



Geoteknik Deprem Mühendisliği Kurs Notları

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Geoteknik Anabilim Dalı
kilic@yildiz.edu.tr

20 Kasım 2016
İstanbul



Deprem Mühendisliği

Depremin, insan ve çevresi üzerindeki etkilerini azaltmaya yönelik yapılan çalışmaları kapsar.

Deprem mühendisliği;

- Jeoloji
- Sismoloji
- Geoteknik mühendisliği,
- Yapı mühendisliği,
- Sismik tehlike analizleri

gibi alanları da kapsayan geniş bir disiplindir.

Geoteknik Deprem Mühendisliği

Dersinin İçeriği

Depremsellik, deprem özelliklerini tanıma

Depremler sırasında yer hareketi parametreleri

Yer hareketi parametrelerinin belirlenmesi – yerel zemin koşulları dikkate alınarak

Dinamik etkiler altında zemin davranışı – malzeme parametrelerinin belirlenmesi

Dinamik Davranış Analizleri (yer tepki analizleri)

Zemin Büyütmesi

Zemin Sıvılaşması

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi

Sıvılaşmayla ilgili zemin davranışı

Geoteknik Yapıların Sismik Tasarımı

Şev, Dolgu, Temel, Dayanma Yapıları,

Zemine gömülü yapılar

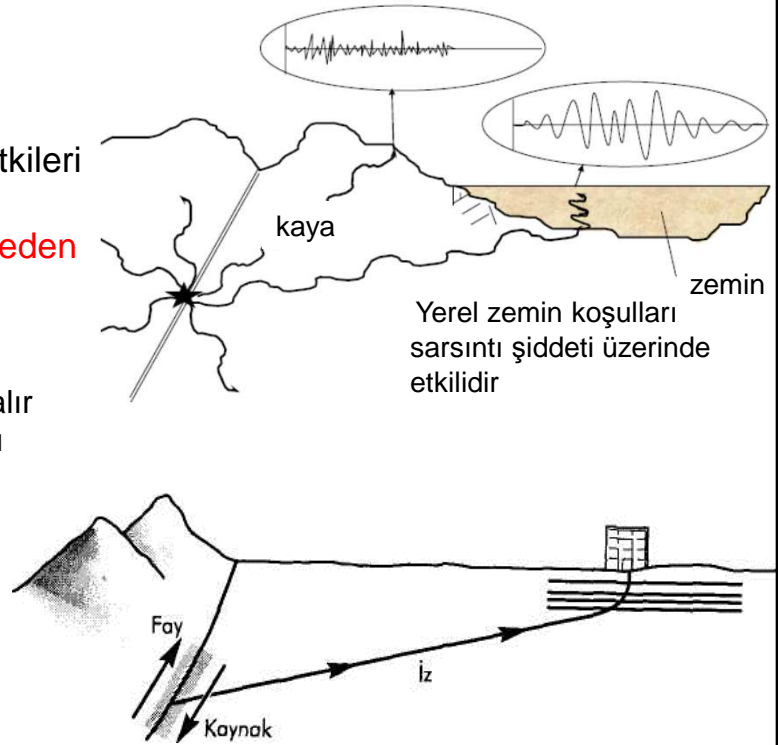
**DEPREMSELLİK VE DEPREM
ÖZELLİKLERİNİ TANIMA**

Deprem hareketi

Kaynak etkileri
İz etkileri
Yerel zemin koşulları etkileri

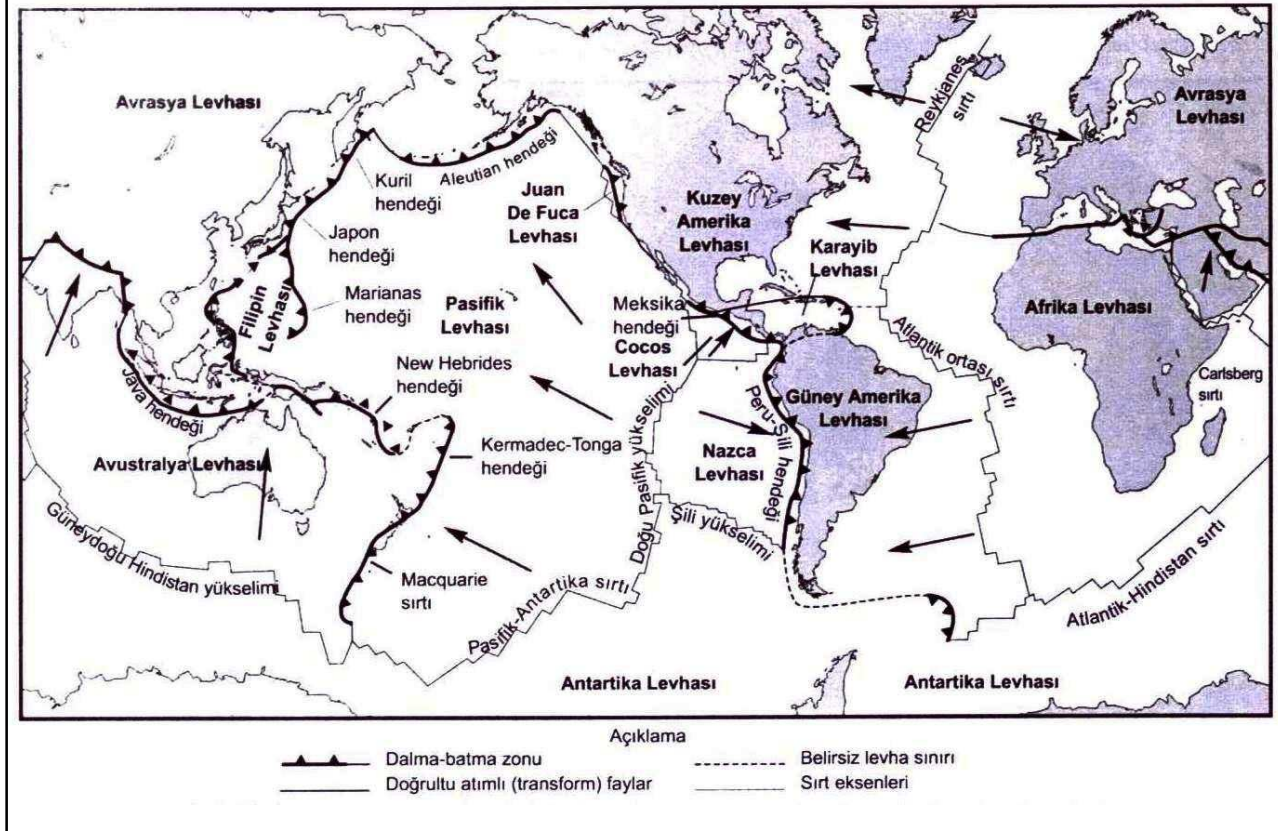
Sarsıntının şiddetini kontrol eden parametreler

- Magnitüd - enerji miktarı
- Uzaklık – sarsıntı uzaklıkla azalır
- Yerel zemin koşulları -sarsıntıyı büyütebilir - küçültebilir

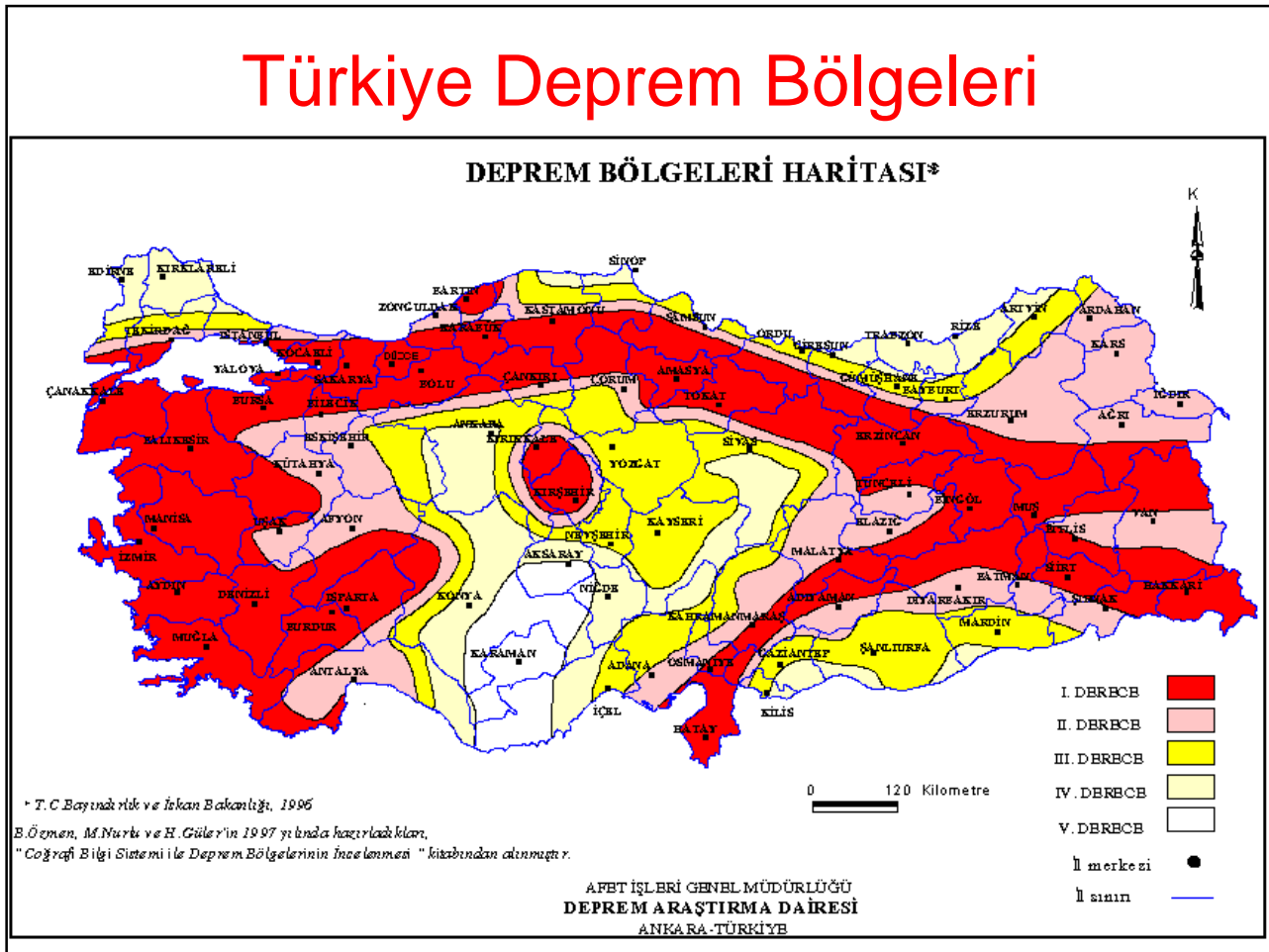


Yerel zemin koşulları sarsıntı şiddeti üzerinde etkilidir

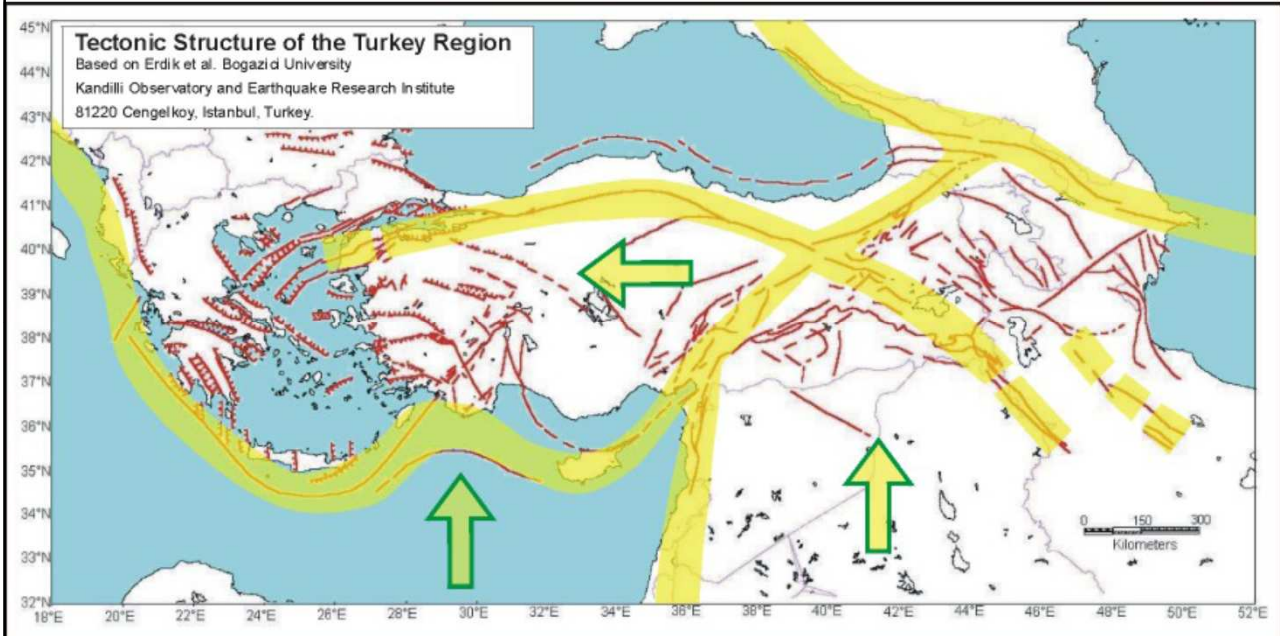
Depremler levha sınırlarında oluşur



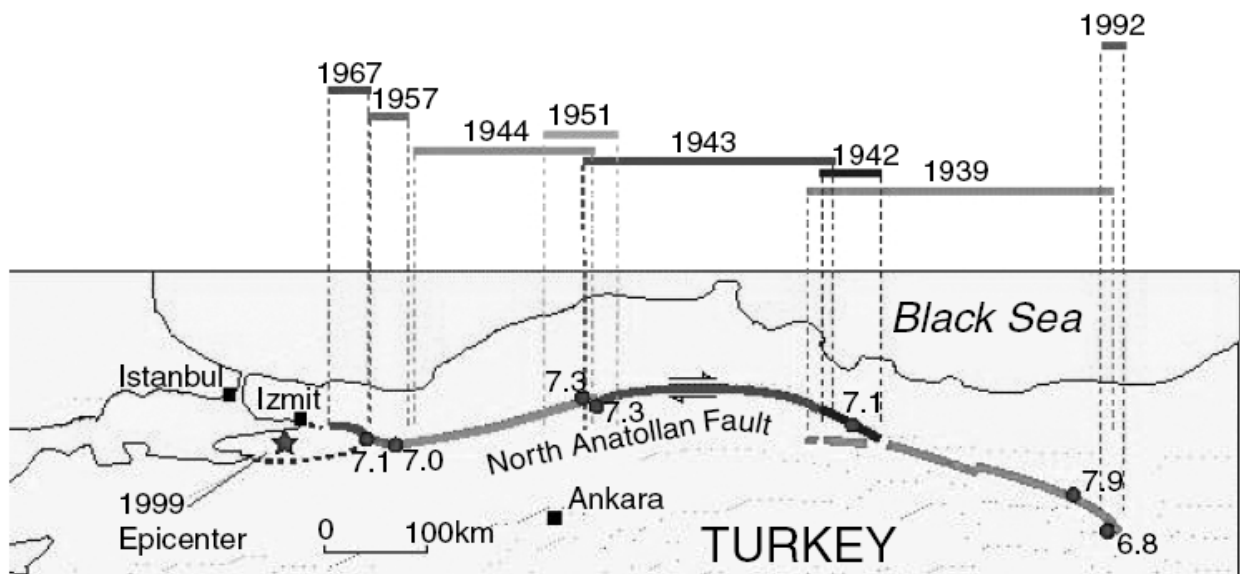
Türkiye Deprem Bölgeleri



Türkiye'deki Ana Faylar



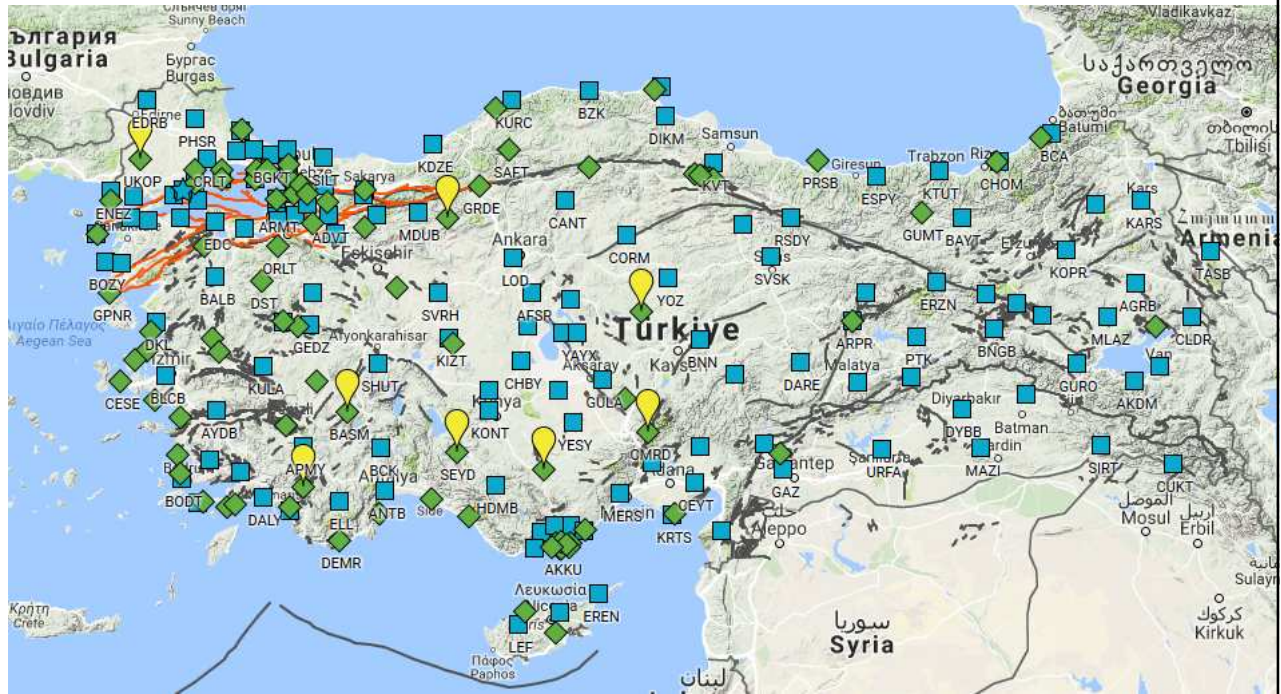
Kuzey Anadolu Fayı depremleri



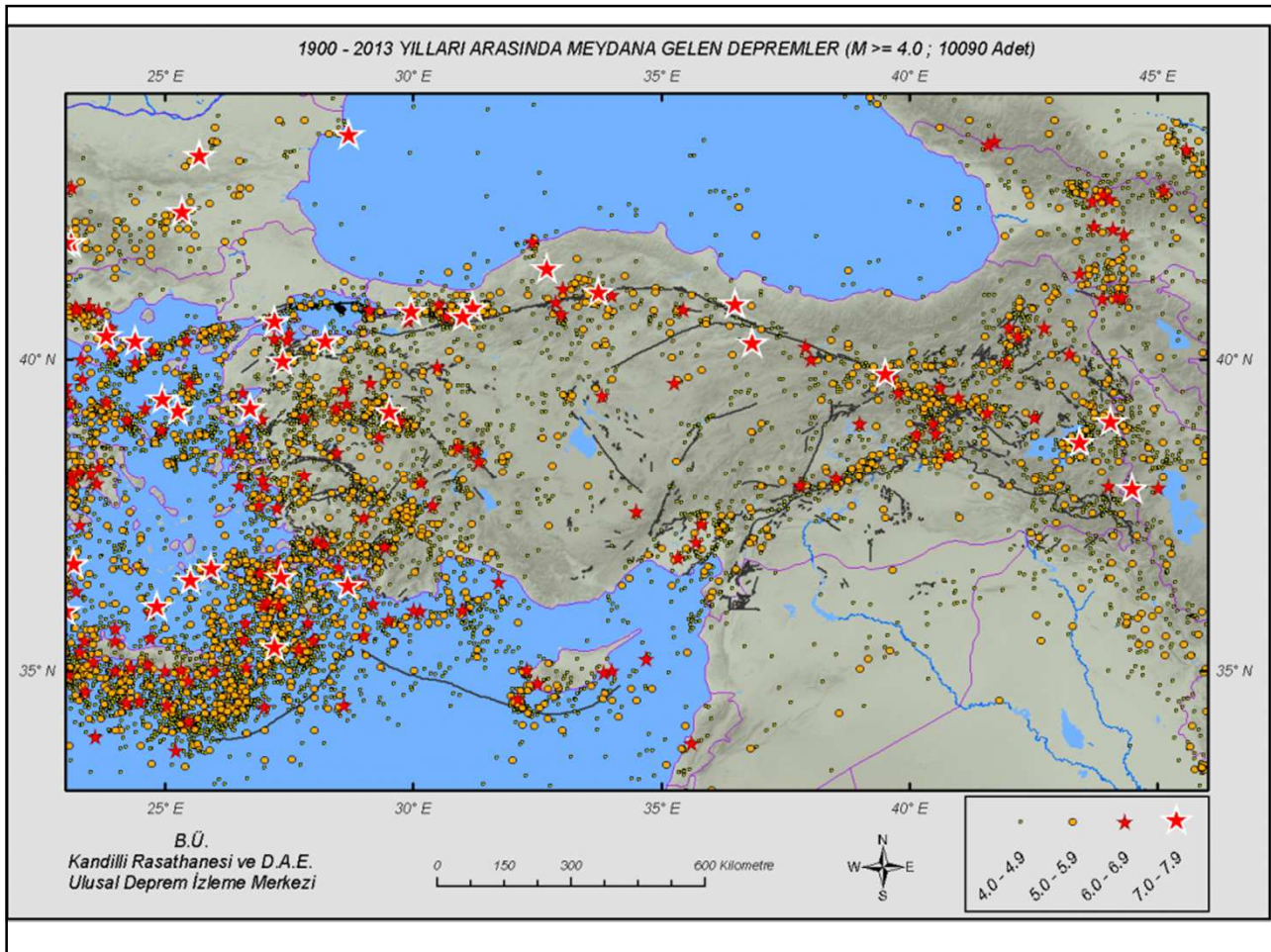
- Historical earthquake epicenter and magnitude
- 1957 Extent of surface rupture
- ⇌ Direction of relative motion on fault

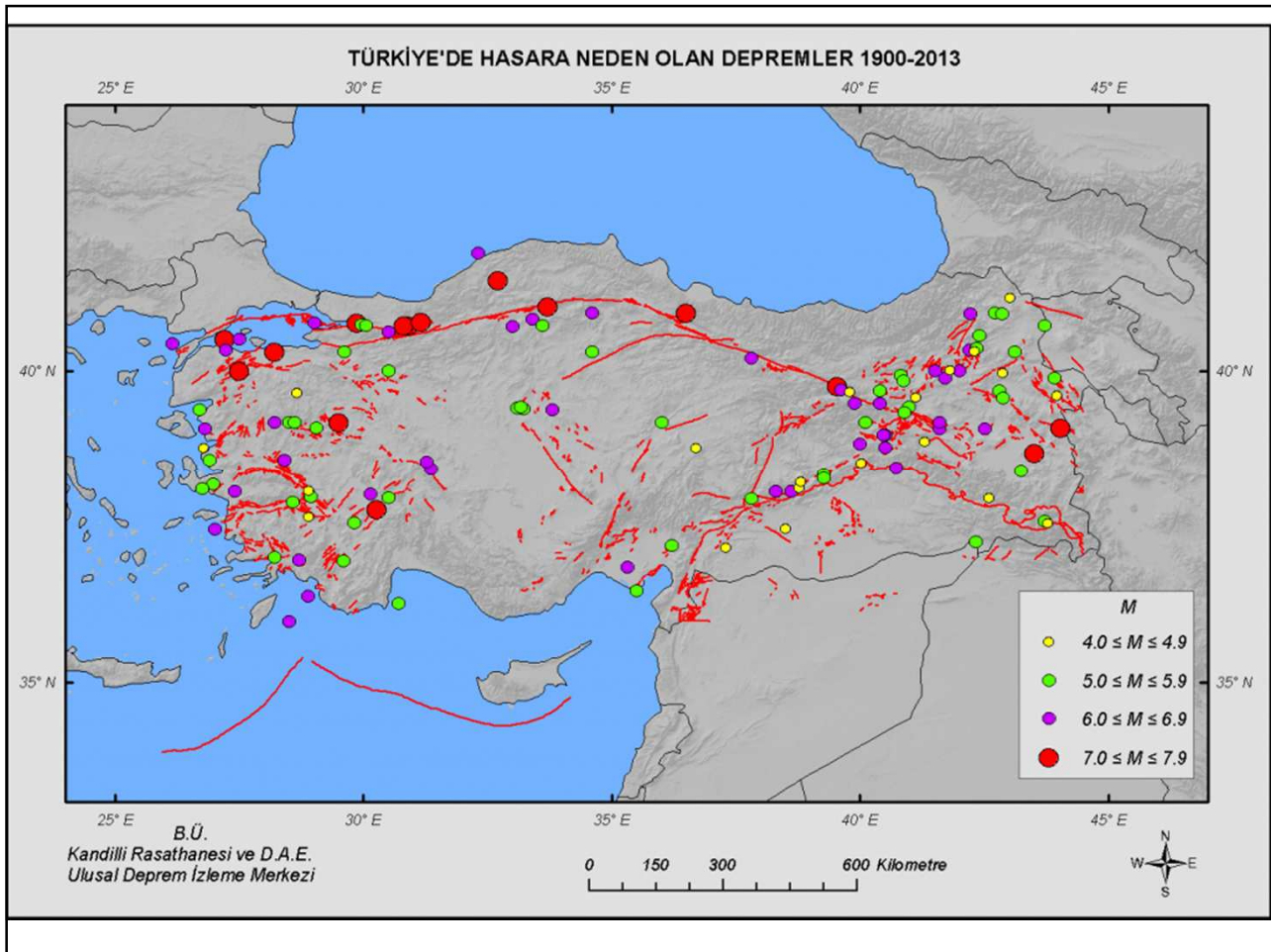
(From quake.wr.usgs.gov/study/)

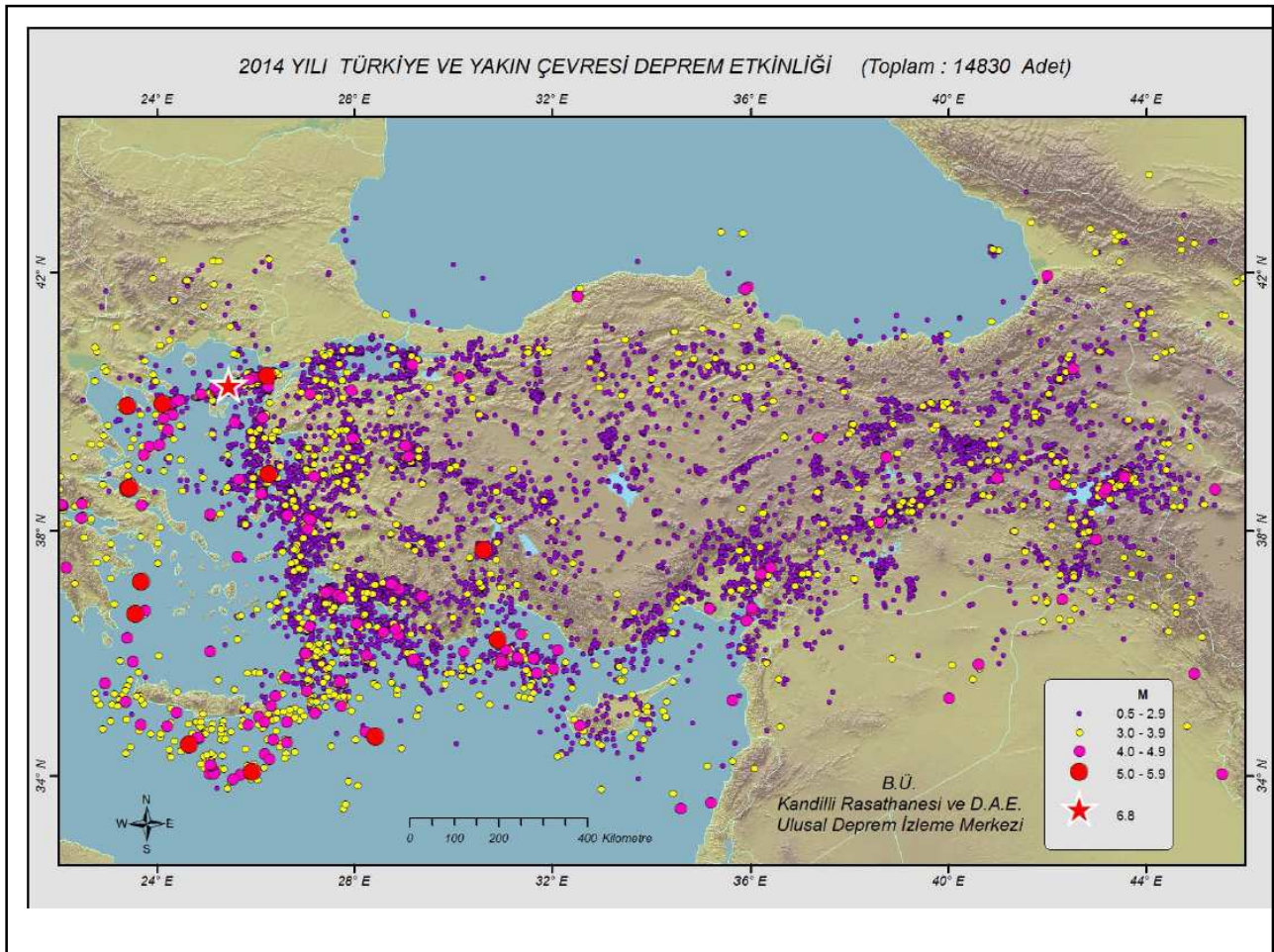
Deprem kayıt istasyonları (toplam 284 istasyon)



B.Ü. KRDAE
BÖLGESEL DEPREM-TSUNAMI
İZLEME VE DEĞERLENDİRME MERKEZİ





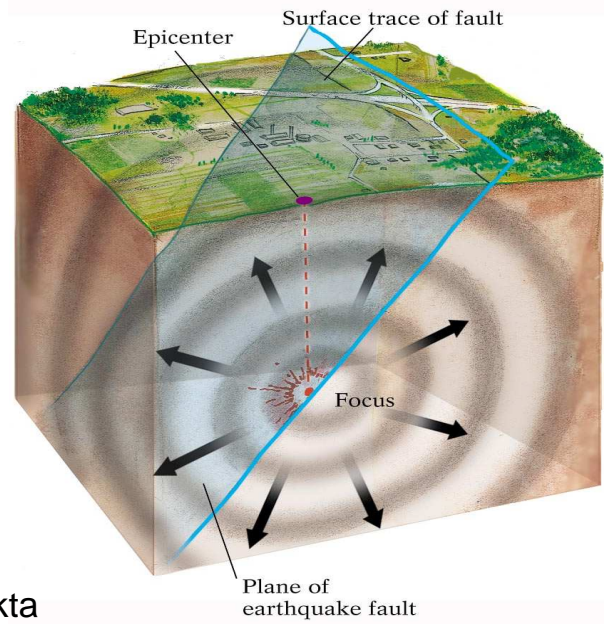
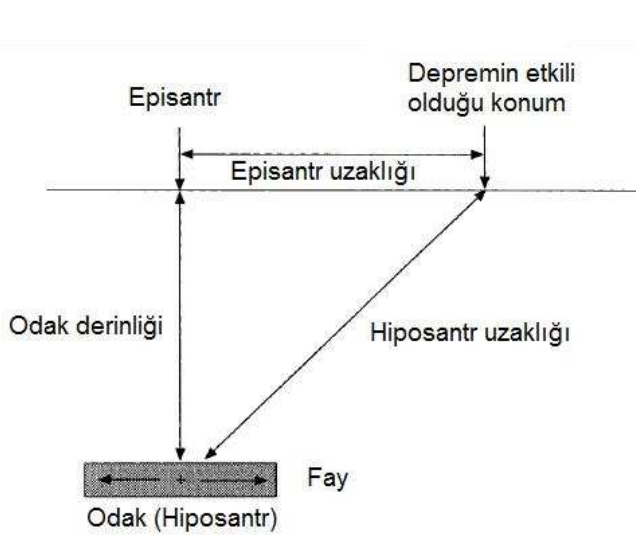


DEPREMLE İLGİLİ TEMEL BÜYÜKLÜKLER

Yer hareketi parametreleri belirlenirken

- a) Fay geometrisi
 - b) Sismik dalgalar
 - c) Deprem özellikleri
- bilinmelidir.**

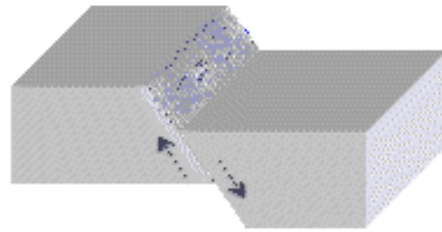
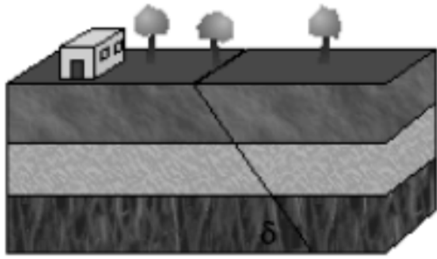
Deprem yerinin tanımlanması için notasyonlar



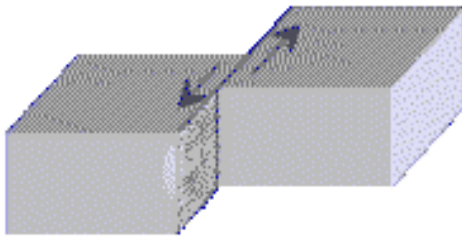
Gerçekte, enerjinin ortaya çıktığı bir nokta olmayıp bir alandır.

Pratik uygulamalarda nokta olarak kabul edilmektedir.

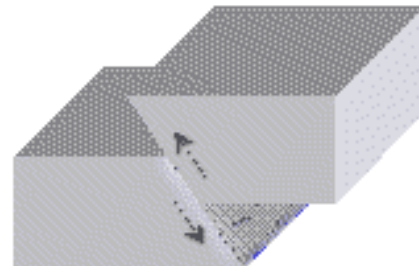
FAY TIPLERİ



Eğim Atımlı Normal Fay



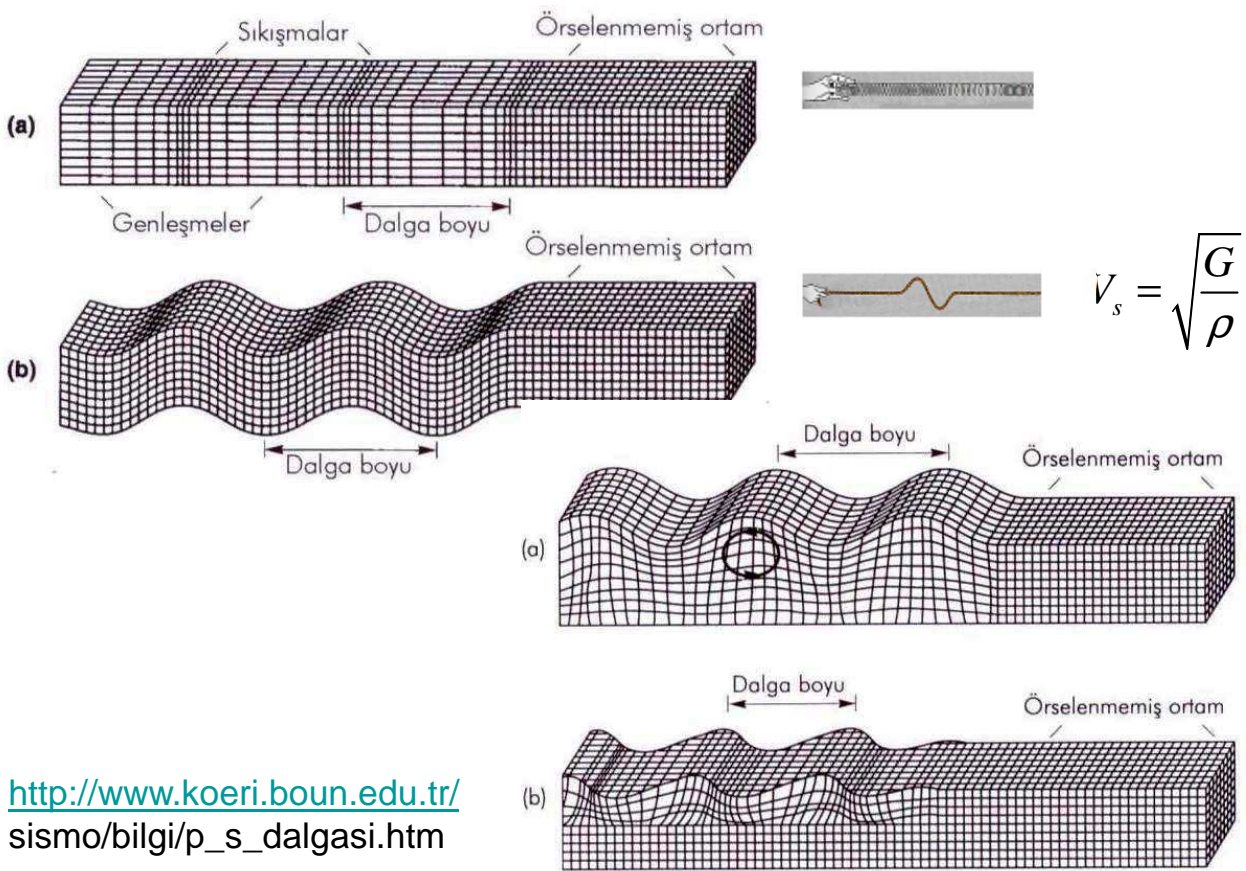
Doğru Atımlı Fay



Eğim Atımlı Ters Fay

<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/bilgi/fay.htm>

Sismik Dalgalar



DEPREMLERİN BÜYÜKLÜĞÜ

- Bir depremin gücünü tanımlamak için iki temel yol vardır.
 - Oluşan hasara göre değerlendirme
 - Depremin enerjisine göre değerlendirme
- 20.yüzyıla kadar depremin büyüklüğünü ölçmek için kullanılabilecek bir aygıt geliştirilemediği için deprem, yeryüzünde sebep olduğu hasara bakılarak tanımlanmaya çalışılmıştır.

Deprem Şiddeti

“Şiddet ölçeği” aletsel olmayan dönemde depremin ölçüsünü belirlemek amacı ile depremin

yapılar,doğa ve insanlar

üzerindeki etkilerinin sınıflandırılması sonucunda çıkmıştır.

MMI – Modifiye Mercalli Ölçeği (I-XII)

RF - Rossi Forel Ölçeği (I-X)

JMA – Japonya Meteoroloji Ajansı Ölçeği (I-XII)

MSK- Medvedev-Soopunheuer Karnik Ölçeği (I-XII)

Türkiyede genellikle MSK ölçeği kullanılmaktadır.

Deprem büyüklüğü (magnitüd)

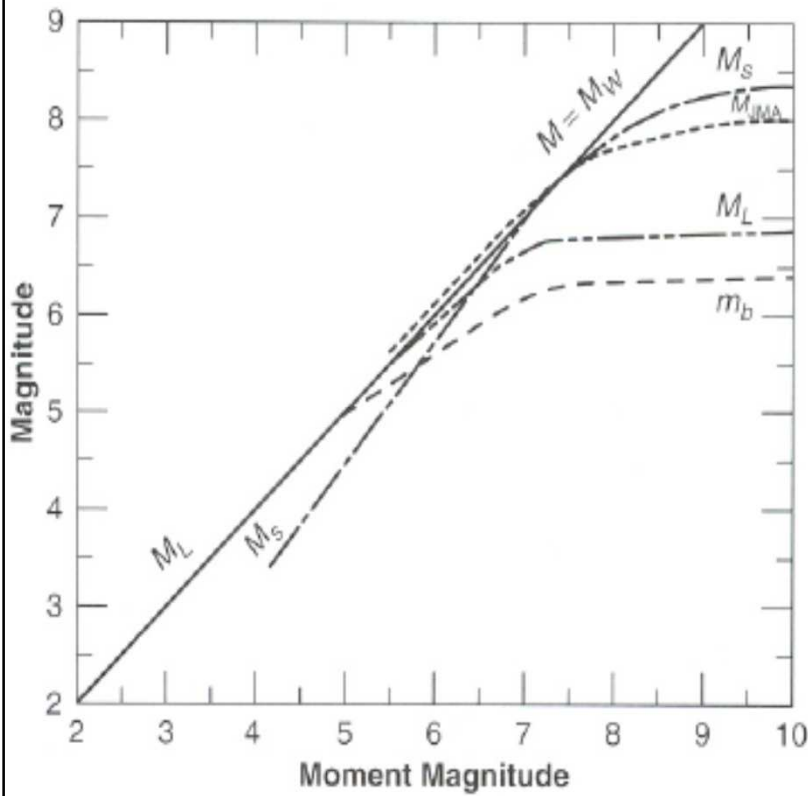
En yaygın olarak kullanılanlar arasında

- P ve S dalgalarının maksimum genliklerinden yararlanılarak hesaplanan M_L (Richter magnitüdü),
- Yüzey dalgalarının maksimum genliklerinden yararlanılarak hesaplanan M_s (Yüzey magnitüdü)
- Açığa çıkan enerjinin büyüklüğünü bir fay boyunca yırtılmaya neden olan faktörlerin doğrudan bir ölçüsü olarak tanımlayan sismik momente (M_o) göre belirlenen **Moment magnitüdü** (M_w) sayılabilir (Kramer, 1996).

Magnitüd ve Şiddet Arasındaki Fark

- **Magnitüd**, depremin kaynağında açığa çıkan enerjinin bir ölçüsü; **şiddet** ise depremin yapılar, insanlar ve çevre üzerindeki etkilerinin bir ölçüsüdür.
- Magnitüd matematiksel, şiddet ise gözlemsel bir ölçüm şeklidir.
- Bir örnek vermek gerekirse, 17 Ağustos 1999'da Marmara Bölgesi'nde meydana gelen deprem, 7.4 büyüklüğünde (magnitüd) ve XI şiddetindedir.

Magnitüd büyüklüklerin karşılaştırılması



- M_s : Yüzey dalgası büyüklüğü, 5-7.5
- M_L : Richter büyüklüğü, 3-7
- m_b : Cisim dalgası büyüklüğü, 3-7
- M_w : Mament büyüklüğü >7.5
- M_{JMA} : Japon Meteoroloji Kurumu

**YER HAREKETİ
PARAMETRELERİ VE
BELİRLENMESİ**

YER HAREKETİ PARAMETRELERİ

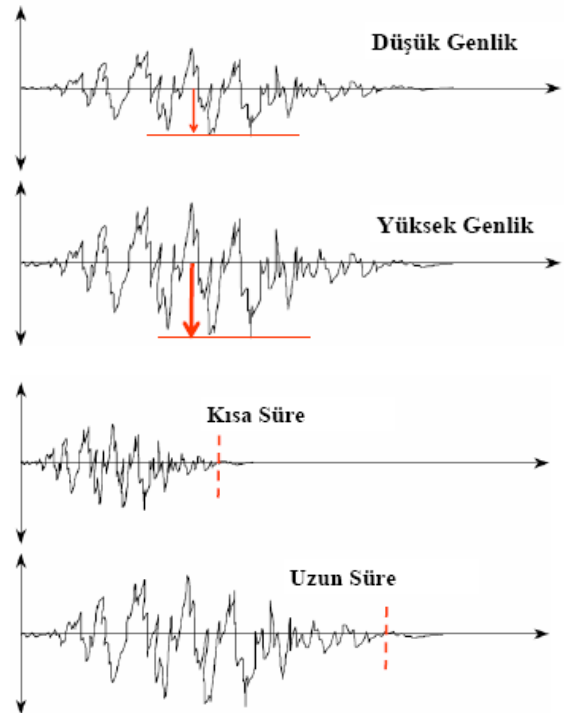
- Zemin ve/veya zemin-yapı problemleri üzerine gerçekleştirilecek analizlerde hareketin tanımlanması için gösterilen çok sayıda karakteristik arasında
- **genlik parametreleri – ivme, hız, yer değiştirme..**
- **depremin frekans içeriği - tepki spektrumları,
- baskın (hakim) frekans**
- **depremin süresi**

ön plana çıktığı görülmektedir.

YER HAREKETİ PARAMETRELERİ

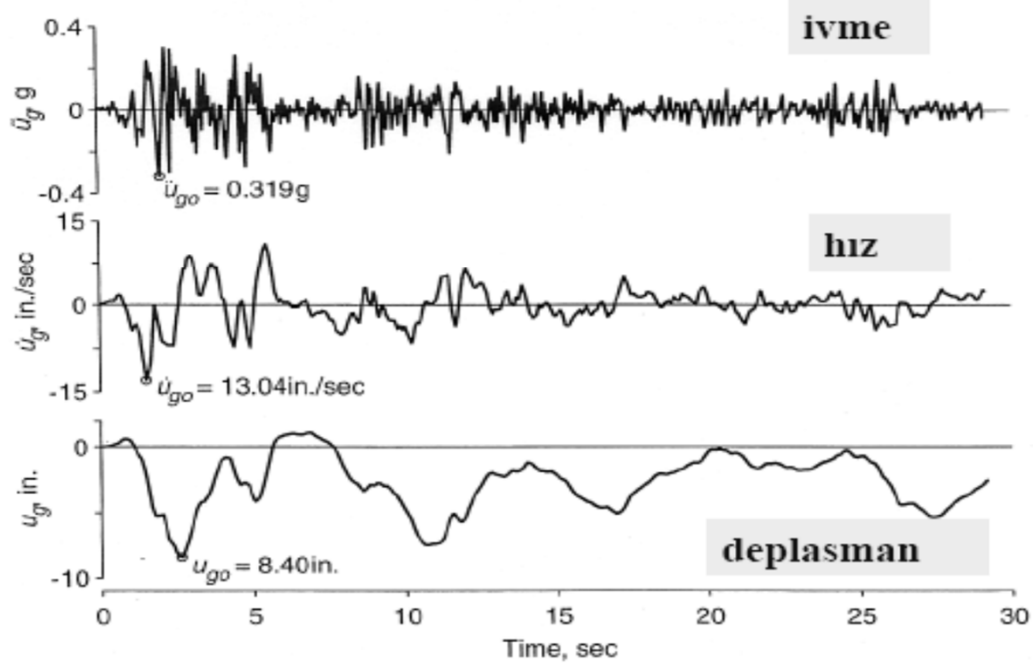
Deprem hasarları yer hareketinden etkilenir:

- Hareketin *Genliği* (Amplitude, A)
- Hareketin *Frekans içeriği* f , [$1/T$])
- Hareketin *süresi* t , [T])



1-Genlik Parametreleri

El Centro ground motion (N-S component)
May 18, 1940



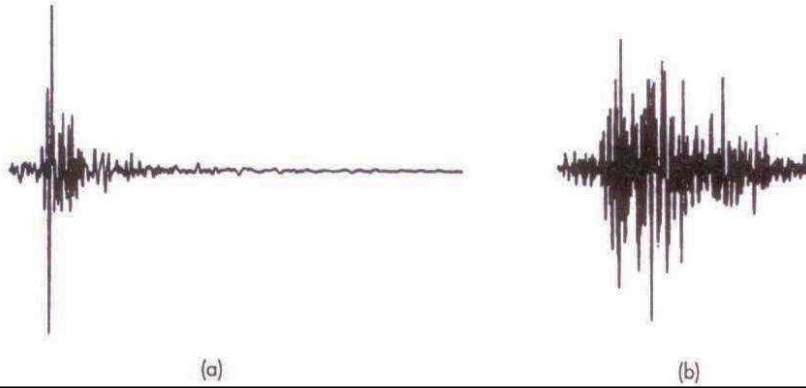
Genlik Parametreleri-Pik ivme

- Maksimum yatay yer ivmesi ya her iki yöndeki bileşene ait maksimum değerlerinin **geometrik ortalaması** ya da yönden bağımsız olarak bunların arasında **en büyük olanı** alınır.

Genlik Parametreleri-Pik ivme

Maksimum yer ivmesi değeri, **hareketin süresini ve frekans içeriğini** ifade etmediğinden, özellikle yapısal hasarların açıklanmasında ölçüt değildir.

İki kaydın zaman ve ivme ölçekleri özdeğtir. Birbirine çok yakın olan pik ivmeler kuvvetli yer hareketinde tek ölçüt olarak pik genliğin tek başına kullanılmasındaki kısıtlamaları ortaya koymaktadır.



Kramer, (1996)

2-Frekans İçeriği

Frekans içeriği, bir yer hareketi genliğinin değişik frekanslar arasında nasıl dağıldığını tanımlamaktadır.

- **Dinamik davranış analizlerinde, yer hareketini tanımlamak için sadece maksimum ivme değerine bakarak karar vermek yanıltıcı olabilmektedir.**
- **Örneğin maksimum ivmesi büyük bir deprem düşünöldüğü kadar zarar verici olmayabilirken, maksimum ivmesi küçük olan bir deprem beklenilenden daha fazla yıkıcı olabilir.**
- **Örneğin depreme maruz kalacak yapıların periyotlarının, depremin periyotu ile çakışması durumunda rezonans nedeniyle depremin maksimum ivmesi küçük olsa dahi oluşturacağı hasar büyük olabilmektedir.**

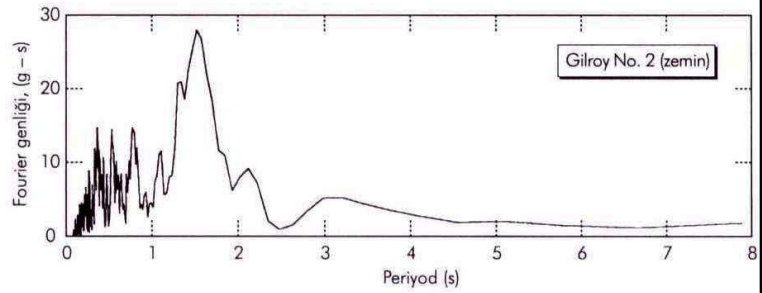
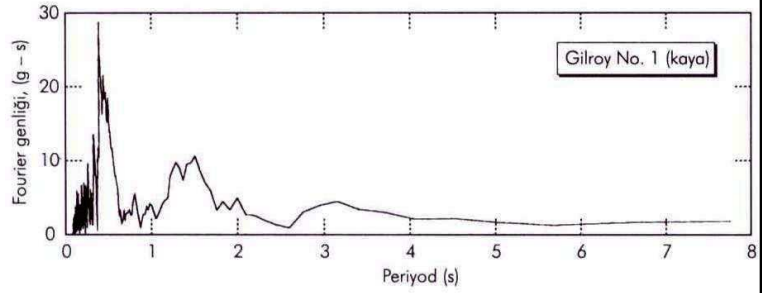
2-Frekans İçeriği Parametreleri

- Bir kuvvetli yer hareketinin frekans içeriği genellikle farklı tür spektrumlar kullanılarak incelenir.
- Fourier spektrumları hareketin frekans içeriğini doğrudan verir.
- Tepki spektrumları ise yer hareketinin değişik doğal frekanslardaki yapılar üzerindeki etkisini temsil eder.
 - Bir kuvvetli yer hareketinin frekans içeriğini tanımlamada çok değişik spektral parametreler bulunmaktadır (Spektral ivme, Spektral hız ve spektral yer değiştirme).

A-Hakim Periyot

Özellikle büyük genlikli bir bileşenin bulunması halinde bu bileşenin hakim durumda olduğu söylenir

Böyle bir dalga bileşeninin frekans veya periyoduna **hakim frekans veya periyot** denir.

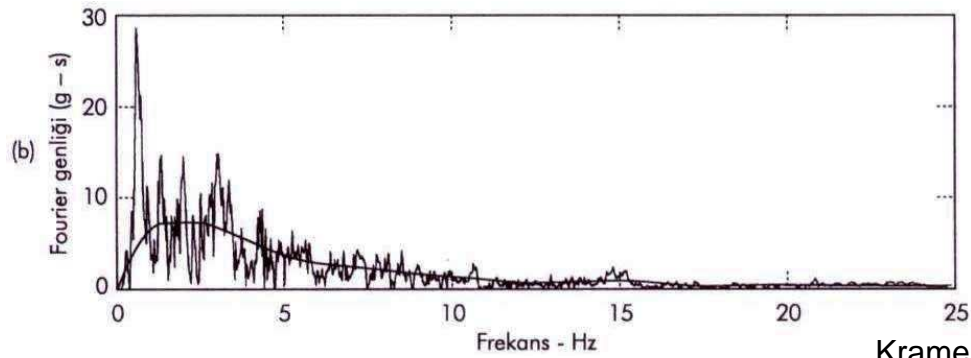
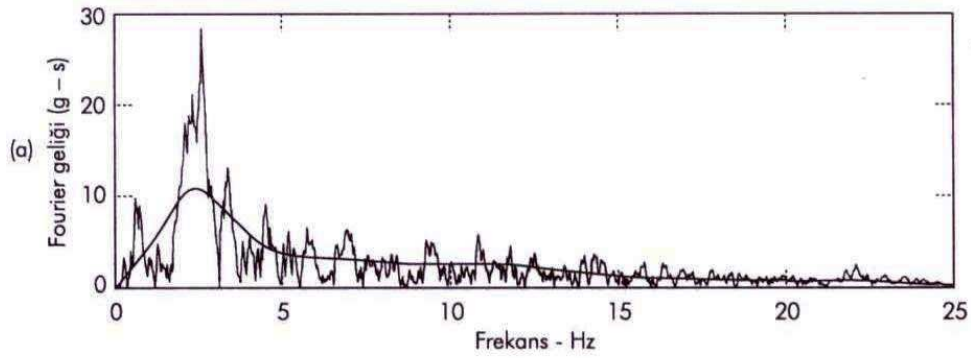


Kramer, (1996)

A-Hakim Periyot

- Hakim periyot, Fourier genlik spektrumunda en büyük değere karşılık gelen titreşim periyodu olarak tanımlanmaktadır (T_p).
- Fourier genlik spektrumunda arzu edilmeyen münferit piklerin etkisinden kaçınmak için baskın periyot genellikle düzleştirilmiş spektrumdan elde edilmektedir.

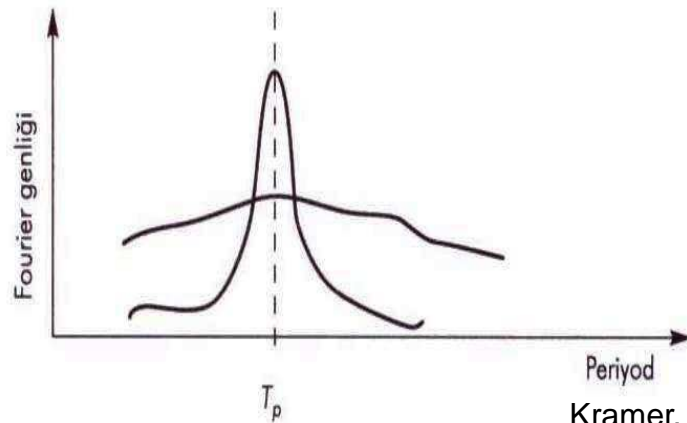
Gilroy No.1 (kaya) ve Gilroy No.2 (zemin)
hareketlerinin ham ve düzleştirilmiş Fourier genlik
spektrumları



Kramer, (1996)

Fourier Spektrumu-Hakim Periyot

- Fourier genlik spektrumu dar veya geniş olabilir.
- **Dar spektrumun anlamı**, yer hareketinin düz ve yaklaşık olarak sinüzoidal; zamana bağlı değişim üretebilen bir baskın frekansının (veya periyodunun) olmasıdır.
- **Geniş bir spektrum ise**, değişik frekanslar içeren ve daha girintili-çıkıntılı, zamana göre düzensiz değişen harekete karşılık gelir.



Kramer, (1996)

B-Tepki Spektrumları

İvme, hız ve yerdeğiştirme tepki spektrumlarının hepsine birden genel bir terim olarak "Tepki (response) Spektrumu" denir.

İvme Tepki Spektrumu, yapılaraya etkiyen kuvveti, yani zeminden yapıya deprem girişini verir.

Mühendislik yapısının doğal periyoduyla sönüm oranına göre, ivme tepki spektrumundan okunan maksimum tepki değeri, yapıya etkiyen mutlak ivme değeri olup, bununla yapının "m" kütlesi çarpılırsa deprem esnasında yapıda oluşan maksimum kesme kuvveti elde edilir.

Hız tepki Spektrumu, depremde hareketle oluşan enerjinin bir kısmı yapılar tarafından absorbe edilir.

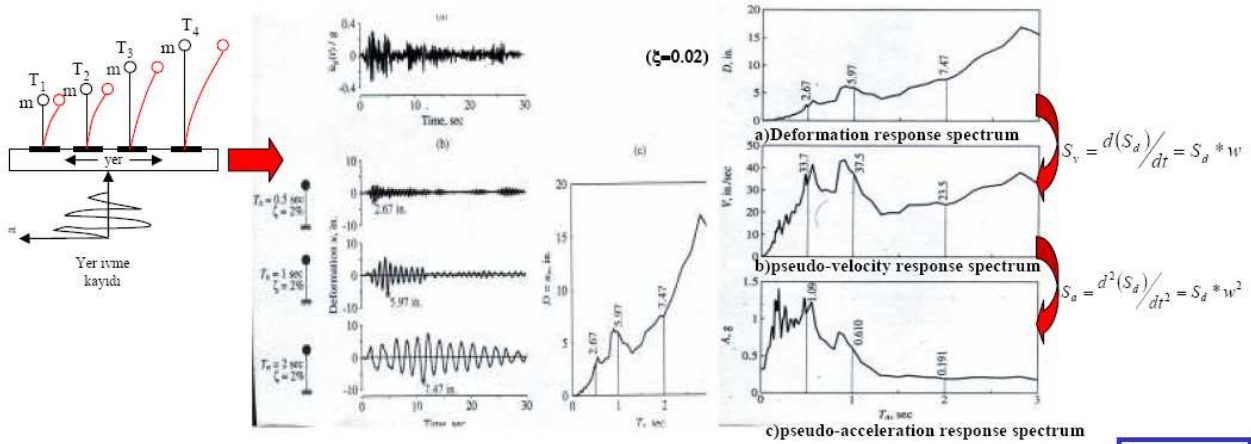
Bu spektrum bize yapılaraya geçen maksimum enerjiyi verir.

Yerdeğiştirme Tepki Spektrumu, yerdeğiştirmenin veya şekil değiştirmenin büyüklüğünü göstermekte olup yapı içindeki gerilmelerle ilişkilidir.

Genel olarak Tepki Spektrumu yer hareketini ve yapılardaki etkilerine pratik anlam yükleyerek fenomenin karakteristik özelliklerini çözümede bir ayırıcı ölççek olarak kullanılıyor.

Değişik yapıları temsil eden Tek Serbestlik Dereceli (TSD) farklı periyodlu fakat eşit kütleli yapıların aynı depremin bir bileşenine karşı gösterdikleri tepkilerin maksimumlarının oluşturdukları eğri tepki spektrumunu oluşturmaktadır.

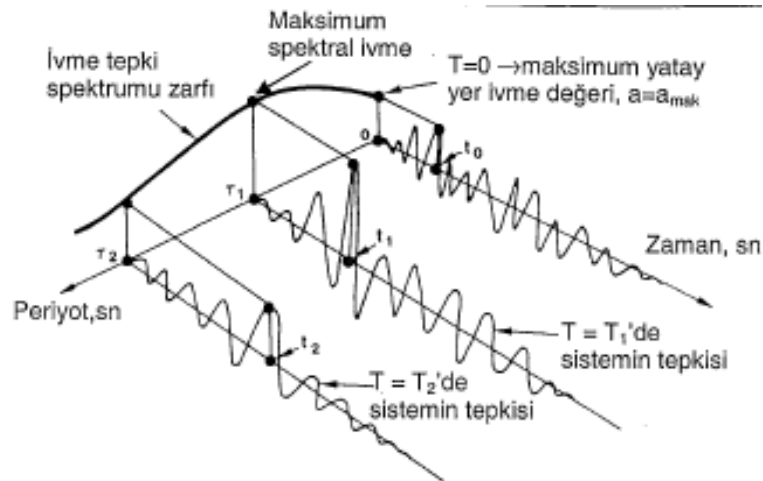
maksimumlarının oluşturdukları eğri tepki spektrumunu oluşturmaktadır.



Kemal Beyen
Kemal Beyen

B-Tepki Spektrumları

a_{\max} , v_{\max} , $d_{\max} = f$ (periyot, zemin türü, sönüm)
şeklinde ifade edilen zarfa “teпки spektrumu”
denir.



Tek serbestlik dereceli sistemde tepki spektrumu

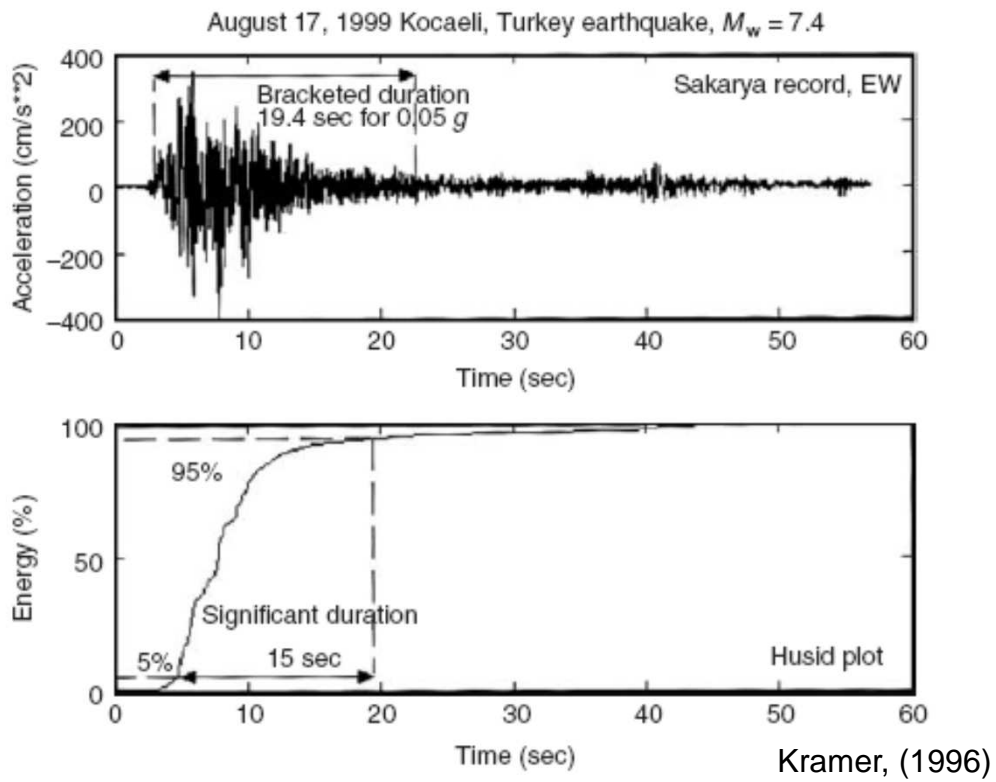
3-Deprem Süresi

- **Kuvvetli yer hareketinin süresi**, bir fay boyunca biriken deformasyon enerjisinin yırtılma ile boşalması için gerekli olan zaman ile ilişkilidir.
- Yırtılan fayın uzunluğu veya alanı büyürken, yırtılma süresi uzar ve artan deprem büyüklüğü ile beraber kuvvetli hareketin süresi de uzar.
- Mühendislik gözlemleri kuvvetli yer hareketi süresinin **“deprem hasarları”** üzerinde çok etkili olduğunu göstermiştir.

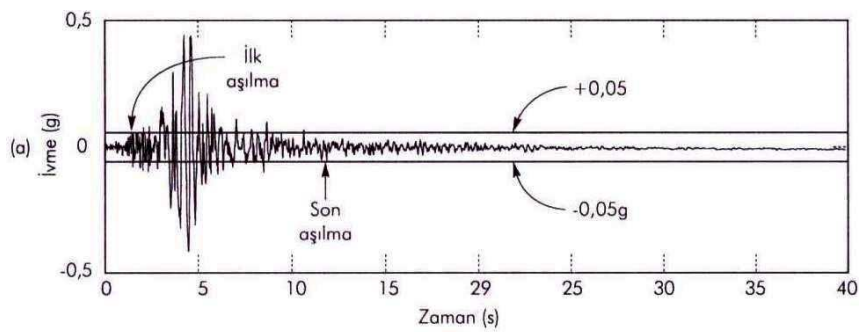
Literatürde sürenin analitik olarak tanımlanmasında genellikle iki yöntem tercih edilir.

- Birincide, **0.05g eşik** ivme değerinin ilk aşıldığı zaman T_1 ile son aşıldığı zaman T_2 ile gösterilerek aralarındaki fark $(T=T_2-T_1)$ olarak tanımlanmaktadır.
- İkincisi ise toplam enerjinin **%5'i** ile **%95'inin** kaydedildiği noktalar arasındaki zaman olarak tanımlanmıştır.

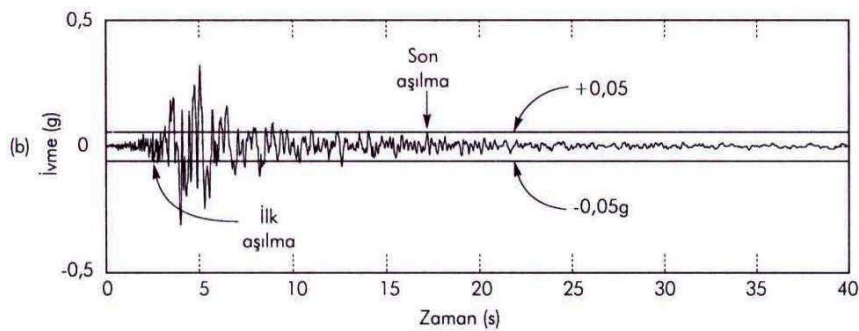
3-Depremin Süresi



Gilroy No.1 (kaya) ve Gilroy No.2 (zemin) yer hareketlerinin E-W bileşenlerinin sürelerini bulunuz.



$T_d = 9.8 \text{ s}$



$T_d = 14.7 \text{ s}$

Kramer, (1996)



The splash screen features a dark blue square icon with a white ECG line on the left. The background is a light gray with faint, semi-transparent text and graphics, including a city skyline and mathematical formulas like $v_{ii} + c_{ii} + k_{ii} = -M_{ii} \cdot \ddot{u}_i(t)$. The main title 'SeismoSignal' is in a large, bold, dark blue font, with 'Version 4.1.2' below it. On the right, 'Build: 25' is displayed. On the left, the text 'Product Name: SeismoSignal' and 'License Information: Temporary License' is shown, with 'Days Left: -1' below it. At the bottom right, the 'SeismoSoft' logo is present, with a list of services: 'Modeling', 'Analyzing', 'Designing', 'Testing', 'Renewing', and 'Improving'.

SeismoSignal

Version 4.1.2

Build: 25

Product Name: SeismoSignal

License Information: Temporary License
Days Left: -1

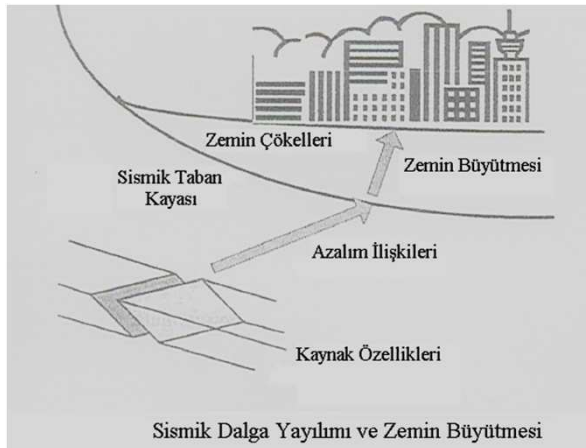
SeismoSoft

- Modeling
- Analyzing
- Designing
- Testing
- Renewing
- Improving

Tasarım Parametrelerinin Geliştirilmesi

Belirli bir sahadaki tasarım yer hareketinin özellikleri

- Sahanın potansiyel sismik kaynaklara göre konumu
- Sismik kaynakların özellikleri ve depremselliği
- Kaynak ile saha arasındaki seyahat yolu etkileri
- Yerel zemin koşulları
- Yer hareketinin kullanılacağı yapı veya tesisin önemi

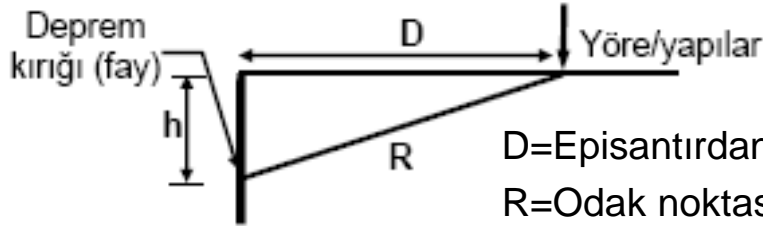


Depreme dayanıklı yapı tasarımının hedefi, yapıları aşırı bir hasar olmaksızın belirli bir yer hareketi seviyesine dayanacak şekilde üretmektir.

Bu belirli yer hareketi seviyesi “tasarım yer hareketi” olarak tanımlanır.

1 - Azalım İlişkileri

Deprem kaynağında belli bir uzaklıkta bu depremin etkileri değerlendirilirken azalım ilişkilerinden faydalanılmaktadır.



D=Episantırdan yöreye dik uzaklık
R=Odak noktasından yöreye uzaklık
h=Odak derinliği

Azalım ilişkileri kaydedilmiş kuvvetli hareketleri veri tabanlarından, regresyon analizleri yoluyla geliştirilir.

Bunlar, zaman içinde daha fazla kuvvetli hareket verisi topladıkça değişirler.

1 - Azalım İlişkileri

- **Azalım ilişkileri kullanılarak yer hareketi parametreleri** magnitüd, uzaklık ve bazı diğer değişkenlerin fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$Y=F(M,R,P_i)$$

Eşitliğinde,

Y= yer hareketi parametresi,

M=Depremin büyüklüğü,

R=kaynaktan proje alanına olan uzaklığın ölçüsü

P_i= deprem kaynağını, dalga yayılma izini ve/veya yerel arazi şartlarını karakterize etmede kullanılan parametreler

2- Sismik Tehlike Analizleri

- Araştırılan bölge için değişik sismik kaynakların varlığı durumunda olasılıksal yaklaşım uygun
- Bölgedeki tehlikeyi sadece tek bir kaynak düzenliyorsa deterministik yaklaşım tercih edilmektedir.
- **tehlike haritaları** için olasılıksal yaklaşım,
- **senaryolar** için deterministik yaklaşımlar uygun

a) Deterministik Sismik Tehlike Analizleri

- Deterministik sismik tehlike analizlerinde (DSTA) belirli bir sismik senaryo geliştirilir ve yer hareketi tehlikesinin belirlenmesi buna göre yapılır.
- Senaryo depremde, belli bir yerde ve belirli bir büyüklükte depremin oluşması ön şartı vardır.

Tek bir “senaryo” varsayımı

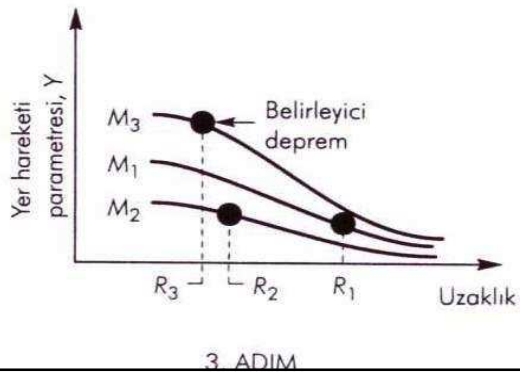
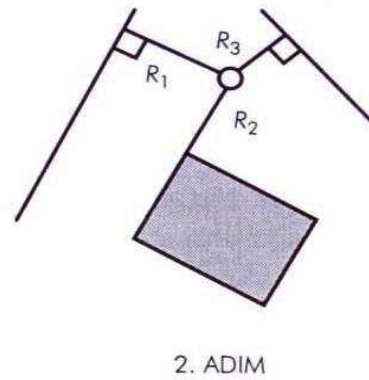
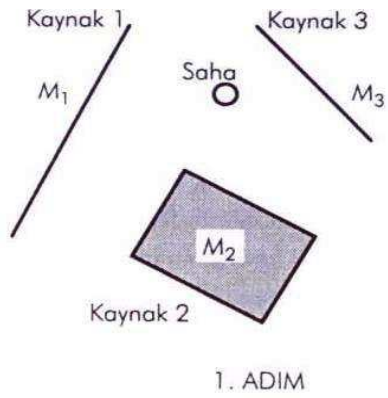
Tek bir büyüklük seçimi, M →

Yer hareketi
parametreleri

Tek bir uzaklık seçimi, R

M, R' den kaynaklanan etkilerin varsayımı

Deterministik sismik tehlike analizi



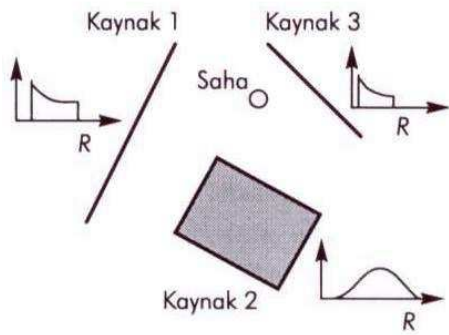
$$Y = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{Bmatrix}$$

4. ADIM

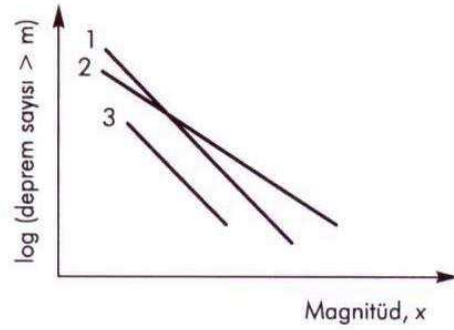
b) Olasılıksal Sismik Tehlike Analizleri (OSTA)

- **Olasılıksal (probabilistik) deprem tehlikesi** hasar yapıcı yer hareketinin belli bir yerde ve belli bir zaman periyodu içerisinde meydana gelme ihtimali olarak tanımlanır.
- Birçok “senaryo” varsayımı
 - Bütün büyüklükler
 - Bütün uzaklıklar
 - Bütün etkiler
- **Olasılıksal Sismik tehlike analizleri (OSTA) ile**
- Depremin büyüklüğü (M)
- Depremin yeri (R) ve tekrarlanma aralığı
- yer hareketi parametreleri
karakteristiklerindeki değişim belirlenmeye çalışılır.

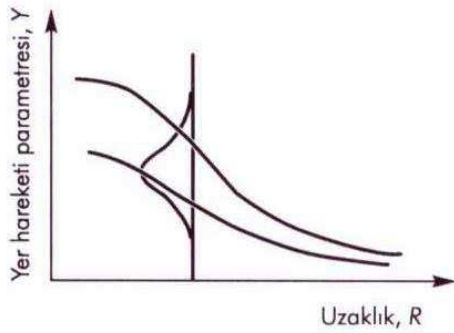
Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi



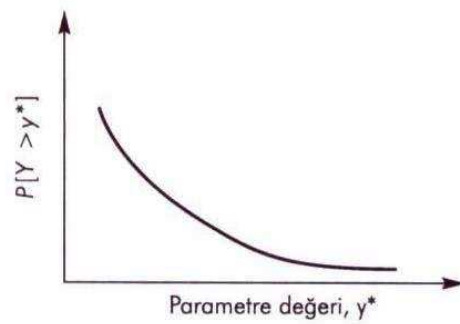
1. ADIM



2. ADIM

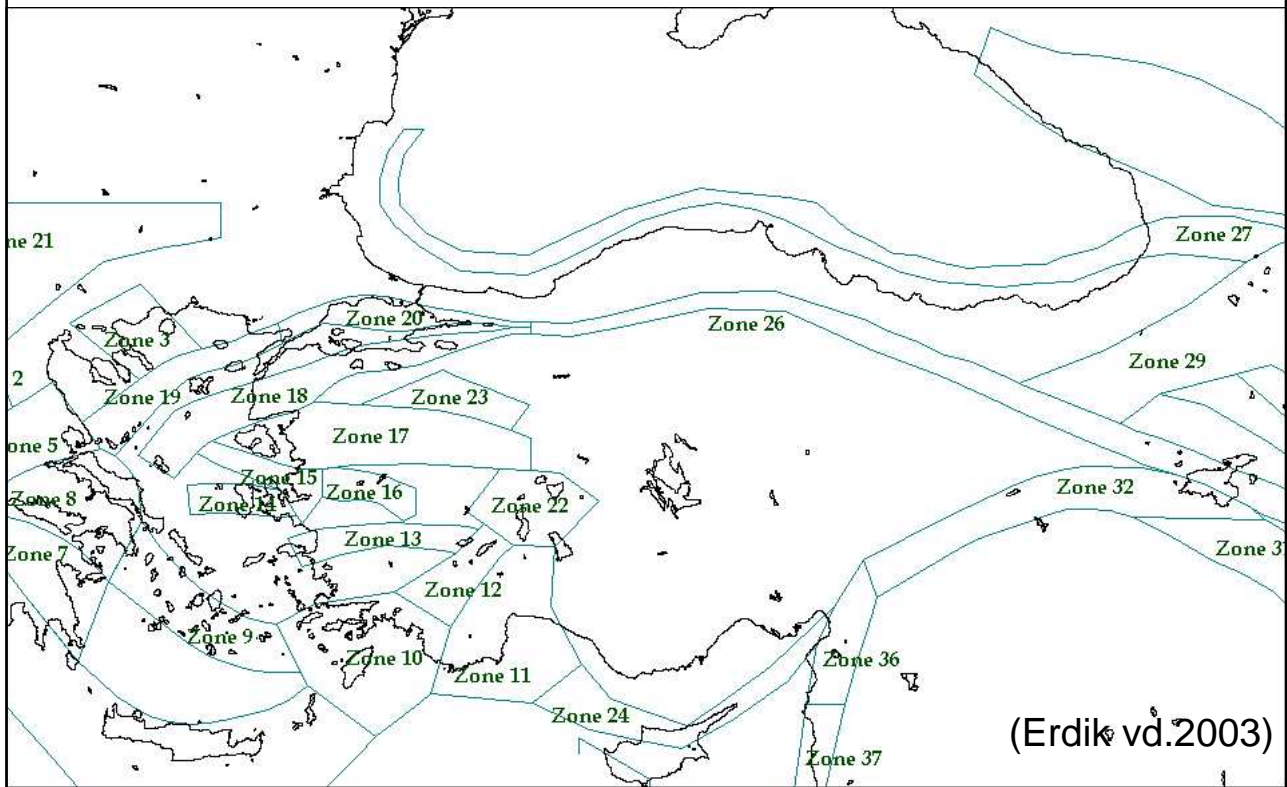


3. ADIM



4. ADIM

Türkiye Deprem Kaynak Zonları



Fukushima-Tanaka (1990) ivme azalım bağıntısı

$$\log a_{\max} = 0.42M_w - \log(D_f + 0.025 \times 10^{0.42M_w}) - 0.0033D_f + 1.22$$

a_{\max} =Maksimum yatay yer ivmesi değeri, (cm/s²)

M_w =Deprem magnitüdü

D_f = Faya dik uzaklık (km)

Bu eşitlikte, yırtılan fayın (doğrultu, normal, ters fay vb) ve zemin koşulları (kaya, sıkı kil, kum vb.) göz önüne alınmamıştır.

Boore, Joyner, Fumal (1993, 1997) ivme azalım bağıntıları

- Bu azalım bağıntısının diğerlerinden en temel farkı “**fay türü**”nün dikkate alınması ve **zemin türünün** “kayma dalgası hızı” V_s ile ifade edilmesidir.

$5 < M_w < 7.7$ ve $D \leq 100$ km için geçerlidir.

$$\log_{10} a_y = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_4(D^2 + h^2)^{1/2} + b_5 \log_{10}(D^2 + h^2)^{1/2} + b_6 G_B + b_7 G_c + \varepsilon_1$$

Boore, Joyner, Fumal (1993) ivme azalım bağıntısı

- Doğrultu atımlı faylanma için $b_1 = -0.136$
- Ters faylanma için $b_1 = -0.051$
- Tüm faylanma türleri için $b_1 = -0.105$
- **Zemin tanımları:**
 - V_s = Kayma dalgası hız (m/s)
 - $180 \text{ m/s} < V_s < 360 \text{ m/s}$ ise yumuşak, gevşek zemin, $G_B=0, G_C=1$
 - $360 \text{ m/s} < V_s < 750 \text{ m/s}$ ise katı, sıkı zemin, $G_B=1, G_C=0$
 - $V_s > 750 \text{ m/s}$ ise kaya, $G_B=0, G_C=0$

Çizelge 2.1 Boore, Joyner, Fumal (1993) ivme azalım bağıntısı katsayıları

b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	h (km)	ε
0.229	0	0	-0.778	0.162	0.251	5.57	0.226

Boore, Joyner, Fumal (1997) ivme azalım bağıntısı

$$\ln a_y = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_5(D^2 + h^2)^{1/2} + b_v \ln(V_s / V_a) + \epsilon_2$$

- M_w =Depremin moment büyüklüğü = 5.0 - 7.7
- a_y = maksimum yatay yer ivmesi büyüklüğü (g)
- D=Faya dik uzaklık (km)
- h=Fiktif odak (hiposantır) derinliği-regresyon analizlerinden elde edilen büyüklük (km)
- b = Regresyon analizi katsayıları
- G_B ve G_C = Zemin sınıfı faktörleri (zemin türüne bağlı katsayılar)
- V_s =Yüzeyden itibaren 30 m derinlikteki zemin katmanının ortalama kayma dalgası hızı (m/s)
- V_a =Efektif kayma dalgası hızı
 $V_a=1396$ m/s (pratik olarak **$V_a=1400$ m/s alınabilir**)
- ϵ =Belirsizliği açıklayan istatistiksel bir faktör.

Boore, Joyner, Fumal (1997) ivme azalım bağıntısı

- $5.5 < M_w < 7.5$ ve $R \leq 80$ km için geçerlidir.

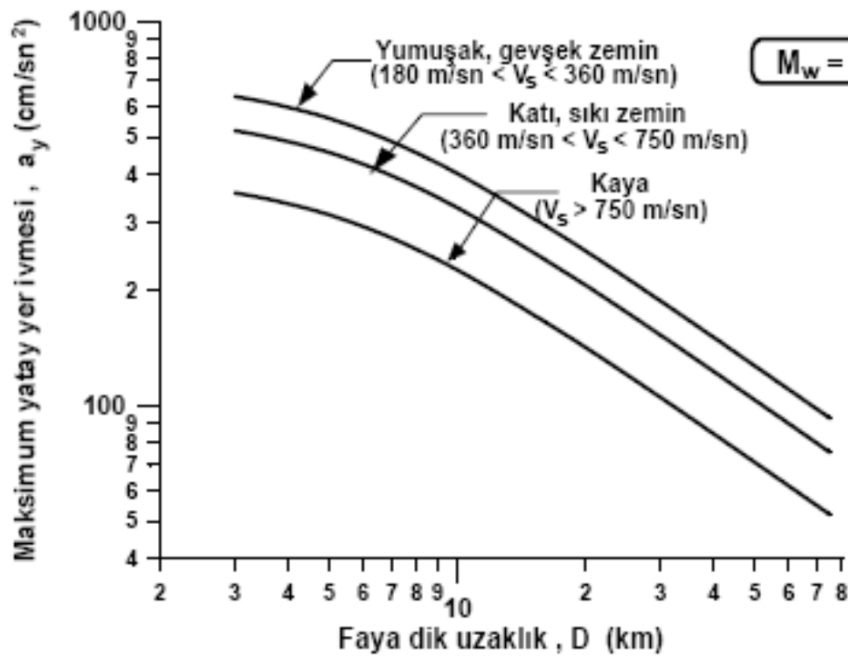
Burada,

- Doğrultu atımlı faylanma için $b_1 = -0.313$
- Ters faylanma için $b_1 = -0.117$
- Tüm faylanma türleri için $b_1 = -0.242$

Çizelge 2.2 Boore, Joyner, Fumal (1997) ivme azalım bağıntısı katsayıları

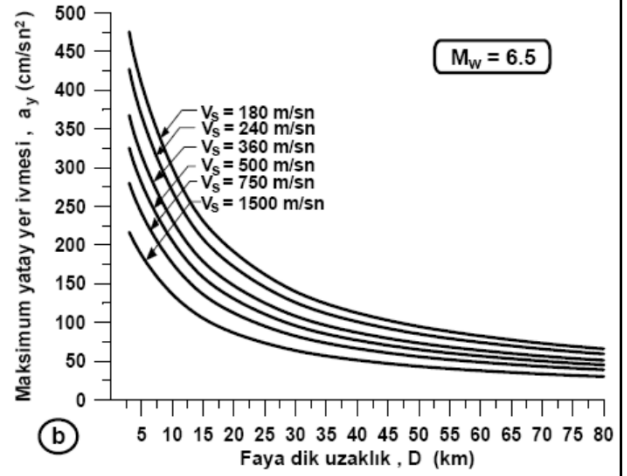
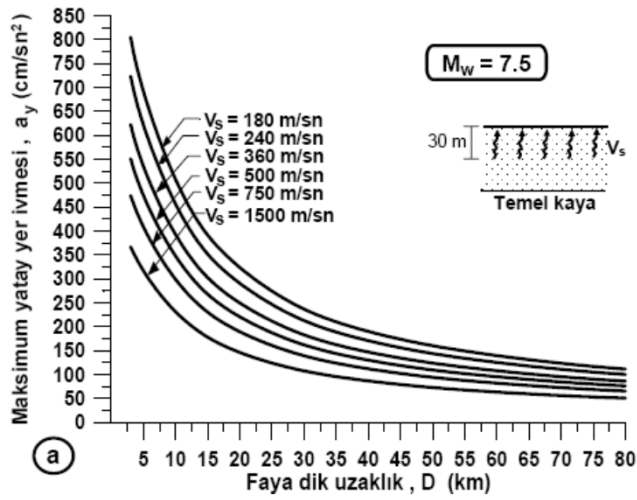
b_2	b_3	b_5	b_v	V_a (m/s)	h (km)	ϵ
0.527	0	-0.778	-0.371	1396	5.57	0.226

Boore, Joyner, Fumal (1993) ivme azalım bağıntısı



$M_w = 7.4$ için $a_y = f(\text{zemin türü, faya dik uzaklık})$ değişimleri

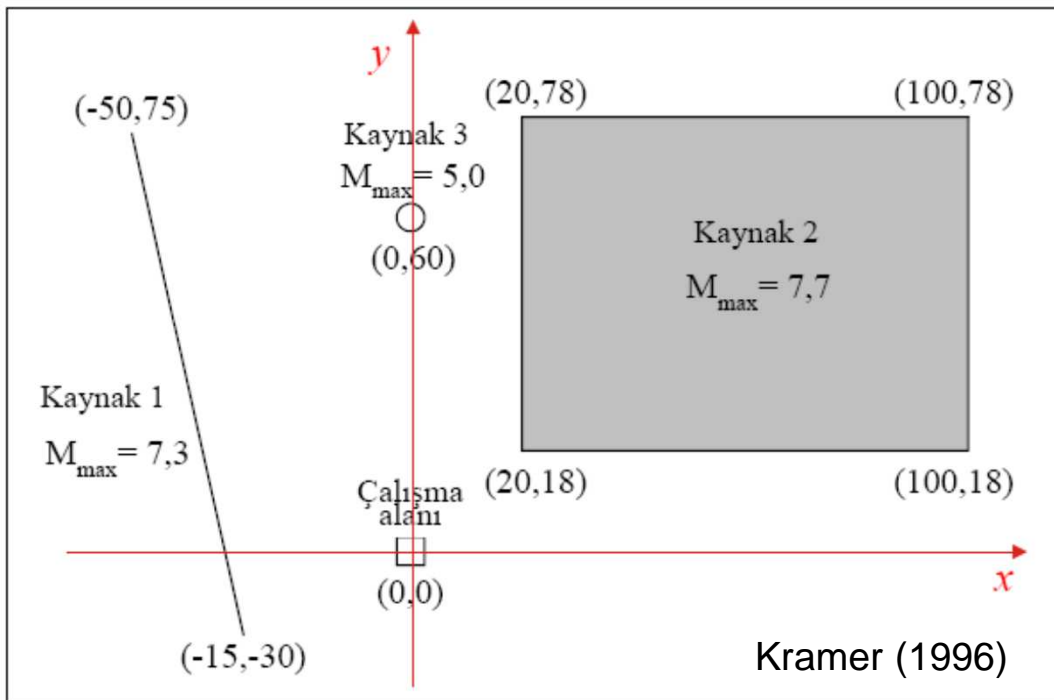
Boore, Joyner, Fumal (1997) ivme azalım bağıntısı



V_s = Yüzeyden itibaren 30m kalınlıktaki katman içinde ortalama kayma hızı, m/s ($V_a = 1396 \text{ m/s}$ alınmıştır)

Deterministik Tehlike Analizleri - Örnek 1

- Çalışma alanının ve kaynak zonu sınırlarının koordinatları (km)



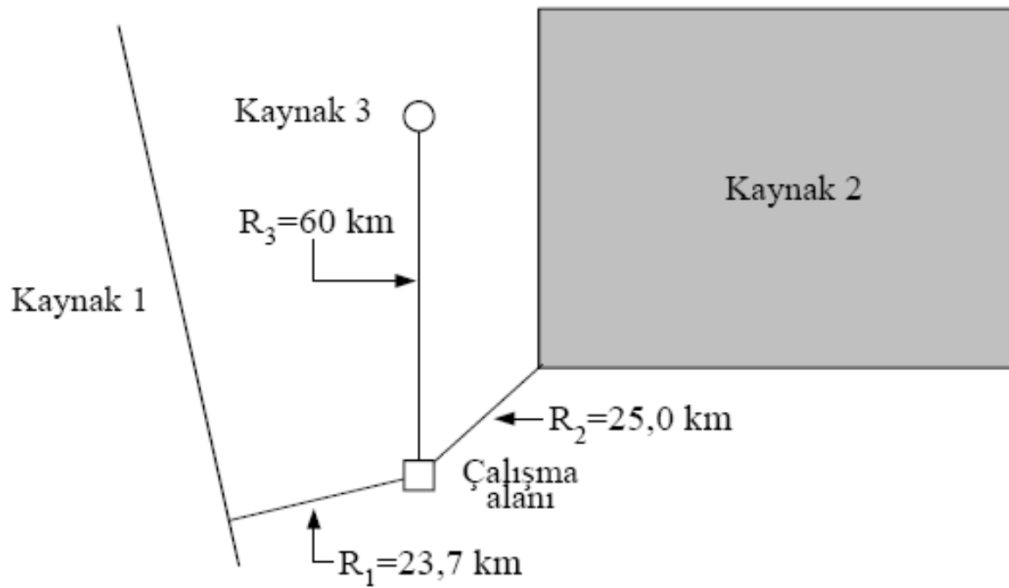
1. Deprem kaynakları

Her bir kaynağın konumu, geometrisi ve magnitüd değerleri verilmektedir.

- **Kaynak 1** Uzunluğu boyunca herhangi bir noktasında $M=7.3$ büyüklüğünde deprem üretebilen 111 km uzunluğunda bir doğrusal kaynak zonu.
- **Kaynak 2** Sınırları içerisinde herhangi bir yerde $M=7.7$ büyüklüğünde deprem üretme kapasitesi olan 4800 km^2 'lik bir düzlemsel kaynak zonu.
- **Kaynak 3**, $M=5.0$ büyüklüğünde deprem üretebilen bir noktasal kaynak.

2. Kaynak-alışma alanı uzaklığı

- Çalışma alanı ile her bir kaynağın herhangi bir noktası arasındaki en kısa mesafedir.



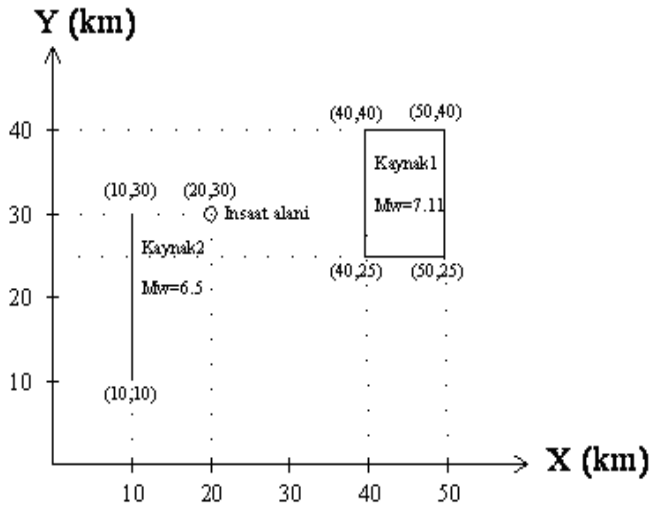
3. Bölgeyi etkileyen deprem

Sarsıntı seviyesinin PGA tarafından karakterize edildiği varsayılıyor

Cornell vd. (1979) tarafından üretilen azalım ilişkisi kullanılmaktadır. Bu azalım ilişkisi $M_w=3.0 - 7.7$ ve 20 – 200 km uzaklıkları için geçerlidir.

$$\ln \text{PGA} = 6.74 + 0.859 M - 1.80 \ln (R+25)$$

Deterministik Tehlike Analizleri - Örnek 2



Kaynak 1 $M_w=7.11$ büyüklüğünde
Kaynak 2 $M_w=6.5$ büyüklüğünde
bir deprem üreteceği tahmin
edilmektedir.

İnşaat alanında yapılan geoteknik
araştırmalar sonucunda zeminde
ortalama kayma dalgası hızı 190
m/s olarak belirlenmiştir.

Kaynak 1 ve Kaynak 2 doğrudan
atımlı kaynaklardır.

Bu olası deprem durumunda yatay
yer ivmesi değerini Boore, Joyner
ve Fumal (1993) azalım ilişkisini
kullanarak belirleyiniz.

$$\log_{10} a_y = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_4(D^2 + h^2)^{1/2} + b_5 \log_{10}(D^2 + h^2)^{1/2} + b_6 G_B + b_7 G_C + \varepsilon_1$$

Çizelge 2.1 Boore, Joyner, Fumal (1993) ivme azalım bağıntısı katsayıları

b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	h (km)	ε
0.229	0	0	-0.778	0.162	0.251	5.57	0.226

5 < Mw < 7.7 ve D ≤ 100 km için geçerli

Doğrultu atımlı faylanma için b₁= -0.136

Kaynak 1

D=20 km

V_s=190 m/s → G_B=0, G_C=1

$$\log_{10} a_{y-kaynak1} = -0.136 + 0.229(7.11 - 6) + (-0.778) \times \log_{10}(20^2 + 5.57^2)^{1/2} + 0.251 \times 1 + 0.226$$

a_y-kaynak1=0.372g

Kaynak2

D=10 km

V_s=190 m/s → G_B=0, G_C=1

$$\log_{10} a_{y-kaynak2} = -0.136 + 0.229(6.5 - 6) + (-0.778) \times \log_{10}(10^2 + 5.57^2)^{1/2} + 0.251 \times 1 + 0.226$$

a_y-kaynak2=0.428g

**DİNAMİK ZEMİN
PARAMETRELERİ VE
BELİRLENMESİ**

Dinamik etkiler altında zemin davranışı

Statik problemlerde olduğu gibi, dinamik yükler altında da zeminleri iki yönü ile düşünmek gerekir.

1. Yapıların üzerine oturtulduğu temel altı malzemesi olarak

- Zemin üzerinde taşıdığı yapıyı, yapıya etkiyen atalet kuvvetlerinin şiddeti ve temel stabilitesi yönlerinden etkiler

2. Zeminin kendisinin inşaat malzemesi olarak kullanıldığı yapılar

- Zeminin drenajsız durumda tekrarlı yükler altında malzeme davranışı önemlidir.

a) mukavemet kaybı

b) kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma,

c) kohezyonlu zeminlerde ise aşırı deformasyonlar ve göçme durumlarının incelenmesi gereklidir.

DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

Zeminler bir çok farklı şekilde (depremler, makine titreşimleri, kazık çakımı vb.) tekrarlı yüklemelere maruz kalabilmektedir.

Bu gibi yüklemeler altında zeminlerin **rijitliğinde** statik duruma oranla bir azalma meydana geldiği bilinmektedir.

Bu azalmanın boyutu etkiyen yükün

çevrim sayısına,

büyükliğüne,

frekansına

meydana gelen kayma birim deformasyonların büyüklüğüne bağlı olduğu kadar

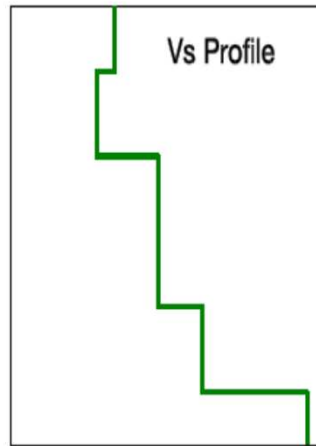
zemin özelliklerine de (doğunluk derecesi, boşluk oranı, plastisite indeksi, aşırı konsolidasyon oranı vb.) bağlı olmaktadır.

Zeminlerin bu gibi yüklemeler altındaki davranışını kontrol eden temel parametreler kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) olarak tanımlanmıştır.

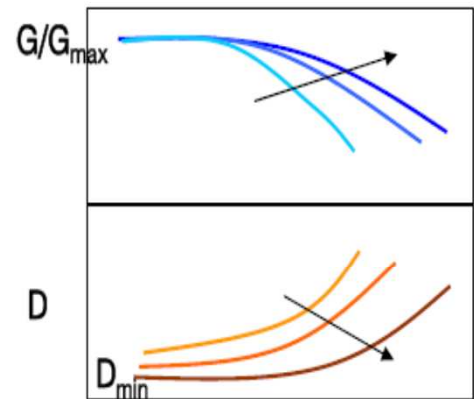
Sismik Tasarım için Dinamik Özellikler



ZEMİN PROFİLİ



ARAZİ DENEYİ



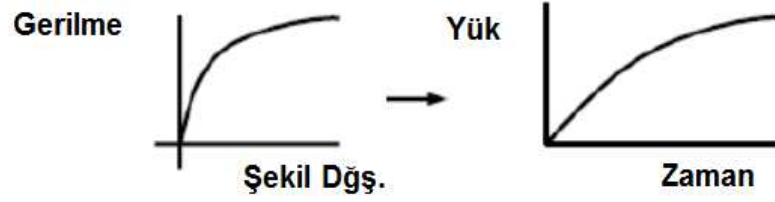
LAB. DENEYİ

Dinamik etkiler altında zemin davranışı

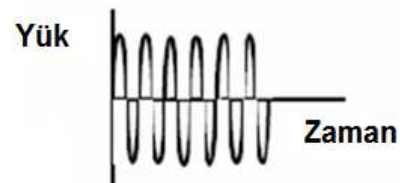
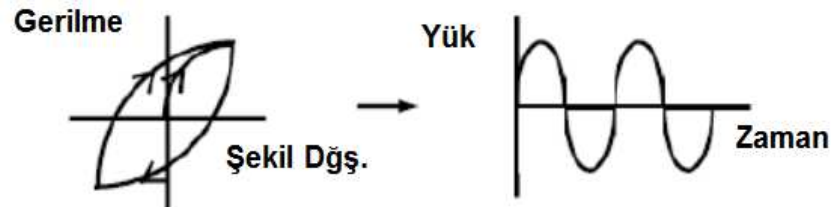
- **Gerilme–şekil değiştirme özellikleri olarak**
 - dinamik kayma modülü
 - sönüm oranı değerleri ve bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması
- **Mukavemet özellikleri olarak**
 - göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği
 - çevrim sayıları

Gerilme-şekil değiştirme-zaman ilişkisi

**Statik
yükleme**



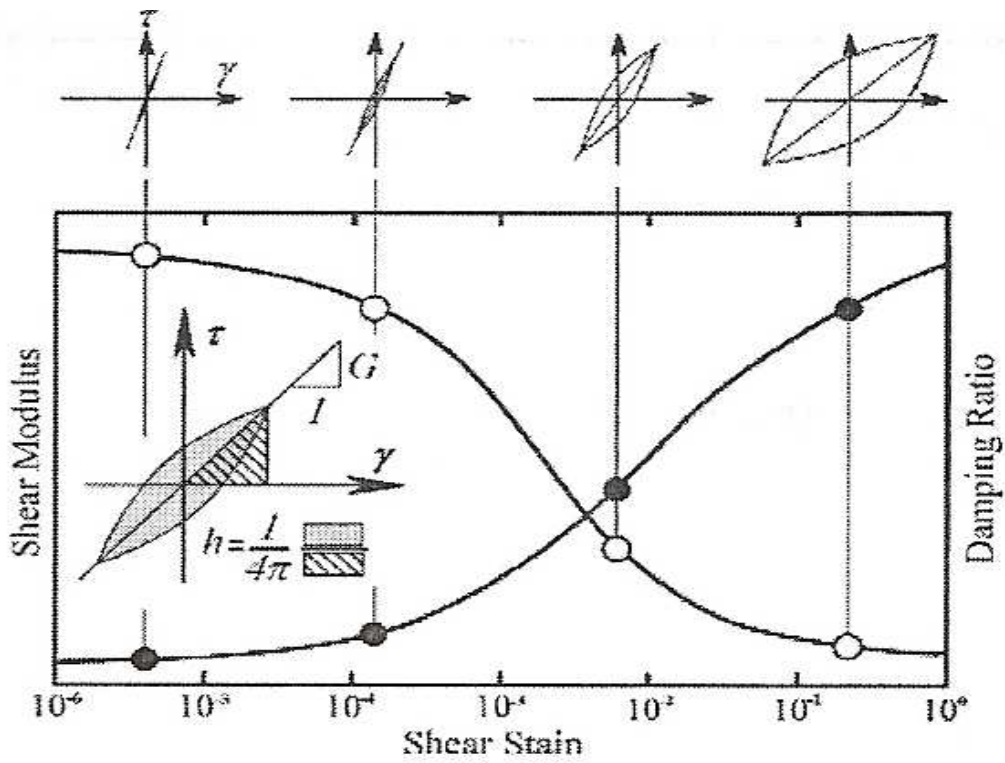
**Çevrimli
yükleme**



Dinamik Zemin Özelliklerini Etkileyen Faktörler

- ortalama efektif çevre gerilmesi σ'_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

Kayma modülünün ve sönüm oranının kayma deformasyonuna bağlı değişimi (Shahnazari, 2010)

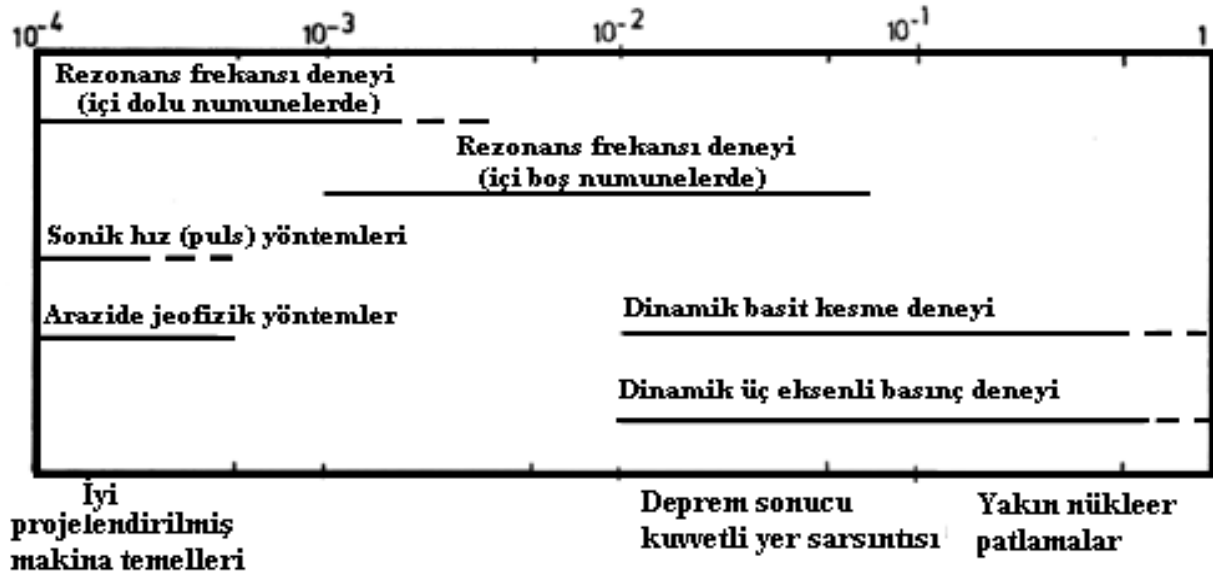


Kayma Gerilmesi-Birim Kayma Şekil Değişirmesi İlişkisi

- G_{max} değeri **kumlarda** - efektif çevre basıncına (σ'_0)
- G_{max} değeri **killerde**
 - drenajsız kayma mukavemeti, (S_u)
 - efektif düşey gerilme (σ'_v) ve
 - aşırı konsolidasyon oranına (AKO) bağlıdır.
- Laboratuvar deneylerinden elde edilen bulguların arazi deneyleriyle desteklenmesi çok kullanılan bir yaklaşım yöntemidir

Farklı Şekil Değişirme Seviyelerinde Zeminlerin Dinamik Özelliklerini Belirlemek İçin Kullanılan Yöntemler

MAKSİMUM BİRİM KAYMA γ (%)



Deformasyon Düzeyleri

Küçük deformasyon düzeylerinde (Small-strain levels) ($\gamma < 10^{-5}$)

Zemin davranışı lineer olduğu kabul edildiğinden gerilme – deformasyon davranışı lineer elastik bir model ile ifade edilmelidir. Bu deformasyon düzeylerinde zemin davranışını kontrol eden parametre G_{max} 'tir.

Orta deformasyon düzeylerinde (Moderate-strain levels) ($10^{-5} < \gamma < 10^{-3}$)

Zemin davranışı elastoplastik olup, gerilme – deformasyon davranışı viskoelastik bir model ile ifade edilmelidir. Kayma deformasyonları arttıkça kayma modülünde azalma meydana gelmektedir. Bu deformasyon düzeylerinde zemin davranışını kontrol eden parametreler G_s ve D 'dir.

Büyük deformasyon düzeylerinde (Large-strain levels) ($\gamma > 10^{-3}$)

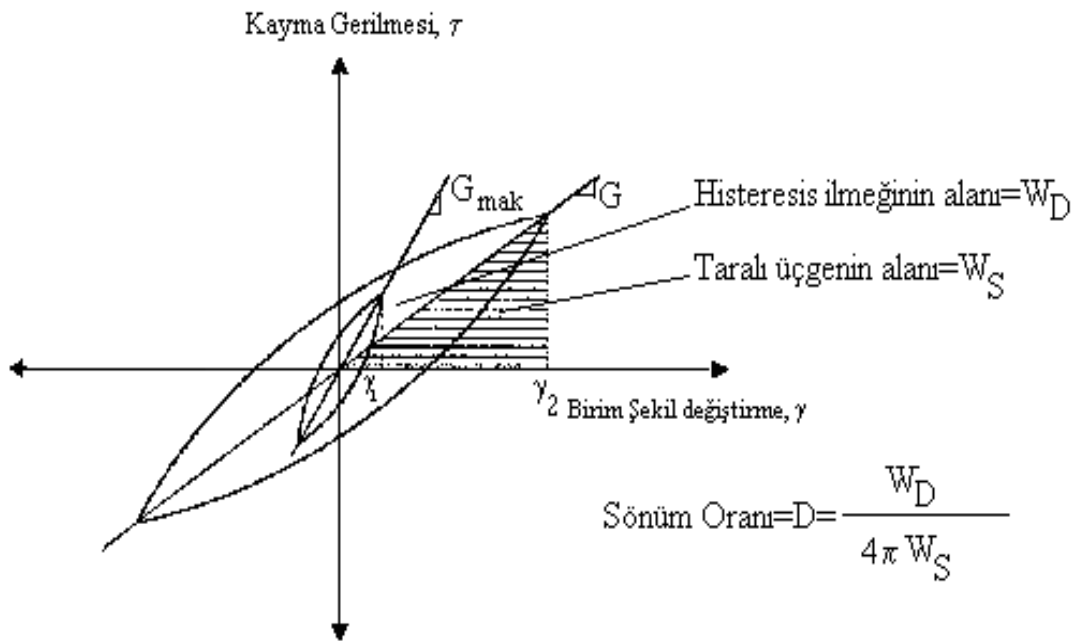
Zeminin dinamik özellikleri hem deformasyonlara hem de çevrim sayısına bağlı olarak değişmektedir.

Gerilme – deformasyon davranışı gerilme tarihçesini izleyen bir model ile ifade edilmelidir. Genel olarak suya doygun zeminlerde artık boşluk suyu basıncı artışı nedeni ile rijitlik kaybı, kuru zeminlerde ise sıkışma ve pekleşme görülmektedir.

Şekil değiştirme seviyesine bağlı zemin davranışı modellemesi (Ishihara, 1996)

Kayma şekil değiştirmesi	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Küçük şekil değiştirme	Orta seviyede şekil değiştirme		Büyük şekil değiştirme	Göçme şekil değiştirmesi	
Elastik						
Elasto-plastik						
Göçme						
Yük tekrarınn etkisi						
Yükleme hızının etkisi						
Model	Doğrusal elastik model		Visko-elastik model		Yükleme tarihçesi iz modeli	
Davranış Analizi Metodu	Doğrusal davranış analizi		Eş değer doğrusal model		Adımsal integrasyon modeli	

SÖNÜM



Sönümlenme oranı histerez ilmiği alanının histerez ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alanına oranı olarak tanımlanır.

Küçük Deformasyon Düzeylerinde Dinamik Zemin Davranışının Belirlenmesi

- G_{\max} 'ın belirlenmesi amacı ile yaygın olarak **arazi ve laboratuvar deneylerine** başvurulmaktadır.
- Bu deneyler ile zeminin kayma dalgası hızı belirlenmekte

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (\gamma < 10^{-6})$$

eşitliği kullanılarak G_{\max} değeri elde edilmektedir.

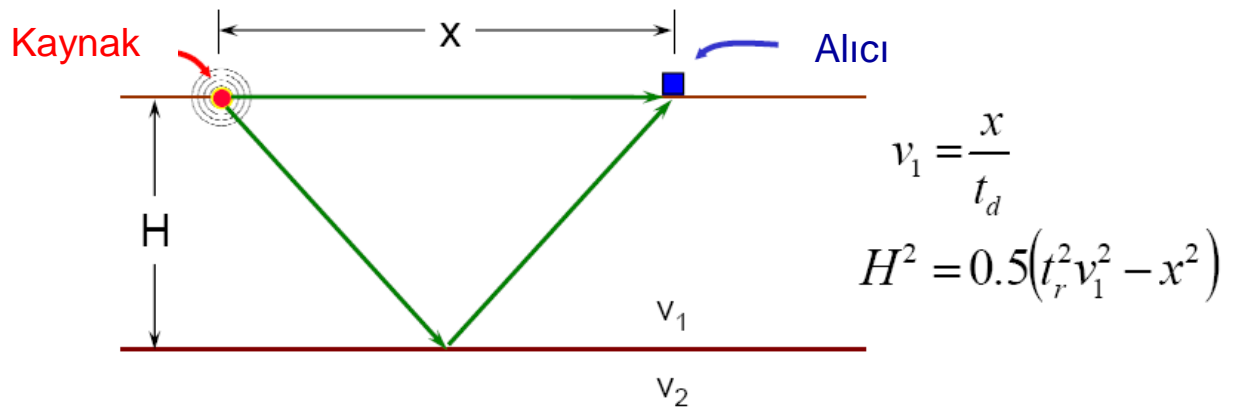
G_{\max} = küçük şekil değiştirmede

ρ = zemin yoğunluğu

V_s = zemin kayma dalgası hızı

$V_s (G_{max})$ ölçümü

- Sismik yansımaya



H= tabaka kalınlığı

x = Kaynak ile alıcı arasındaki mesafe

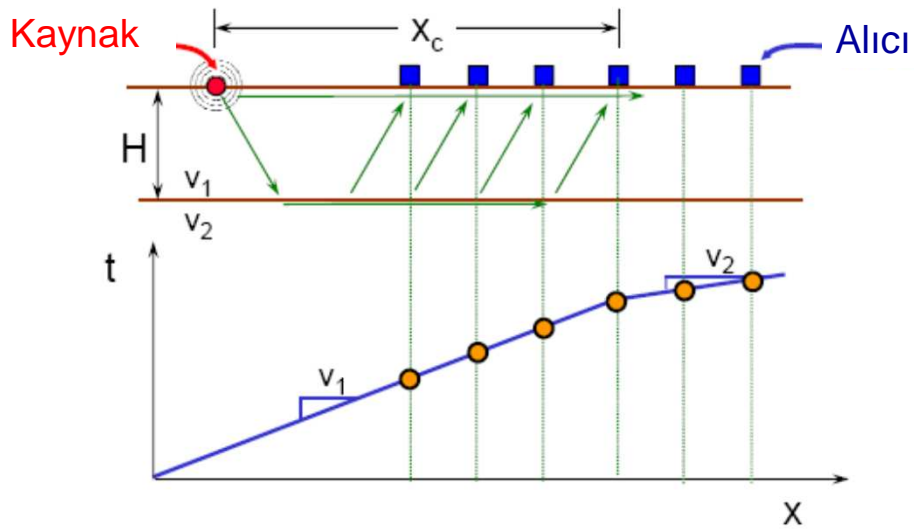
t_d = kaynaktan çıkan dalganın alıcıya varış zamanı

$V_s (G_{max})$ ölçümü

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

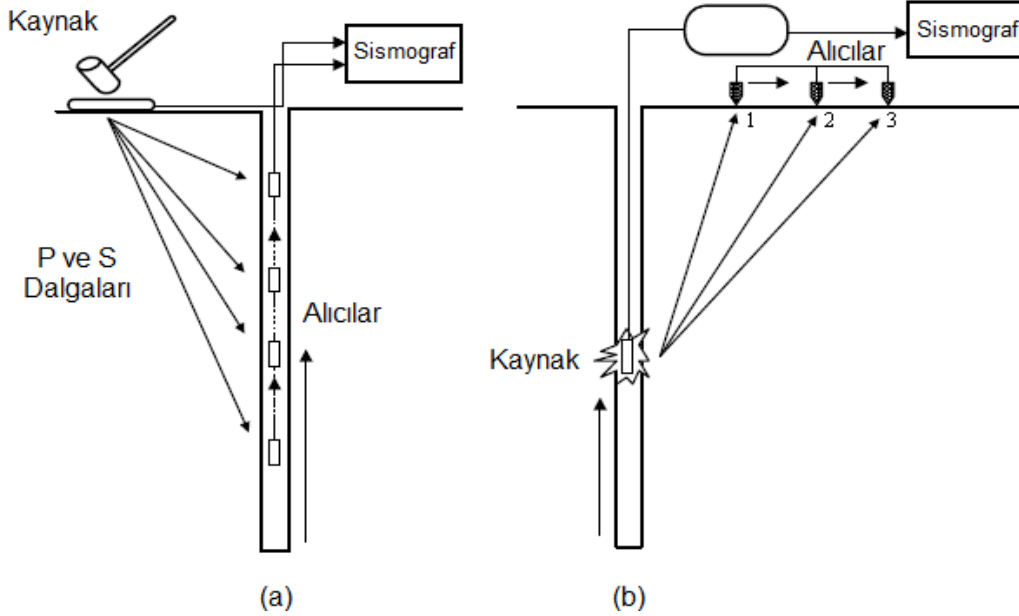
ν = Poisson Oranı'dır

$$H^2 = 0.5x_c^2 \left[\frac{(\nu_2 - \nu_1)}{(\nu_2 + \nu_1)} \right]$$



$V_s (G_{max})$ ölçümü – Sismik Kuyu Yöntemi

Zemin tabakalarına ait sıkışma ve kayma dalgası hızları elde edilmektedir.

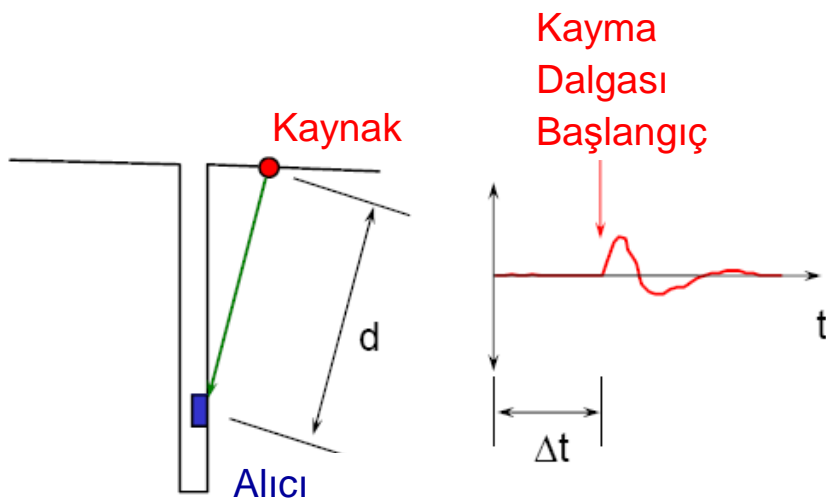


Aşağı yönlü yöntemde zemin yüzeyinde bir darbe etkisi ile oluşturulan titreşim dalgalarının açılan bir kuyu içerisinde farklı derinliklere yerleştirilen alıcılara geliş zamanları belirlenmektedir

Yukarı yönlü yöntemde ise titreşim dalgaları kuyu içerisinde farklı derinliklerde oluşturulur ve yüzeye yerleştirilen alıcılara geliş zamanları belirlenir

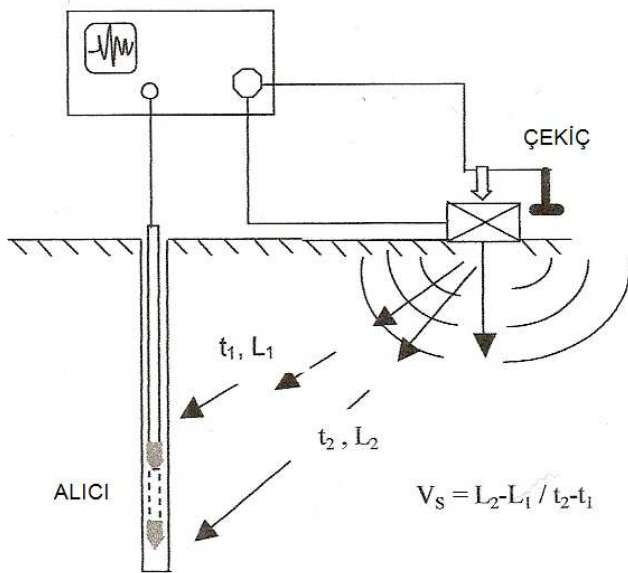
$V_s (G_{max})$ ölçümü

- Sismik aşağı kuyu



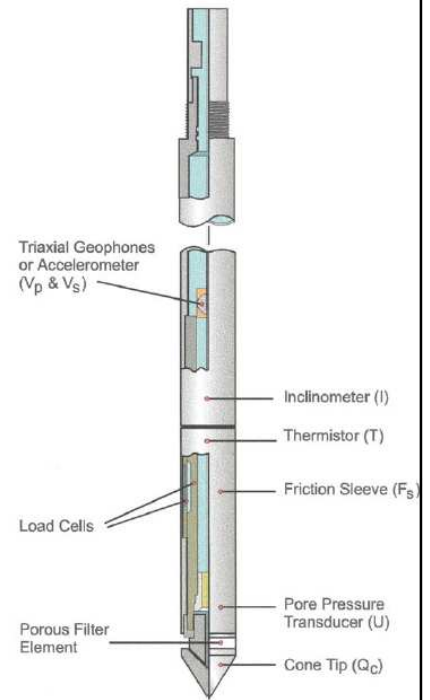
$$V_s = d / \Delta t$$

Sismik CPT (Luna ve Jadi, 2000)



Konik penetrometre ile ölçü alınırken değişik aşamalarda durulur ve zemin yüzeyinde uygulanan dinamik enerji ile üretilen dalgaların konik penetrometredeki jeofon ile algılanması sağlanır.

Sismik koni ucu



Kayma dalgası hızının amirik eşitliklerden belirlenmesi

- Standart Penetrasyon Deneyi (SPT N) -
- Koni Penetrasyon Deneyi (CPT- q_c) deneylerinden kayma dalgası hızı tahmin edilebilir.

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

**SPT Darbe Sayısı (N) İle Kayma Dalgası Hızı Arasındaki
Amirik Korelasyonlar (Manual for Zonation on Seismic
Geotechnical Hazards, 1993)**

Araştırmacılar	Eşitlik
Imai ve Yoshimura (1970)	$V_s = 76N^{0.33}$
Ohba ve Toriumi (1970)	$V_s = 84N^{0.31}$
Ohta ve Goto (1978)	$V_s = 69N^{0.17} \cdot D^{0.2} \cdot E \cdot F$ $E = 1.0 (H)$ $F = 1.00 (Kil)$ $E = 1.3 (P)$ = 1.09 (İ.Kum) = 1.07 (O.Kum) = 1.14 (K.Kum) = 1.15 (Ç.Kum) = 1.45 (Çakıl)
Imai (1977)	$V_s = a \cdot N^b$ $a = 102$ $b = 0.29 (H.Kil)$ $= 81$ = 0.33 (H.Kum) $= 114$ = 0.29 (P.Kil) $= 97$ = 0.32 (P.Kum)
Okamoto vd. (1989)	$V_s = 125N^{0.3} (P.Kum)$
İyisan (1996)	$V_s = 51.5 N^{0.316}$

V_s : Kayma Dalgası Hızı (m/s) N : SPT Vuruş Sayısı (N Sayısı)
D : Derinlik (m) H : Halosen P : Pleistosen
İ : İnce O : Orta K : Kaba Ç : Çakılı

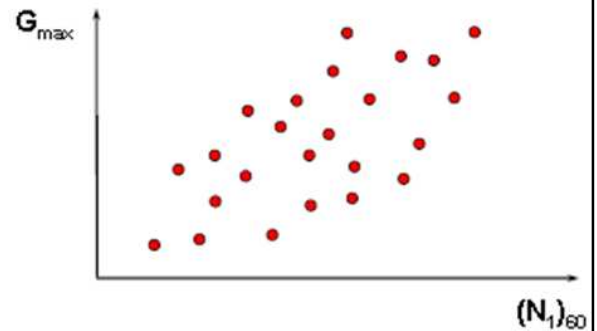
G_{\max} arazi araştırmaları veya ampirik eşitliklerle tahmini

$$G_{\max} = 220 (k_2)_{\max} (\sigma'_m)^{0.5}$$

Seed ve diğ. (1984)

$$(k_2)_{\max} \cong 20 (N_{160})^{1/3}$$

$$\sigma'_m = \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \right) \sigma'_v$$



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 zeminlerde

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

P_a atmosfer basıncı (kPa),
 q_c koni uç direnci (kPa)
 e_o boşluk oranı

Tipik G_{max} değerleri

yumuşak kilde 2750-13750 kPa,
katı kilde 6900-34500 kPa,
siltli kumda 27600-138000 kPa,
sıkı kum ve akılda 69000-345000 kPa,
kaya dolguda 1000000 kPa

Arazi deneylerinden G_{max} 'ın tahmini

Yerinde Dene	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 σ'_m birimi lb/ft ²
	$G_{max} = 325N_{60}^{0.68}$	Kum	Imai ve Tonouchi, (1982)	G_{max} birimi kips/ft ²
CPT	$G_{max} = 1634(q_c)^{0.250}(\sigma'_v)^{0.375}$	Kuvars kumu	Rix ve Stokoe (1991)	G_{max} , q_c ve σ'_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 σ'_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 σ'_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
	$G_{max} = \frac{530}{(\sigma'_v/p_e)^{0.25}} \frac{\gamma_D/\gamma_w - 1}{2,7 - \gamma_D/\gamma_w} K_o^{0.25} (p_e \sigma'_v)^{0.5}$	Kum, silt, kil	Hryciw (1990)	G_{max} , p_e ve σ'_v birimleri aynı; γ_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; α : boşaltma-yükleme şartlarına bağlı bir faktör; teoriye ve arazi deneylerine dayalı

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.
- f) Bender elemanlar

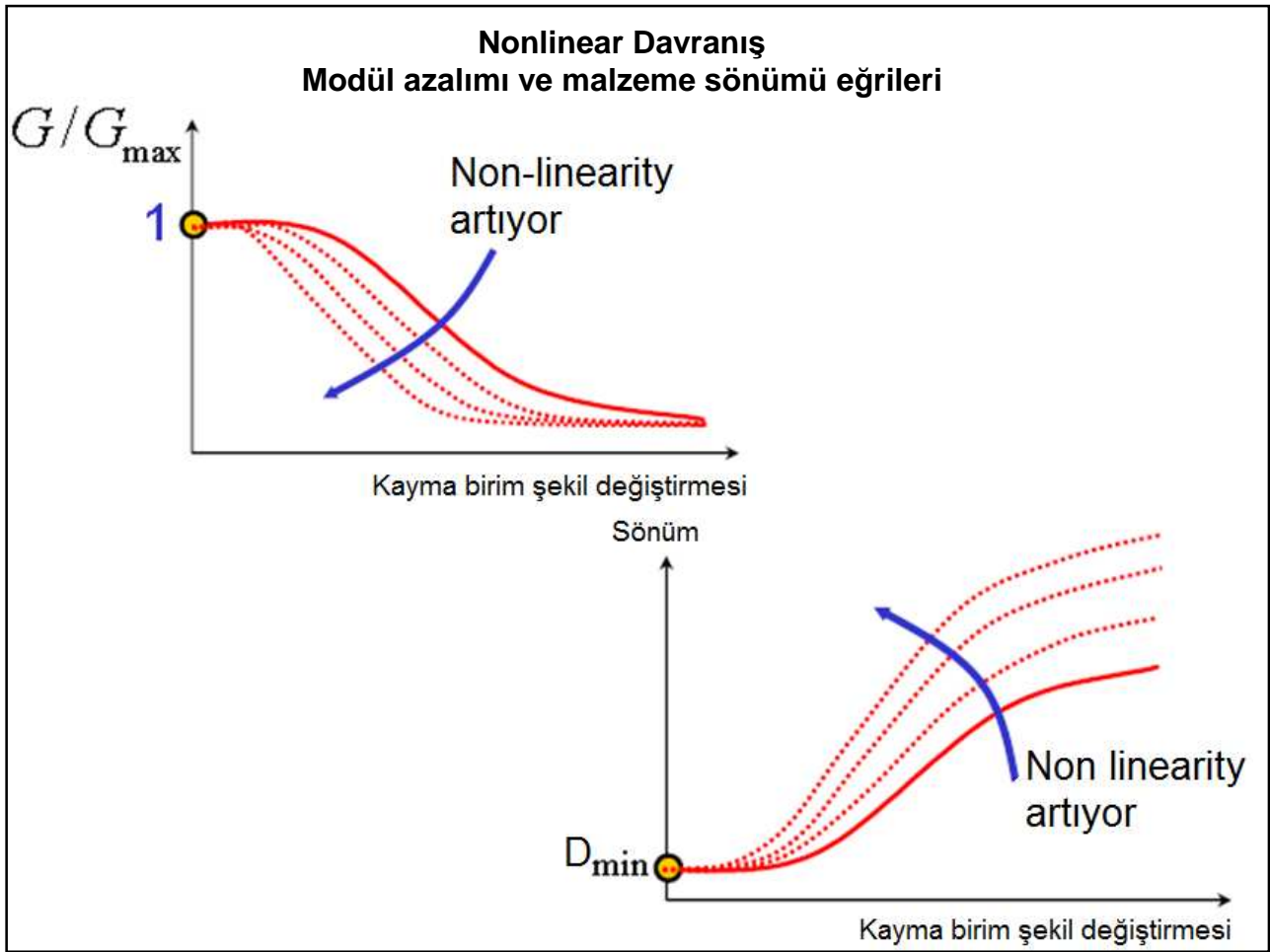
Dinamik zemin parametrelerinin Laboratuarda deneysel olarak belirlenmesi

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

- a) **Dinamik üç eksenli deneyler (Dynamic triaxial test)**
(drenajlı ve drenajsız kesme) ($10^{-4} < \gamma < 0.005$)
- b) **Dinamik basit kesme (Dynamic simple shear test)**
($10^{-4} < \gamma < 0.005$)
- c) Burulmalı kesme (Torsional Shear test) ($10^{-5} < \gamma < 0.005$)
- d) **Sarsma tablası (Shaking Table)**
- e) Rezonant kolonu (Rezonant column test)
deneyleri kullanılmaktadır.
- f) **Bender ve extender elemanlar**

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

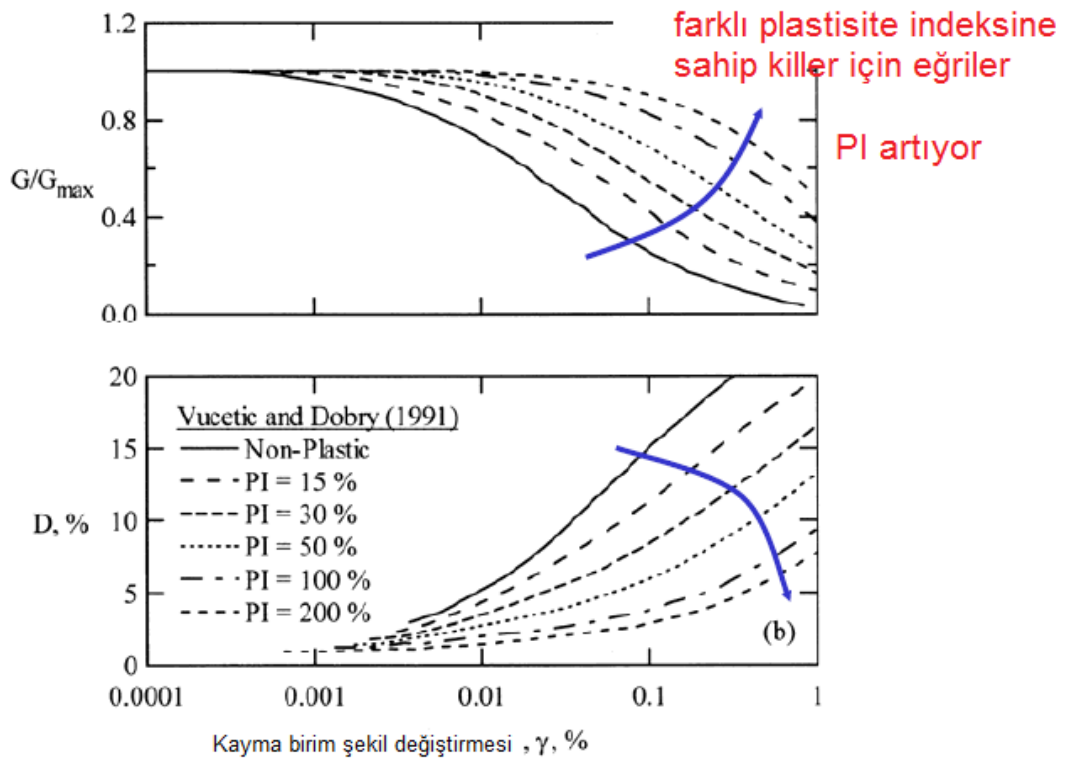
- Zeminin plastisitesi G/G_{\max} (modül azalım) eğrisinin biçimini oldukça fazla etkilemektedir.
- Bu eğriler, ileri dercede plastik zeminlerin doğrusal tekrarlı eşik kayma birim deformasyonu γ 'nın düşük plastisiteli zeminlerdekinden büyük olduğunu göstermiştir.
- Bu özellik, zemin çökelinin bir deprem hareketini büyütme ve sönümlenme tarzını kuvvetlice etkilemektedir.



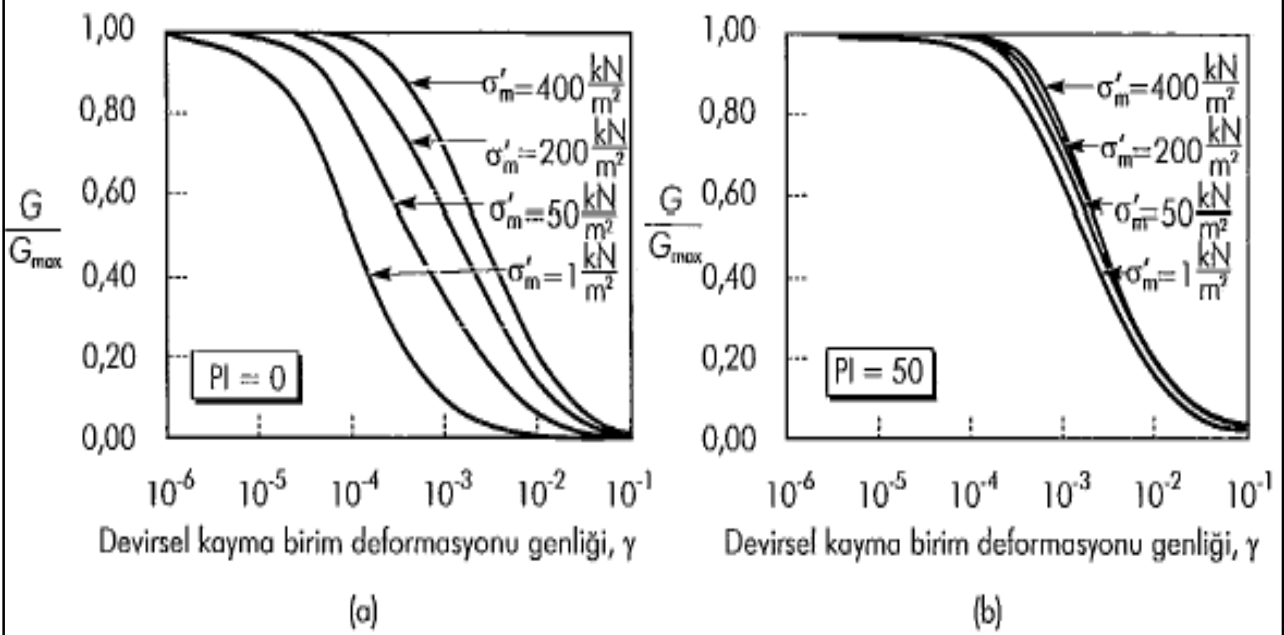
Nonlinear Davranış

Modül azalımı ve malzeme sönümü eğrileri

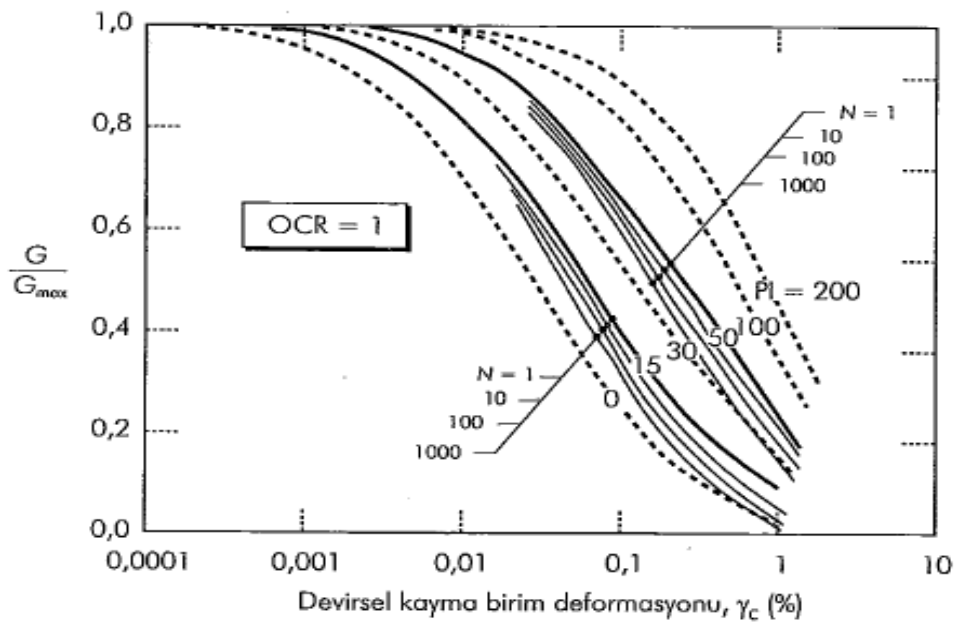
Amirik eğriler - Vucetic & Dobry (1991)



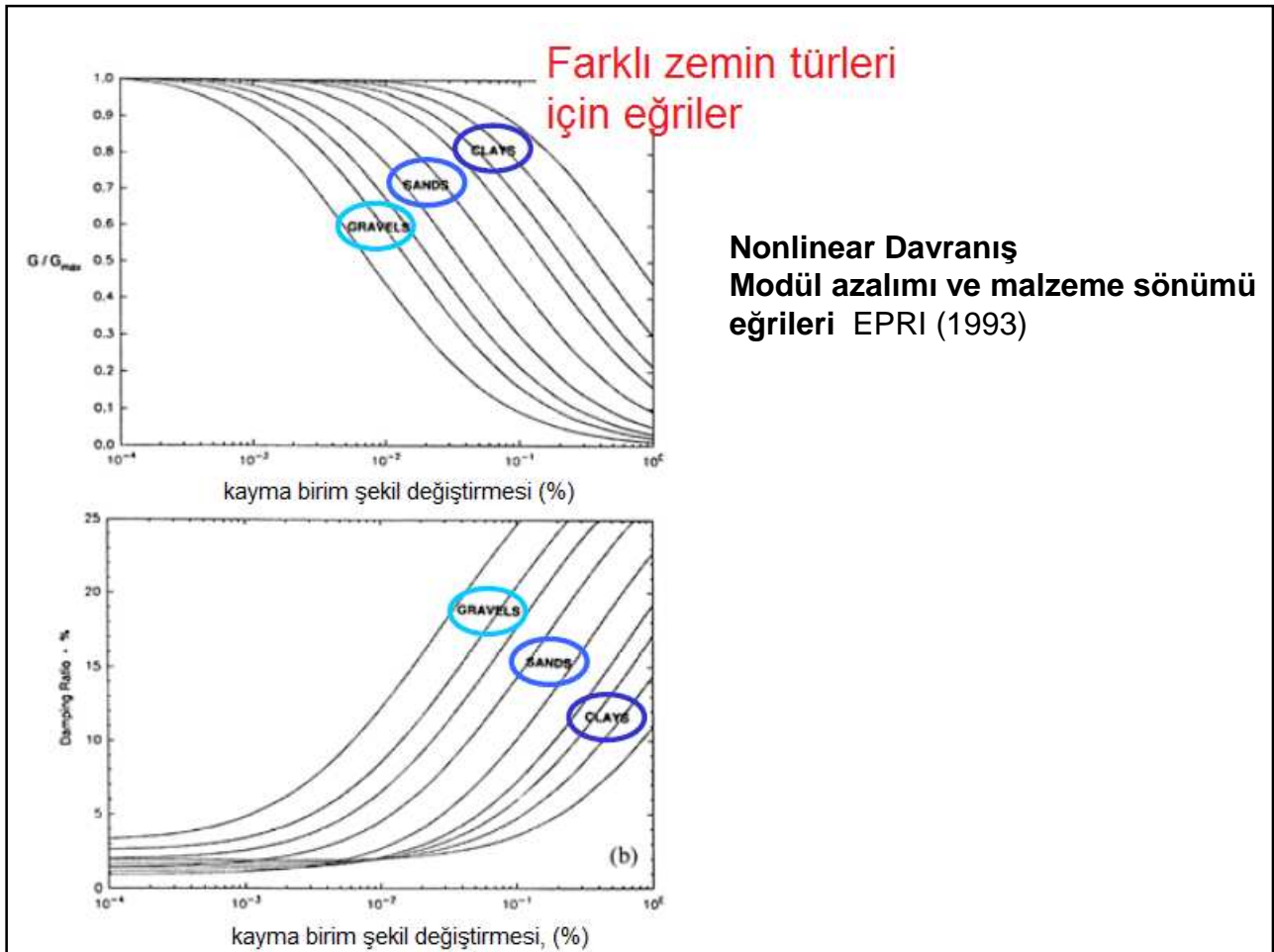
Efektif çevre basıncı ile plastisite indeksinin modül azalım davranışı üzerindeki etkisi



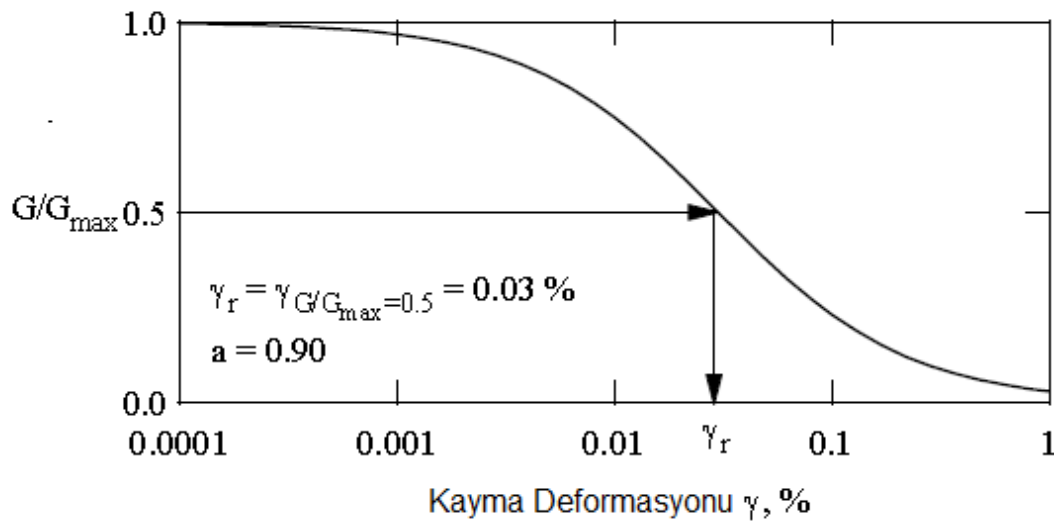
Modül Azalımı G/G_{max} , Plastisite indeksi, N İlişkileri



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



Kayma modülü azalım eğrisi (Darendeli, 1997 ve 2001)



$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a}$$

Darendeli (1997) eşitliği ile verilen

modelde γ_r = referans kayma deformasyonu değerinin 0.3, a = katsayısının 0.90 alınmasını önermektedir

Darendeli (2001) Masing Kuralları'nı (1926) dikkate alarak $a = 1$ için sönüm oranını aşağıdaki eşitlik ile tanımlamıştır.

$$D_{\text{Masing},a=1.0} = \frac{100}{\pi} \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right]$$

$$D_{\text{Masing}} = c_1 D_{\text{Masing},a=1.0} + c_2 D_{\text{Masing},a=1.0}^2 + c_3 D_{\text{Masing},a=1.0}^3$$

Darendeli (2001) deneysel çalışmalar sonucunda c_1 , c_2 ve c_3 katsayılarını aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

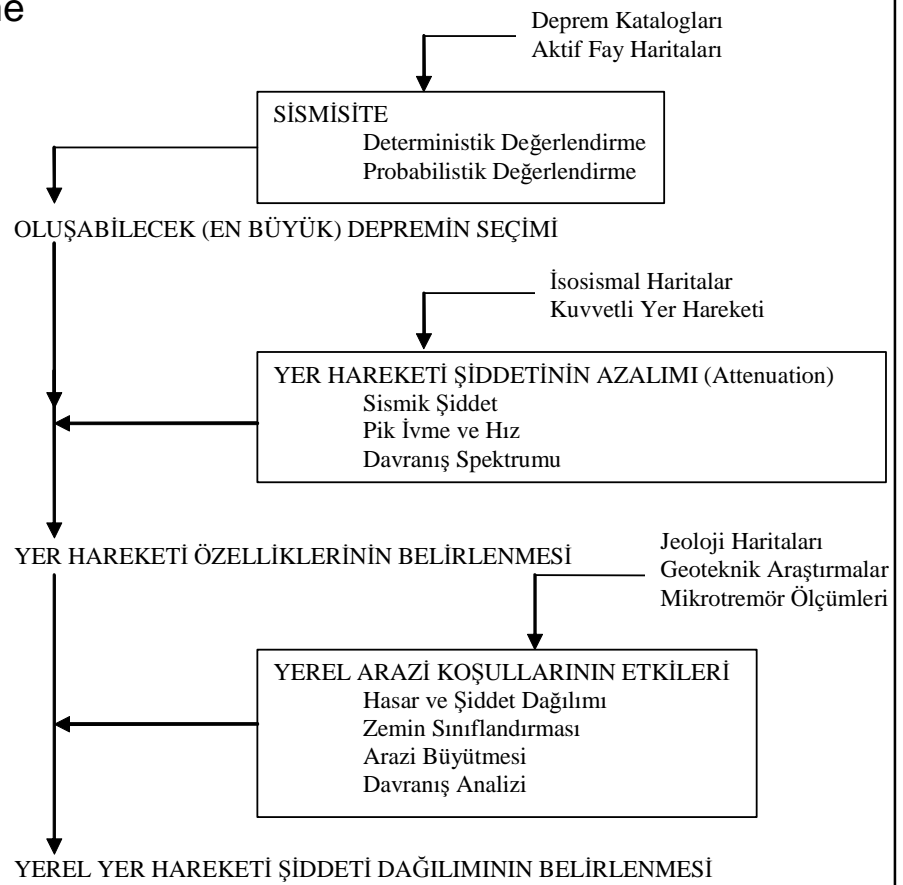
$$c_1 = -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2523$$

$$c_2 = 0.0805a^2 + 0.0710a + 0.0095$$

$$c_3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003$$

**YEREL ZEMİN KOŞULLARI
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Sismik Bölgeleme Çalışmalarında İzlenebilecek Yol



YEREL ARAZİ KOŞULLARININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASINDA İZLENECEK YOL

- Geçmiş depremlerde gözlenen davranış ve jeolojik bilgilerin değerlendirilmesi
- Arazinin zemin koşullarını ve topoğrafik özelliklerini dikkate alan ayrıntılı arazi davranış (tepki) analizleri

Yerel Zemin Koşullarının Deprem Hasarlarına Etkilerinin Değerlendirilmesi Bakımından Önemli Depremler

- 1964 Niigata ve 1964 Alaska
- 1967 Caracas
- 1971 San Fernando
- 1979 Imperial valley
- 1985 Mexico City
- 1989 Loma Prieta
- 1995 Kobe (Japonya)
- 1999 Kocaeli (Türkiye)
- 1999 Chi Chi (Taiwan)

**Relatif Amplifikasyon Faktörleri ile Ortalama
Kayma Dalgası Hızı Arasındaki Ampirik
Korelasyonlar (Manual for Zonation on Seismic
Geotechnical Hazards, 1993)**

Araştırmacılar	Eşitlik
Midorikawa (1987)	$A = 68V_1^{-0.6}$ ($V_1 < 1100$ m/s) =1.0 ($V_1 > 1100$ m/s)
Joyner ve Fumal (1984)	$A = 23V_2^{-0.45}$
Borcherdt vd. (1991)	ASHA = $700 / V_1$ (zayıf hareket için) = $600 / V_1$ (kuvvetli hareket için)

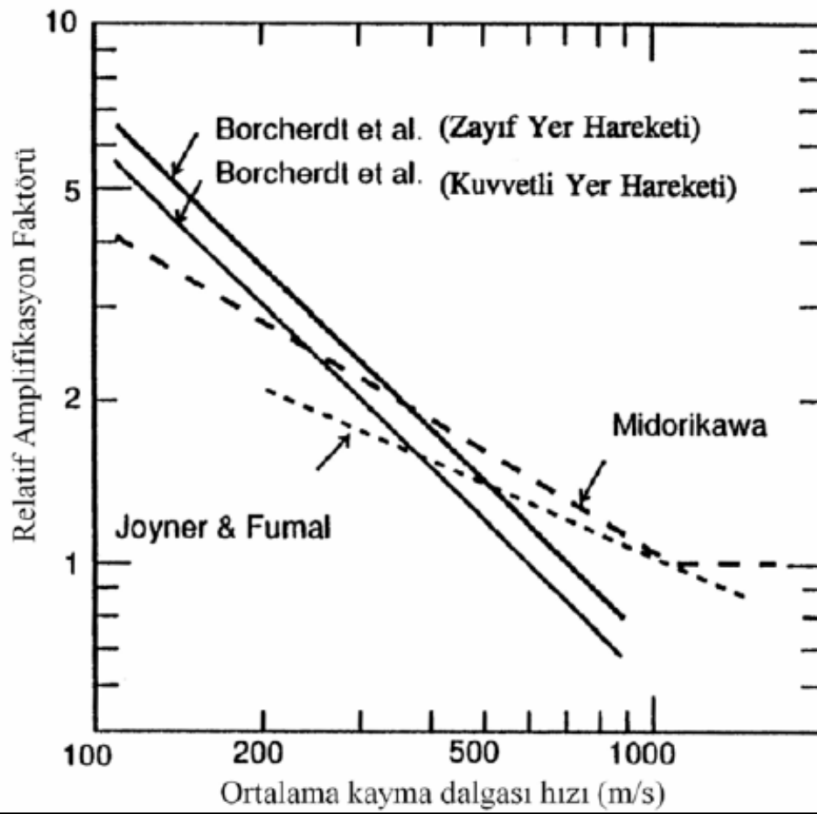
A = Maksimum yer hızı için relatif amplifikasyon faktörü

AHSA = 0.4 ila 2.0 saniye periyodundaki ortalama yatay spektral amplifikasyon

V_1 = 30 m derinliğe kadar ortalama kayma dalgası hızı (m/s)

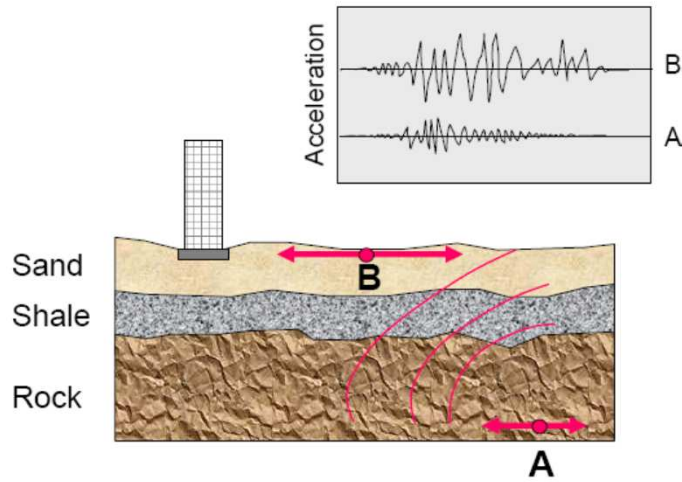
V_2 = Bir saniye periyodlu dalga için 1/4 dalga boyu derinliğe kadar ortalama kayma dalgası hızı (m/s)

Relatif amplifikasyon ile yüzeye yakın tabakaların ortalama kayma dalgası hızı arasındaki ilişkiler

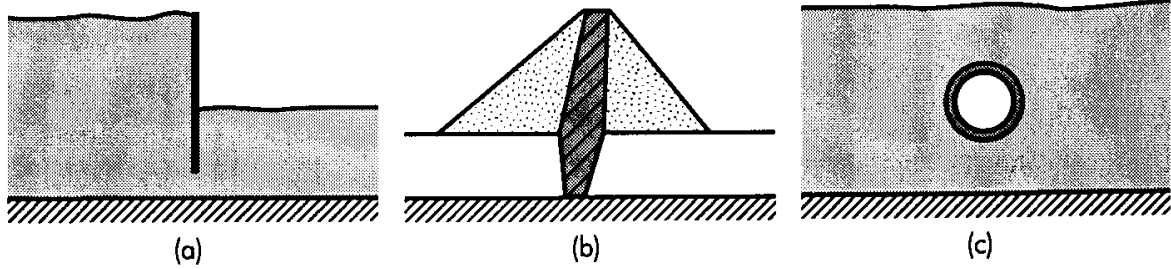


Dinamik davranış analizleri ve zemin büyütmesi

- Davranış analizleri ile yerel zemin koşullarının yer sarsıntıları üzerindeki etkileri değerlendirilebilmektedir
- Bu analizlerde taban kayası olarak nitelendirilen formasyondan kayma dalgasının yukarı doğru hareket ettiği varsayılmaktadır.
- Tek-boyutlu ve iki-boyutlu analiz yöntemlerinde zemin tabakalarının lineer veya non-lineer davranışı dikkate alınabilmektedir.

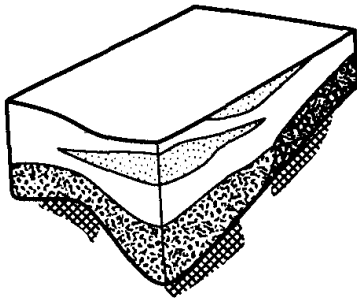


Tipik olarak iki boyutlu düzlemsel birim
deformasyon dinamik tepki analizleri ile
çözülen yaygın problemler

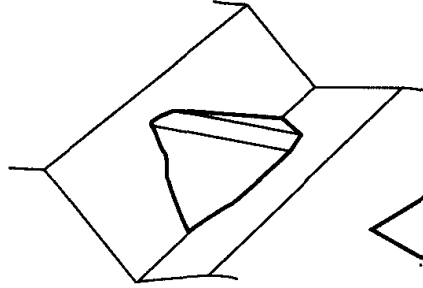


- (a) konsol palplanş perde
(b) toprak baraj
(c) tünel

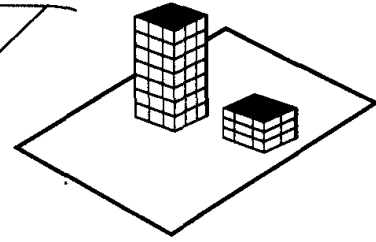
Üç boyutlu dinamik tepki veya zemin yapı etkileşim analizi gerektiren üç durum



(a)



(b)

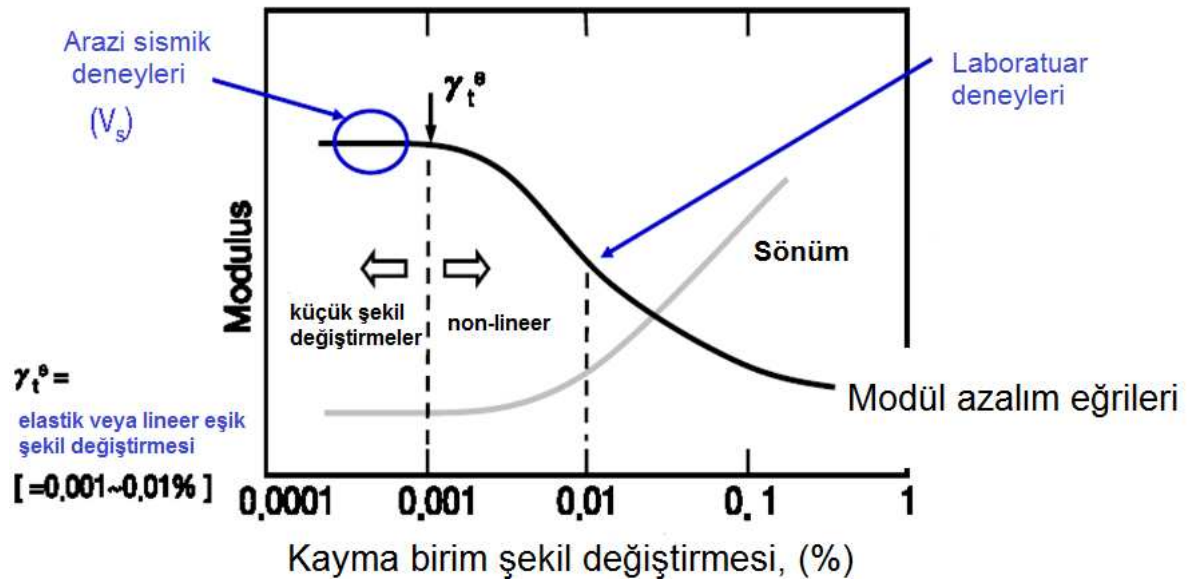


(c)

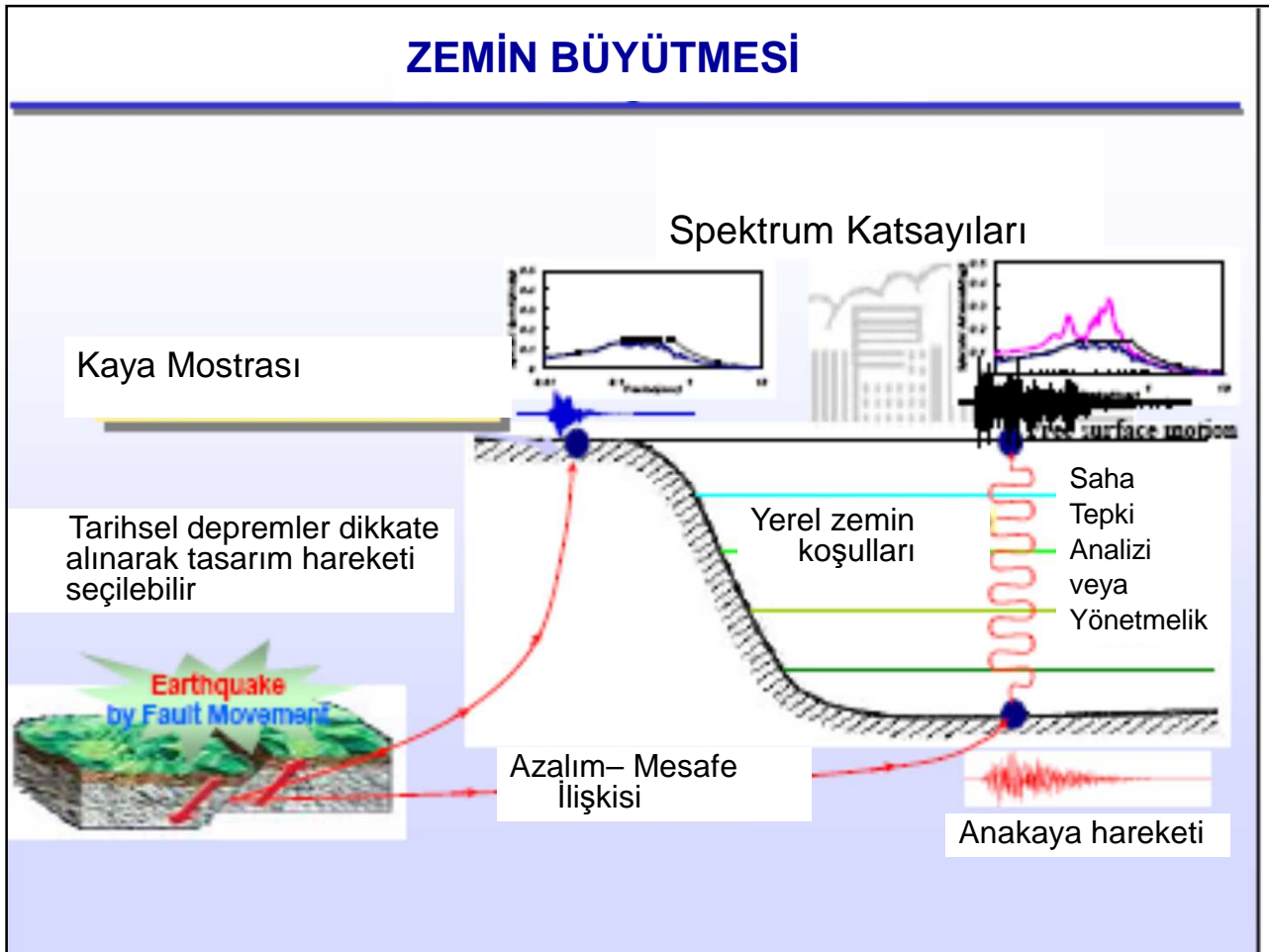
- (a) zemin şartlarının üç boyutta önemli olarak değiştiği saha
(b) dar vadideki toprak baraj
(c) zemin tepkisinin yapıların tepkisinden etkilendiği saha.

Lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Küçük şekil değiştirmeler $\langle \gamma_t^e \rangle$	Orta şekil değiştirmeler $\langle \gamma_t^e \rangle$
Maksimum Modül : G_{max}, E_{max}	Modül Azalım Eğrisi : $G-\gamma, E-\epsilon$
Minimum Sönüm Oranı : D_{min}	Sönüm Azalım Eğrisi : $D-\gamma$



ZEMİN BÜYÜTMESİ



Kaydedilmiş depremler

<http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>

PEER Strong Motion Database



[Introduction](#) [Browse](#) [Search](#) [Documentation](#) [Providers](#) [Credits](#)

ARCHIVED DATABASE VERSION. [Visit the latest version of the database!](#)

1: Search earthquake or station characteristics and peak values

Earthquake

Mechanism

Magnitude (Range) -
 ML M MS Any

Distance (km) -
 Closest Hypocentral Projection of fault plane (JB distance) Any

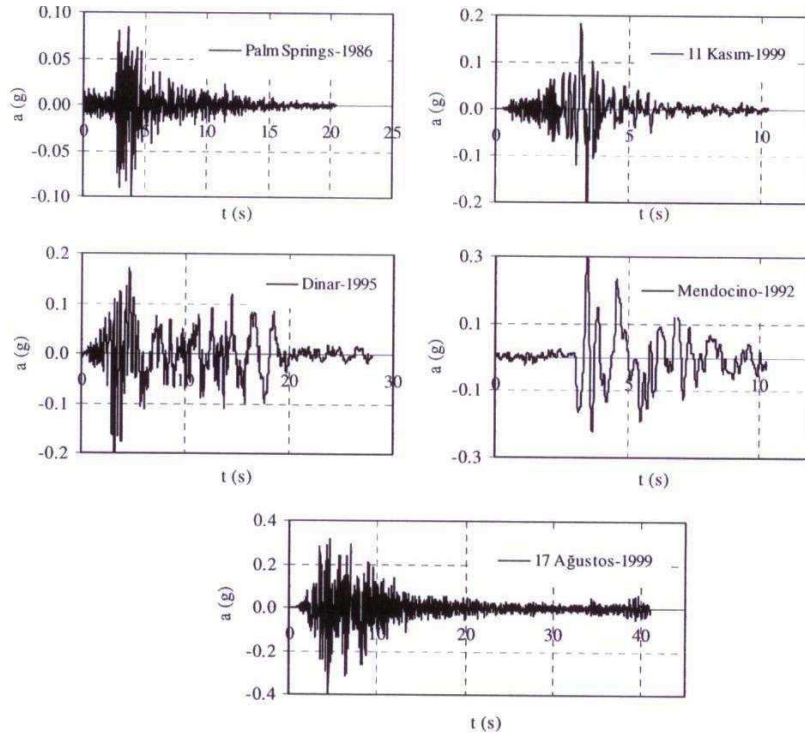
Site Classification USGS (Compare to NEHRP classifications)

Geomatrix

Taiwan CWB

Kaydedilmiş depremler

Maksimumlara göre tasarım – davranışta 3 deprem kaydı
Ortalamalara göre tasarım – davranışta 7 deprem kaydı



Depremler Sırasında Yapısal Davranış Üzerinde Temel Zemininin Etkileri

Sarsıntı Şiddeti ve Binaya Etkiyecek Kuvvetlerde Meydana Gelen Artışlar

- İvme Büyütmesi (Amplifikasyon)
- Spektral Davranış Parametreleri

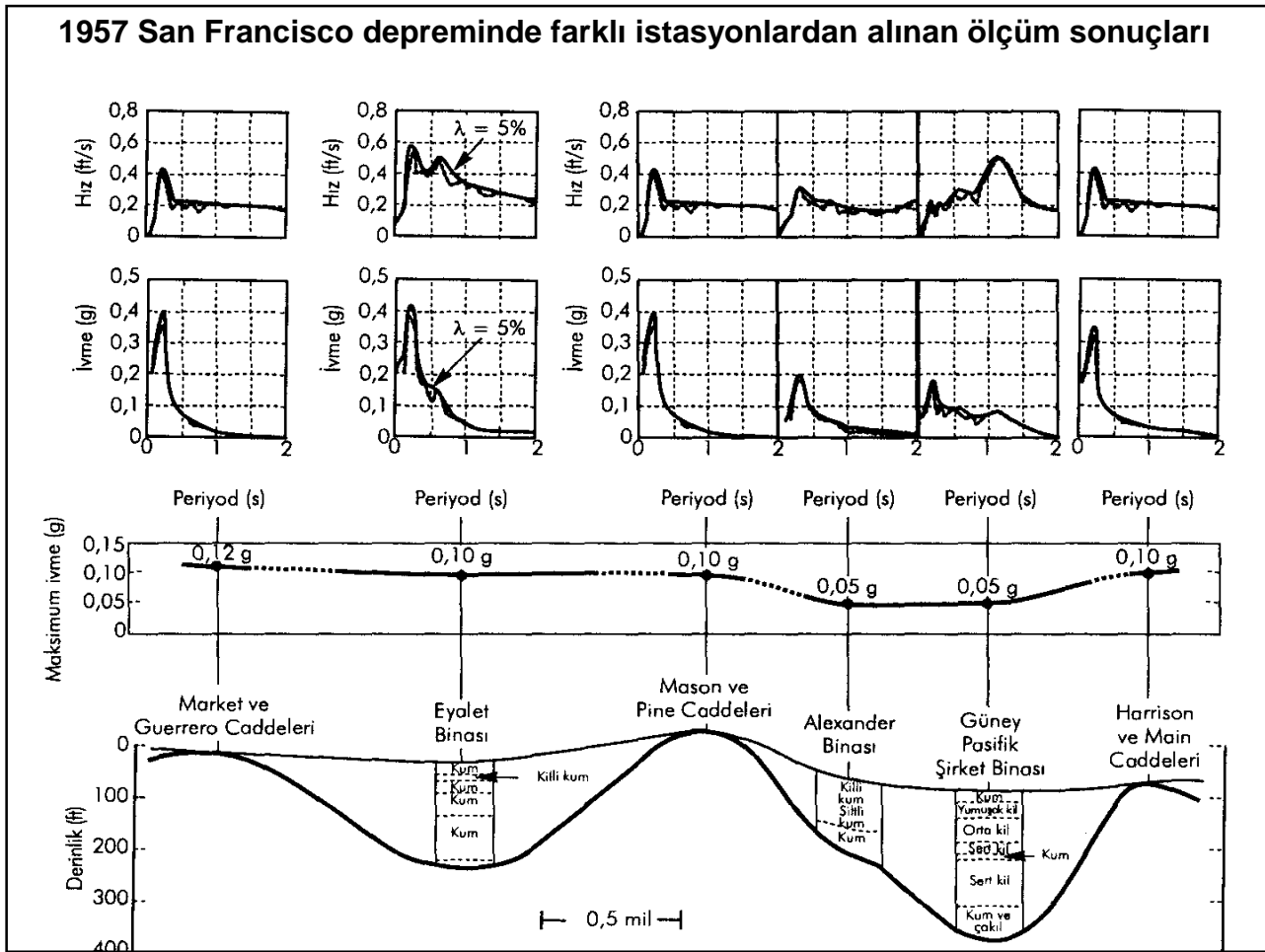
Temel Zemininde Meydana Gelebilecek Olumsuzluklar

- Taşıma Gücü Kaybı
- Aşırı Oturmalar
- Yanal Akmlar
- Şev Kaymaları

1957 San Francisco depremi

- Bu konudaki ilk önemli bilgiler 1957 San Francisco depreminde değişik noktalarda alınan bazı ölçümlerden elde edilmiştir.
- Bu ölçümler, birbirine yakın bölgelerde oluşan yer ivmelerinin bazen birbirinden %100'e varan farklılıklar gösterdiğini ve bunun büyük olasılıkla ölçüm istasyonları altındaki zemin koşullarından ileri geldiğini ortaya koymuştur.

1957 San Francisco depreminde farklı istasyonlardan alınan ölçüm sonuçları

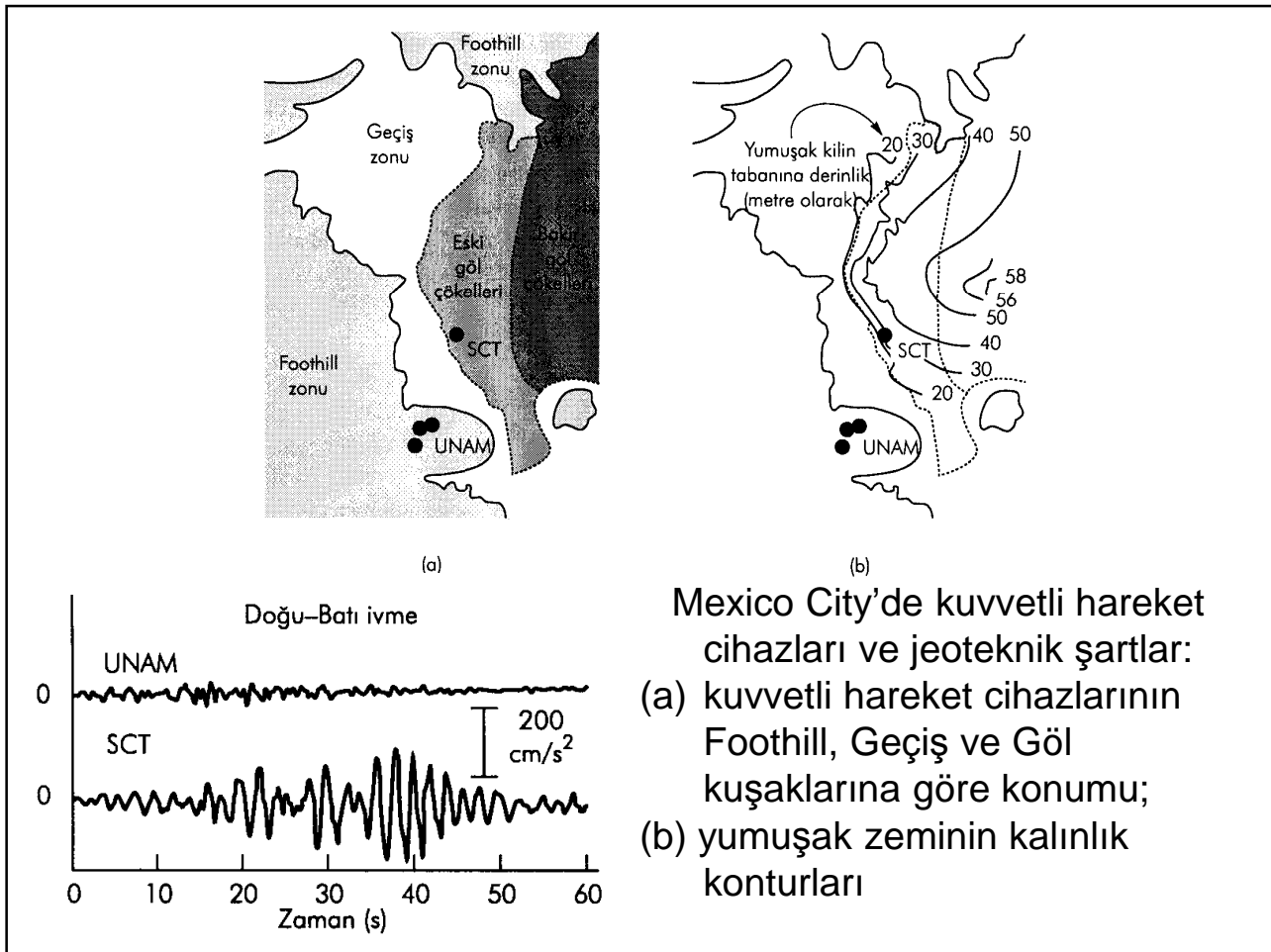


1957 San Francisco depremi

- Pik yatay ivme ve tepki spektrumları cinsinden ifade edilen yer hareketlerindeki değişimler, şehirdeki 4 millik bir enine kesitte zemin şartlarındaki değişimlerle birlikte yukarıdaki şekilde verilmiştir.
- Kaya mostralarındaki (Market ve Guerrero, Mason ve Pine, Harrison ve Main Caddeleri'nde) yer yüzeyi hareketleri birbirine çok benzerken, kalın zemin çökellerinin bulunduğu yerlerdeki hareketlerin genlik ve frekans içerikleri oldukça farklıdır.

1985 Mexico City depremi

- 19 Eylül 1985 Michoacan depremi ($M_s=8,1$) dışmerkez civarında (Meksika'nın Pasifik kıyısına Yakın yerlerde) sadece orta düzeyde hasara neden olmuştur
- Fakat 350 km kadar uzaktaki Mexico City'de çok büyük hasarlar meydana gelmiştir.
- Mexico City'de değişik sahalarda kaydedilen yer hareketleri üzerinde yapılan çalışmalar, yerel zemin koşulları ile yıkıcı yer hareketi arasındaki önemli ilişkiyi ortaya koymuştur.
- Genellikle 0.04g değerinden düşük olan taban kayası pik ivme değerleri, eski bir göl yatağında yer alan kalın kil tabakalarında yaklaşık 5 misli büyümeye maruz kalmış ve periyodları arazi periyoduna yakın yapılarda çok büyük hasarlara yol açmıştır.



- Mexico City'de kuvvetli hareket cihazları ve jeoteknik şartlar:
- (a) kuvvetli hareket cihazlarının Foothill, Geçiş ve Göl kuşaklarına göre konumu;
- (b) yumuşak zeminin kalınlık konturları

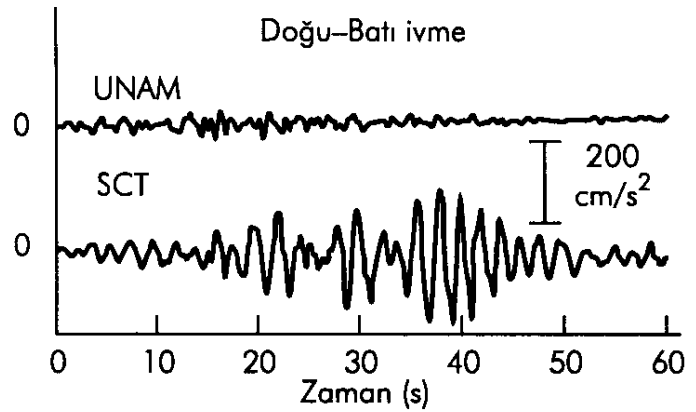
UNAM istasyonunun temelini 3 ile 5 m kalınlığındaki bazaltlar oluşturmaktadır.

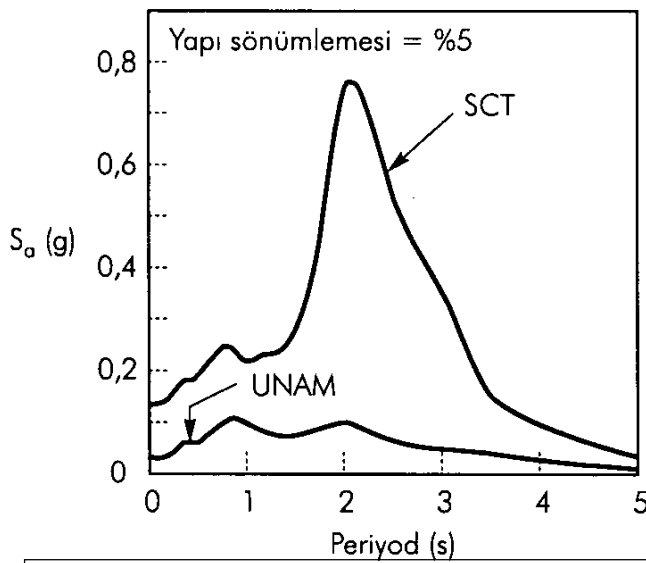
SCT sahasının zemini, kayma dalgası hızı yaklaşık 75 m/s ve kalınlığı 35-40 m olan yumuşak kilden oluşmaktadır.

Göl zonunda, zeminin karakteristik periyodu $T_s=4H/V_s \approx 4(37,5)/75=2s$

Genellikle 0.04 g değerinden düşük olan taban kayası pik ivme değerleri, eski bir göl yatağında yer alan kalın kil tabakalarında yaklaşık 5 misli büyümeye maruz kalmış ve **periyodları arazi periyoduna yakın yapılarda çok büyük hasarlara yol açmıştır.**

UNAM ve SCT sahaslarındaki kuvvetli yer hareketi cihazları ile kaydedilmiş ivmenin zamana göre değişimi





tepki spektrumları

karakteristik zemin periyodu
 $T_s=2s$ SCT tepki
 spektrumunun maksimumu
 ile uyum içerisindedir.

Hasarın en büyüğü, karakteristik zemin periyodunun 1,9 ile 2,8 s arasında tahmin edildiği ve 38 ile 50 m kalınlığındaki yumuşak çökellerden oluşan Göl Zonunda olmuştur.

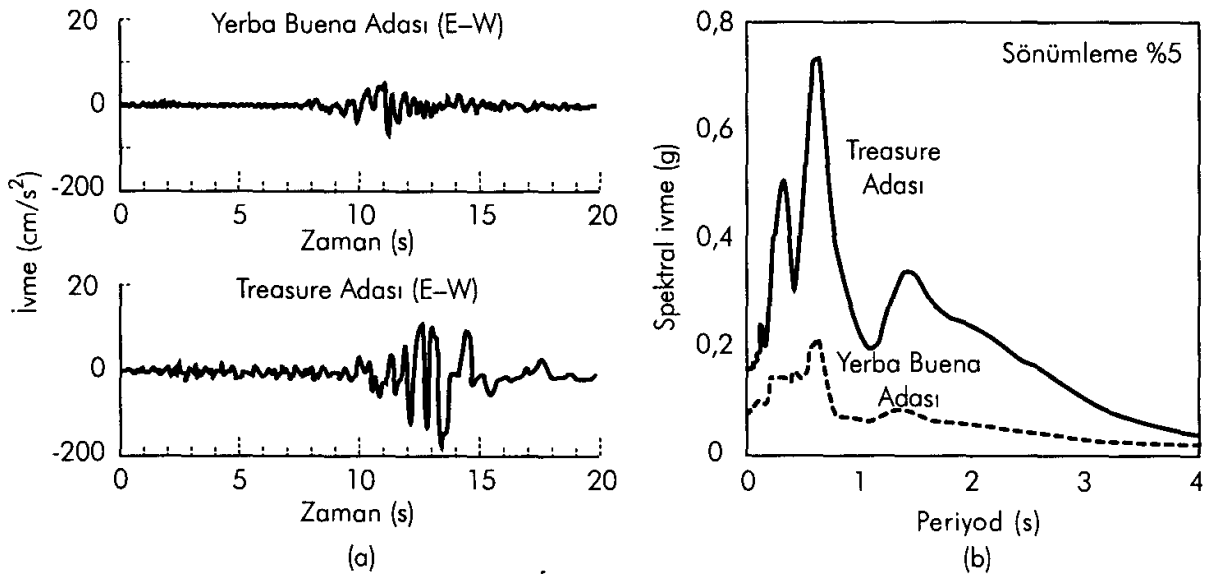
Bu zonda, 5'ten daha az katlı veya 30'dan daha fazla katlı modern binalarda düşük düzeyde hasar gözlenmiştir.

Ancak, kat sayısı 5 ile 20 arasında değişen yapılar ya tamamen çökmüş ya da ağır hasara uğramıştır.

1989 Loma Prieta depremi

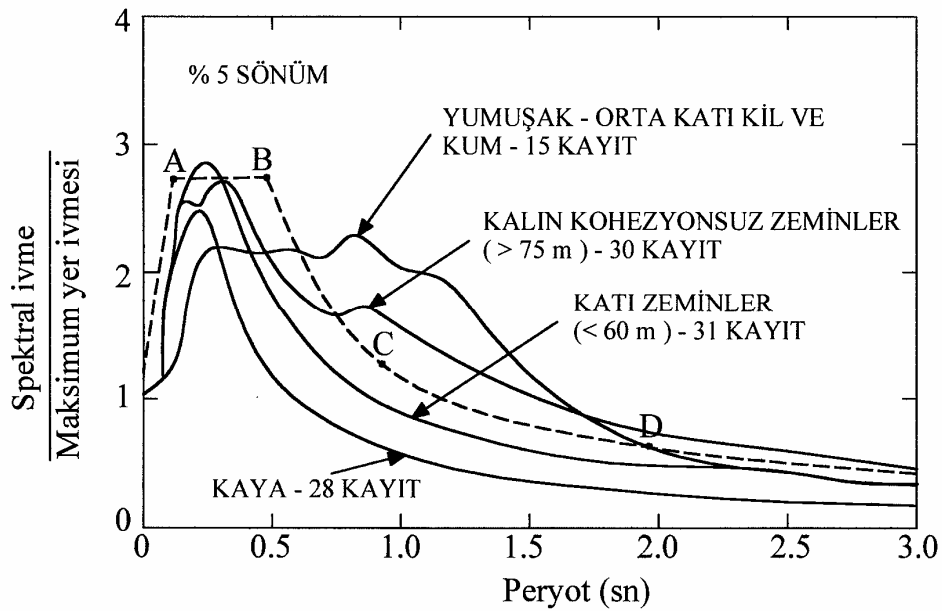
- Yerba Buena Adası'ndaki istasyon bir kaya mostrası üzerindedir.
- Treasure Adası ise, bir kısmı Yerba Buena Adası'nın hemen kuzeybatısında bulunan ve siğ kum sırtlarından oluşan denizel alanın hidrolik dolgu yapılarak oluşturulduğu, 400 akrelik yapay bir adadır.

1989 Loma Prieta depreminde de hasarın büyük çoğunluğu yumuşak zemin tabakalarının yer aldığı San Francisco –Oakland bölgesinde spektral ivmelerin kayalık bölgelere göre 2-4 defa büyüdüğü gözlenmiştir.



İki istasyon kaynaktan aynı mesafede

Değişik Arazi Koşulları için Ortalama İvme Spektrumları (Seed ve Idriss, 1983)



Deprem mühendisliğinde hesaplanan spektrumların normalize edilmesiyle (spektral ivme / maksimum yatay yer ivmesi) "**yerel zemin koşulları**"nın tepki spektrum eğrisine etkilerini daha açık bir şekilde gösterir.

Türkiye Deprem Yönetmeliği

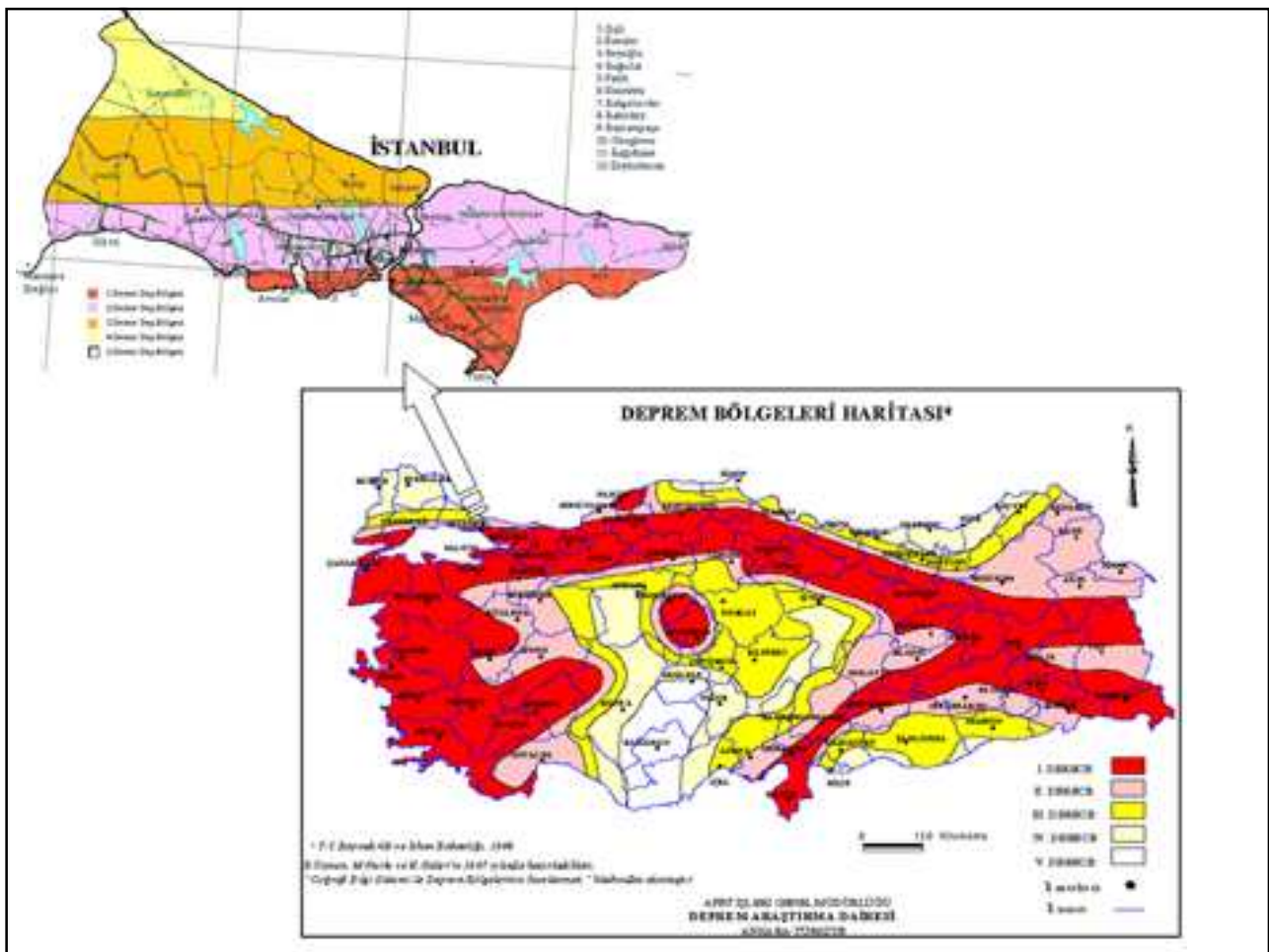
Zemin Sınıflandırma Sistemleri

Temel zeminini sınıflandırmada kullanılan başlıca kriterler (üst 30 m için)

- Kayma Dalgası Yayılma Hızı (v_s)
- Standart Penetrasyon Darbe Sayısı (N)
- Killi Zeminler için Drenajsız Kayma mukavemeti (C_u)
- Kumlu zeminler için Relatif sıkılık (D_r)

Bazı çok olumsuz zemin koşullarına sahip arazilerin

Göçebilen, sıvılaşabilen zeminler, aşırı hassas killer, çok yüksek plastisiteli killer, turba zeminler vb. özel olarak dikkate alınması gerekmektedir.



Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası

- Bu harita, Türkiye ve Dünya'daki mevcut deprem verileri ışığı altında hazırlanmış ve Bakanlar Kurulu'nun 18.4.1996 tarih ve 96/8109 sayılı kararı ile yürürlüğe girmiştir.
- Önceki haritalardan farklı olarak sismik tehlike analizlerinde olasılıksal yöntemler kullanılmıştır.
- **Buna göre, normal bir yapının 50 yıllık ekonomik ömrü içinde %90 olasılıkla bu ivme değerlerinden daha fazla bir ivmeye maruz kalmayacağı tahmin edilmektedir.**
- Ekonomik ömrü daha uzun veya önemli yapılar için karşılaşılabilecekleri en büyük ivme değerlerinin ayrıca hesaplanması gerekir.
- Türkiye Deprem Yönetmeliği 1997 yılında yürürlüğe girmiştir. 1998 ve 2007 yıllarında revizyondan geçmiştir.
-

TÜRKİYE DEPREM YÖNETMELİĞİ

- Bu yönetmelik, depreme karşı dayanıklı tasarımlarda yerel zemin koşullarının etkisini dikkate almak için dört yerel zemin sınıfını göz önüne almaktadır
- Spektrum katsayısı hesabında yerel zemin koşullarına göre seçilecek spektrum karakteristik periyotları kullanılması öngörülmektedir.
- Türkiye deprem yönetmeliğinde tasarıma esas deprem, aşılma olasılığı 50 yıllık süre için %10 (dönüş periyodu 475 yıl) olan yer hareketi olarak kabul edilmektedir.
- Bu hareketi göstermek için yerel zemin sınıflarına bağlı olarak % 5 sönüm oranındaki spektrum katsayıları, $S(T)$, tanımlanmıştır.
- Yerel zemin sınıflarının tasarım spektrumu üzerinde yarattığı farklılık spektrum karakteristik periyotları (T_A , T_B) sayesinde yansıtılmaktadır.

TÜRKİYE DEPREM YÖNETMELİĞİ

- Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne göre zemin grupları belirlenirken çeşitli parametrelere göre sınıflandırma yapılmaktadır.

Bu parametreler

- Standart Penetrasyon Deneyi sonuçları (N_{30}),
- Kayma dalgası hızı değerleri,
- Aksenal basınç deneyleri ve kumlu zeminler için relatif sıkılık değerleridir.

Zemin Grupları

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Stnd. Pntr. (N/30)	Relatif Sıklık (%)	Serbest Basınc Direnci (kPa)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayalar ve ayrışmamış sağlam Metamorfik kayalar, sert çimentolu tortul kayalar....	----	----	>1000	>1000
	2. Çok sıkı kum, çakıl.....	>50	85-100	----	>700
	3. Sert kil ve siltli kil.....	>32	----	>400	>700
(B)	1. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayalar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayalar..	----	----	500-1000	700-1000
	2. Sıkı kum, çakıl...	30-50	65-85	----	400-700
	3. Çok katı kil ve siltli kil..	16-32	----	200-400	300-700
(C)	1. Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar...	----	----	<500	400-700
	2. Orta sıkı kum, çakıl...	10-30	35-65	----	200-400
	3. Katı kil ve siltli kil...	8-16	----	100-200	200-300
(D)	1. Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları....	----	----	----	<200
	2. Gevşek kum.....	<10	<35	----	<200
	3. Yumuşak kil, siltli kil..	<8	----	<100	<200

Gruplandırmada, zeminler, en üst tabaka kalınlığına bağlı olarak dört ana zemin sınıfına ayrılır

Temel tabanı altındaki en üst zemin tabakası kalınlığının 3 m' den az olması durumunda, bir alttaki tabaka, en üst zemin tabakası olarak göz önüne alınabilmektedir.

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin grubu ve en üst zemin tabakası kalınlığı (h_1)
Z1	(A) grubu zeminler $h_1 \leq 15 m$ olan (B) grubu zeminler
Z2	$h_1 > 15 m$ olan (B) grubu zeminler $h_1 \leq 15 m$ olan (C) grubu zeminler
Z3	$15 m < h_1 \leq 50 m$ olan (C) grubu zeminler $h_1 \leq 10 m$ olan (D) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 50 m$ olan (C) grubu zeminler $h_1 > 15 m$ olan (D) grubu zeminler

Spektrum Karakteristik Peryotları

Yerel Zemin Sınıfı	T_A (saniye)	T_B (saniye)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

Yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren 10 m içinde olduğu durumlarda D grubuna giren zeminler için sıvılaşma potansiyelinin bulunup bulunmadığının saha ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi gerekmektedir.

Elastik Deprem yüklerinin tanımlanması: Spektral ivme katsayısı

Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan ve tanım olarak %5 sönüm oranı için elastik Tasarım İvme Spektrumu'nun yerçekimi ivmesi g 'ye bölünmesine karşı gelen spektral ivme katsayısı, $A(T)$,

$$A(T) = A_0 I S(T)$$

$A(T)$ = spektral ivme katsayısı

A_0 = Etkin yer ivmesi katsayısı

I = Bina önem katsayısı

$S(T)$ = Spektrum ivme katsayısı, yerel zemin koşullarına ve bina doğal periyoduna (T) göre tanımlanmaktadır.

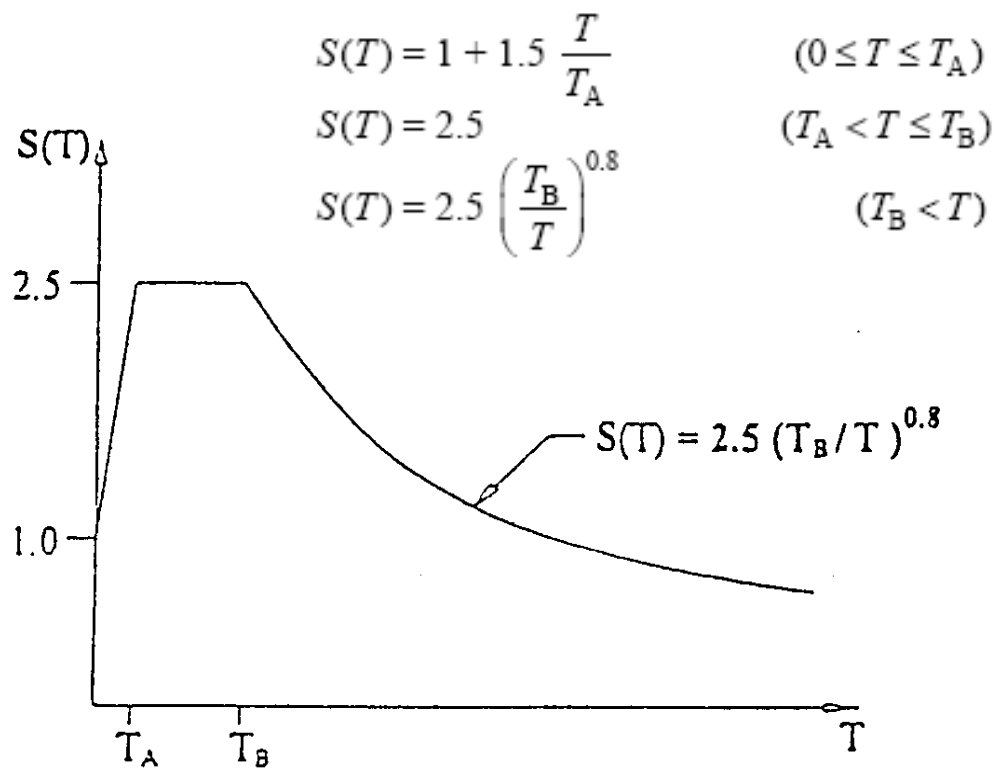
Deprem Bölgesi	A_0
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

Elastik Deprem Yüklerinin Tanımlanması: Bina Önem Katsayısı

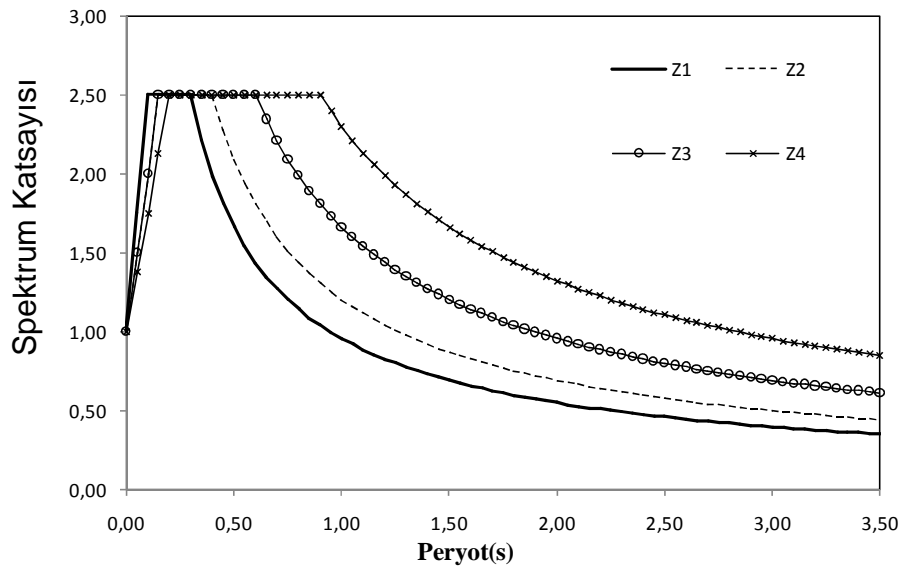
TABLO 2.3 – BİNA ÖNEM KATSAYISI (I)

<i>Binanın Kullanım Amacı veya Türü</i>	<i>Bina Önem Katsayısı (I)</i>
<p><u>1. Deprem sonrası kullanımı gereken binalar ve tehlikeli madde içeren binalar</u></p> <p>a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri; vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları)</p> <p>b) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar</p>	1.5
<p><u>2. İnsanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu ve değerli eşyanın saklandığı binalar</u></p> <p>a) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb.</p> <p>b) Müzeler</p>	1.4
<p><u>3. İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar</u></p> <p>Spor tesisleri, sinema, tiyatro ve konser salonları, vb.</p>	1.2
<p><u>4. Diğer binalar</u></p> <p>Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb)</p>	1.0

Spektrum Karakteristik Peryotları



Türkiye Deprem Yönetmeliğinde Farklı Zemin Sınıfları İçin Spektral Eğrilerin Karşılaştırılması

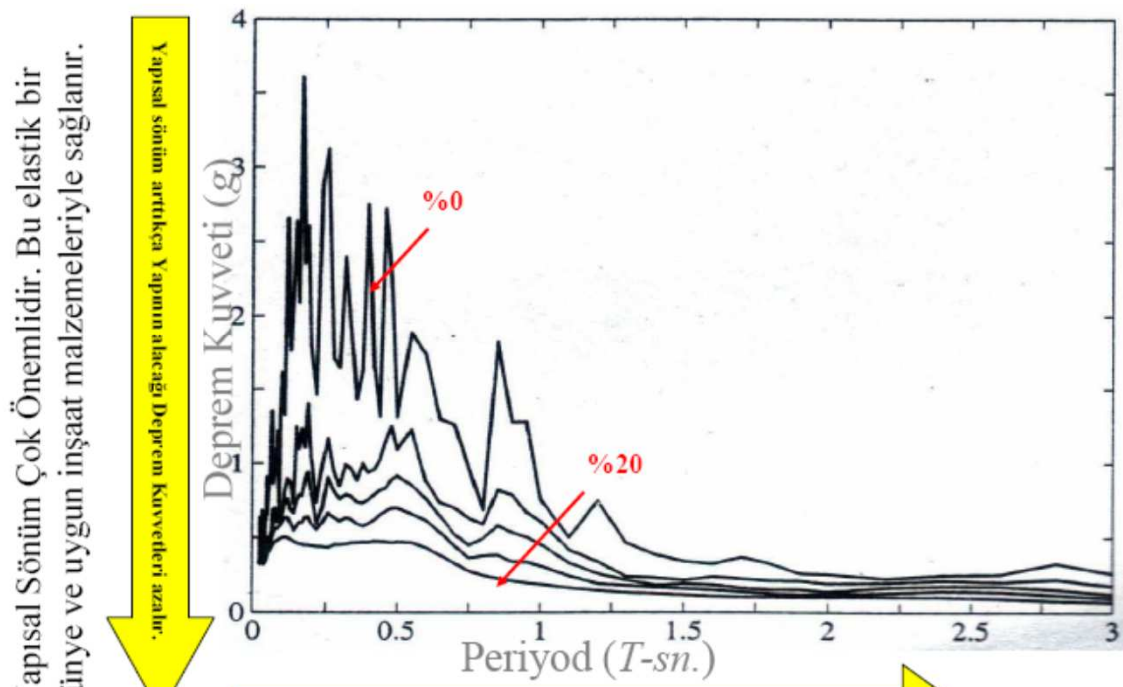


Sınıflamada spektrumun uzun periyotlardaki bandı gevşek veya yumuşak zeminlerde büyür.

Spektrumun düzeyi zemin sınıfına bağlı olarak değişmez alınmaktadır.

Türkiye Deprem Yönetmeliğinde bu değer 2.5 olarak alınmıştır .

Sönümü %0, %2, %5, %10 ve %20 Olan Yapılar İçin Normalize Edilmiş Yalancı İvme Tepki Spektrumu



Yapısal Esneklik arttıkça Yapının alacağı Deprem Kuvvetleri azalır.

Türkiye için Makro Tasarım İvme Spektrumu

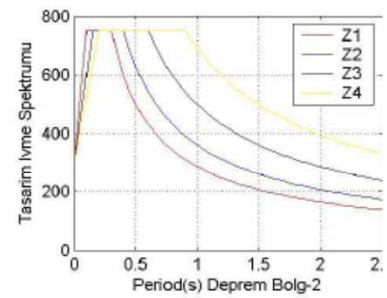
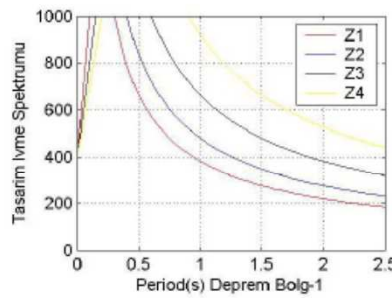
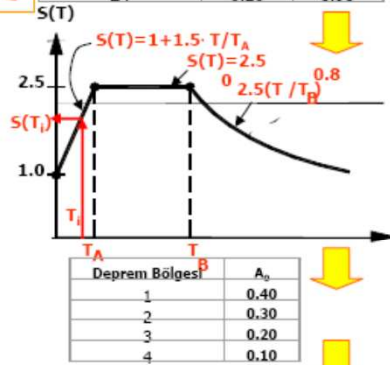
TABLO 12.2 - YEREL ZEMİN SINIFLARI

Yerel Zemin Sınıfı	T_A (sn)	T_B (sn)
Z1	0,10	0,30
Z2	0,15	0,40
Z3	0,15	0,60
Z4	0,20	0,90

Yerel Zemin Sınıfı	Tablo 12.1'e Göre Zemin Grubu ve En Üst Zemin Tabakası Kalınlığı (h_1)
Z1	(A) grubu zeminler
Z2	$h_1 > 15$ m olan (B) grubu zeminler
Z2	$h_1 \leq 15$ m olan (C) grubu zeminler
Z3	$15 \text{ m} < h_1 \leq 50$ m olan (C) grubu zeminler
Z3	$h_1 \leq 10$ m olan (D) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 50$ m olan (C) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 10$ m olan (D) grubu zeminler

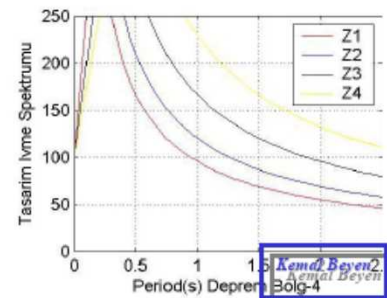
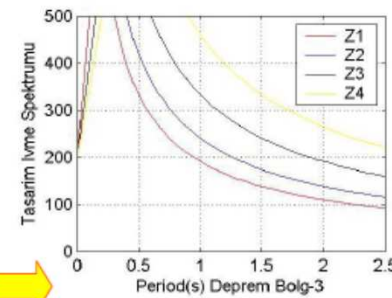
TABLO 12.1 - ZEMİN GRUPLARI

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Stand. Penetr. (N/30)	Relatif Sıkılık (%)	Serbest Basınç Dönüsü (kPa)	Kayma Dalgıy Hızı (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayalar ve aşınmışta sağlım metamorfik kayalar, sert çarstokta temel kayalar.	—	—	> 1000	> 1000
	2. Çok sıkı kum, çakıl.	> 50	85-100	> 700	> 700
	3. Sert kil ve siltli kil.	> 32	—	> 400	—
(B)	1. Tuf ve ağılaşma gibi gevrek volkanik kayalar, metamorfik dışlanımlar; bulunan en uygun çarstokta temel kayalar.	—	—	500-1000	700-1000
	2. Sıkı kum, çakıl.	30-50	65-85	—	400-700
	3. Çok kum kil ve siltli kil.	16-32	—	200-400	300-500
(C)	1. Yumşak çarstokluk dışlanımlar; bulunan en uygun çarstokta temel kayalar.	—	—	—	—



TABLO 2.3 - BİNA ÖNEM KATSAYISI (I)

Bina Önem Katsayısı Anacık veya Tünel	Bina Önem Katsayısı (I)
1. Deprem sırasında bulunması gereken binalar ve tehlikeli yapılar: a) Deprem sırasında hizmet kullandırması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, ofisler, bina ve tesisler, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve araçları, enerji üretim ve dağıtım tesisleri), vizejet, karayolları ve beldeler (yeni binalar, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. tehlikeli olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1,5
2. Tasarıma uygun sivil ve sığınma olarak bulunan ve depreme dayanıklı binalar: a) Okullar, diğer eğitim binaları ve tesisleri, yurt ve yatılıhanlar, aken binaları, sinemaları, vb. b) Müzeler	1,4
3. Tasarıma uygun sivil ve sığınma olarak bulunan binalar: a) Spor tesisleri, sinema, tiyatro ve konser salonları, vb. b) Diğer binalar	1,2
4. Diğer binalar: Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (konutlar, işyerleri, oteller, bina dışındaki yapılar, vb.)	1,0



$$A(T_i) = A_0 \cdot I \cdot S(T_i)$$

$A(T_i)$ = spektral ivme katsayısı

Kemal Beyen
Kemal Beyen

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

Yeni Deprem Yönetmeliğinde, deprem etkisi altında tasarımı yapılacak yeni binalar ile deprem performansı değerlendirilecek veya güçlendirilecek mevcut binalar için, geoteknik tasarıma ilişkin hususlar aşağıdaki ana başlıklar altında yer almaktadır:

1. Zemin araştırmalarının kapsamı,
2. Zemin koşullarının, sınıf ve parametrelerinin belirlenmesi,
3. Bina temellerinin ve çevre bodrum perdelerinin deprem etkisi altında tasarımı,
4. Yapı-zemin etkileşimi analizleri,
5. Zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi,
6. Zemin dayanma (istinat) yapılarının ve şevlerin deprem etkisi altında tasarım ilkeleri,
7. Gerekli olması durumunda uygulanmak üzere, arazi zemin özelliklerinin yerinde iyileştirilmesine ilişkin kurallar

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

Yeni yönetmelikte deprem etkisi altında yeni binaların tasarımında ve mevcut binaların değerlendirilmesinde esas alınacak deprem yer hareketi düzeyleri 4 seviye olarak belirlenmektedir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)

DD-1 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan çok seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)

DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)

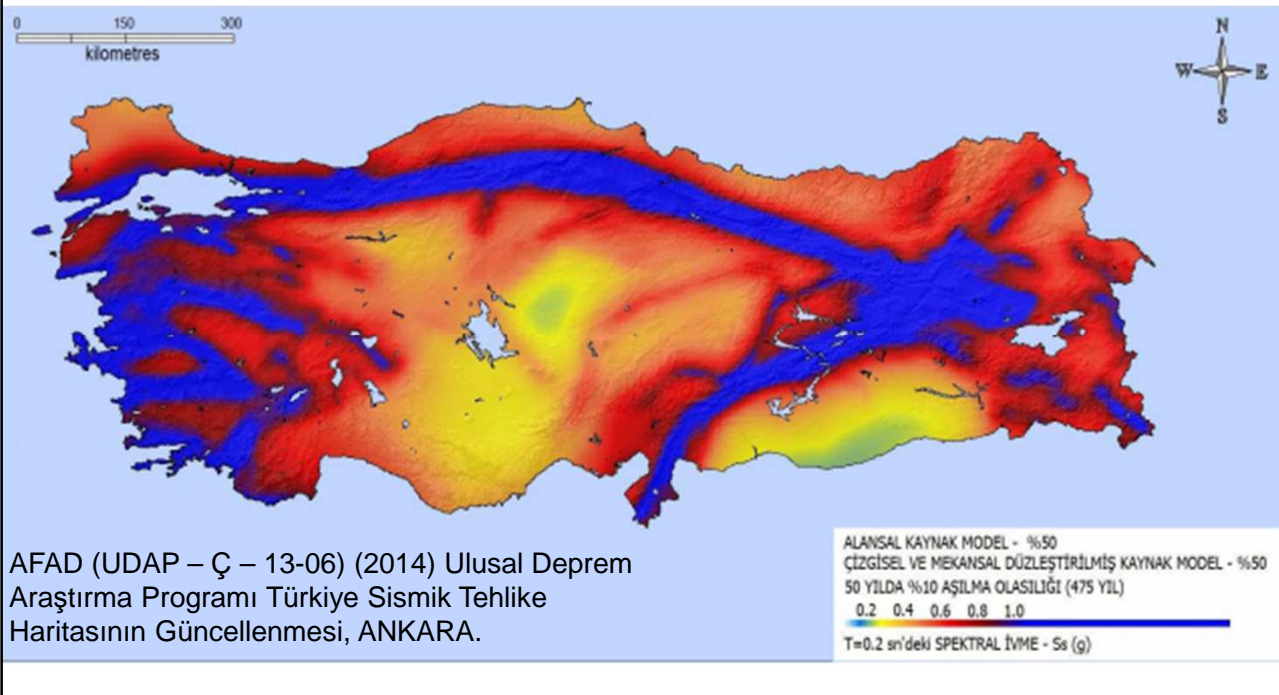
DD-3 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu deprem yer hareketini nitelemektedir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4)

DD-4 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 30 yılda aşılma olasılığının %10 olan ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 43 yıl olduğu deprem yer hareketini nitelemektedir.

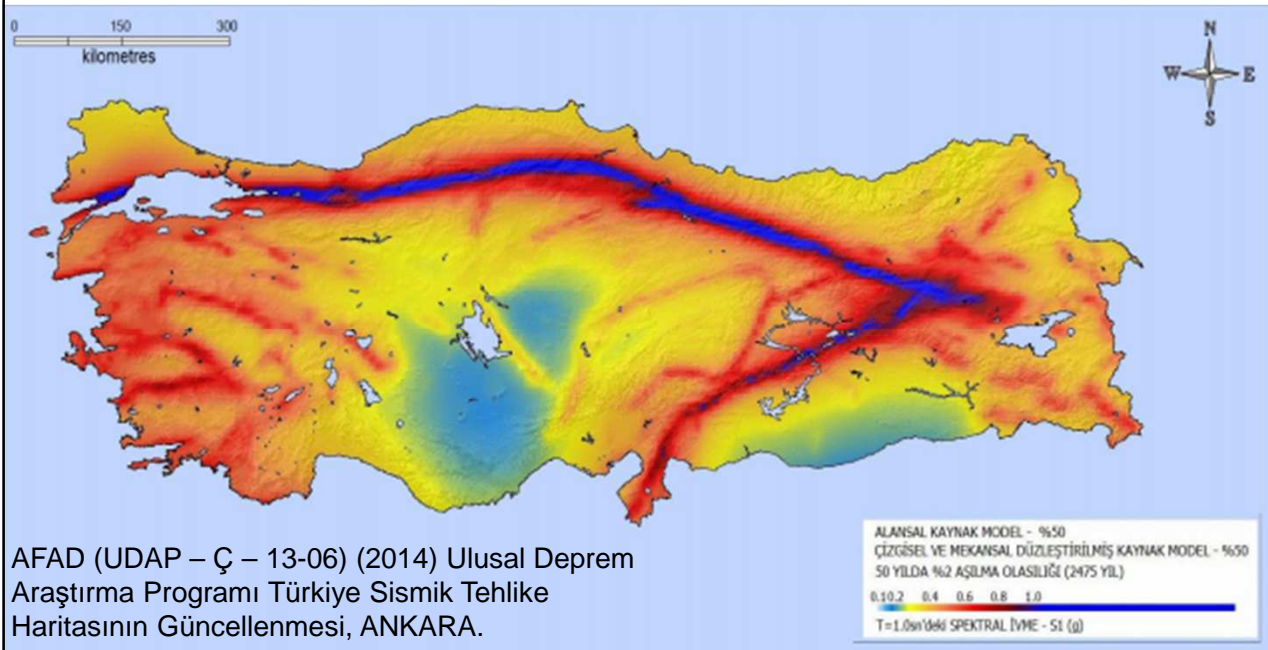
Kaya zeminde ($V_{s30}=760$ m/s) $T=0.2$ s için hesaplanan spektral ivme değerleri (2475 yıllık tekrar süresi için)

50 yılda %2 aşılma olasılığı için $T=0.2$ s için Spektral İvme (S_s) değeri

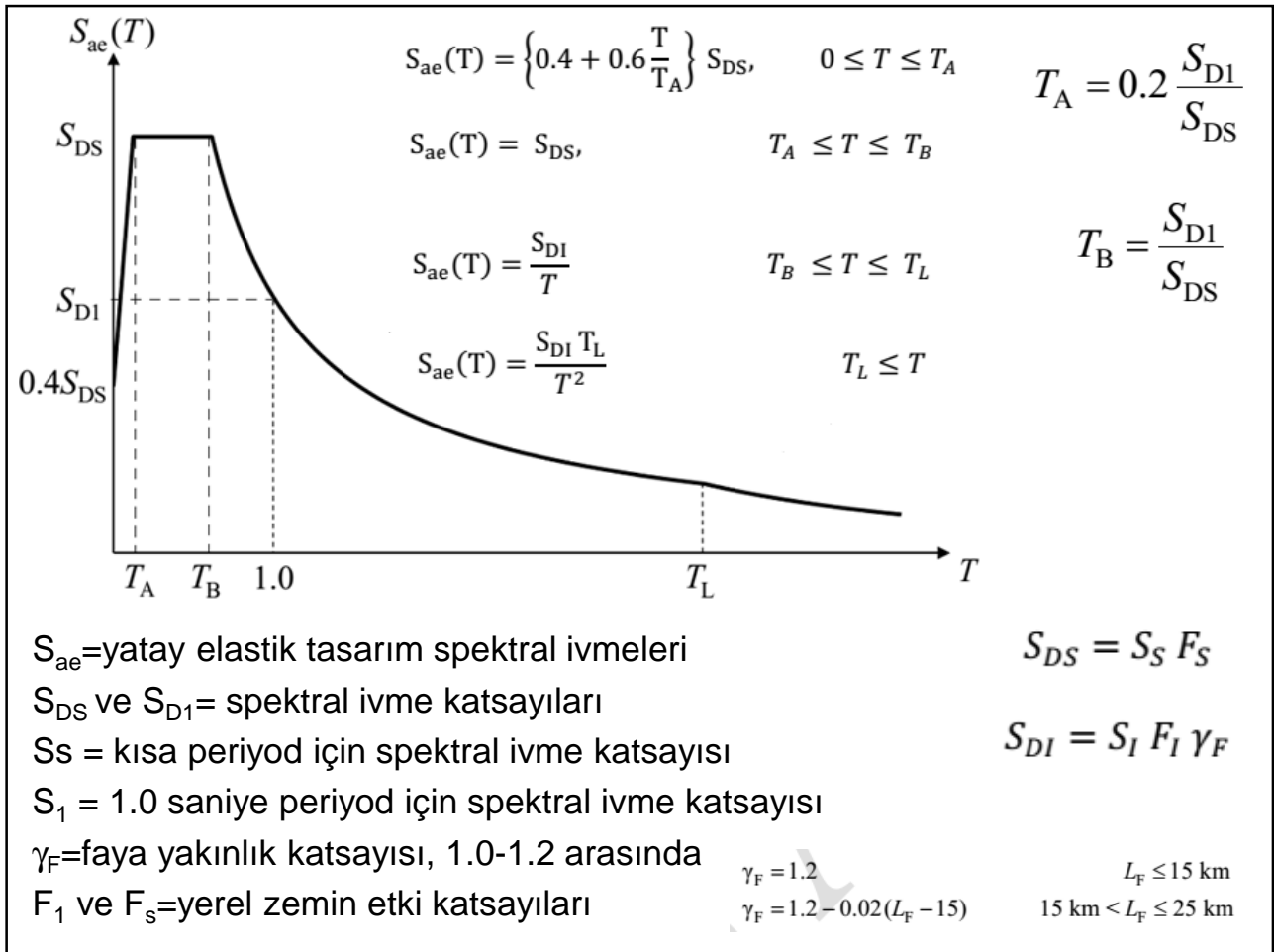


Kaya zeminde ($V_{s30}=760$ m/s) $T=1.0$ s için hesaplanan spektral ivme değerleri (2475 yıllık tekrar süresi için)

50 yılda %2 aşılma olasılığı için $T=1$ s için Spektral İvme (S_1) değeri



AFAD (UDAP – Ç – 13-06) (2014) Ulusal Deprem Araştırma Programı Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi, ANKARA.



Tablo 2.1 – Kısa periyod bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyod bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	<i>Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).</i>					

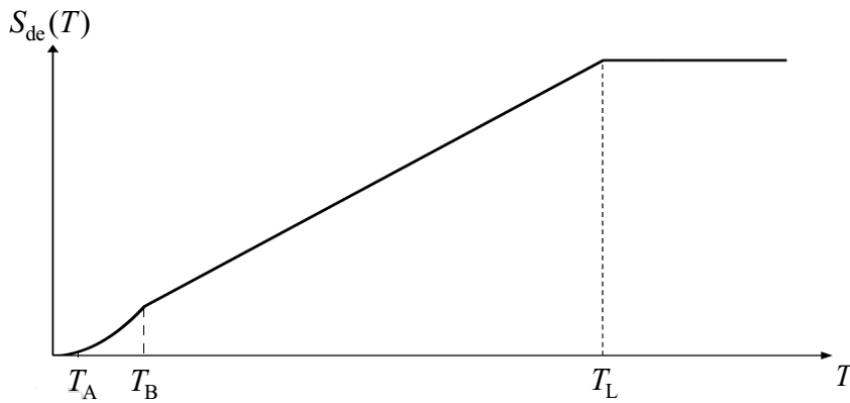
Tablo 2.2 – 1.0 saniye periyod için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyod için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	<i>Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).</i>					

Yatay elastik tasarım yer değiştirme spektrumu

$S_{de}(T)$ = yatay elastik tasarım spektral yer değiştirmeleri doğal titreşim periyoduna (T) bağlı olarak metre [m] cinsinden belirlenir.

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} g S_{ae}(T)$$



Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016) Temellerin tasarımı için genel kurallar

$q_o \leq q_t$ q_o =temel seviyesinde etkiyen düşey yük, kesme ve moment etkilerinin oluşturduğu temel taban basıncı

q_t = tasarım dayanımı $q_t = \frac{q_k}{\gamma_{Rv}}$

$$q_k = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5 \gamma B' N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

s_c, s_q, s_γ = temel şekli katsayıları

d_c, d_q, d_γ = derinlik katsayıları

i_c, i_q, i_γ = yükleme eğikliği katsayıları

g_c, g_q, g_γ = temel zemini eğimi katsayıları

b_c, b_q, b_γ = temel taban eğimi katsayıları

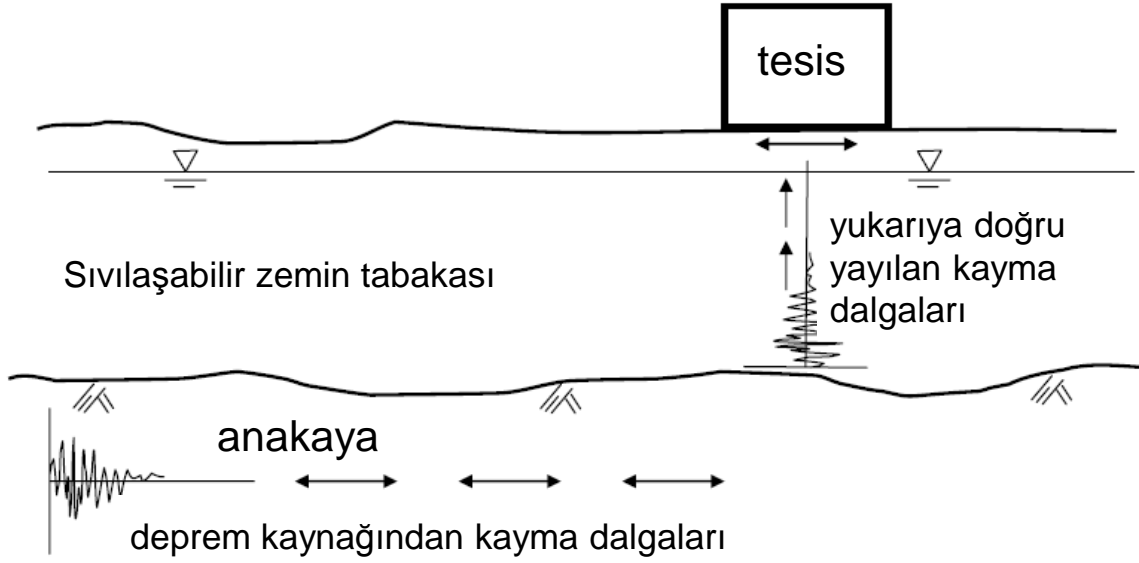
Tablo 16.2. Yüzeysel Temeller İçin Dayanım Katsayıları

Dayanımın Türü	Dayanım Katsayısı Simgesi	Dayanım Katsayısı Değeri
Temel Taşıma Gücü	γ_{Rv}	1.4
Sürtünme Direnci	γ_{Rh}	1.1
Pasif Direnç	γ_{Rp}	1.4

**ZEMİNLERDE SIVILAŞMA VE
ETKİLERİ**

Sıvılaşma Analizleri

Suya doymun gevşek kumlar, siltli kumlar, kumlu siltler, plastik olmayan siltler depremler sırasında sıvılaşmaya karşı hassastırlar.



Zemin sıvılaşması ne demektir ?

“Sıvılaşma zeminin mukavemet ve rijitliğinin sıfıra düştüğü noktada zemin partiküllerinin birbirine göre hareket etmesi olayıdır”

Statik Sıvılaşma:

Yukarı doğru sızma olayı nedeniyle (hidrolik eğim zeminin kritik hidrolik eğimden büyük olursa)

Dinamik (sismik) sıvılaşma

Suya doymuş, gevşek granüler zeminlerde deprem sarsıntısı nedeniyle boşluk suyu basıncının hızlıca artması sonucu

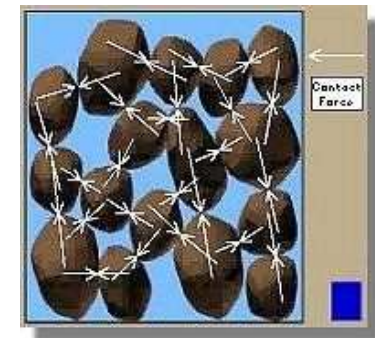
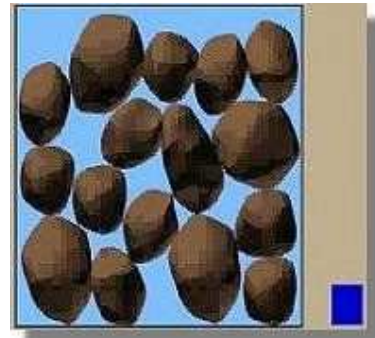
$$(\sigma' = \sigma - u \longrightarrow 0)$$

Zemin sıvılaşması niçin oluşur ?

- Sıvılaşma mekanizmasını tam olarak anlamak için, öncelikle deprem meydana gelmeden önce, arazide zeminin sahip olduğu koşulları iyi belirlemek gerekir.
- Suyu doymuş granüler zeminler birbirleriyle temas halinde olan çok sayıda daneden oluşmaktadır.
- Üstte bulunan danelerin ağırlığı, her bir daneyi bulunduğu konumda tutan ve zemine mukavemetini veren daneler arasındaki temas kuvvetini oluştururlar.
- Zeminin mukavemeti Mohr-Coulomb yasası ile tanımlanmaktadır.

Mohr-Coulomb kanunu:

$\tau = \sigma' \tan \phi' = (\sigma - u) \tan \phi'$
boşluk suyu basıncı düşük olursa kontak kuvvetleri büyük olacaktır.



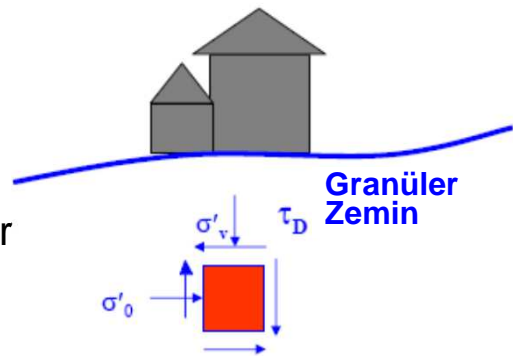
Zemin sıvılaşması niçin oluşur ?

- Sıvılaşma, suya doymun kum zeminlerin ani etkileyen dinamik bir yük uygulamasına maruz kalması sonucu meydana gelmektedir.
- Zemin daneleri bir yük uygulaması etkisi altında daha sıkı bir yerleşime sahip olma eğilimindedir.
- Buna karşılık, suyun drene olmak için yeterli zamanı bulamaması nedeniyle boşluklara hapsolmesi danelerin bu eğilimine engel olur.
- Bu durum ise, boşluklardaki suda basınç artışına ve doğal olarak daneler arası temas kuvvetlerinin azalmasına, dolayısıyla da zeminin mukavemetini kaybetmesine yol açar.
- Boşluk suyu basıncı artışının, zemin daneleri arasındaki teması ortadan kaldıracak kadar sürmesi durumunda, zemin katı bir malzeme gibi değil, bir sıvı gibi davranacaktır.



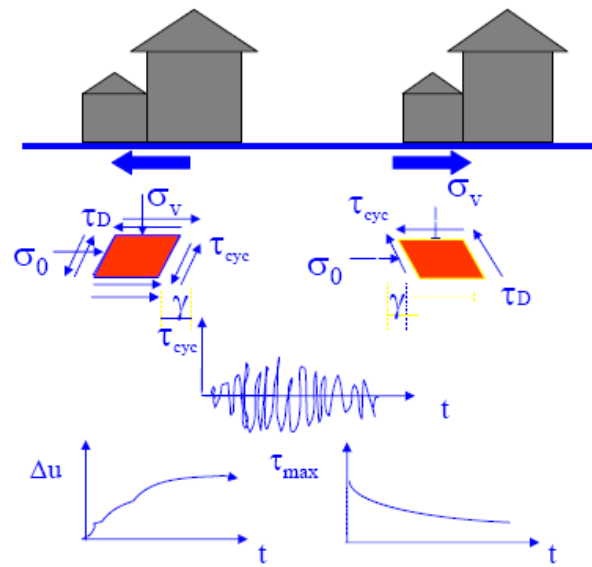
Depremden önce gerilme durumu

- Düz bir arazide yer alan bir yapının altında, birim hacimdeki bir zemin elemanına etkiyen gerilmeler; efektif gerilmeler ve kayma gerilmesidir.
- Zeminin kayma mukavemeti; efektif gerilmeler ve kısmen dengelenmiş kayma gerilmelerinden kaynaklanmaktadır (statik denge).
- Deprem sırasında, zeminde başlangıçta var olan statik kayma gerilmelerine ek olarak zemine etkiyen, **deprem nedeniyle oluşan çevrimli kayma gerilmeleri, kayma deformasyonlarının oluşmasına sebep olur.**



Depremden sonra gerilme durumu

- Kayma deformasyonlarının hacimsel kayma deformasyonu olarak adlandırılan bir eşik değere kadar ulaşması durumunda, boşluk suyu basıncı artmaya ve bununla paralel olarak kayma mukavemeti azalmaya başlar.
- Sarsıntı sürerken, zemin çok daha büyük deformasyonlara maruz kalarak, adeta viskoz bir sıvı gibi davranarak sıvılaşıma durumuna gelir.



Depremden sonra gerilme durumu

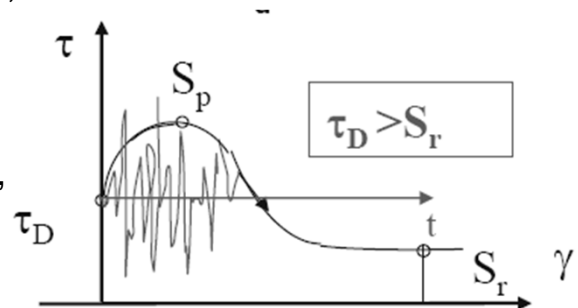
Sarsıntının sonunda 2 farklı senaryo meydana gelebilir. Bu senaryolar zeminin rezidüel drenajsız kayma mukavemetinin, statik kayma gerilmesinden büyük veya küçük olması durumlarıdır.

1. Flow Liquefaction (akma sıvılaşması) olarak tanımlanan statik kayma gerilmesinin, rezidüel kayma mukavemetinden büyük olması durumunda; drenajsız şartlar mevcudiyetini korurken, statik kayma gerilmeleri artık dengede değildir.

Etkileri

- düz yüzeyle zeminlerde taşıma gücü kaybı, yapıların düşeyden sapsması
- şevlerde metrelerce mertebesi ile ifade edilebilecek kitle hareketleri oluşur.
- depremden sonra bile devam eden büyük ve hızlı hareketler,

S_r Depremden sonra rezidüel drenajsız kayma mukavemeti
 τ_D = Statik kayma mukavemeti



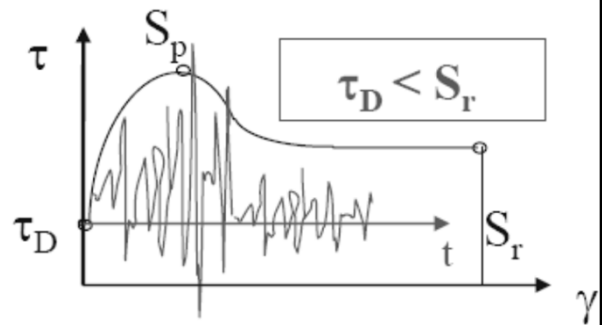
Depremden sonra gerilme durumu

2. Cyclic Mobility (çevrimsel hareketlilik) olarak tanımlanan, statik kayma gerilmesinin rezidüel kayma mukavemetinden küçük olması durumunda; zeminde drenajlı şartlara doğru hızlı bir gidiş olur.

Etkileri

- temellerde aşırı olmayan oturmalara ve şevlerde sınırlı stabilite kayıplarına sebep olabilir.
- depremden sonra hareket olmaz.

S_r Depremden sonra rezidüel drenajsız kayma mukavemeti
 τ_D = Statik kayma mukavemeti



Zeminlerin Sıvılaşabilirliği

- Sıvılaşmanın arazide bütün zemin tabakalarında oluşmaz
- Sıvılaşmanın meydana gelmesi için gerekli koşulların mevcut olup olmadığı incelenmelidir.
 - deprem büyüklüğü ve merkezine uzaklık,
 - zemin tabakasının kompozisyonu ve jeolojik tarihçesi
 - zeminin arazi gerilme ve sıklık durumu

Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler

Zemin özellikleri

zeminin sıkılık derecesi,

- Sıkılık derecesi %35'ten küçük olan suya doymun zeminler sıvılaşmaya karşı son derece hassas bir yapıya sahiptirler.

dane özellikleri

- dane boyutu, dane şekli, dane çapı dağılımı

kil zemin içeriği

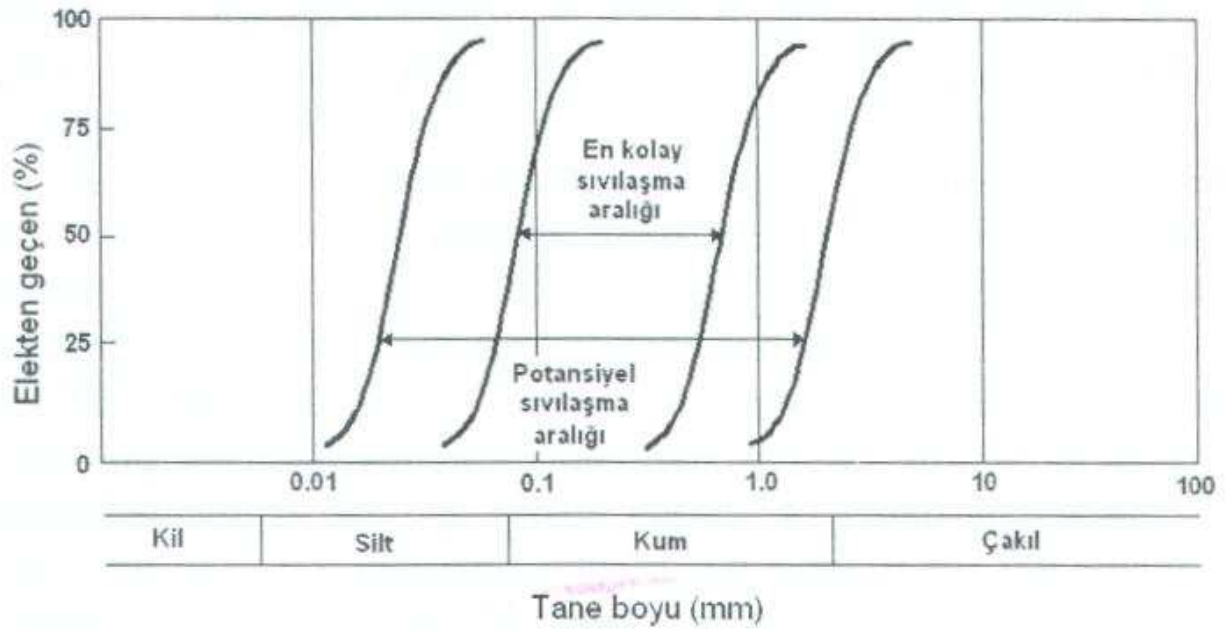
arazideki drenaj şartları

sıvılaşmaya yol açan etkenin özellikleri → (deprem özellikleri)

Deprem şiddeti

Yükleme süresi

Sıvılaştırma için dane çapı aralığı



Düşük plastisiteli, ince daneli zeminlerin sıvılaştırılabilirliği için yaygın olarak başvuru olan

Çin Kriteri

- Bu kriter gere göre 0.005mm den daha küçük çaplı ince danelerin oranı %15' den az olan zeminlerde

$$- w_L < \%35, w_n > 0.9w_L \text{ ve } I_L \leq 0.75$$

w_L veya LL = Likit limit

w_n = tabii su muhtevası

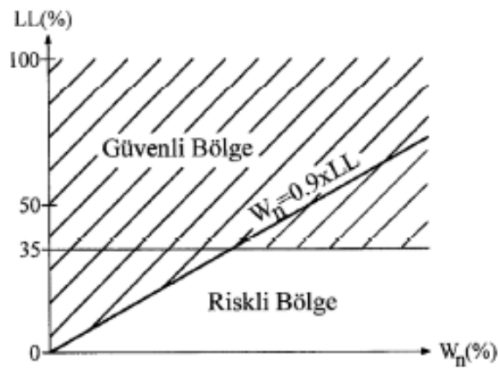
$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_p}$$

Modifiye Çin Kriterleri

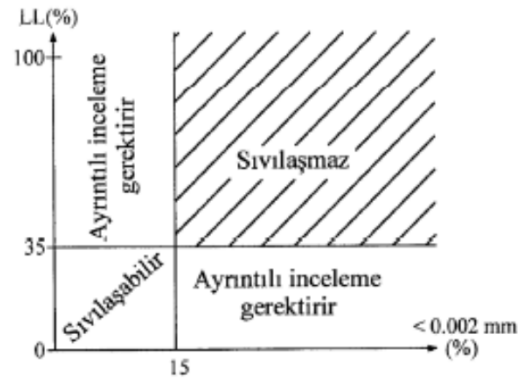
Sıvılaşma Potansiyeli olan zeminler:

- (1) 0.005 mm' den küçük ince malzeme oranı \leq %15
- (2) Likit limit(LL) \leq %35
- (3) Doğal su muhtevası (W_n) \geq 0.9 x LL

Marcuson vd. (1990)



Seed ve Idriss (1982)



✓ Sıvılaşma Analizleri

Arazi deneyleri :

- SPT
- CPT
- V_s

Laboratuvar deneyi :

- Üç eksenli dinamik deney

CRR (Tekrarlı Dayanım Oranı)

Tekrarlı Dayanım Oranı

$F_L = \frac{CRR}{CSR} MSF$ → Deprem Büyüklüğü Düzeltme Faktörü

Tekrarlı Gerilme Oranı

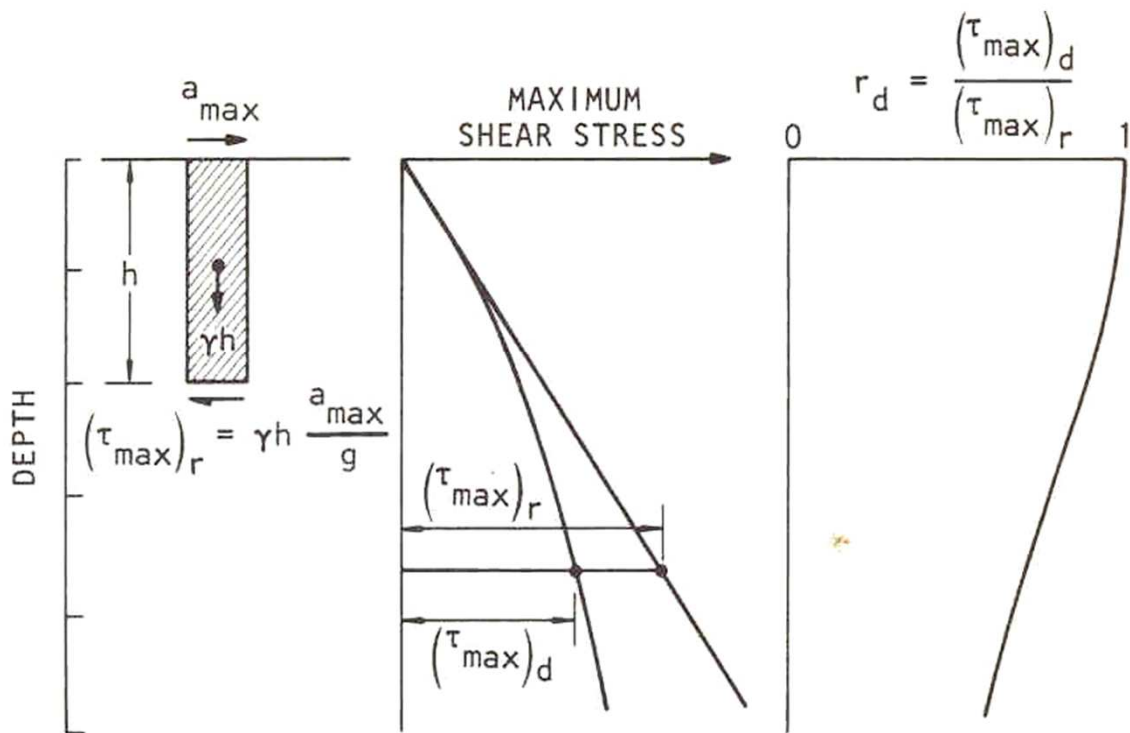
Çevrimli Gerilme Yaklaşımı

- Deprem etkisine maruz kalan bir zemin tabakasında oluşan boşluk suyu basıncı artışının tamamen çevrimli kayma gerilmelerine bağlı olduğu düşüncesinden yola çıkılırsa,
- sıvılaşmaya sebep olacak sismik yüklemelerden oluşan çevrimsel kayma oranı
(Cyclic Shear Ratio - CSR)
- Zeminin sıvılaşmaya karşı direncini
(Cyclic Resistance Ratio -CRR) karşılaştırma

Çevrimsel Kayma Oranının Bulunması-CSR

- Sismik kayma gerilmesi oranını bulmak için çeşitli metodlar mevcuttur.
- **Bu değerin elde edilmesinde yaygın olarak Seed ve Idriss (1971) amprik ifadesi kullanılmaktadır.**
- Bu yöntemde bir deprem sırasında zemin tabakası içerisinde herhangi bir noktada oluşan kayma gerilmesinin, kayma dalgasının düşey olarak yayılımı nedeniyle meydana geldiği kabul edilir.
- Eğer h kadar derinde yer alan bir zemin elemanı üzerinde bulunan bir zemin kütlesi rijit bir cisim olarak kabul edilirse zemin elemanı üzerindeki maksimum kayma gerilmesi aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

Çevrimsel Kayma Oranının Bulunması-CSR



Çevrimsel Kayma Oranının Bulunması-CSR

$$(\tau_{\max})_r = \frac{\gamma h}{g} a_{\max}$$

a_{\max} = yüzeydeki maksimum ivme

γ = zeminin birim hacim ağırlığı

g = yer çekimi ivmesi

Bununla birlikte zemin deforme olabilen bir malzeme olduğundan dolayı bu değer azaltılmalıdır.

$$(\tau_{\max})_d = r_d (\tau_{\max})_r \quad r_d = \text{gerilme azaltma katsayısı}$$

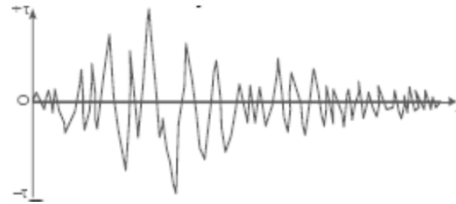
Yukarıdaki iki eşitlik bir arada değerlendirildiğinde deprem sırasında, zemin içerisinde herhangi bir noktada meydana gelecek maksimum kayma gerilmesi

Çevrimsel Kayma Oranının Bulunması-CSR

$$CSR_{eq} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \quad \tau_{max} = \frac{\gamma h}{g} a_{max} r_d$$

Bu değer tekrarlı yükleme sırasında etkiyecek ortalama kayma gerilmesi (τ_{av}) cinsinden yazılacak olursa

$$\tau_{av} \cong 0.65 \frac{\gamma h}{g} a_{max} r_d$$



Bu değer efektif gerilme ile normalize edilirse eşdeğer çevrimsel kayma gerilmesi (CSR) elde olunur.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}}$$

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d$$

r_d değişimi

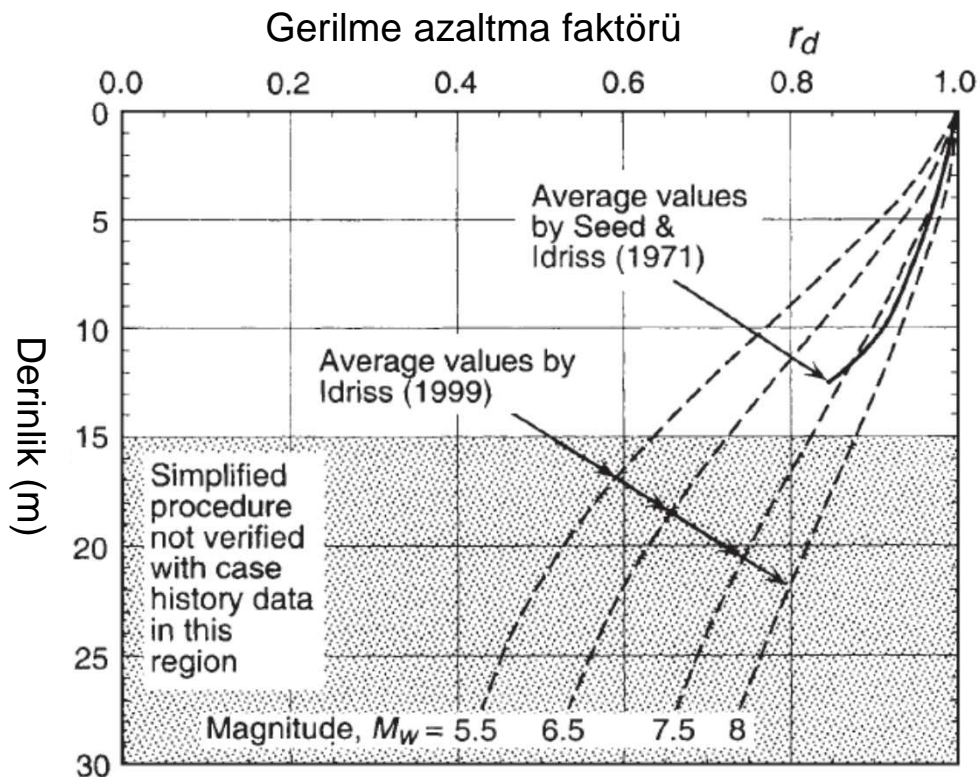


FIGURE 6.5 Reduction factor r_d versus depth below level or gently sloping ground surfaces. (From Andrus and Stokoe 2000, reproduced with permission from the American Society of Civil Engineers.)

Revize Edilmiş Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi (Seed ve Idriss (1971); Youd 2001)

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d$$

a_{\max} = yüzeydeki en büyük yatay ivme

σ_v = toplam düşey gerilme

σ'_v = efektif düşey gerilme

r_d = gerilme azaltma katsayısı

$$r_d = 1 - 0.00765xz \quad (z \leq 9.15\text{m için})$$

$$r_d = 1.174 - 0.267xz \quad (9.15 < z \leq 23\text{m için})$$

z = yüzeyden itibaren derinlik (metre cinsinden) olarak ifade edilmektedir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65 \sigma_{\text{vo}} (0.4 S_{DS}) r_d$$

σ_{vo} = toplam düşey gerilme

r_d = gerilme azaltma katsayısı

S_{DS} = kısa periyod tasarım spektral ivme katsayısı

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad z \leq 9.15\text{m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 9.15\text{m} < z \leq 23\text{m}$$

$$r_d = 0.744 - 0.008z \quad 23\text{m} < z \leq 30\text{m}$$

$$r_d = 0.50 \quad z > 30\text{m}$$

Sıvılaşma Direnci için SPT Sonuçlarından Yararlanan Yöntemler

- Bu yöntemlerde arazi SPT darbe sayılarına bazı düzeltmeler yapılarak sıvılaşma direnci (CRR) kestirilmekte ve depremde oluşacak çevrimli kayma gerilmesi oranı (CSR) ile karşılaştırılmaktadır.

SPT N → CRR

Arazide belirlenen Standart Penetrasyon deneyi darbe sayısından yararlanılabilir.

$$N_{1,60} = N C_N C_R C_S C_B C_E$$

N= ölçülen SPT darbe sayısı

C_N =efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü

C_R =tij boyuna göre düzeltme faktörü

C_S = standart olmayan numune alıcı düzeltme faktörü

C_B = sondaj kuyusu çapına göre düzeltme faktörü

C_E =tokmak enerjisi oranına göre düzeltme faktörü

SPT N → CRR

$$C_N = 9.78 \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.70$$

σ'_v = Düşey jeolojik efektif gerilme (kPa)

SPT Düzeltme Katsayıları

Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
C_R	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m ile 30m aralığında	1.00
	30m'den derin	<1.00
C_S	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_B	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C_E	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

SPT N → CRR

$N_{1,60}$ değerlerine, zemin ince dane içeriyorsa etkisini hesaba katmak için bir düzeltme daha yapılmalıdır.

$$N_{1,60cs} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

FC ≤ %5 için

$$\alpha = 0 \text{ ve } \beta = 1.0$$

%5 < FC < %35 için

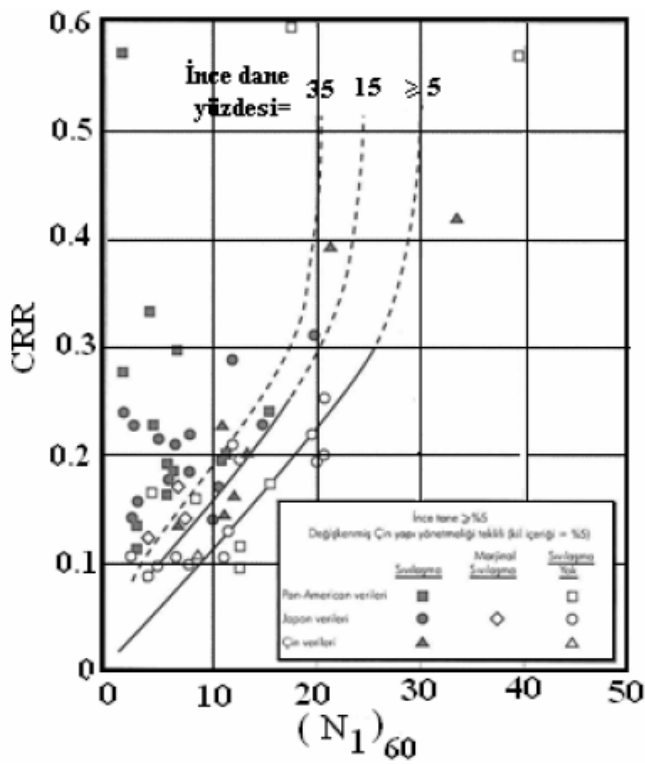
$$\alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{(FC)^2}\right)$$

$$\beta = \left[0.99 + \frac{(FC)^{1.5}}{1000}\right]$$

FC ≥ %35 için

$$\alpha = 5 \text{ ve } \beta = 1.2$$

SPT N \rightarrow CRR



Not = $N_{1,60}$ değeri 30'a eşit veya 30'dan büyükse zemin sıvılaşmaz olarak kabul edilir.

Sıvılaşma direnci-standart penetrasyon darbe sayısı ilişkisi (Seed vd, 1975)

SPT N → CRR

- Bu durumda M=7.5 büyüklüğünde bir deprem için sıvılaşma direnci
- Eşitlikteki $N_{1,60}$ değeri $N_{1,60,cs}$ olabilir

$$CRR = \frac{1}{34 - N_{1,60cs}} + \frac{N_{1,60cs}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

Başlangıç kayma gerilmeleri ve yüksek çevre basınçlarının etkisini dikkate almak için CRR oranı üzerinde aşağıdaki düzeltmenin yapılması

Eğimli sahalarda veya ağır yapılar altındaki tabakalarda başlangıç (statik) kayma gerilmelerinin mevcudiyeti sıvılaşma olasılığını etkilemektedir.

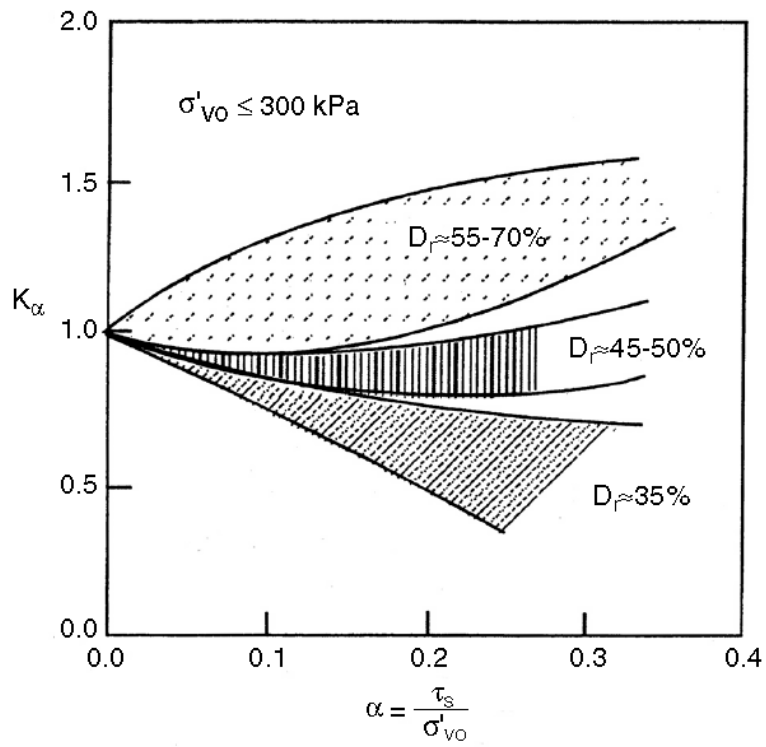
Başlangıç kayma gerilmeleri ve yüksek çevre basınçlarının etkisini dikkate almak için CRR oranı üzerinde aşağıdaki düzeltmenin yapılması önerilmektedir.

$$(CRR_{arazi})_{\alpha,\sigma} = (CRR_{arazi})_{\alpha=0,\sigma<100kPa} K_{\alpha} K_{\sigma}$$

Burada K_{α} , K_{σ} düzeltme faktörleridir

$$\alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma'_{v0}}$$

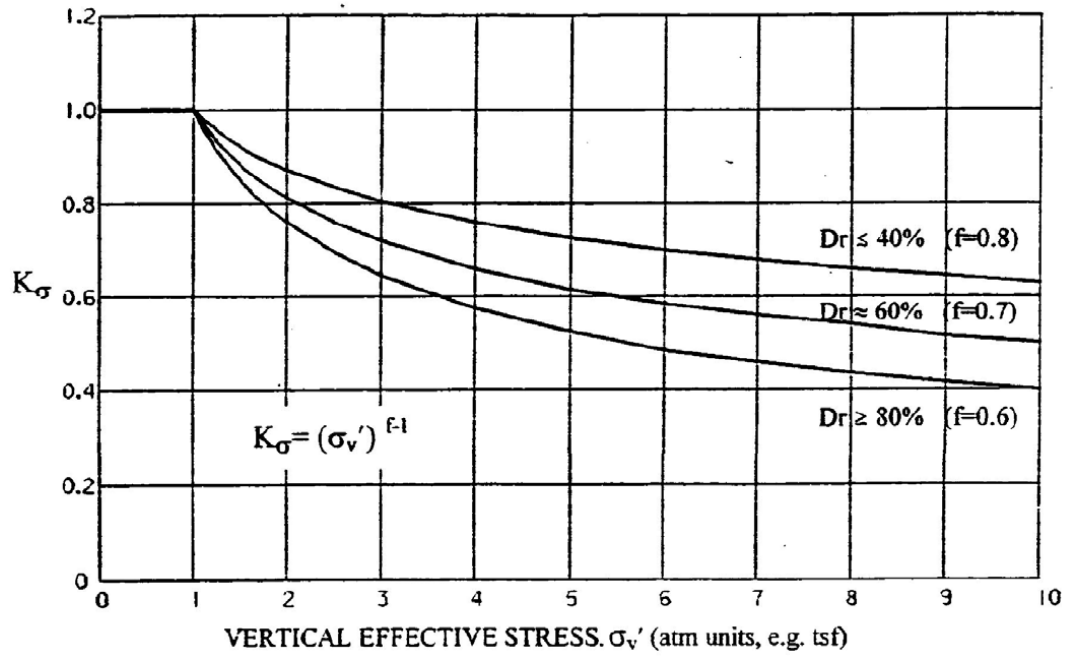
K α değerinin gevşek ve sıg çökellerde 1.0'den küçük, Sıkı zeminlerde 1.0'den büyük alınması önerilmekte,



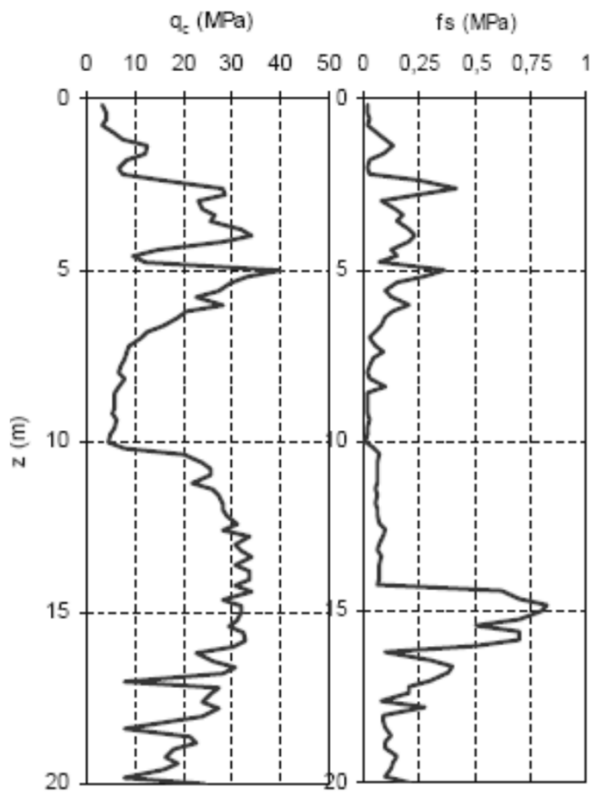
K α korelasyon faktörünün NCEER (1997) tarafından tavsiye edilen değerleri

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln\left(\frac{\sigma'_{vo}}{P_a}\right) \quad C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{N_{1,60}}}$$

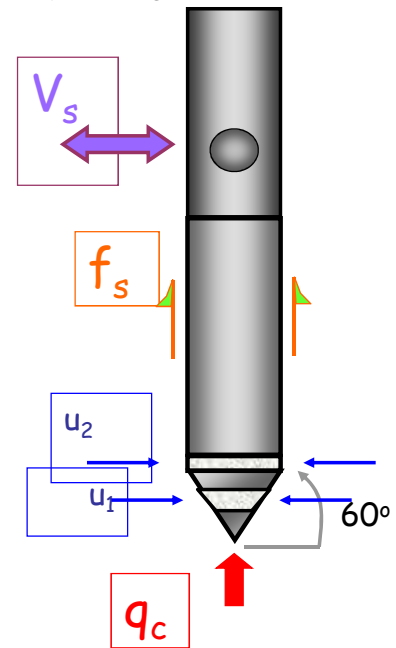
Burada, σ'_{vo} = düşey efektif gerilme,
 $N_{1,60}$ = düzeltilmiş SPT darbe sayısı olmaktadır.



Sıvılaşıma olasılığının CPT deneylerine göre değerlendirilmesi



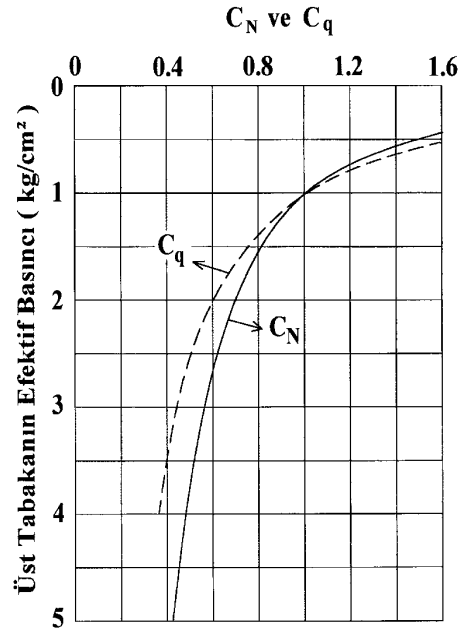
f_s ölçülen yaka sürtünmesi
 q_c uç direnci
 u_1 ve u_2 boşluk suyu basıncı
 V_s kayma dalgası hızı



Sıvılaşma olasılığının CPT deneylerine göre değerlendirilmesi

$$q_{c1} = C_q \cdot q_c \quad \text{Burada } C_q, C_N \text{ benzeri bir sürşarj düzeltme sayısıdır}$$

q_{c1} = düzeltilmiş uç direnci



CPT $q_c \rightarrow$ CRR

- Koni penetrasyon deneyi uç direncinden (q_c) sıvılaştırma direncinin belirlenmesinde de bazı düzeltmeler yapmak gerekir.

$$q_{c1N} = C_q \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \quad C_q = \left[\frac{P_a}{\sigma'_v} \right]^n$$

q_c =ölçülen koni uç direnci

C_q =koni uç direnci normalizasyon faktörü

$n = 1.0$ (kil zeminler için)

$n = 0.50$ (temiz kumlar için)

$n = 0.50 - 1.00$ (silt ve siltli kumlar için)

CPT $q_c \rightarrow$ CRR

- CRR'nin CPT deneyi sonucuna göre tahmininde Olsen (1977) aşağıdaki eşitliği önermektedir.

$$CRR_{7.5} = \frac{0.0128 q_c}{(\sigma'_v)^{0.7}} - 0.025 + 0.17 R_f - 0.028 (R_f)^2 + 0.0016 (R_f)^3$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_c - \sigma_v} \times 100 \quad (\%)$$

σ_v σ'_v Toplam ve efektif düşey gerilme (kg/cm²)
 f_s Ölçülen yaka sürtünmesi (kg/cm²)
 R_f Sürtünme yüzdesi (%)
 q_c Uç direnci (kg/cm²)

Zemin cinsini tanımlamak için kullanılan zemin indeksi

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2}$$

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_v}{p_a} \right) \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^n$$

$$F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma_v} \right) \times 100\%$$

f_s =ölçülen sürtünme direnci

Eğer $n=1$ alınarak hesaplanan $I_c > 2.6$ ise zemin killi ve sıvılaşmayan zemin olarak kabul edilir.

Eğer $n=1$ alınarak hesaplanan $I_c < 2.6$ ise zemin büyük bir olasılıkla granüler bir zemindir,

C_q ve Q değerleri $n=0.5$ alınarak tekrar hesaplanır ve I_c değeri yeniden belirlenir.

Hesaplanan $I_c < 2.6$ ise zemin plastik olmayan granüler bir zemindir ve sıvılaşma analizlerinde kullanılır.

Fakat, eğer $n=0.5$ alınarak hesaplanan $I_c > 2.6$ ise bu durumda, $n=0.7$ alınarak I_c tekrar hesaplanır ve sıvılaşma analizlerinde kullanılır.

CPT $q_c \rightarrow$ CRR

İnce dane oranına göre düzeltme için

$$q_{c1N,CS} = K_c q_{c1N}$$

$$I_c \leq 1.64 \text{ için } \rightarrow K_c = 1.0$$

$$I_c > 1.64 \text{ için}$$

$$K_c = (-0.403) I_c^4 + (5.581) I_c^3 - (21.63) I_c^2 + (33.75) I_c - 17.88$$

CPT $q_c \rightarrow$ CRR

Robertson ve Wride (1997) M=7.5 büyüklüğünde bir deprem için sınılaşma direnci :

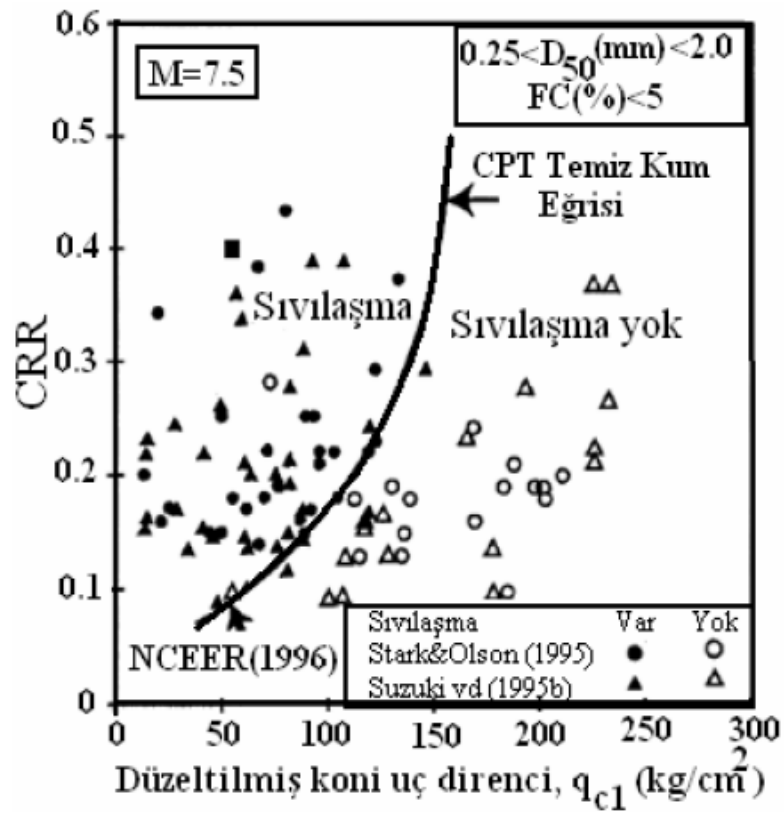
$q_{c1N,CS} < 50 \text{ kg/cm}^2$ için

$$CRR_{7.5} = \frac{0.833q_{c1N,CS}}{1000} + 0.05$$

$50 \text{ kg/cm}^2 \leq q_{c1N,CS} < 160 \text{ kg/cm}^2$ için

$$CRR_{7.5} = 93 \left(\frac{q_{c1N,CS}}{1000} \right)^3 + 0.08$$

M= 7.5 için Sıvılaşmanın Değerlendirilmesi



Arazide ölçülen V_s 'e göre değerlendirme

$V_s \rightarrow CRR$

- Arazide ölçülmüş V_s değerlerinden faydalanarak düzeltilmiş V_s 'ler aşağıdaki bağıntıdan elde edilir (**Andrus ve Stoke 1997, 2000**)

$$V_{s_1} = V_s \left(\frac{P_A}{\sigma'_v} \right)^{0.25}$$

V_{s_1} = gerilmeler için düzeltilmiş kayma dalgası hızı,
 P_A = Atmosfer basıncı (1 atm)

V_s → CRR

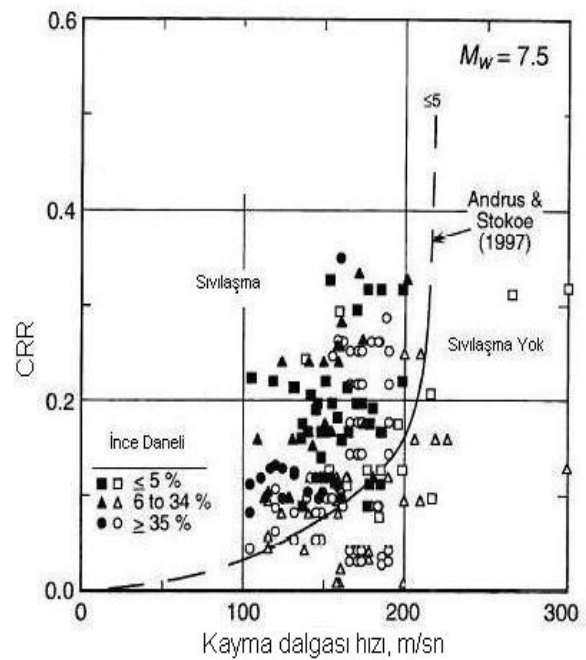
$$CRR_{7.5} = 0.022 \left[\frac{(V_{S1})}{100} \right]^2 + 2.8 \left[\frac{1}{215 - (V_{S1})} - \frac{1}{215} \right]$$

$$V_{S1} = V_S \left(\frac{P_A}{\sigma'_v} \right)^{0.25}$$

V_{S1} = düzeltilmiş kayma dalgası hızı

Elde edilen V_{S1} değeri ile şekilden yararlanarak CRR bulunabilir.

Kayma dalgası hızı-CRR ilişkisi
(Andrus ve Stokoe, 1997)



Japon Karayolları Köprü Şartnamesi Yöntemi (JSHE, 1990)

- Japon Karayolları Köprü Şartnamesi (*Japanese Highway Bridge Design Code, JSHE-1990*)

$$CRR = R_1 + R_2 + R_3 \quad R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_{v0} + 0.7}}$$

$$R_2 \begin{cases} = 0.19 & (0.02 \text{ mm} \leq D_{50} < 0.05) \\ = 0.2251 \log\left(\frac{0.35}{D_{50}}\right) & (0.05 \text{ mm} \leq D_{50} < 0.60) \\ = -0.05 & (0.60 \text{ mm} \leq D_{50} < 2.00) \end{cases}$$

$$R_3 \begin{cases} = 0.0 & (0 \leq FC < \%40) \\ = 0.004 FC - 0.16 & (\%40 \leq FC < \%100) \end{cases}$$

D_{50} =ortalama dane çapı

FC=ince dane oranı (%)

N= düzeltilmemiş SPT N darbe sayısı

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} MSF$$

Yukarıda tanımlanan CRR değerleri M=7.5 büyüklüğünde depremler için geçerlidir.

Eğer tasarım deprem büyüklüğü farklı ise,

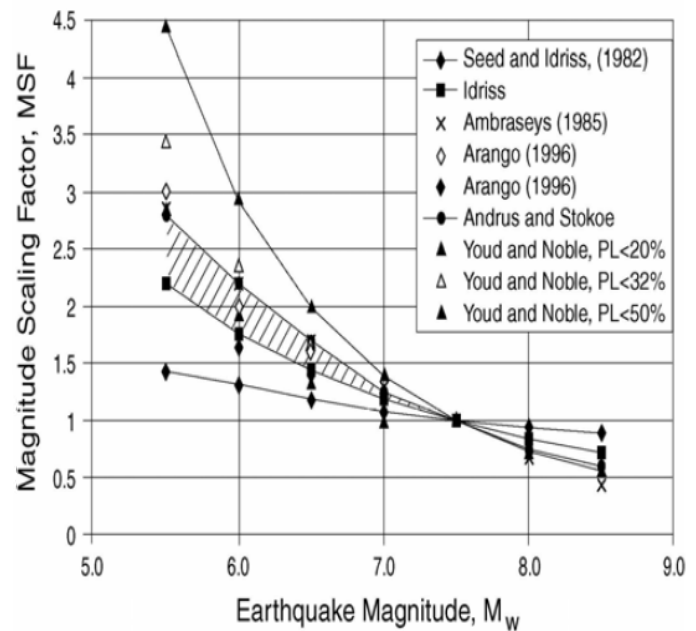
Deprem Büyüklüğü Ölçeklendirme Katsayısı (MSF) dikkate alınarak sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS) belirlenir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

- Bu düzeltme için Youd (2001) bir öneride bulunmuştur.
- $MSF = (M_w / 7.5)^n$
 $n = -3.3 \quad M_w < 7.5$
 $n = -2.56 \quad M_w > 7.5$

TABLE 1.5 Magnitude Scaling Factor

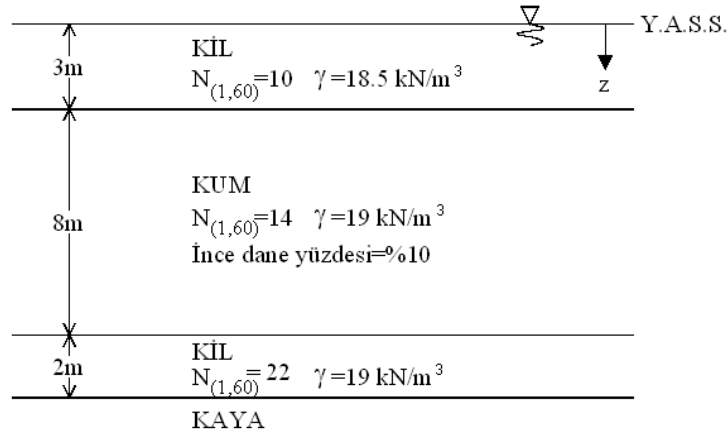
Magnitude, M	MSF
5.5	2.20–2.80
6.0	1.76–2.10
6.5	1.44–1.60
7.0	1.19–1.25
7.5	1.00
8.0	0.84
8.5	0.72



$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56}$$

ÖRNEK .1

Şekilde bir sahaya ait zemin profili gösterilmektedir. Bu sahada $M_w=6.0$ büyüklüğünde bir depremde meydana gelecek maksimum yüzey ivmesi $a_{maks}=0.40g$ olarak belirlendiğine göre bu sahada sıvılaşma meydana gelme potansiyelini basitleştirilmiş yöntemle belirleyiniz.

**ÇÖZÜM .1**

Kum tabakasının orta noktası için ($z=7.0$ m):

$$r_d = 1 - 0.00765 (z) = 1 - 0.00765 (7) = 0.946$$

$$\sigma_v = (3 \times 18.5) + (4 \times 19) = 131.5 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_v = [3 \times (18.5 - 9.81)] + [4 \times (19 - 9.81)] = 62.83 \text{ kN/m}^2$$

$$CSR_{EQ} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} r_d \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad CSR_{EQ} = 0.65 \frac{0.40g}{g} 0.946 \frac{131.5}{62.83} = 0.51$$

(FC) ≤ %5 için $\alpha = 0$ ve $\beta = 1.0$

$$\%5 < FC < \%35 \text{ için } \alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{(FC)^2}\right) \text{ ve } \beta = \left[0.99 + \frac{(FC)^{1.5}}{1000}\right]$$

FC ≥ %35 için $\alpha = 5$ ve $\beta = 1.2$

z=7m 'de ince dane oranı=%10

$$\alpha = \exp\left[1.76 - \frac{190}{(10)^2}\right] = 0.869 \quad \beta = \left[0.99 + \frac{(10)^{1.5}}{1000}\right] = 1.021$$

$$N_{1,60cs} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad N_{1,60cs} = 0.869 + 1.021 \times 14 = 15.17$$

$$CRR = \frac{1}{34 - N_{1,60cs}} + \frac{N_{1,60cs}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

$$CRR = \frac{1}{34 - 15.17} + \frac{15.17}{135} + \frac{50}{[10 \times 15.17 + 45]^2} - \frac{1}{200} = 0.162$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^n \quad n = -3.3 \quad M_w < 7.5 \quad n = -2.56 \quad M_w > 7.5$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \times MSF \quad FS = \frac{0.162}{0.51} \times 2.088 = 0.663 < 1.0 \text{ olduğu için bu kum tabakasının sıvılaşma olasılığı vardır.}$$

ÖRNEK.2

Şekilde gösterilen sondaj logu $M_w=7.4$ olan 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşmanın meydana geldiği gözlenen Yalova Vapur İskelesinin bulunduğu sahaya aittir (<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari>). Bu depremde Yalova Vapur İskelesi'nde maksimum yüzey ivmesi $0.30g$ olarak belirlenmiştir. Sahada yapılan SPT deney sonuçları dikkate alınarak bu saha için basitleştirilmiş yöntemle göre sıvılaşma analizi yapınız (Sıvılaşabilir kum tabakaları için doğal birim hacim ağırlık $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$).

ÇÖZÜM: 2

Sondaj logunda görüldüğü gibi zemin tabakaları kötü derecelenmiş kum (SP) ve siltli kum (SM) tabakalarından oluşmakta ve YASS zemin yüzeyinden 0.8m aşağıdadır. Dolayısı ile bu sahadaki kum tabakalarının sıvılaşma potansiyeli taşıyan zeminlerden oluştuğunu söyleyebiliriz. Verilen bilgiler ışığında bu sahanın sıvılaşma analizini aşağıdaki şekilde yapabiliriz.

Örneğin $z=3\text{m}$ derinlik için:

$$\sigma_v = (3 \times 18) = 54 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_v = 54 - [(3 - 0.8) \times 9.81] = 32.42 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{YASS seviyesi zemin yüzünden } 0.8\text{m} \text{ aşağıdadır})$$

$$r_d = 1 - 0.00765(z) = 1 - 0.00765(3) = 0.977$$

$$CSR_{EQ} = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} r_d \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad CSR_{EQ} = 0.65 \frac{0.30g}{g} 0.977 \frac{54}{32.42} = 0.32$$

UCB-BYU-UCLA ZETAS-SaU-METU Joint Research		Projenin İsmi: Yanal Akma Görülen Sahaların Geoteknik İncelemesi		Test No: SPT-YH3																	
Sponsored by: NSF, Caltrans CEG, PG&E		Yer: Yalova Vanur İskelesi		GPS Koordinatları: 40.65964°N E 29.26910° E																	
		Tarih: 3 Ağustos 2000		Delme Ekipmanı: Crealuis XC90H'a eşdeğer																	
		Arazi Logunu Hazırlayan: M.T. Yılmaz, K.Ö. ÇETİN		Sorumlu Mühendisler: K.Ö. Çetin ve M.T. Yılmaz, METU																	
		Firma: ZETAS		SPT Sistemi: İpli, makaralı ve kedibaşı yöntemi ile. AWJ tıjları																	
		Delme Yöntemi: Rotary yıkamalı		Tokmak Tipi: Safety Hammer (Kovacs vd. 1983)																	
		YASS Kotu: 0.8m		Sondaj kuyusu çapı=76mm																	
Derinlik(m)	Litojoloji	USCS	Numune Tipi ve No.	Numune boyu/uzunluk(cm)	SPT Darbe Ad./15 cm	Statik Boru Derinliği(m)	Tıj Boyu (m)	Enerji Oranı (%)	Tanım	Cep Pen. (kPa)	Torwane (kPa)	Arazi Su Muh.(%)	Lab. Su Muh.(%)	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	İnce dane %<0.075 mm	<0.005mm	<0.002mm	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	Düşünceler
0									SM: Gri Siltli Kum												
1																					
2																					
3		SM	S-YH3-1	34/45	2-3-5	2.43	3.83	55						NP	NP	16			0.20	<0.074	
4		SM SP-SM	S-YH3-2	30/45	5-6-6	3.20	5.35	60						NP	NP	13			0.22 0.30	<0.074 0.079	
5		SP-SM	S-YH3-3	31/45	3-4-4	4.20	6.87	65						NP	NP	10			0.25	0.074	
6		SM	S-YH3-4	35/45	3-5-6	5.20	8.30	65						NP	NP	11			0.23	0.070	
7		SM	S-YH3-5	38/45	5-6-7	6.20	8.30	65						NP	NP	17			0.18	<0.074	
8		SM	S-YH3-6	38/45	3-5-6	7.20	9.92	65						NP	NP	33			0.10	<0.074	
9		CL	S-YH3-7	43/45	3-2-3	8.20	11.45	65	CL: Gri Siltli Kıl					31	19	56	18	16	0.074	<1.3µm	
10		CL	SH-YH3-8	40/50		9.10						31	35	17	90	25	18	0.026	<1.4µm		
11		CL	SH-YH3-8	40/50		10.40						32	36	18	80	24	17	0.028	<1.4µm		

S: Spit Spoon (SPT) SH: Shelby tube NP: Nonplastic

z=3m'de ($N_{1,60}$) değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

C_N =efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü,

$$C_N = \frac{2.2}{1.2 + \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)} \leq 1.7 \quad (P_a = \sigma'_v \text{ birimleri cinsinden atmosfer basıncı})$$

Düşey efektif gerilmeye göre düzeltme: $C_N = \frac{2.2}{1.2 + \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)} = \frac{2.2}{1.2 + \left(\frac{32.4}{100}\right)} = 1.44$

SPT-N Darbe Sayısı Düzeltme Faktörleri

Faktör	Değişken	Düzeltilme
Tokmak enerjisi oranı (C_E)	Donut tipi tokmak	0.5-1.0
	Safety tipi tokmak	0.7-1.2
	Otomatik tokmak	0.8-1.3
Sondaj kuyusu çapı (C_B)	65mm-115mm	1.0
	150mm	1.05
	200mm	1.15
Tij boyu (C_R)	<3 m	0.75
	3-4m	0.80
	4-6m	0.85
	6-10m	0.95
	10-30m	1.0
	>30m	>1.0
Numune alma yöntemi (C_S)	Standart numune alıcı	1.0
	Standart olmayan numune alıcı	1.1-1.3

Sondaj kuyusu çapı= 76 mm için Tablodan $C_B=1.00$,

$z=3\text{m}$ derinlik için verilen 3.83m'lik tij boyu için Tablodan $C_R=0.80$

Standart numune alıcı için $C_S=1.00$

$$\text{Enerji düzeltmesi oranı} = C_E = \frac{ER}{60} = \frac{55}{60} = 0.92$$

$$(N_{1,60}) = N \times C_N \times C_B \times C_R \times C_S \times C_E = 8 \times 1.44 \times 1.0 \times 0.80 \times 1.00 \times 0.92 \cong 8.50$$

$$\%5 < FC < \%35 \text{ için } \alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{(FC)^2}\right) \quad \text{ve} \quad \beta = \left[0.99 + \frac{(FC)^{1.5}}{1000}\right]$$

$$\alpha = \exp\left[1.76 - \frac{190}{(16)^2}\right] = 2.77 \quad \beta = \left[0.99 + \frac{(16)^{1.5}}{1000}\right] = 1.054$$

$$N_{1,60cs} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad N_{1,60cs} = 2.77 + 1.054 \times 8.5 = 11.72$$

$$CRR = \frac{1}{34 - N_{1,60cs}} + \frac{N_{1,60cs}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

$$CRR = \frac{1}{34 - 11.72} + \frac{11.72}{135} + \frac{50}{[10 \times 11.72 + 45]^2} - \frac{1}{200} = 0.128$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \times MSF \quad FS = \frac{0.128}{0.32} (1.00) = 0.40 < 1.0$$

Benzer hesaplamalar diğer derinlikler için de yapılmış ve aşağıdaki tablo'da gösterilmiştir.

Aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi hesaplanan güvenlik sayıları 1.0'den küçük değerlerde olup, sahada sıvılaşmanın meydana geldiğini göstermektedir.

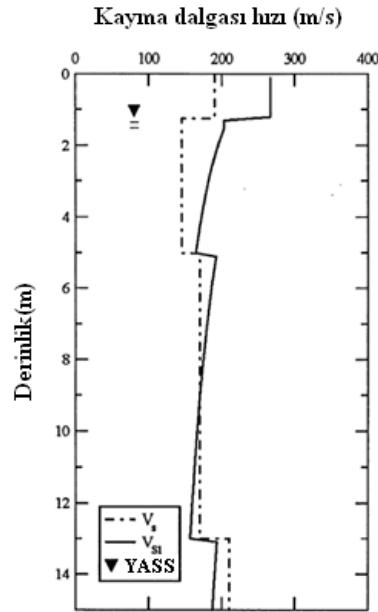
z (m)	SPT-N	γ kN/m ³	FC (%)	σ_v (kPa)	σ'_v (kPa)	C_N	C_E	C_B	C_S	C_R
3	8	18	16	54.0	32.42	1.44	0.92	1	1	0.80
3.7	12	18	13	66.6	38.15	1.39	1.00	1	1	0.85
4.8	8	18	10	86.4	47.16	1.32	1.08	1	1	0.95
5.7	11	18	11	102.6	54.53	1.26	1.08	1	1	0.95
6.7	13	18	17	120.6	62.72	1.20	1.08	1	1	0.95
7.7	11	18	33	138.6	70.91	1.15	1.08	1	1	0.80

z (m)	$N_{1,60}$	α	β	$N_{1,60cs}$	a_{max}	r_d	CRR	CSR	FS
3	8.5	2.77	1.054	11.72	0.3	0.977	0.128	0.32	0.40
3.7	14.2	1.89	1.037	16.60	0.3	0.971	0.177	0.33	0.53
4.8	10.8	0.87	1.022	11.90	0.3	0.963	0.130	0.34	0.39
5.7	14.2	1.21	1.026	15.81	0.3	0.956	0.168	0.35	0.48
6.7	16.1	3.01	1.060	20.03	0.3	0.948	0.216	0.36	0.61
7.7	11.0	4.88	1.180	17.80	0.3	0.941	0.189	0.36	0.53

ÖRNEK.3

Şekilde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde ($M_W=7.4$) sivilaşma sonrası yanal akmanın meydana geldiği gözlenen Sapanca Oteli'nin bulunduğu sahaya ait kayma dalgası hızı profili gösterilmektedir (<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari>).

Bu sahadaki zeminin suya doygun gevşek kum tabakalarından oluştuğu ve ince dane yüzdesinin $FC= \%5$ 'den küçük olduğu belirlendiğine göre, maksimum yüzey ivmesinin $0.35g$ ve $0.40g$ olması durumları için sivilaşmaya karşı güvenlik sayısının derinlikle değişimini çiziniz (Sıvılaşabilir kum tabakalarının doğal birim hacim ağırlığı $\gamma=18.5 \text{ kN/m}^3$).



ÇÖZÜM:

Verilen kayma dalgası hız profilinden $z=2\text{m}$, 4m , 6m , 8m , 10m , 12m , 14m derinlikleri için düzeltilmiş kayma dalgası hızı (V_{s1}) değerleri belirlenerek örneğin $z=2\text{m}$ derinlik için aşağıdaki gibi bir hesap yapılabilir:

$$\sigma_v = (2 \times 18.5) = 37.0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_v = 37 - [(2 - 1.50) \times 9.81] = 32.09 \text{ kN/m}^2$$

$$r_d = 1 - 0.00765(z) = 1 - 0.00765(2) = 0.985$$

Maksimum yüzey ivmesinin $0.35g$ olması durumunda çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR):

$$CSR_{BQ} = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} r_d \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad CSR_{BQ} = 0.65 \frac{0.35g}{g} 0.985 \frac{37.00}{32.09} = 0.26$$

Maksimum yüzey ivmesinin $0.40g$ olması durumunda çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR):

$$CSR_{BQ} = 0.65 \frac{0.40g}{g} 0.985 \frac{37.00}{32.09} = 0.30$$

$$CRR_{7.5} = 0.022 \left[\frac{(V_{s1})}{100} \right]^2 + 2.8 \left[\frac{1}{215 - (V_{s1})} - \frac{1}{215} \right]$$

$$CRR_{7.5} = 0.022 \left[\frac{(200)}{100} \right]^2 + 2.8 \left[\frac{1}{215 - (200)} - \frac{1}{215} \right] = 0.262$$

Maksimum yüzey ivmesinin **0.35g** olması durumunda FS:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \times MSF \quad FS = \frac{0.26}{0.26}(1.00) = 1.00$$

Maksimum yüzey ivmesinin **0.40 g** olması durumunda FS:

$$FS = \frac{0.26}{0.30}(1.00) = 0.87 < 1.0$$

Benzer hesaplamalar diğer derinlikler için de yapılarak aşağıdaki gibi bir tablo hazırlanabilir:

z (m)	V _{s1} (m/s)	CRR	σ _v (kN/m ²)	σ' _v (kN/m ²)	r _d *	CSR a _{mals} =0.35g	CSR a _{mals} =0.40g	FS a _{mals} =0.35g	FS a _{mals} =0.40g
2.0	200	0.26	37	32.09	0.985	0.26	0.30	1.00	0.87
4.0	180	0.14	74	49.48	0.969	0.33	0.38	0.42	0.37
6.0	190	0.18	111	66.86	0.954	0.36	0.41	0.50	0.43
8.0	172	0.12	148	84.24	0.939	0.38	0.43	0.31	0.27
10.0	170	0.11	185	101.62	0.907	0.38	0.43	0.30	0.26
12.0	165	0.10	222	119.00	0.854	0.36	0.41	0.29	0.25
14.0	190	0.18	259	136.38	0.800	0.34	0.40	0.52	0.45

*r_d=1-0.00765z z ≤ 9.15 m ve r_d=1.174-0.0267z 9.15 < z ≤ 23m

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının maksimum yüzey ivmesinin 0.35g ve 0.40g olması durumları için derinlikle değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi güvenlik sayıları her iki durum için de 1'den küçük değerlerdedir ve sahada sıvılaşma meydana geldiğini göstermektedir.

SIVILAŞMAYA KARŞI GÜVENLİK SAYISI YETERLİ Mİ?

- Sıvılaşma analizlerinde genellikle temel altındaki zeminler için sıvılaşmaya karşı bir güvenlik faktörü (FS_L) bulunmaktadır.
- Iwasaki ve diğ. (1978) ise bu değerin tek başına temelde oluşabilecek hasarın tanımlanması için yeterli olmadığını yola çıkarak bir “Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (I_L)” değeri hesaplamış ve böylelikle temel altında zemin kolonunun bütünsel davranışını yansıtabilmişlerdir.

Tablo 1. Sıvılaşma potansiyeli indeksine bağlı sıvılaşma seviyesi (Iwasaki ve diğ., 1978)

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi	Sıvılaşma Hasar Riski
$I_L = 0$	Çok düşük (sıvılaşma yok)
$0 < I_L \leq 5$	Düşük
$5 < I_L \leq 15$	Yüksek
$I_L \geq 15$	Çok yüksek

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi

Belirlenen güvenlik sayısı incelenen zemin seviyesinin sıvılaşabilirliği hakkında bilgi verir.

Sıvılaşmanın derecesi hakkında **bilgi vermez!**

$FS_L < 1.0$ Sıvılaşabilir

$1.2 > FS_L > 1.0$ Potansiyel Sıvılaşma

$FS_L > 1.2$ Sıvılaşmaz ?????

Sıvılaşma tehlikesi bulunan tabakalardaki güvenlik sayıları hesaplandıktan sonra yüzeyden 20m derinlik için

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (I_L) hesaplanarak bölgesel sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi yapılabilir.

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

I_L = Sıvılaşma potansiyel indeksi

$F(z)$ = Sıvılaşan tabakada sıvılaşma şiddeti

FS_L = Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı

$w(z)$ = Ağırlık fonksiyonu

dz = İlgili tabakanın kalınlığı

z = zemin derinliği

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

FS_L = z derinliğindeki güvenlik sayısı olmak üzere,

$$F(z)=1-FS_L \quad FS_L \leq 1$$

$$F(z)=0 \quad FS_L > 1$$

$$w(z)=10-0.5z \quad (z = m \text{ cinsinden yüzeyden derinlik})$$

I_L = Sıvılaşma potansiyel indeksi

$F(z)$ = Sıvılaşan tabakada sıvılaşma şiddeti

FS_L = Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı

$w(z)$ = Ağırlık fonksiyonu

dz = İlgili tabakanın kalınlığı

z = zemin derinliği

$I_L \geq 15$ yüksek sıvılaşma olasılığını,

$5 < I_L < 15$ orta derece olasılığı

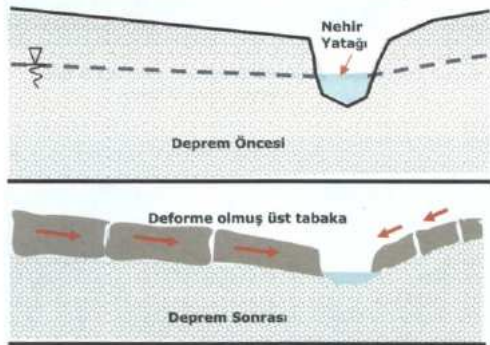
$I_L \leq 5$ düşük olasılığı gösterdiği kabul edilmektedir.

Sıvılaşmanın Yol Açtığı Zemin Problemleri

- Sıvılaşma nedeniyle arazide karşılaşılan başlıca zemin problemleri arasında,
 - yanal yayılma (lateral spreading),
 - akma gçmesi (flow failure),
 - zemin yüzeyinde çökme-ayrılma,
 - istinat yapılarında stabilite sorunları,
 - şev kaymaları, taşıma gücü kaybı,
 - kum kaynaması (sand boils)sayılabilir.

Yanal Yayılma

Genellikle **çok az eğimli (0.3° - 3°) yamaçlarda veya su kütlelerine komşu düzlüklerde gelişmektedir. yayılımlar, altta bulunan zeminin sıvılaşmasını ve yüzeysel sediment blokların yanal deplasmanını eder. Bu yayılımlar, çoğunlukla birkaç metre ile sınırlıdır. Bu gibi hareketler, tipik olarak dolgulara, tesislerine, boru hatlarına, köprülere ve yüzeysel temellere sahip diğer yapılara zarar vermektedir.**



Yanal yayılma oluşum biçimi



2001 Nisqually depremi Green River boyunca oluşan yanal yayılma

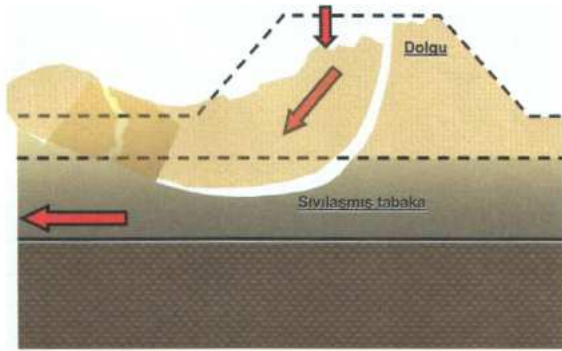




Lower San Fernando barajında San Fernando depremi, (1970) sırasında akma nedeniyle göçme

Akma Göçmesi

Akma göçmeleri çoğunlukla 3 dereceden daha fazla eğimlerde meydana gelirler. Sıvılaşmanın olduğu en feci gçmelerdir. Ansızın ortaya çıkarlar. Çabuk gelişirler ve çoğu zaman bir zemin kütüldükça geniş şev, aşağı hareketini içerirler.



Akma göçmeleri biçimi



San Francisco'daki Merced Glü kıyısı boyunca 1957 yılında gelişen bir akma kayması

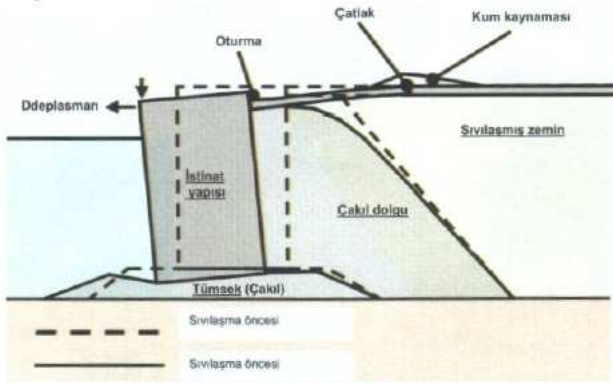




Bir yanal akma örneği (<http://earthquake.usgs.gov/>)

İstinat Yapısı Yenilmesi

Sıvılaşmış temel zemininin destek kaybından veya istinat yapısı arkasındaki sıvılaşmış zeminden artan yanıl yüklerden kaynaklanır. Bu etkiler sonucu istinat yapısı düşey ve/veya yatay deplasmanlara maruz kalır .



İstinat yapısı yenilme biçimi

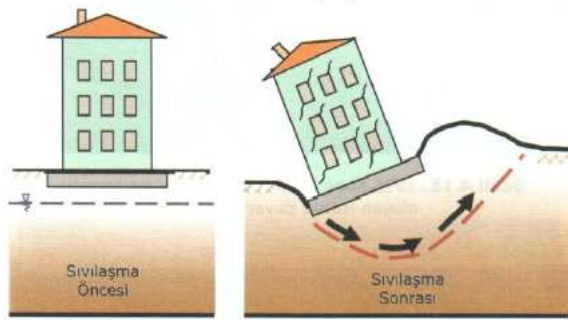


1995 Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvan ye



Taşıma Gücü Kaybı

Temel zemini sıvılaşma sonucu dayanımını kaybeder. Bir başka deyişle, taşıma gücünü yitirir. Bu sonucunda, üzerinde bulunan yapılar batar, döner, yan yatar veya devrilir



Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi



1964 Niigata depreminde sıvılaşma sonucu devrilen binalar





1999 Gölcük depremi nedeniyle oluşan sıvılaşmanın yol açtığı taşıma gücü kaybının Adapazarı'nda bir binaya etkisi (www.learn-hazards.org)

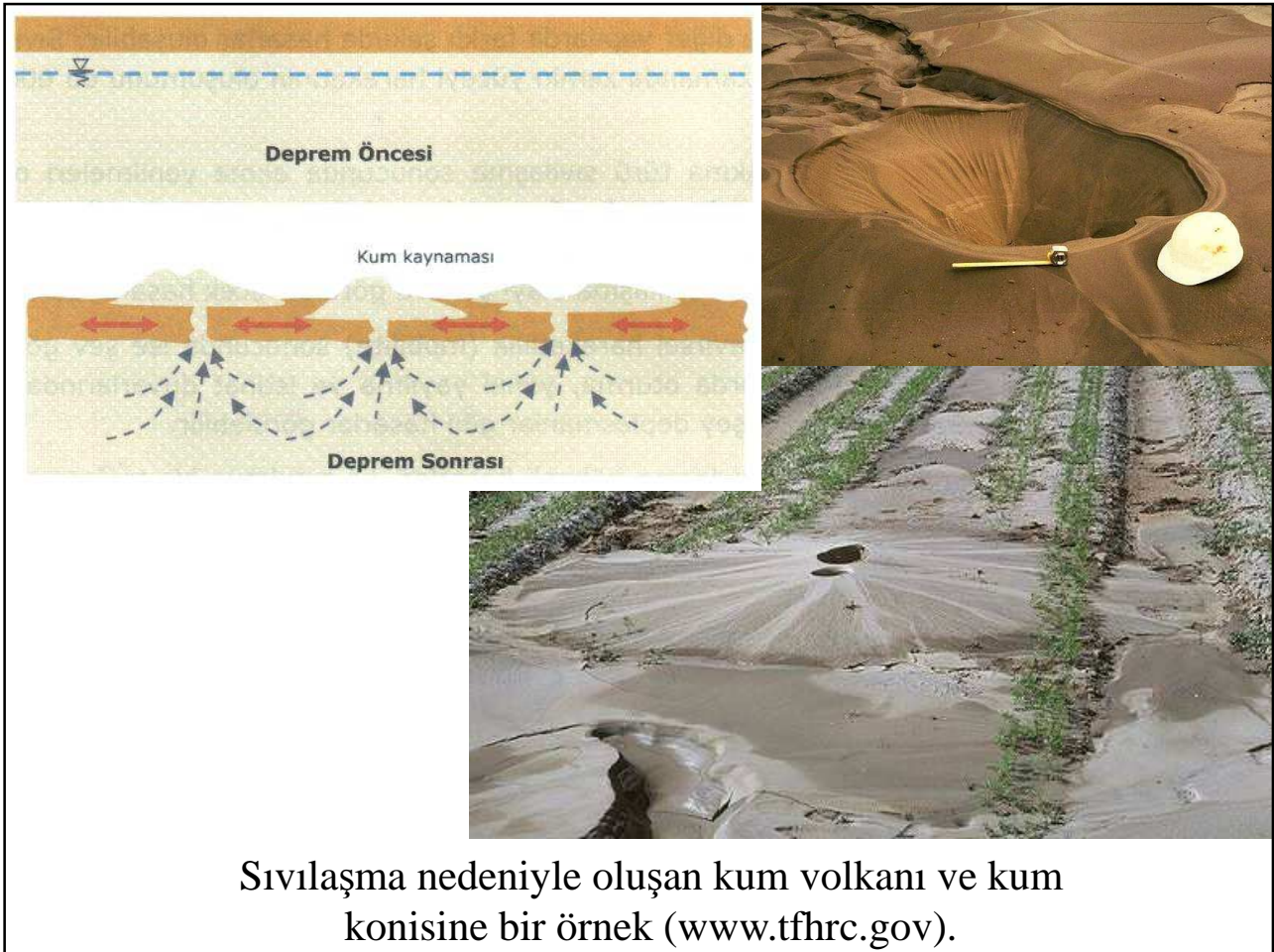
Kum kaynaması genellikle bir hat üzerinde gözlenir. Zemindeki çatlak veya yankları takip eder ve çoğunlukla çökme ve nispeten küçük hasarlara yol açarlar .



2000 Tottori depreminde oluşan kum kaynamaları

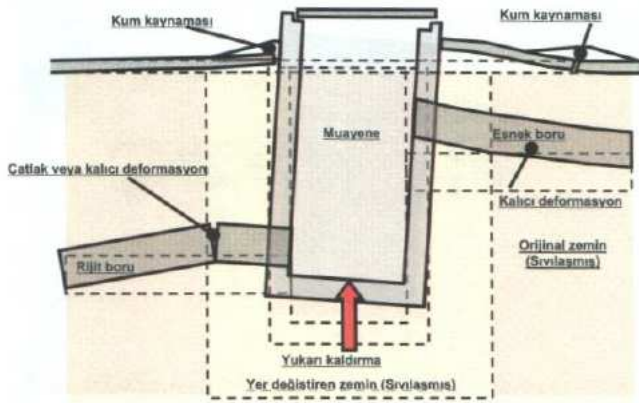
1999 Chi-Chi depreminde oluşan kum kaynaması





Gömülü Yapı Yüzeylemesi

Sıvılaşma esnasında kaldırma kuvveti etkisiyle, muayene bacası, tank, boru hatları ve benzeri hafif zemin yüzeyine yükselir



Gömülü yapı yüzeylemesi biçimi



2000 Tottori depreminde sıvılaşma sonucu muayene bacası yükselmiştir



ŞEV STABİLİTESİ

SİSMİK ŞEV STABİLİTESİ ANALİZİ

-Pseudostatik analiz metodu:

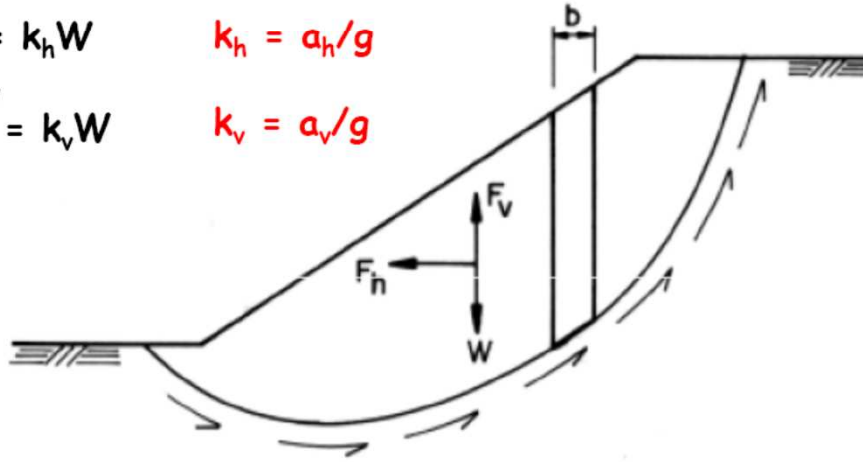
Potansiyel kayma yüzeyi üzerindeki kütlenin ağırlık merkezinde etkiyen yatay ($=k_h W = a_h/g W$) ve düşey deprem kuvvetleri stabilite hesaplarına katılır

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

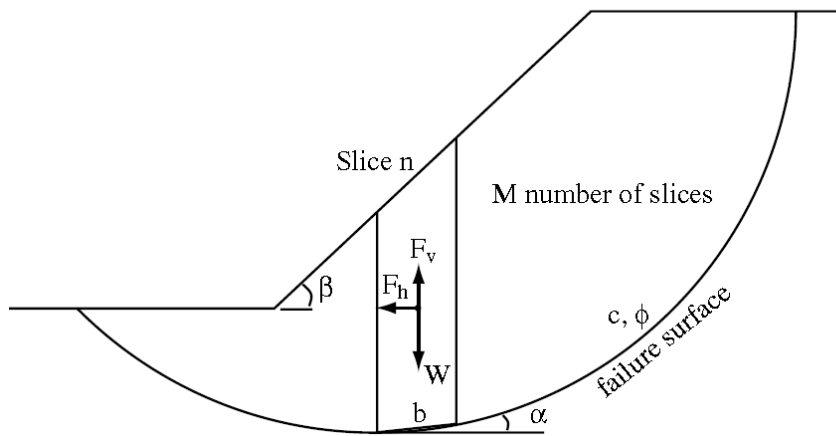
$$k_h = a_h/g$$

$$F_v = \pm \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

$$k_v = a_v/g$$



Bir dilime etkiyen deprem kuvvetleri



$$F_h = k_h dW \quad F_v = k_v dW$$

$$F = \frac{\sum [c'b \sec \alpha + (dW \cos \alpha - k_v dW \cos \alpha - k_h dW \sin \alpha)] \tan \phi'}{\sum (dW \sin \alpha - k_v dW \sin \alpha + k_h dW \cos \alpha)}$$

Psödo-Statik kuvvetlerin büyüklüğü şu şekilde belirlenebilir.

$$F_h = ma = \frac{Wa}{g} = \frac{Wa_{h\max}}{g} = k_h W$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

F_h =şevin içinden dışarı doğru olan ve kayan kütlein ağırlık merkezinden geçen yatay psödo-statik kuvvet

m =kayan malzemenin kütlesi

W = göçen (kayan) kütlein ağırlığı

a_v = düşey ivme değeri

k_v =düşey sismik ivme katsayısı

$k_h = a_{\max}/g$ = yatay sismik ivme katsayısı

Şev malzemesinin rijit olmaması ve maksimum ivmenin çok kısa bir süre etki etmesi nedeni ile $a_{h\max}$ a_{\max} dan daha küçük kullanılır.

Not: $a_{h\max} = a_{\max}/2$ veya $a_{\max}/3$ (Marcuson, 1981)

Psödo-Statik Katsayıların Seçimi

- Gerçek şevlerin rijit olmadığı ve pik ivmelerin de sadece kısa bir süre içinde etkili olduğu gerçeğinden hareketle, pratikte kullanılan psödo-statik katsayılar genellikle a_{\max} 'ın çok altındaki değerlerine karşılık gelmektedir.

k_h değerinin seçimi için bazı kılavuz bilgiler (Day, 2004)

- **Terzaghi (1950) aşağıdaki değerleri önermiştir:** şiddetli depremler için $k_h = 0.10$
- şiddetli ve yıkıcı depremler için $k_h = 0.20$
- felaket boyutundaki depremler için $k_h = 0.50$
- **Marcuson (1981)** barajlar için $k_h = 0.33 a_{max}/g$ ile $k_h = 0.50 a_{max}/g$ 'nin yanı sıra, baraj şeklinden dolayı sismik salınım olası büyütme ve küçültmesinin dikkate alınmasını önermiştir.

Psödo-Statik Yaklaşımın Avantaj ve Sınırlamaları

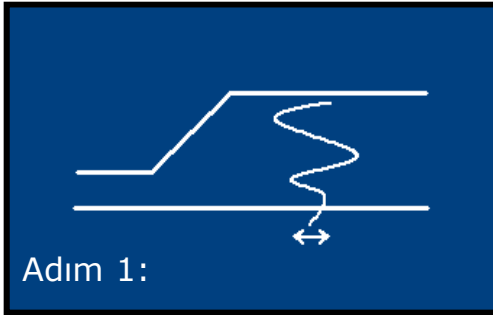
- Deprem sarsıntısının karmaşık ve dengesiz etkilerinin sabit bir tek yönlü psödo-statik ivme ile temsil edilmesi oldukça kaba bir yaklaşımdır.
- Toplam gerilme ve efektif gerilme analizlerinde uygulanabilir.
- Psödo-statik analiz yöntemi basit ve uygulanması çok kolaydır.
- Bu yöntem depremin çevrimli yük uygulanması özelliğini ihmal eder.
- Statik stabilite analizlerine ilave olarak, sismik etkilerden dolayı meydana gelen atalet kuvvetleri eklenir.
- Statik stabilite analizlerinde elde edilene benzer skaler bir güvenlik sayısı elde edilir.
- Bu yaklaşımın doğruluk derecesi direkt olarak sismik katsayının doğru tahminine bağlıdır.

Ataletsel Şev Stabilitesi

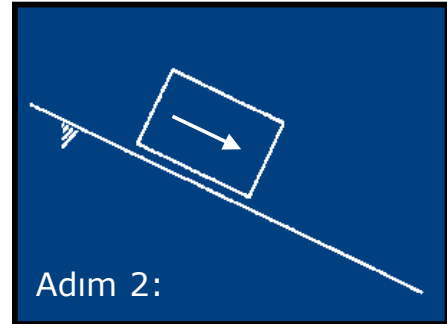
- Şevlerin güvenlik araştırmalarının deprem yükleri altında gerçekleştirilmesinde statik benzeşimli bir yaklaşımla çevrimli deprem hareketi yerine sabit yatay ve düşey bir ivme gözönüne alınmaktadır.
- Analizlerde kullanılan sismik katsayı göçen kütle için pik ortalama ivmeden daha az olup güvenlik sayısının tipik olarak 1.0-1.2 arasında olması yeterlidir.

Gerilme Deformasyon Analizleri

- Gerilme-deformasyon analizleri zemin ve kayanın gerilme-birim deformasyon davranışının göz önüne alınmasına olanak verir.



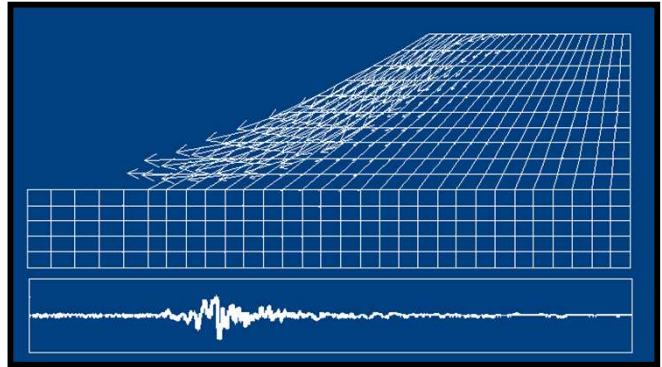
Dinamik davranış analizleri



Kayan blok analizi

Sonlu elemanlar analiz yöntemi

- Doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon davranışı
- Sınır koşulları
- Düzensiz geometriler
- İnşaat adımları



Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

Deprem etkisinde şev duraylılık analizlerinde, zemin özellikleri üzerinde *dayanım katsayıları* (kohezyon ve sürtünme direnci için, sırası ile, c'/γ_{Rc} ve $\tan\phi'/\gamma_{R\phi}$) uygulanmalıdır.

$$F_H = 0.5 W(0.4 S_{DS} S_T) \quad ; \quad F_V = \pm 0.5 F_H$$

F_H ve F_V = yatay ve düşey eylemsizlik kuvvetleri

γ_{Rc} ve $\gamma_{R\phi}$ = güvenlik sayıları

W = kayan kütlelerin ağırlığı,

S_{DS} = kısa periyod tasarım spektral ivme katsayısı

S_T = topoğrafik büyütme katsayısı

Topoğrafik büyütme etkisi,

şev açısı $\beta \leq 15^\circ$ olan şevlerde ihmal edilebilir;

taç (tepe) genişliği taban genişliğinden daha küçük olan sırtlarda

şev açısı $\beta \geq 30^\circ$ olan şevlerde $S_T \geq 1.4$,

daha küçük şev açılarında ise $S_T \geq 1.2$ olarak kullanılacaktır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

$$\tau_{\text{mob}} = \frac{c'}{\gamma_{\text{Rc}}} + \frac{\tan\phi'}{\gamma_{\text{R}\phi}} = \frac{c'}{\gamma_{\text{Rk}}} + \frac{\tan\phi'}{\gamma_{\text{Rk}}} \quad \gamma_{\text{Rk}} = \frac{1}{\sum W_s \sin\alpha} \sum c'b + \left[\frac{1}{m_\alpha} \left(W_s - \frac{c'b \sin\alpha}{\gamma_{\text{Rk}}} - ub \right) \right] \tan\phi'$$

$$\gamma_{\text{Rk}} = \frac{1}{\sum W_s (1 - k_v) \sin\alpha + k_h W_s \left(\cos\alpha - \frac{H_c}{R_d} \right)} \sum c'b + \left[\frac{1}{m_\alpha} \left(W_s (1 - k_v) - \frac{c'b \sin\alpha}{\gamma_{\text{Rk}}} - ub \right) \right] \tan\phi'$$

$$m_\alpha = \cos\alpha \left(1 + \frac{\tan\alpha \tan\phi'}{\gamma_{\text{Rk}}} \right)$$

b = dilim genişliği

W_s = dilim ağırlığı

α = dilim tabanının yatayla yaptığı açı

u = dilim tabanında etkiyen su basıncı

$k_h = 0.2 S_{DS}$ ve $k_v = \pm 0.5 k_h$ sırası ile yatay ve düşey eşdeğer deprem katsayısı

H_c = dilim tabanının orta noktasından dilim merkezine olan düşey uzaklığı

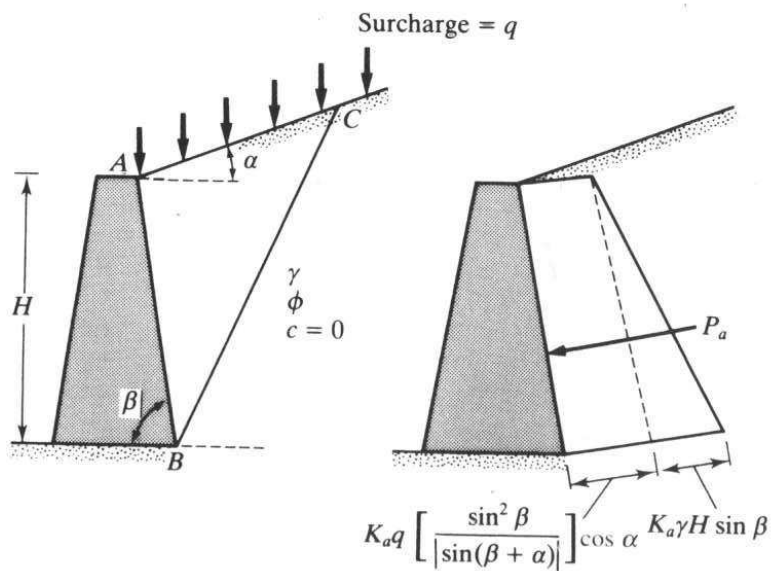
R_d ise dairesel göçme yüzeyi yarıçapı

İSTİNAT DUVARLARININ SİSMİK YÜKLER ALTINDA TASARIMI

Mononobe-Okabe Yaklaşımı (1929)

- Mononobe-Okabe eşitliği hemen tüm dayanma yapıları için kullanılmaktadır.
- Depremin düşey ve yatay ivme katsayısı k_v ve k_h kama ağırlığı ile çarpılıp depremlili durumdaki kuvvetler elde edilmektedir.
- Örneğin ağırlık duvarları, ankrajlı duvarlar, mekanik olarak iyileştirilmiş (donatılı vs) duvarlarda aynı yöntem uygulanabilir.
Bu yöntem içeriğinde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.
- Duvar aktif basınç doğmasını sağlayacak kadar hareket eder ve duvar arkası dolgu yüzeyi eğimli olabilir, ancak bir düzlem olarak kabul edilir.
- Duvar arkası dolgu yüzeyinin eğimli olması halinde bu dolgunun ya tamamen YASS altında olduğu ya da tamamen üstünde olduğu varsayılır. Yüzeyin yatay konumda olması durumunda su tablası herhangi bir seviyede olabilir.
- Duvar arkasındaki sürşarj üniformdur ve tüm yüzeyi kaplar.
- Duvar arkası dolgusunun granüler olduğu ($c=0$) varsayılır.
- Sıvılaşma sorunu yoktur.

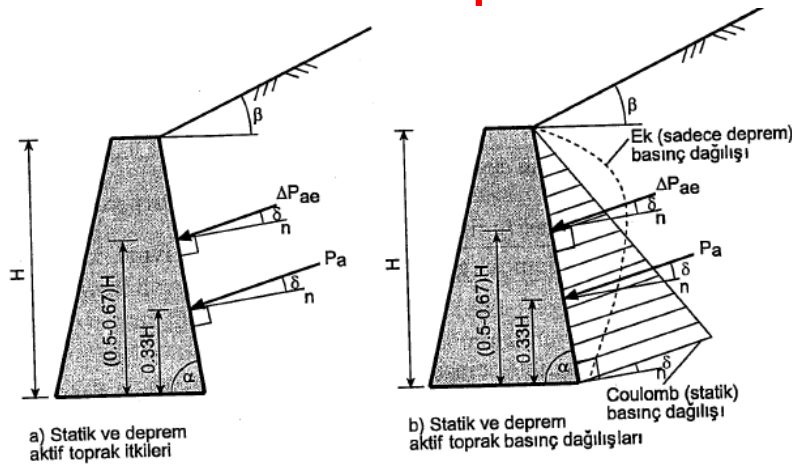
Coulomb'a göre sürşarj etkisi



$$P_{Ac} = \frac{1}{2} \gamma_{eq} H^2 K_{Ac}$$

$$\gamma_{eq} = \gamma + \left[\frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \alpha)} \right] \left(\frac{2q}{H} \right)$$

Deprem Etkisi



$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{ae}$$

$$\Delta P_{ae} = P_{ae} - P_a$$

$$z = \frac{P_a \left(\frac{H}{3} \right) + \Delta P_{ae} (0.6H)}{P_{ae}}$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 \pm k_v} \right)$$

P_{ae} duvara etkiyen aktif toprak basıncı kuvveti

P_a statik durumda duvara etkiyen aktif toprak basıncı kuvveti

ΔP_{ae} statik durum ile depremlili durumda duvara etkiyen aktif kuvvetlerin farkıdır.

H duvar yüksekliği

γ zeminin birim hacim ağırlığı

ΔP_{ae} duvarın tabanından $0.5-0.67H$ mesafede etkir.

z P_{ae} 'nin duvar tabanından itibaren etkime noktası

$$K_{ae} = \frac{\sin^2(\phi + \alpha - \theta')}{\cos \theta' \sin^2 \alpha \sin(\alpha - \theta' - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta' - \beta)}{\sin(\alpha - \delta - \theta') \sin(\beta + \alpha)}} \right]^2}$$

TDY'ye göre Deprem Etkisinin Dikkate Alınması

Toplam Aktif Basınç Katsayısı,

K_{at} = Aktif statik toprak basıncı ile depremden oluşan ek dinamik toprak basıncının toplamını hesaplamak için kullanılacak katsayı

Toplam Pasif Basınç Katsayısı,

K_{pt} = Pasif statik toprak basıncı ile depremden oluşan ek dinamik toprak basıncının toplamını hesaplamak için kullanılacak katsayı

- Emniyetli tarafta kalmak üzere zeminin kohezyonu ihmal edilmiştir.

Toplam Aktif Basınç Katsayısı, K_{at}
Toplam Pasif Basınç Katsayısı, K_{pt}

$$K_{at} = \frac{(1 \pm C_v) \cos^2(\varphi - \lambda - \alpha)}{\cos \lambda \cos^2 \alpha \cos(\delta + \alpha + \lambda)} \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \lambda - i)}{\cos(\delta + \alpha + \lambda) \cos(i - \alpha)}} \right]^{-2}$$

$$K_{pt} = \frac{(1 \pm C_v) \cos^2(\varphi - \lambda + \alpha)}{\cos \lambda \cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha + \lambda)} \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \lambda + i)}{\cos(\delta - \alpha + \lambda) \cos(i - \alpha)}} \right]^{-2}$$

Burada;

α duvar-zemin arakesitinin düşeyle aktif basınç tarafına doğru yaptığı açı,

δ zeminle duvar arasındaki sürtünme açısı,

Zeminin su altında veya suya doymun olması durumunda δ yerine $\delta/2$ alınacaktır.

ϕ zeminin kayma mukavemeti açısı,

i arka zemin yüzeyinin yatayla yukarıya doğru yaptığı şev açısıdır.

λ C_v ve C_h 'a bağlı olarak hesaplanan bir açı = (θ = Sismik açı)

C_v ve C_h = (k_v ve k_h) düşey ve yatay eşdeğer deprem katsayısı

Sismik Katsayının Seçimi

- Yürürlükteki Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007) 'e göre düşeyde serbest konsol olarak çalışan dayanma yapılarında ,

$$C_h = 0.2 (I + 1) A_0 \qquad C_v = \frac{2C_h}{3}$$

ve yanal doğrultuda mesnetlenmiş yapılarda bunun 1.5 katının alınması önerilmektedir.

Burada

C_h ve C_v = yatay ve düşey eşdeğer deprem katsayısı,

A_0 deprem bölgesine göre alınacak etkin yer ivmesi katsayısı

(1. derece deprem bölgesi için 0.40) ,

I ise yapı önem katsayısı (1.5 ~ 1.0) dır.

Statik durumda zemin yükleri

P_{as} = Zemin kütesinden oluşan statik aktif yatay itki kuvveti

$$P_{as} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{as}$$

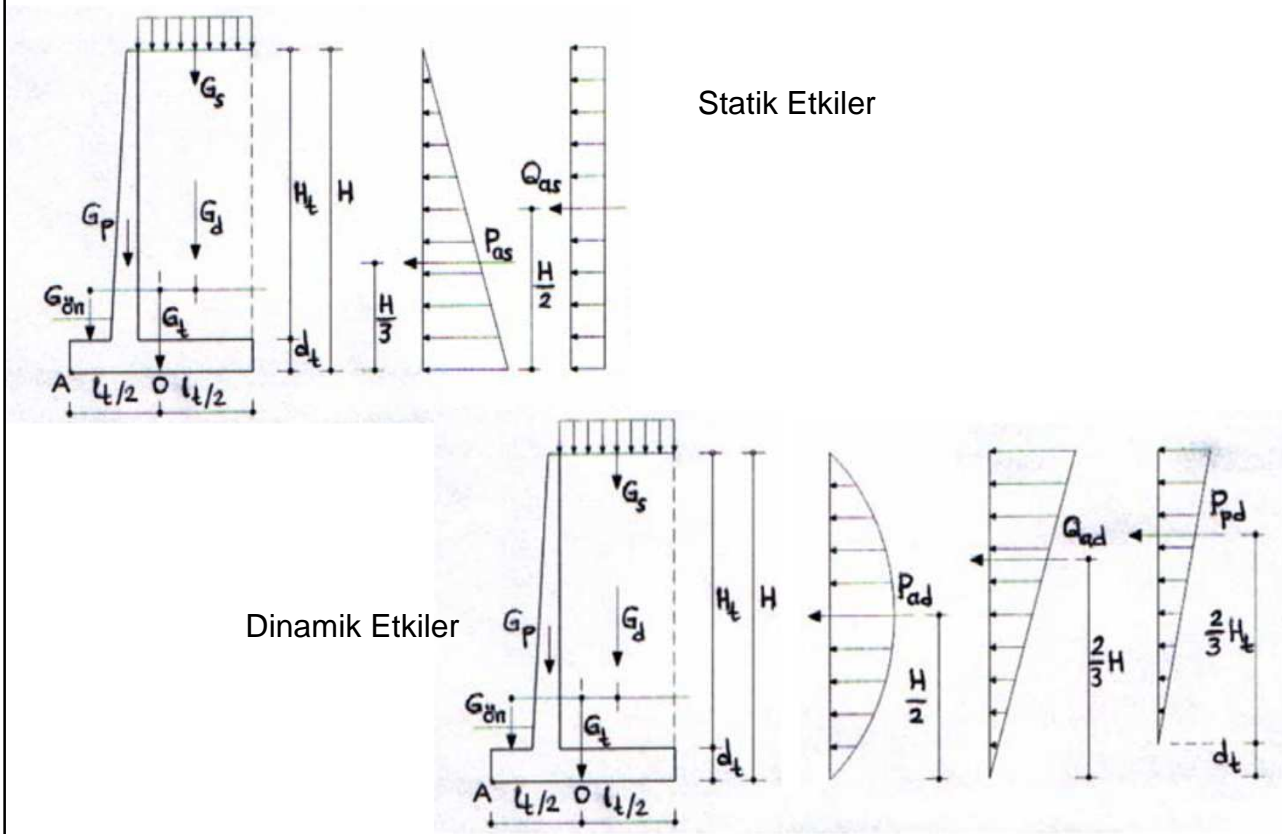
K_{as} = statik durumda aktif toprak basıncı katsayısı

Q_{as} = ek yükten (sürşarj) oluşan statik aktif yatay itki kuvveti

q_0 = düzgün yayılı dış yük

$$Q_{as} = q_0 K_{as}$$

İstinat Yapılarına Etkiyen Statik ve Dinamik Yükler



Dinamik basınç katsayıları K_{ad} , K_{pd}

Depremden oluşan

dinamik aktif basınç katsayısı K_{ad}

dinamik pasif basınç katsayısı K_{pd} ,

$$K_{ad} = K_{at} - K_{as}$$

$$K_{pd} = K_{pt} - K_{ps}$$

K_{at} = Toplam aktif basınç katsayısı

K_{as} = Statik aktif basınç katsayısı

K_{pt} = Toplam pasif basınç katsayısı

K_{ps} = Statik pasif basınç katsayısı

Aktif ve Pasif Dinamik Yükler

Zemin kuruda ve üniform olması özel durumunda, $p_v(z)=\gamma z$ alınarak

$$P_{ad} = 0.5 \gamma K_{ad} H^2$$

$$P_{pd} = 0.5 \gamma K_{pd} H^2$$

$$z_{cd} = H / 2$$

z_{cd} = Aktif veya pasif basınç kuvvetinin bileşkesinin zemin üst yüzeyinden itibaren aşağıya doğru ölçülen derinliği

$$p_{ad}(z) = 3 K_{ad} (1 - z / H) p_v(z)$$

$$p_{pd}(z) = 3 K_{pd} (1 - z / H) p_v(z)$$

Yayıllı yük etkisi

Statik toprak basıncına ek olarak deprem durumunda düzgün yayıllı dış yükten oluşan aktif ve pasif toprak basıncının zemin yüksekliği boyunca değişimi

Zemin özelliklerinin üniform olması özel durumunda,

$$Q_{ad} = q_o K_{ad} H \cos \alpha / \cos(\alpha - i)$$

$$Q_{pd} = q_o K_{pd} H \cos \alpha / \cos(\alpha - i)$$

$$z_{cd} = H / 3$$

$$q_{ad}(z) = 2 q_o K_{ad} (1 - z / H) \cos \alpha / \cos(\alpha - i)$$

$$q_{pd}(z) = 2 q_o K_{pd} (1 - z / H) \cos \alpha / \cos(\alpha - i)$$

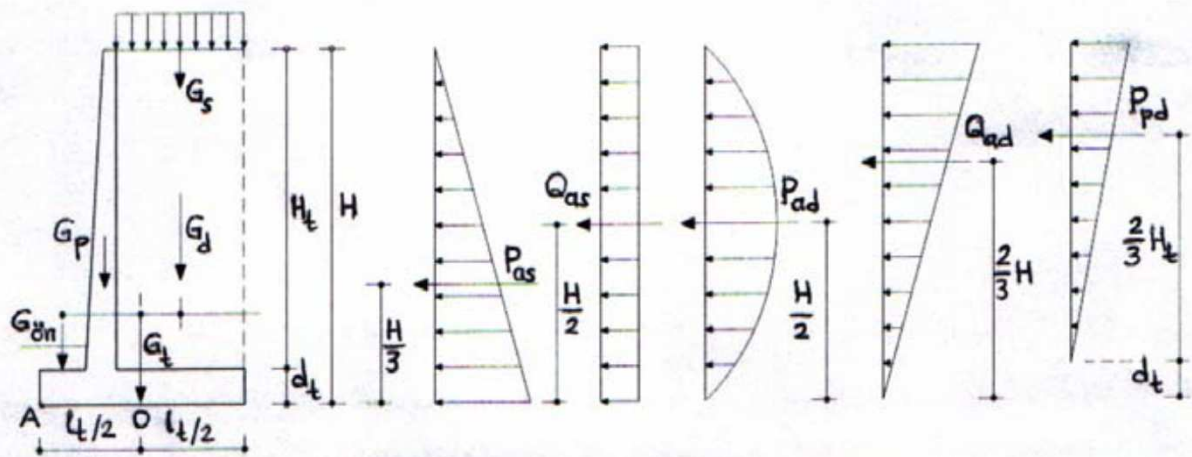
Depremde perdede oluşan yatay kuvvet P_{pd}

Depremde perdede oluşan yatay kuvvet P_{pd} , G_p gövde ağırlığına bağlı olarak

$P_{pd}=G_p A_o$ şeklinde verilmektedir.

Tabakalı zemin durumunda statik ve dinamik toprak basınçlarının hesabında her bir tabakaya ait özellikler ve ilgili tabakanın kalınlıkları alınarak yukarıdaki formüller ile hesap yapılabilecektir.

İstinat Yapılarına Etkiyen Statik ve Dinamik Yükler



Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)

Tablo 16.7. Dayanma Yapıları için r katsayıları

$$k_h = \frac{0.4S_{DS}}{r}$$

$$k_v = 0.5k_h$$

Dayanma Yapısının Tipi	r
En fazla $120S_{DS}$ (mm) yerdeğiştirmeye izin verilen ağırlık tipi duvarlar	2.0
En fazla $80S_{DS}$ (mm) yerdeğiştirmeye izin verilen ağırlık tipi duvarlar	1.5
Ankrajlı duvarlar, yerdeğiştirmesine izin verilmeyen ağırlık tipi duvarlar	1.0

$$P_t = \frac{1}{2} K(1 \mp k_v)(\gamma^*H^2 + qH) + P_{su} + \Delta P_{su}$$

H = duvar yüksekliği

γ^* = zemin birim hacim ağırlığı

q = ek yükü (sürşarj)

K = toplam (statik+dinamik) aktif (K_a) veya pasif (K_p) toprak basıncı katsayısı

k_v = düşey statik-eşdeğer deprem katsayısı

P_{su} ve ΔP_{su} = bileşke statik ve dinamik su basınçları

Kaynaklar

- Kramer, S.L. (1996). "Geotechnical Earthquake engineering". New Jersey, Prentice Hall, 654 p.
- Kramer, S. L. (2003) Geoteknik deprem mühendisliği, Gazi Kitabevi.
- Özaydın, K. (2011). "Zemin Mekaniği". Birsen Yayınevi, Güncelleştirilmiş Baskı.
- Yıldırım, S. (2009). "Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı". Birsen Yayınevi, Güncelleştirilmiş Baskı.
- Beyen, K. (2008) "Yapı-Deprem Mühendisliği Açısından Depremlerde Yapısal Davranış" IMO Semineri.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, AIGM (2007) "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Türkiye Deprem Yönetmeliği (TDY)"
- Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (1993), Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4 Int. Soc. for Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Finn, W.D.L. (1991), "Geotechnical Engineering Aspects of Microzonation", Proc. Fourth Int. Conf. on Seismic Zonation, Vol.1, pp. 199-259.
- Idriss, I.M.(1990), "Response of soft soil sites during earthquakes" Proc., H. Bolton Seed Memorial Symp. Vol.2, BiTech Publishers, Ltd. Vancouver, 273-290.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97(9), pp. 1249-1273.

Kaynaklar

- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü (2007) “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Türkiye Deprem Yönetmeliği.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2016, www.deprem.gov.tr/belgeler2016/tbdy.pdf
- Committee on Earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council 1985. "Liquefaction of Soils During Earthquakes".
- Committee on the Alaska Earthquake of the Div. of Earth Sciences, National Research Council 1973. "The Great Alaska earthquake 1964". Engineering, Geology, and Summary Volumes, National Academy of Sciences,
- Holtz, Robert D.; William, Kovacs D. 1981 . "An Introduction to Geotechnical Engineering". New Jersey, Prentice Hall.
- Kawasumi-Hirosi (editor) 1968. "General report on the Niigata earthquake of 1964".
- Richart, F.E., Jr., Hall, J.R., Woods, R.D. 1970. Vibration of soils and foundation. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 414 p.
- Suzuki, Y., Tokimatsu, K., Koyamada, K., Taya, Y., and Kubota, Y.(1995). "Field correlation of soil liquefaction based on CPT data."Proc., Int. Symp. on Cone Penetration Testing, Vol. 2, 583–588.
- Youd, T.L. and Carter, B.L. (2005), "Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131 (7):811-825.

Kaynaklar

- Anderson, D. G., Stokoe, K. H. II (1978) "Shear modulus: A time-dependent soil property" Dynamic Geotech. Testing, ASTM STP654, 66 – 90.
- Assimaki, D., Kausel, E., Whittle, A. (2000) "Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils." ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., Vol. 126, No. 10, pp. 859 – 869.
- Darendeli, M. B. (2001) "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves", PhD. Thesis, The Univ. of Texas at Austin.
- Dobry, R., Vucetic, M. (1987) "Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits." Proc. Int. Symp. on Geotech. Engrg. of Soft Soils, Vol. 2, Mexico City, 49 – 85.
- Fred, Y. (2010) "Nonlinear cyclic characteristics of soils" GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design, pp. 2601-2610.
- Hardin, B. O., Drnevich, V. P. (1972a) "Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects." J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 98(6), 603 – 624.
- Hsu, C., Vucetic, M. (2004) "Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement" ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., Vol. 130, No. 1, pp. 58 – 70.

Kaynaklar

- Ishibashi, I. and Zhang, X. (1993). "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay," Soils and Foundations, Vol. 33, No. 1, pp.182-191.
- Ishihara, K., 1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Clarendon Press, Oxford.
- Iwasaki, T., Tatsouka, F., Takagi, Y. (1978) "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading." Soils and Found., 18(1), 39 – 56.
- Kokusho, T., Yoshida, Y., Esashi, Y. (1982) "Dynamic properties of soft clay for wide strain range" Soils and Found., 22(4), 1 – 18.
- Kondner, R.L., Zelasko, J.S., 1963. A hyperbolic stress–strain formulation for sands. Proceedings of 2nd Pan-American Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 289–324.
- Koutsoftas, D. C., Fischer, J. A. (1980) "Dynamic properties of two marine clays" J. Geotech. Engrg. Div., 106(6), 645 – 657.
- Lanzo, G., Vucetic, M., Doroudian, M. (1997). "Reduction of shear modulus at small strains in simple shear." ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., Vol. 123, No. 11, pp.1035 -1042.
- Lodde, P. F. , Stokoe, K. H. II (1982) "Dynamic response of San Fransisco Bay mud." Geotech. Engrg. Report GT-82-2. Univ. of Texas at Austin, Austin, Tex.
- Akkar S. ve Kale Ö (2015) "Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi ve Yeni Deprem Yönetmeliği" 8. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Bildiriler Kitabı, Cilt 1, s:61-82, 11-15 Mayıs 2015

Kaynaklar

- Olsen, P (2008) "Shear modulus degradation of liquefying sand: quantification and modelling", MSc. Thesis, Brigham Young University, Department of Civil and Environmental Engineering
- Shahnazari, H., Dehnavi, Y., Alavi, A. H. (2010) "Numerical modeling of stress – strain behavior of sand under cyclic loading", *Engrg. Geology*, 116(2010), 53 – 72.
- Sun, J. I., GoleSORhki, R., Seed, H. B. (1988). "Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils." Report No. EERC 88-15, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1991) "Effect of soil plasticity on cyclic response." *J. Geotech. Engrg. Div. ASCE*, 117(1), 89 – 117.
- Vucetic, M., Lanzo, G., Doroudian, M. (1998) "Damping at small strains in cyclic simple shear test" *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, Vol. 124, No. 7, pp. 585 – 594.
- Yamada, S., Hyodo, M, Orense, R. P., Dinesh, S. V. (2008) Initial shear modulus of remolded sand-clay mixtures." *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, Vol. 134, No. 7, pp. 960 – 971.
- Zhang, J., Andrus, R. D., Juang, H. (2005) "Normalized shear modulus and material damping ratio relationships" *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, Vol. 131, No.4. pp. 453 – 464.

İnternet Kaynakları

Afet İşleri Genel Müdürlüğü, (2016), <http://www.deprem.gov.tr>

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi (2016), <http://www.koeri.boun.edu.tr/>

<http://ceor.princeton.edu/~radu>, Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering at Princeton University

<http://geosystems.gatech.edu/Research/gpr.html>, Georgia Institute of Technology, Liquefaction research.

<http://nisee.ce.berkeley.edu/>, National Information Service for Earthquake Engineering

<http://peer.berkeley.edu/>, Pacific Earthquake Engineering Research Center.

<http://quake.wr.usgs.gov/>, United States Geological Survey Earthquake Information

<http://www.ce.berkeley.edu/Programs/Geotech/>

<http://www.eerc.berkeley.edu/>, Earthquake Engineering Research Center.

<http://www.liquefaction.com/>, Web site with general liquefaction information and more specialized research information.

<http://www.ce.berkeley.edu/~hausler/home.html>

Yazılımlar

SEISMOSIGNAL

<http://www.seismosoft.com/index.htm>

NONLIN:

<http://training.fema.gov/EMIWeb/nonlin.asp>

MAE DEEP SOIL http://mae.ce.uiuc.edu/software_and_tools/deepsoil.html

EERA : <http://gees.usc.edu/GEES/Software/EERA2000/Default.htm>