



**İNM 424112**

# **Ders 4.1 Dinamik Etkiler Altında Zemin Davranışı**

Yrd. Doç. Dr. Pelin ÖZENER  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Geoteknik Anabilim Dalı

# DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

- Statik problemlerde olduğu gibi, dinamik yükler altında da zeminleri iki yönü ile düşünmek gerekir.
- **Yapıların üzerine oturtulduğu temel altı malzemesi olarak**
- **Zeminin kendisinin inşaat malzemesi olarak kullanıldığı yapılar**

# DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

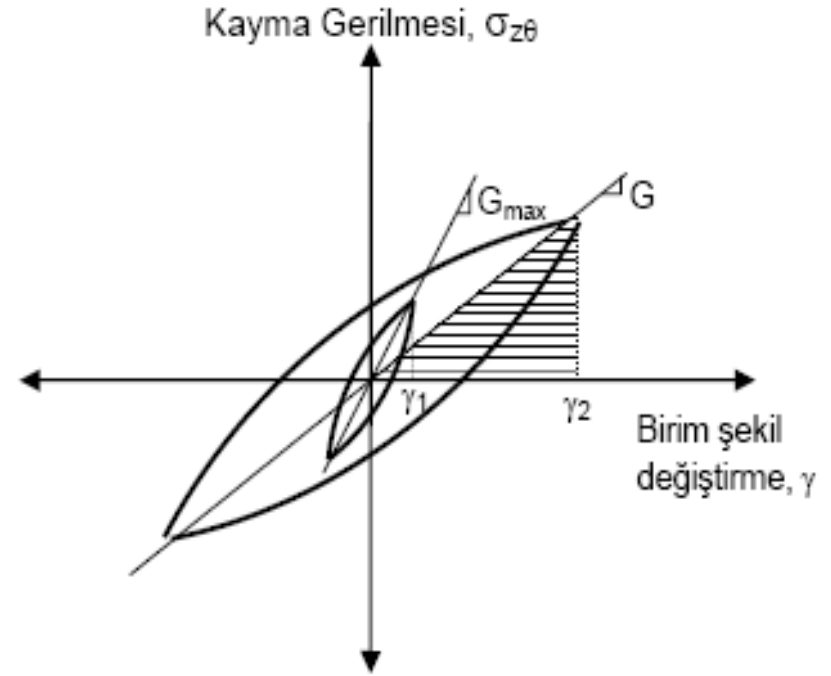
- Birincisinde, **zemin üzerinde taşıdığı yapıyı, yapıya etkiyen atalet kuvvetlerinin şiddeti ve temel stabilitesi yönlerinden etkilerken**
- İkincisinde, **zeminin tekrarlı yükler altında malzeme davranışı önemli olmaktadır.**

# DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

- Depremler veya dalga yükleri gibi tekrarlı yüklemeler altında zemin davranışının incelenmesinde, zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesi önemli bir konudur.
- Zeminlerin drenajsız durumda tekrarlı yükler altında
  - mukavemet kaybı
  - kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma,
  - kohezyonlu zeminlerde ise aşırı deformasyonlar ve göçme durumlarının incelenmesi gereklidir.

# DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

- Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı;
- mukavemet
- gerilme-şekil değiştirme karakteristikleri üzerinden incelenir.
- Gerilme-şekil değiştirme davranışları histerezis ilmikleri şeklinde olmaktadır.

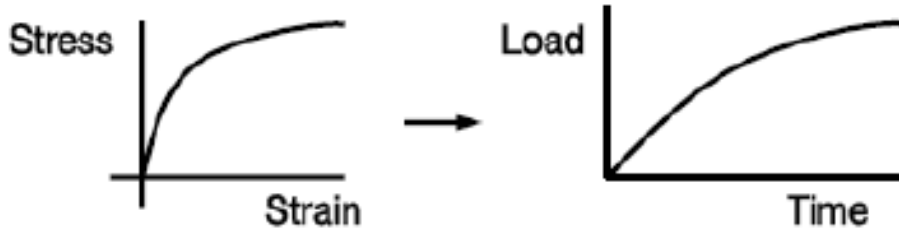


# DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

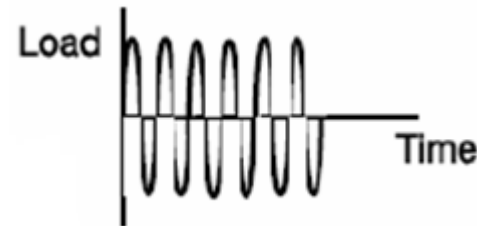
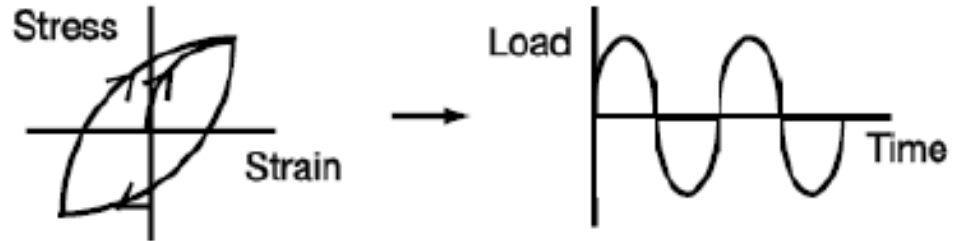
- Gerilme–şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle
  - dinamik kayma modülü
  - sönüm oranı değerleri ve bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması
- Mukavemet özellikleri olarak da
  - göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği
  - çevrim sayıları

# Gerilme-şekil değiştirme-zaman ilişkisi

**Statik  
yükleme**

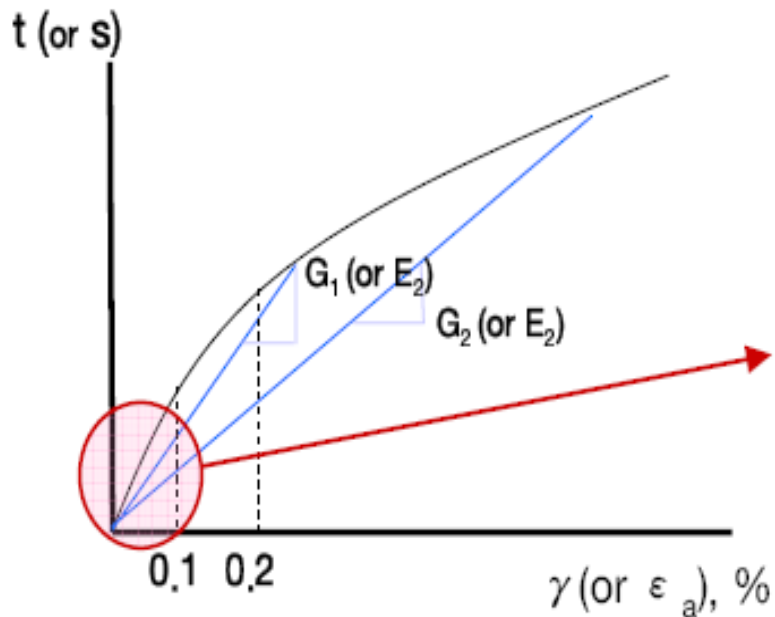


**Çevrimli  
yükleme**

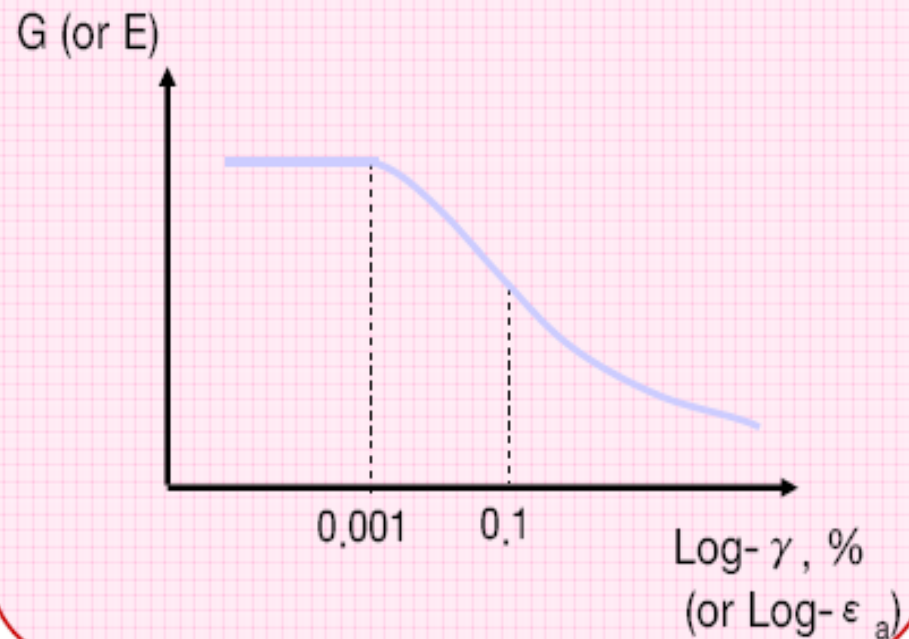


# Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi

Stress-Strain Relationship



Modulus-Strain Relationship





# DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

- Zeminlerin dinamik davranış özellikleri, zeminde oluşan deformasyonların mertebesi ile ilişkilidir.
- Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarındaki şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır.
- Daha büyük şekil değiştirme seviyelerinde ise uygulanan yük altında zemindeki mukavemet kayıpları ve plastik şekil değiştirme özellikleri önem kazanmaktadır.

# DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Düşük deformasyon seviyelerinde,

- rijitlik,
- sönümlleme,
- Poisson oranı
- yoğunluk

gibi parametreler dalga yayılmasını etkileyen zemin özellikleridir.

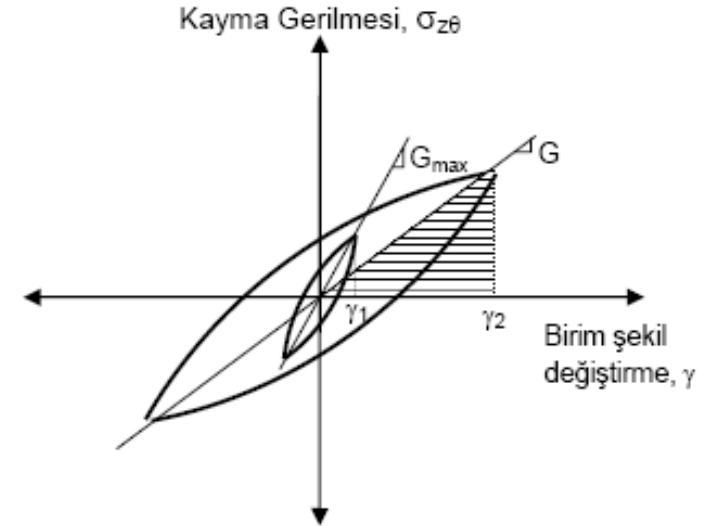
- Bunlar arasında rijitlik ve sönümlleme en önemlileridir.

# Dinamik Zemin Özelliklerini Etkileyen Faktörler

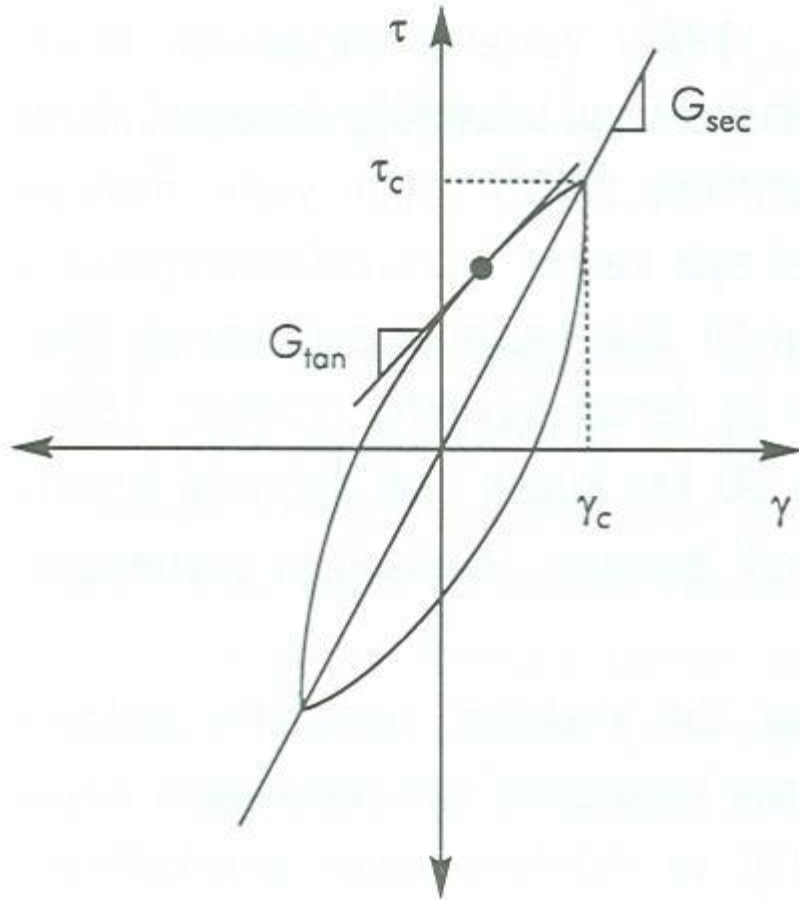
- ortalama efektif çevre gerilmesi  $\sigma'_0$
- boşluk oranı  $e$
- yükleme çevrim sayısı  $N$
- suya doygunluk derecesi  $S$
- aşırı konsolidasyon oranı AKO
- yükleme frekansı
- dane çapı dağılımı
- ince dane oranı
- Plastisite indeksi
- kullanılan deneysel yöntem
- yükleme biçimi ve yüklemenin doğrultusu

# Dinamik kayma modülü

- Histerezis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi kayma modülü olarak tanımlanır.
- Kayma modülü şekil değiştirme düzeyine göre değişken değerler alır.
- Dinamik kayma oranı birim deformasyon düzeyi arttıkça azalmakta, doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir.



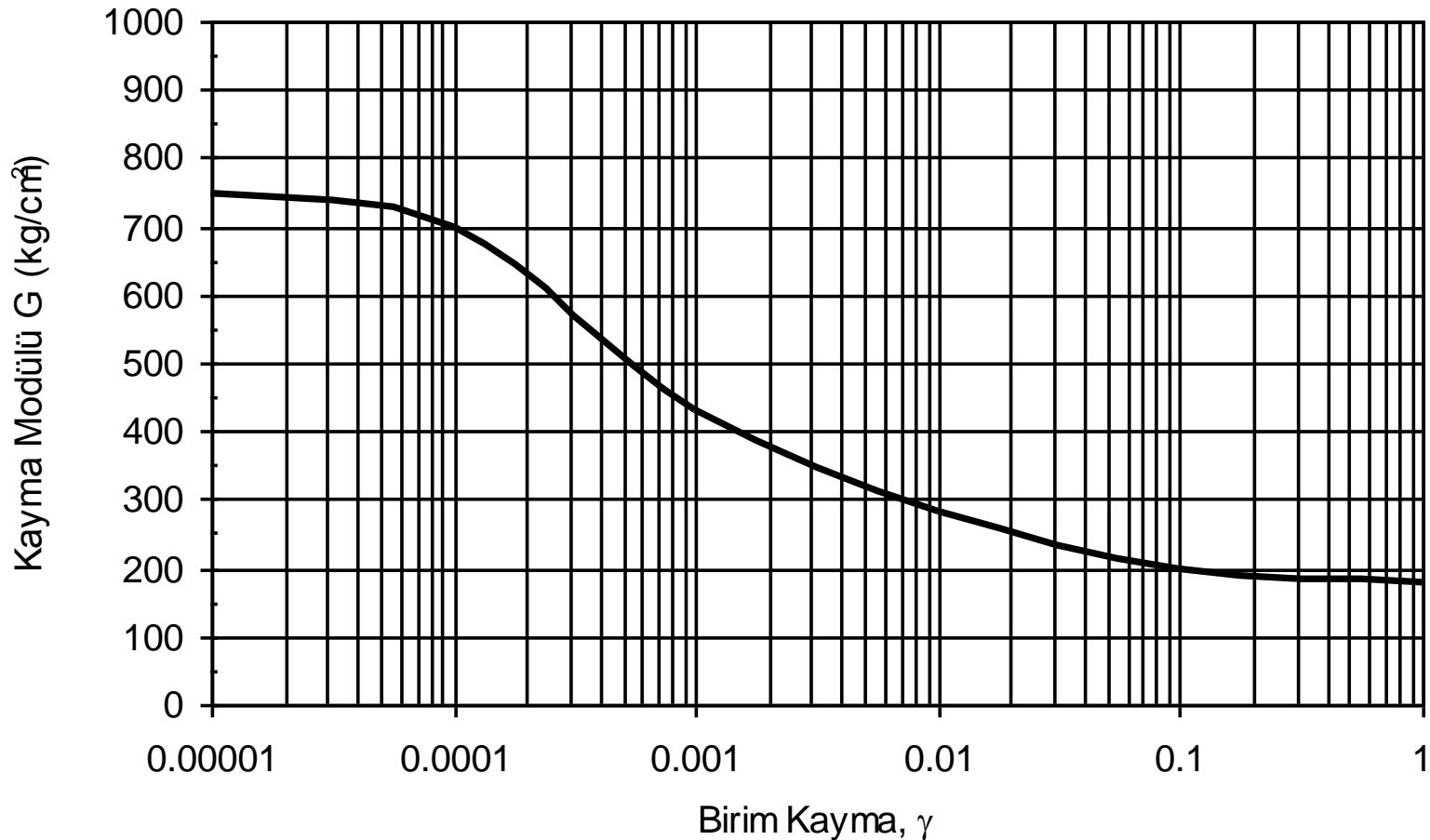
# Dinamik kayma modülü



$$G_{\text{sec}} = \tau_c / \gamma_c$$

# Kayma Gerilmesi-Birim Kayma Şekil Değiştirmesi İlişkisi

- Kayma modülü G'nin değeri, birim kayma Şekil değiştirmesi ( $\gamma$ )'nin mertebesi arttikça azalmaktadır.

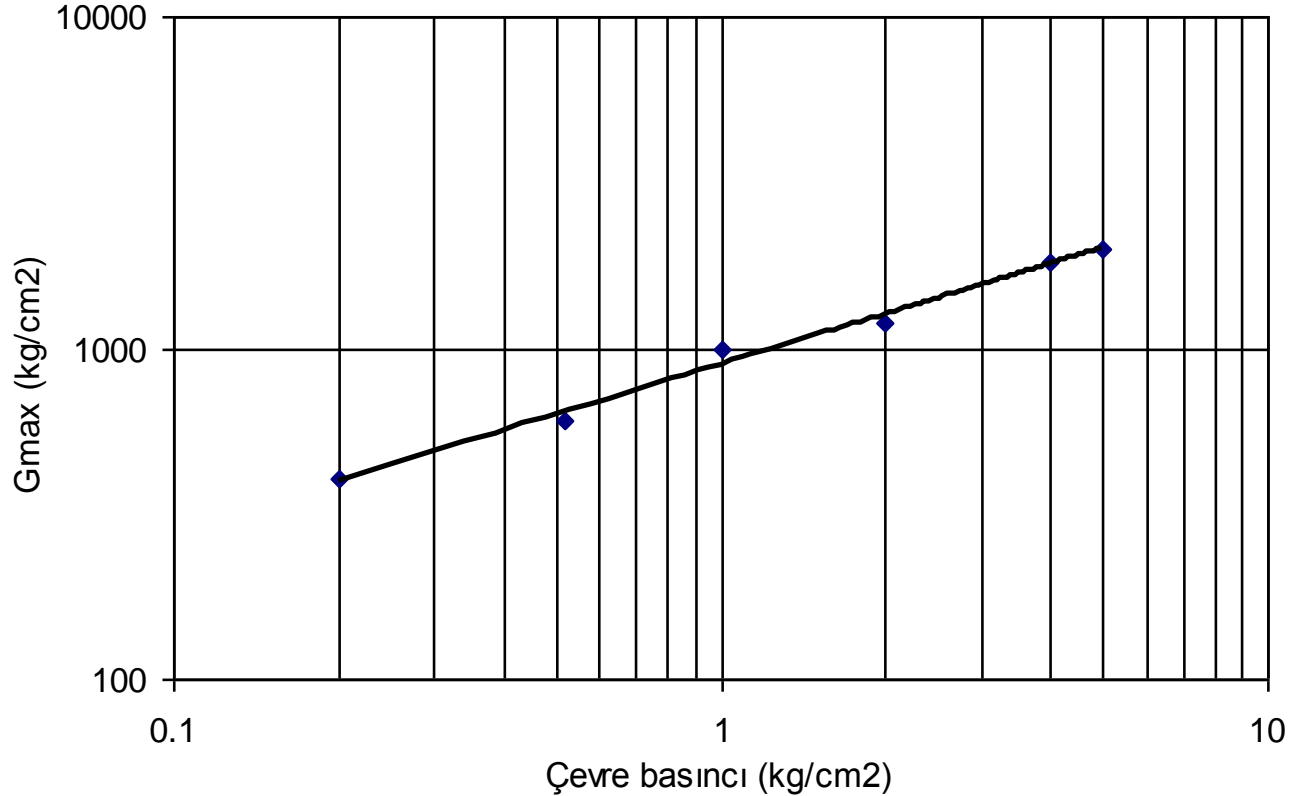


# Kayma Gerilmesi-Birim Kayma Şekil Değiştirmesi İlişkisi

- $G_{\max}$ 'ın değeri **kumlarda**
  - efektif çevre basıncına ( $\sigma'_0$ ),
- **killerde** ise
  - drenajsız kayma mukavemeti, ( $S_u$ )
  - efektif düşey gerilme ( $\sigma'_v$ ) ve
  - aşırı konsolidasyon oranına (AKO)

bağlı olmaktadır. Şekil 'de kumlar için  $G_{\max}$  değerinin genel olarak çevre basıncı ile değişimi gösterilmiştir.

# Kumlarda $G_{max}$ - Ortalama çevre basıncı ilişkisi

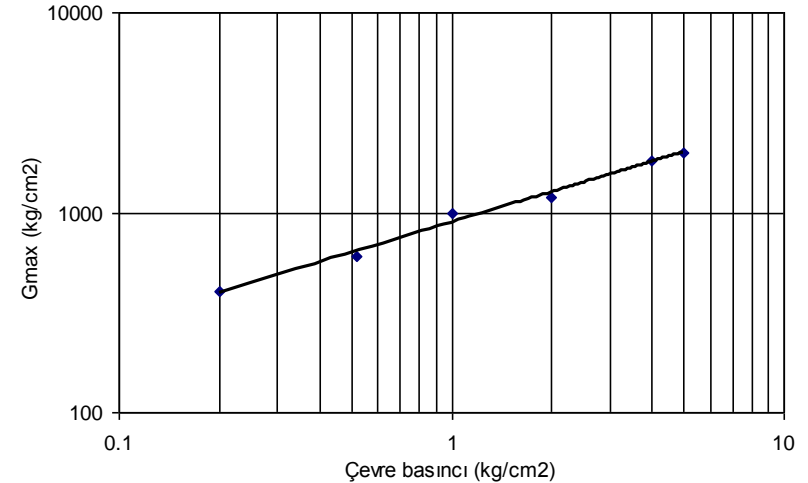


Şekil. Kayma modülünün en büyük değerinin ortalama efektif çevre basıncı ile değişimi



# Kumlarda $G_{max}$ - Ortalama çevre basıncı ilişkisi

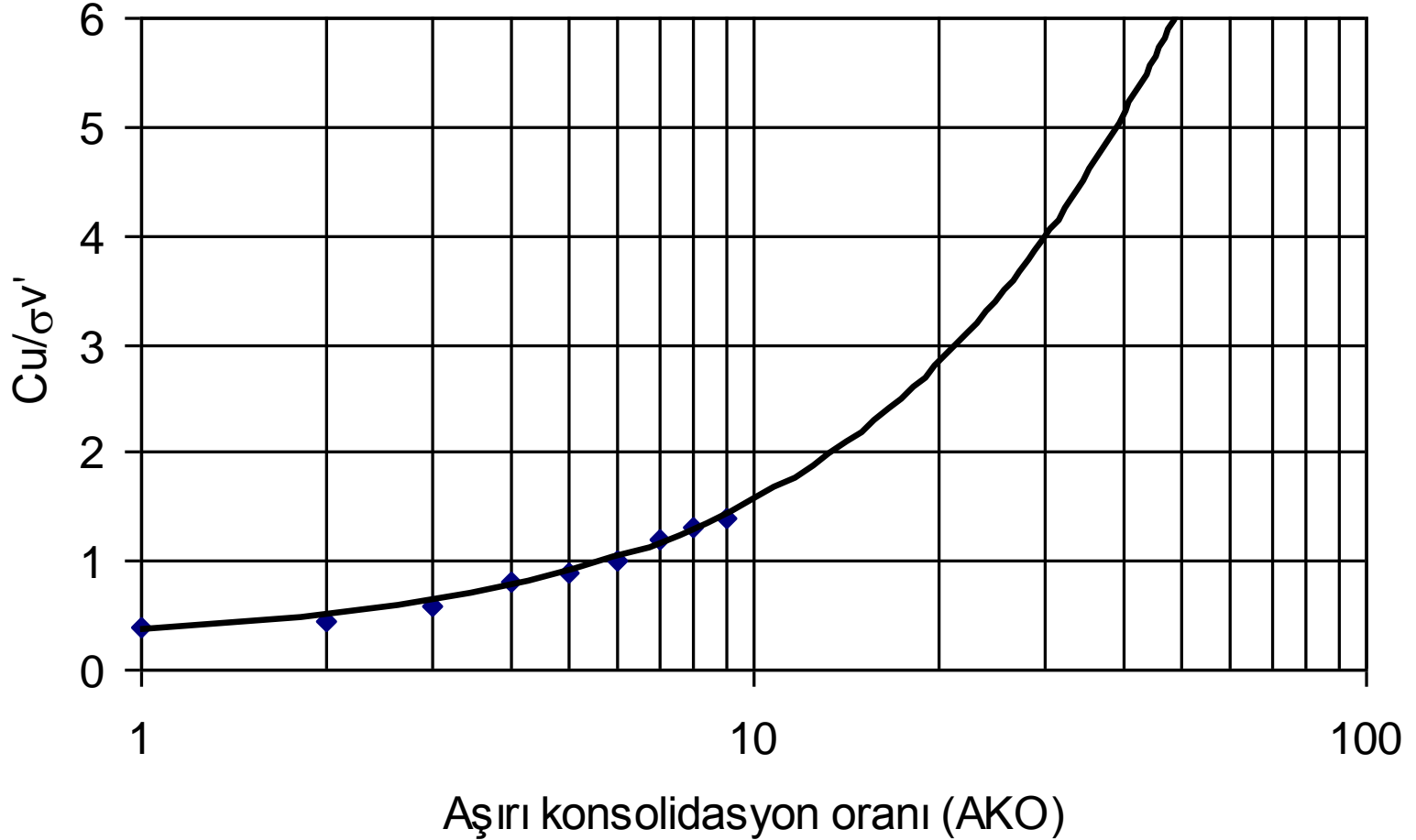
- Arazideki bir kum tabakasındaki bir zemin elemanının  $G_{max}$  değerini bulmak için,
- önce o elemana etkiyen efektif çevre basıncı hesaplanarak Şekil 'dekine benzer deneysel sonuçlardan o eleman için  $G_{max}$  değeri belirlenebilir.



# Killerde $G_{\max}$ – AKO ilişkisi

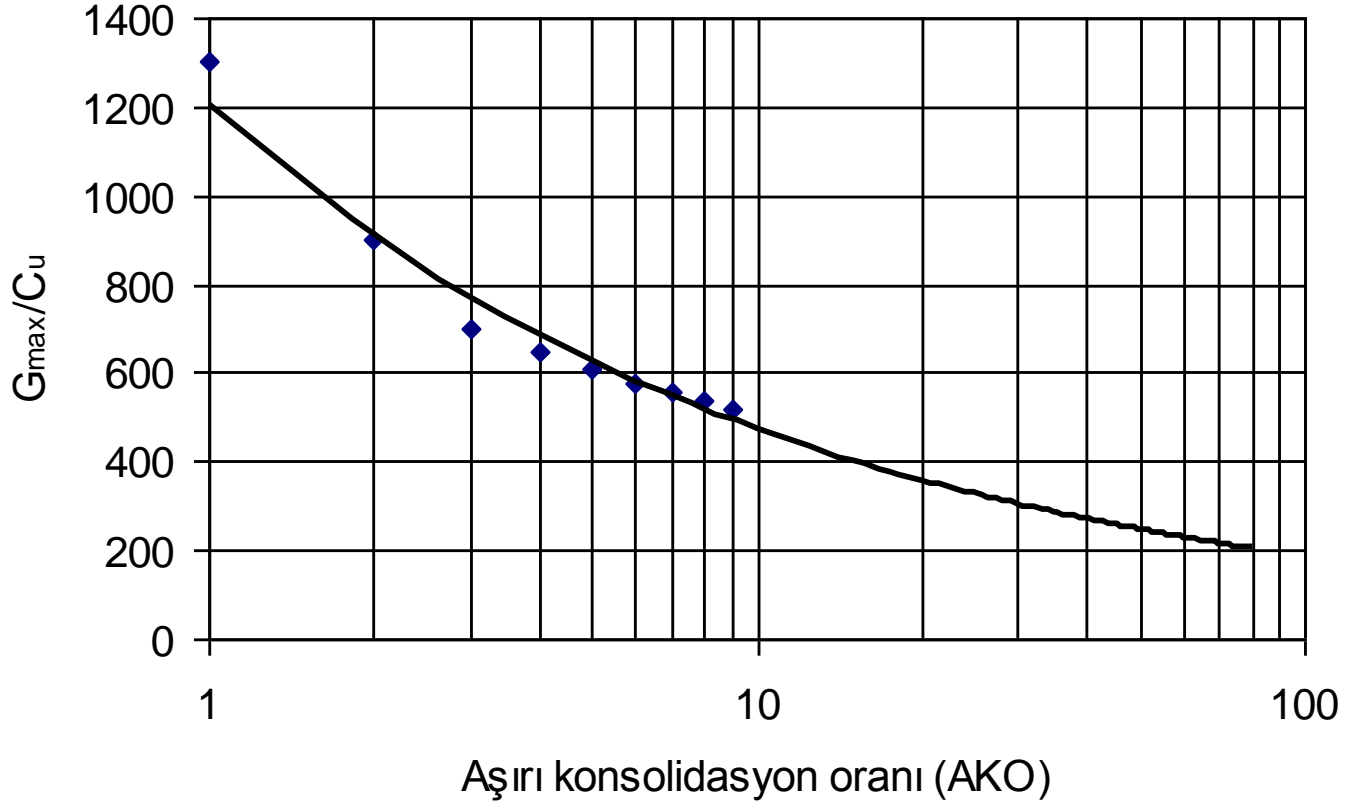
- Killerde ise önce drenajsız kayma mukavemeti ile AKO arasındaki ilişkinin deneysel olarak saptanması gerekir.
- Şekil 'de efektif düşey gerilme değerine göre normalize edilmiş drenajsız kayma mukavemetinin AKO'ya göre değişimini veren deneysel sonuçların tipik bir örneği gösterilmiştir.
- Drenajsız kayma mukavemetine göre normalize edilmiş  $G_{\max}$  değerlerinin AKO'ya göre değişimi için ise bir sonraki Şekil 'de benzer deneysel eğriler elde etmek mümkündür.

# Normalize $C_u$ - AKO ilişkisi



Şekil. Efektif düşey basınca göre normalize edilmiş drenajsız kayma mukavemetinin AKO ile değişimi

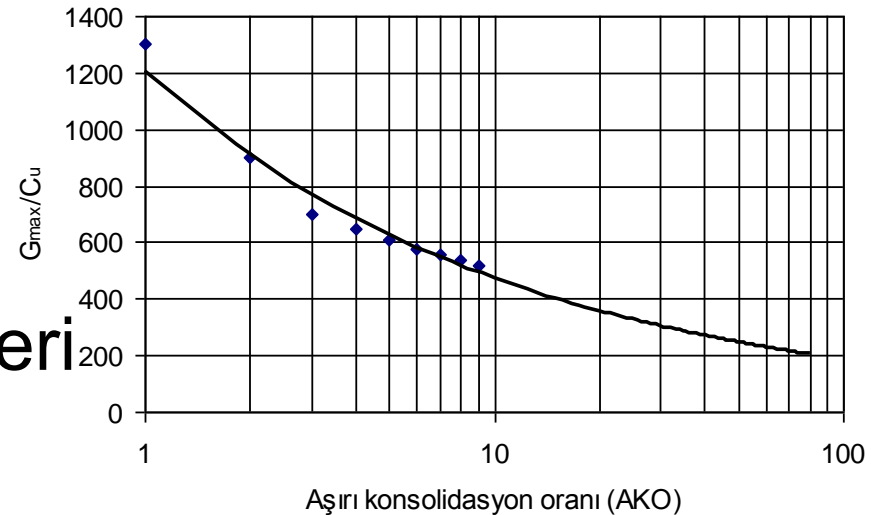
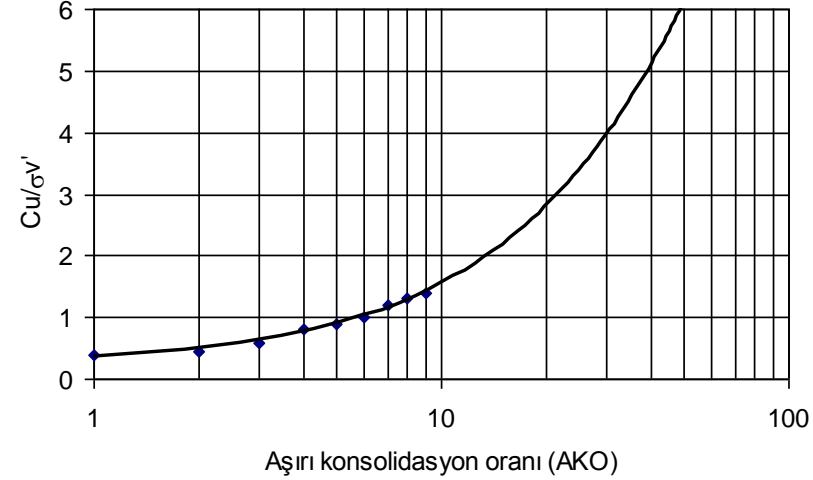
# Killerde $G_{max}$ – AKO ilişkisi



Şekil. Drenajsız kayma mukavemetine göre normalize edilmiş en büyük kayma modülü değerinin AKO ile değişimi

# Killerde $G_{max}$ – AKO ilişkisi

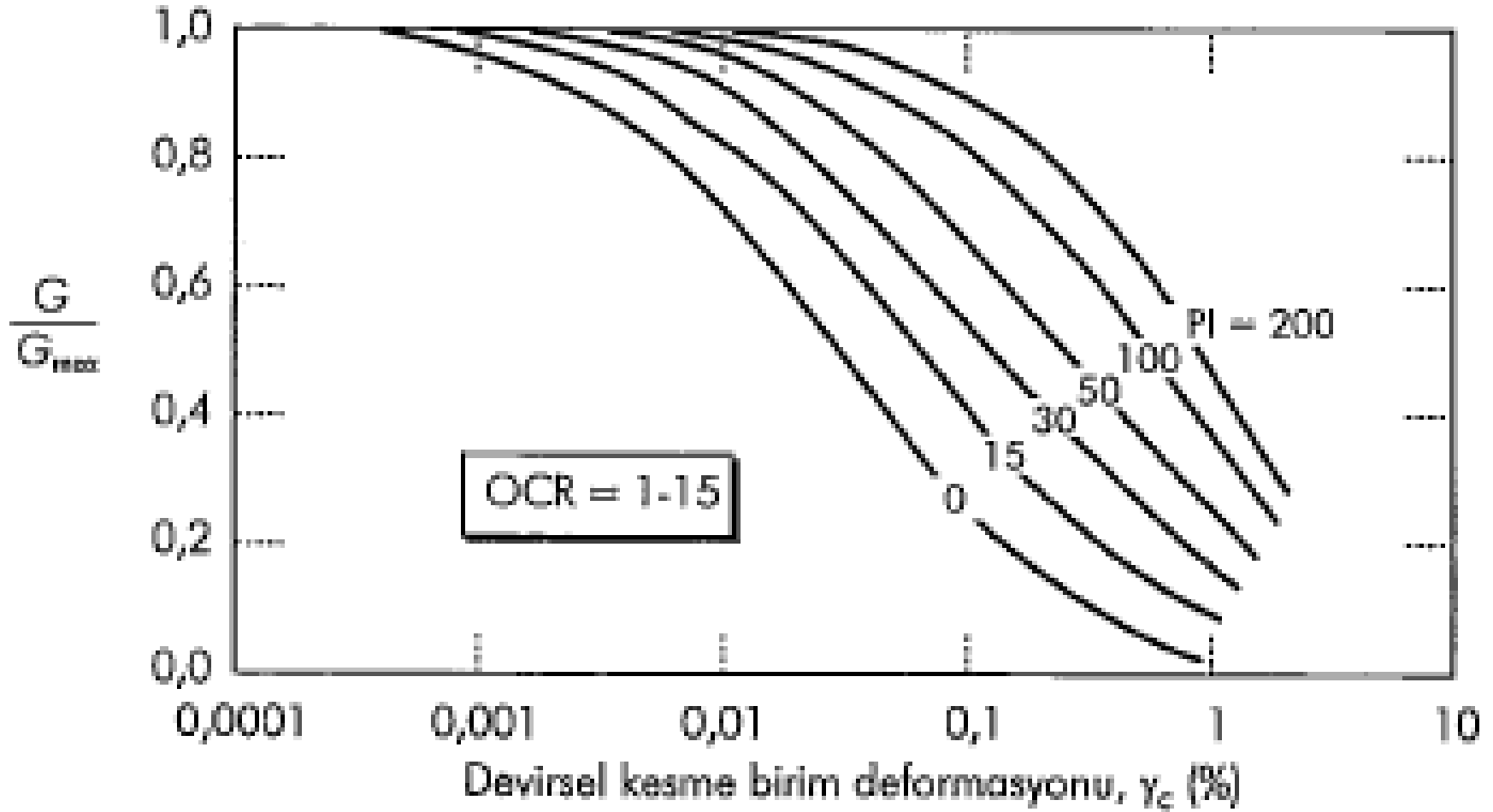
- Arazideki bir kil zeminin herhangi bir elemanı üzerine etkiyen efektif düşey gerilme ile AKO belirlendikten sonra
- Şekil 'dekine benzer deneysel eğrilerden drenajsız kayma mukavemeti,
- Şekil 'deki deneysel sonuçlardan da  $G_{max}$  değeri seçilebilir.



$$G/G_{\max}$$

- Başlangıç kayma modülü ( $G_{\max} = G_0$ ) değerinin artan birim kayma şekil değiştirmesi ile değişimi, genellikle normalize edilmiş boyutsuz parametreler cinsinden Şekil 'dekine benzer eğriler ile tanımlanır.

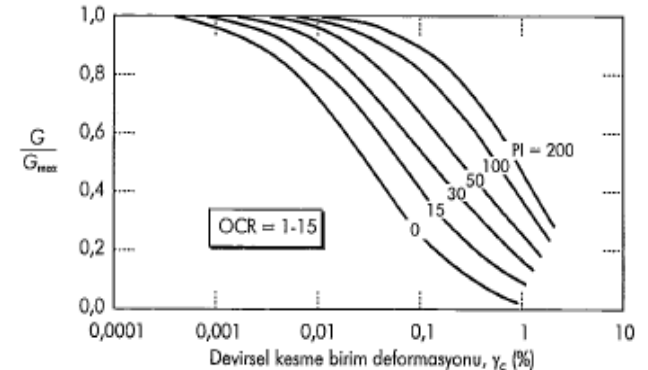
# $G/G_{\max}$ - $\gamma$ ile değişimi



şekil .  $G/G_{\max}$  -  $\gamma$  ile değişimi

# $G/G_{max}$ - $\gamma$ ile değişimi

- Önemli projelerde her zemin tabakası için  $G$ 'nin  $\gamma$  ile değişimi deneysel olarak saptanmalıdır.
- Eğer deneysel olarak belirleme imkanı yoksa  $G_{max}$  değeri laboratuvar veya arazi deneyleri ile belirlendikten sonra kayma şekil değiştirmesi ile değişimi
- Şekil 'dekine benzer eğrilerden yaklaşık olarak belirlenebilir.

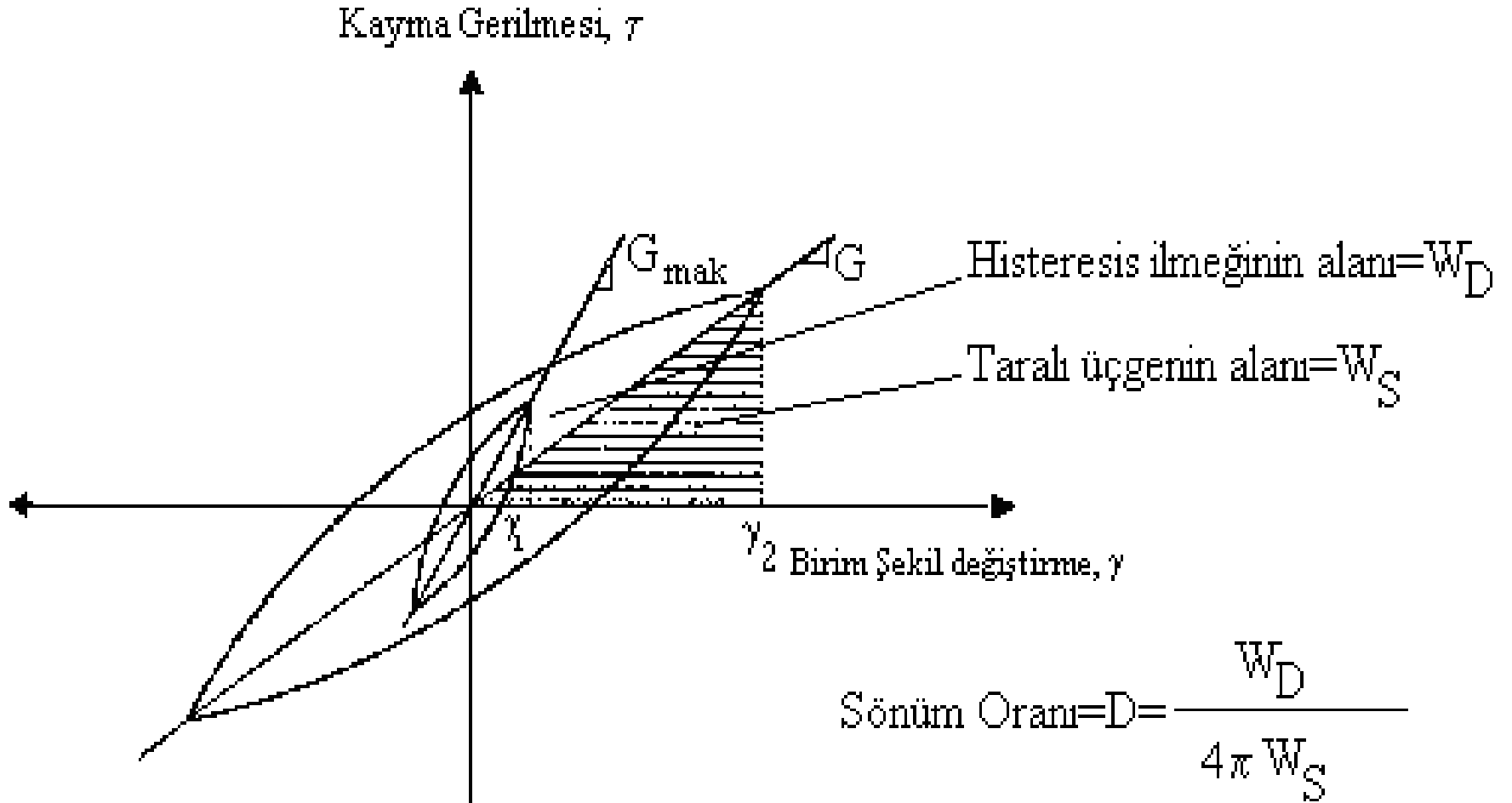




# Sönüm oranı

- Plastik şekil değiştirmelerin varlığı sürtünme gibi nedenlerle enerji kayıplarının olduğunu göstermektedir.
- Her bir çevrim sonunda bir miktar enerji sönümlenmekte ve bu ilişki sönümlenme oranı olarak tanımlanmaktadır.
- Sönümlenme oranı histerez ilmiği alanının histerez ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alanına oranı olarak tanımlanır.

# SÖNÜM



Şekil. Histeresis Eğrisi.

# SÖNÜM

- Sönüm, dinamik yüklenmiş bir malzemedeki ya da mekanik sistemdeki enerji miktarının ısıya dönüşüp azalmasıdır.
- Bir malzemenin sönümünün büyük olması, bu malzemenin dinamik yükleme ya da titreşimler sırasında daha çok enerji yutması demektir.
- Zeminlerde sönüm, zemin elemanında bir çevrim sonucu yutulan enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır.

# SÖNÜM

- Zeminlerin sönüm özelliklerini bilmek, zeminlerde dalga yayılımı, deprem yükleri karşısında zemin davranışı gibi dinamik problemlerin çözümü açısından önem taşımaktadır.

# Dinamik zemin parametrelerinin laboratuarda deneysel olarak belirlenmesi

- Laboratuarda gerçekleştirilen deneylerde tabiattaki gerilme ve Şekil değiştirme koşulları yaklaşık olarak sağlanabilmektedir.
- Fakat araziden alınan numunelerde az da olsa meydana gelen örselenme veya yeniden oluşturulan numunelerdeki fiziksel özellik farklılıkları zemin numunesinin davranış biçimini etkilemektedir.
- Bu nedenle laboratuvar deneylerinden elde edilen bulguların arazi deneyleriyle desteklenmesi çok kullanılan bir yaklaşım yöntemidir

# Dinamik zemin parametrelerinin Laboratuarda deneysel olarak belirlenmesi

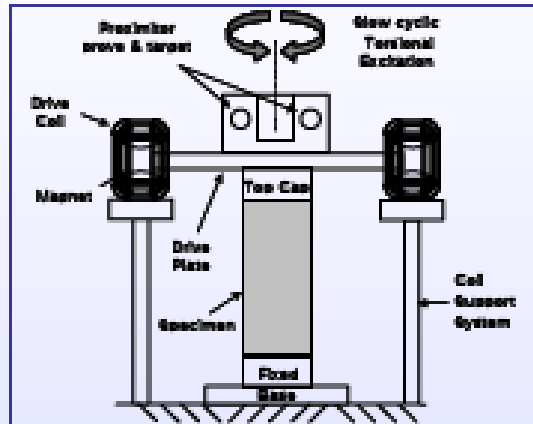
Depremler sırasında oluşabilecek mertebede yüksek şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin dinamik özelliklerini deneysel olarak belirleyebilmek için, yaygın olarak

- a) **Dinamik üç eksenli deneyler (Dynamic triaxial test)**  
(drenajlı ve drenajsız kesme)
- b) **Dinamik basit kesme (Dynamic simple shear test)**
- c) **Burulmalı kesme (Torsional Shear test)**
- d) **Sarsma tablası (Shaking Table)**
- e) **Rezonant kolonu (Rezonant column test)**  
deneyleri kullanılmaktadır.

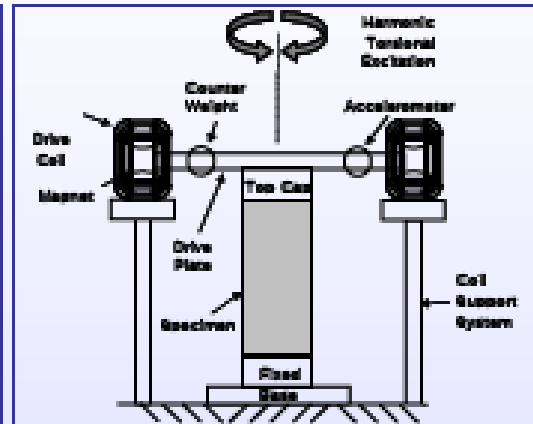
# Lab. tests

- Non-linear properties of ground  
(G-log  $\gamma$ , D- G-log  $\gamma$ , coefficient for liquefaction)

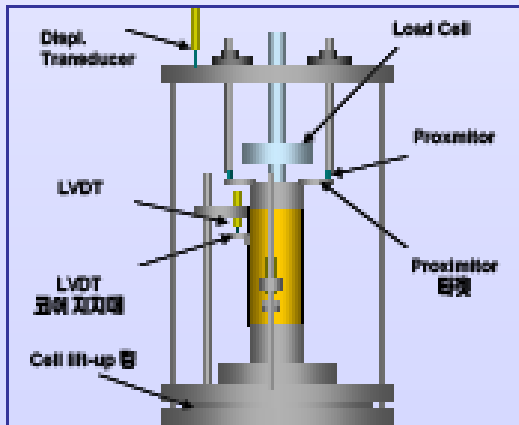
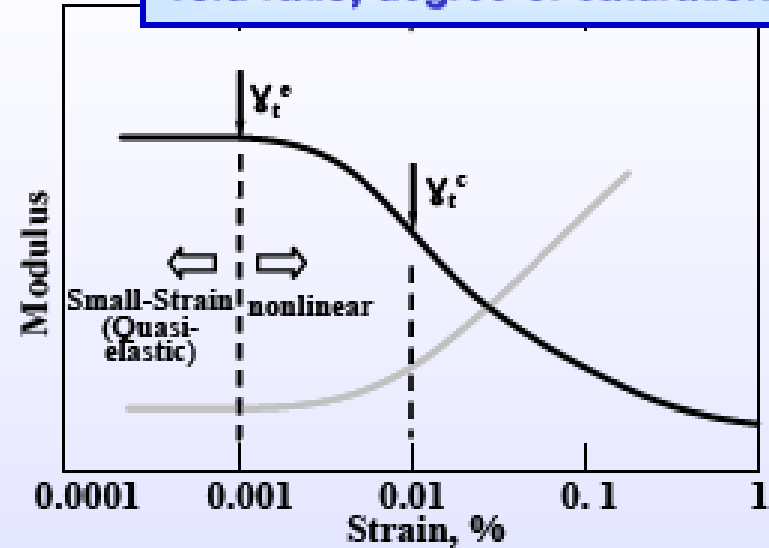
Strain, confining pressure, void ratio, degree of saturation



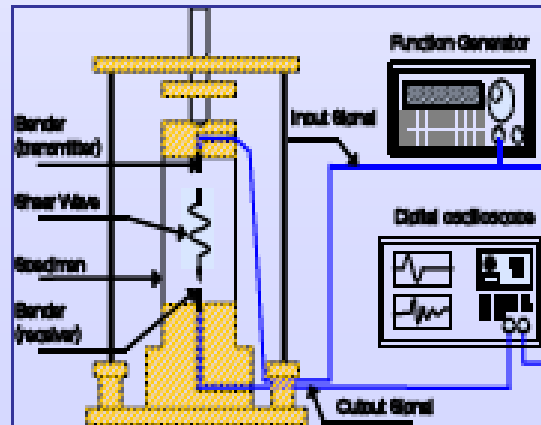
TS test



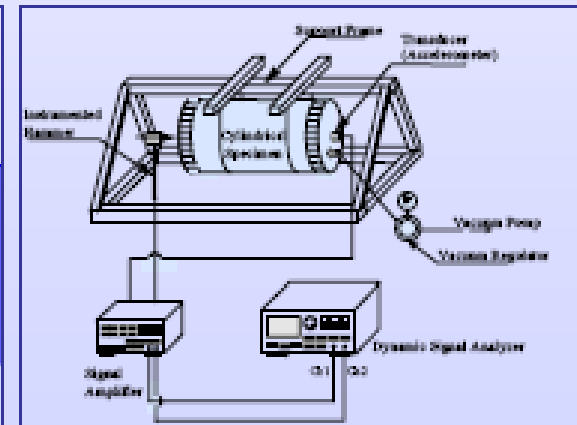
RC test



Tri-axial test



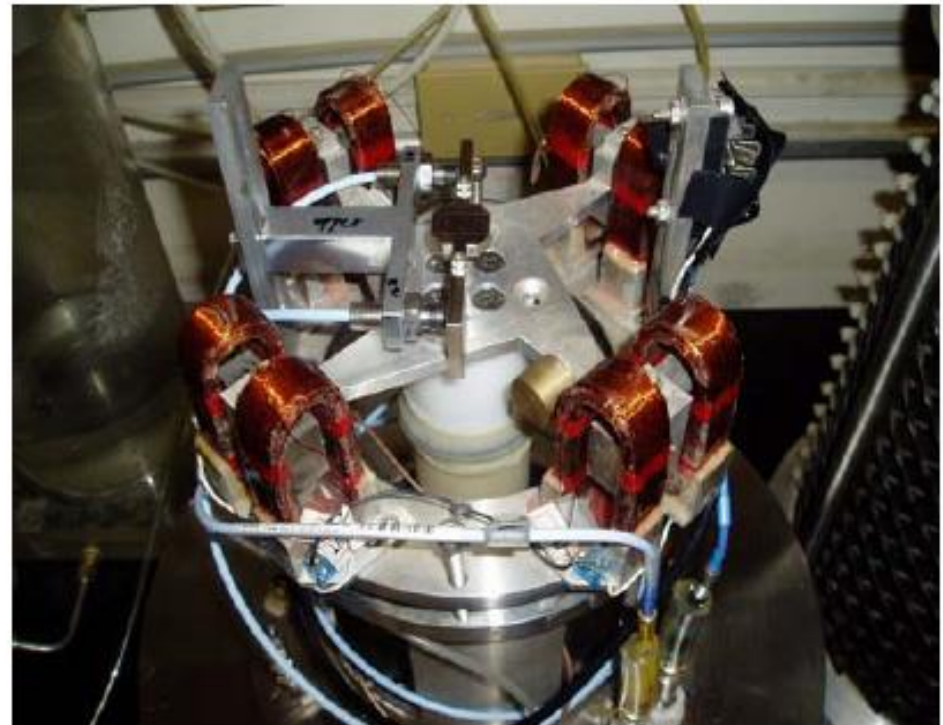
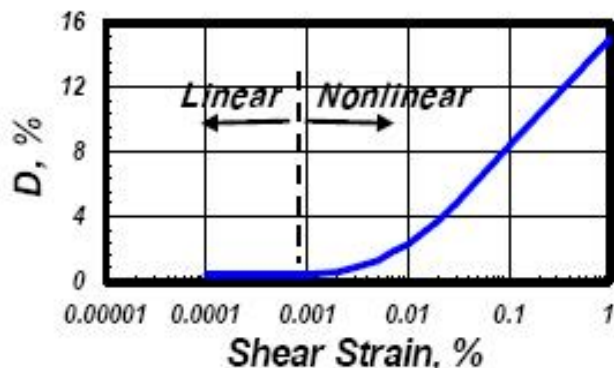
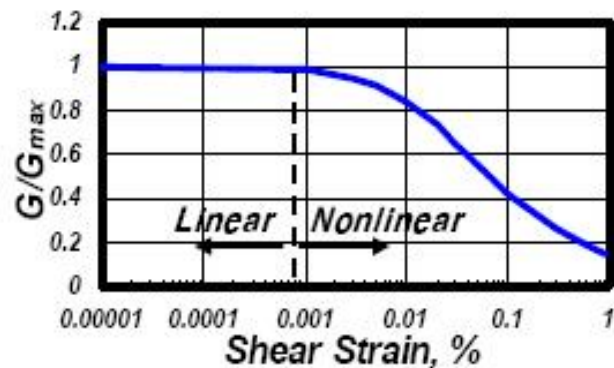
Bender element



FFRC

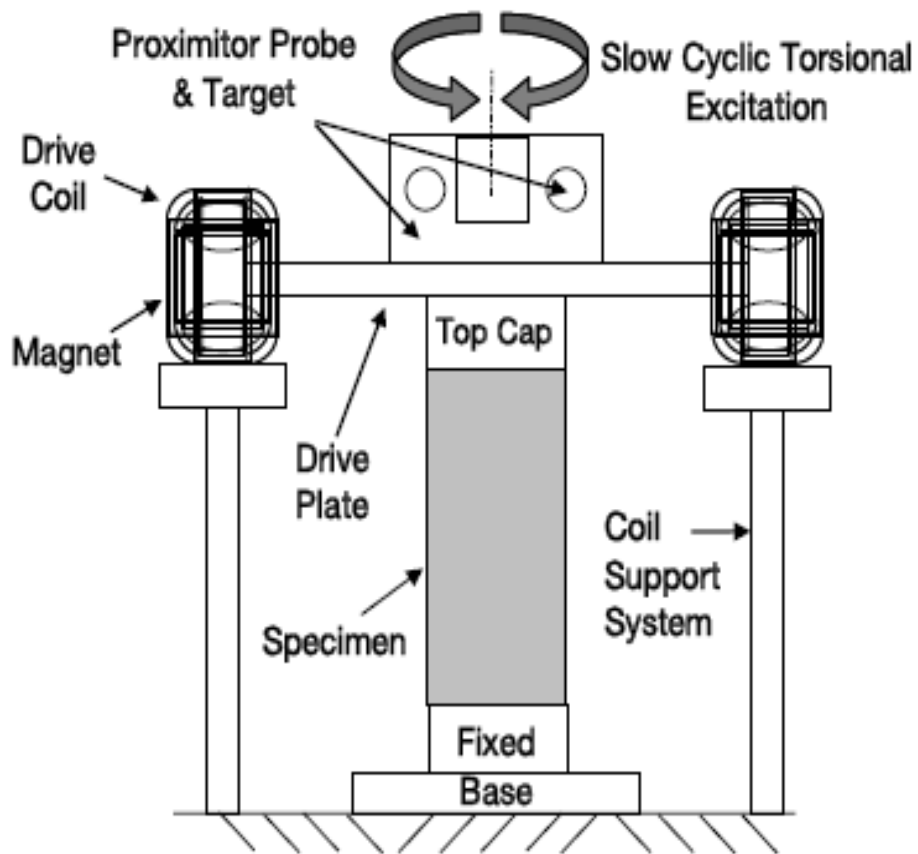
# Resonant Column & Torsional Shear Test

- Dynamic Deformational Characteristics (Shear Modulus, Damping) at Shear Strain Range from  $10^{-4}\%$  to  $0.1\%$
- Deformational Characteristics at Small Strain Range :  $G_{\max}$ ,  $D_{\min}$
- Nonlinear Deformational Characteristics :  $G$ ,  $G/G_{\max}$ ,  $D - \log \gamma$

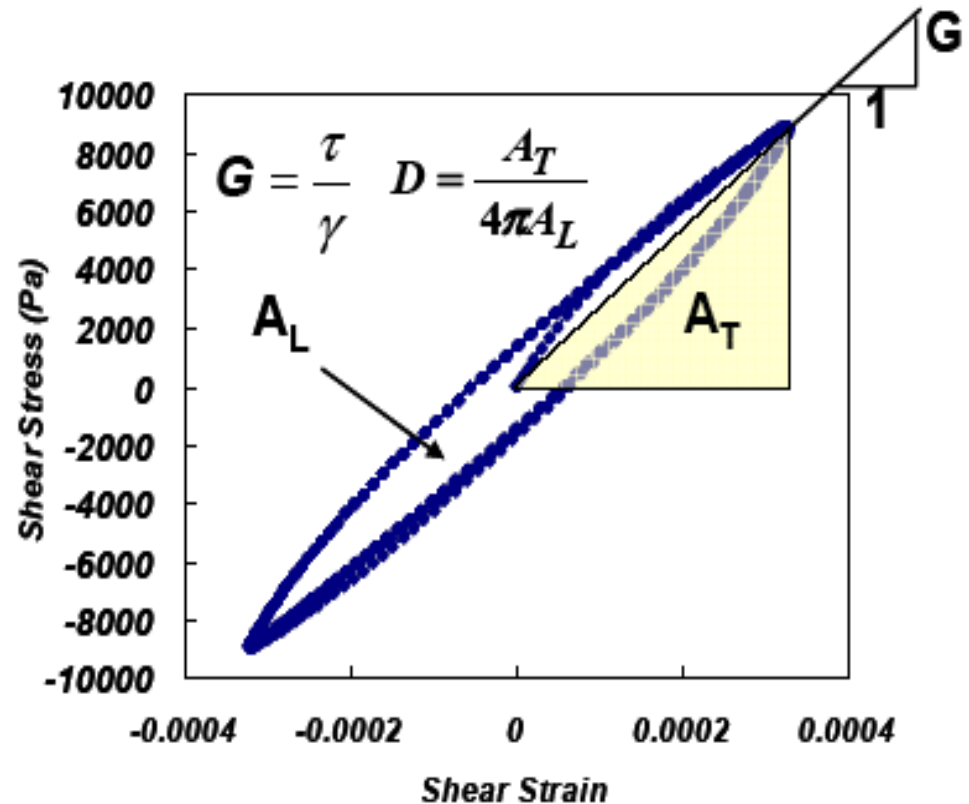




# Torsional Shear Test

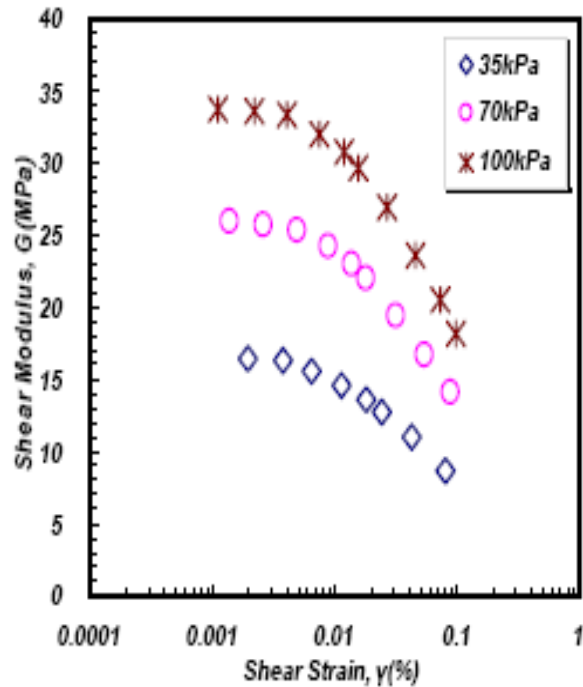


Schematic Diagram

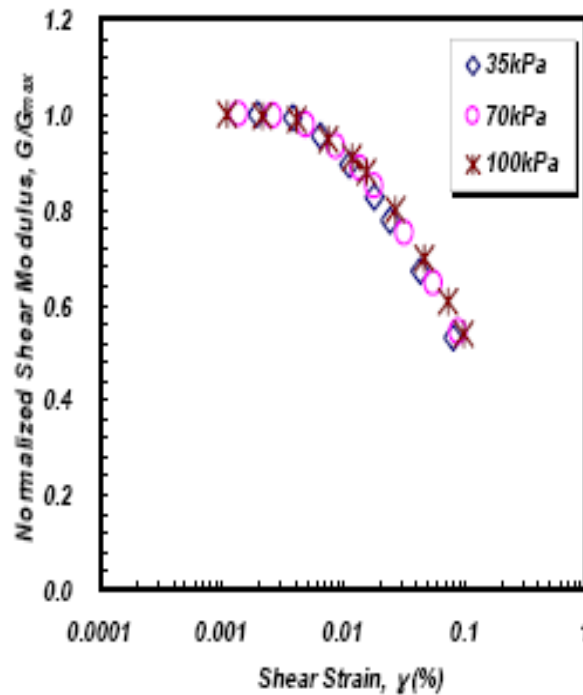


Stress-Strain Hysteresis Curve

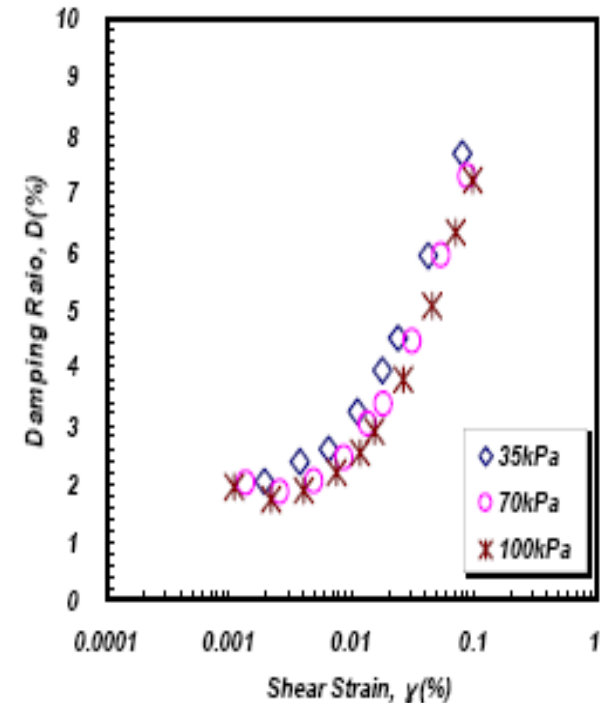
# Deneylerden elde edilen dinamik parametreler



Shear Modulus Reduction Curve ( $G - \log \gamma$ )



Normalized Shear Modulus Reduction Curve ( $G/G_{max} - \log \gamma$ )



Damping Curve ( $D - \log \gamma$ )

# Dinamik parametrelerin arazi deneyleri ile belirlenmesi

- Dinamik parametreleri belirleyebilmek için geoteknik ve jeofizik yöntemler kullanılabilir

# JEOFİZİK YÖNTEMLER

- Jeofizik yöntemler geoteknik mühendisliği dışında özel bir uzmanlık işi olup alışılmış araştırma yöntemlerine göre daha kısa sürede ve ekonomik olarak Jeofizik gözlemlerin yorumunda geniş alanları taramak için kullanılmaktadır.
- Jeofizik yöntemlerin birçoğu iki tarafında fiziksel özelliklerin farklı olduğu kesimleri ortaya çıkarmaktadır.

# Jeofizik yöntemler

- **Örneğin** : İki tabakanın sınırı, fay, yeraltı yapısı, bir boşluk bu farklılığın ortaya çıkmasına neden olabilir.
- Fark belirgin değilse jeofizik yöntemin başarı şansı azalmaktadır.
- Bu yöntemler bazen zemin veya kayacın parametrelerini bulmakta kullanılırsalar da sonuçlar bu parametreler için doğrudan ölçümlerle karşılaştırılmalıdır.

# Arazi Yöntemleri

- Zemin yüzünde uygulanan bir titreşim kaynağından yayılan dalgalar, değişik aralıklarla yerleştirilmiş alıcılar (R1, R2, R3) tarafından algılanmaktadır.
- Dalga hızları birbirinden farklı olduğu için P, S ve R dalgaları alıcılara değişik zamanlarda varmakta ve her dalga için varış zamanı ile titreşim kaynağından uzaklık arasında ilişkiler elde edilebilmektedir.

# Arazi Yöntemleri

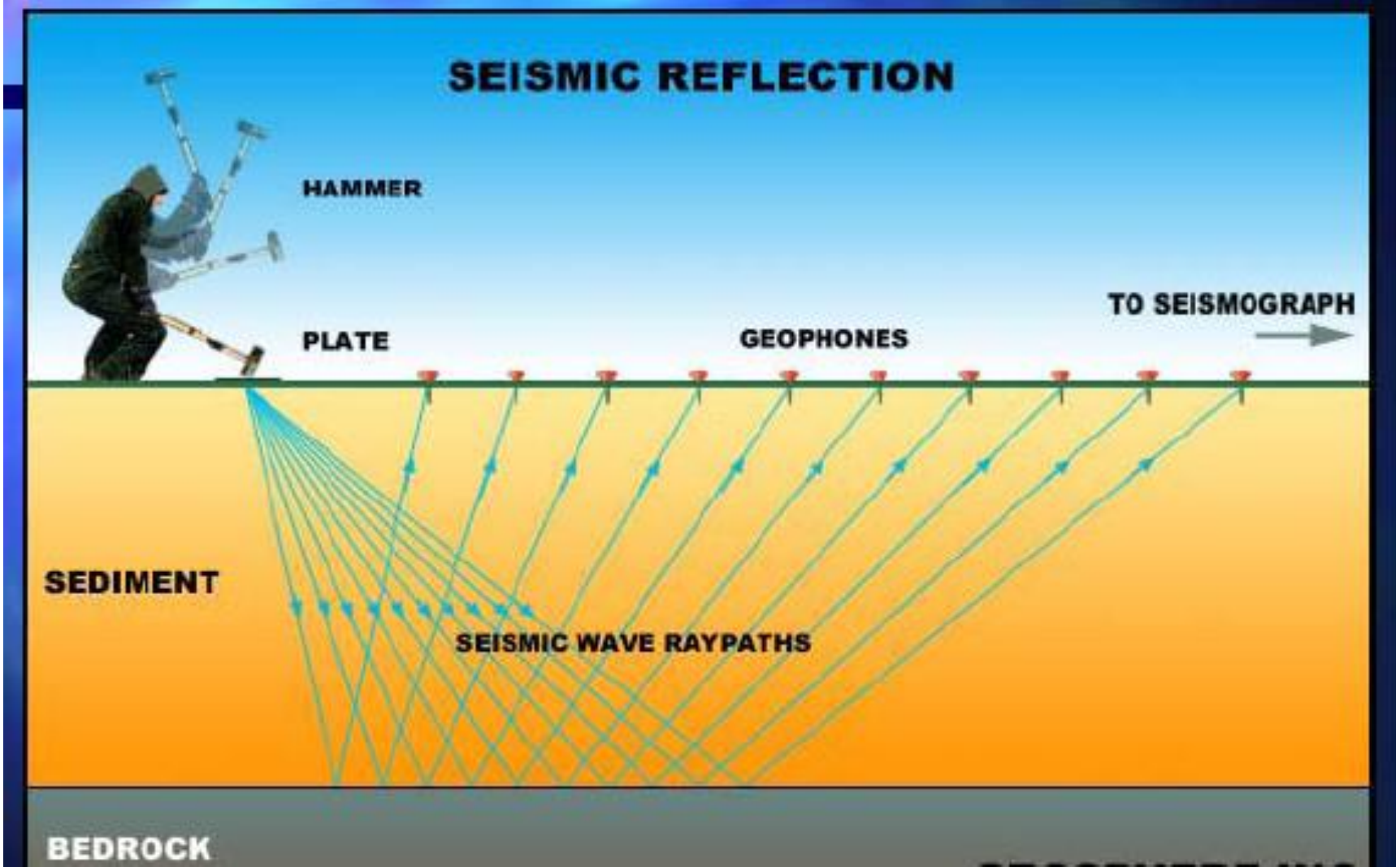
- Daha derinlerdeki zeminlerin dalga yayılma hızlarını belirlemek için aşağıdaki arazi ölçüm yöntemleri uygulanmaktadır.
  - a) Yansıma Yöntemi (Reflection)
  - b) Sismik Kuyu Yöntemi
  - c) Karşıt Kuyu Yöntemi
  - d) Sismik Koni Yöntemi sayılabilir.

## a) Yansımaya Yöntemi (Reflection)

- Sismik yansımaya deneyleri zemin katmanlarının dalga iletme hızı ve kalınlıklarının yer yüzeyinden ölçülmesine izin verir.
- Bir kaynaktan üretilen P dalgasının bir alıcı tarafından varış zamanının kaydedilmesi şeklinde yapılır. Şekil 'de sismik yansımaya deneyi gösterilmiştir.



# a) Yansima Yöntemi (Reflection)

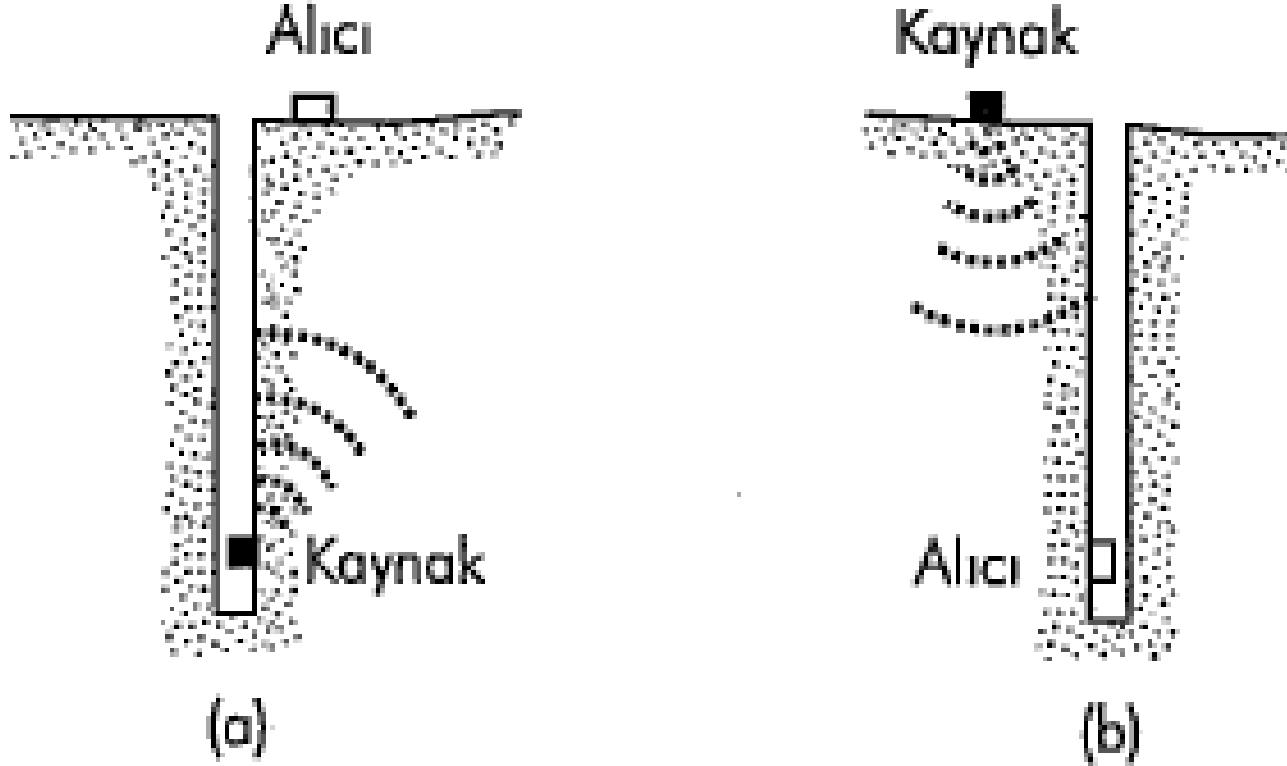


Sismik yansima deneyi

## b) Sismik Kuyu Yöntemi

- Zeminlerde dalga yayılma hızları en sağlıklı biçimde sismik kuyu yöntemleri ile ölçülebilmektedir.
- Açılan bir sondaj kuyusu ile, Şekil 'de gösterilen düzen kullanılarak zemin yüzünden itibaren aşağı doğru değişik tabakalardaki P ve S dalgaları yayılma hızları saptanabilmektedir.

## b) Sismik Kuyu Yöntemi

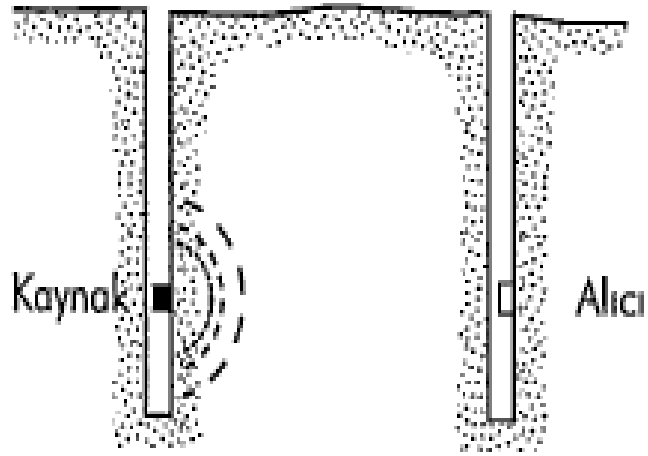


Şekil . Tek kuyu ile derinlik boyunca dalga yayılma hızlarının değişik tabakalar için ölçülmesi

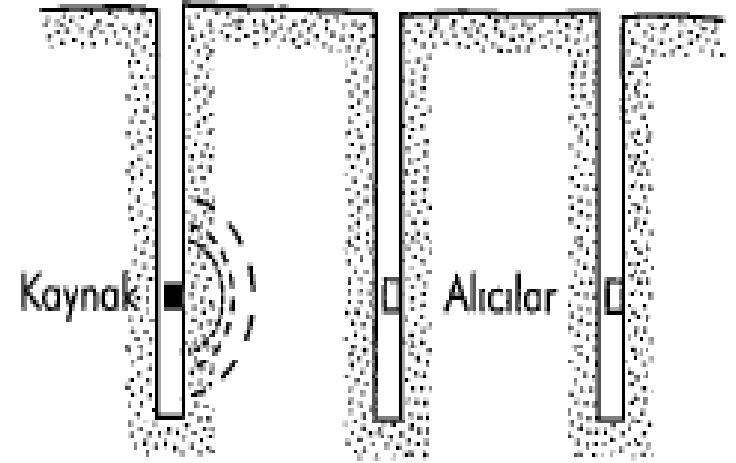
## c) Karşıt Kuyu Yöntemi

- Bu yöntemde en az iki sondaj kuyusu açılmakta biri içinde uygulanan titreşimlerden yayılan kütle dalgaları diğer kuyu içinde kaydedilmektedir.
- Dalga varış zamanı ve kuyu aralığından dalga yayılma hızları hesaplanmaktadır.
- Karşıt kuyu yönteminin en önemli unsurları, sondaj kuyuları, sismik kaynak, sismik alıcılar ile kayıt yapan ve zamanı ölçen aygıtlar olmaktadır.

## c) Karşıt Kuyu Yöntemi



(a)

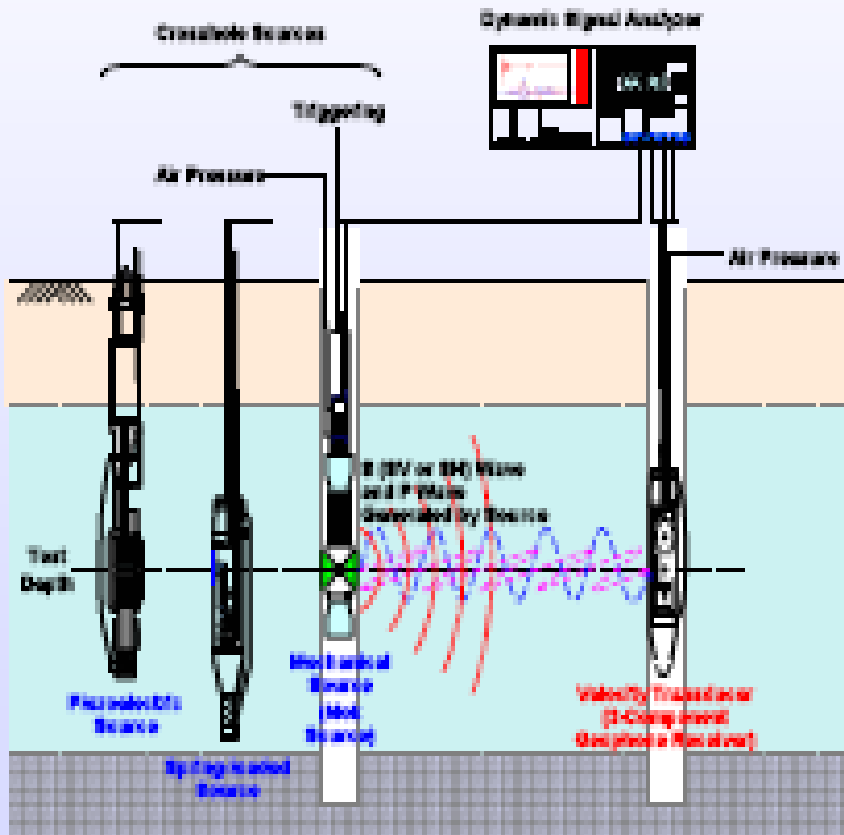


(b)

Karşıt kuyu yöntemi ile dalga yayılma hızlarının ölçülmesi

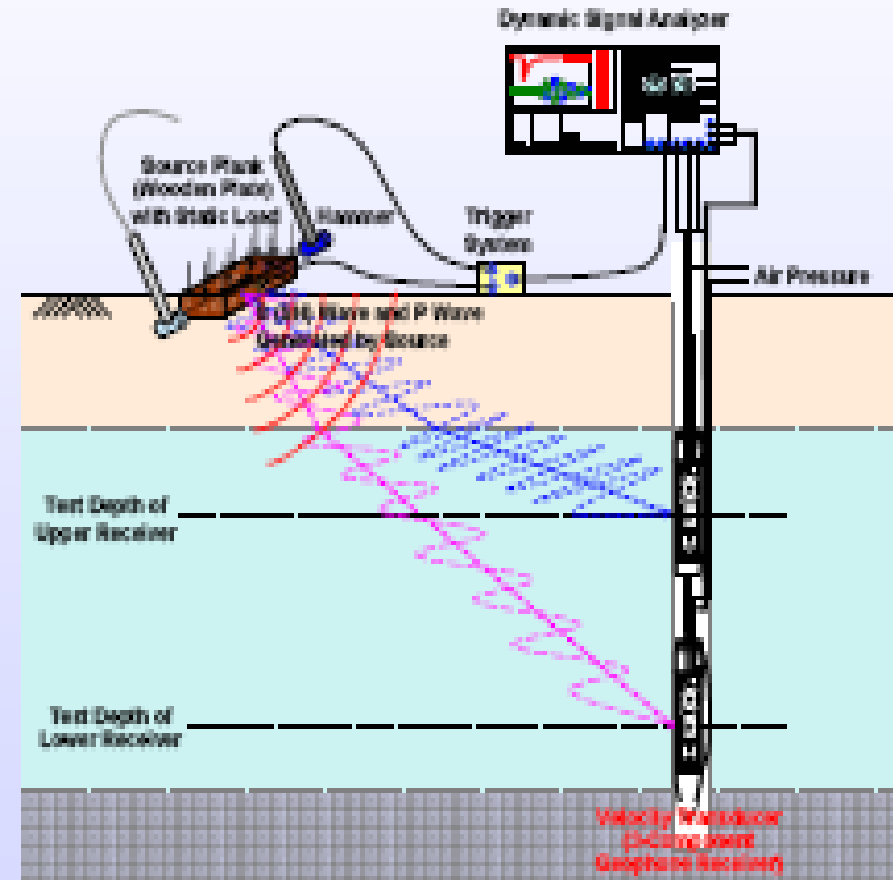
# Cross-hole and Down-hole methods

## Karşit Kuyu Yöntemi



Crosshole Seismic Method

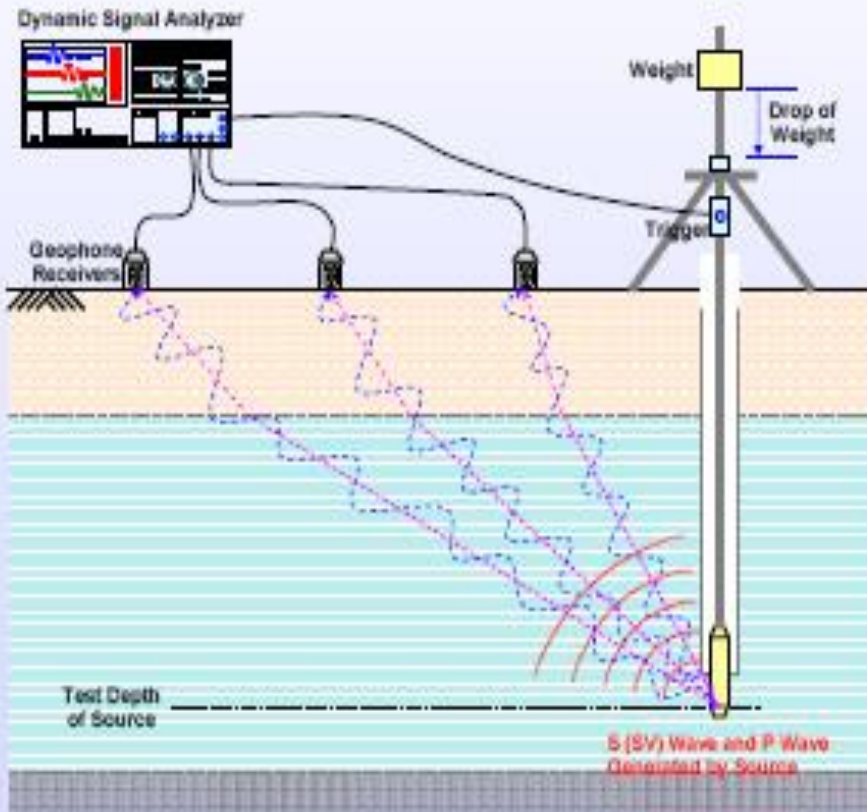
## Aşağı Kuyu Yöntemi



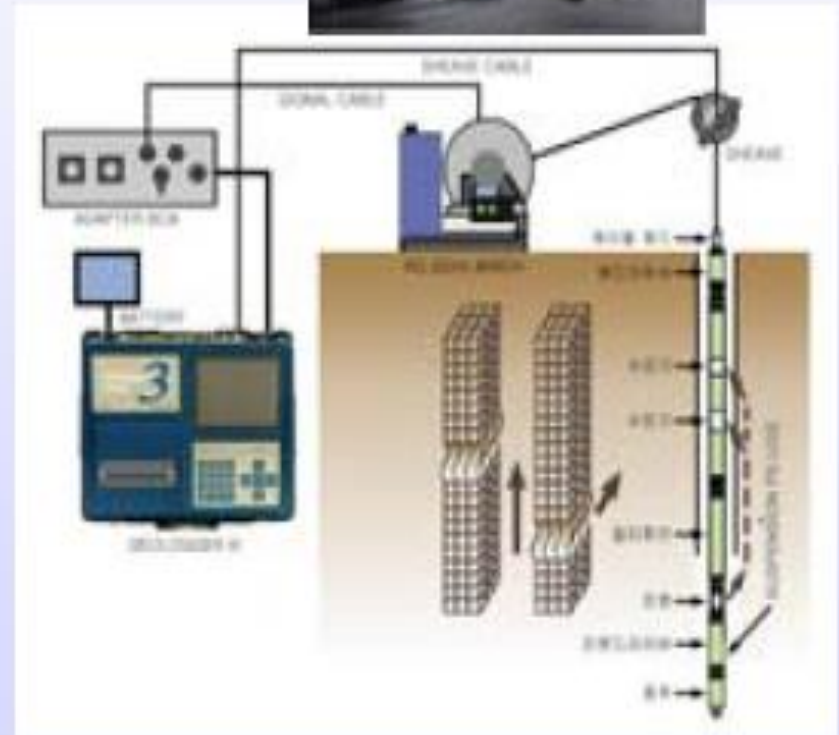
Downhole Seismic Method

# SPT-Uphole and SPS-logging methods

## Yukarı Kuyu Yöntemi

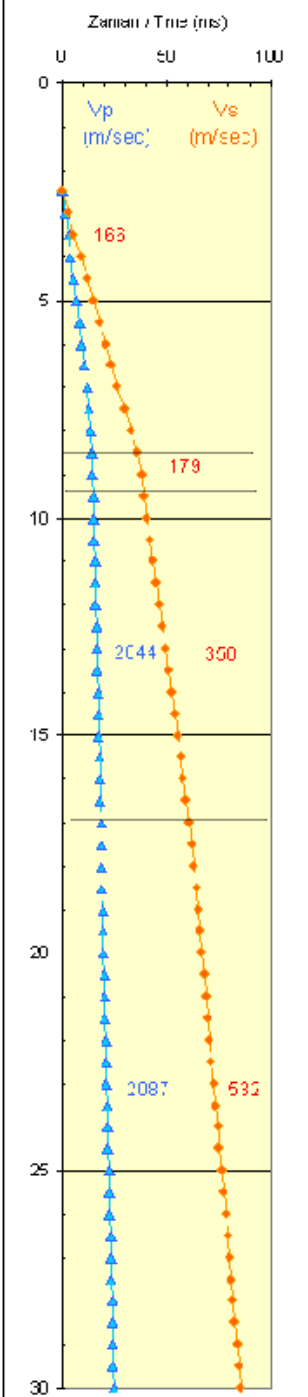
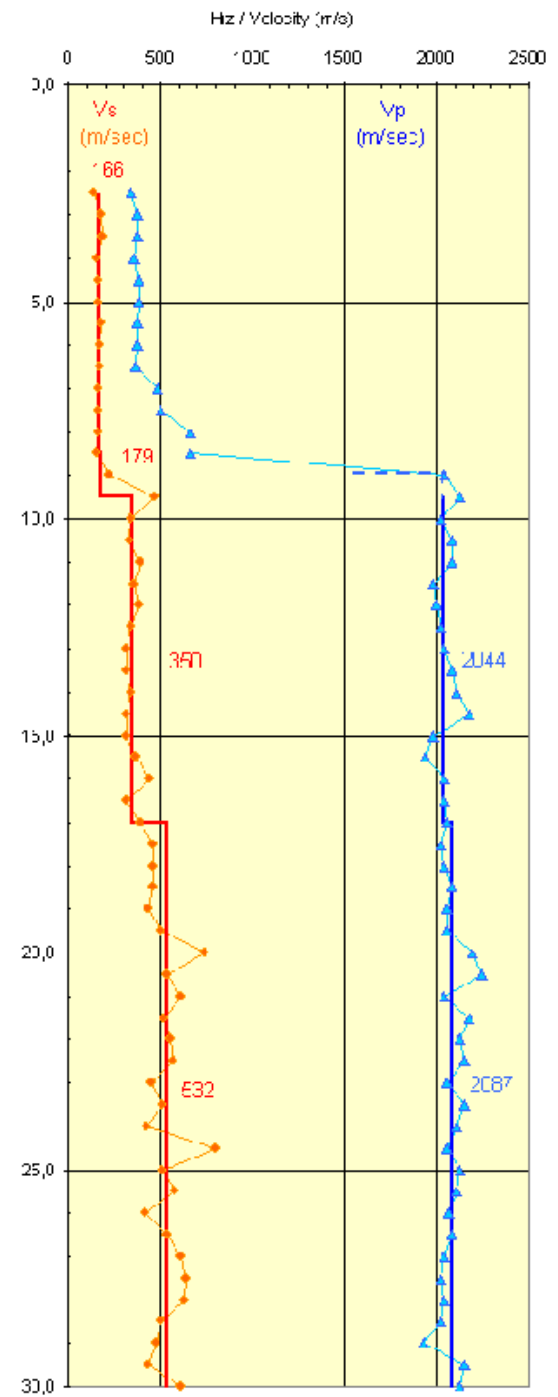


Uphole Seismic Method



Suspension PS Logging

Derinlik (m)	GRAFIK					FORNAS - VON	GÜNGÖREN	ÇUKURÇEŞME	GÜRPINAR
	N <sub>30</sub>	10	20	30	40				
0,50									
1,00									
1,50									
2,00	17								
2,50									
3,00									
3,50	23								
4,00									
4,50									
5,00	16								
5,50									
6,00									
6,50	23								
7,00									
7,50									
8,00	>50								
8,50									
9,00									
9,50	>50								
10,00									
10,50									
11,00	39								
11,50									
12,00									
12,50	>50								
13,00									
13,50									
14,00	>50								
14,50									
15,00									
15,50	>50								
16,00									
16,50									
17,00	72								
17,50									
18,00									
18,50	>50								
19,00									
19,50									
20,00	>50								
20,50									
21,00									
21,50	>50								
22,00									
22,50									
23,00									
23,50									
24,00	43								
24,50									
25,00									
25,50									
26,00									
26,50									
27,00									
27,50	28								
28,00									
28,50									
29,00									
29,50									
30,00									



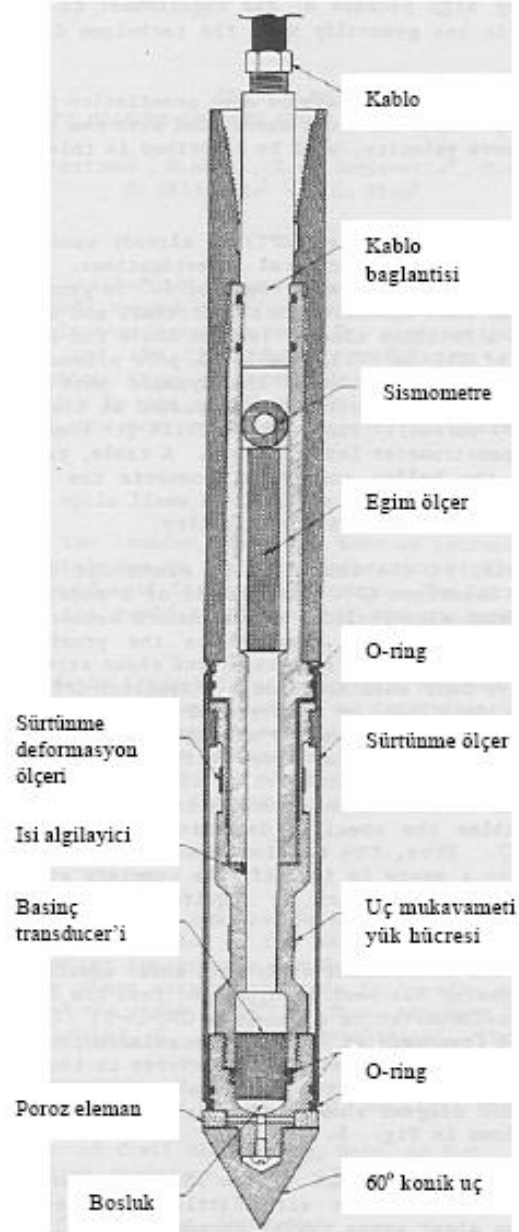


## d) Sismik Koni Deneyi

- Sismik kuyu içi metodların CPT deneyi ile birlikte gerçekleştirilmesi, temel zeminlerinin stratigrafik, mukavemet ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde çok hızlı, güvenilir ve ekonomik bir araç teskil etmiştir.
- Bir sismik koni penetrometre, sürtünme kolonunun hemen yukarısına yerleştirilmiş bir jeofon veya akselerometre yerleştirilmiş bir geleneksel konik penetrometreden oluşur. Şekil 'de sismik koni ucu gösterilmiştir.

# d) Sismik Koni Deneyi

Sismik koni ucu

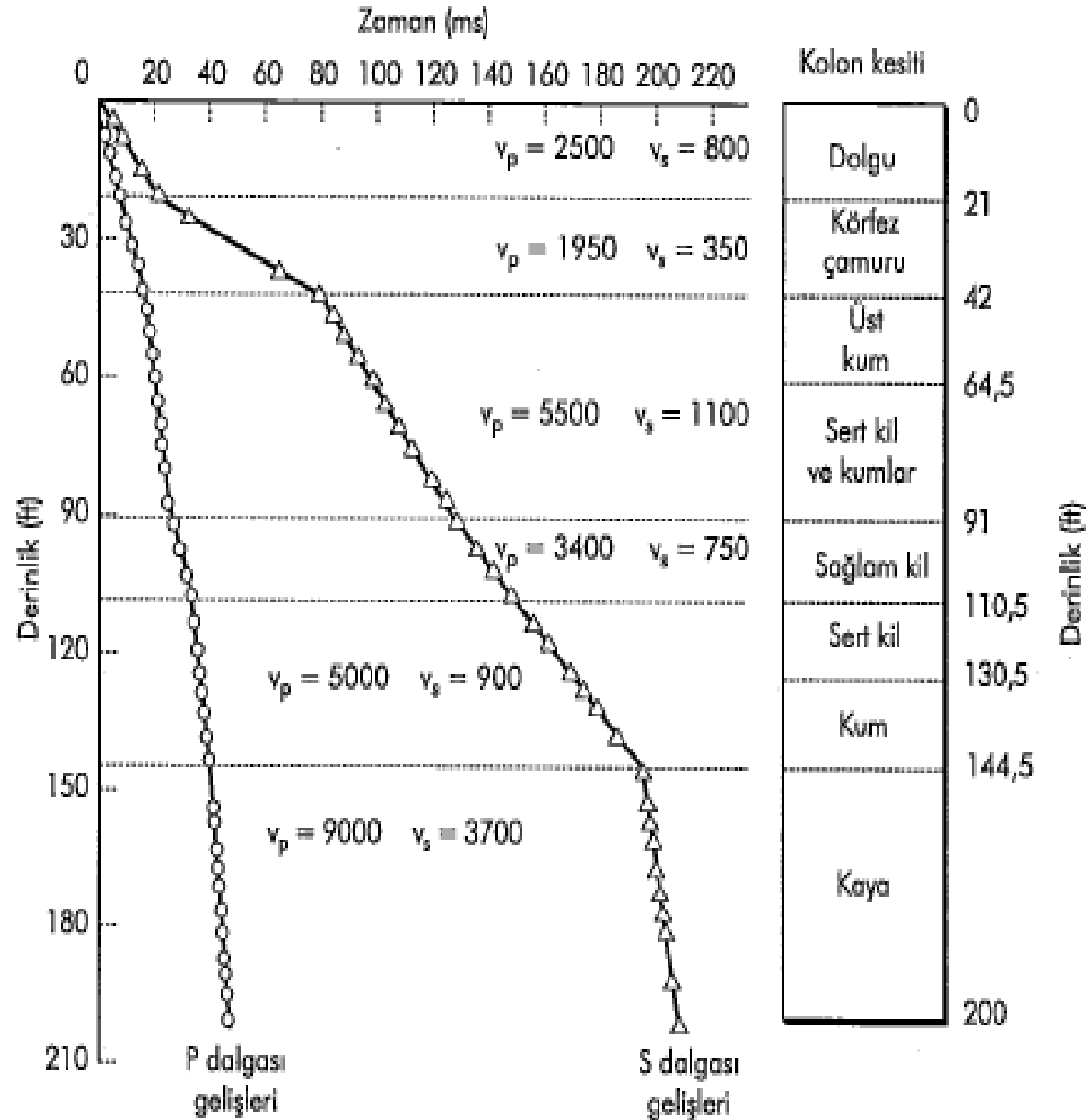


## d) Sismik Koni Deneyi

- Konik penetrometre ile ölçü alınırken değişik aşamalarda durulur ve zemin yüzeyinde uygulanan dinamik enerji ile üretilen dalgaların konik penetrometredeki jeofon ile algılanması sağlanır.
- Dinamik enerji genellikle konik uca bağlı tijlere sıkıca yaslandırılmış bir kirişin uçlarına balyoz ile çarpmak suretiyle uygulanmaktadır.
- Balyozun kenarına iliştirilmiş veya çarpmanın yapıldığı noktanın hemen yakınına yerleştirilmiş bir alıcı ile vuruş zamanı kaydedilmektedir.

# d) Sismik Koni Deneyi

- Şekil 'de Sismik koni deneyi ile belirlenen kayma dalgası ve basınç dalgası hızı profili gösterilmiştir



# Kayma dalgası hızının amprik eşitliklerden belirlenmesi

- Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) deneylerinden kayma dalgası hızı tahmin edilebilir.
- SPT deneyi arazide çok yaygın olarak uygulanmaktadır.
- Bu deneyle sınıflandırma için numune alınması, zeminin sıkılık derecesinin belirlenmesi ve (N) darbe sayısının bulunması mümkün olmaktadır.

# Kayma dalgası hızının amprik eşitliklerden belirlenmesi

- (N) darbe sayısı ile ( $V_s$ ) kayma dalgası hızı arasında kurulan korelasyonlarda bu deneyin kullanım sahasının yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır.
- Standart Penetrasyon Deneyinden elde edilen N darbe sayısına ve koni penetrasyon deneyinden belirlenen  $q_c$  bağlı olarak literatürde önerilmiş birçok amprik ilişki mevcuttur.

Çizelge 3.1 Arazi penetrasyon deneyleri - kayma dalgası hızı ilişkileri (MERM, 2003).

Araştırmacılar	İlişki ( $V_s$ ) (m/sn)	Zemin Türü
Imai (1977)	$V_s = 91 N^{0.377}$ $V_s = 102 N^{0.292}$ $V_s = 80.6 N^{0.331}$	Tüm zeminler Killer Kumlar
Otha ve Goto (1978)	$V_s = 85.35 N^{0.348}$ $V_s = 67.79 N^{0.219} D^{0.230}$ $V_s = 62.14 N^{0.219} D^{0.230}$	Tüm zeminler İnce kumlar (D : m) Killer (Tabaka Kal. (D : m))
Barrow ve Stokoe (1983)	$V_s = 154 + 0,64 q_c$	Tüm zeminler ( $q_c$ : $kg/cm^2$ )
Sykora ve Stokoe (1983)	$V_s = 100.5 N^{0.29}$ $V_s = 134 + 0.52q_c$	Kumlar Kumlar ( $q_c$ : $kg/cm^2$ )
Jinan (1987)	$V_s = 116,1(N + 0.3185)^{0.202}$	Holosen Çökelleri
Lee (1990)	$V_s = 57.4 N^{0.49}$ $V_s = 114.43 N^{0.31}$ $V_s = 105.64 N^{0.32}$	Kumlar Killer Siltler
İyisan (1996)	$V_s = 51.5 N^{0.316}$ $V_s = 55.3 q_c^{0.377}$	Tüm Zeminler Tüm Zeminler
Kiku (2001)	$V_s = 68.3 N^{0.292}$	Adapazarı zeminleri

# $G_{\max}$ Değerinin Arazi Deneyleeri ile Bulunması

- Arazide yapılan sismik ölçümlerden, kayma dalgası yayılma hızı ( $V_s$ ) belirlenebilmektedir.
- Buradan başlangıç (düşük genlikli) kayma modülü

$$G_{\max} = \rho V_s^2$$

ilişkisi kullanılarak hesaplanabilmektedir.



# $G_{\max}$ Değerinin Arazi Deneyleeri ile Bulunması

- Görüldüğü gibi kayma dalgası hızının ve zeminin yoğunluğunun bilinmesi durumunda zeminin kayma gerilmesi-kayma deformasyonu davranışını tanımlamada son derece önemli bir parametre olan kayma modülü ( $G$ ) belirlenebilir.
- Ayrıca kayma dalgası hızına bakarak zeminin gevşek/yumuşak, orta sıkı/orta katı veya sıkı/katı-çok katı olup olmadığı pratik amaçlar için belirlenebilir.
- Örneğin kayma dalgası hızı 700-750m/s'den büyük olan ortamlar kaya olarak kabul edilmektedir.

# $G_{\max}$ arazi araştırmaları veya ampirik eşitliklerle tahmini

Granüler zeminlerde

$$G_{\max} = 220 (k_2)_{\max} (\sigma'_m)^{0.5} \quad \text{Seed ve diğ. (1984)}$$

$$(k_2)_{\max} \cong 20 (N_{160})^{1/3} \quad \text{olup} \quad \sigma'_m = \left( \frac{1 + 2K_o}{3} \right) \sigma'_v$$

çok gevşek kumlarda  $(k_2)_{\max} = 30$ ,

çok sıkı kumlarda  $(k_2)_{\max} = 75$ ,

iyi derecelenmiş sıkı çakıllarda  $(k_2)_{\max} = 80-180$ ,

kaya dolgularda  $(k_2)_{\max} = 120-170$

# $G_{\max}$ arazi araştırmaları veya ampirik eşitliklerle tahmini

Kohezyonlu zeminler için

$$G_{\max} = 99.5 (P_a)^{0.305} \frac{(q_c)^{0.695}}{(e_o)^{1.13}} \quad \text{Mayne ve Rix (1993)}$$

Burada  $P_a$  atmosfer basıncı (kPa),  $q_c$  koni uç direnci (kPa),  $e_o$  boşluk oranıdır.

Tipik  $G_{\max}$  değerleri

yumuşak kilde 2750-13750 kPa,

katı kilde 6900-34500 kPa,

siltli kumda 27600-138000 kPa,

sıkı kum ve akıda 69000-345000 kPa,

kaya dolguda 1000000 kPa mertebelerindedir.

# Kayma Modülü

$$G_{\max} = \frac{V_s^2 \cdot \gamma_t}{g}$$

$G_{\max}$  : küçük şekil değiştirmede ( $\gamma_c < 1.0 \times 10^{-4}$  %) dinamik kayma modülü

$V_s$  : Kayma dalgası hızı

$\gamma_t$  : Zeminin toplam birim hacim ağırlığı

$g$  : yerçekimi ivmesi

# Kayma Modülü

$$G_{\max} = 1000 \cdot K_2 \cdot (\sigma'_m)^{1/2}$$

$$G_{\max}, \sigma'_m \quad (2000 \text{ psf} = 100 \text{ kPa})$$

$K_2$  kumlar için

$D_R$ (%)	$K_2$
30	34
40	40
45	43
60	52
75	59
90	70

$K_2 = 120 - 170$  (kayalar için)

# Kayma Modülü

$$G_{\max} = 16.5 \cdot 1000 \cdot N_{1,60}^{1/3} \cdot \sigma_v'^{1/2}$$

$G_{\max}$  : Küçük şekil değiştirme ( $\gamma_c < 1.0 \times 10^{-4}$  %) dinamik kayma mukavemeti

$N_{1,60}$  : SPT N sayısı

$\sigma_v'$  : Düşey efektif gerilme (psf)

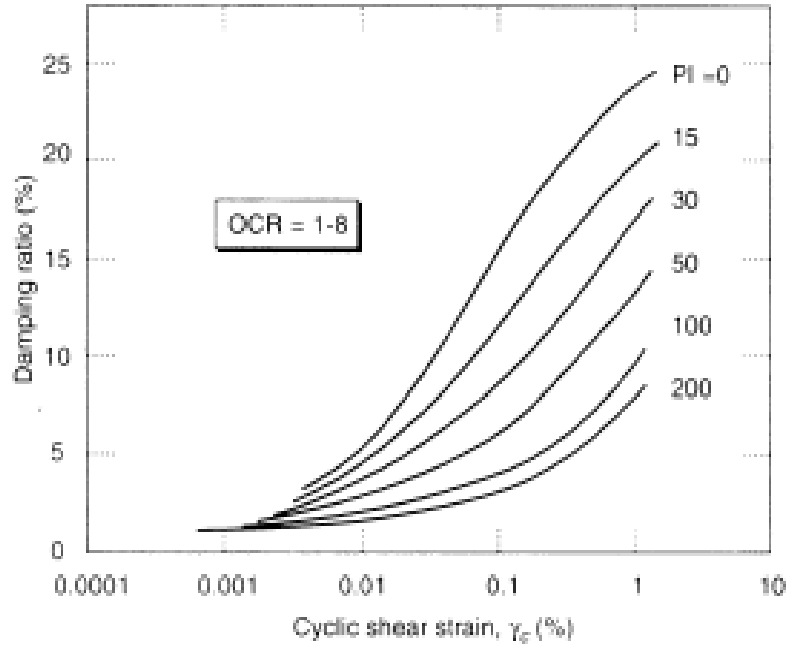
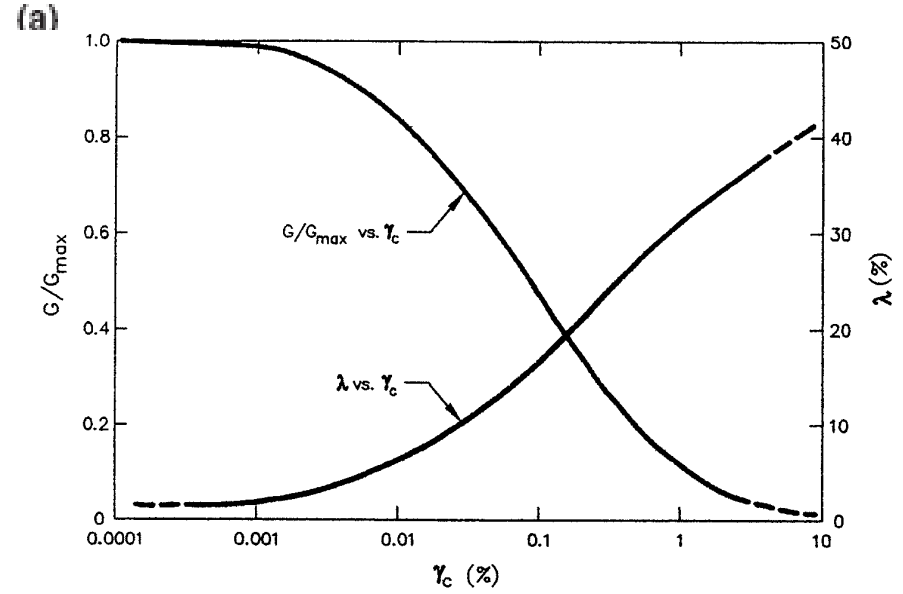
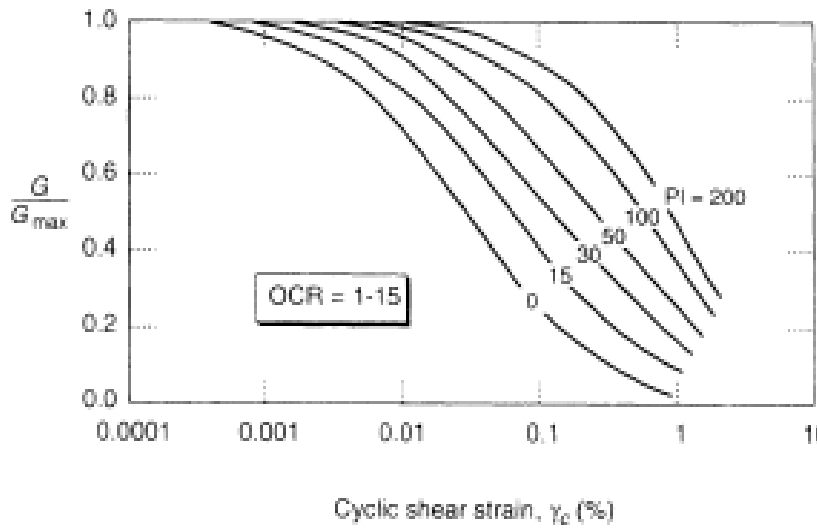
# Arazi deneylerinden $G_{max}$ 'ın tahmini

Yerinde Deney	Bağıntı	Zemin Türü	Kaynaklar	Açıklamalar
SPT	$G_{max} = 20.000(N_1)_{60}^{0,333} (\sigma'_m)^{0,5}$	Kum	Ohta ve Goto (1976), Seed vd. (1986)	$G_{max}$ ve $\sigma'_m$ birimi lb/ft <sup>2</sup>
	$G_{max} = 325N_{60}^{0,68}$	Kum	Imai ve Tonouchi, (1982)	$G_{max}$ birimi kips/ft <sup>2</sup>
CPT	$G_{max} = 1634(q_c)^{0,250} (\sigma'_v)^{0,375}$	Kuvars kumu	Rix ve Stokoe (1991)	$G_{max}$ , $q_c$ ve $\sigma'_v$ birimi kPa; İtalya'daki arazi deneylerine ve kalibrasyon oda deneylerine dayalı
	(Şekil 6.41)	Silis kumu	Baldi vd. (1986)	$G_{max}$ , $q_c$ ve $\sigma'_v$ birimi kPa; İtalya'daki arazi verilerine dayalı
	$G_{max} = 406(q_c)^{0,695} e^{-1,130}$	Kil	Mayne ve Rix (1993)	$G_{max}$ , $q_c$ ve $\sigma'_v$ birimi kPa; dünyanın değişik yerlerine ait verilere dayalı
DMT	$G_{max}/E_d = 2,72 \pm 0,59$	Kum	Baldi vd. (1986)	Oda kalibrasyon deneylerine dayalı
	$G_{max}/E_d = 2,2 \pm 0,7$	Kum	Bellotti vd. (1986)	Arazi deneylerine dayalı
	$G_{max} = \frac{530}{(\sigma'_v / p_a)^{0,25}} \frac{\gamma_D / \gamma_w - 1}{2,7 - \gamma_D / \gamma_w} K_o^{0,25} (p_a \sigma'_v)^{0,5}$	Kum, silt, kil	Hryciw (1990)	$G_{max}$ , $p_a$ ve $\sigma'_v$ birimleri aynı; $\gamma_D$ : zeminin dilatometreden belirlenen birim ağırlığı; arazi deneylerine dayalı
PMT	$3,6 \leq (G_{max}/G_{ur,c}) \leq 4,8$	Kum	Bellotti vd. (1986)	$G_{ur,c}$ : tekrarlı PMT'den düzeltilmiş boşaltma-yükleme modülü
	$G_{max} = 1,68 G_{ur}/\alpha_p$	Kum	Byrne vd. (1991)	$G_{ur}$ : PMG'nin boşaltma-yükleme kısmının sekant modülü; $\alpha$ : boşaltma-yükleme şartlarına bağlı bir faktör; teoriye ve arazi deneylerine dayalı

# Modül Azalımı $G/G_{max}$ ve Sönüm İlişkileri

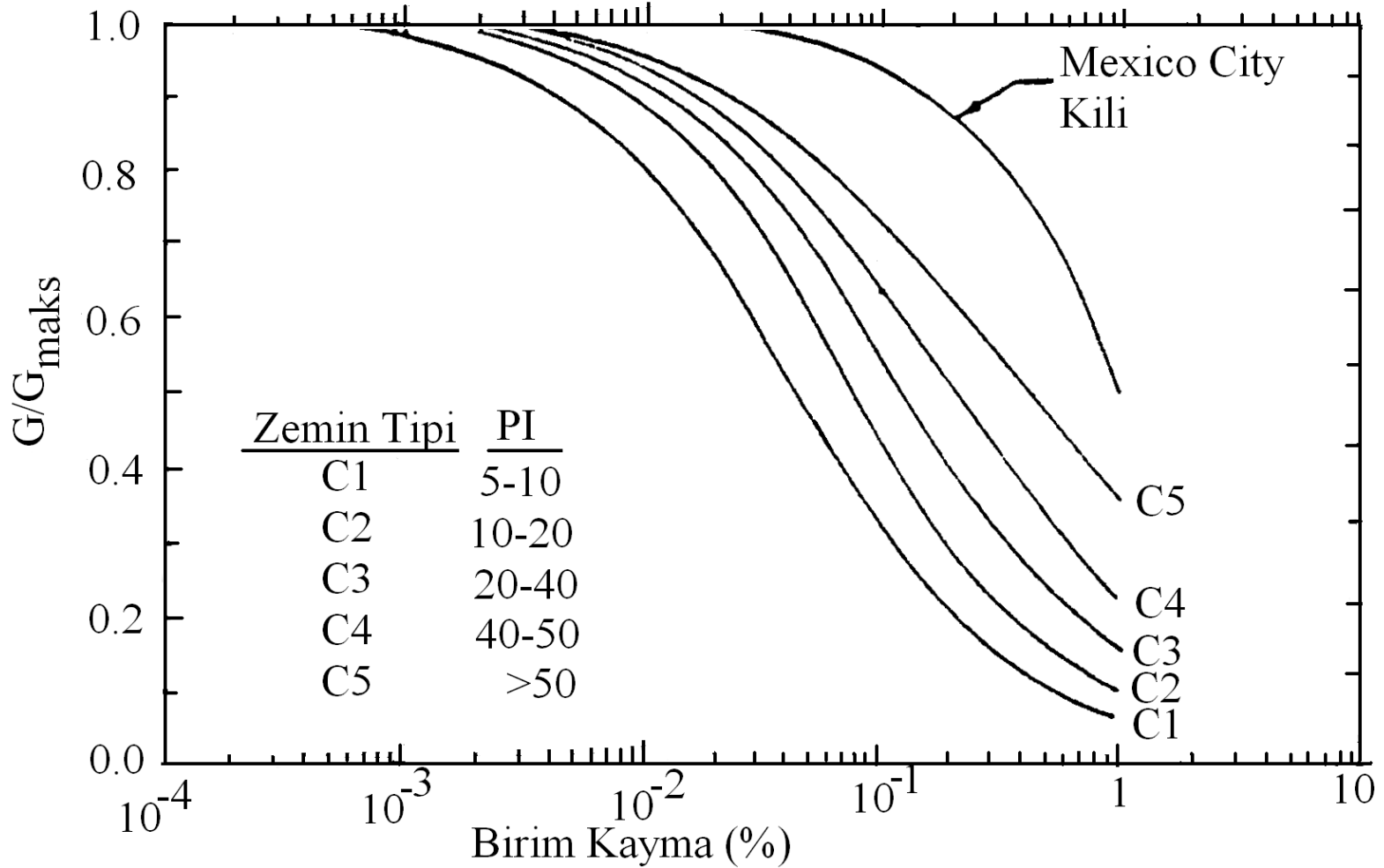
- Zeminin plastisitesi  $G/G_{max}$  (modül azalım) eğrisinin biçimini oldukça fazla etkilemektedir.
- Bu eğriler, ileri dercede plastik zeminlerin doğrusal tekrarlı eşik kayma birim deformasyonu  $\gamma$ 'nin düşük plastisiteli zeminlerdekinden büyük olduğunu göstermiştir.
- Bu özellik, zemin çökelinin bir deprem hareketini büyütme ve sönümlenme tarzını kuvvetlice etkilemektedir.
- Şekil 'de killi zeminlerde plastisite ve AKO'nun  $G/G_{max}$  ve Sönüm ilişkilerine etkileri gösterilmiştir.





Zeminlerde plastisite ve AKO'nun  $G/G_{max}$  ve Sönüm ilişkilerine etkileri

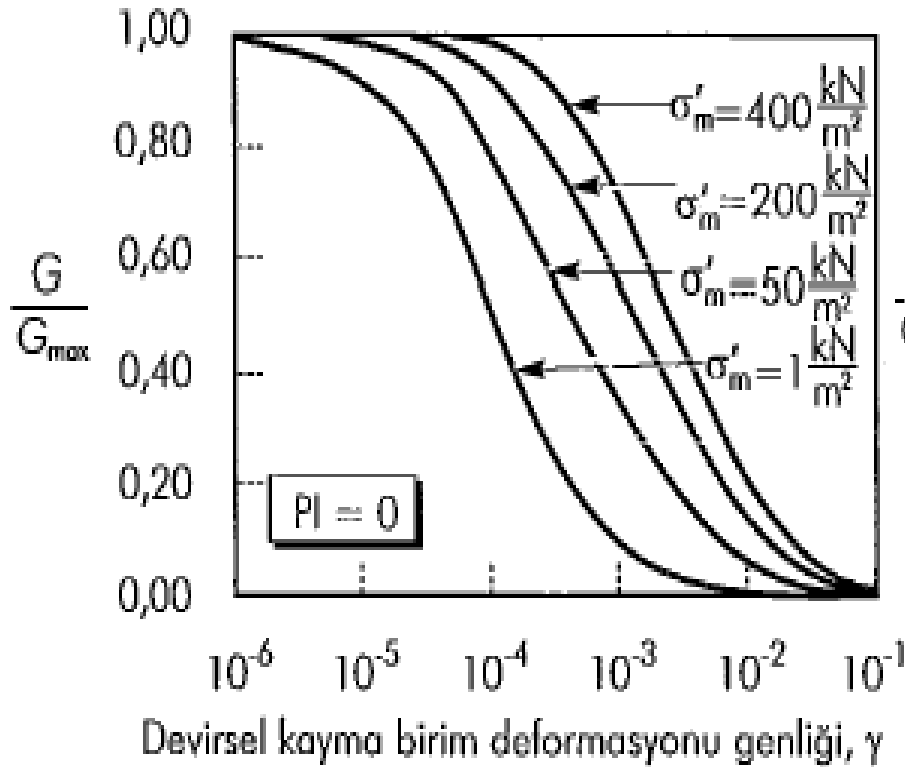
# Farklı Plastisite İndisine Sahip Zeminler için Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrileri



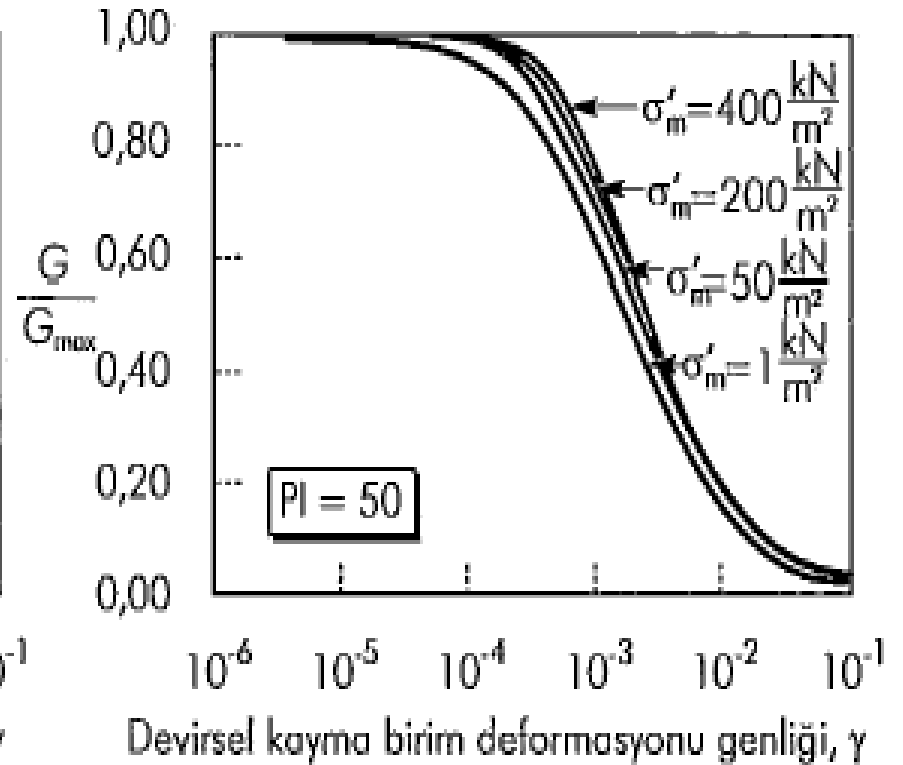
# Modül Azalımı $G/G_{\max}$ ve Sönüm İlişkileri

- Modül azalım davranışı özellikle **düşük plastisiteli zeminlerde** olmak üzere efektif çevre basıncından etkilenir.
- Yüksek efektif çevre basınçlarındaki doğrusal tekrarlı eşik kayma birim deformasyonu  $\gamma$ , küçük efektif çevre basınçlarındakinden büyüktür.
- Efektif çevre basıncı ile plastisite indeksinin modül azalım davranışı üzerindeki etkisi Şekil 'de gösterilmiştir.

# Efektif çevre basıncı ile plastisite indeksinin modül azalım davranışı üzerindeki etkisi



(a)

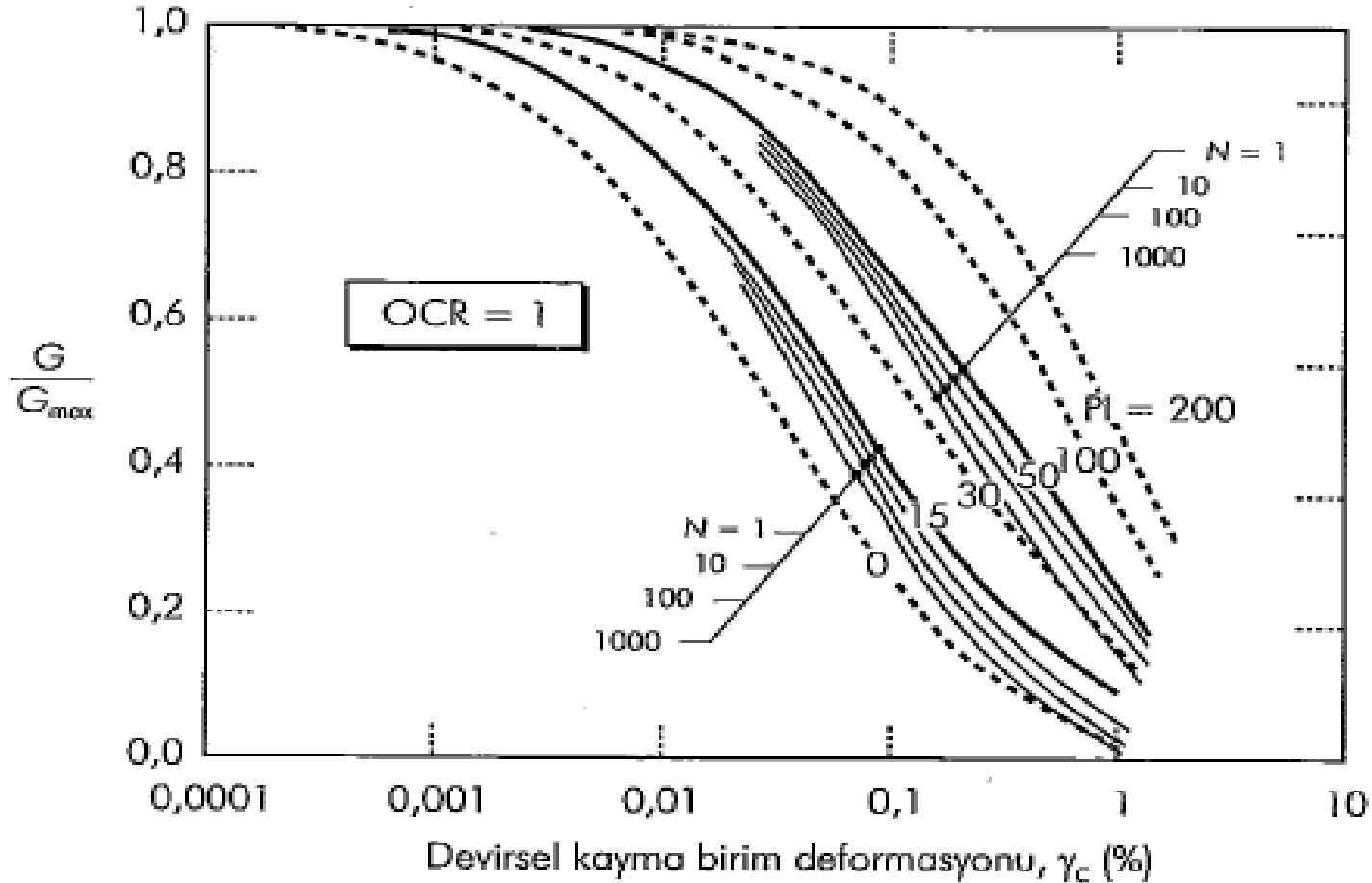


(b)

# Modül Azalımı $G/G_{\max}$ devir sayısı N İlişkileri

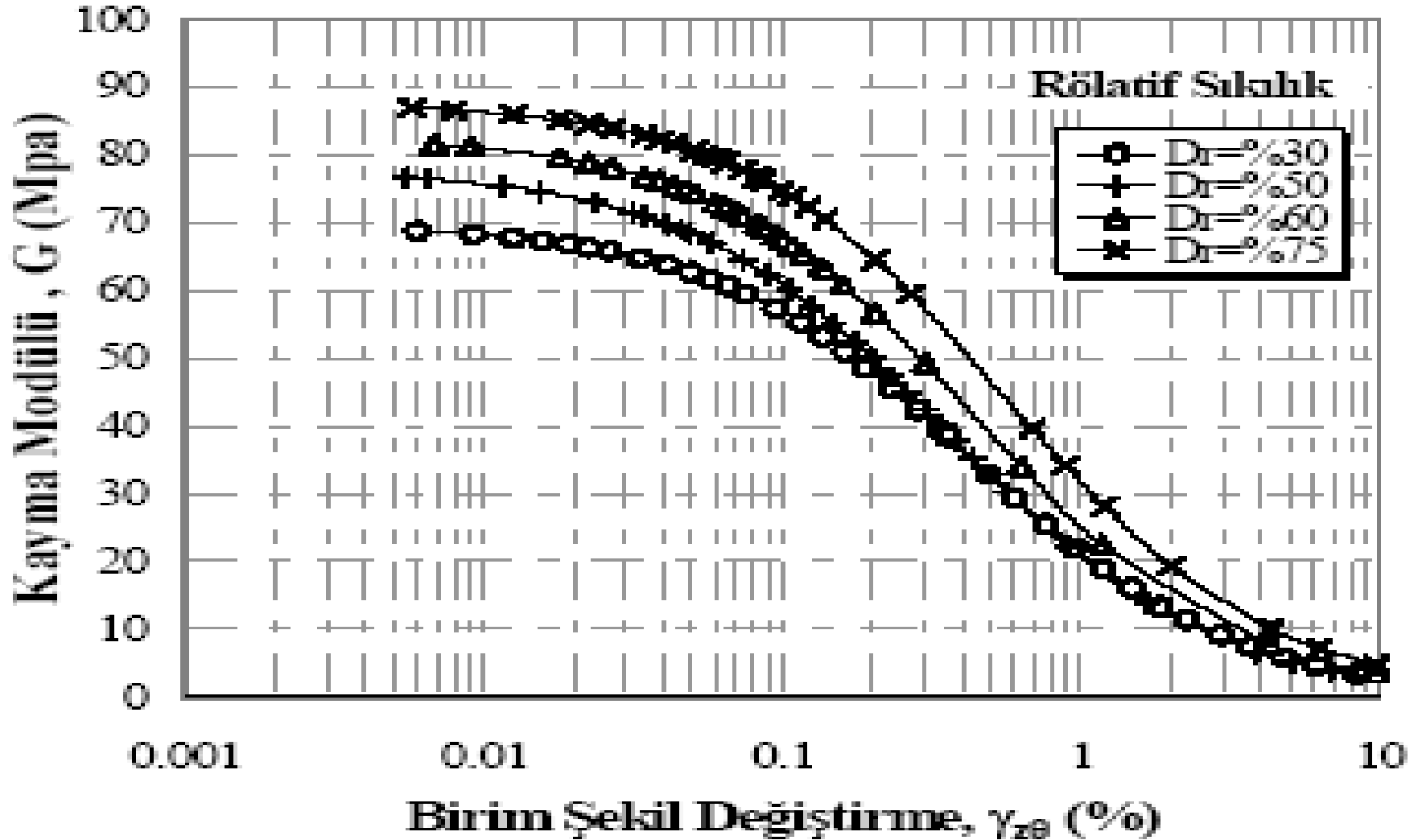
- killi ve kumlu zeminlerde, kayma birim deformasyonu genliği artan devir sayısı ile birlikte azalmaktadır.
- Böylece çevrimli yükler altında numunenin rijitliğinin de azaldığı görölmektedir.

# Modül Azalımı $G/G_{max}$ , Plastisite indeksi. $N$ İlişkileri



Killi ve kumlu zeminlerde, kayma birim deformasyonu genliği artan devir sayısı ile birlikte azalmaktadır.

# Modül Azalımı $G/G_{max}$ ve Sıkılık İlişkileri



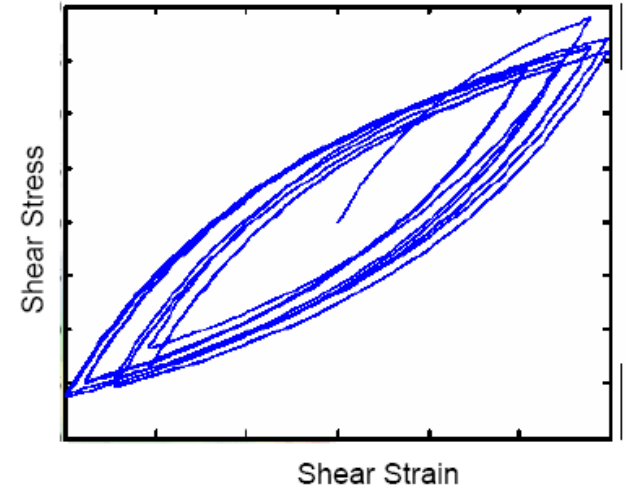
# Zeminlerin Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri

- Genel olarak zeminler elasto-plastik davranış gösteren anizotrop malzemelerdir
- zeminlerin farklı şekil değişirme seviyelerinde farklı gerilme-şekil değişirme davranışı gösterdiği bilinmektedir.



# Zeminlerin Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri

- Gerilme-şekil değişirme karakteristiği; dinamik kayma modülü ve sönüm oranı parametrelerinin birim deformasyon düzeyi ile değişimi üzerinden incelenir.
- Deformasyon kontrollü deneylerde çevrim sayısı arttıkça (deformasyon düzeyi sabit) kayma gerilmesi genliklerinin azalması histerez ilmiklerinin küçülmesine ve yatıklaşmasına neden olmaktadır.
- Gerilme-şekil değişirme özellikleri olan dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri her bir çevrim sonunda (histerez ilmiği üzerinden) bulunur.



# Zeminlerin Dinamik Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri

- Zeminlerin dinamik davranışının şekil değişirme aralığına göre farklılık gösterdiği
- ve dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesinde ve analizinde olası şekil değişirme seviyesinin belirleyici bir rol oynadığı bilinmektedir.
- Şekil değişirme seviyelerine göre zemin davranışında beklenen özellikler Şekillerde özetlenmiştir.

# Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri

- Şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını ifade edebilmek için teorik olarak yaklaşık  $10^{-5}$ 'den küçük olması gerektiği kabul edilmektedir.
- Bu şekil değiştirme seviyelerinde ve elastik sınırlar içerisinde dinamik kayma modülünün maksimum değerinde ve sabit olduğu kabul edilebilir.

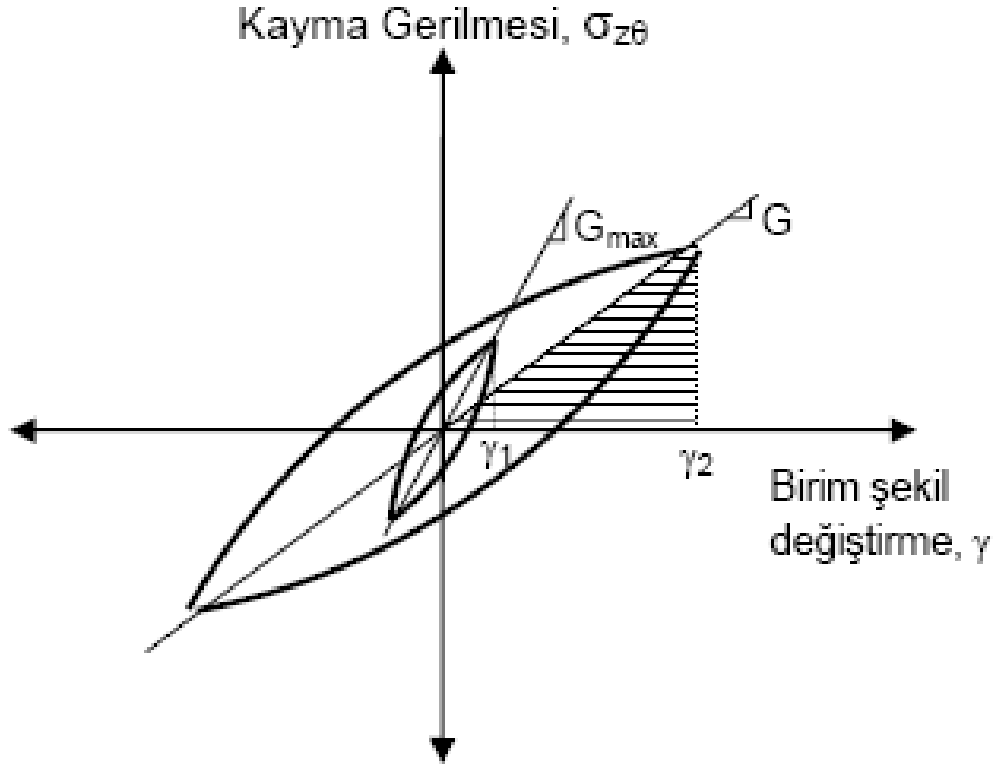
# Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri

- Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak  $10^{-3}$  civarında olması durumunda zeminin davranışları elasto-plastik bir hal alır ve dinamik kayma modülü şekil değiştirmeler arttıkça azalır.
- Aynı zamanda bu şekil değiştirme seviyelerinde dinamik yüklemelerle birlikte enerji sönümlenmesi de başlar ve zeminin bu özelliği sönüm oranı ile ifade edilir.

# Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri

- Zeminlerdeki enerji sönümlenmesi histeretik biçimdedir.
- Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeritik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile dinamik kayma modülü ve sönüm oranı Şekil ' de gösterilmiştir.
- Bu şekil değiştirme seviyelerinde zemin özelliklerini temsil edebilmek için dinamik kayma modülü ve sönüm oranı şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak belirlenmelidir.

# Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri



Şekil . Farklı şekil değişirme genliklerindeki histeritik gerilme-şekil değişirme ilişkisi

# Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri

- Kayma şekil değiştirmelerinin  $10^{-2}$  den büyük olması durumunda zemin özellikleri şekil değiştirmeler arttıkça değişmeye ve kalıcı şekil değiştirmeler oluşmaya başlar.
- Bu şekil değiştirme seviyesinden sonra dinamik kayma modülü ve sönüm oranı yükleme çevrimleri ile değişmeye devam eder.
- Bu durumda zemin davranışı azalan histerisis türü olarak isimlendirilir.