



TMMOB  
İNŞAAT  
MÜHENDİSLERİ  
ODASI

Geoteknik Meslekiçi Eğitim Kursu

# Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Analizler Notları

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ  
Y.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Geoteknik Anabilim Dalı  
[kilic@yildiz.edu.tr](mailto:kilic@yildiz.edu.tr)

03 Aralık 2017  
İstanbul

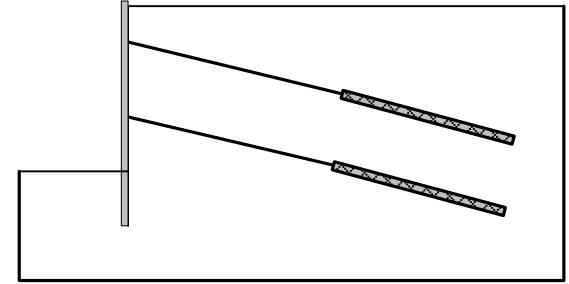
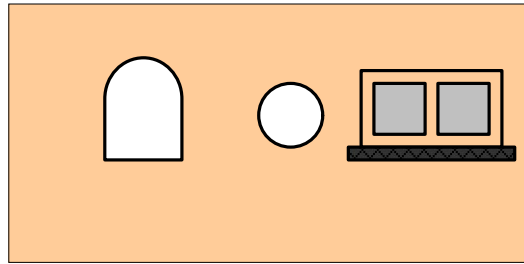
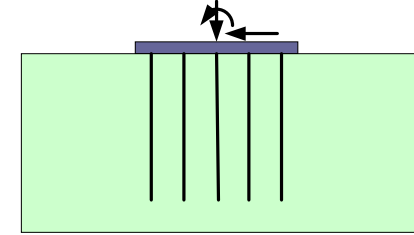
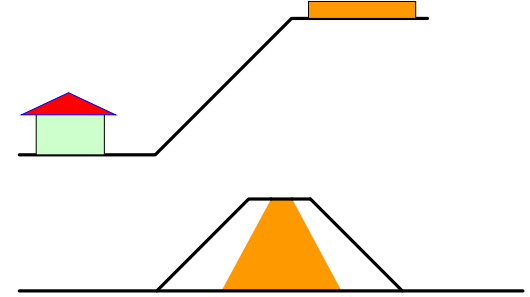


# İçerik

- ❖ Giriş
- ❖ Geoteknik Problemler
  - ❖ Tasarım Amaçları
  - ❖ Tasarım Gereçleri
  - ❖ Temel Teorik Bilgiler
  - ❖ Geometrik İdealizasyon
- ❖ Çözüm Yöntemleri
- ❖ Geoteknik Problemlerin Sayısal Analizi

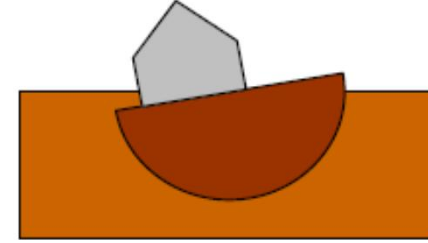
# Geoteknik Problemler

1. Temeller
2. Kazı ve şevler
3. Dolgular
4. İstinat yapıları
5. Yeraltı yapıları

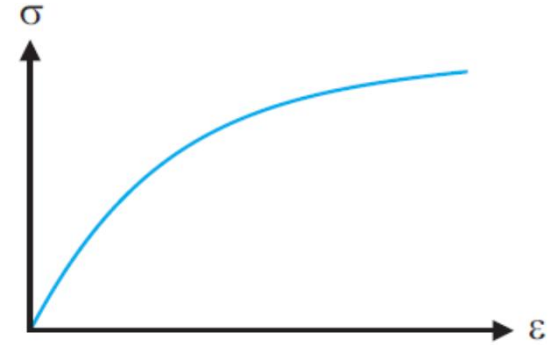


# Geoteknik Problemlerin Analizi

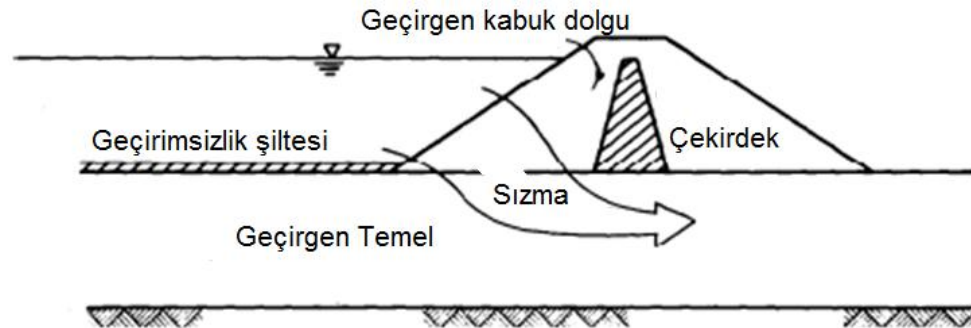
1. Stabilite problemleri



2. Gerilme şekil değiştirme problemleri



3. Zemin içinde su hareketi



# Zemin Mekaniği Süreklilik Teorisi

Süreklilik teorisi, elastisite, plastisite ve vizkozitenin matematiksel eşitliklerini içerir.

- 1) Denge ve hareket eşitlikleri
- 2) Geometri şartları veya deformasyonlar ile deplasmanların uygunluğu
- 3) Geçerli olan malzeme kanunları veya gerilme deformasyon ilişkileri

# Virtüel İş Prensibi

- Virtüel iş prensibine göre, dış yükler ve deplasmanlar nedeniyle yapılan iş, içsel gerilmeler ve deformasyonlar nedeniyle yapılan işe eşittir.

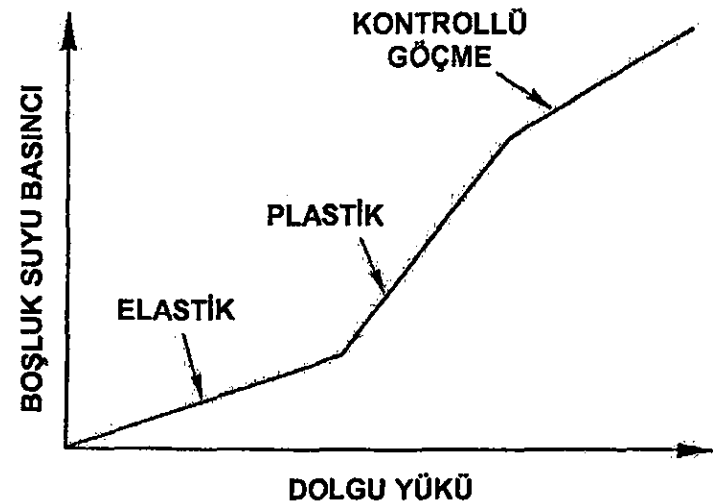
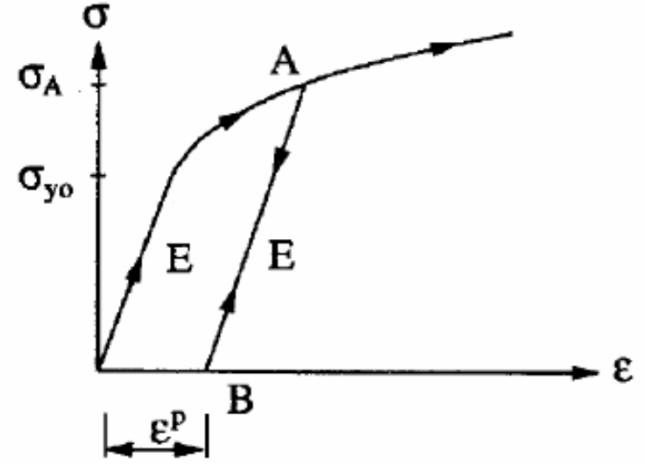
$F$ =dış yük

$w$ =deplasmanlar

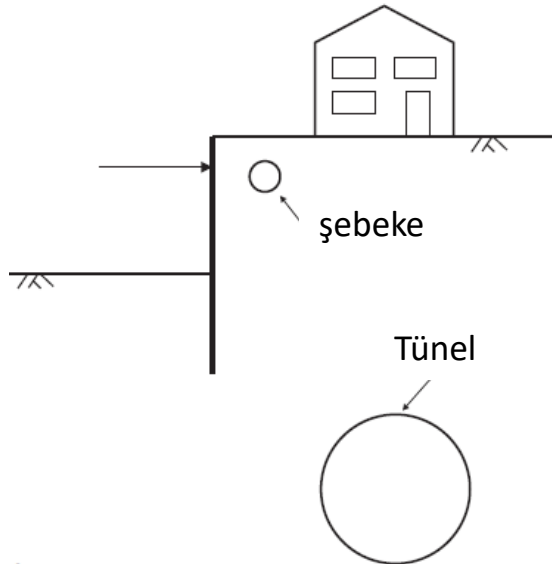
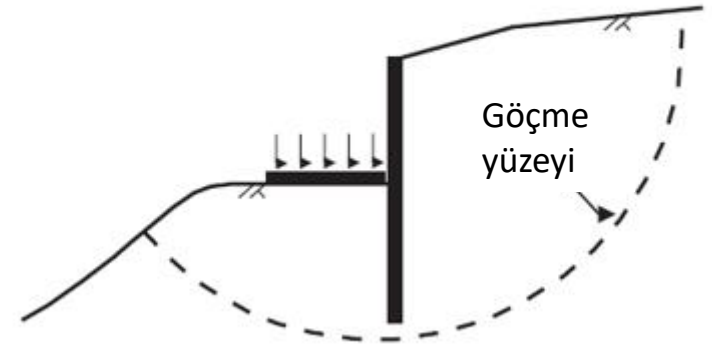
$$\sum F \delta w = \int_v \sigma \delta \epsilon d(\text{hacim})$$

# Elastik ve Plastik Deformasyonlar

- Zeminler dış yüklerle yüklendiği zaman, elastik ve plastik deformasyonlar oluşur.
- Küçük yük seviyelerinde deformasyonlar da çok küçük ve zemin türüne göre elastik olabilir, ancak yük arttıkça deformasyonlar da artacak ve plastik karakterde gelişecek ve sonuç olarak deformasyonlar çok arttığı zaman zeminde göçme meydana gelecektir.



# Geoteknik Tasarımda Amaçlar



- ❖ Zemin ve komşu yapılarda şekil değiştirme
- ❖ Kesit tesirleri



# Tasarım gereçleri

- Geometri
- Zemin profili
- Zemin parametreleri
- YASS durumu
- Komşu yapılar
- İnşaat süresi ve adımları
- Yapı Ömrü
- Tasarım kısıtları

# İdeal Çözüm

- ❖ Denge,
  - ❖ Uygunluk,
  - ❖ Malzeme Bünye Davranışı,
  - ❖ Sınır Koşulları (kuvvet ve yer değiştirme)
- koşullarını sağlamalıdır

# Denge

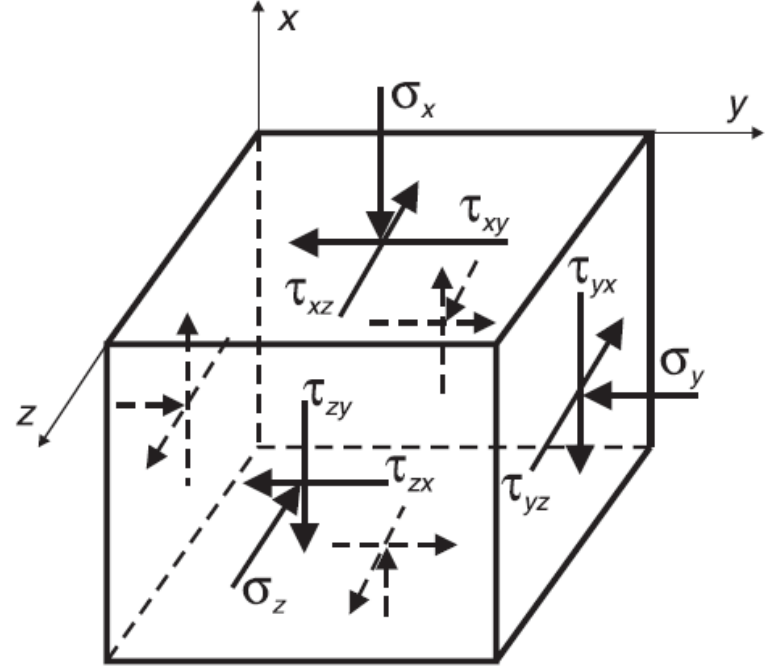
$\gamma$ , yer çekimi (x) doğrultusundaki öz ağırlığı göstermektedir.

Bu denklemlerde toplam gerilmeler göz önüne alınmış olup basınç durumu pozitif kabul edilmiştir.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \gamma = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0$$

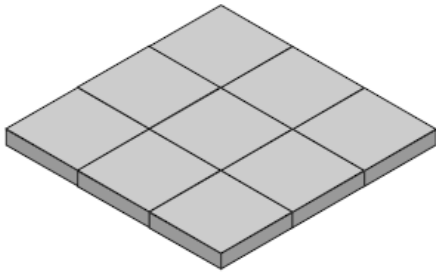


*Bilinmeyen sayısı = 6 Gerilme bileşeni*

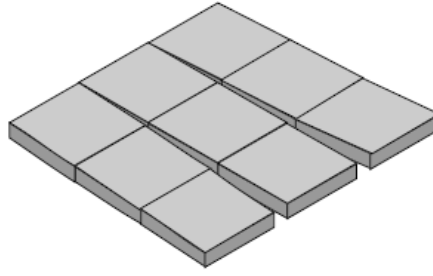
*Denklem sayısı = 3 Denge denklemi*

*Bilinmeyen sayısı > Denklem sayısı*

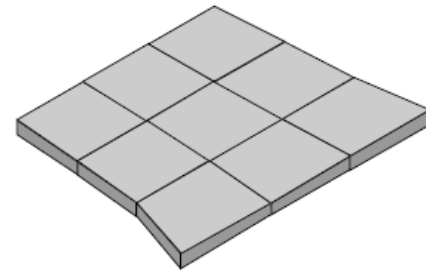
# Uygunluk: Geometrik



*(a) Orijinal*



*(b) Uygun olmayan*



*(c) Uygun*

# Uygunluk: Matematiksel

$\varepsilon_x = -\frac{\partial u}{\partial x}$	$\varepsilon_y = -\frac{\partial v}{\partial y}$	$\varepsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z}$
$\gamma_{xy} = -\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$	$\gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$	$\gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}$

x, y, z eksenleri doğrultusundaki yer değiştirmeler sırası ile u,v ve w

*Bilinmeyen sayısı = 6 Gerilme + 6 ř.D. Bileşeni + 3y.d = 15*

*Denklem sayısı = 3 Denge + 6 Uygunluk = 9*

*Bilinmeyen sayısı > Denklem sayısı*

# Malzeme bünye davranışı

İdeal malzeme : lineer elastik homojen izotrop

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{yz} \\ \Delta\tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{yz} \\ \Delta\gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

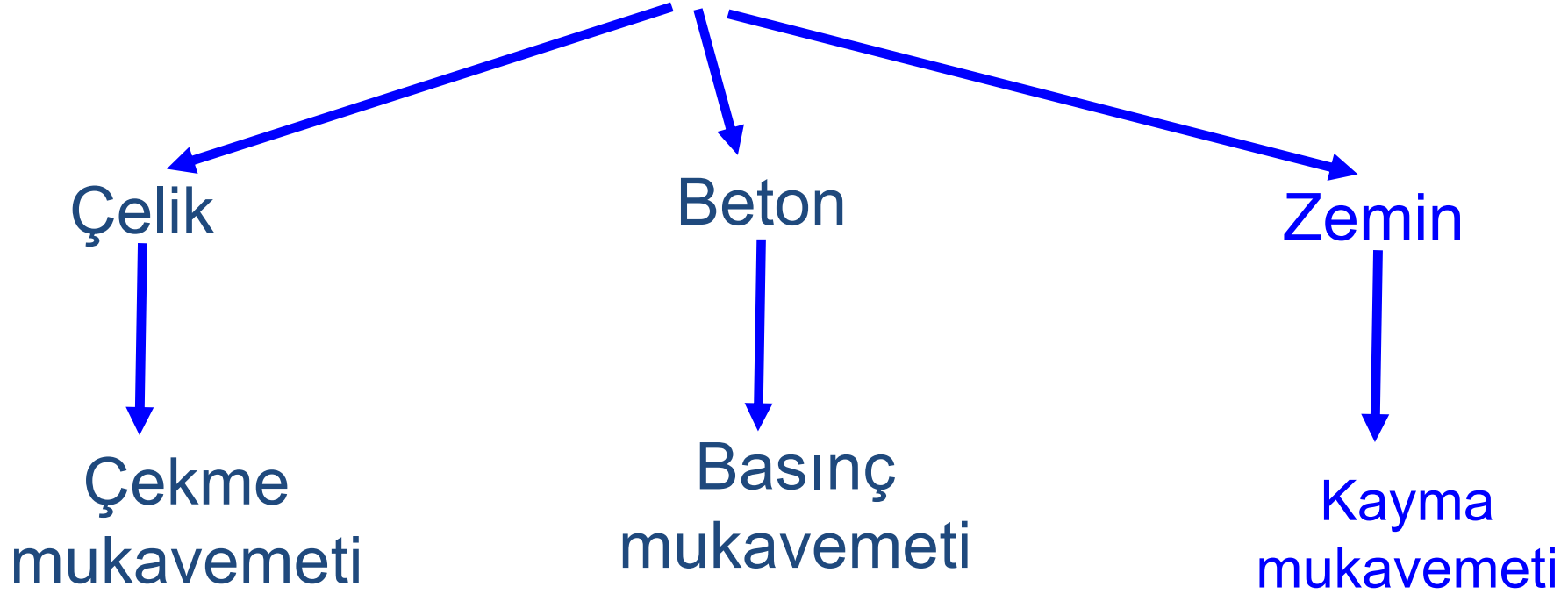
$$\Delta\sigma = [D]\Delta\varepsilon$$

*Bilinmeyen sayısı = 6 Gerilme + 6 Ş.D. + 3y.d. = 15*

*Denklem sayısı = 3 Denge + 6 Uygunluk + 6 Bünye = 15*

*Bilinmeyen sayısı = Denklem sayısı*

# Malzemelerin mukavemeti

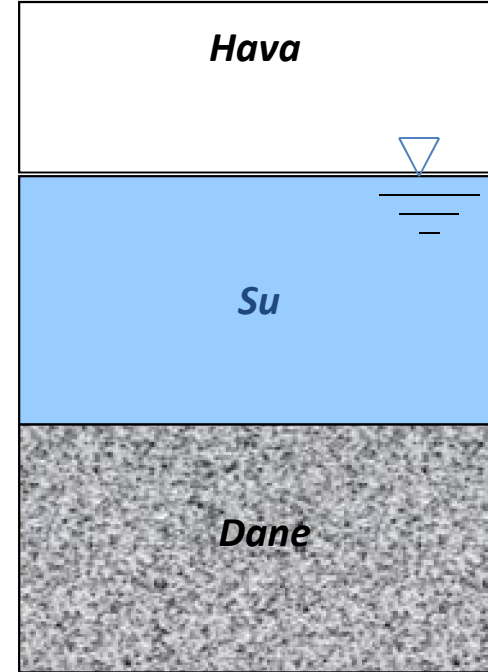


**Kompleks davranış**

**Boşluk suyunun varlığı**

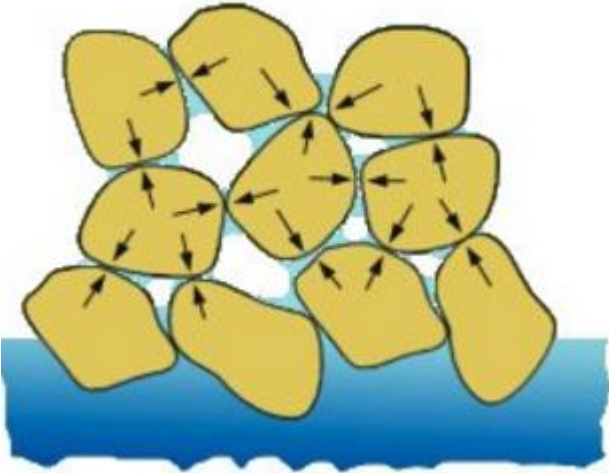
# Zemin Malzemesi

- Üç fazlı
- Daneli
- Heterojen
- Anizotrop
- Elastik değil
  - Elasto-Plastik
  - Viskoz
- Gerilme tarihçesi
- Yükleme koşulları
- Drenaj





# Zemin için bünye davranışı



$$\Delta\sigma = ([D'] + [D_f])\Delta\varepsilon$$

$$\Delta\sigma' = [D']\Delta\varepsilon$$

$$\Delta u = [D_f]\Delta\varepsilon$$

$\Delta\sigma$  = Gerilme değişimi

$[D']$  = Zemin iskeleti bünye matrisi

$[D_f]$  = Boşluk suyu bünye matrisi

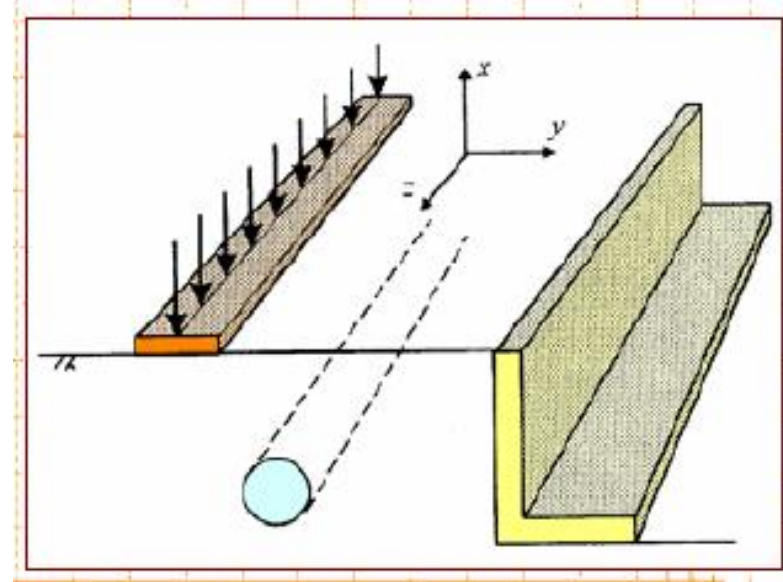
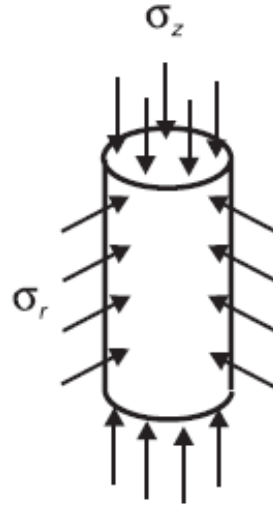
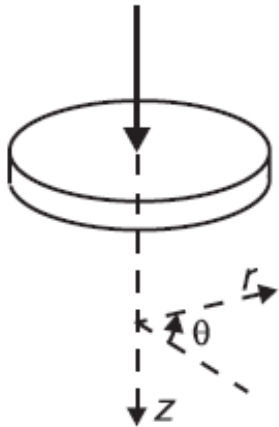
$\Delta\varepsilon$  = şekil değiştirme değişimi

# Gerçek Zemin Davranışı

- Elastisite (geçici deformasyon; sınırlı)
- Plastisite (kalıcı deformasyon)
- Göçme (nihai durum veya kritik durum)
- Boşluk suyunun varlığı ve rolü
- Drenajsız davranış ve konsolidasyon
- Gerilme-bağımlı rijitlik
- Zamana bağlı davranış (krip)
- Sıkışma ve ayrılma (genleşme)
- Gerilme tarihçesi (önkonsolidasyon basıncı)
- Anizotropi (yönsel mukavemet ve/veya rijitlik)

# Geometrik İdealizasyon

- Düzlem şekil değiştirme
- Aksenal simetri



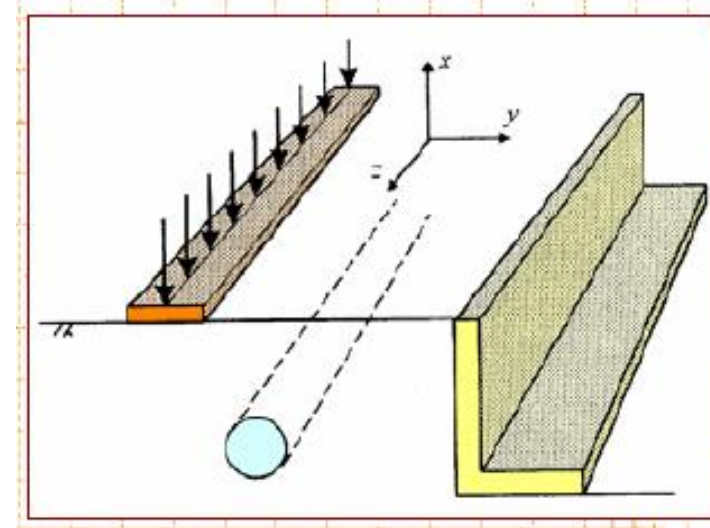
# Düzlem şekil değiştirme

Yükleme x doğrultusunda olup yüke bağlı şekil değiştirmeler x ve y doğrultularında oluşacaktır. z doğrultusunda yer değiştirme oluşmadığı kabul edilir. Bu durum için süreklilik denklemleri

$$\varepsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \quad \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{xz} \\ \Delta \tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{44} \\ D_{51} & D_{52} & D_{54} \\ D_{61} & D_{62} & D_{64} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$



# Eksenel Simetri

Bu durumda koordinat sistemi düşey ve simetri eksenini  $z$ , radyal doğrultu  $r$  ve teğetsel doğrultü  $\theta$ 'dan oluşmaktadır.

Bu eksenler dikkate alınarak yazılacak uygunluk bağıntıları  $u$  ve  $v$  düşey ve radyal doğrultülerdeki yer değiştirmeler

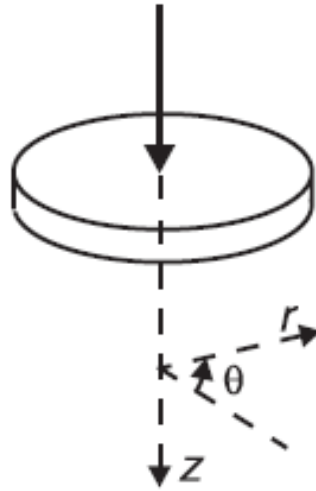
$$\varepsilon_{\theta} = -\frac{u}{r}$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\partial u}{\partial r};$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\gamma_{rz} = -\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}$$

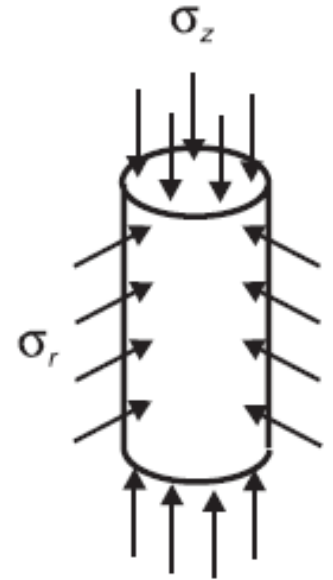
$$\gamma_{r\theta} = \gamma_{z\theta} = 0$$



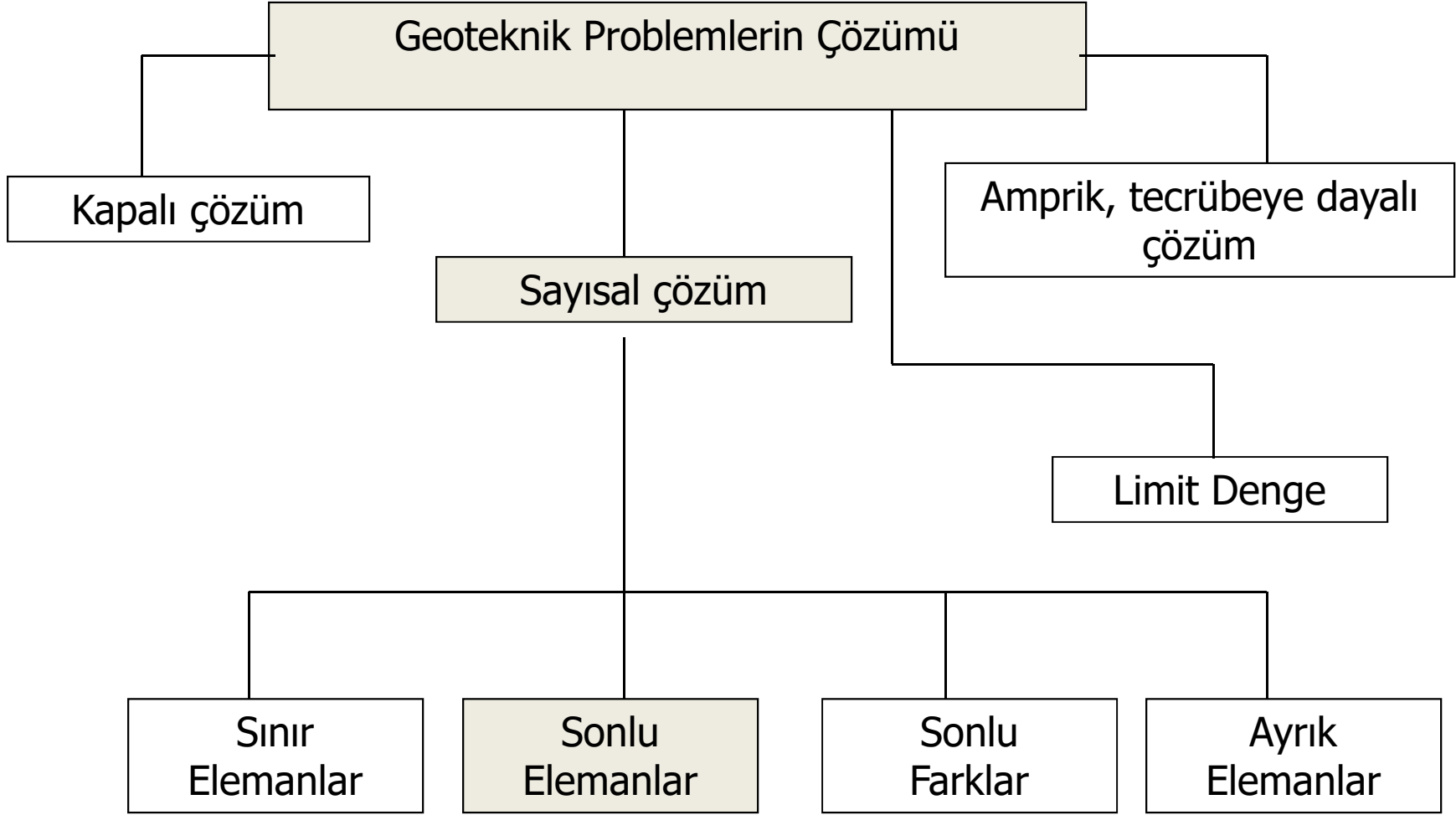
(a) Dairesel temel



(b) Düşey yüklü kazık



(c) Üç eksenli silindirik numune



## Çözüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

<b>ANALİZ YÖNTEMİ</b>	<b>ÇÖZÜM GEREÇLERİ</b>				
	<b>Denge</b>	<b>Uygunluk</b>	<b>Bünye Davranışı</b>	<b>Sınır Koşulları</b>	
				<b>Kuvvet</b>	<b>Deplas.</b>
<b>Kapalı çözüm</b>	✓	✓	Lineer elastik	✓	✓
<b>Limit Denge</b>	✓	✗	Bir göçme kriteri ile rijit	✓	✗
<b>Gerilme alanı</b>	✓	✗	Bir göçme kriteri ile rijit	✓	✗
<b>Limit Analiz</b>	<b>Alt sınır</b>	✓	Bileşik akma kuralı ile İdeal Plastik	✓	✗
	<b>Üst sınır</b>	✗		✓	✗
<b>Kiriş-Yay Yaklaşımı</b>	✓	✓	Zemin yaylarla modellenir	✓	✓
<b>Tam Nümerik Analizler</b>	✓	✓	Herhangi	✓	✓

# Sayısal analizin avantajları

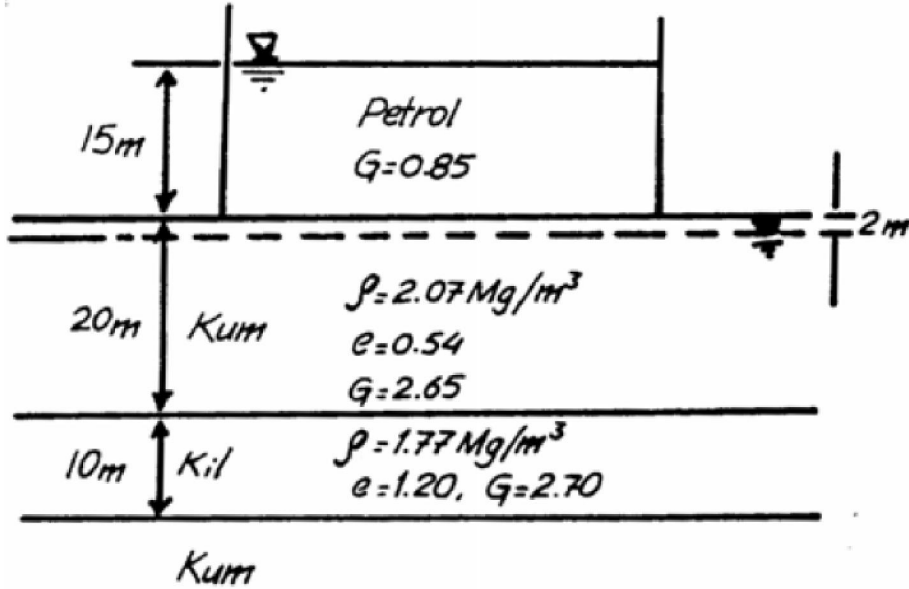
1. Uygun bir şekilde kullanıldığında, sayısal analizler ile pratik zemin mühendisliği problemleri için gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir.
2. Zemin ve yapı davranışını benzeştirerek mühendisin problemi daha iyi anlamasını sağlar.
3. Karmaşık geometri, malzeme davranışı, yükleme ve sınır koşullarını modellemek mümkündür.
4. Farklı problemleri bir arada çözmek (bütünleşik problemler) mümkündür
5. İnşa adımları göz önüne alınabilir.
6. Analizlerde bilgisayar kullanımı zorunlu olduğundan analizler hızlı yapılabilir.
7. Parametrik analizler yapılabilir ve tasarımda optimizasyon sağlanabilir.
8. Tasarımda kullanılan model üzerinde geri analizler yapılabilir.



# Geoteknik problemlerin sayısal analizine etki eden faktörler

- ❖ Sayısal analiz yöntemi
- ❖ Model geometrisi ve sınır koşulları
- ❖ Malzeme bünye davranışı
- ❖ Doğrusal olmayan çözüm yaklaşımı
- ❖ Drenajlı-drenajsız analiz
- ❖ Zemin yapı etkileşimi
- ❖ Malzeme parametreleri
- ❖ Kullanıcı alışkınlıkları

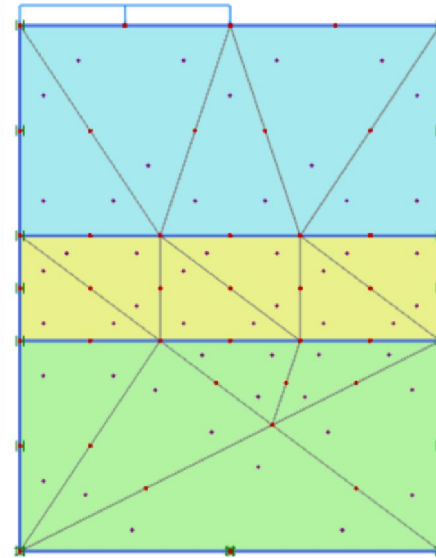
# Sayısal analiz yöntemi etkisi



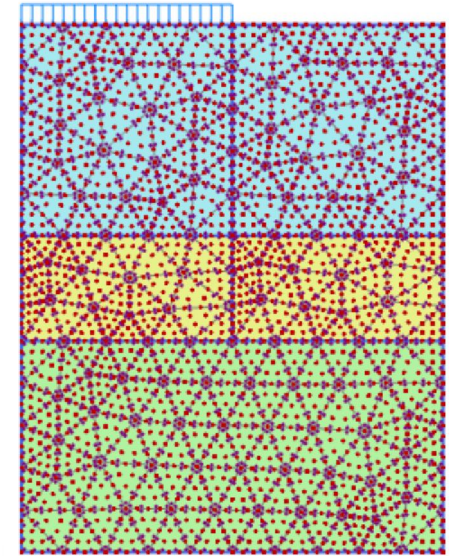
Örnek: Özaydın, K., Zemin Mekaniği, s. 203.

$E=8650 \text{ kPa}$

$c_v=3.939 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{gün}$

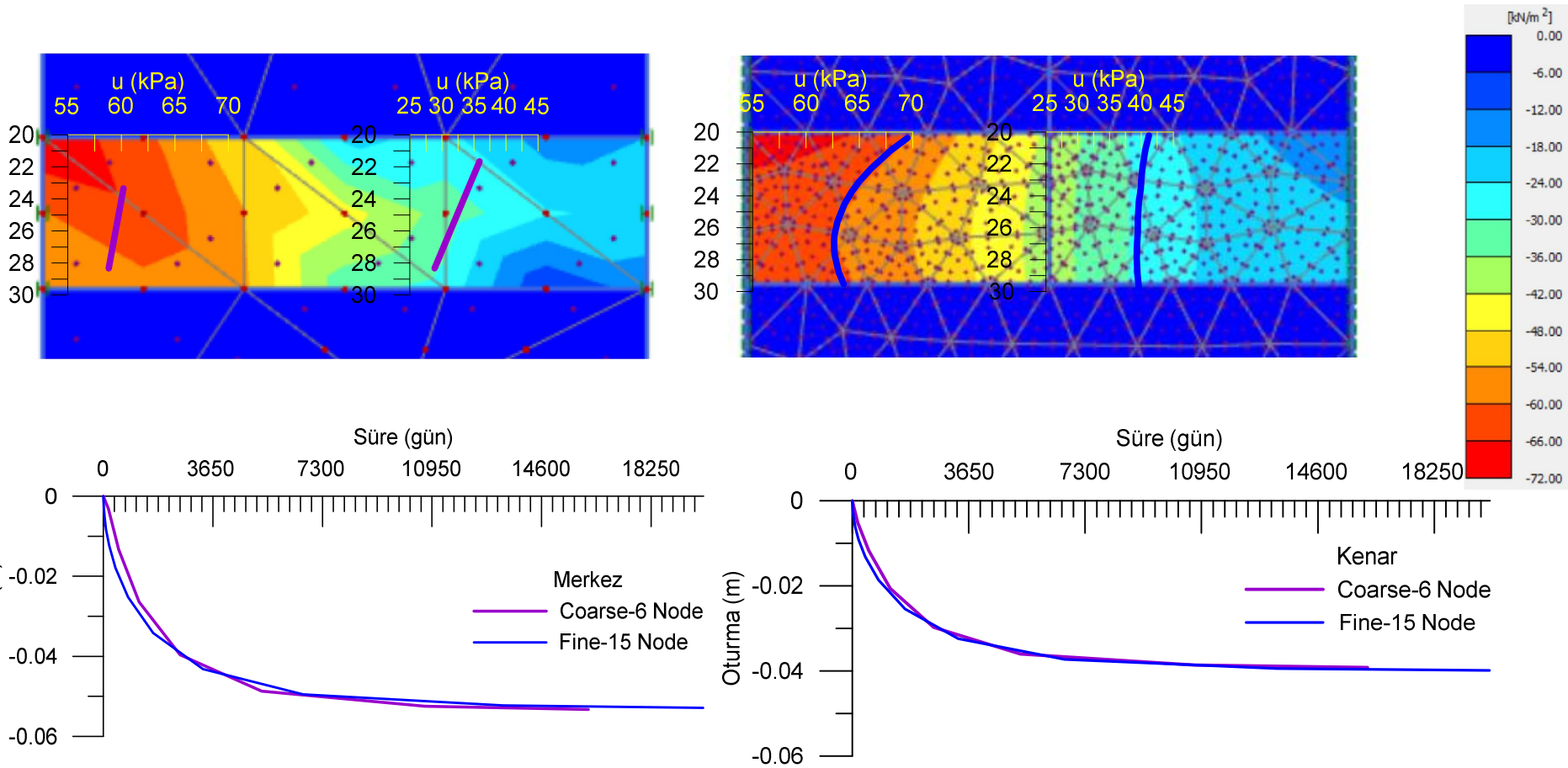


6 d.n.  
 $e=17$   
 $n=44$

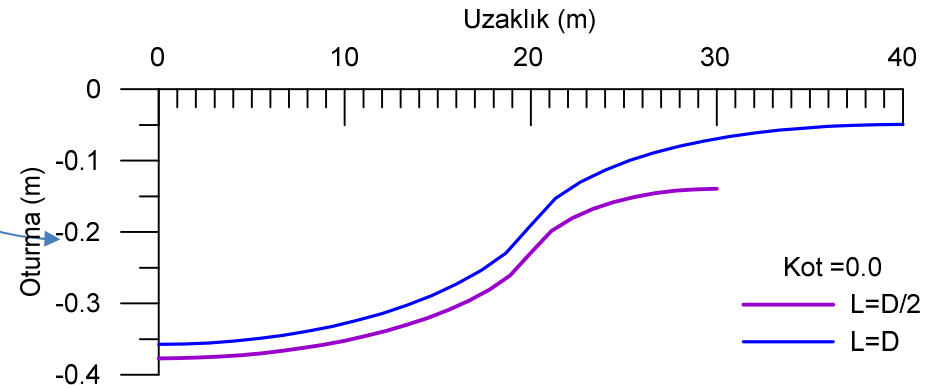
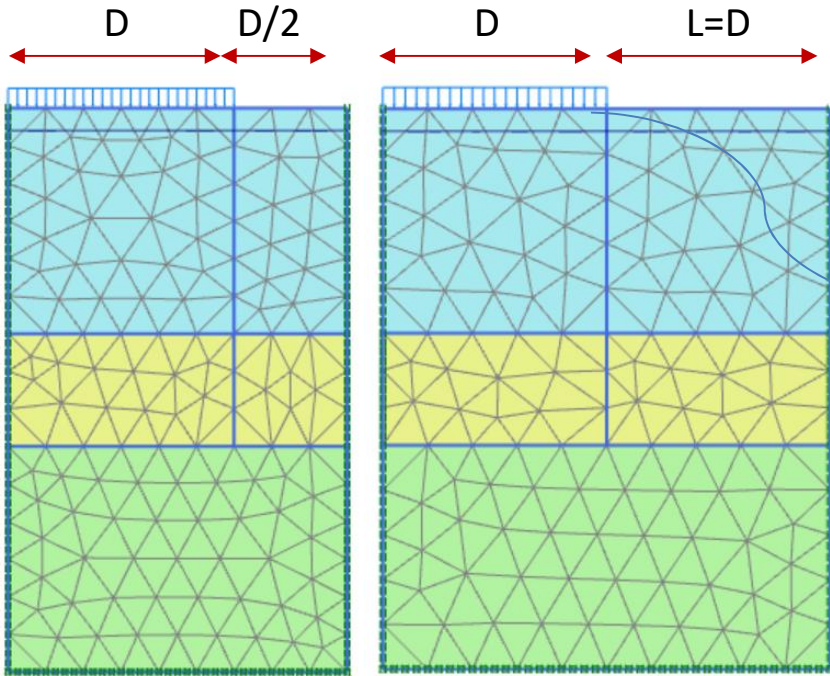


15 d.n.  
 $e=260$   
 $n=2173$

# Sonuçların karşılaştırılması



# Model Geometrisi ve Sınır Koşulları

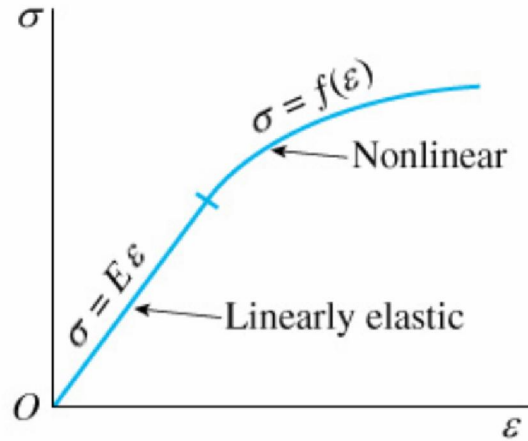


# Malzeme Bünye Davranışı

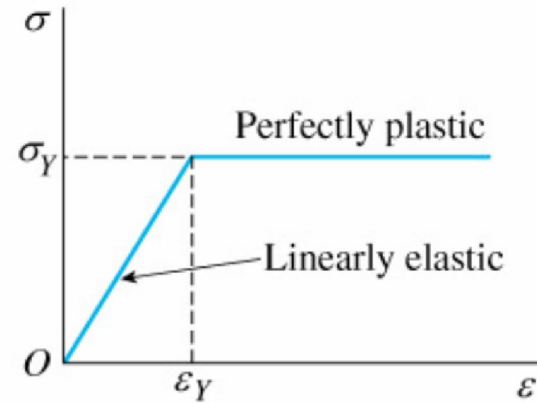
- ❖ Doğrusal ve doğrusal olmayan elastik modeller
- ❖ Doğrusal(doğrusal olmayan) elastik – ideal plastik modeller
- ❖ İzotropik pekleşen tek yüzey plastik modeller
- ❖ İzotropik pekleşen çift yüzey plastik modeller

*Gerçek davranışa yakınlık*

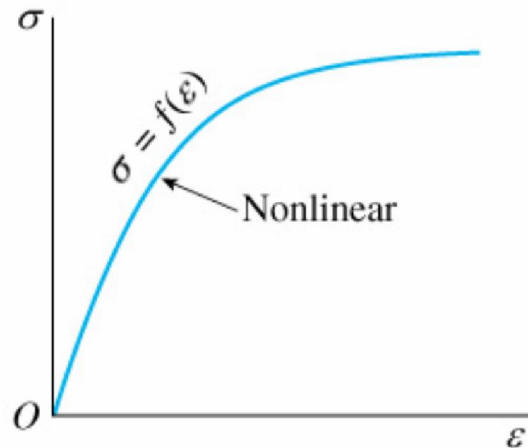
# Malzeme Davranışı



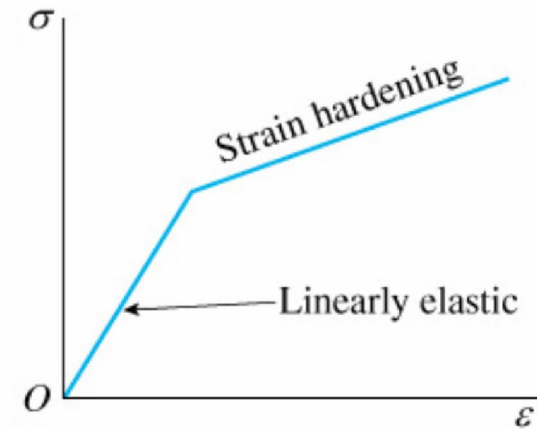
(a)



(c)



(b)



(d)

# Non-lineeriteyi etkileyen faktörler

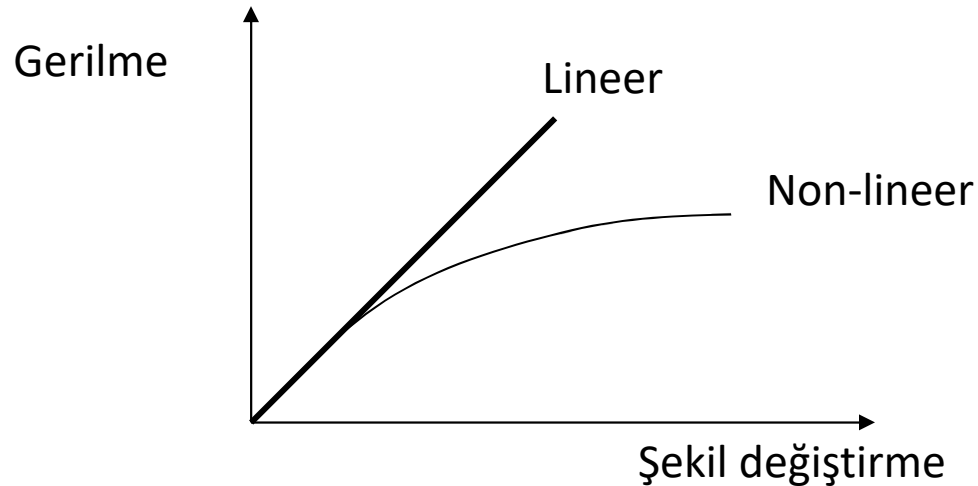
Başlangıç gerilme durumu

Gerilme izleri

Malzemenin fiziksel durumu - yoğunluk, su muhtevası, boşluk oranı.....

Yükleme tipi

Ortam özellikleri - süreksizlikler, çataklar, su.....



# Non-lineerite

- Non-lineeriteyi etkileyen faktörler malzeme davranışını tanımlarken göz önüne alınır
  - Basit Modeller
  - İleri (Advanced) Modeller



# Zemin malzemesi için bünye modelleri

- Mohr-Columb Model
- Hiperbolik modeller
  - Koedner(1963)
  - Duncan-Chan (1971)
  - Hardening Soil model (Schanz, 1996)
- Cam Clay modeller
  - Cam clay
  - Modifiye Cam Clay
  - Soft Soil Model
- Ve diğerleri (Lade(1977), Sekiguchi-Ohda(1977), vs)

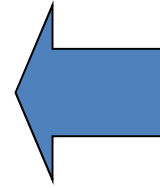
**Bir zemin modeli, gerilme artışları ve şekil değiştirme artışları arasındaki ilişkinin matematiksel ifadesidir.**

# Kaya için malzeme bünye modelleri

- Mohr Coulomb
- Hoek Brown
- Jointed Rock

# Elasto-Plastik Davranış

Gerilme-şekil değiştirme  
eşitlikleri



elastisite  
akma yüzeyi  
akma kuralı  
pekleşme

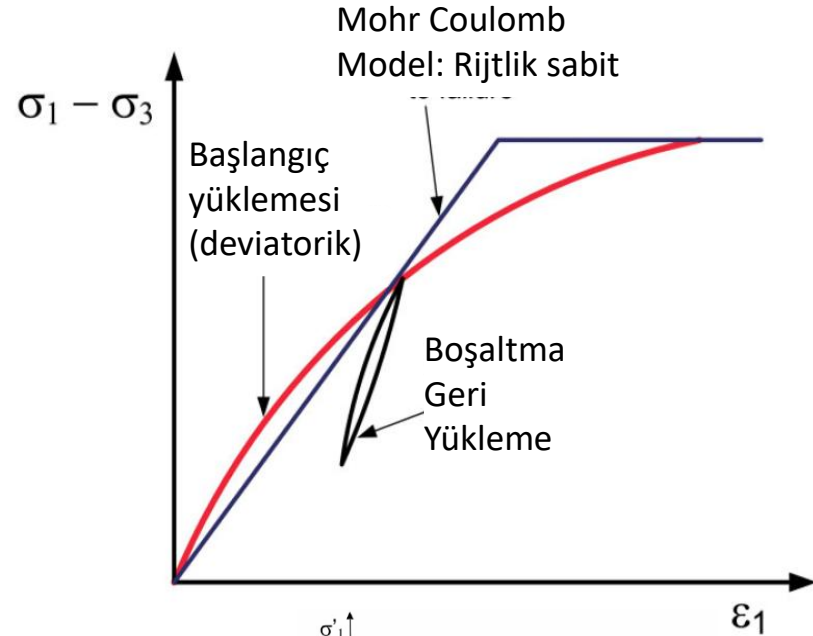
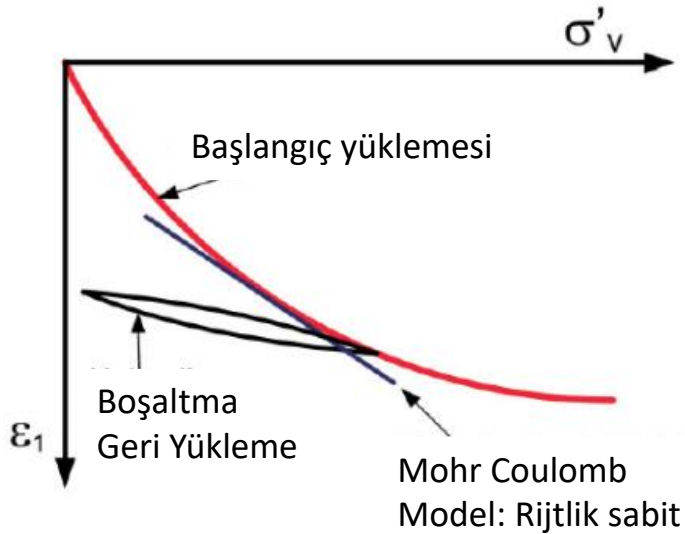
$$\delta \varepsilon_s = \delta \varepsilon_s^e + \delta \varepsilon_s^p$$

$$\delta \varepsilon_v = \delta \varepsilon_v^e + \delta \varepsilon_v^p$$

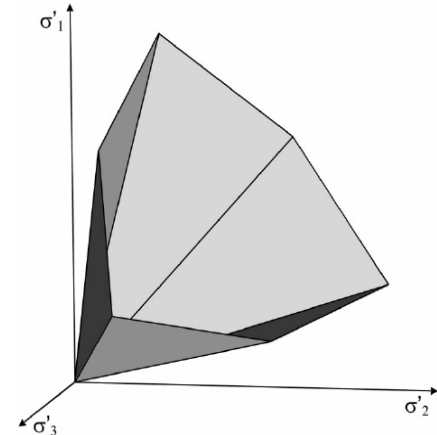
Toplam şekil değiştirmeler

= elastik bileşen + plastik bileşen

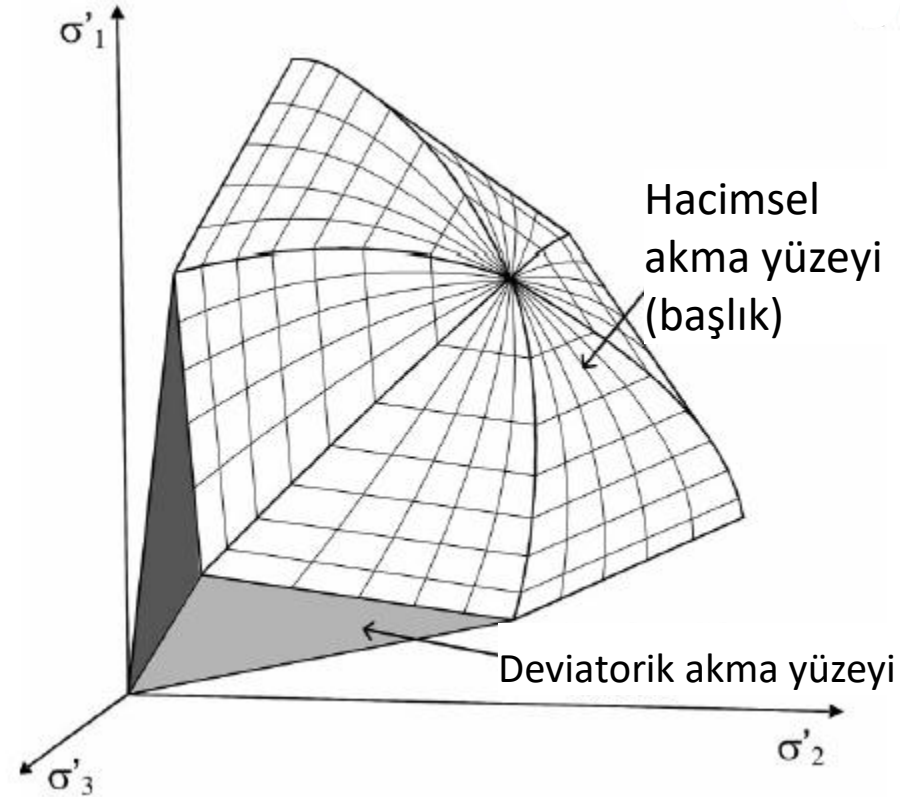
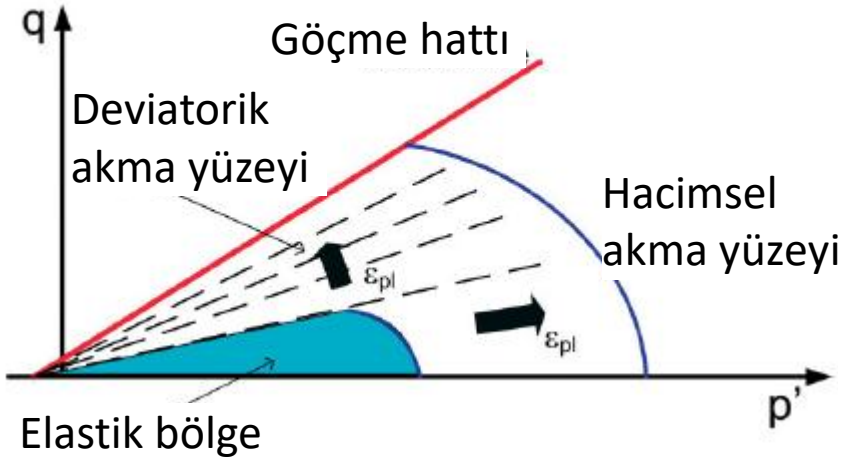
# Basit plastik bünye modeli: Elastik-İdeal plastik model



MOHR-COULOMB MODEL



# İleri düzey plastik model: İzotropik pekleşen çift yüzey plastik model



# Drenajlı-Drenajsız Analiz

- **Toplam Gerilme Analizi**
  - $\Delta\sigma = D\Delta\varepsilon$
  - Tamamen drenajlı
    - Toplam gerilme = Efektif gerilme
    - D matrisi drenajlı parametrelerden oluşur
  - Tamamen drenajsız ( $\phi_u = 0, s_u = c_u$ )
    - D matrisi drenajsız parametrelerden oluşur
- **Bütünleşik Analiz**
  - $\sigma = \sigma' + p_w$
  - $\Delta\sigma = ([D'] + [D_w])\Delta\varepsilon$

# Analizde drenajlı / drenajsız

- ❖ Drenaj durumuna karar vermek için Vermeer ve Meier, (1998) önerisi kullanılabilir:
  - ❖ Drenajsız analiz  $U < \% 10$  ( $T < 0.10$ )
  - ❖ Drenajlı analiz  $U > \%70$  ( $T > 0.40$ )
- ❖  $0.10 > T > 0.40$  ise Konsolidasyon analizi
  - ❖  $U = 1B$  konsolidasyon %si
  - ❖  $T = 1B$  konsolidasyon teorisi zaman faktörü

# Drenajsız durumu modelleme

## Yöntem A

Bütünleşik durum (İki fazlı ortam)

Boşluk suyu basıncı üretilir

Efektif kayma mukavemeti ve rijitlik parametreleri

## Yöntem B

Bütünleşik durum (İki fazlı ortam)

Boşluk suyu basıncı üretilir ama **güvenilmez**

Drenajsız kayma mukavemeti ve efektif rijitlik parametreleri

## Yöntem C

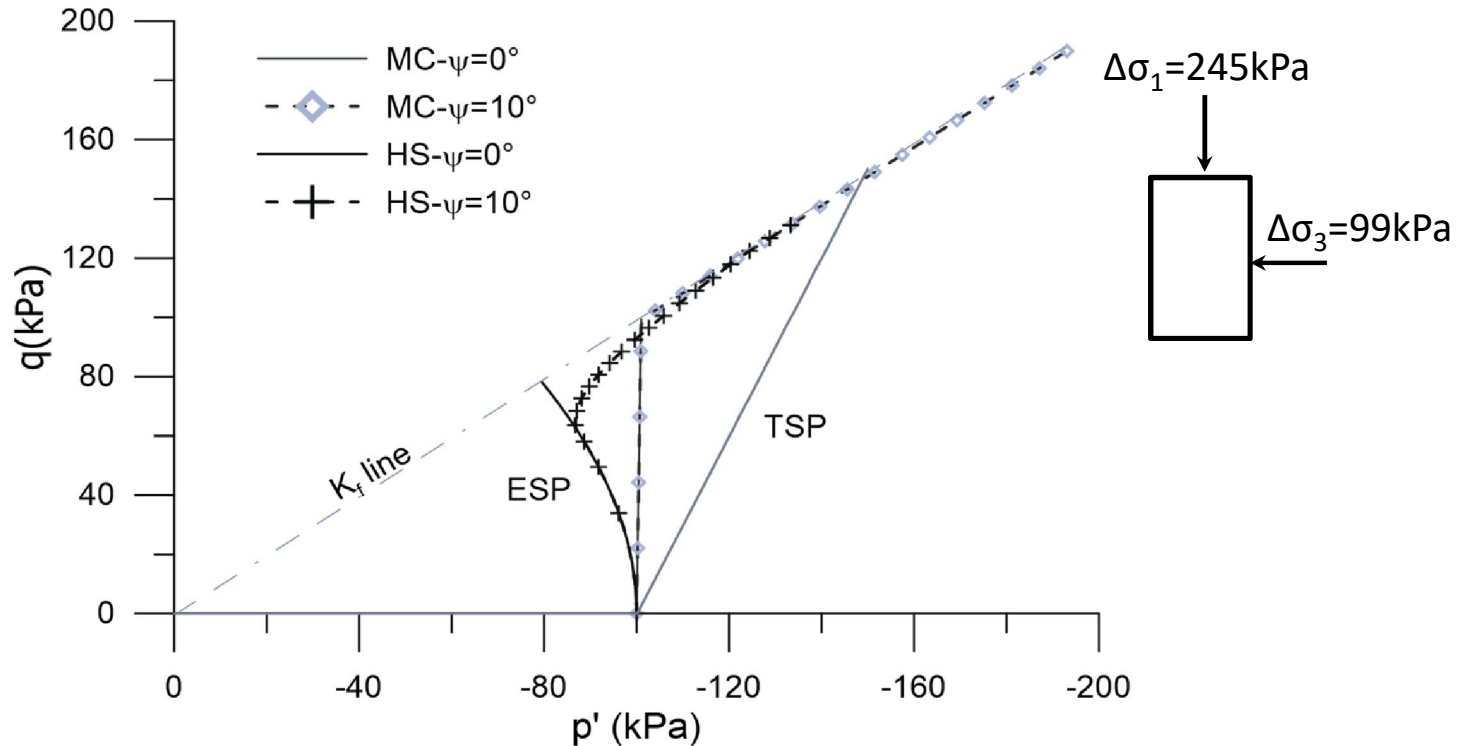
Tek fazlı ortam

Drenajsız kayma mukavemeti ve rijitlik parametreleri



# Drenajsız davranışa bünye modeli etkisi

## MC ve HS Modeller ile üç eksenli CU deneyi

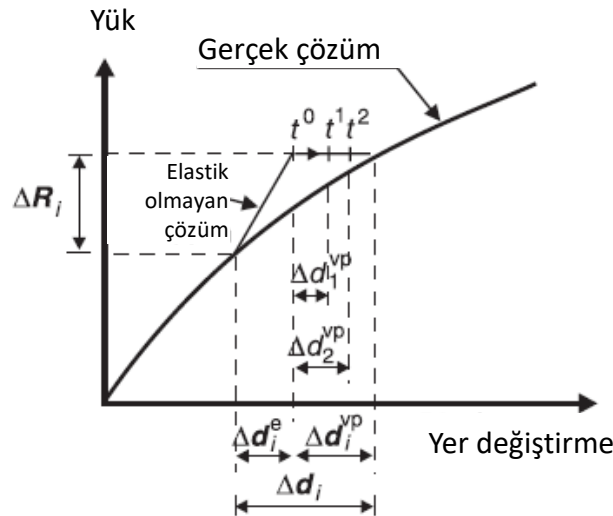
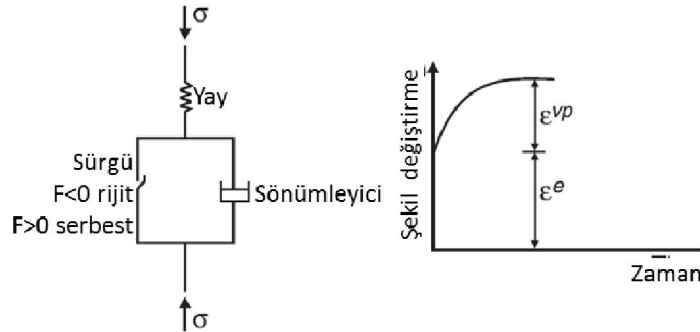


# Doğrusal Olmayan Çözüm Yaklaşımı

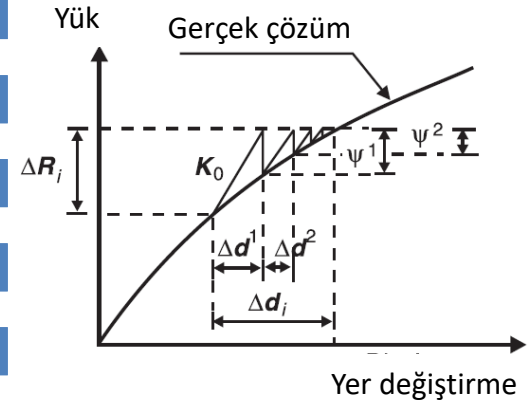
## 1) Tanjant rijitlik



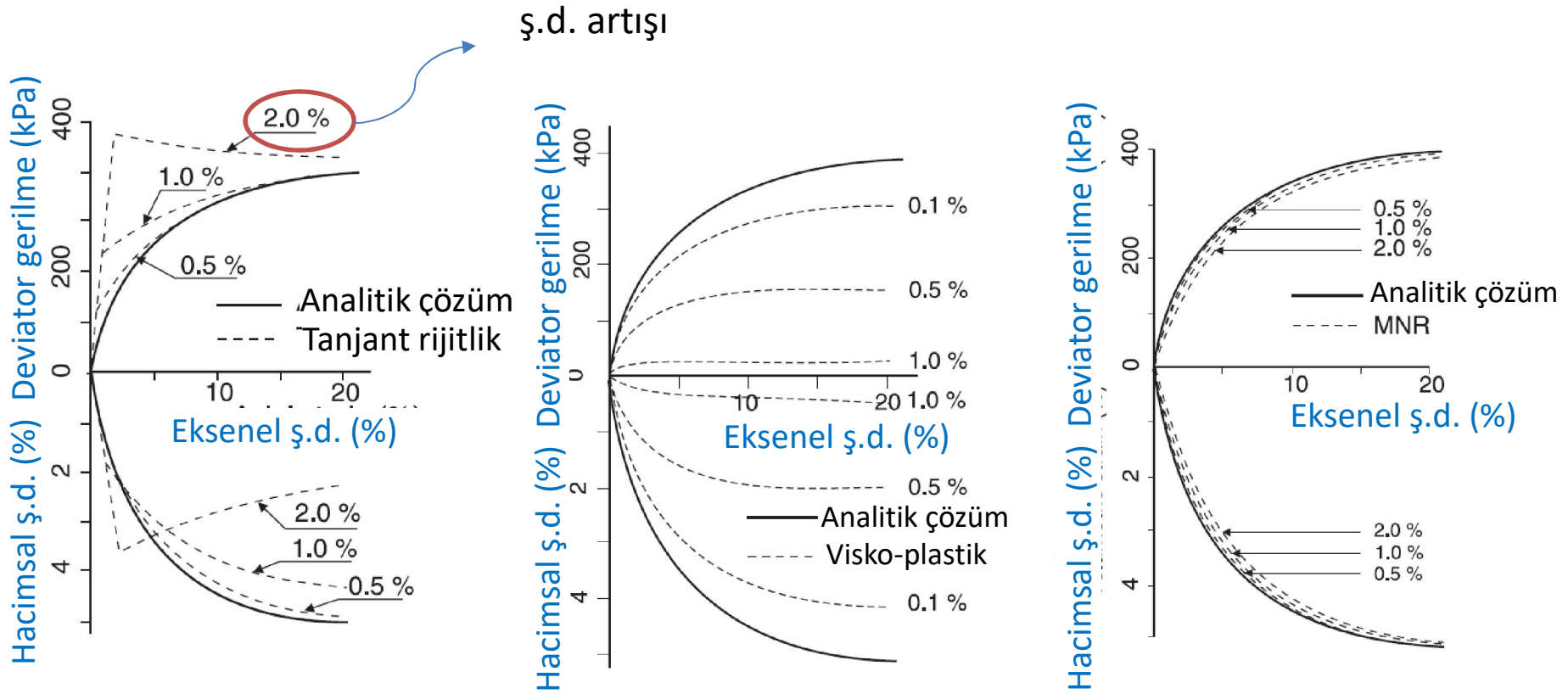
## 2) Visko-plastik



## 3) Newton-Raphson



# Doğrusal Olmayan Çözüm Yaklaşımı

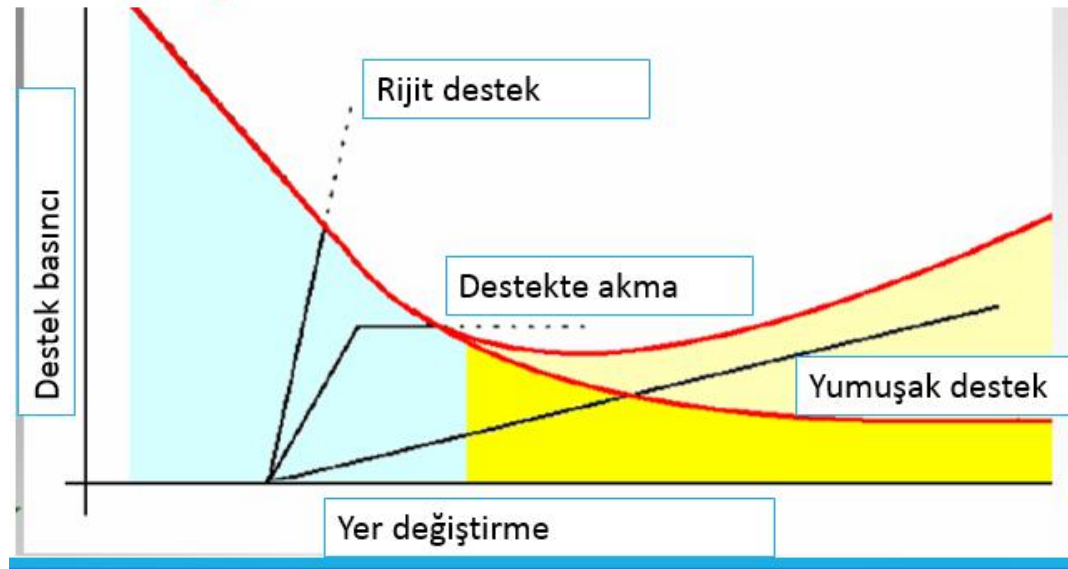
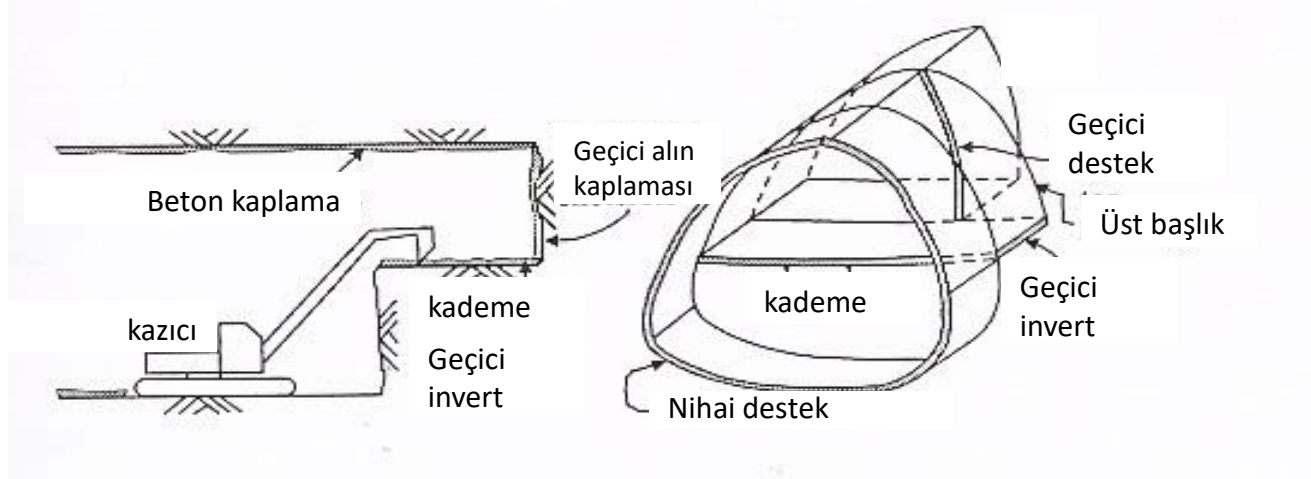


Drenajlı üç eksenli basınç deneyi (Potts ve Zdravkovic, 1999)

# Başlangıç gerilmeleri

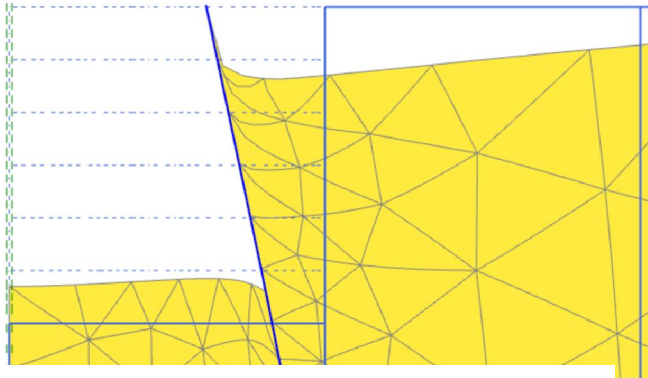
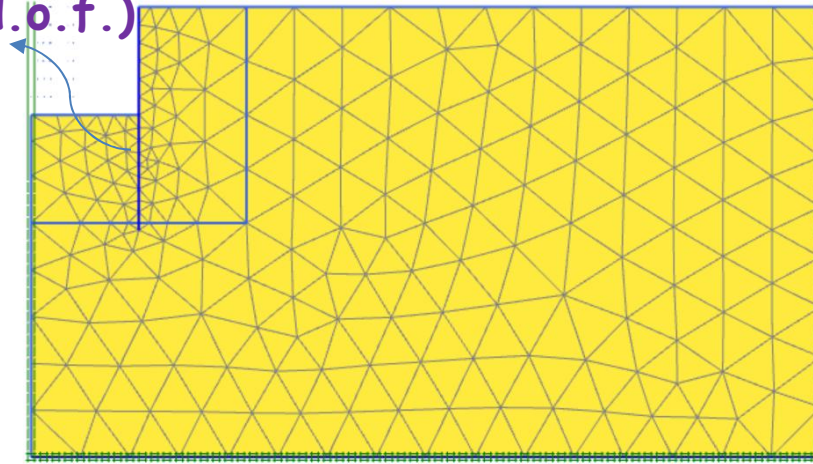
- ❖ Zemin malzemesi gerilme izine bağlı ve doğrusal olmayan davranış sergiler
- ❖ Analizde doğru sonuç elde etmek için analizin başında belirlenmelidir
- ❖ Başlangıç gerilmeleri örselenmemiş zeminin denge durumunu gösterir ve bileşenleri :
  - ❖ Zemin ağırlığı
  - ❖ Yükleme tarihçesi
- ❖ İki şekilde tanımlanabilir:
  - ❖  **$K_0$  yöntemi**
  - ❖ **Ağırlık yöntemi**

# İnşa Adımları

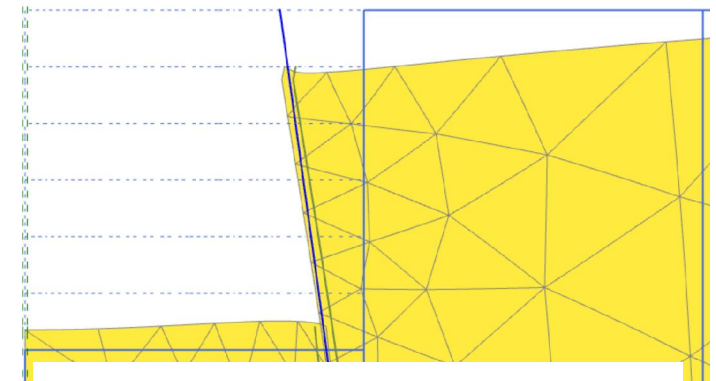


# Zemin Yapı Etkileşimi

Plak eleman (1D, 2 d.o.f.)

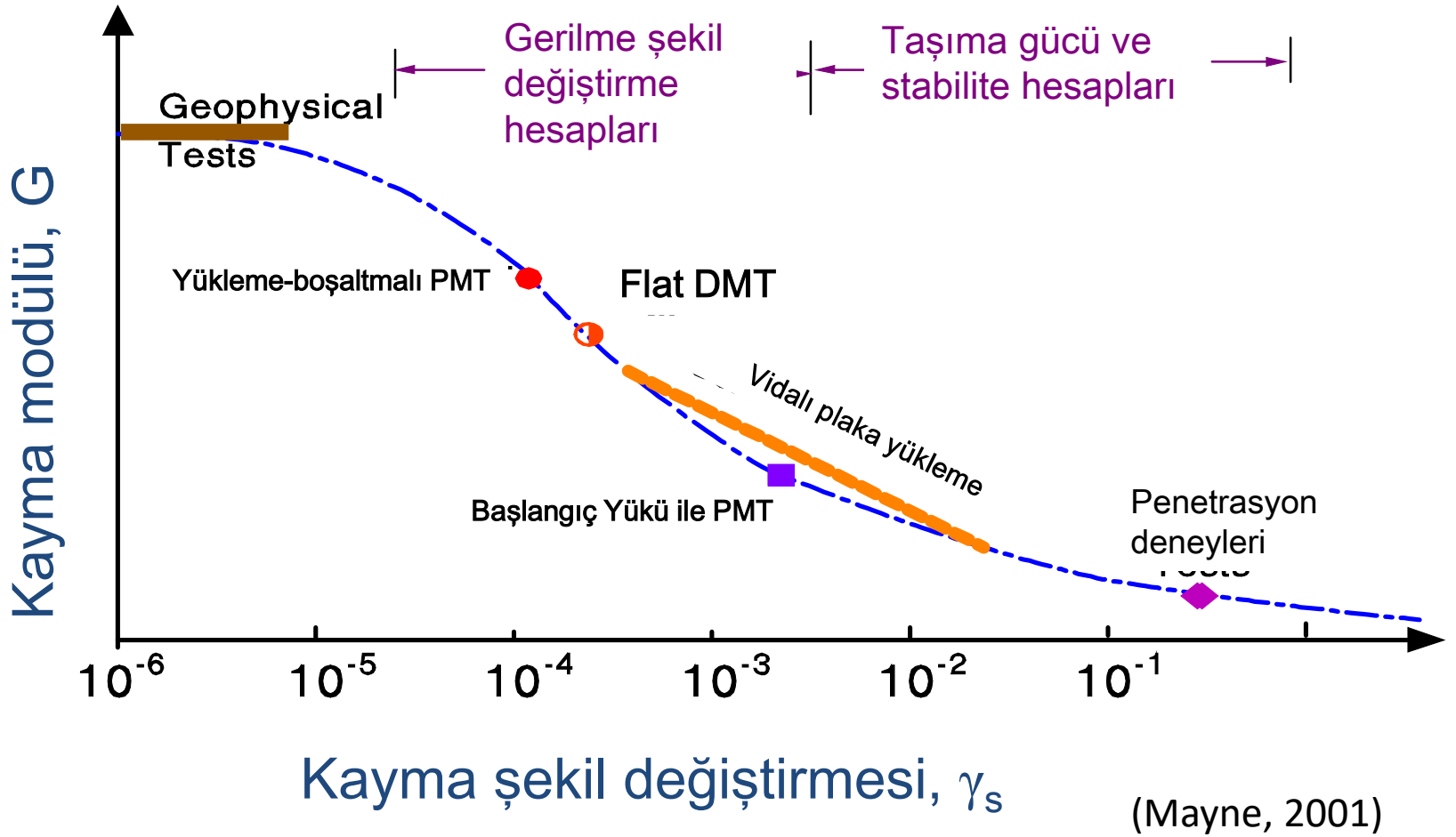


Arayüzey elemansız

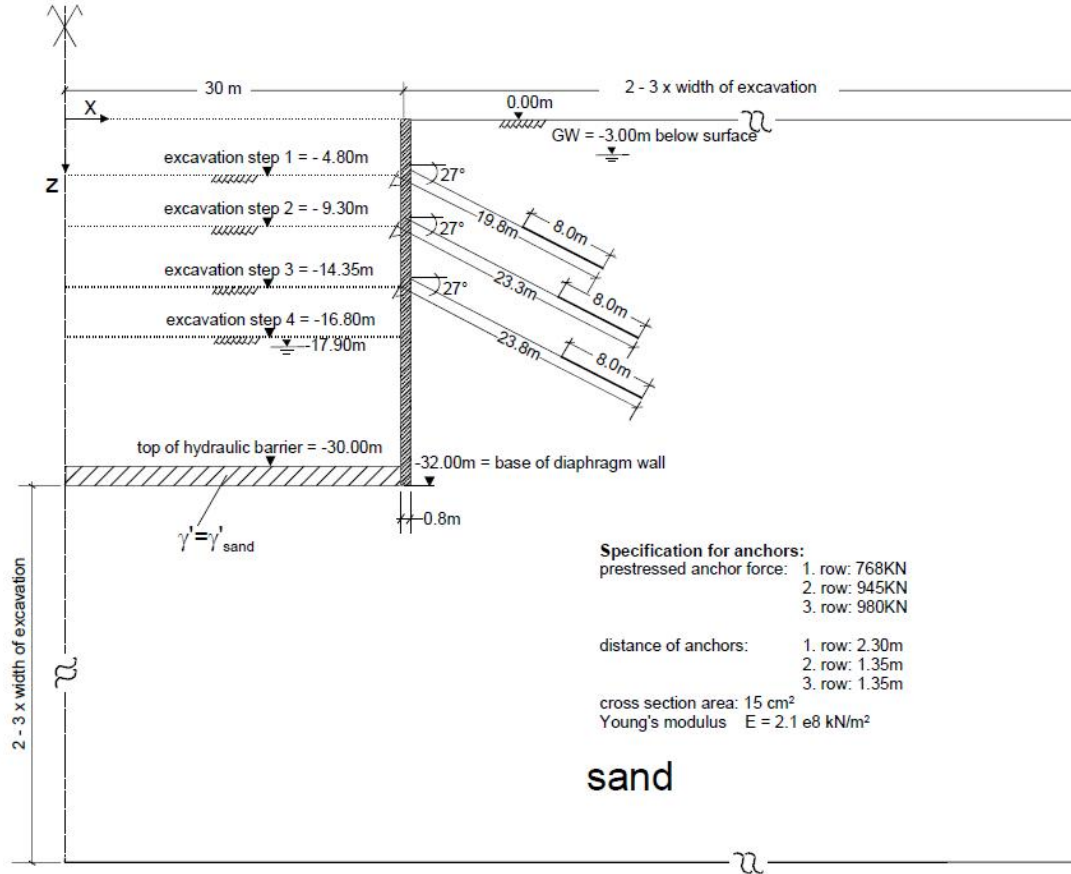


Arayüzey elemanlı

# Malzeme Parametreleri



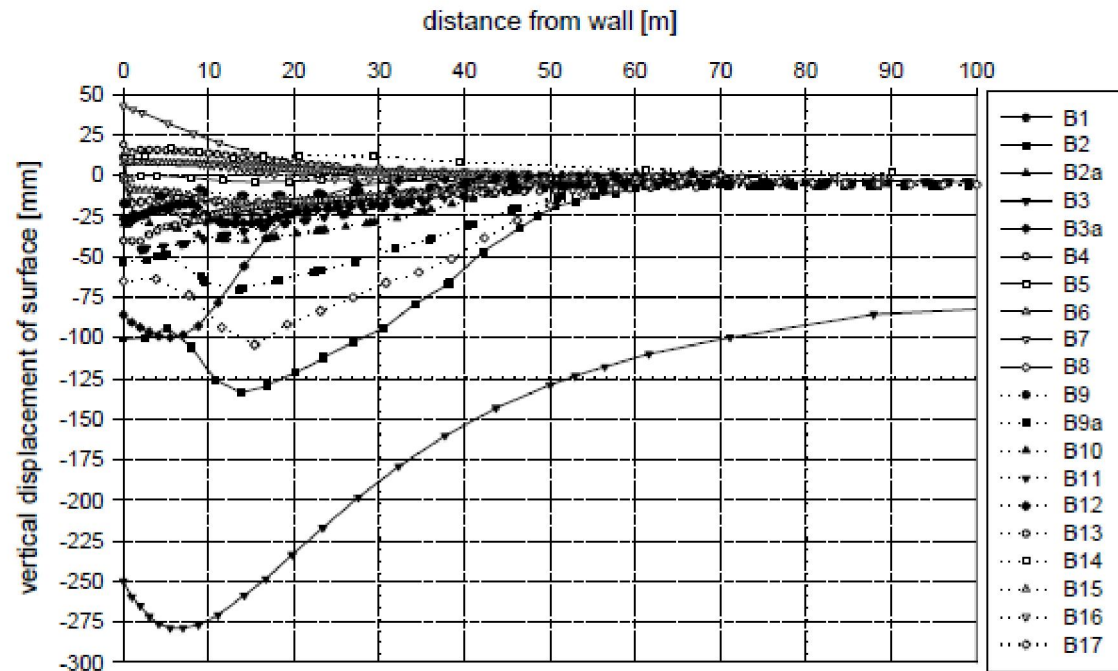
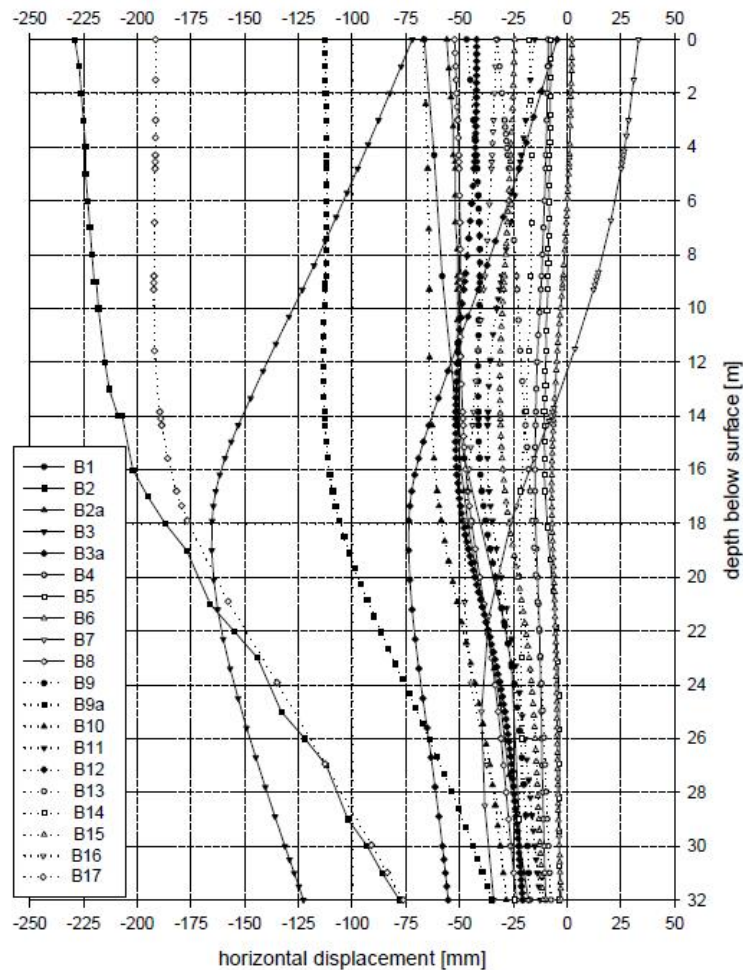
# Kullanıcı Alışkanlıkları



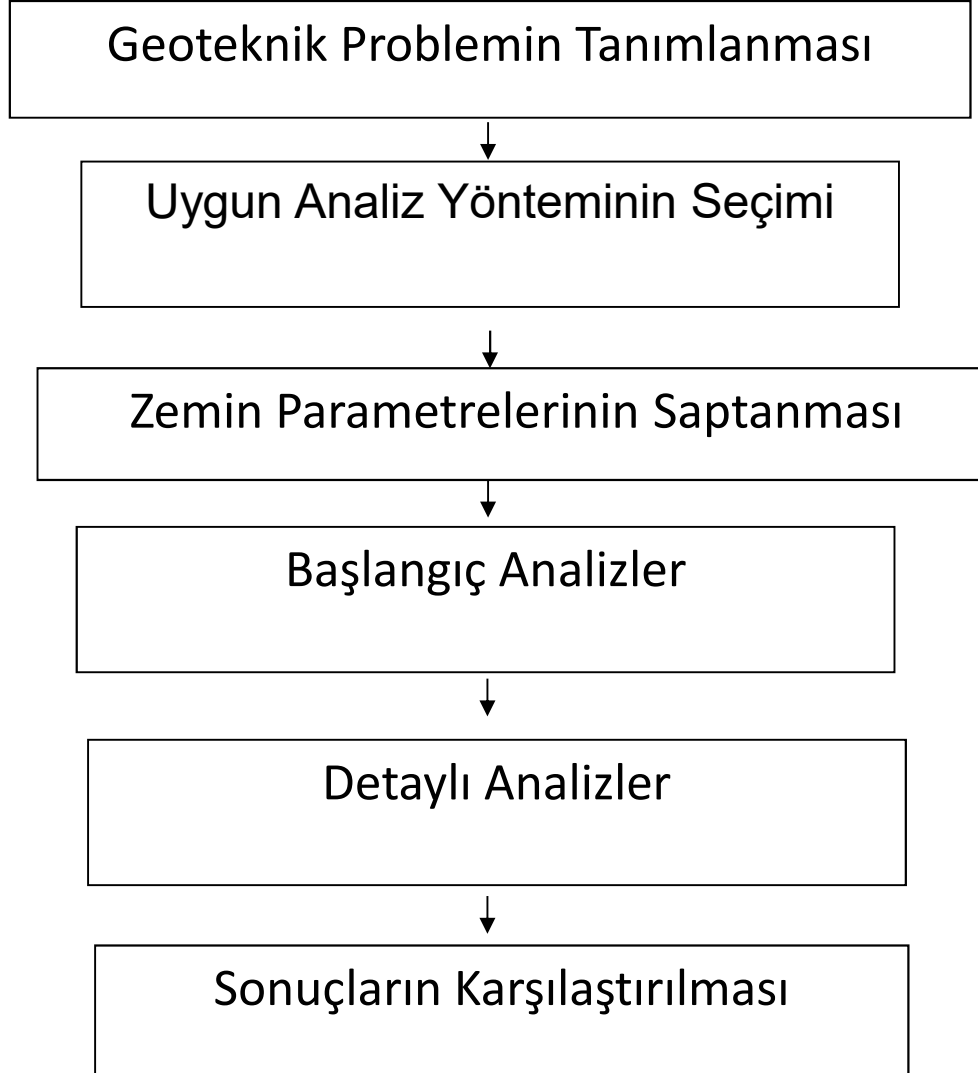
AK 1.6 "Numerical Methods in Geotechnics", Alman Geoteknik Derneği, (Schweiger, 2002)



# Farklı kullanıcıların sonuçları



# Sayısal analizler için adımlar

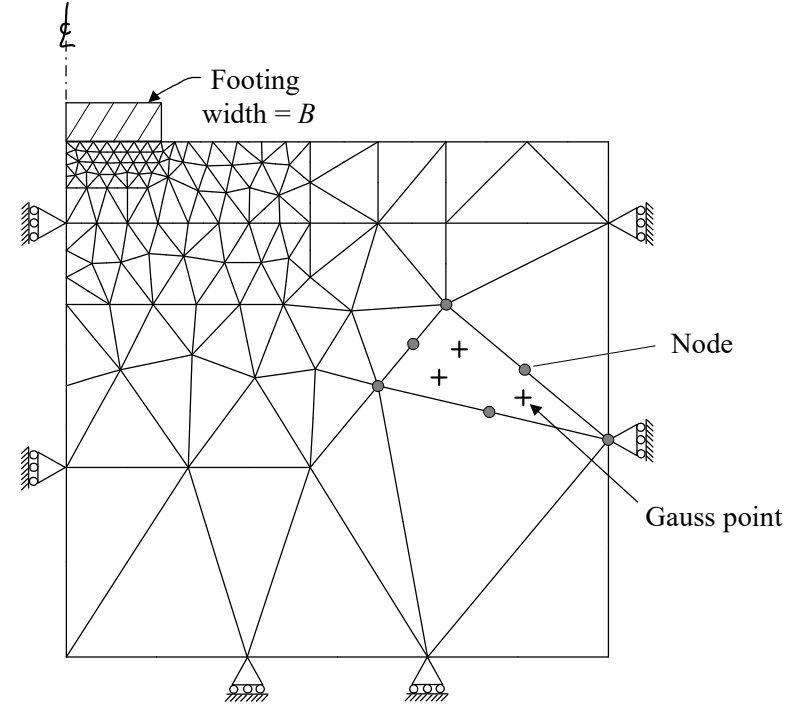


# **SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ**

# Sonlu elemanlar yöntemi

Düğümmler **birincil değişkenlerin**(yer değiştirmeler) değerlerinin hesaplandığı noktalardır.

**Düğüm deplasmanları** tüm sonlu elemanlar ağda deplasman ve **şekil değiştirmeler** için cebrik ifadeleri vermek üzere eleman içlerinde interpolate edilir.



Eleman düğümlerinde etkiyen kuvvetlerin yolaçtığı gerilme ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir bünye yasası kullanılır.

Düğüm kuvvetleri ile düğüm deplasmanları oluşturulan ve çözülen denklemlerle ilişkilendirilir.

## SEY'de aşağıdaki adımlar izlenir

### Elemanlara ayırma

Bu, incelenen problemin geometrisinin sonlu eleman denilen küçük sonlu bölgelerin birleşimiyle modelleme işlemidir.

Bu elemanlar, eleman sınırlarında veya içlerinde düğüm noktalarına sahiptir.

### Birincil değişken yaklaşımı

Bir birincil değişken seçilmeli (örn. Deplasman) ve oluşturulan sonlu eleman üzerindeki değişimi tanımlanmalıdır.

Bu değişim nodal (düğüm) değerleri cinsinden ifade edilir.

- ❑ Bir **polinom formu** kabul edilir. Polinomun mertebesi elemandaki düğüm noktasına bağlıdır.
- ❑ Daha yüksek mertebeden düğüm sayısı (polinom mertebesi) daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar(daha fazla çözüm zamanı).

## SEY'de aşağıdaki adımlar izlenir

### Eleman denklemleri

Eleman denklemlerini elde etmek için uygun bir varyasyonel kural (örn, minimum potensiyel enerji) uygulanır:

$$K^e U^e = P^e$$

$K^e$  eleman rijitlik matrisi,  $U^e$  düğüm yer değiştirmeleri ve  $P^e$  düğüm kuvvetlerini gösterir.

### Global denklemler

Global denklemleri elde etmek için eleman denklemleri birleştirilir:

$$KU = P$$

### Sınır koşulları

Sınır koşulları uygulanır ve global denklemler değiştirilir.

Yükler  $P'$ 'yi değiştirirken, deplasmanlar  $U'$ yu değiştirir.

### Global denklemlerin çözüümü

Düğümdeki deplasmanları elde etmek için global denklemler çözüür.

Düğüm deplasmanlarından ikincil bilinmeyenler(şekil değiştirme ve gerilme) elde edilir.

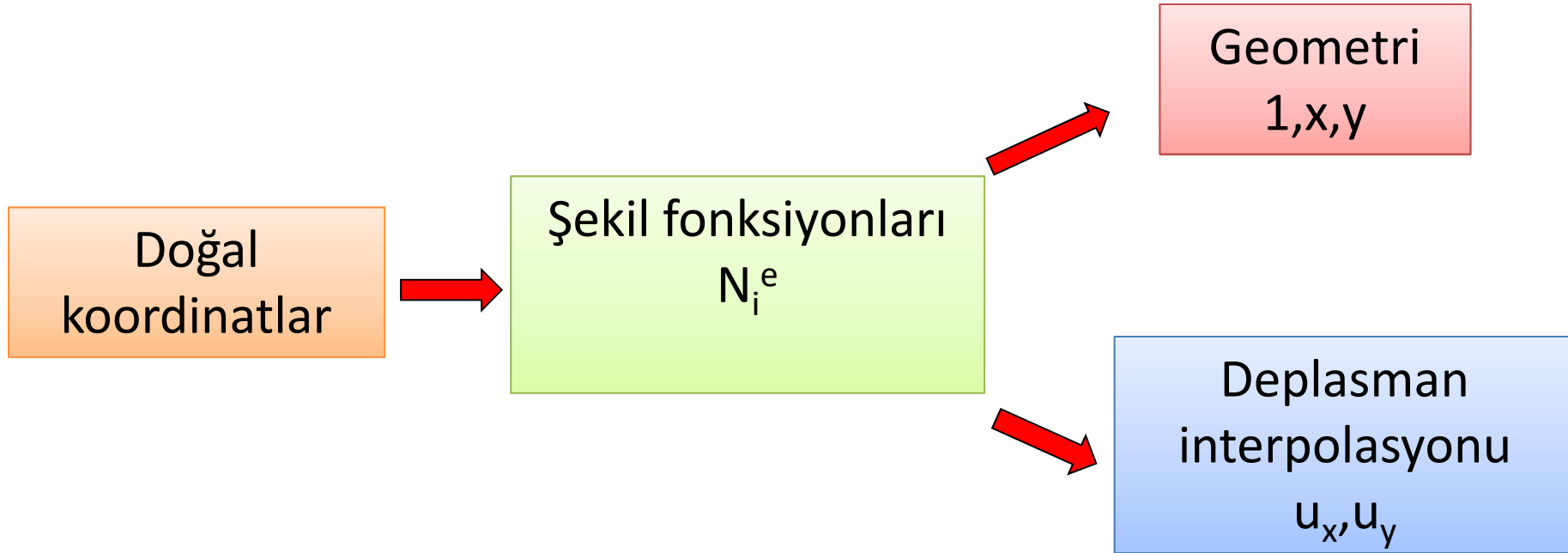
## Deplasman interpolasyonu

En çok(yaygın) kullanılan elemanlar **iso-parametrik yaklaşımı** esas alır

**Eleman *geometrisi ve deplasmanlar***

***aynı* şekil fonksiyonları ile temsil edilir (iso = aynı)**

## Bir 2B eleman için izoparametrik gösterim



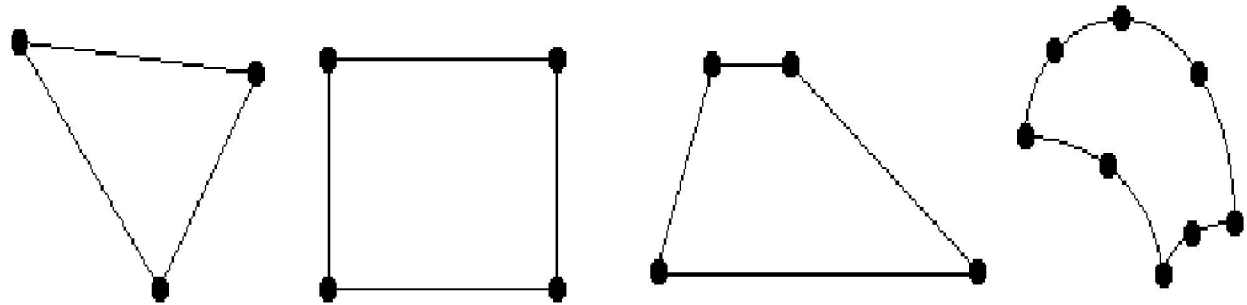


# Sonlu eleman örnekleri

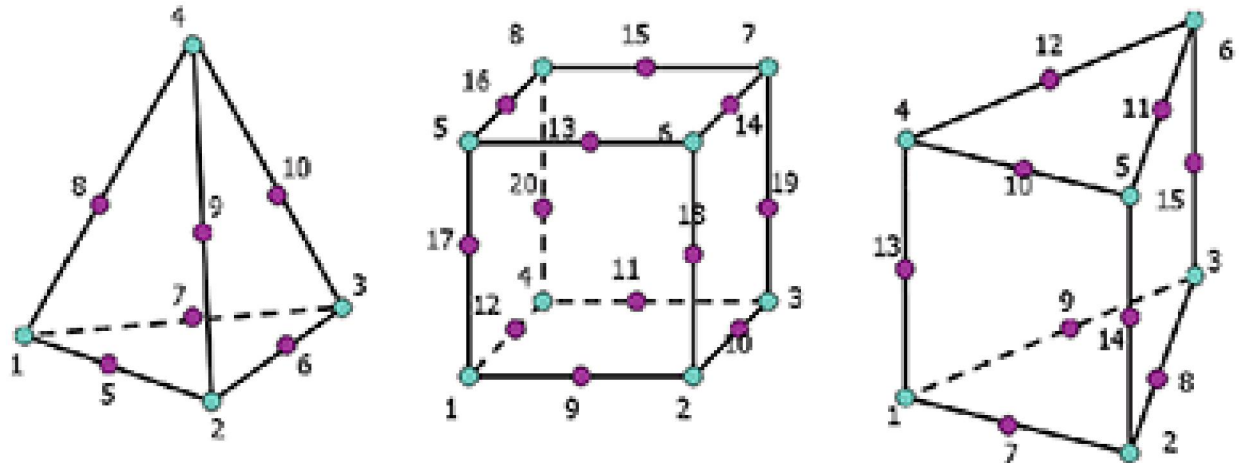
Bir boyutlu elemanlar



İki boyutlu elemanlar



Üç boyutlu elemanlar



Birincil bilinmeyenler: düğüm deplasmanlarının değerleri

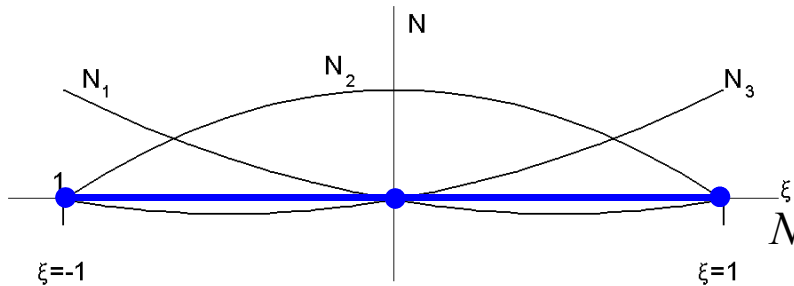
eleman içindeki deplasman: interpolasyon fonksiyonu kullanarak düğüm değerleri cinsinden ifade edilir.

$$u(\xi) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) u_i, \quad N_i = \text{Düğüm } i\text{'nin şekil fonksiyonu}$$

*i* düğümünün şekil fonksiyonu

*i* düğümünde "1"

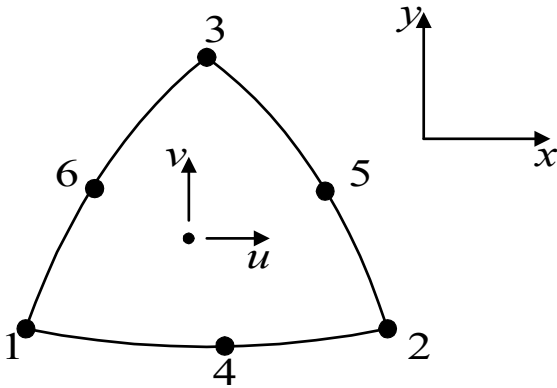
diğer tüm *n*-1 düğümde "0" değerini alır



3 düğümlü çizgisel eleman için şekil fonksiyonları

$$N_1 = -\frac{1}{2}(1-\xi)\xi, \quad N_2 = (1+\xi)(1-\xi), \quad N_3 = \frac{1}{2}(1+\xi)\xi$$

# Altı düğüm noktalı üçgen eleman için şekil fonksiyonları



2°'den interpolasyon

$$u(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2$$

$$v(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2$$

12 düğüm deplasmanı değerine bağlı 12 katsayı

## Altı düğüm noktalı üçgen eleman için şekil değiştirme – yer değiştirme ilişkisi

Şekil değiştirmeler standart tanımlar kullanarak eleman içlerinde elde edilebilir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = a_1 + 2a_3x + a_4y$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} = b_2 + b_4x + 2b_5y$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = (b_1 + a_2) + (a_4 + 2b_3)x + (2a_5 + b_4)y$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{U}^e$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_6 \\ V_6 \end{pmatrix}$$

## Bünye ilişkisi (elastisite)

**Elastisite:** bir SE çevrede gerilme ve şekil değiştirme arasında bire bir ilişki vardır, gerilmeler  $\sigma$  ve şekil değiştirmeler  $\varepsilon$  vektör formunda yazılırsa gerilme şekil değiştirme ilişkisi  $\sigma = \mathbf{D} \varepsilon$  şeklinde gösterilir

Düzlem şekil değiştirmede lineer izotropik elastisite

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix}$$

Matrisin elemanları sabitler olup SE denklemlerin lineer olduğuna işaret eder

## Elastik olmayan bünye ilişkisinde ne olur ?

Elastisitenin avantajı katsayılar matrisinin sabit olmasıdır. Böylece SE denklemleri lineer olur ve dış yüklerin hepsi tek hesap adımında birlikte uygulanarak çözülebilir.

Zeminler genellikle elastik davranmaz!

$$\Delta \sigma = \mathbf{D} \Delta \varepsilon$$

**D** mevcut ve geçmiş gerilme tarihçesine bağlıdır.



Dış yükü farklı adımlarda uygulamak ve uygun bir non-lineer çözüm şeması kabul etmek gerekir.

## Eleman stiffness (rijitlik) matrisi

Elemana uygulanmış kütle kuvvetleri ve yüzeysel kuvvetler düğüme etkiyen kuvvet kümesine (düğüm kuvvetleri vektörü) dönüştürülür.

Düğüm kuvvetler düğüm deplamanları ile ilişkilidir :

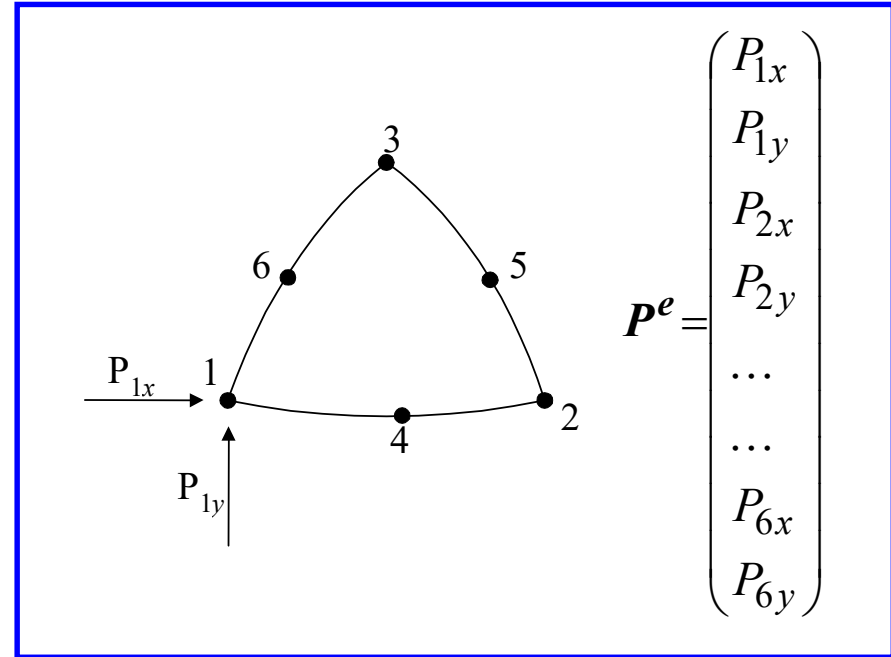
$$\mathbf{K}^e \mathbf{U}^e = \mathbf{P}^e$$

$\mathbf{K}^e$  eleman rijitlik matrisi

$$\mathbf{K}^e = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv$$

$\mathbf{D}$  malzeme rijitlik matrisi

$\mathbf{B}$  şekil değiştirmelerin düğüm deplasmanları ile ilişkisini veren matris

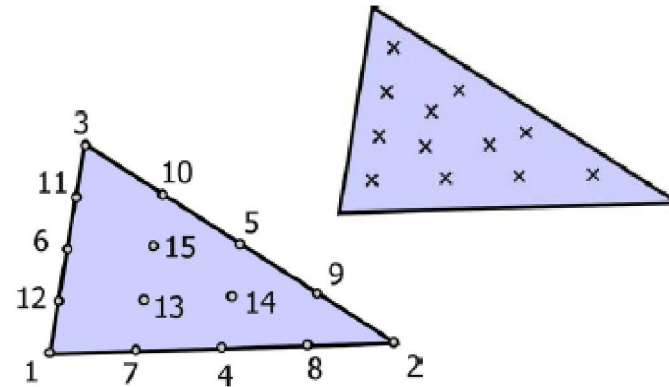
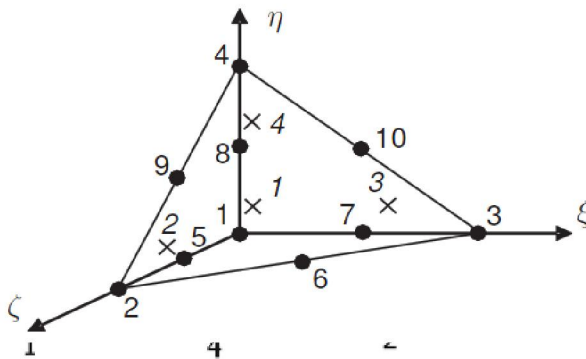


## Gauss noktaları

$$\mathbf{K}^e = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv$$

$\mathbf{K}^e$ 'yi elde etmek için her elemanda integrasyon almak gerekir.  
Genelde bu integrasyon sayısal olarak gerçekleştirilir ([Gauss integrasyonu](#))

Aslında bir fonksiyonun integrali çok sayıda integrasyon noktasında elde edilen fonksiyonun ağırlıklı toplamı ile bulunur.





## Global rijitlik matrisi (1)

Tüm ağ için rijitlik matrisi eleman rijitlik matrislerinin birleştirilmesi ile elde edilir.

Bu ağdaki serbestlik derecesi sayısına eşit bir kare matris **K'**ı üretir.

Düğüm kuvvetlerinin global vektörü **P** benzer şekilde eleman düğüm kuvvetlerin birleştirilmesiyle elde edilir.

Birleştirilmiş rijitlik matrisi ve kuvvet vektörü :

$$\mathbf{KU} = \mathbf{P}$$

burada **U** vektörü ağdaki tüm düğümlerin deplasmanlarını gösterir.

# Geoteknik Müh.'de Sayısal Analizler

- Sürekli ortam
- Başlangıç Gerilmeleri
- Elasto-Plastik Malzeme Davranışı
- Drenajlı-drenajsız davranış
  - Toplam Gerilme Analizi
  - Efektif gerilmeler
  - Boşluk basınçları
- Anizotropi
- Kompleks yükleme ve sınır koşulları
- Zemin-Yapı etkileşimi

# **PROGRAM KULLANIMI**

# Program Kullanımı

- Bilgisayarların boyutlarının küçülmesi, kapasitelerinin ve grafik yeteneklerinin artması ile program geliştirme profesyonelleşmiştir.
- Grafik ara yüz geliştiren yazılımlar veri girişi ve çıkışını kolaylaştırarak kullanıcıların öğrenmeleri ve kullanmalarını kolaylaştırmak yanında gelişmiş bünye modelleri eklenmiş ve doğrusal olmayan hesap tekniklerin de önemli gelişmeler sağlamıştır.
- Bu nedenlerden ötürü geçmişte kendi yazılımlarını geliştiren mühendisler ve kuruluşlar artık ticari yazılımları tercih etmektedir.
- Bugün çok çeşitli özelliklerdeki malzeme davranışını gözönüne alarak farklı disiplinlerdeki problemleri çözmek için geliştirilmiş yazılımlar mevcuttur. Bu yazılımlar çok pahalı ve kullanılması uğraştırıcıdır.
- Geoteknik problemler için yukarıda anlatılan durumları gözönüne alan yazılımlar geliştirilmiştir.

# Geoteknik Yazılımlar

## – Gerilme Şekil değiştirme

- 2 Boyutlu: Plaxis, Zsoil, Sigma, Flac 2D, SoilWorks , 3Boyutlu: Plaxis 3D, Flac 3D, Midas GTX

## – Su Akımı

- 2D: Plaxis (kararlı akım), Plaxflow (kararsız akım), Seep (kararlı ve kararsız akım), Flac, SoilWorks

## – Dalga yayılımı

- 1 Boyutlu: Shake, Eera, DeepSoil, 2 Boyutlu : Plaxis, Flac 2D, Quake, SoilWorks 3 Boyutlu: Flac 3D,

## – Şev Stabilite Analizleri

- SE ve SF: Plaxis 2D ve 3D, Flac 2D ve 3D
- Limit Denge (Dilim): Slope/W, Talren 4, Geo5

## – Kazık ve Kazık Grupları Analizleri

- D-Pile Group, Allpile, Geo5

## – 1B Destekli kazı analizleri

- D-Sheet Piling, K-rea, Geo5

# Genel Amaçlı Yazılımlar

- 1B,2B ve 3B Sonlu elemanlar
- Kararlı-Kararsız durumlar
  - Gerilme-Şekil değiştirme, Sızma, Mağnetizma, ısı yayılımı
  - Zemin-yapı etkileşimi
  - Bütünleşik analizler
  - Özdeğer analizi
- Gelişmiş eleman kütüphanesi
- Gelişmiş grafik arayüz
- ABAQUS, TNO DIANA, ANSYS, LUSAS, MIDAS

# Sonuç

Yukarıda anlatılanlar ışığında

- ❖ Sayısal analizler ile ideal çözümler yapılabileceği
- ❖ Günümüz koşullarında sayısal analizlerin kullanımının geoteknik mühendisliğinde bir çok problemin analizinde kaçınılmaz olduğu
- ❖ Geoteknik Mühendisliği problemlerinin çözümünde sayısal analizlerin klasik analiz yöntemlerine göre üstün yanları olsa da bir takım kısıtları (belirsizliklerin) olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

# KAYNAKLAR

- Berilgen, M.M. (2014), "Geoteknikte Sayısal Analizler – Yöntemler, Esaslar ve Sınırlamalar" *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi, Sayfa: 35-55, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.*
- Boer, R. (1996), "Highlights in the Historical Development of the Porous Media Theory:Toward a Consistent Macroscopic Theory", *Appl. Mech. Rev.* 49(4), 201-262.
- Desai, C.S., Christian, J. T. (1977), "Introduction Numerical Methods and Special topics", *Numerical methods in geotechnical engineering.* Edited by C. S. Desai and J. T. Christian. McGraw-Hill Book Company, 1977.
- Duncan, J.M., Chang, C.-Y. (1970), "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils." *J. Soil Mechanics and Foundations Division*, pp. 1629–1653.
- Griffiths, D.V. (1990), "Failure Criteria Interpretation Based on Mohr-Coulomb Friction", *J. Geotech. Enging.* 116, pp. 986–999.
- Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L. (1969) "Finite Dynamic Model for Infinite Media", *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE*, vol. 95, no. EM4, pp. 859 – 876.
- Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (1999), "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory", Thomas Telford.
- Schweiger, H. F. (2002), "Results From Numerical Benchmark Exercises In Geotechnics Proc. 5th European Conf. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Presses Ponts et chaussees, Paris, 305-314.
- Schweiger, H. F. (2008), "The Role of Advanced Constitutive Models in Geotechnical Engineering", *Geomechanics and Tunnelling, Volume 1, Issue 5*, pp. 336–344.
- Vermeer, P.A. (1978), "A Double Hardening Model for Sand." *Geotechnique*, 28, 413–433.
- Wolf, J.P. (1988), "Soil-structure Interaction Analysis in Time Domain", Prentice Hall.
- Yu, H.S. (1998), "CASM: A unified state parameter model for clay and sand.", *Int. J. Num. Analyt. Meth. Geom.* 22, pp. 621–653.
- Zienkiewicz, O.C., Bicanic N., Shen, F.Q. (1989), "Earthquake Input Definition and The transmitting boundary bonditions", *Proceedings Advances in Computational Nonlinear Mechanics I*, pp. 109-138, Springer-Verlag.