

# PRATİKTE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ KURSU

## Zemin Etütleri ve Arazi Deneyleri



Prof. Dr. Erol Güler  
Boğaziçi Üniversitesi

# İnşaat Mühendisliği Yapıları

- Bina (konut, işyeri, eğitim tesisi, hastane v.b.)
- Yüksek Yapılar
- Alışveriş Merkezleri
- Endüstriyel Tesisler
- Depolama Tesisleri
- Milli Savunma Tesisleri
- Ulaşım Yapıları (karayolu, demiryolu, havaalanı)
- Şehirçi Ulaşım (metro, LRTS)
- Deniz Yapıları (rıhtım, tersane, dalgakıran)
- Hidrolik Santraller-Barajlar
- Sulama Seddeleri
- Su Temini (su alma ağızları, pompa istasyonları, boru hatları)
- Kirlı Su Tesisleri (Su arıtma, kanalizasyon boru hatları)
- Katı Atık Depolama Tesisleri
- Spor ve Kültür Tesisleri (stadyum, kapalı spor salonu, konferans ve konser salonları v.b.)
- Termik Santraller
- Akaryakıt Depolama Tesisleri
- Boru Hatları
- Rafineriler
- Altyapı (elektrik, gaz, TV v.b.)
- Kule Yapıları (su deposu, TV, anten, rüzgar v.b.)
- Viyadük, Dere Köprüleri, Altgeçit, Üstgeçit Köprüleri v.b.
- Yeraltı Yapıları, Tünel, Galeri
- İstinat Yapıları
- Zemin Yapıları
- ...

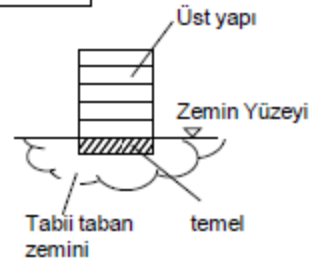
**UNUTMAYIN!**  
**GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**TÜM BU YAPILARLA İŞTİGAL EDER!**

# Geoteknik Mühendisliğinde Zemin - Kayaç

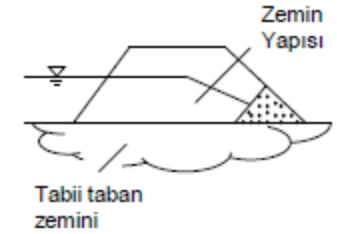
TABIİTTAKİ ŞEKLİ İLE  
•TABİİ HALDE INSITU

ZEMİN-KAYAÇ YAPILARI  
•KONTROLLU

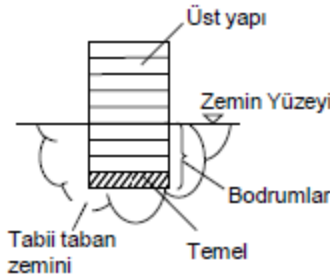
•Taban Zemin Üzerinde Yapı



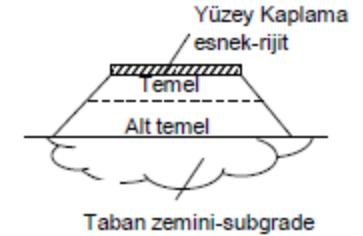
•Baraj-Sedde



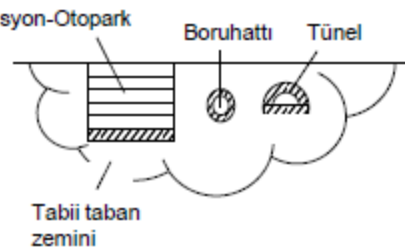
•Zeminin Kısmen Üzerinde ve  
Kısmen Gömülü Üst Yapı



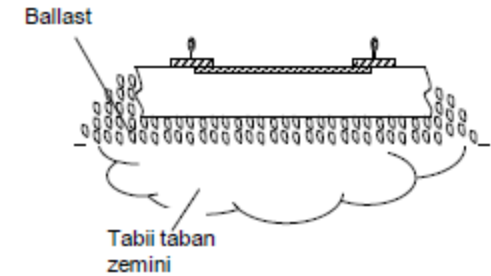
•Karayolu-Otoyol-Pist-Üst Yapı



•Zemine Gömülü Üst Yapı

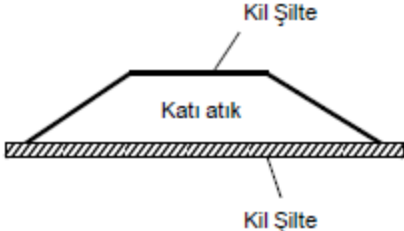
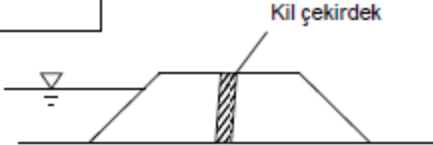


•Demiryolu

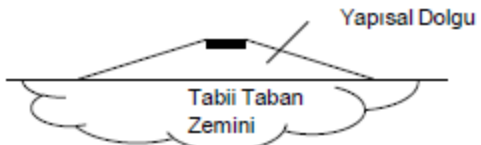


**ZEMİN-KAYAÇ YAPILARI**  
**•KONTROLLÜ (devamı)**

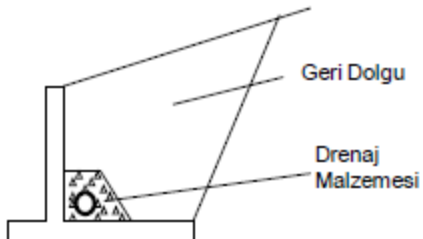
•Geçirimsiz-çekirdek-silte



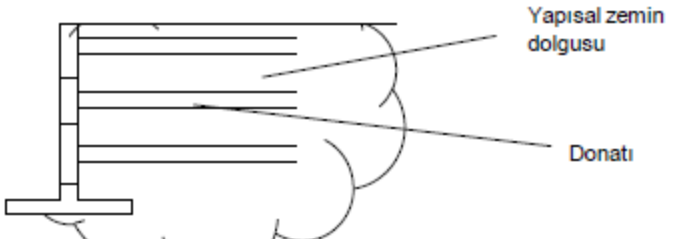
•Yapısal Dolgu-Embankment



•Geri Dolgu-Drenaj Malzemesi



•Zemin Dayanım Yapıları



## TASARIMDA İLGİLİ DİSİPLİNLER

- Harita Mühendisliği** Topoğrafya, Metraj, Aplikasyon
- Mimari** Fikir, Ön Uygulama Projeleri Ve Detaylar, Plan+Kesit
- Üst yapı** Statik Sistem Seçimi, Analiz ve Tasarım
- Malzeme Seçimi** Tasarım+Uygulama, Malzeme Mühendisliği
- Depremsellik** Yerel Şartnameler  
Özel Yapılar – Detay Çalışmalar  
Deprem Mühendisliği
- Zemin – Temeller – Geoteknik Mühendisliği**  
Jeomorfoloji, jeoloji  
Jeofizik Mühendisliği, Mühendislik Jeolojisi  
Zemin ve Kaya Mekaniği  
Temel Mühendisliği

### Özel Projeler

Ulaşım Projeler – Yol, Demiryolu, Havaalanı, Rıhtım vb.

Teknolojik Üniteler – Teknolojik Projeler Tasarım Ve Uygulama Kriterleri.

Su Yapıları – Hidrolik

Çevre Mühendisliği Yapıları - Çevre

# Planlama (Temel Mühendisliği)

- RİSK GRUPLARI TANIMLAMASI
- TARİFLENEN YAPI İLE İLİŞKİSİ
- MEVCUT ALTYAPI VE KOMŞU YAPILARLA İLİŞKİSİ
  - TASARIM İLE İLİŞKİSİ
  - UYGULAMA İLE İLİŞKİSİ

# Geoteknik Risklerin Tarifi

- HEYELAN, STABİLİTE BOZUKLUĞU
  - PROBLEMLİ ZEMİNLER
    - TAŞIMA GÜCÜ
- OTURMALAR VE YATAY DEPLASMANLAR
- AKTİF FAYLANMA - TEKTONİK HAREKETLER
  - ZEMİN SIVILAŞMASI
  - ZEMİN BÜYÜTMESİ

# Problemlı Zeminler

- KONTROLSUZ DOLGULAR
  - ÇÖKEBİLEN ZEMİNLER
  - ŞİŞEBİLEN ZEMİNLER
  - ORGANİK ZEMİNLER
  - SIKIŞABİLİR ZEMİNLER
- GEVŞEK VE ZAYIF ZEMİNLER



## Zemin Etüdü

- Zemin Etüdü Kapsam ve Programı
- Zemin Etüdünün Uygulaması
- Zemin Etüdünün Uygulamasının Denetlenmesi
- Zemin Etüdü Raporlanması-Factual Report

# ZEMİN ETÜDÜ KAPSAMI

- KAPSAM
- YER
- ADET
- DERİNLİK
- ŞARTNAMELER
- SONDAJ
- NUMUNE ALMAK
  - Temsili – indeks özellikler
  - Örselenmemiş – mekanik özellikler
- LABORATUVAR DENEYLERİ
  - İndeks özellikler
    - » Dane dağılımı
    - » Atterberg limitleri
    - » Sınıflandırma
    - » Sıkıştırma – kompaksiyon
  - Mekanik özellikler
    - » Kayma mukavemeti
    - » Sıkışabilirlik
    - » Hidrolik iletkenlik
- ARAZİ DENEYLERİ
  - SONDAJ KUYUSU İÇİNDE
    - SPT, Standard Penetrasyon Deneyi, N
    - PT, Menard Presiyometre Deneyi, Ep, Pi
    - DLT, Marchetti Dilatometri Deneyi, ED, ID
    - VT, Vane kanatlı kesme deneyi
    - Lefranc, permeabilite, k
    - Lugeon, Basınçlı su deneyi, k, Lv
    - Jeofizik, vp, vs, dalga hızları
  - SONDAJ KUYUSU DIŞINDA
    - CPT, Statik Penetrasyon Deneyi, qc, fs, FR
    - Plaka yükleme deneyi, (q – s) bağıntısı
    - Pompaj deneyi – permeabilite, k
    - Jeofizik deneyler, vp, vs

## PROBLEMLİ ZEMİNLER

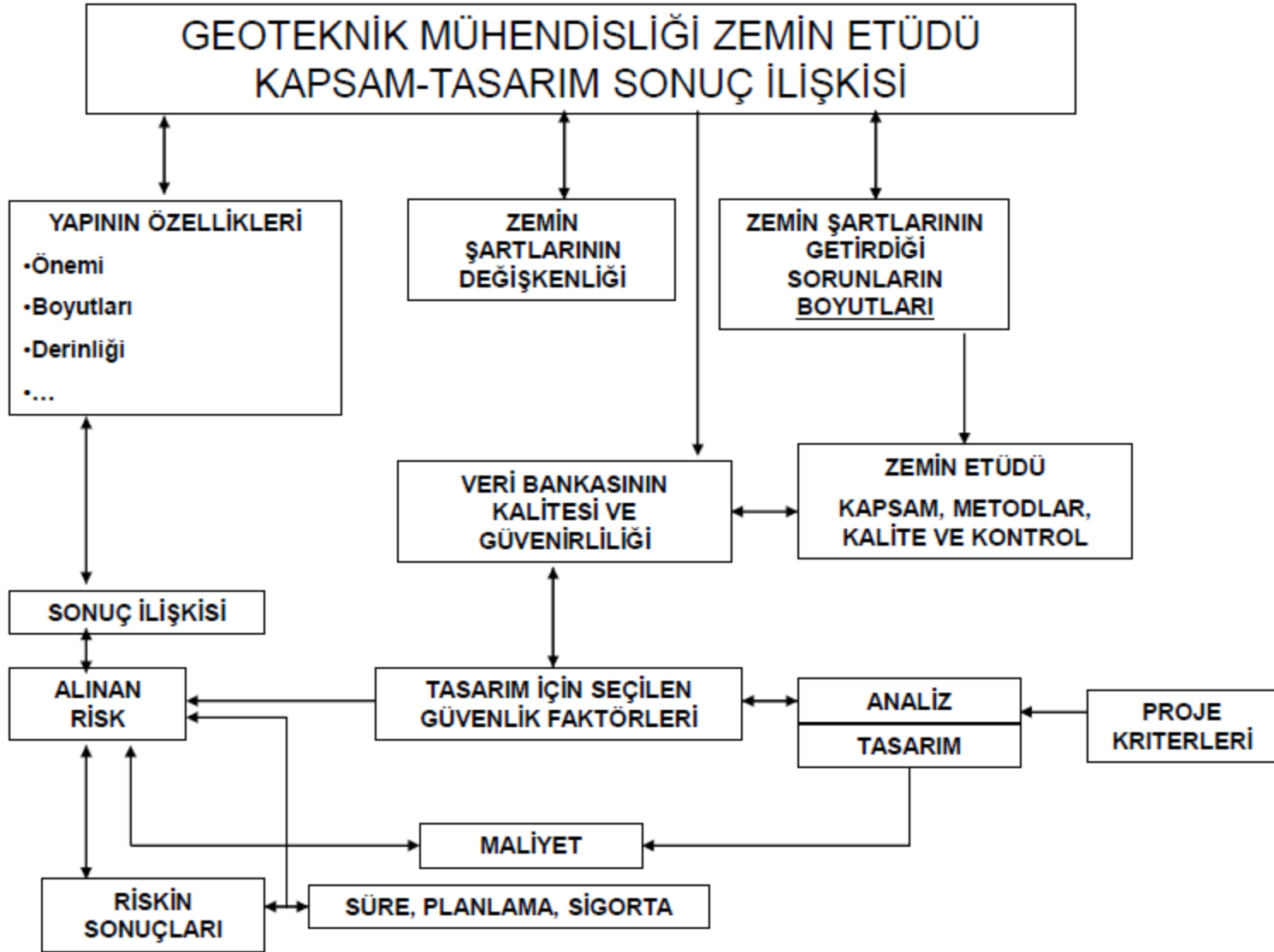
- SUYA DOYGUN, YUMUŞAK KİLLER,
  - Düşük Taşıma gücü
  - Yüksek Şıkışabilirlik
  - Kazı Taban göçmesi
  - Genel Stabilite
  - Sıvılaşma Düşük Plastisite  $I_p < 12$
- SUYA DOYGUN GEVŞEK KUMLAR VE NP SİLTLER
  - Sıvılaşma
- YARI DOYGUN YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLER
  - Yüksek hacim değiştirme, şişme ve büzülme
- AŞIRI KONSOLİDE KİLLER
  - Uzun vadeli stabilite
- NP SİLTLER
  - Basınç altında su ile temasta aşırı deplasman, hydrocompression
  - Dona karşı yüksek hacim değiştirme
- NP DISPERSİF SİLT VE KİLLER
  - Borulanma ve yıkanma
- ORGANİK ZEMİNLER
  - Zamana bağlı oturma

# GEOTEKNİK RİSKLER-SORUNLAR ZEMİN İLİŞKİSİ

<u>ZEMİN</u>	<u>GEOTEKNİK PARAMETRE</u>	<u>TEMEL SORUNU</u>
YUMUŞAK NORMAL KONSOLİDE KİLLER	<ul style="list-style-type: none"><li>•Drenajsız kayma mukavemeti, <math>s_u</math></li><li>•Kompresibilite, <math>C_c</math></li><li>•Konsolidasyon katsayısı, <math>C_v, C_h</math></li><li>•Hidrolik geçirgenlik, <math>k_v, k_h</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Taşıma gücü</li><li>•Oturma</li><li>•Stabilite</li><li>•Taban göçmesi</li><li>•Plastik deformasyonlar</li><li>•Kazıklar üzerinde negatif sürtünme</li></ul>
YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLER	<ul style="list-style-type: none"><li>•Atterberg limitleri, LL, PL, <math>I_p=LL-PL, w_s</math></li><li>•Aktivite, A (kil yüzdesi)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Yüksek hacim değiştirme potansiyeli</li><li>•Şişme ve büzülme</li><li>•Hafif yapılar ?</li></ul>
AŞIRI KONSOLİDE KİLLER	<ul style="list-style-type: none"><li>•Drenajlı kayma mukavemeti, <math>(c', \phi') - (c'_d - \phi'_d)</math></li><li>•Residüel kayma mukavemeti, <math>c'_r, \phi'_r</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Uzun vadeli şev stabilitesi</li></ul>

## GEOTEKNİK RİSKLER-SORUNLAR ZEMİN İLİŞKİSİ (devam)

<b><u>ZEMİN</u></b>	<b><u>GEOTEKNİK PARAMETRE</u></b>	<b><u>GEOTEKNİK SORUN</u></b>
LÖSS ZEMİN	<ul style="list-style-type: none"><li>•Birim hacim ağırlığı</li><li>•Boşluk oranı</li><li>•Özel odometre deneyinde suya boğulma halindeki düşey deplasman</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Islanmadan doğan oturma ve farklı oturmalar</li><li>•Kazıklar üzerinde negatif çeper sürtünmesi</li></ul>
GEVŞEK SİLTİLİ VE KUMLU ZEMİNLER	<ul style="list-style-type: none"><li>•SPT darbe sayısı, <math>N_{1,60}</math>-SPT</li><li>• penetrasyon uç mukavameti, <math>q_{c1}</math> CPT</li><li>•Sürtünme oranı, FR(%)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Sıvılaşma</li></ul>
KALIN ALÜVYON	<ul style="list-style-type: none"><li>•Jeofizik ölçümler, <math>V_p</math>, <math>V_s</math>, <math>V_R</math> dalga hızları derinlikle değişimi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Zemin Büyütmesi</li></ul>



## Geoteknik Analiz

### Zemin ve Temel Mühendisliği Değerlendirmesi

- Geoteknik Modelleme
- Depremsellik
- Zemin Büyütmesi
- Zemin Sıvılaşması
- Problemlili Zemin Őartlarının Deđerlendirilmesi

## Geoteknik Analiz

### Zemin ve Temel Mühendisliği Değerlendirmesi (devamı-2)

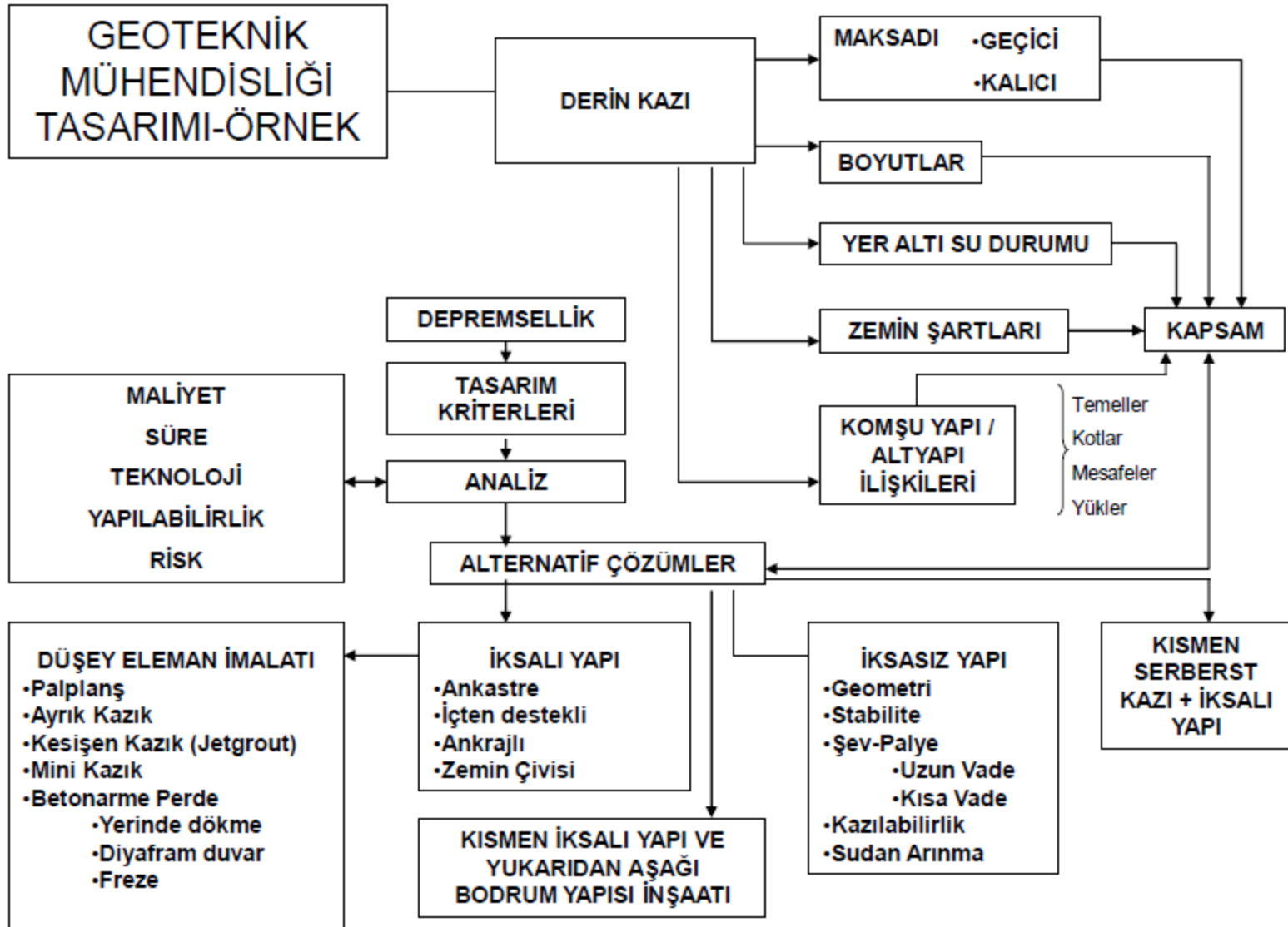
- ❑ Yapı Yüzeysel Temel Tipi, Derinliği, Boyutları
- ❑ Taşıma gücü – Zemin Emniyet Gerilmesi
- ❑ Oturmalar, Farklı Oturmalar
- ❑ Zemin Emniyet Gerilmesi
- ❑ Zemin Islahı ve kuvvetlendirilmesi, Yöntemi, Maksadı, Boyutları ve Zamanlama
- ❑ Yüzeysel sıkıştırma (kompaksiyon), geosentetikler, derin sıkıştırma (dinamik kompaksiyon), vibrofilotasyon, vibroreplacement, yüksek modüllü kolonlar (jetgrout, deepmix), enjeksiyon(grouting), compensated grouting



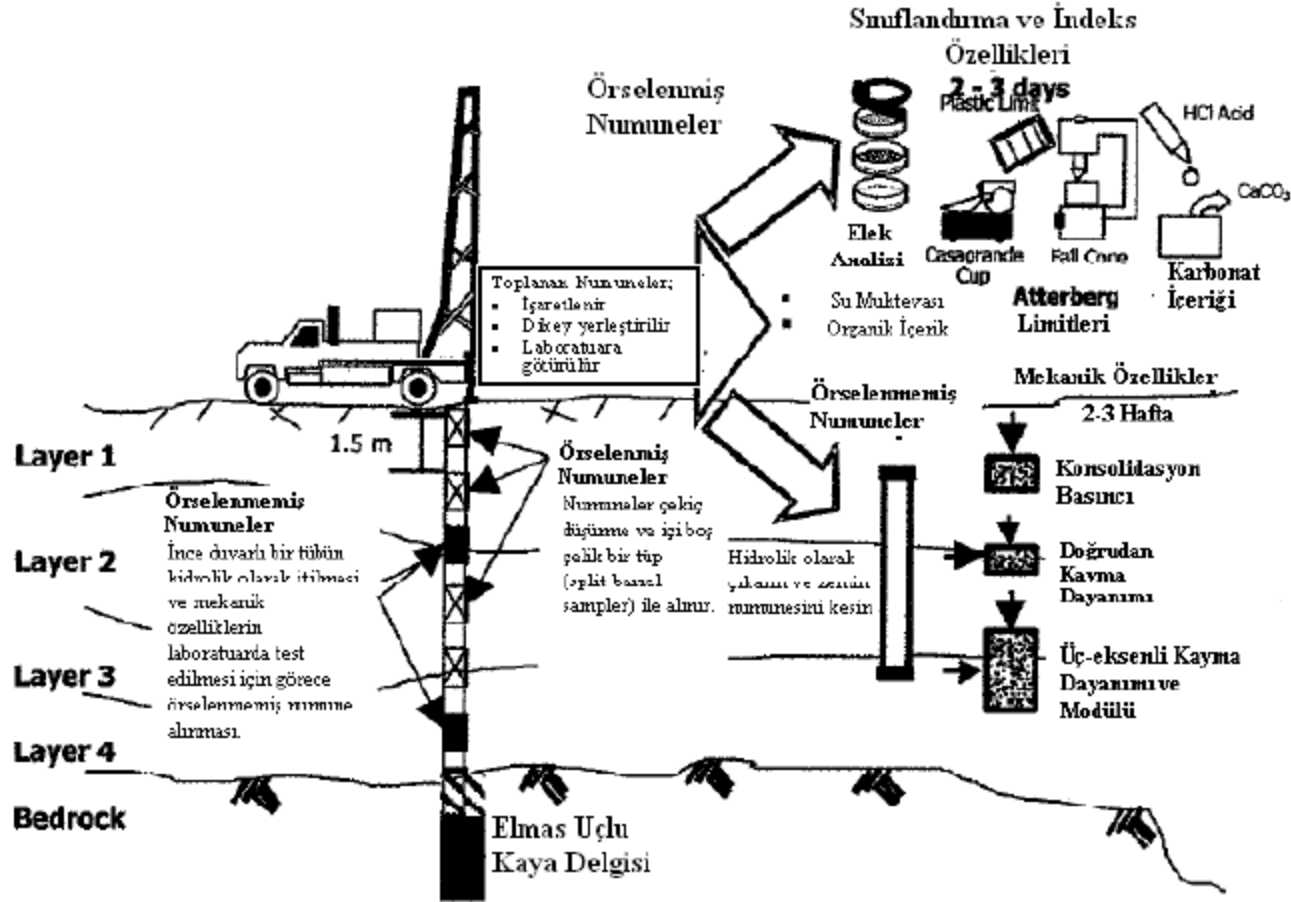
## Geoteknik Analiz

### Zemin ve Temel Mühendisliği Değerlendirmesi (devamı-3)

- Toprak İşleri,
- Derin Temeller, Düşey ve Yatay Kapasite, Grup Faktörü, Düşey ve Yatay Deplasman
- Kazı ve Dolgu, Kısa ve Uzun Vadeli Stabilite
- Dolgular Altında Oturma Miktarı ve Zamanlaması
- Kazı ve Dolguda İksa Sistemlerine İlişkin Değerlendirmeler, Tipleri (Klasik, ankastre, öngermeli ankrajlı, zemin çivili vb.)
- Drenaj ve İzolasyon
- Malzeme Kriterleri ve Teknik Şartnameler
- Tasarım Kriterleri ve Analiz Sonuçlarının Kriterlerle Mukayesesi
- Alternatif Çözüm Örnekleri, Tartışılması
- Geoteknik Mühendislik Tasarımı, Geoteknik Analizler, Alternatifler ve tüm değerlendirmelerin tasarım paftalarının hazırlanması (Avan-Uygulama)



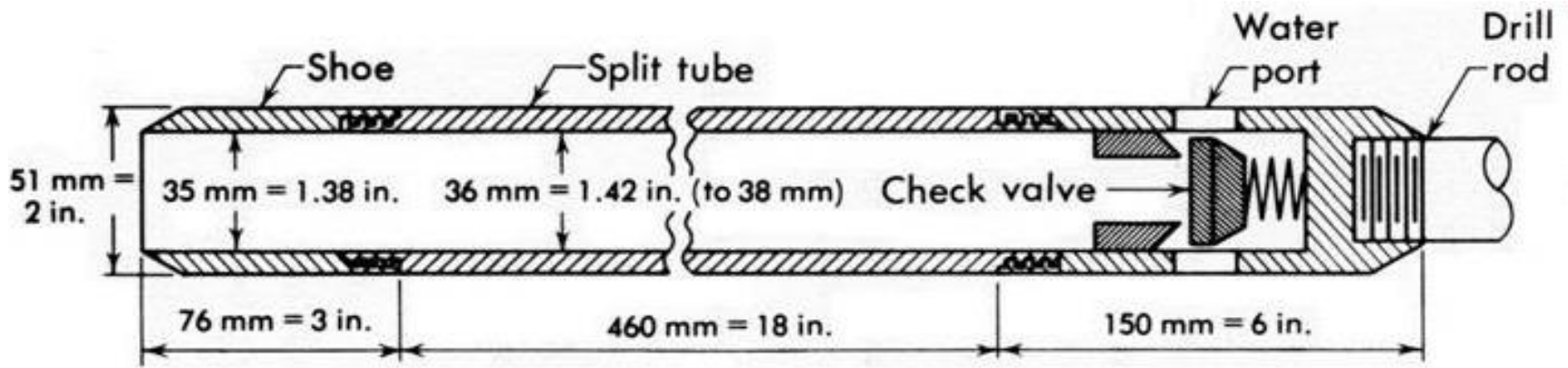
# Geleneksel delme, numune alma ve numunelerin laboratuarda test edilmesi



# Sondaj içinden numune alma

- Örselenmiş veya örselenmemiş numuneler alınır.
- Örselenmemiş numune genelde Shelby Tüp ile alınır.
- Bu tip numune alıcılar ince daneli zeminler ve bunların en fazla orta katı kıvamda olanlarında ve içinde iri parçalar bulundurmeyen zeminlerde kullanılır.
- Shelby Tüp numune alıcılar paslanmaz çelik veya karbon çeliğinden ve tipik olarak 3" veya 4" çapında olur.

# Tipik Bir Numune Alıcı



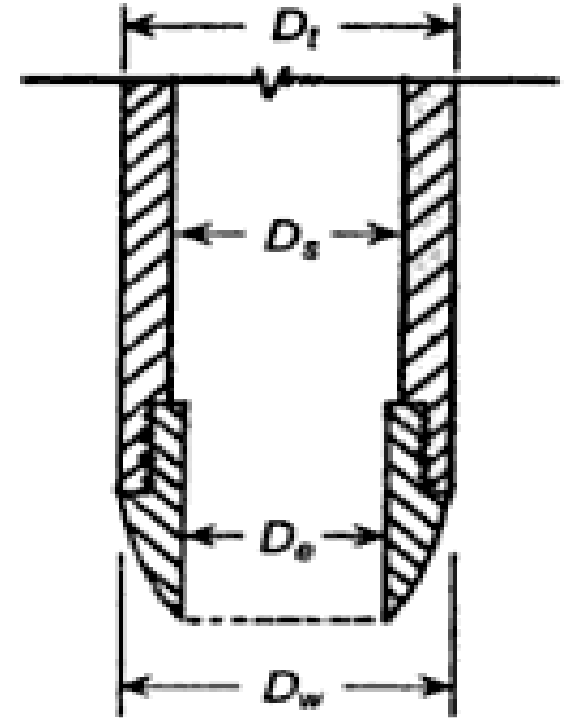
# Shelby Tüp Numune Alıcı

- Örselenmeyi minimuma indirmek için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır:

- Alan oranı =  $\frac{(D_w^2 - D_e^2)}{D_e^2} \times \%100$

- Alan oranı mümkün olduğunca küçük olmalıdır (<%10).

- İç ferahlama oranı =  $\frac{(D_s - D_e)}{D_e} \times \%100$



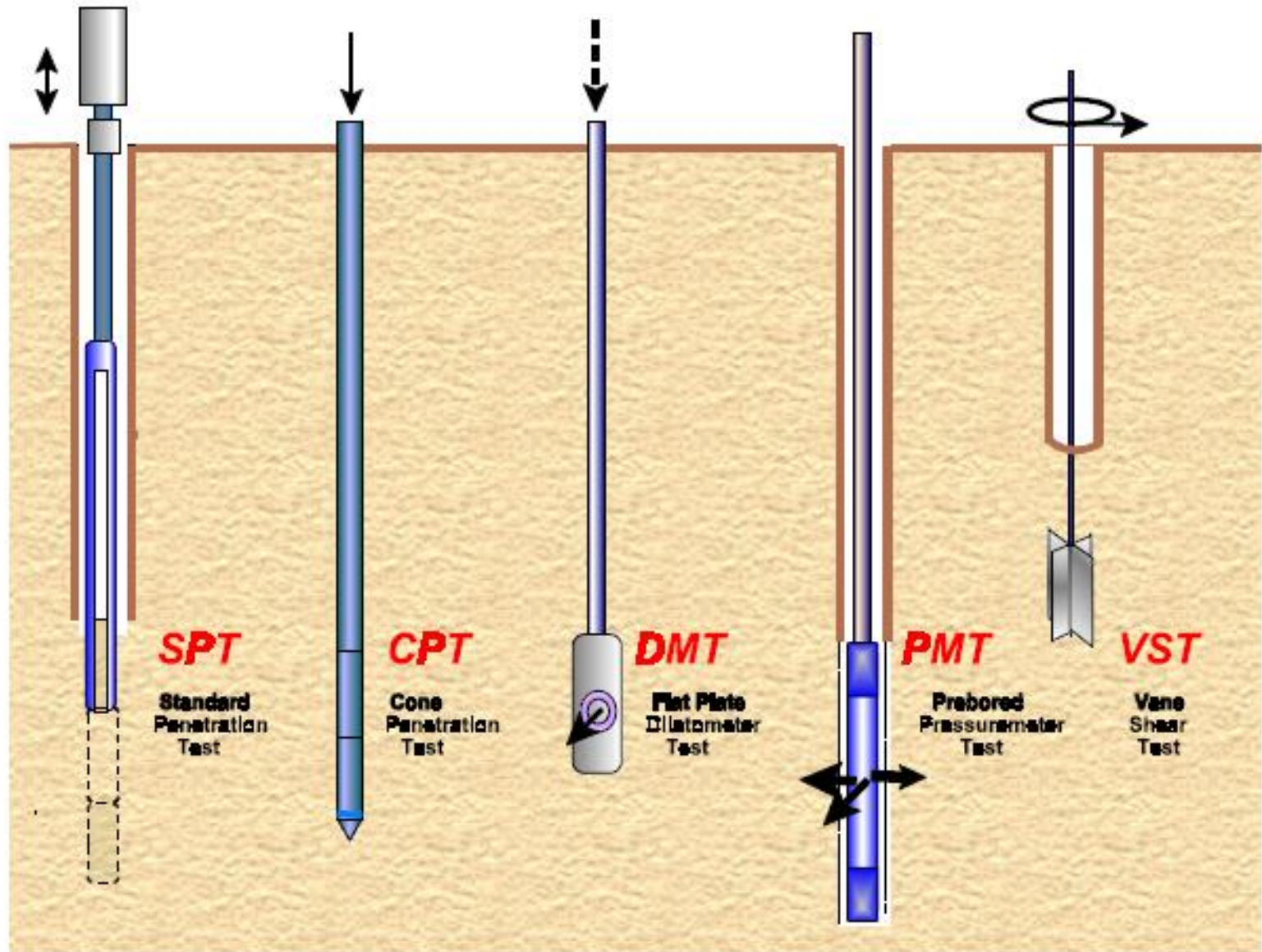
# Örselenmemiş Numune

- İç ferahlama oranı, numunenin numune içine girdikten sonra elastik ferahlamasına imkan vererek numune alıcının numuneyi sürüklemesini engeller.
- İç ferahlama oranı %0.5 ila %3 arasında olmalıdır.
- Çok büyük olduğu takdirde numuneyi yukarı almak zorlaşır.
- Dış ferahlama oranı =  $\frac{(D_w - D_t)}{D_t} \times \%100$
- Dış ferahlama oranı hem itme kuvvetinin artmasına engel olur, hem de zeminin cidara yapışarak alan oranının büyümesini engeller.
- Dış ferahlama oranı %0 ile %2 arasında olmalıdır.
- Numune çapı en az 38mm, tercihan 50-150mm olmalıdır.

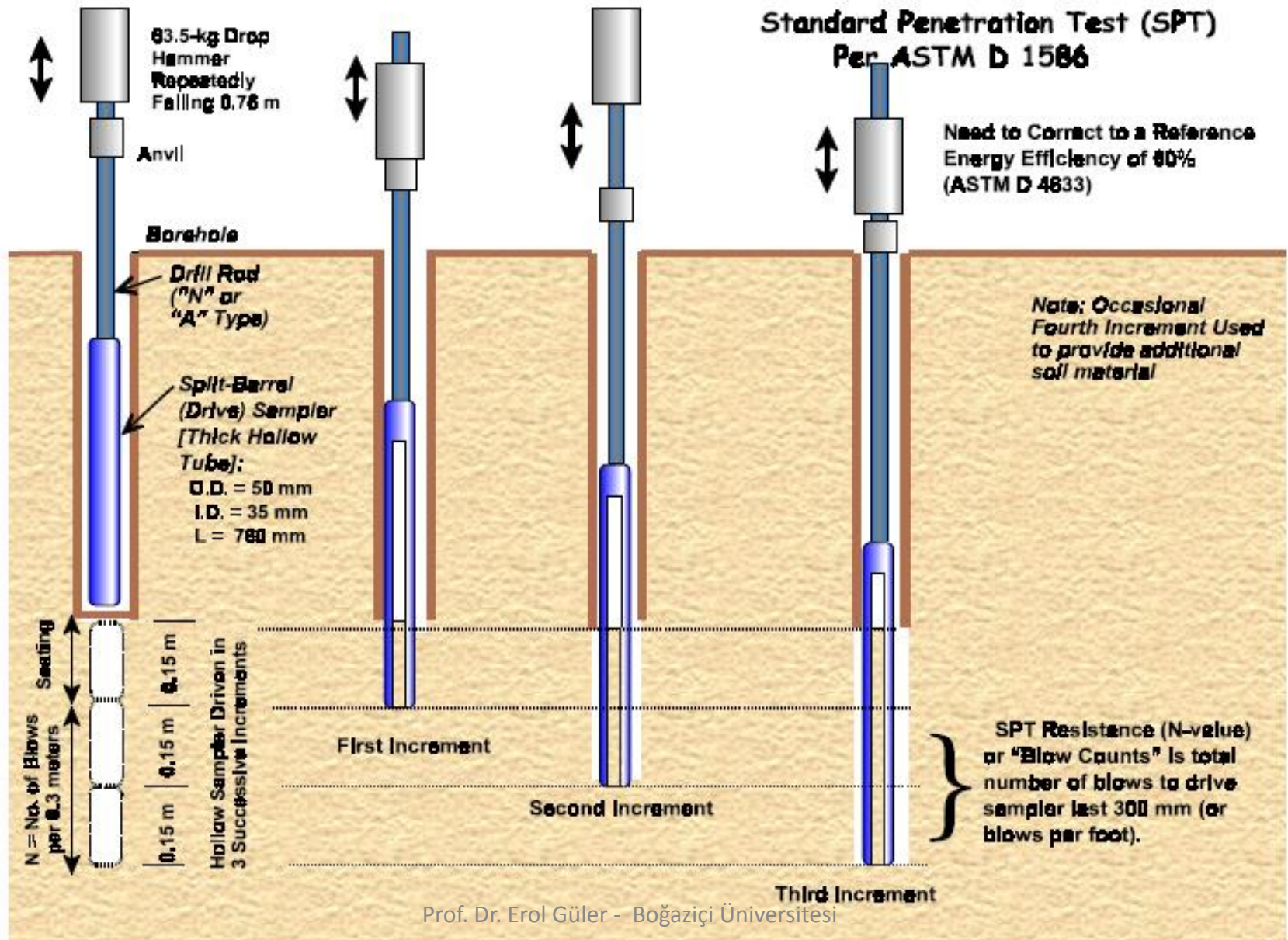
## Arazi Deneyleri için Referans Yayınlar

Deney Yöntemi	AASHTO/ ASTM No	Referans
SPT	AASHTO T206 ASTM D 1586	U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (1997) Subsurface Investigations, Training Course in Geotechnical and Foundation Engineering (Yüzeyaltı İncelemeleri, Geoteknik ve Temel Mühendisliğinde Eğitim Kursu), FHWA HI-97-021
CPT, CPTu, SPTu	ASTM D 3341, D5778	U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (1988) Guidelines for Using the CPT, CPTu, and Marchetti DMT for Geotechnical Design (Geoteknik Tasarımda CPT, CPTu ve Marchetti DMT Kullanımı için Kılavuzlar) Lunne, T., Robertson, P.K., ve Powell, J.J.M. (1997) Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice (Geoteknik Uygulamalarda Konik Penetrasyon Deneyi), E&F Spon, 312 pp.
DMT	Önerilen ASTM Yöntemi Schmertmann, 1986	U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (1992) The Flat Dilatometer Test (Düz Dilatometre Deneyi), FHWA-SA-91-044 Marchetti, S., ve Crapps, D.K. (1981) Flat Dilatometer Manual (Düz Dilatometre Kılavuzu), Internal Report of GPE, Inc. (Gainsville, FL), available at <a href="http://www.gpe.org">http://www.gpe.org</a> .
PMT	ASTM D 4719	U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (1989) The Pressuremeter Test fo Highway Applications (Otoyollar Uygulamaları için Presiyometre Deneyi), FHWA-IP-89-008 Clarke, B.G. (1995) Pressuremeters in Geotechnical Design (Geoteknik Tasarımda Presiyometreler), Blackie Academic & Professional, 364 pp.
VST	ASTM D 2573	American Society of Testing and Materials, (1988) Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies (Zeminlerde Vane Kayma Dayanımı Deneyi: Arazi ve Laboratuar Çalışmaları), ASTM STP 1014, 378 pp.





# SPT DENEYİ



# SPT DENEYİ

## AVANTAJLARI

- Numunenin gözle görülmesine imkan verir
- Mekanik özellikler ile ilişkilendirilebilen bir sayı verir
- Basit ve dayanıklı bir sistemdir
- Hemen tüm zeminlerde, hatta yumuşak kayalarda bile kullanılabilir
- Çok yaygın bir deney düzeneğidir

## DEZAVANTAJLARI

- Alınan numune örselenmiş numunedir
- SPT N sayısı ile yapılan korelasyonlarda pek çok belirsizlik vardır
- Yumuşak killer ve siltlerde iyi sonuç vermez
- Yüksek değişkenlik ve belirsizlik içerir

Kohezyonsuz zeminlerde izafi sıkılık, SPT N değeri ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişkiyi gösterir tablo

Sıkılık durumu	İzafi Sıkılık Dr	SPT, N (vuruş/300 mm)	Sürtünme açısı, Ø (°)
Çok gevşek	<20	<4	<30
Gevşek	20-40	4-10	30-35
Orta sıkı	40-60	10-30	35-40
Sıkı	60-80	30-50	40-45
Çok sıkı	>80	>50	>45

# Kohezyonlu Zeminlerde

$N_{60}$	Zemin Tanımı	$c_u$ (kPa)
0 – 2	Çok yumuşak	<10
3 – 5	Yumuşak	10 – 25
6 – 9	Orta katı	25 – 50
10 – 15	Katı	50 – 100
15 – 30	Çok katı	100 – 200
> 30	Sert	> 200

# Gerekli Düzeltmeler

- Enerji kaybı
- Derinlik
- Delik çapı
- Tij cinsi ve boyu



## SPT - Enerji Düzeltmesi

$$N_{60} = N \cdot c_E \cdot c_B \cdot c_S \cdot c_R$$

Enerji Oranı	Donut	$c_E = ER/60$	0.5 - 1.0
	Safety		0.7 - 1.2
	Otamatik		0.8 - 1.5
Kuyu Çapı	65 - 115 mm	$c_B$	1.00
	150 mm		1.05
	200 mm		1.15
Numune Alış	Standart	$c_S$	1.0
	Standart dışı		1.1 - 1.3
Tij Boyu	3 - 4 m	$c_R$	0.75
	4 - 6 m		0.85
	6 - 10 m		0.95
	10 - 30 m		1.00

### Efektif Jeolojik Basınç – Derinlik Düzeltmesi

$$(N_1)_{60} = c_N \cdot N_{60}$$

$$c_N = (Pa/\sigma_{v0}')^n$$

$$n=1$$

Killer

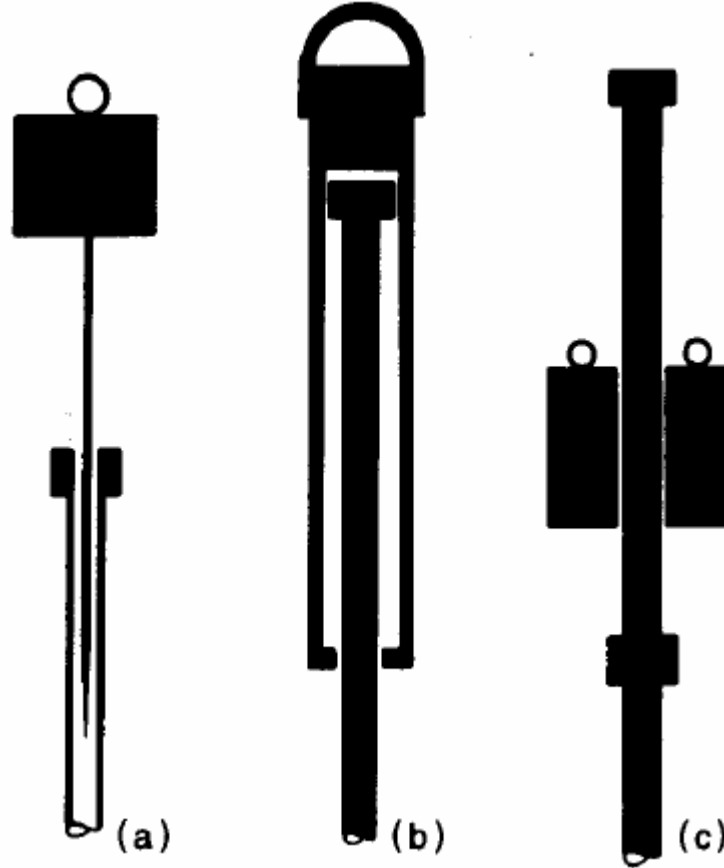
$$n= 0.5 - 0.6$$

Kumlar

$$Pa= 1 \text{ bar (ATM)}$$

$$\sigma_{v0}' = \text{Efektif Jeolojik Basınç}$$

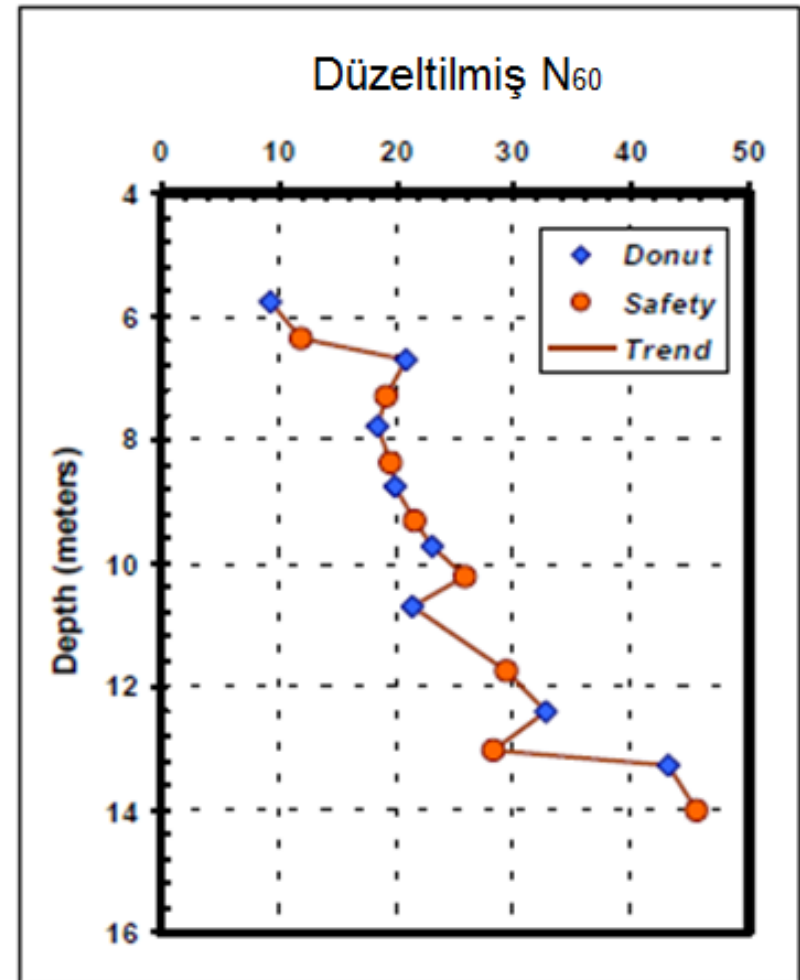
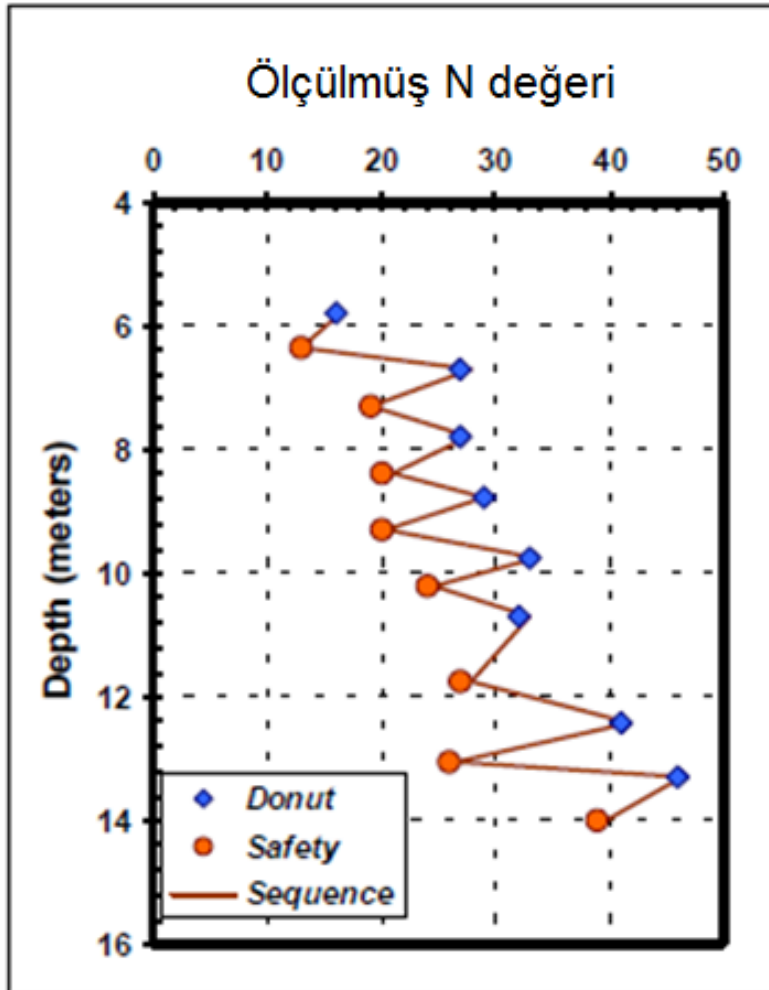
# SPT ÇEKİÇLERİ



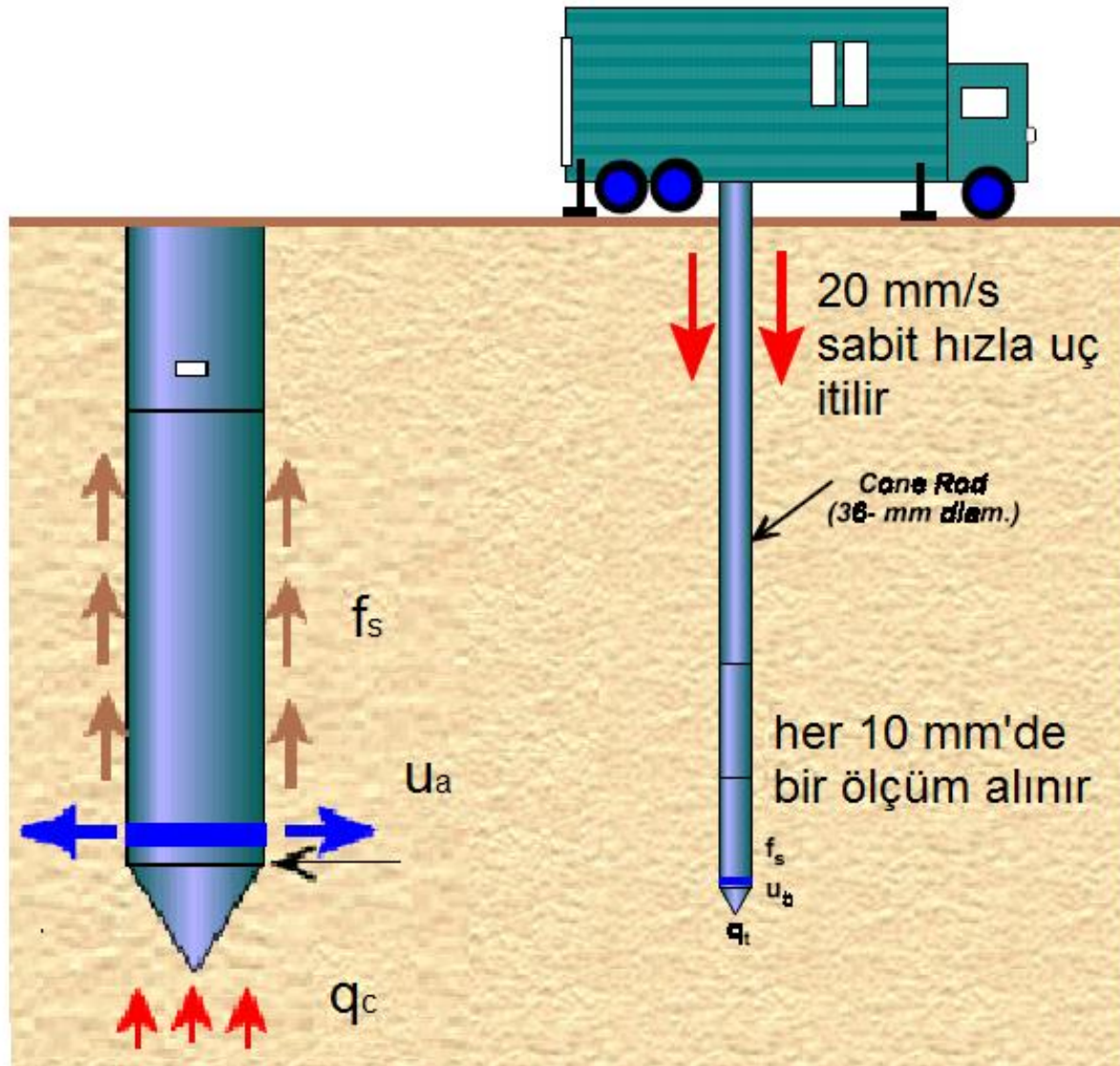
a) merkezleyicili; b) emniyetli; c) simit tipi (donut) SPT çekiçleri



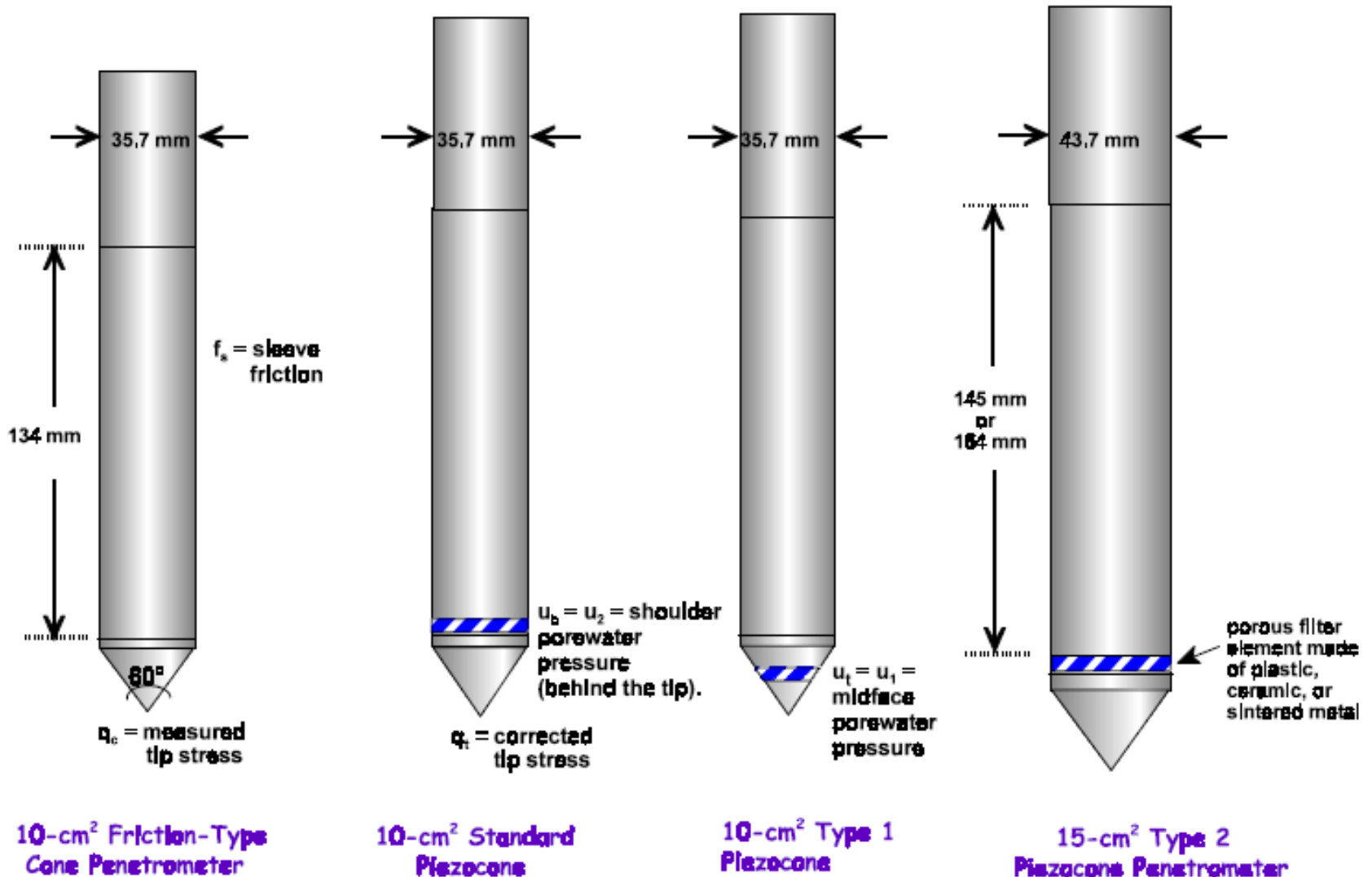
# ÖLÇÜLMÜŞ VE DÜZELTİLMİŞ SPT N DEĞERLERİ



# CPT DENEYİ



# CPT UÇLARI



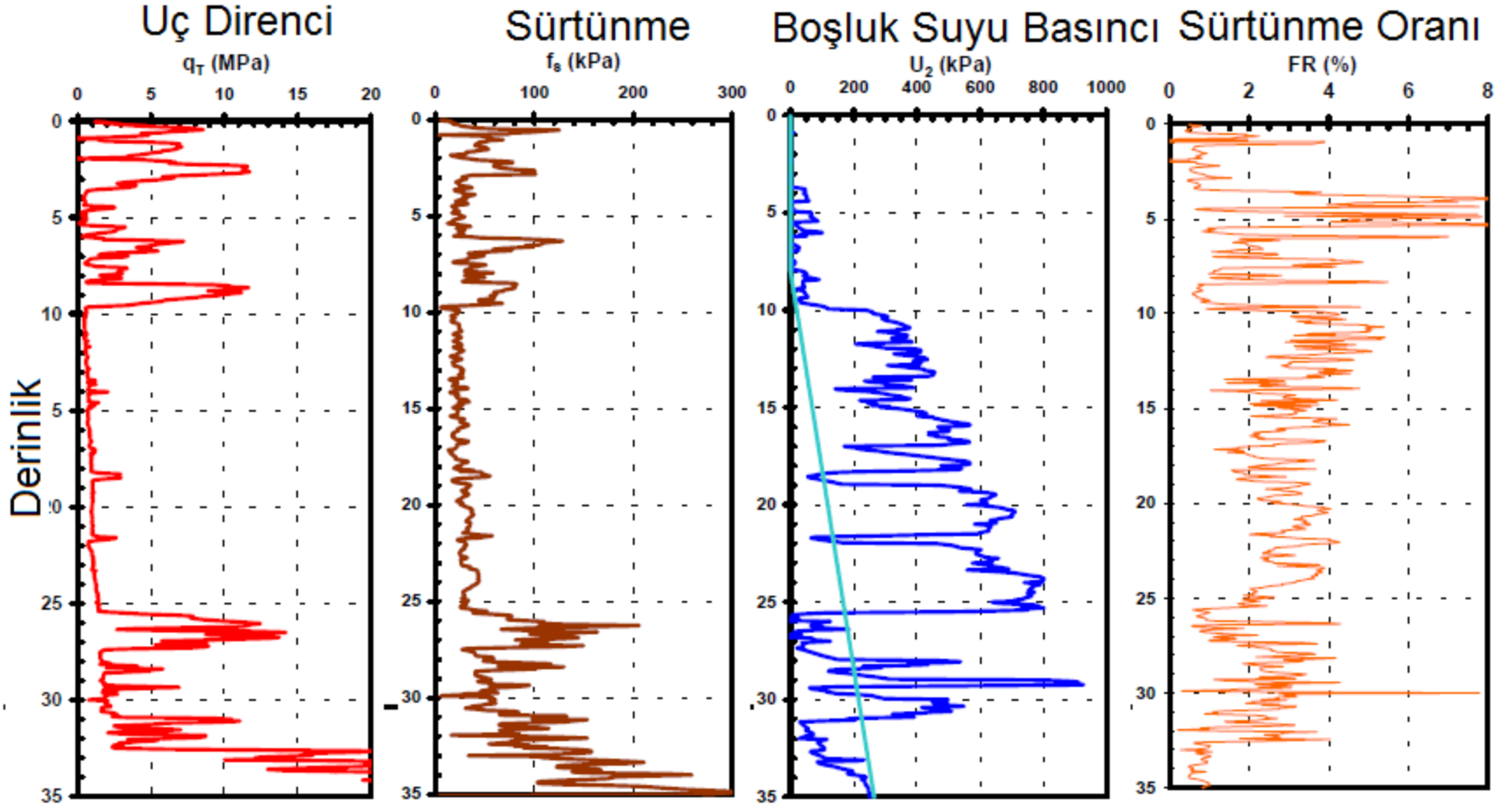
# CPT DENEYİ

## AVANTAJLARI

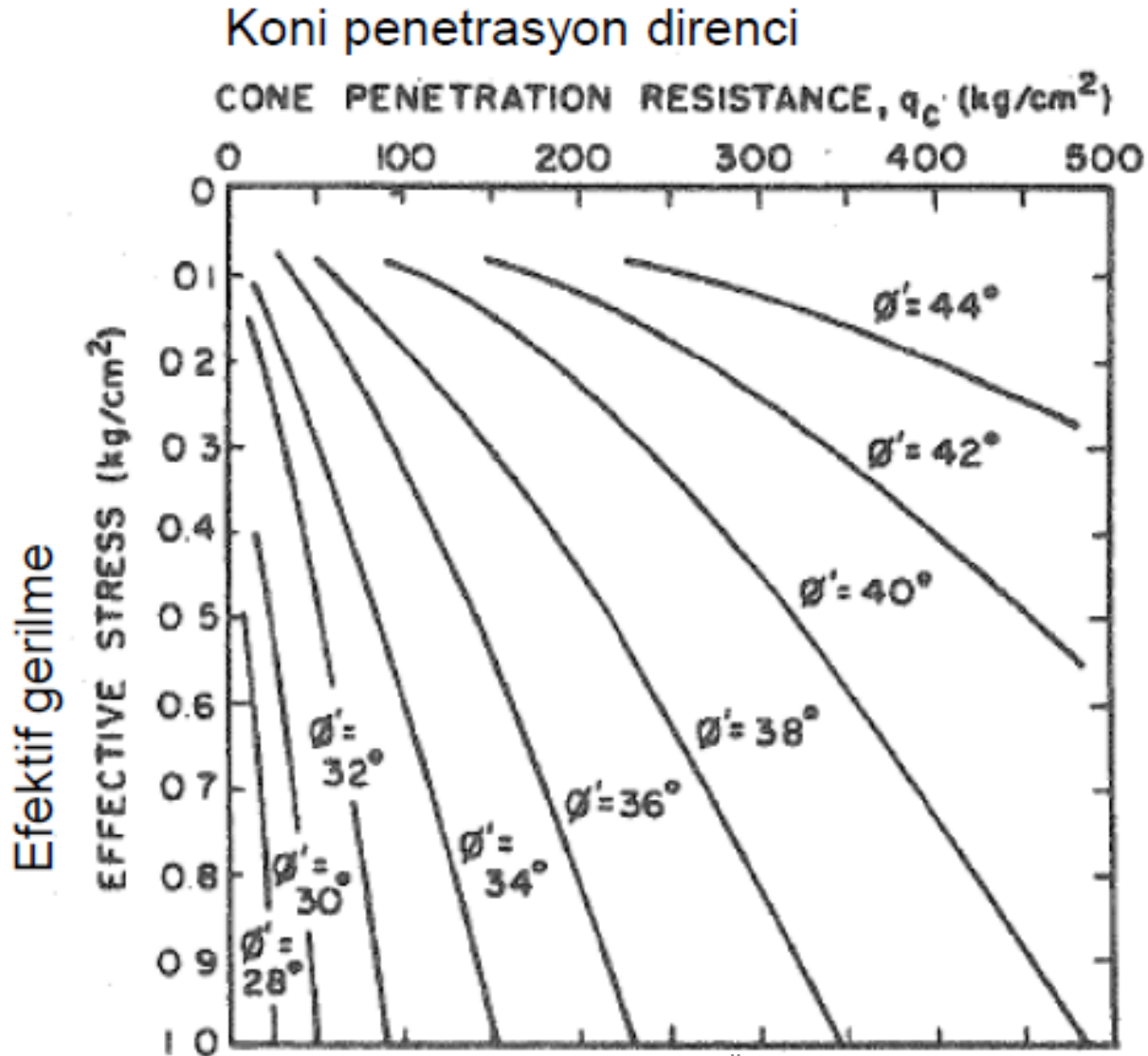
- Hızlı ve sürekli ölçüm alma
- Ekonomi ve yüksek verimlilik
- Sonuçlar operatörden bağımsız
- Yorum için bazı teorik değerlendirmeler mevcut
- Özellikle yumuşak zeminler için çok uygun

## DEZAVANTAJLARI

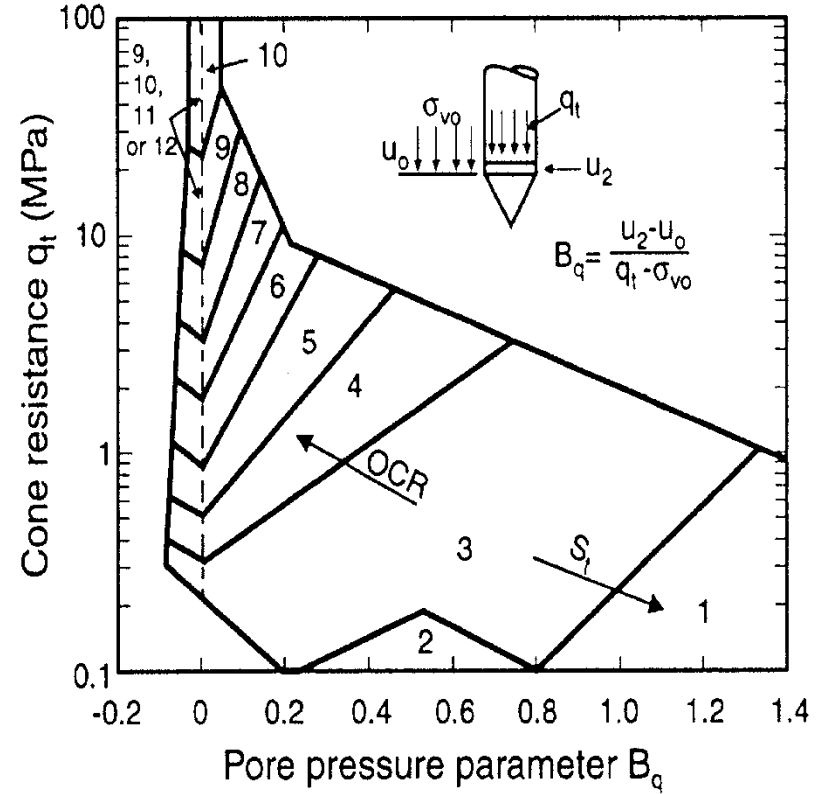
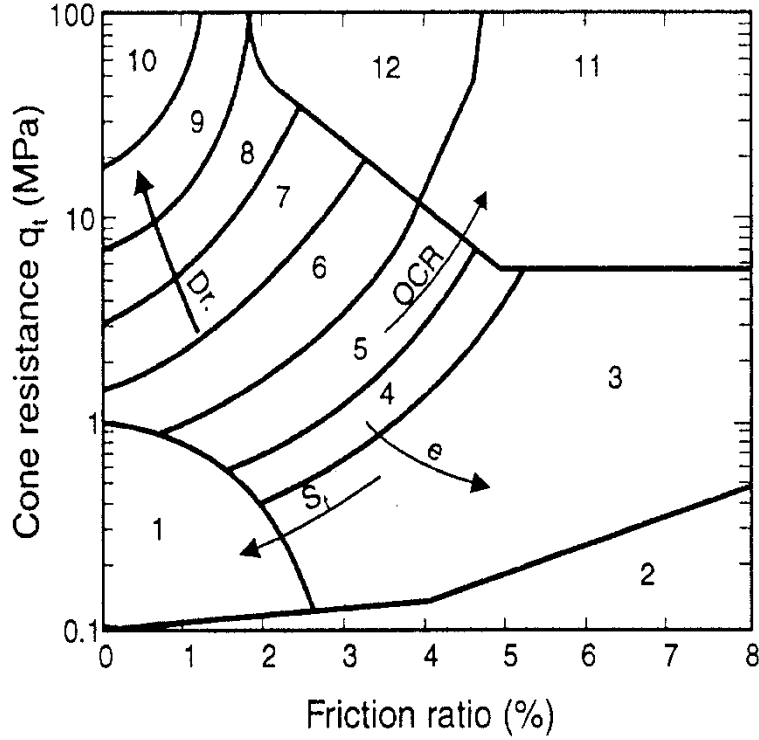
- Ölçüm cihazı ön yatırımı yüksek
- Eğitimli operatör gerektirir
- Zeminden örnek alamaz, zemin gözle görülemez
- Çakıl ve bloklulu zeminlerde kullanılması mümkün değildir



# CPT- $q_c$ Değeri ile $\sigma_{v0}'$ ve $\phi'$ Arasındaki İlişki



# CPT Sonucuna Göre Zemin Sınıflaması



## Zemin Sınıfı (Robertson et al., 1986; Robertson & Campanella, 1988)

1 – Hassas Killer

2 – Organik malzeme

3 – Kil

4 – Siltli Kil - Kil

5 – Killi Silt – Siltli Kil

6 – Kumlu Silt – Siltli Kum

7 – Siltli Kum – Kumlu Silt

8 – Kum – Siltli Kum

9 – Kum

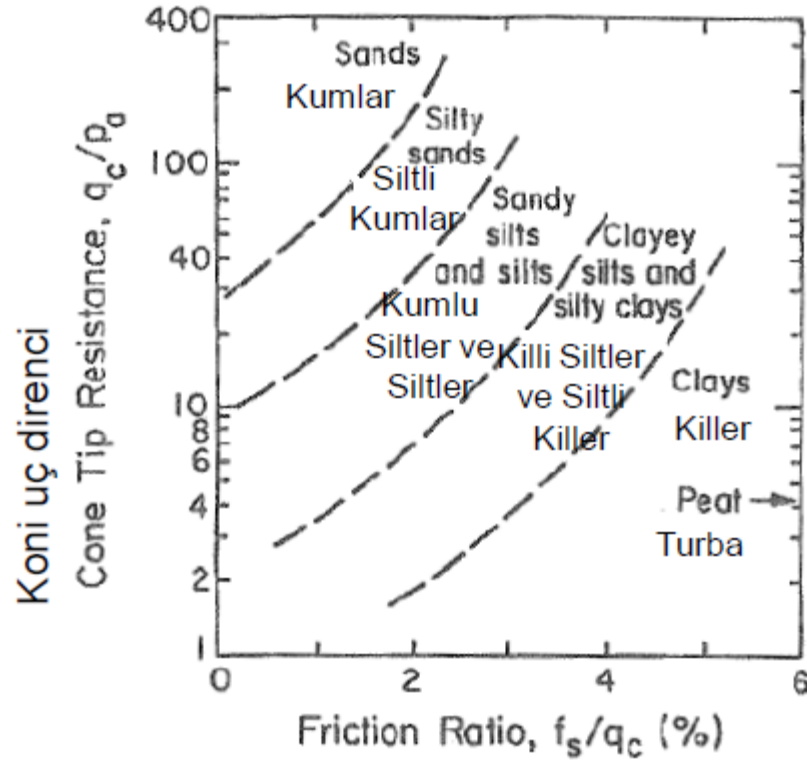
10 – Çakıllı Kum - Kum

11 – Çok Katı Kil\*

12 – Kum – Killi Kum\*

\*: *Aşırı Konsolide veya Çimentolu*

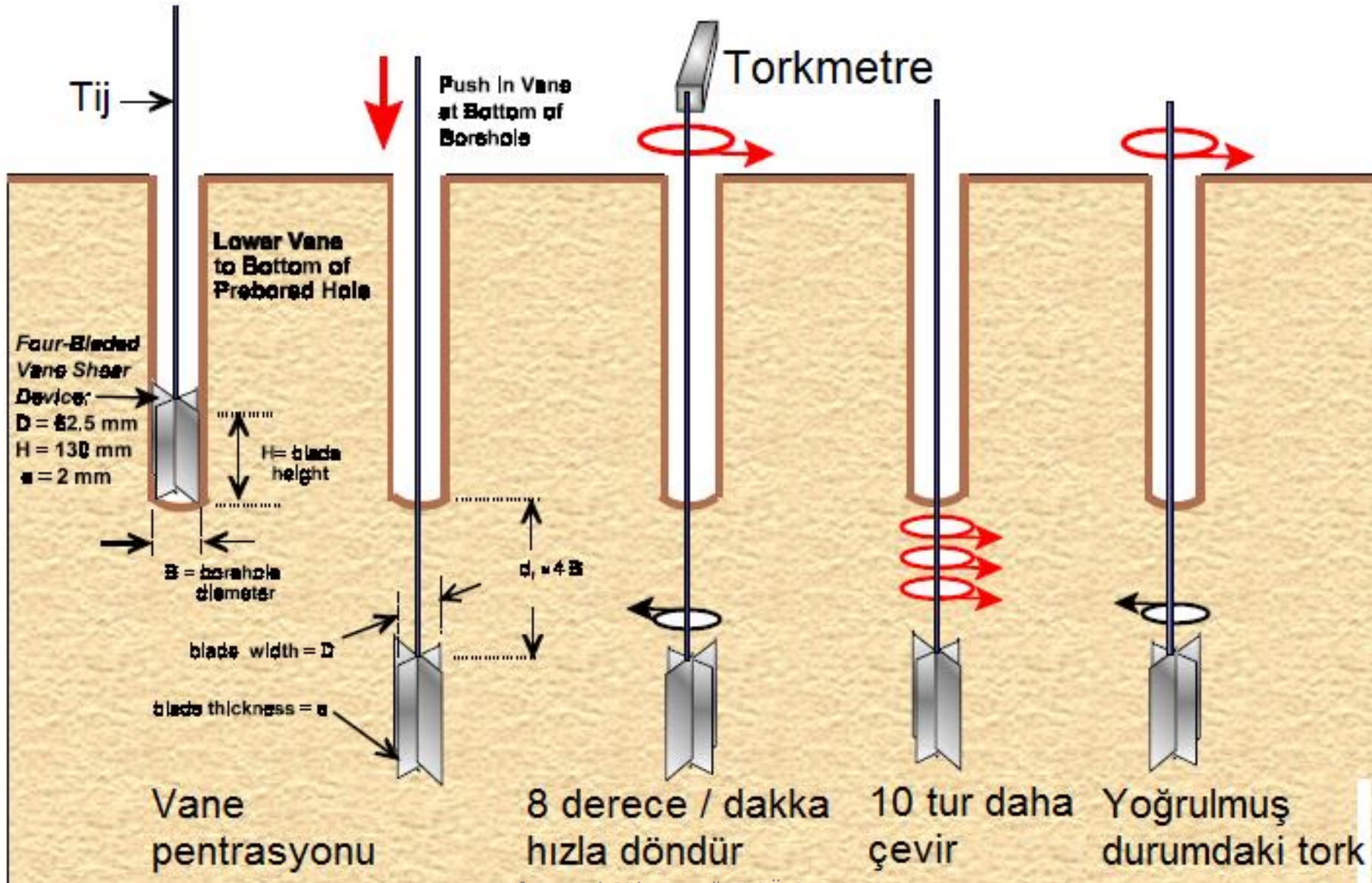
## Koni Penetrasyon Deneyi Datası ile Zemin Sınıflandırması



Sürtünme oranı



# VANE DENEYİ



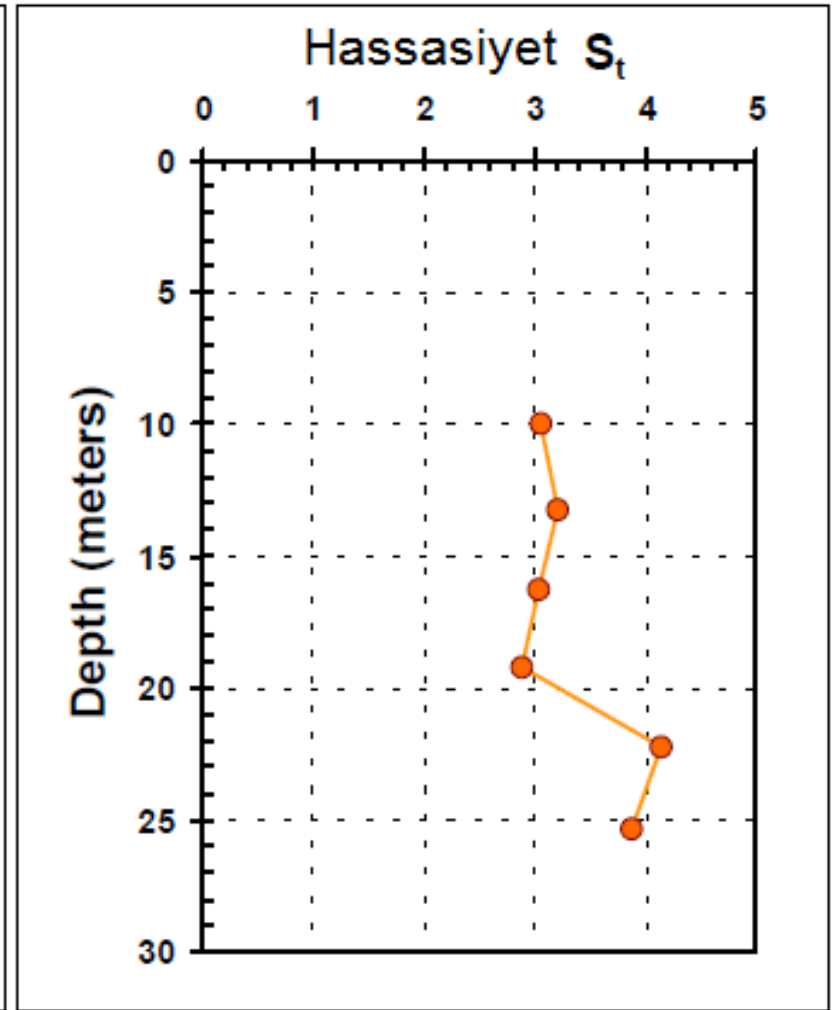
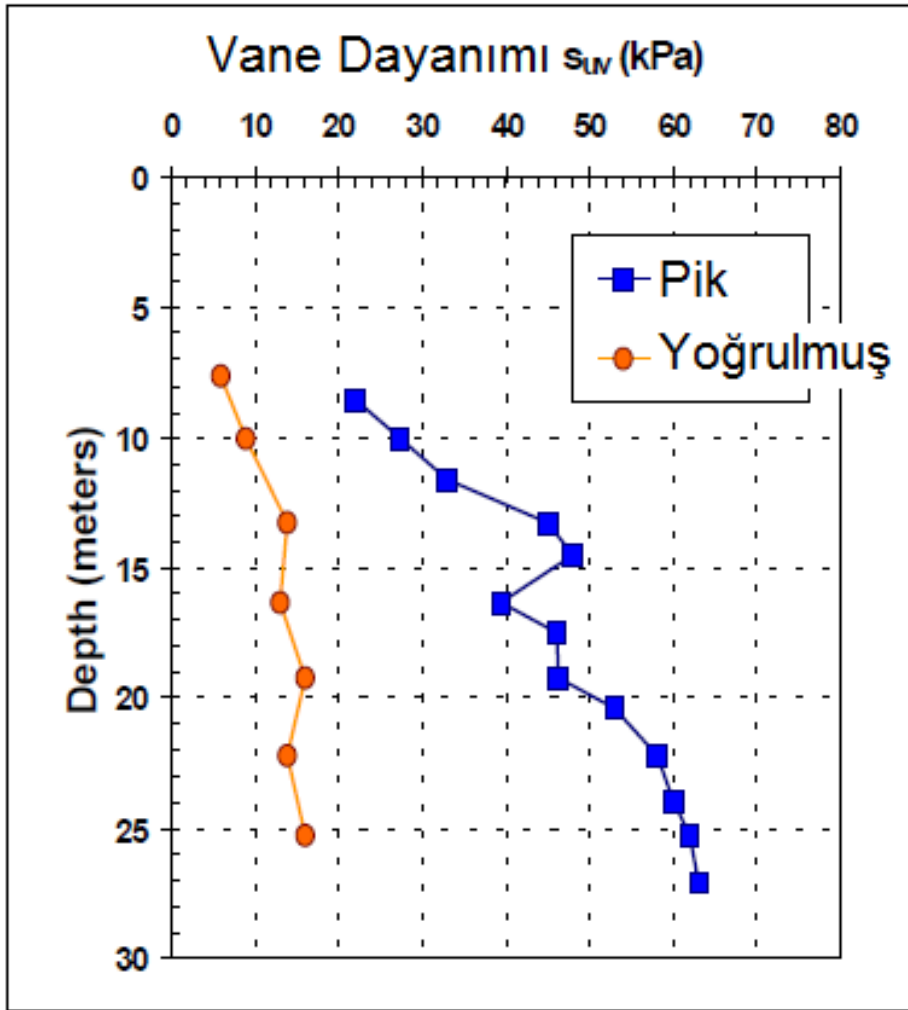
# VANE DENEYİ

## AVANTAJLARI

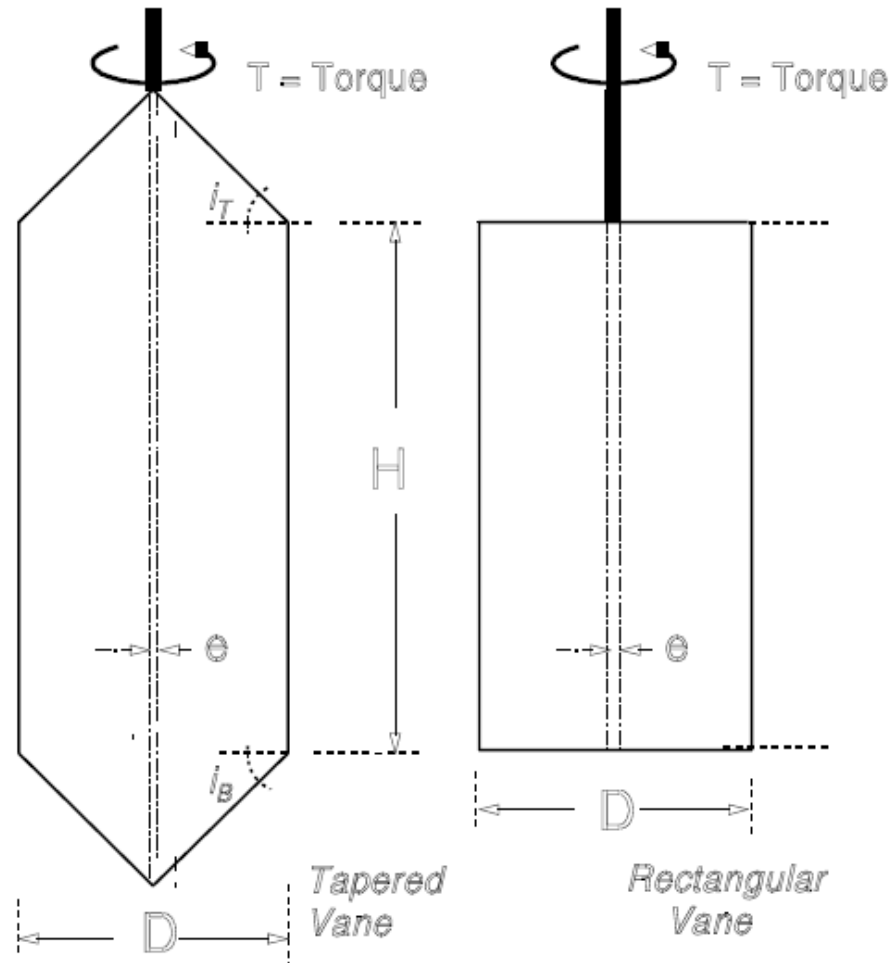
- Drenajsız kayma dayanımı doğrudan belirlenir
- Basit deney düzeneği
- Kilin hassaslığını tespit edebilir
- Çok eskiden beri kullanılan bir yöntemdir

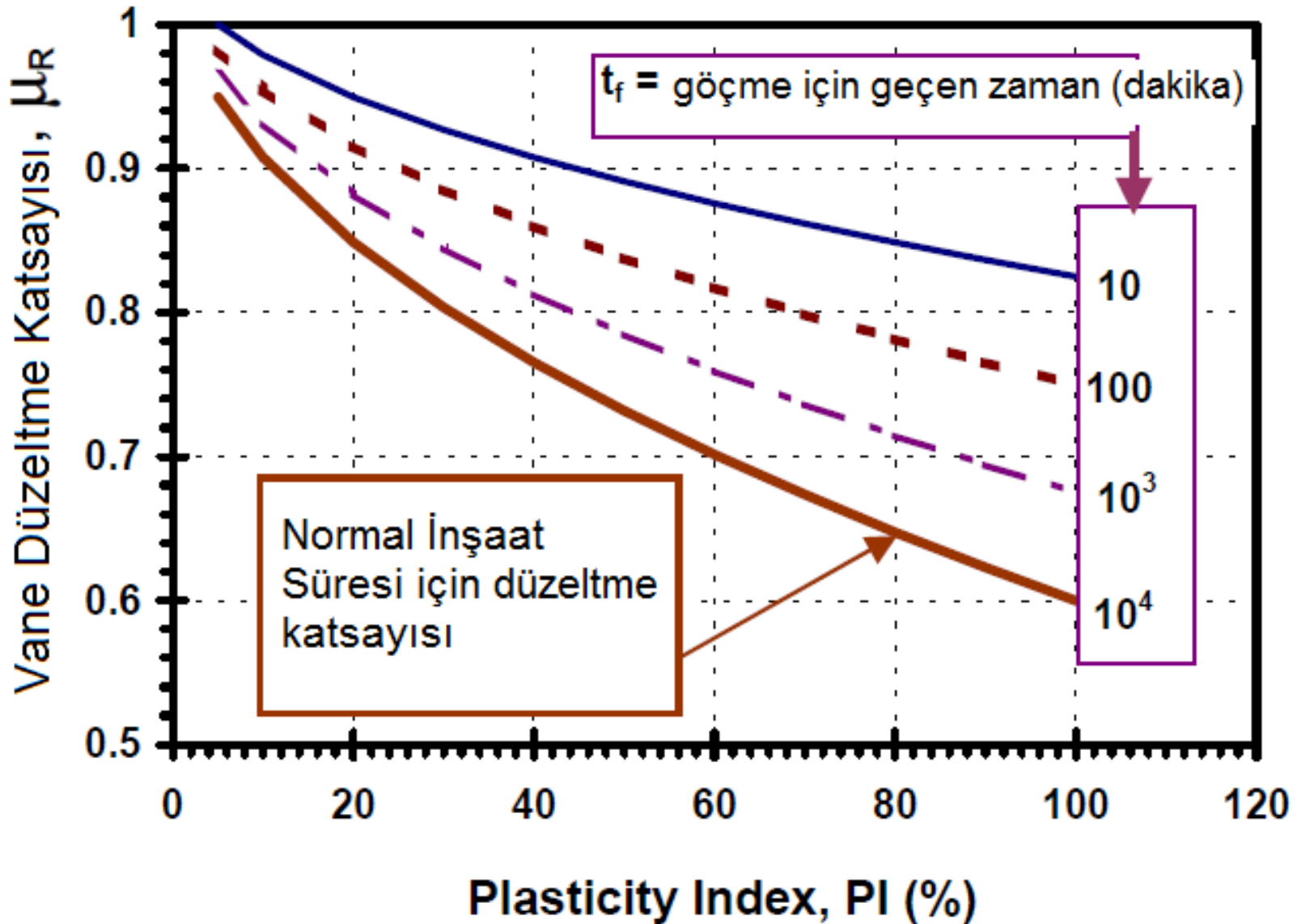
## DEZAVANTAJLARI

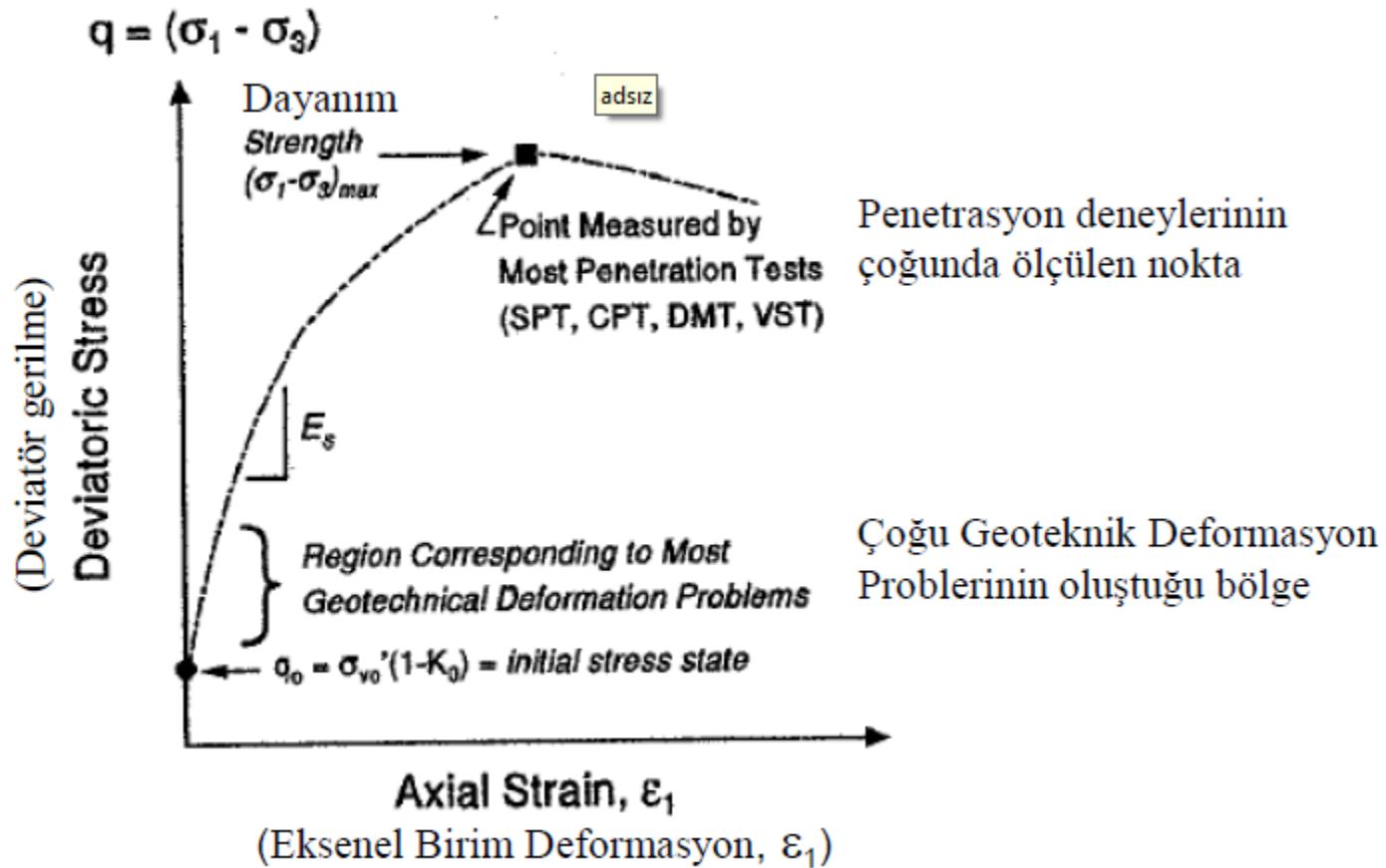
- Sadece Yumuşak ila katı killerde kullanılabilir
- Yavaş ve vakit alan bir deneydir
- Değerlendirmede ampirik kurallar kullanılır
- Kum cepleri vs. gibi süreksizliklerden etkilenir

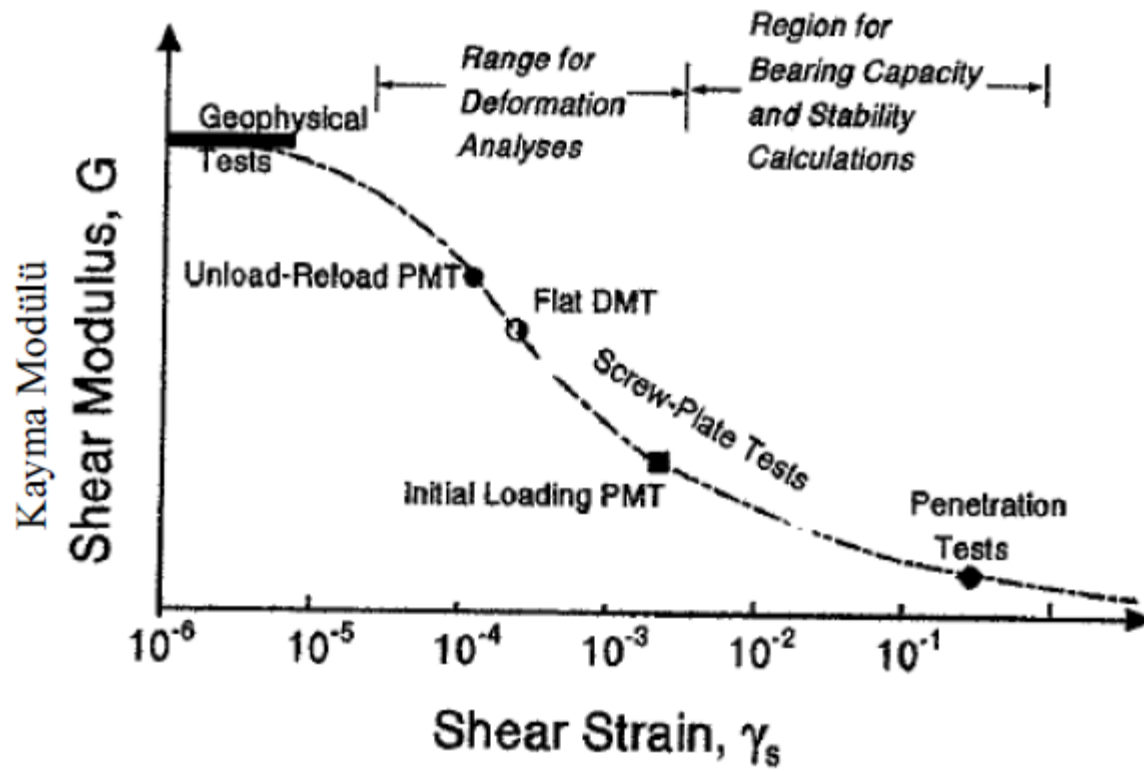


# Kanat Tipleri





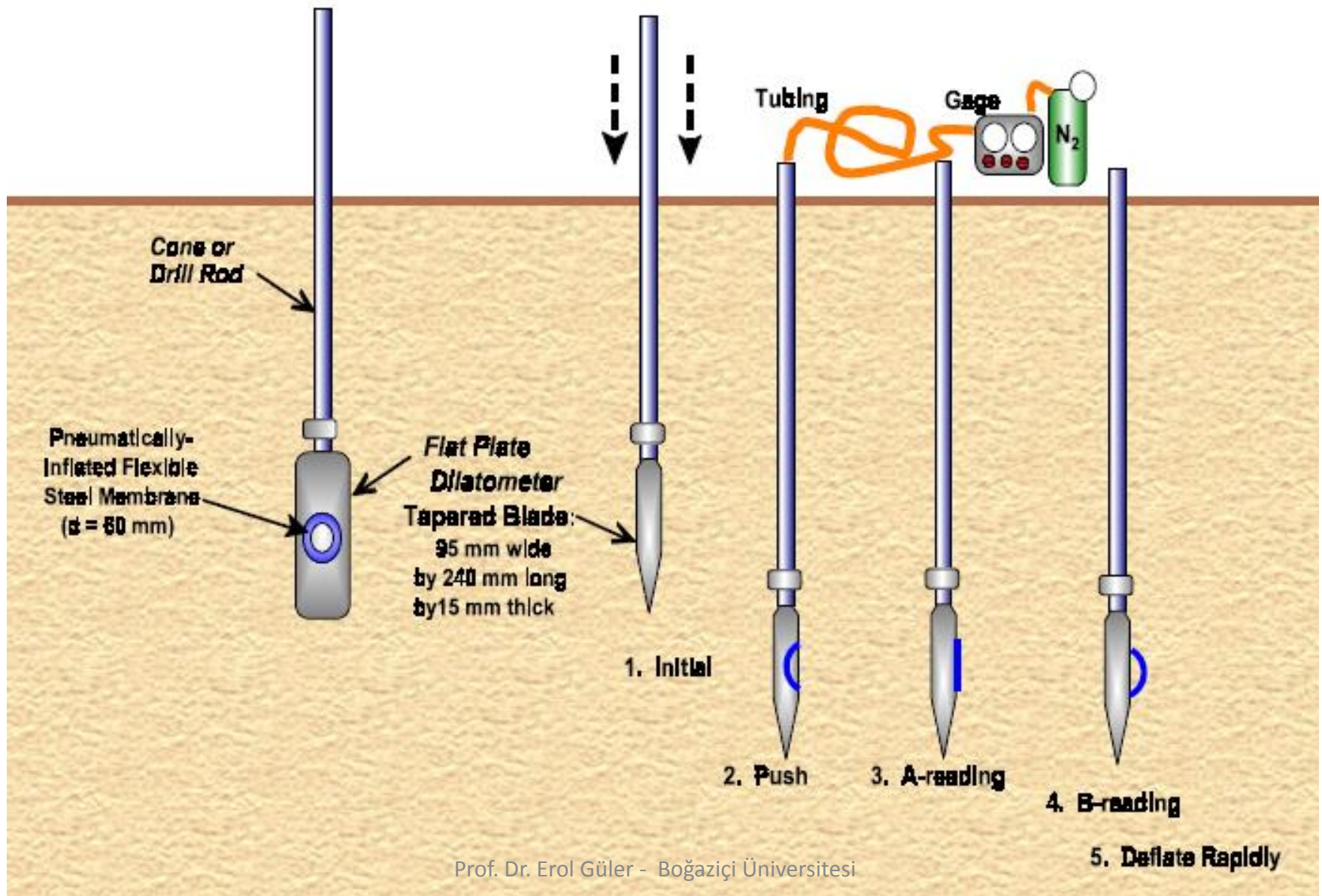




Birim kayma deformasyonu



# DILATOMETRE





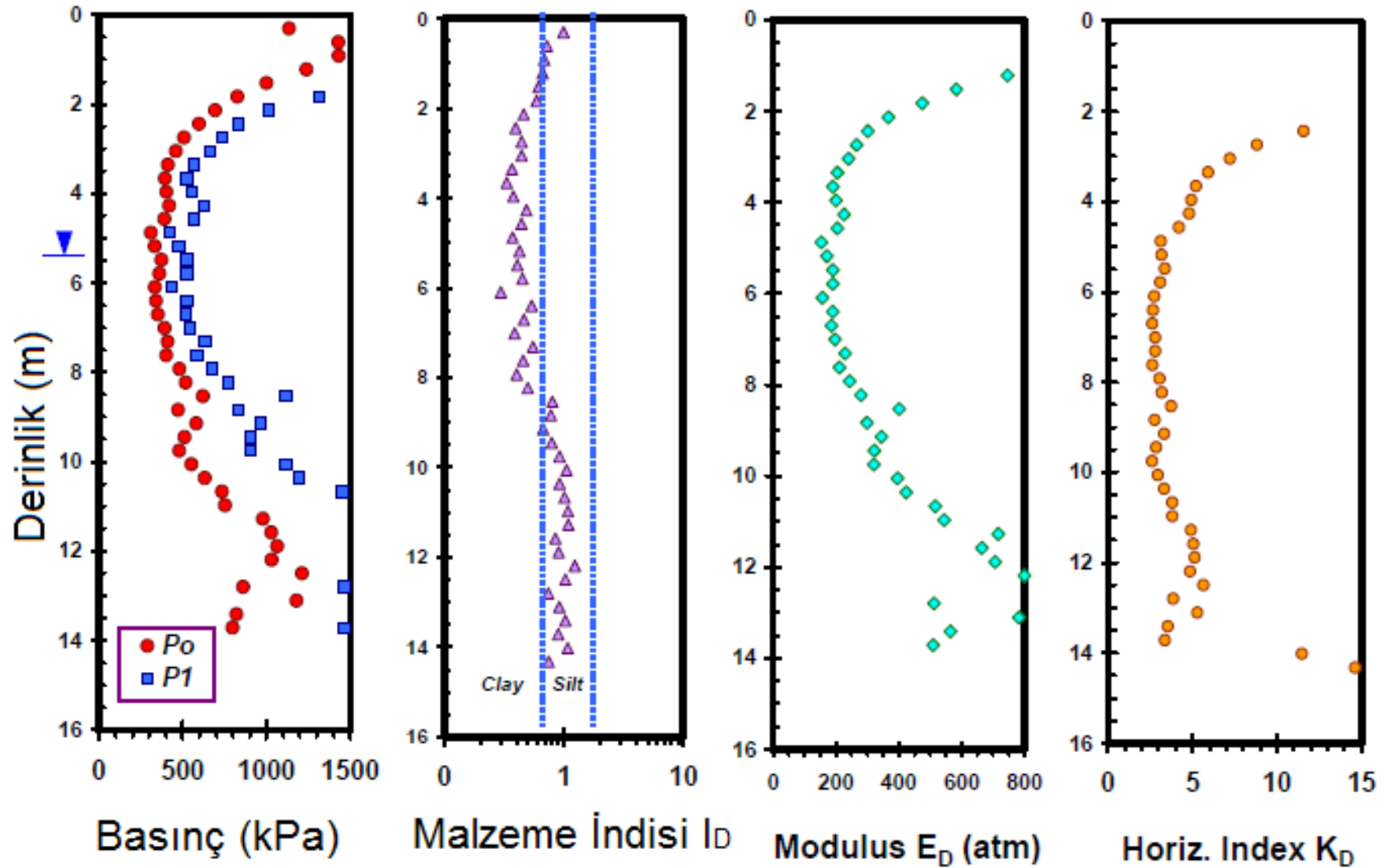
# DİLATOMETRE

## AVANTAJLARI

- Basit ve dayanıklı
- Tekrarlanabilir
- Operatörden bağımsız
- Çabuk ve ekonomik

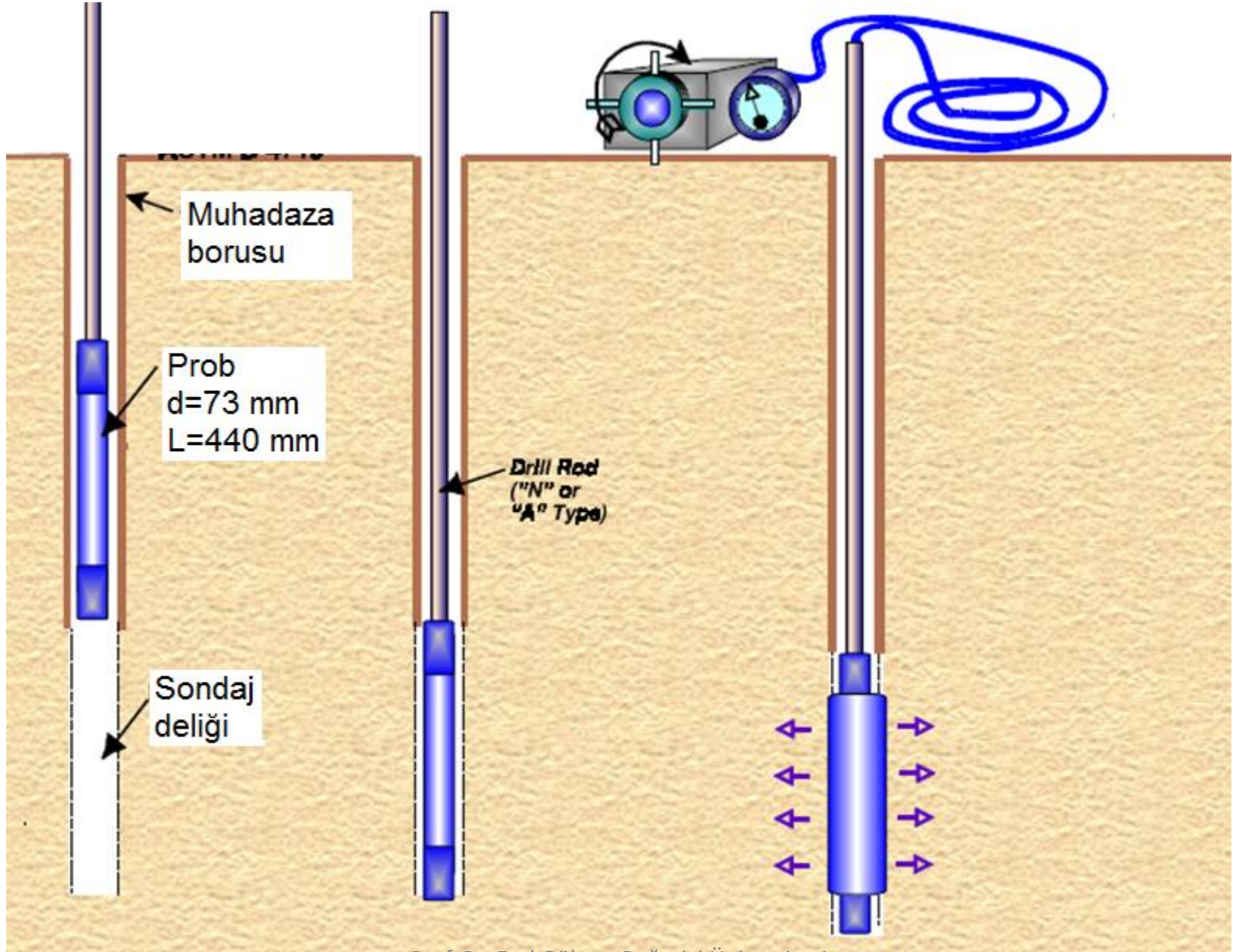
## DEZAVANTAJLARI

- Sıkı ve katı zeminlere penetrasyonu zor
- Yorumlanması için korelasyonlar gerekli
- Yerel jeolojik koşullar için kalibre edilmesi gerekir



$I_D < 0.6$  Kil;  $0.6 < I_D < 1.8$  Silt;  $I_D > 1.8$  Kum

# PRESYOMETRE



# PRESYOMETRE

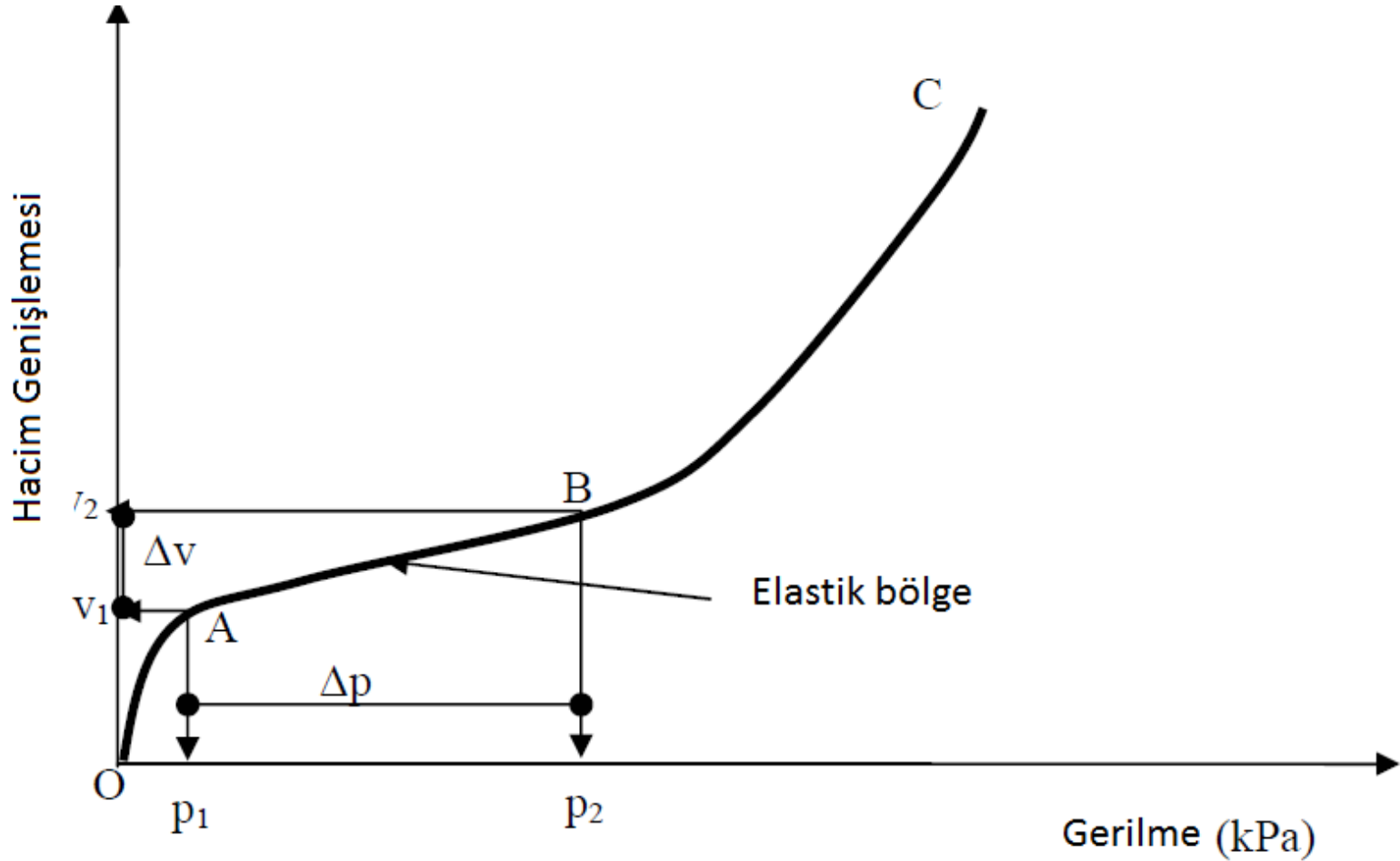
## AVANTAJLARI

- Teorik olarak en doğru şekilde zemin parametrelerinin belirlenmesini sağlar
- Diğer in-situ deneylere göre daha büyük bir alandan ölçü alır
- Tam bir gerilme - deformasyon eğrisi elde edilebilir

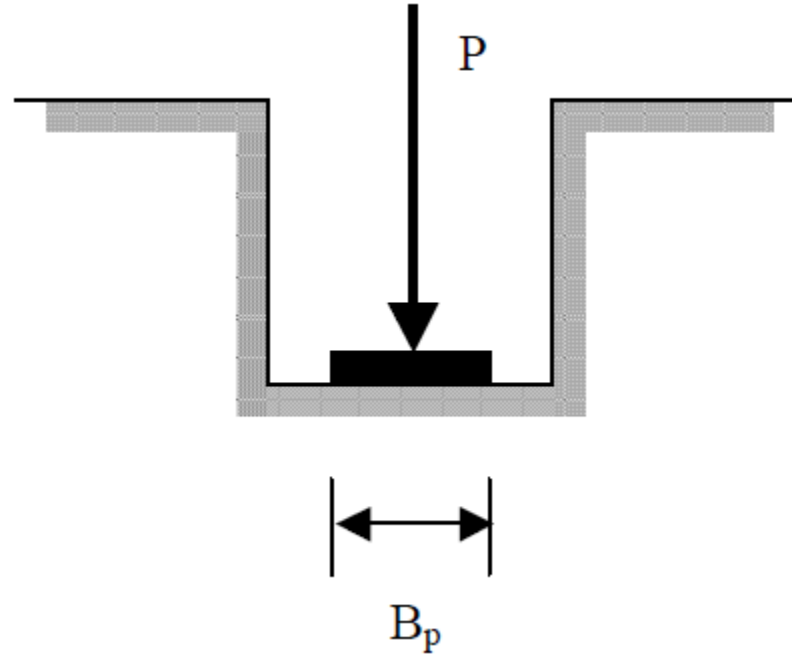
## DEZAVANTAJLARI

- Komplike bir sistemdir, uzmanlık gerektirir
- Zaman alıcıdır
- Hassas bir aparattır

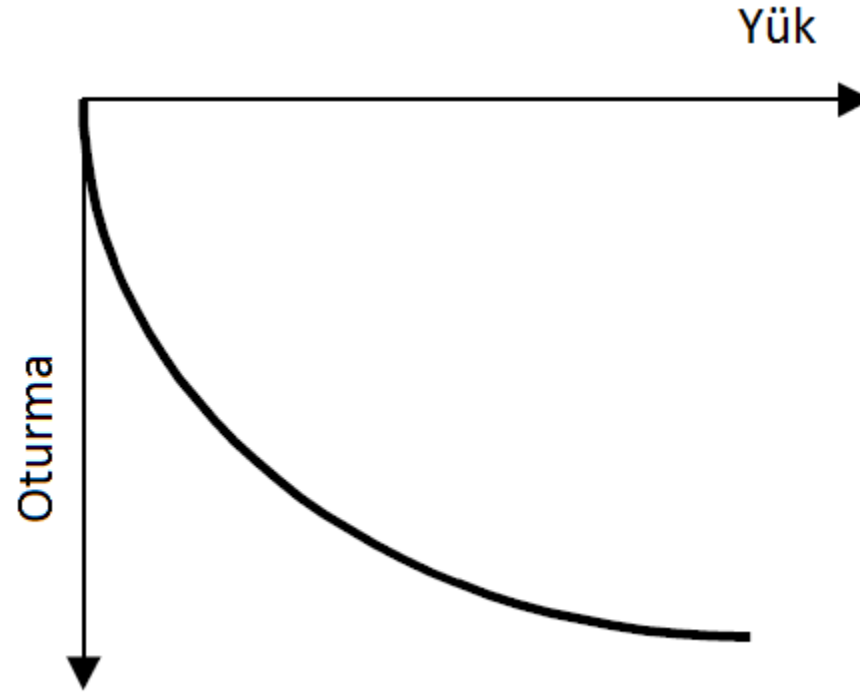
# Gerilme-deformasyon eğrisi



# Plaka Yükleme Deneyi



# Yük-Oturma Eğrisi



# Plaka Yükleme Deneyi

## AVANTAJLARI

- Yatak katsayısını fiziksel olarak belirleyen tek deneydir.
- Doğrudan taşıma gücü belirlenebilir
- Zeminin Elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılabilir
- Son derece basit bir deneydir.

## DEZAVANTAJLARI

- Sadece sığ bir derinlikteki zeminde gerilme yaratır
- Büyük boyuttaki gerçek temeller için parametreler belirlenirken dönüşüm çok dikkatli yapılmalıdır.



## Kayalarda arazi deneyleri

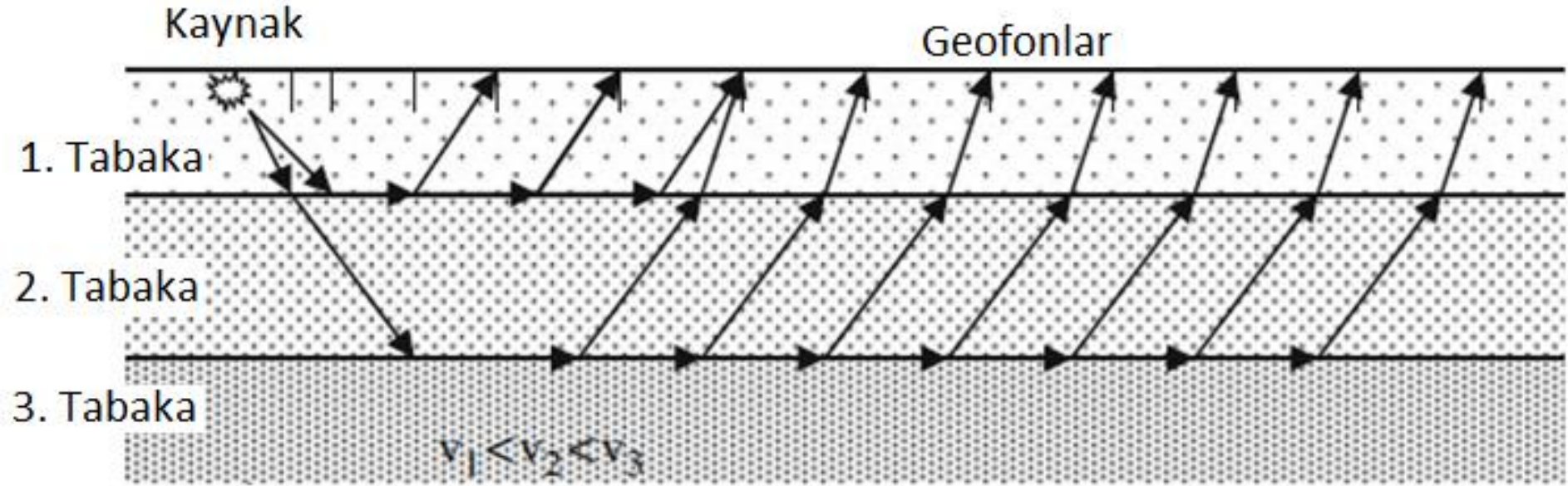
Yöntem	Yapılışı	Kaya Özellikleri	Sınılamalar / Açıklamalar
Kuyu Dilatometresi	Dilatometre deneyin yapılacağı seviyeye indirilir ve esnek lastik membran kuyunun duvarlarına uniform bir basınç etkiyecek şekilde şişirilir.	Çatlaklı kaya bloğunun modülü	Kayanın Poisson oranı tahmin edilmelidir; deney kaya bloğunun sadece küçük bir bölgesine uygulanabilir fakat diğer derinliklerde deney tekrarlanabilir.
Kuyu krikosu	Krikolar karşı karşıya iki çelik levha ile kuyunun duvarlarına tek yönlü basınç uygular.	Çatlaklı kaya bloğunun modülü	Ölçülen modül değeri sıklık ve çelik levhalar için düzeltilmelidir; deney yöntemi anizotropinin tahminini sağlayabilir.
Plaka yükleme deneyi	Çelik levhaya veya betonarme temele hidrolik krikolar ve kaya temele saplı tepki çerçevesi ile yük uygulanır.	Çatlaklı kaya bloğunun modülü	Yüklenen alan sınırlıdır dolayısıyla eğer birleşimler birbirine mesafeliyse kaya bloğu etkili bir şekilde test edilemez; modül değerleri plaka geometrisi, kaya kırılma etkisi, kaya anizotropisi ve çelik levha modülü için düzeltilir.
Arazi doğrudan kesme deneyi	Deney tipik olarak bir galeride (adit) uygulanır, böylece kesme (shear) yükü galeri duvarı yardımıyla etkilidir. Doğrusal yük bir kriko sistemi ile galeri tavanından destek alınarak uygulanır.	Süreksizliğin veya süreksizlik içeriğinin en yüksek ve rezidüel kayma mukavemeti	Süreksizlik yüzeyinin üzerindeki kaya bloğunun, içerik örselenmeden yalıtılması gerekir.

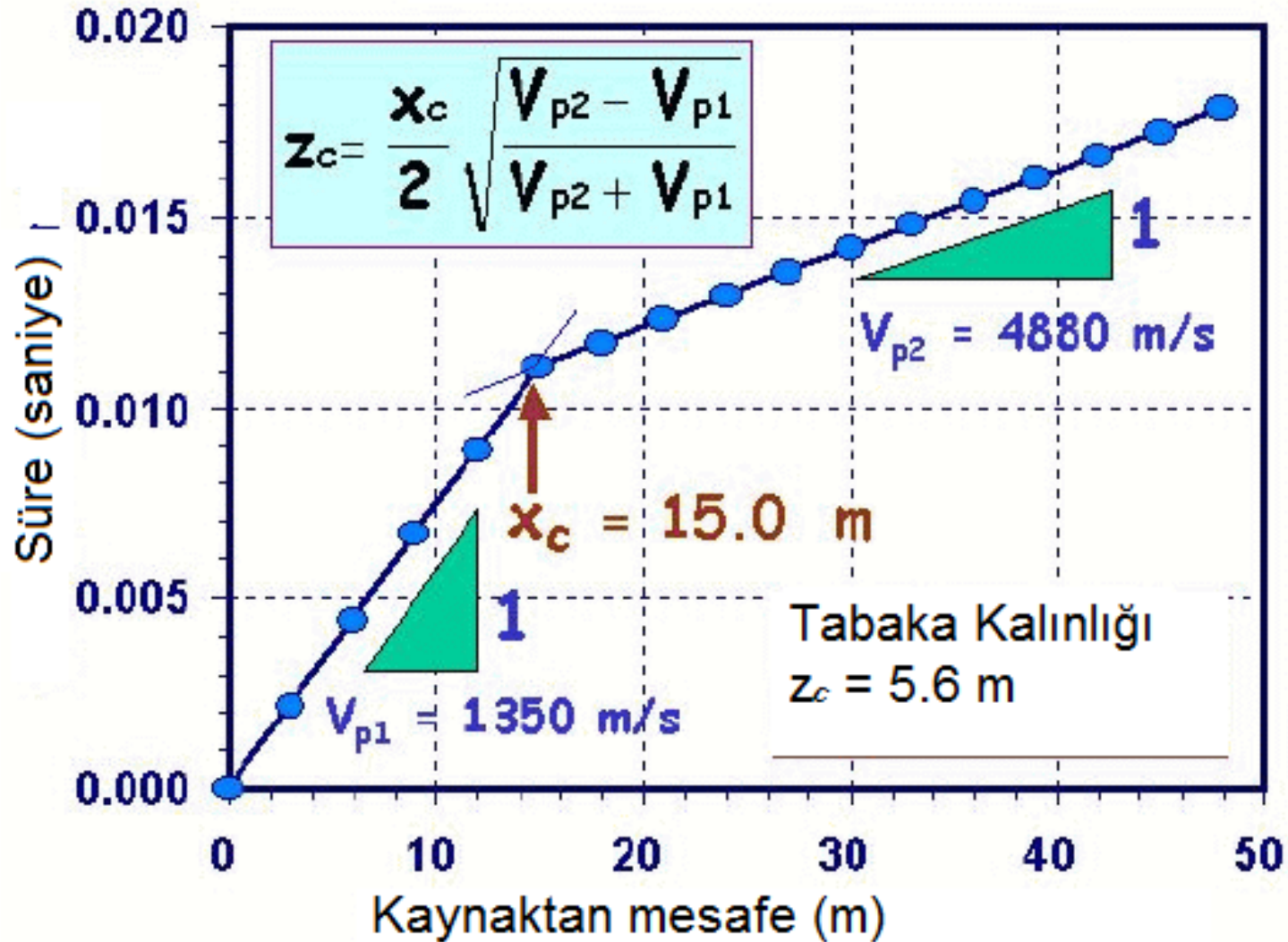
# JEOFİZİK ÖLÇÜMLER

## SİSMİK KIRILMA

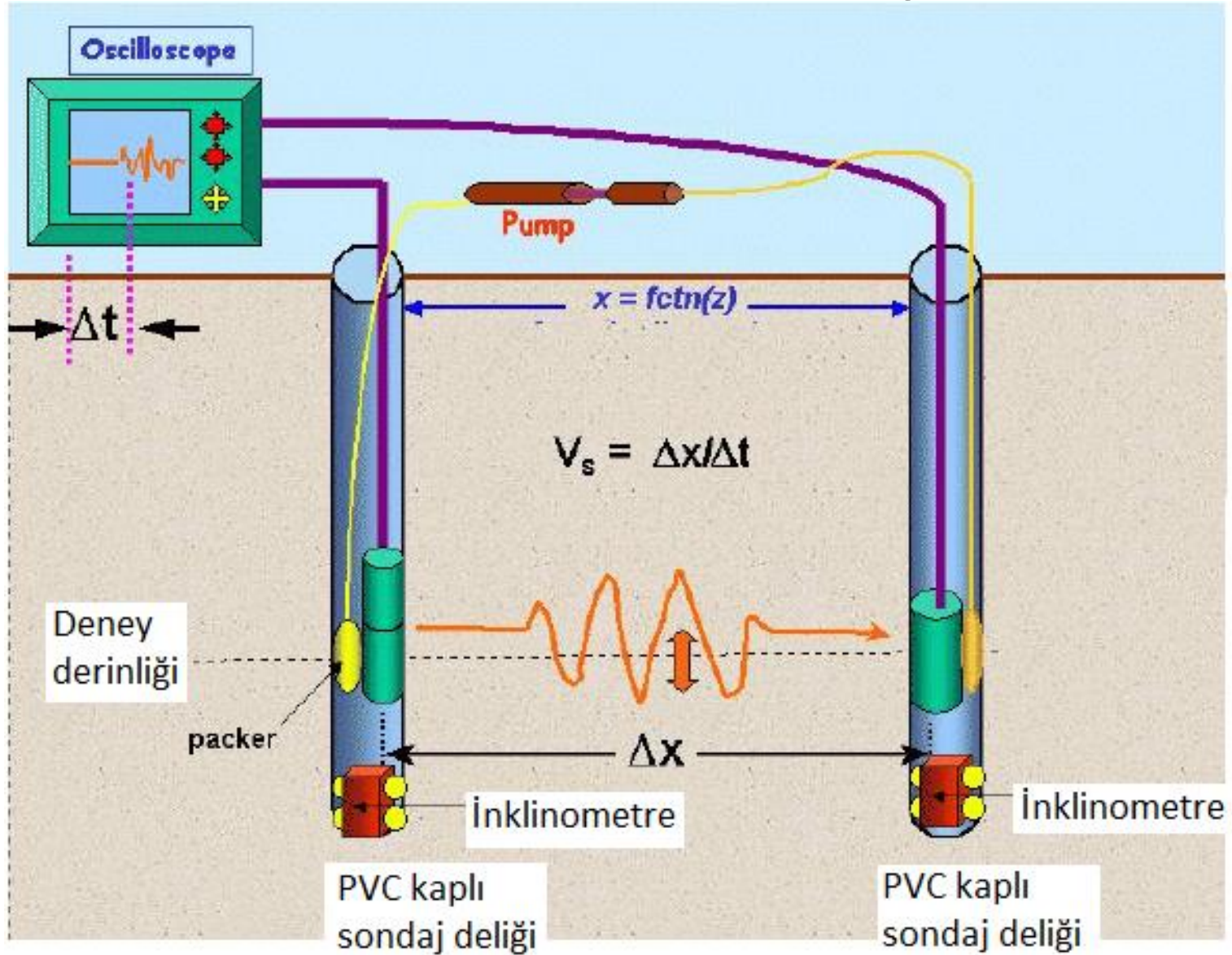
- Yöntem Standard bir yöntemdir. Tipik olarak 30 m derinliklere kadar bilgi verir, ancak bu derinlik 300 m'ye de varabilir. En fazla dört tabakaya kadar bilgi alınabilir.
- Temelde basınç dalgalarının yayılma hızının ölçülmesinde kullanılır. Ancak kayma dalgası hızları da ölçülebilir.
- Metot, kaynaktan çıkan titreşimlerinin belirli aralıklarla yüzeye yerleştirilen geofonlara ulaşma süresinin ölçülmesine dayanır.

# Sismik Kırılma



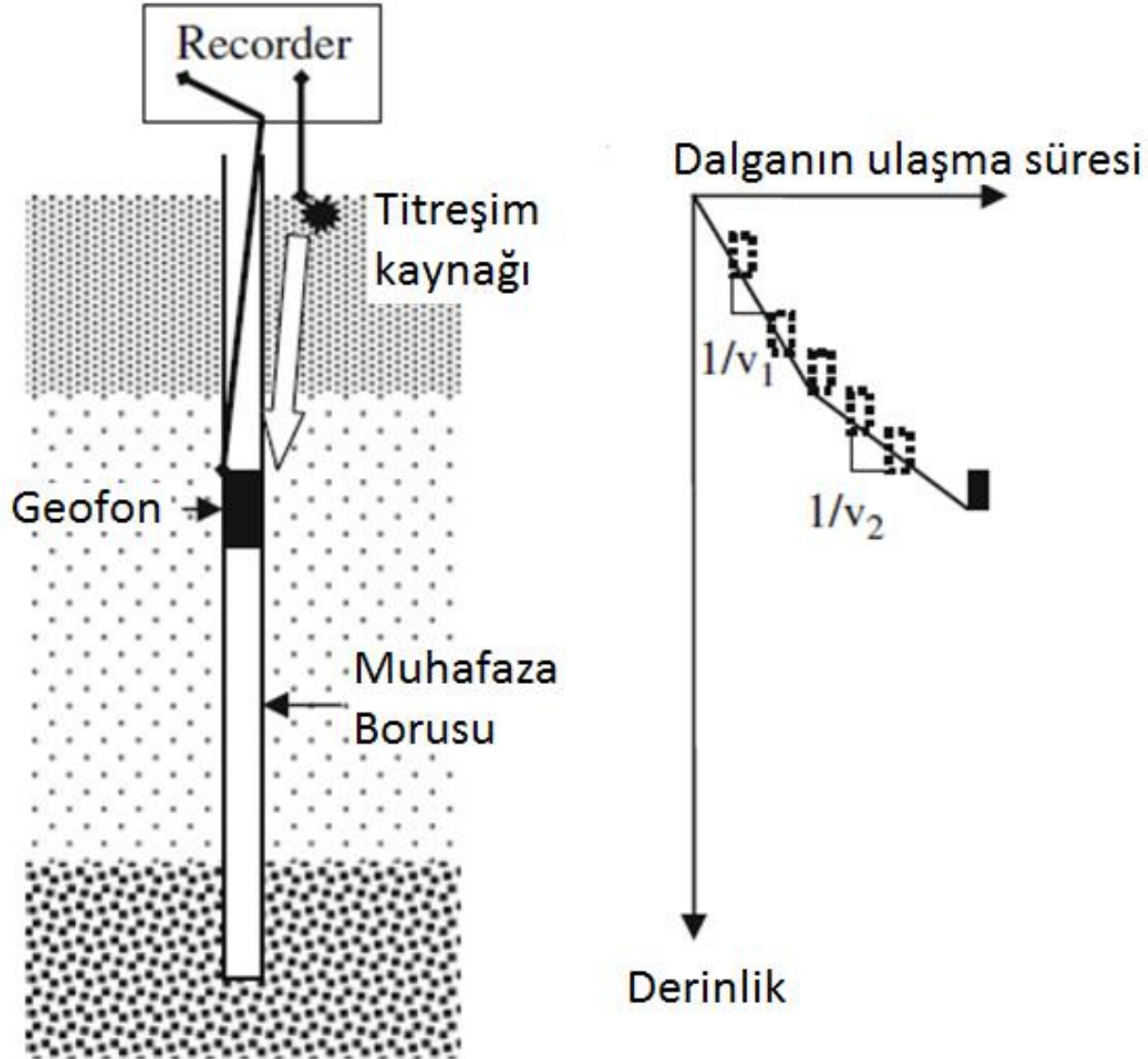


# Cross-Hole deneyi

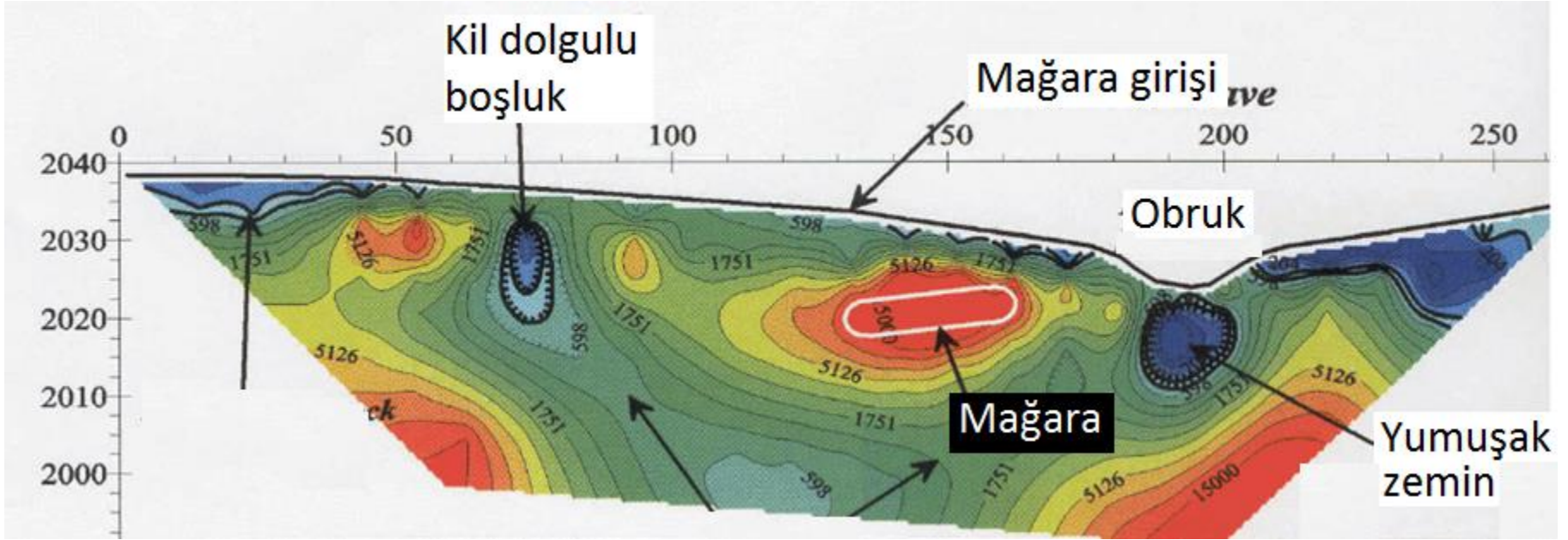




# Down-Hole Deneyi



# Rezistivite Yöntemi



# Saha Etütleri

- Sahada yapılan jeofizik etütler mutlaka sondaj verisi ile desteklenmelidir.
- Arazi deneylerine ilave olarak mutlaka laboratuvar deneyleri de yapılmalıdır, aksi takdirde büyük deformasyondaki davranışı belirlemek mümkün olmaz.
- Laboratuvar da çok küçük numuneler üzerinde ve sınırlı sayıda deney yapılması temsili güçleştirdiğinden yeteri sayıda deney yapılması gereklidir.



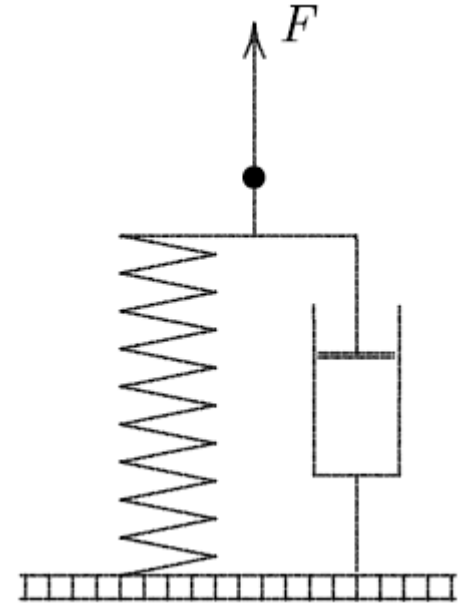
DEPREME YÖNELİK TASARIMLAR  
İÇİN GEREKLİ GEOTEKNİK  
PARAMETRELER

# Bir Yay ile Yağ Kutusu tarafından Taşınan Bir Kütle

Newton'un ikinci kanunu kütle ile hareket arasındaki ilişikiyi şöyle verir:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = P(t)$$

Burada  $P(t)$  toplam kuvvet,  $u$  ise deplasmandır.



$P$  nin bileşenleri, dış kuvvet  $F(t)$ , ve yay ve yağ kutusundaki kuvvetlerdir. O zaman:

$$P(t) = F(t) - ku - c \frac{du}{dt}$$

# Bu durumda hareket denklemi:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = F(t)$$

Eğer dış kuvvet sıfır ise:  $F(t) = 0$ , *bu durumda sistem serbest titreşen bir sistem olur.* O zaman:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = 0.$$

Yukarıdaki denklemde rezonans frekansı:

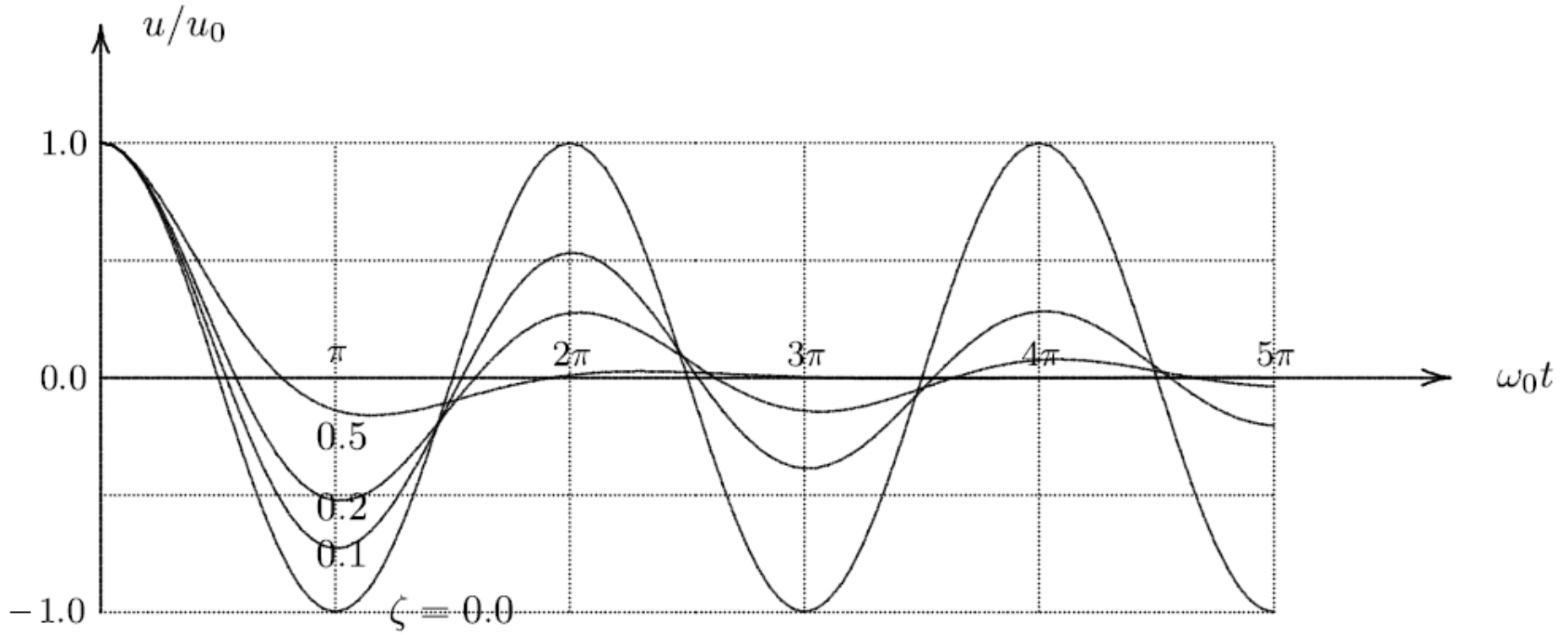
$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

ve viskoz sönümlenme oranı:

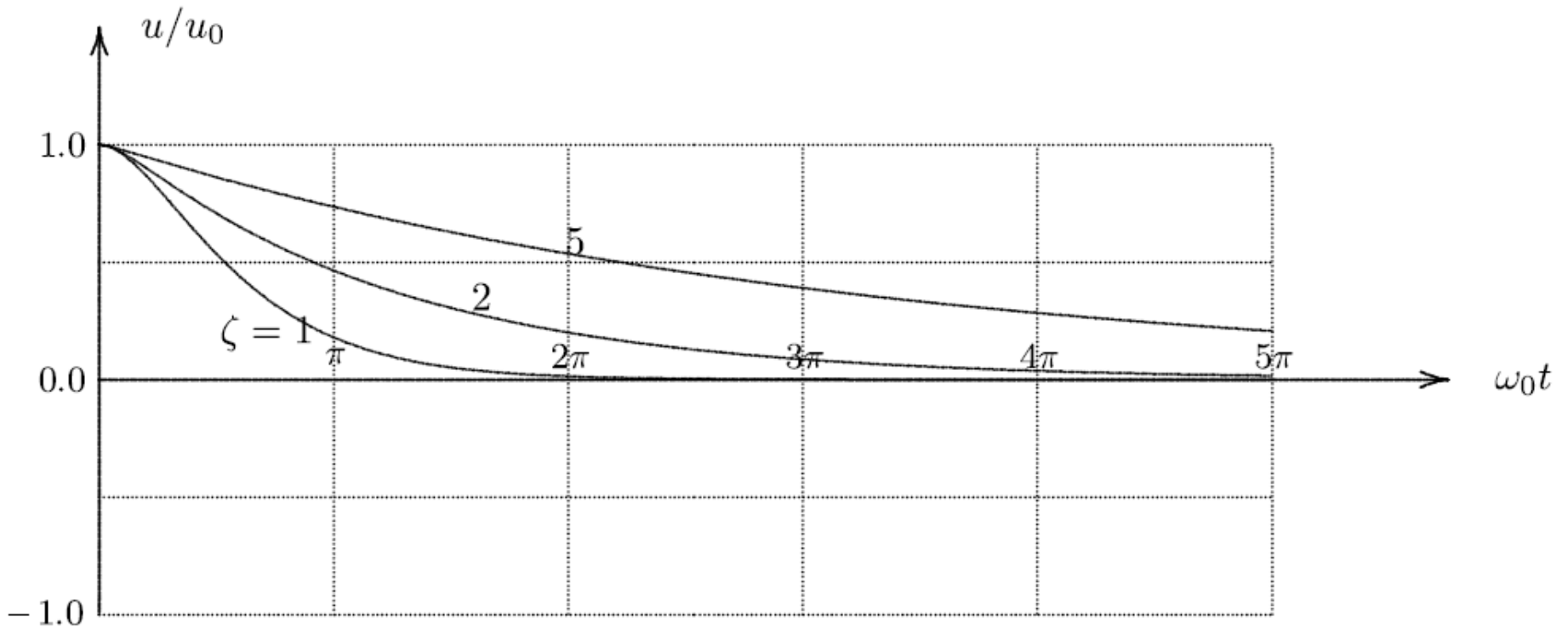
$$2\zeta = \frac{c}{m\omega_0} = \frac{c}{\sqrt{km}}$$

olarak hesaplanır

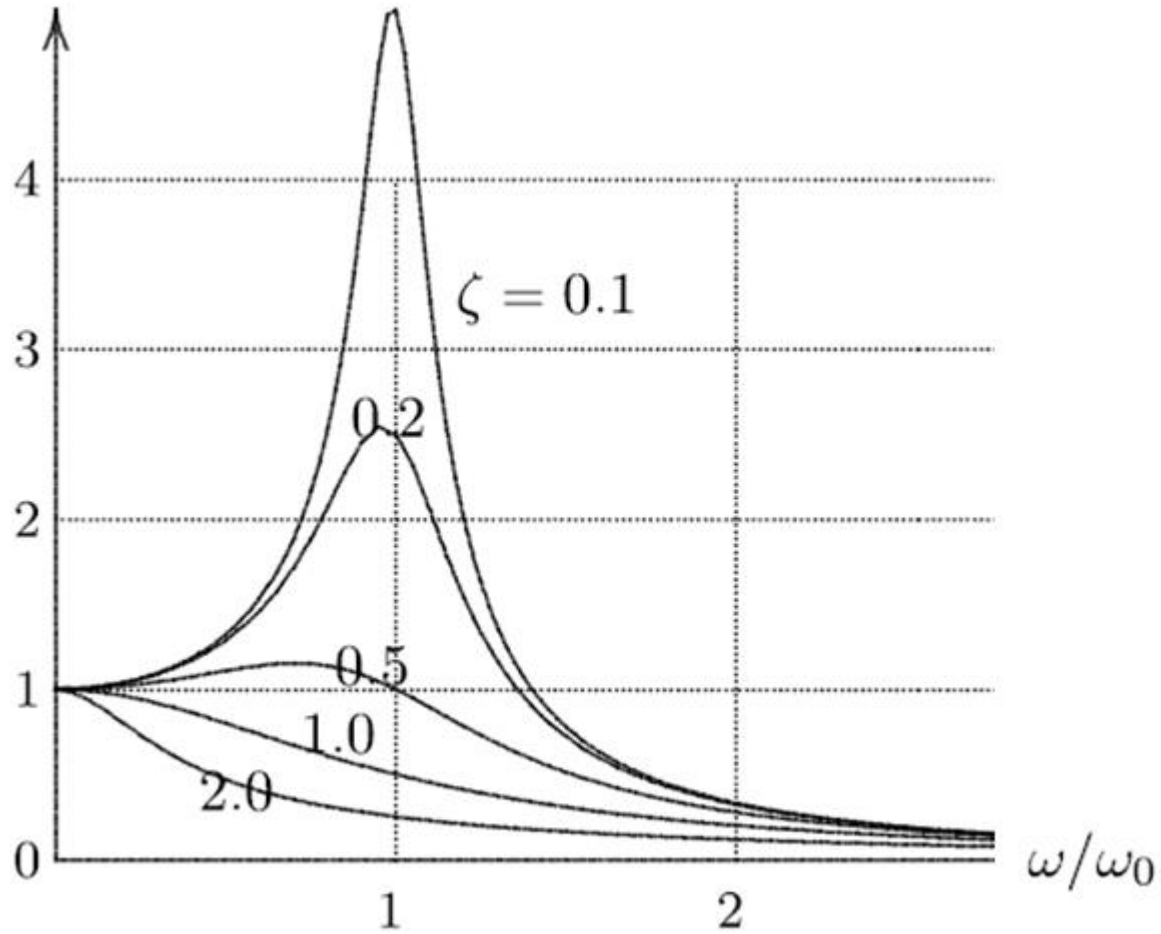
# $\xi < 1$ durumunda çözüm



# $\xi \geq 1$ durumunda çözüm



$$2\zeta = \frac{c}{\sqrt{km}}$$



Rezonansın meydana gelmesi için;

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{k/m}$$

Bu zeminin doğal frekansdır

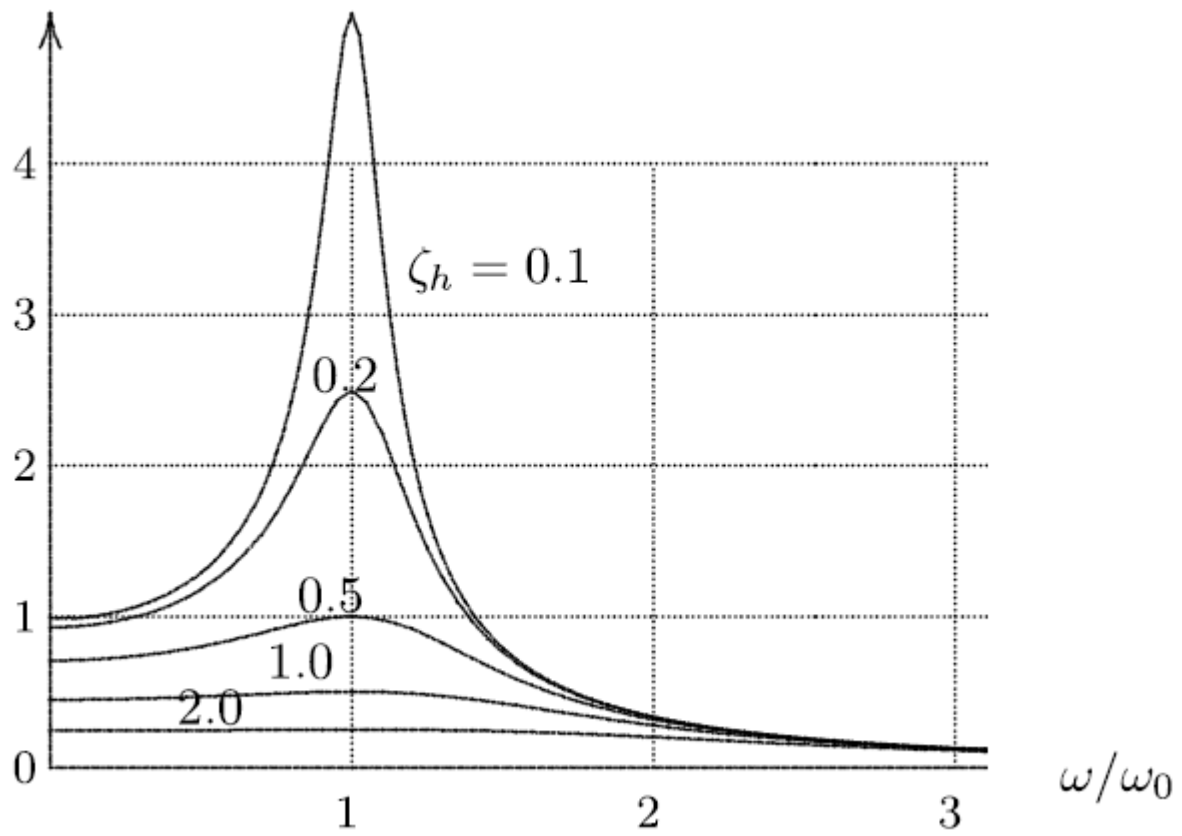
# Histeretik Sönümlenme

Zeminlerdeki sönümlenme sadece viskoz bir sönümlenme değildir. Sönümlenmenin önemli bir kısmı mekanik sürtünmeden kaynaklanır. Bu durumu da histeretik sönümlenme daha doğru temsil eder.

Bunun esas sebebi zeminde geri dönmeyen (plastik) deformasyonlar meydana gelmesidir. Bu tip plastik deformasyon da tekrarlı yükün frekansından bağımsızdır. Bu durumda sönümlenme katsayısı  $\zeta_h$  *viskositeden bağımsız olarak ifade edilir:*

$$2\zeta_h = \frac{c\omega}{k}$$





Yukarıdaki grafikte titreşimin amplitüdünü yine frekansın ve histeretik sönümlenme katsayısı  $\zeta_h$  in bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Davranış viskoz sönümlenmeye benzese de özellikle düşük frekanslarda önemli farklar vardır. Ayrıca bu sistemde sistem özelliğini özellikle yüksek frekanslarda kütle daha fazla belirlemektedir.

# Zeminlerin Statik Kayma Dayanımı

**Kum zeminlerde statik içsel sürtünme açısı:**

$$\phi_1 = 30 + \frac{10}{35} \cdot (N - 10) \quad \text{or} \quad \phi_1 \approx \arctan \left( \frac{N}{12.2 + 20.3 \cdot \frac{\sigma'_v}{100}} \right)^{0.34}$$

Peck et al. (1974) Kulhawy and Mayne (1990)

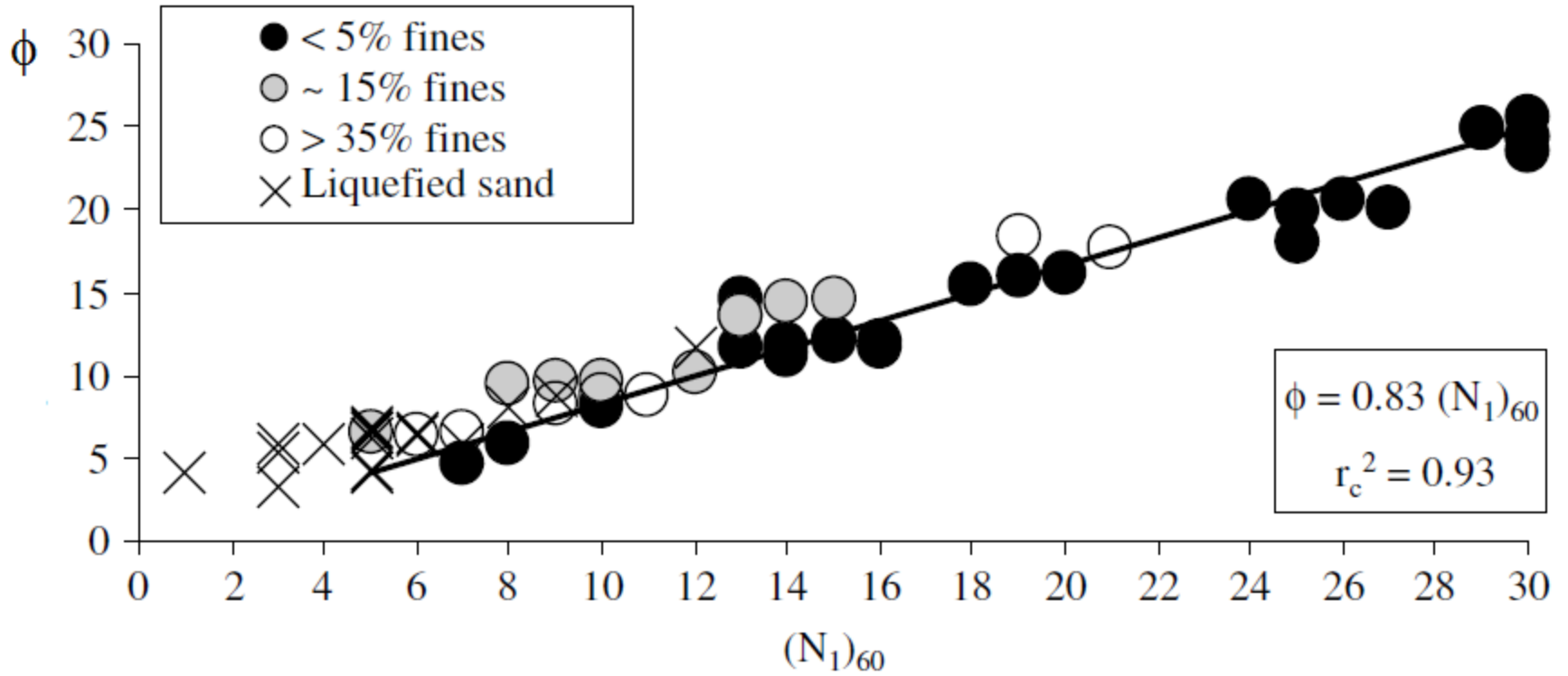
**Normal konsolide killer için:**

$$\phi_1 = \arcsin \left[ 0.6 - \frac{0.25}{90} \cdot (PI - 10) \right] \quad \text{Kenney (1959)}$$

or

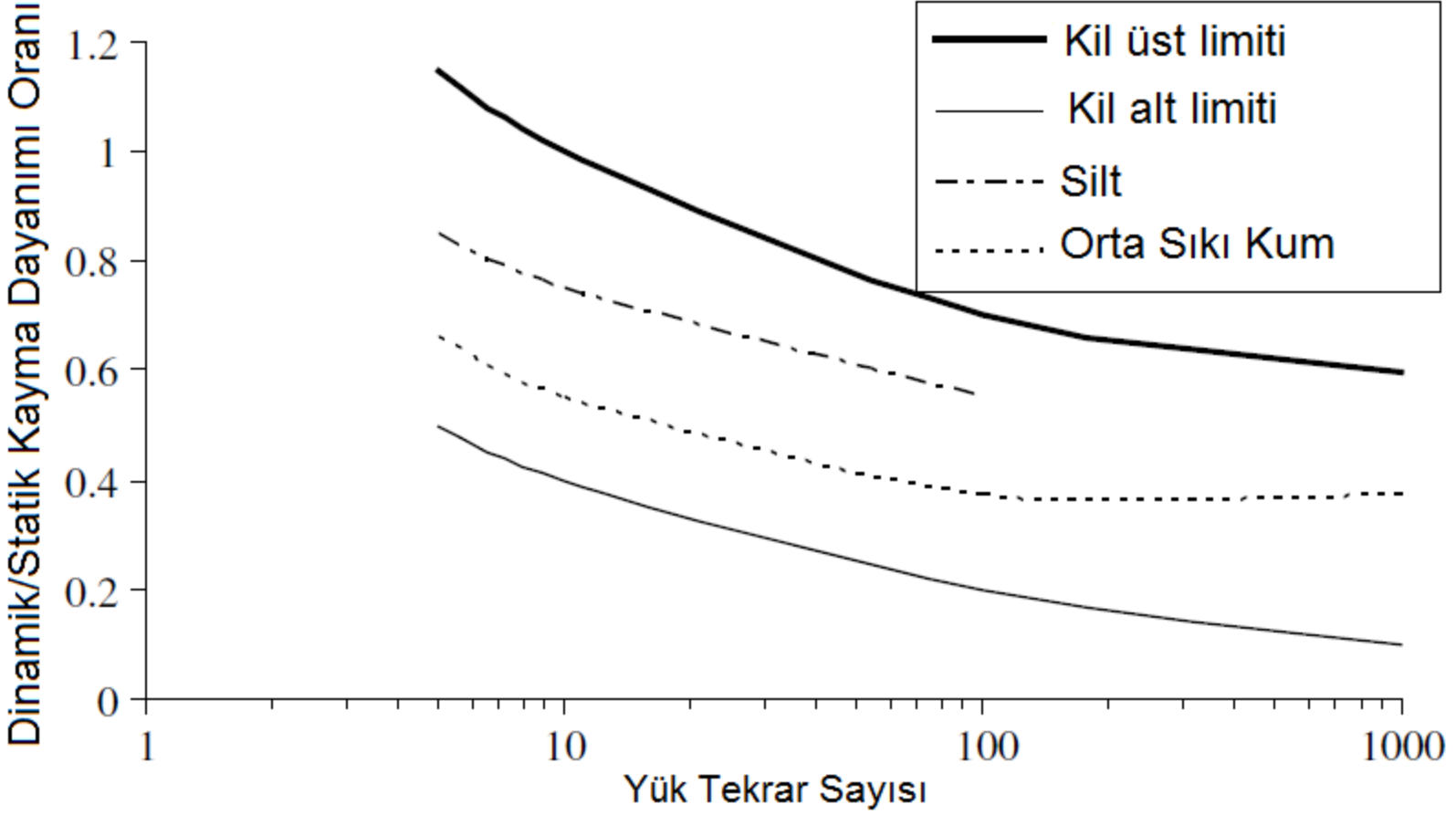
$$\frac{c_{u1}}{\sigma'_v} = 0.11 + 0.0037 \cdot PI \quad \text{Skempton (1957)}$$

# Kumlarda Dinamik İçsel Sürtünme Açısı



(Srbulov, 2005)

# Killerde Dinamik Kayma Gerilmesi Dayanımı



(Srbulov, 2005)

# Kayma Modülü

## Kum – Küçük Ampitüdümlü deformasyonlarda

Maksimum Kayma Modülü,  $G = G_{max}$ , tipik olarak  $10^{-6}$  (=0.0001%) veya daha düşük birim deformasyonda ölçülür ve temel zemin parametrelerinden birisidir.

Bu değer doğrudan jeofizik ölçümlerde elde edilen kayma dalgası hızından ( $V_s$ ) elde edilir:

$$G = v_s^2 * \rho$$

Bazı ampirik formüller de kullanılabilir, ancak bu sadece ön tasarım için kullanılmalıdır;

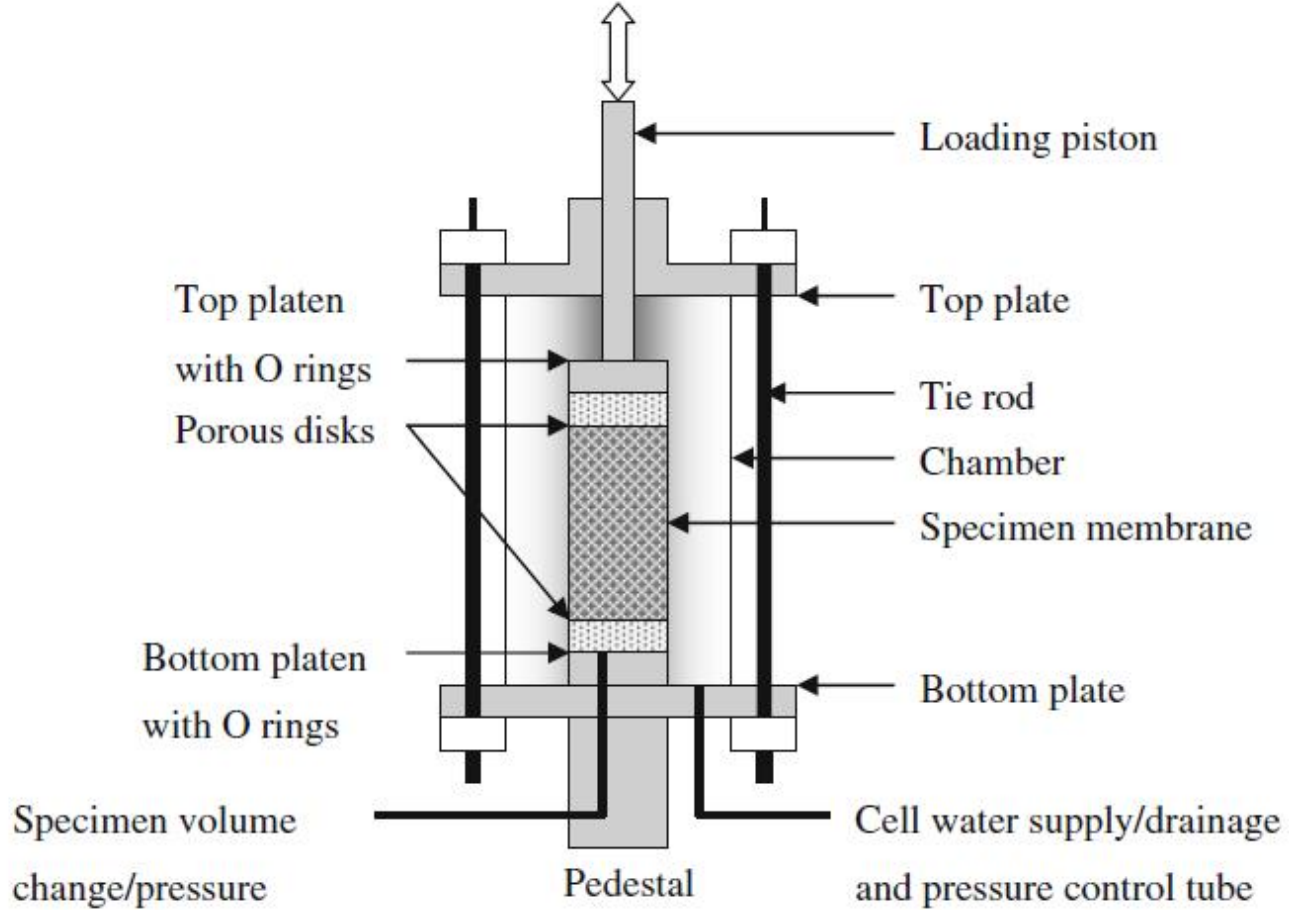
$$G_{max} = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (P')^{0.5} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ (for round sand)}$$

$$G_{max} = 330 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (P')^{0.5} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ (for angular sand)}$$

# Laboratuvar Deneyleri

- Direkt Kesme
- Üç Eksenli
- Basit Kesme
- Rezonans Kolon

# DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYİ

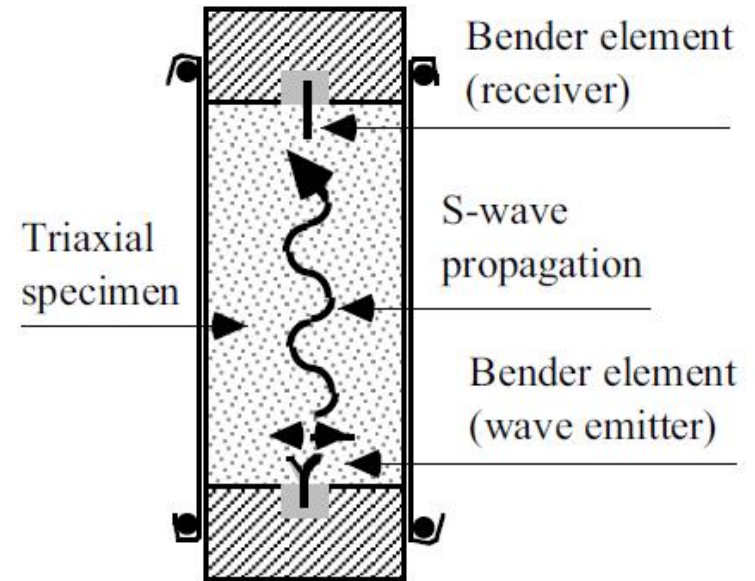
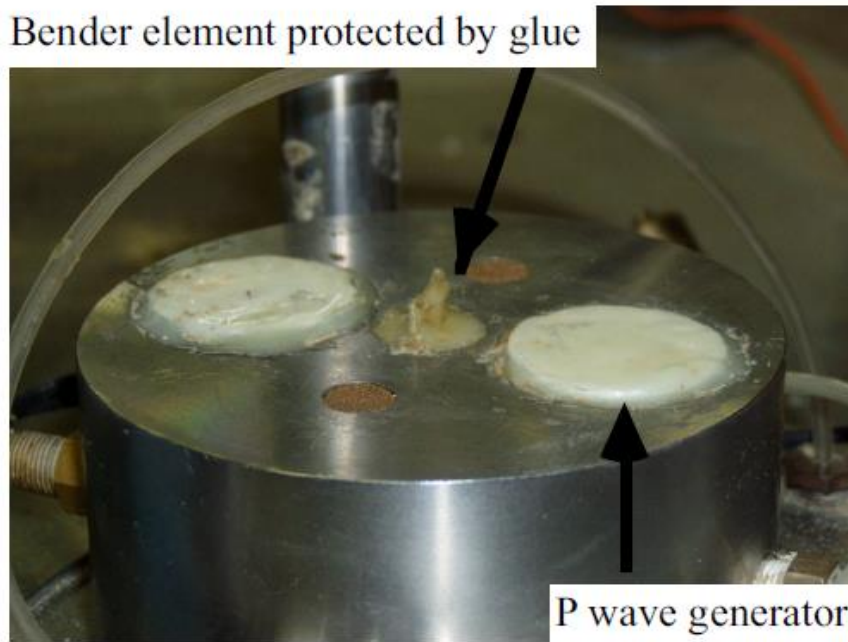


# DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYİ

- Dinamik üç eksenli deneyi standart bir deneydir. Ya sabit bir yükün tekrarlı olarak uygulanması (yük kontrollü deney) veya sabit bir deformasyonun tekrarlı olarak uygulanması (deformasyon kontrollü deney) olarak gerçekleştirilir. Yükseklik, çap oranı en az 2 olmalıdır. Bu numunedeki gerilme dağılışının üniform olmasını sağlar.
- Genelde 0.5% birim deformasyonlara kadar tekrarlı yük uygulanmakla birlikte, yumuşak kil ve gevşek kuumlarda numunede fıçılanma ve katı kil ve sıkı kuumlarda belirgin bir kayma yüzeyinin oluşması ile numune içinde homojen olarak dağılmayan bir deformasyon oluşur. Bazı durumlarda özellikle de küçük birim deformasyonlarda lokal birim deformasyonlar ölçülmeye çalışılsa da bu standart bir ölçüm sistemi değildir..

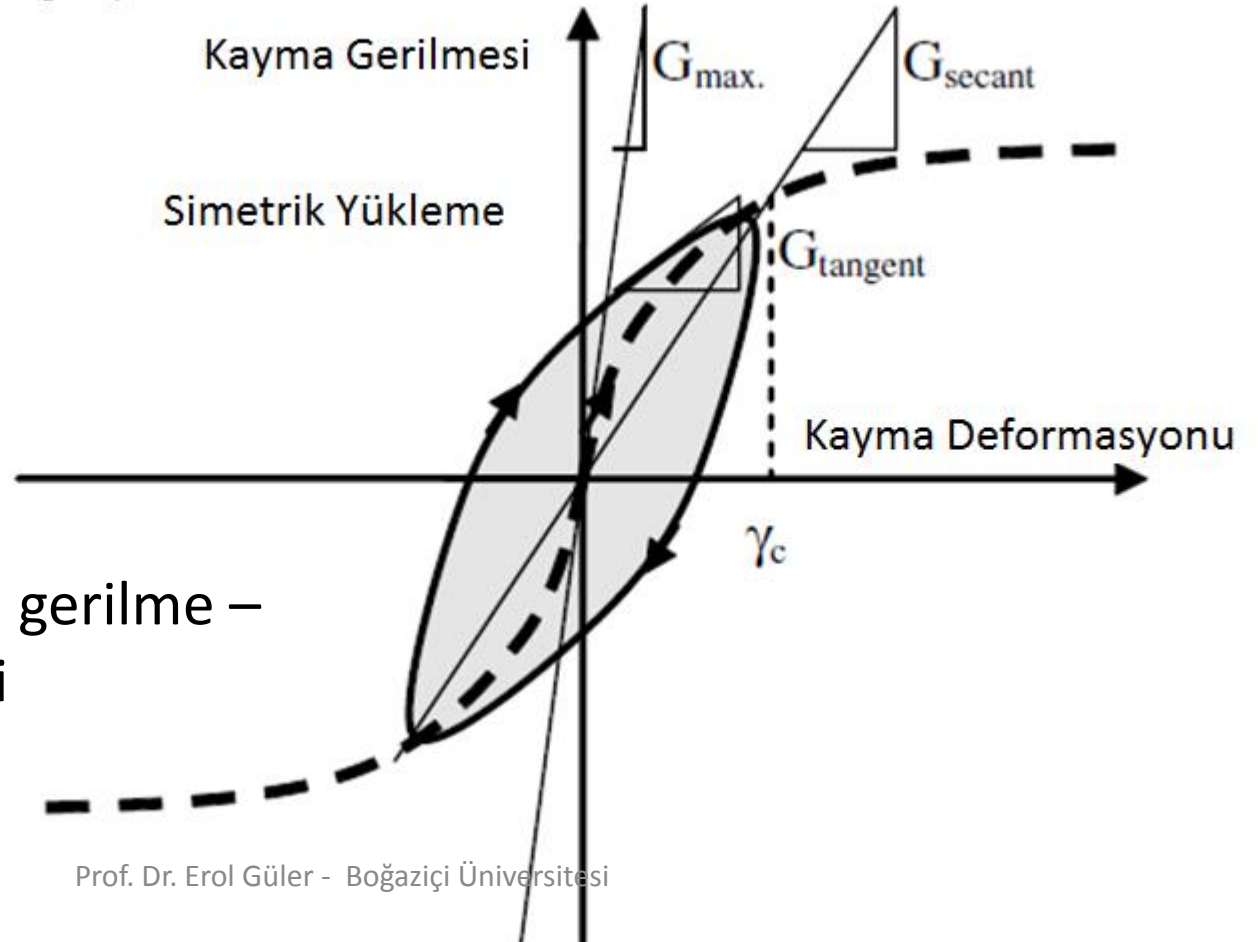
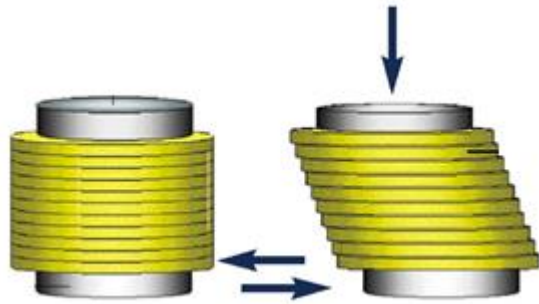
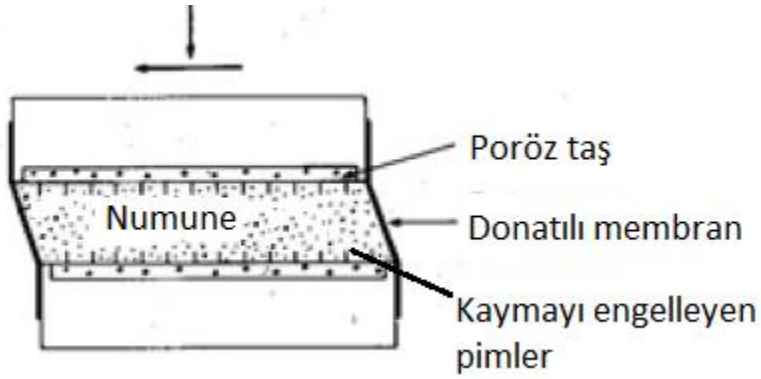


# Üç Eksenli Numunesi Üzerinde Kayma ve Basınç Dalgası Hızlarının Ölçülmesi



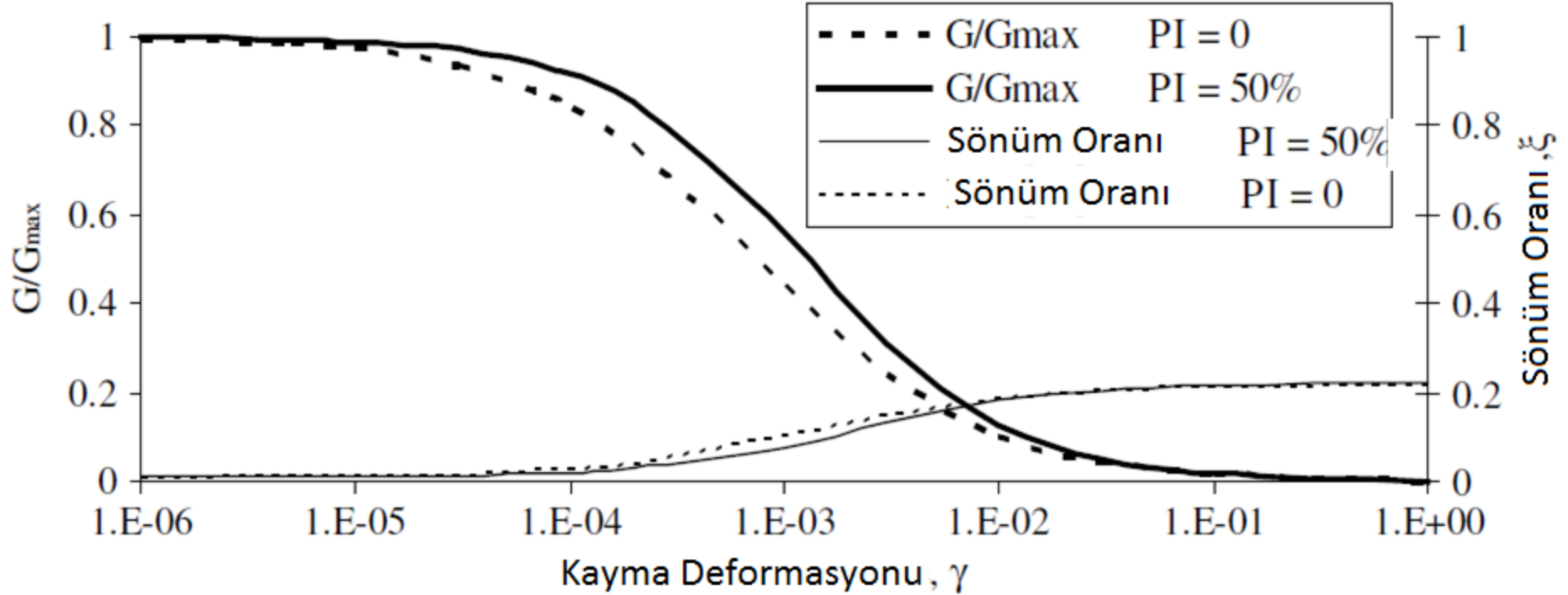
$$V_s = \frac{\text{Travel distance}}{\text{Travel time}}$$

# BASİT KESME DENEYİ



Tekrarlı yük altında gerilme –  
deformasyon eğrisi

# G ve Sönümlenmenin kayma deformasyonu ile değişimi

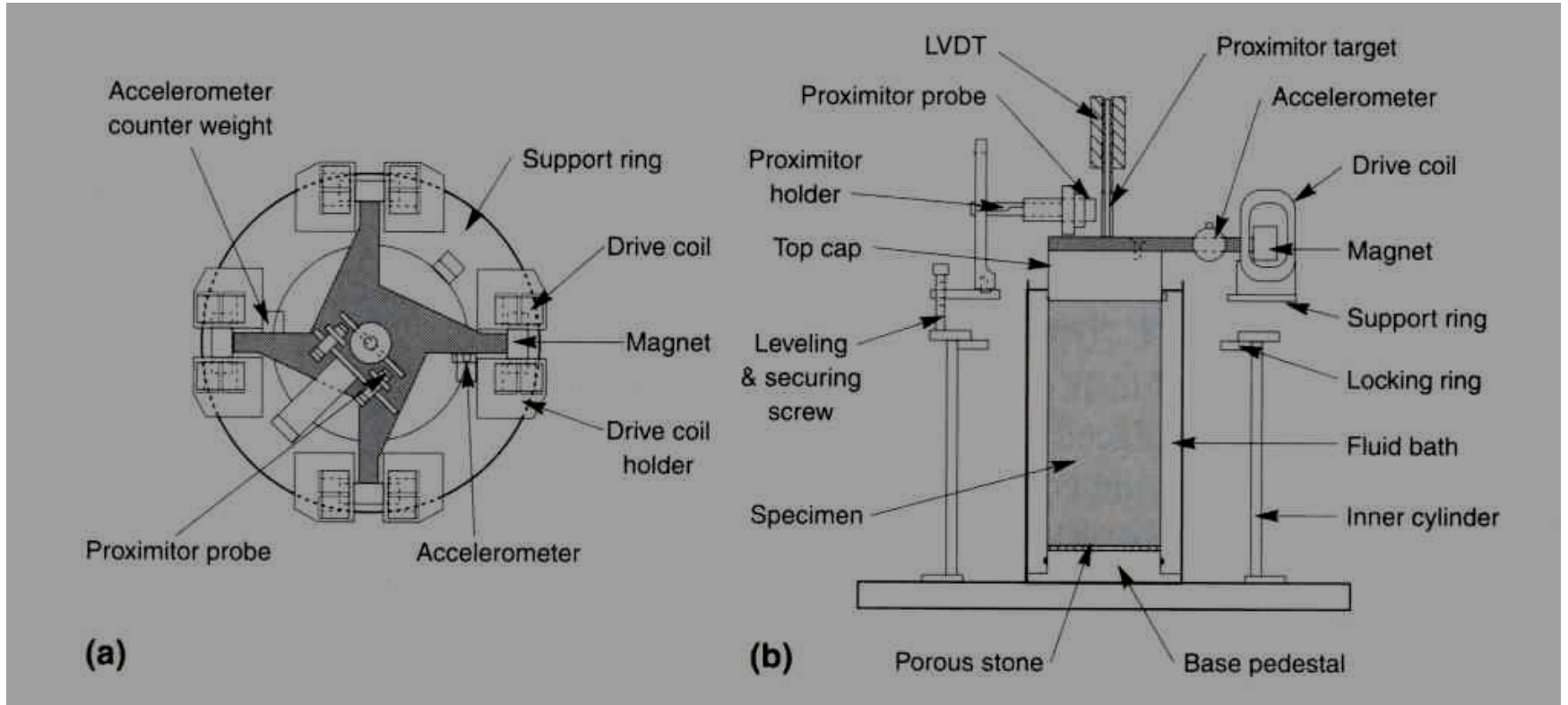


# REZONANS KOLON

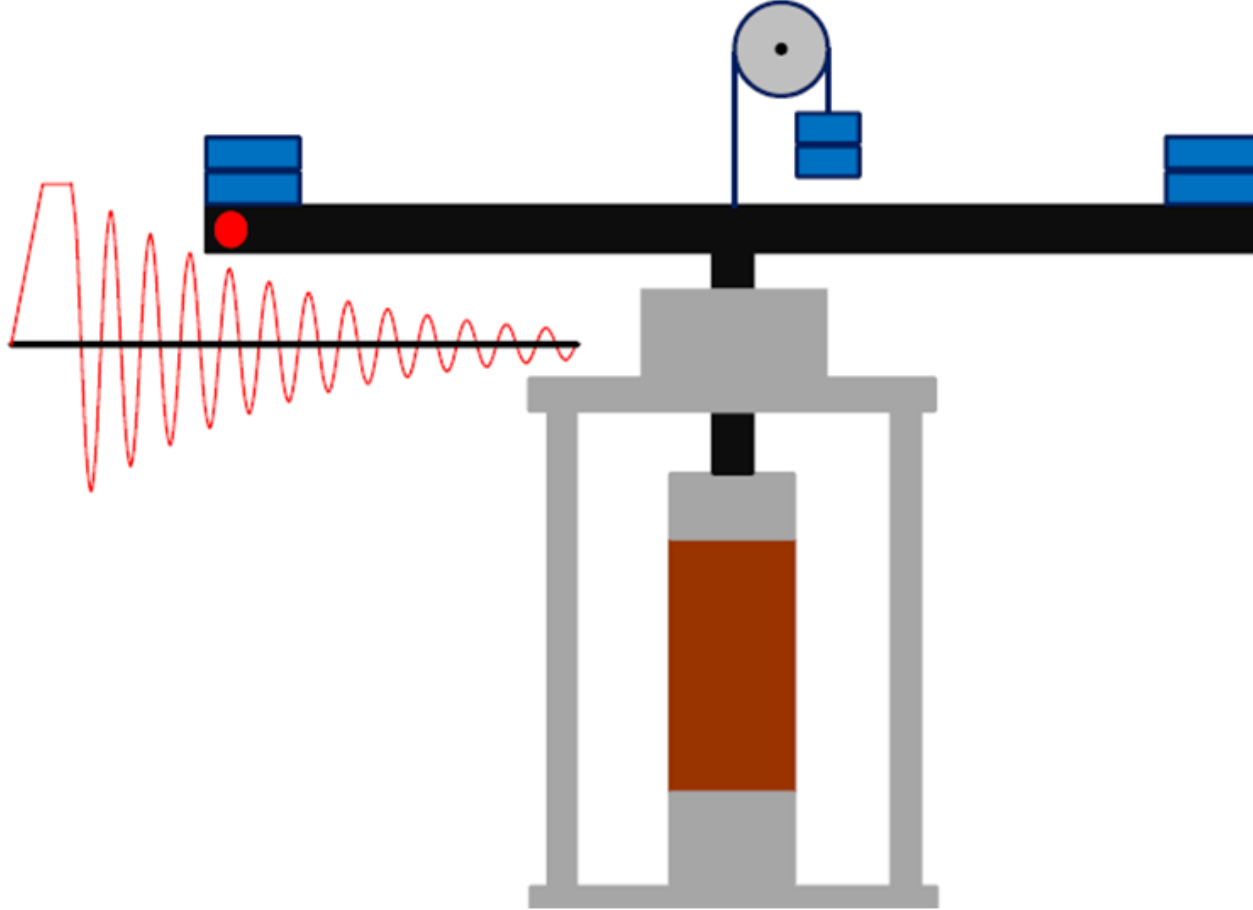
$10^{-6}$ – $10^{-2}$  (0.0001%–1%) mertebelerindeki birim deformasyonlar için laboratuvar ortamında Kayma Modülü ve sönümlenmenin ölçülmesi için en uygun deney düzeneği rezonans kolon deneyidir.  $G / G_{max}$  ve  $\xi$  değerleri bu yöntemle belirlenebilir.

# Rezonans Kolon Deneyi

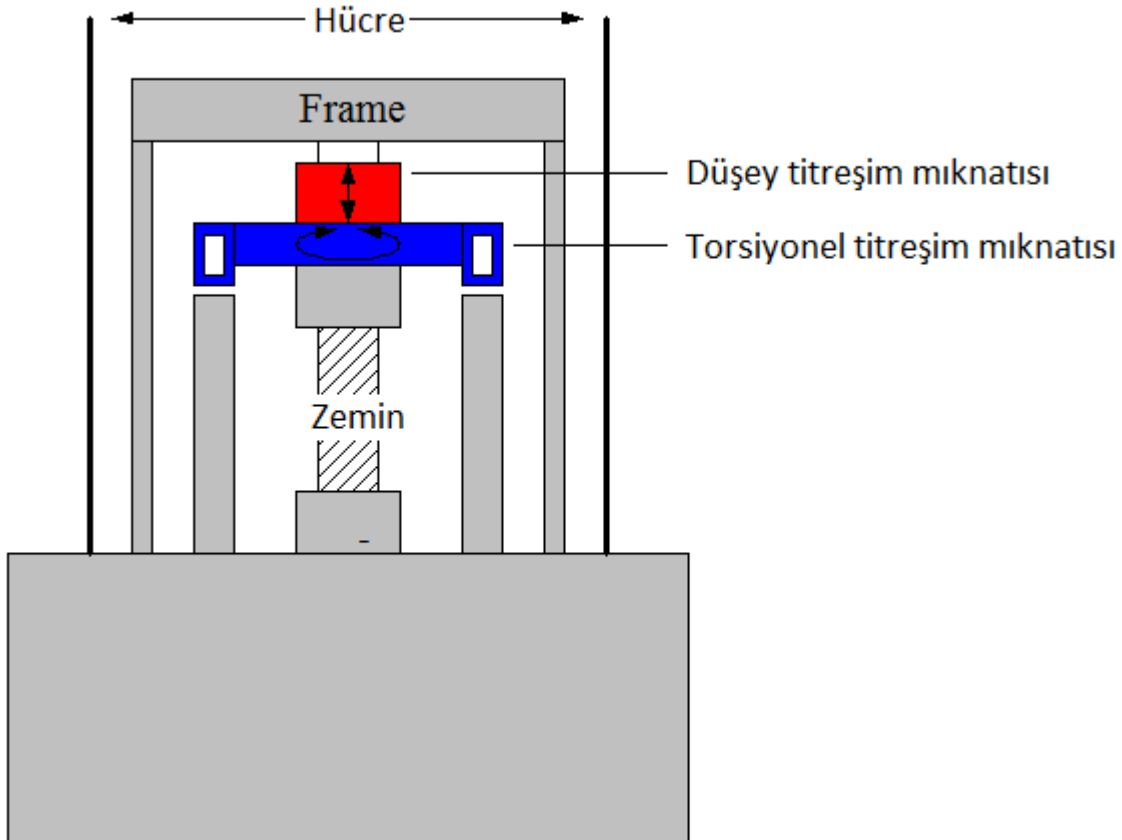
- Silindirik zemin numunesine elektromıknatıslar yardımı ile bir tork uygulanır. Bu torkun amplitüd ve frekansı ayarlanabilir



# Serbest Titreşimli Rezonans Kolon



- **Resonans Kolon Deneyi**
- Drnevich düşey/torsiyonel salınım aparatı





# NGI TİPİ TEZONANS KOLON APARATI

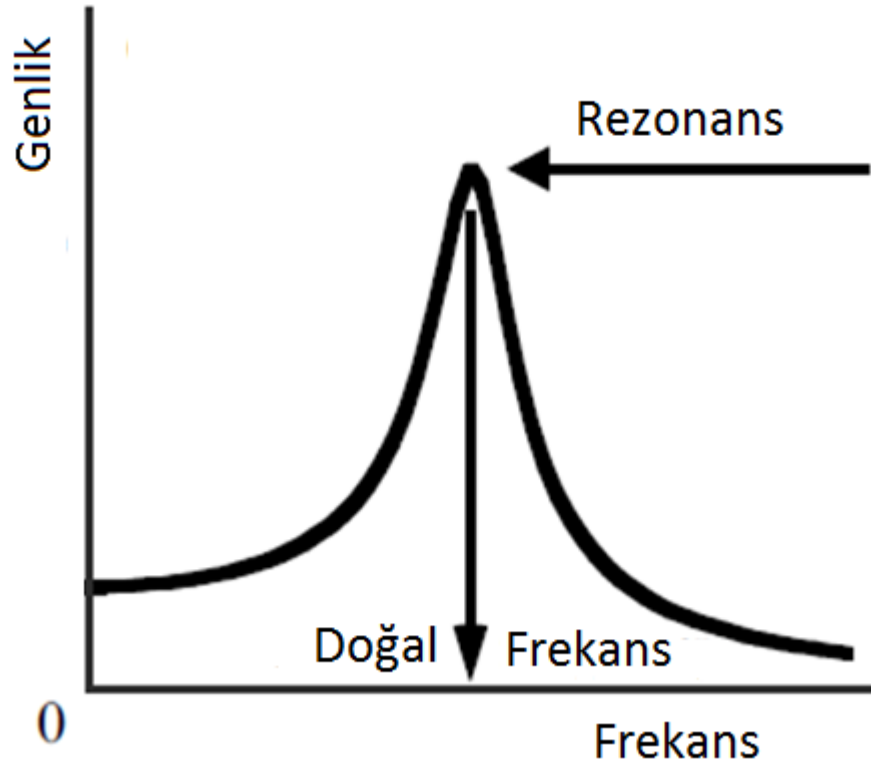




- **Resonans Kolon Deneyi**
- Drnevich düşey/torsiyonel salınım aparatı
- Numune tabandaki vibrasyonu sönümleyici bir platform üzerine sabitlenir.
- Yük (düşey veya torsiyonel) numune üst başlığına uygulanır. Numunenin reaksiyonu da üst başlıktan ölçülür.
- $G_0$ ,  $\xi_0$ , E ve G,  $\xi$  değerlerini birim deformasyon  $\gamma$  'nın şiddetine bağlı olarak belirlenir

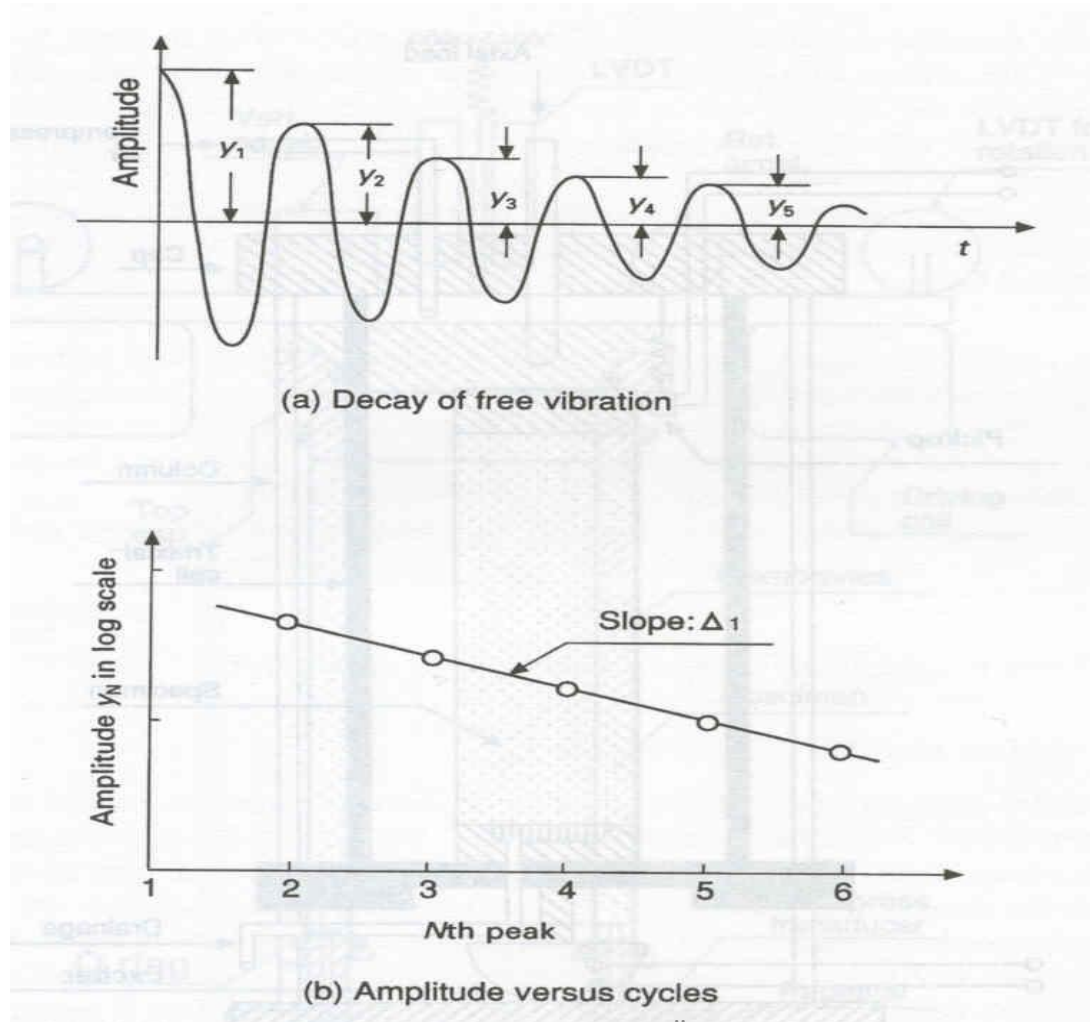
# • Resonans Kolon Deneyi

- 1) Numune hazırlanıp konsolide edilir
- 2) Elektromıknatis yardımı ile uygulanan salınımın frekansı yavaş yavaş arttırılarak ilk rezonans moduna ulaşılır
- 3) Ölçülmüş olan rezonans frekansı yardımı ile dalga yayılma hızını ( $v_s$  or  $v_l$ ) hesaplamak mümkündür. Buradan da  $G_0$  veya  $E$  değeri hesaplanabilir.
- 4) Rezonans durumuna ulaştıktan sonra elektromıknatisin enerjisi kesilir ve sistem serbest titreşime bırakılır. Titreşimin sönümlenmesi izlenerek  $\xi_0$  sönümlenme oranı belirlenir



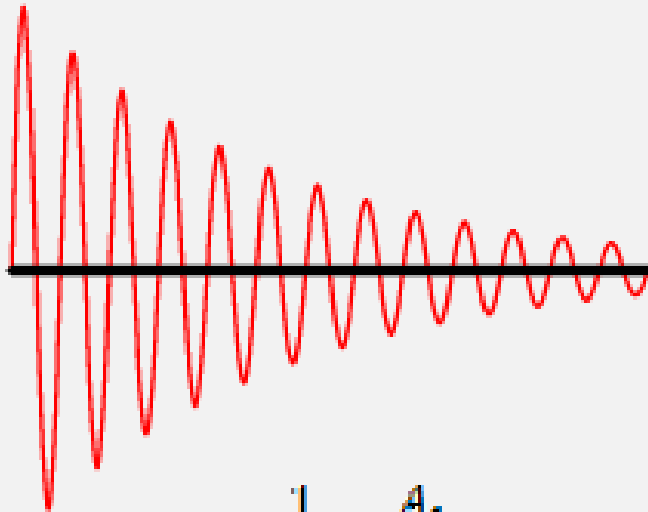
# Sönümlenme Oranının Belirlenmesi

$$\xi_0 = 1/2\pi \cdot \Delta_1$$



# Rezonans Kolon Deneyinden Sönüm Oranının Hesaplanması

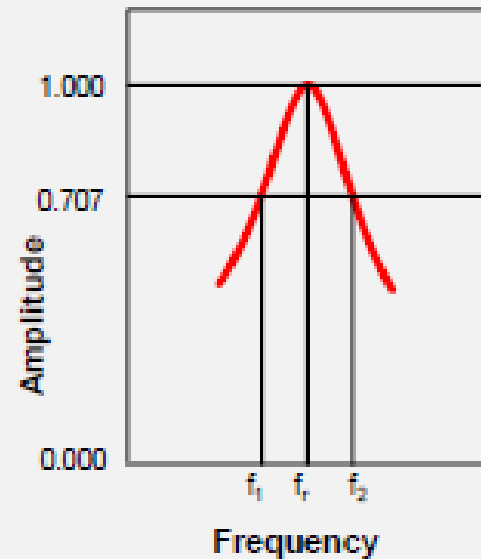
Logarithmic decrement



$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_{1+n}}$$

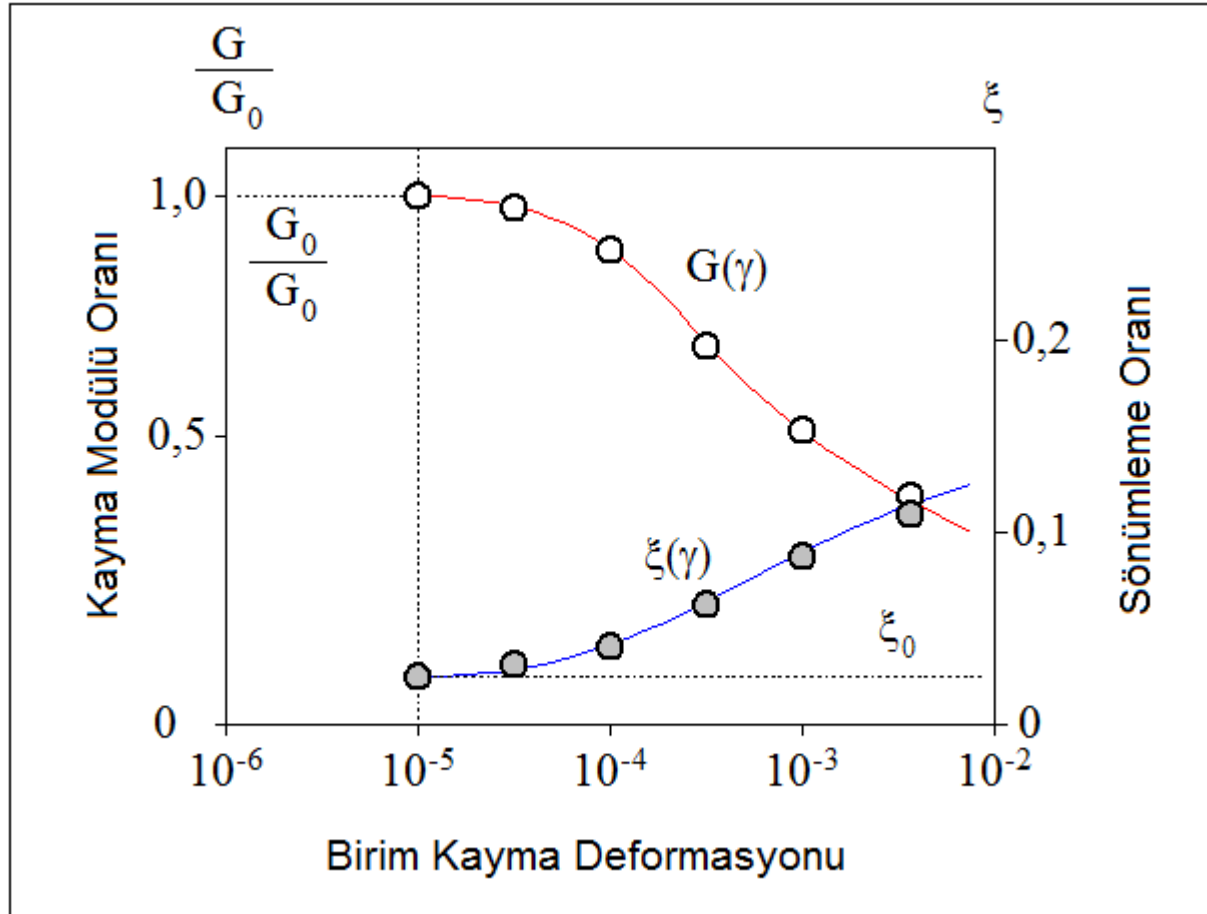
$$D = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}}$$

Half-power bandwidth



$$D \approx \frac{(f_2 - f_1)}{2 \cdot f_r}$$

- Rezonans Kolon Deneyi Sonuçları



# Rezonans Kolon Deneyinin Dezavantajları

- Deney doğrudan bir zemin parametresi ölçmez, zeminle ilgili parametreler sistem geometrisini de göz önüne alan formülasyonlar yardımı ile yapılır. Bu yüzden sonuçlar çok dikkatli değerlendirilmelidir.
- Kayma dalgasının Deney  $5 \times 10^{-2} \%$  mertebelerindeki kayma deformasyonları için sonuç verir.
- Deneyin bir dezavantajı da tekrar sayısıdır. Bilindiği gibi yaklaşık 7 büyüklüğündeki bir deneyde pik sayısı sadece 2'dir.

# PRATİKTE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ KURSU

## Zemin Etütleri ve Arazi Deneyleri



Prof. Dr. Erol Güler  
Boğaziçi Üniversitesi