp, 1.15 katını yatayda alıp, eğriyi kestiği noktanın izdüşümü,  $U = \%90 \rightarrow \sqrt{t}_{90}$

$$C_v = \frac{0.848d^2}{t_{90}}$$

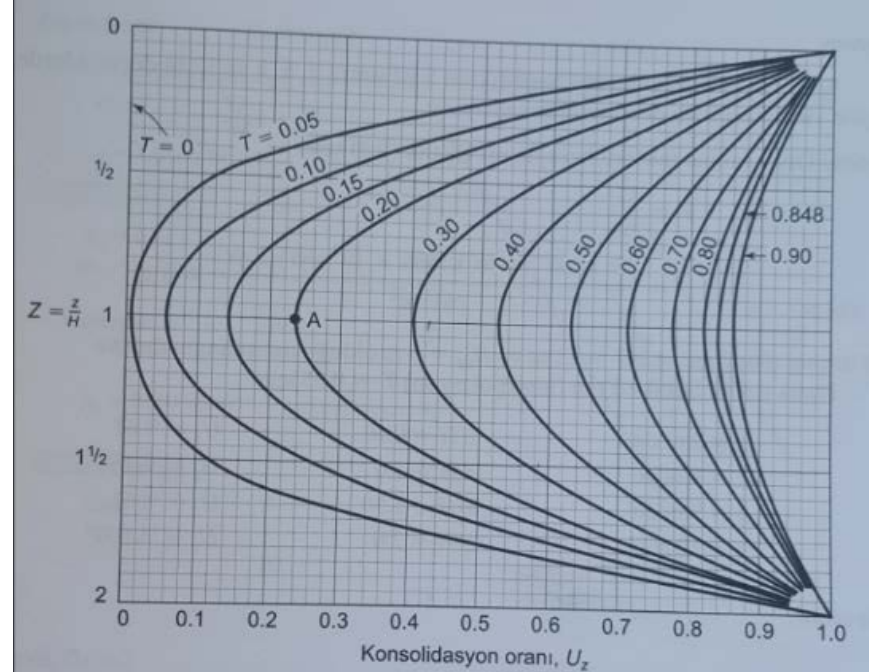


# OTURMA ZAMAN İLİŞKİSİ

$U$ (%)	$T_v$	$U$ (%)	$T_v$
0	0	60	0.287
10	0.008	65	0.342
20	0.031	70	0.403
30	0.071	75	0.478
35	0.096	80	0.567
40	0.126	85	0.684
45	0.159	90	0.848
50	0.197	95	1.127
55	0.238	100	$\infty$



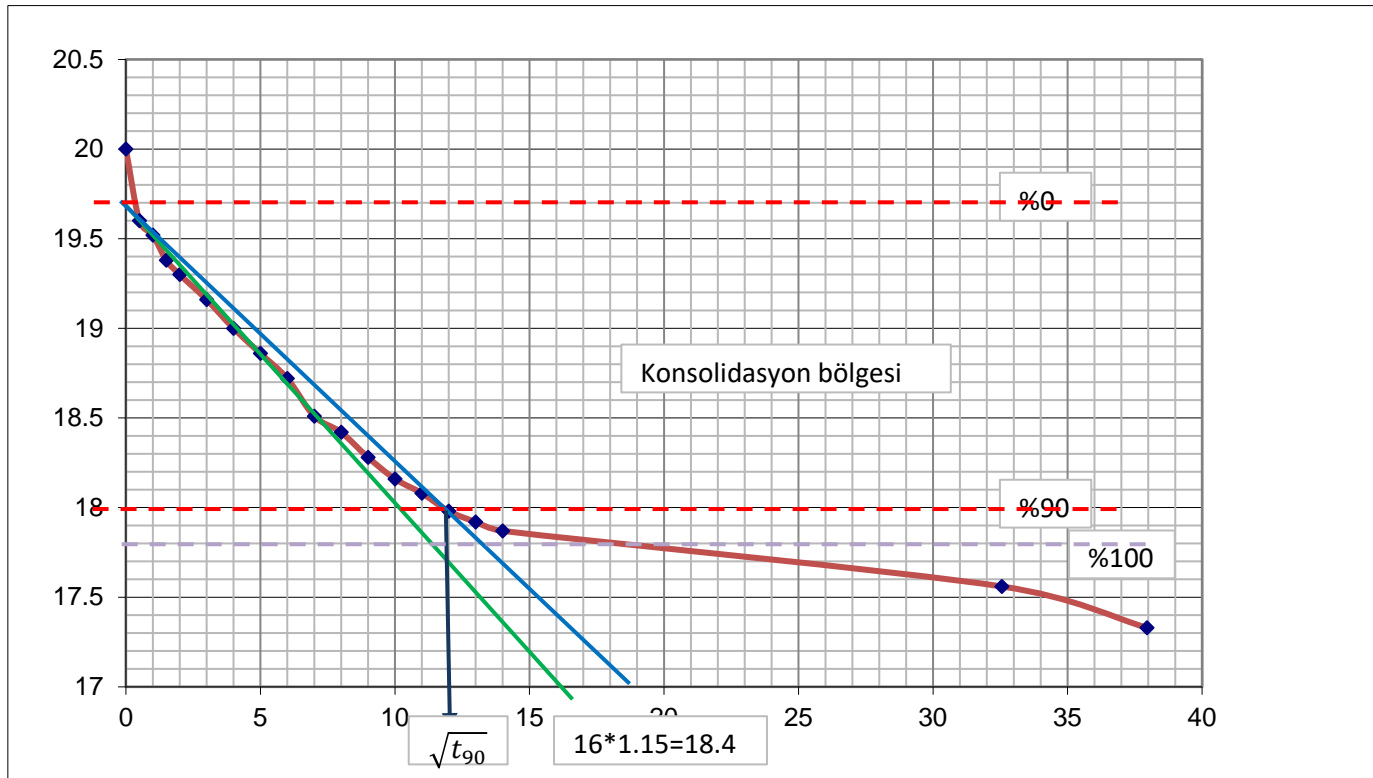
Ortalama Konsolidasyon Yüzdesinin Zaman Faktörü ( $T$ ) ile Değişimi



# Soru:

Taylor yöntemine göre konsolidasyon grafiğini çizerek  $c_v$  yi hesaplayınız.

Zaman (dk)	0	0.25	1	2.25	4	9	16	25	36	49	64	81	100	121	144	169	196	1060	1440
Kalınlık (mm)	20	19.60	19.52	19.38	19.30	19.16	19.00	18.86	18.72	18.51	18.42	18.28	18.16	18.08	17.98	17.92	17.87	17.56	17.33
$\sqrt{vt}$	0	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	32.56	37.95



$$h_{ort} = \frac{20+17.33}{2} = 18.65 \text{ mm} \quad c_v = \frac{0.848 * (h)^2}{t_{90}} \implies \frac{0.848 * \left(\frac{18.65^2}{4}\right)}{144} = 0.512 \text{ mm}^2/\text{dk}$$