

**DİNAMİK ETKİLER ALTINDA  
ZEMİN DEFORMASYONUN İNCELENMESİ**

**M. İnanç ONUR**  
**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**  
**Ağustos 2007**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

M. İnanç ONUR'un "Dinamik Etkiler Altında Zemin Deformasyonunun İncelenmesi" başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 13.07.2007 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof.Dr. MUSTAFA TUNCAN	.....
Üye	: Prof.Dr. BEKİR KARASU	.....
Üye	: Doç.Dr. YÜCEL GÜNEY	.....

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DEFORMASYONUNUN İNCELENMESİ**

**M. İnanç ONUR**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN  
2007, 130 Sayfa**

Bu çalışmada; deprem yükleri altında zemin deformasyonu konusuna genel bir bakış açısıyla yaklaşılmış ve özellikle depremler sonucu oluşan deformasyonlarda sıkça görülen bir durum olan sıvılaşma hakkında daha geniş bilgi ve örnek çalışmalar sunulmuştur.

Yerkabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsma olayına "DEPREM" denir. Deprem etkisi farklı deprem karakteristiklerinde ve farklı zemin türlerinde farklı deformasyonlara sebep olmaktadır. Deprem kaynaklı deformasyonların ise şu şekilde sıralanabilmesi mümkündür; Yüzey yırtılması, Bölgesel çökme, Yamaç hareketleri, Hacimsel sıkışma, Sıvılaşma, Oturma ve Taşıma gücü yenilmeleri, Akma kaymaları, Yanal yayılmalar, Kum volkanları.

Tez çalışmasında kullanılan Plaxis paket programı dinamik modülü yardımı ile dinamik etki altında zemin deformasyonu modellenmiş, değerlendirme kısmında, sonuçlar irdelenerek, sebep sonuç ilişkilerine yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Depremler, Sıvılaşma, Zeminlerde Deformasyon, Plaxis

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **SOIL DEFORMATIONS UNDER DYNAMIC EFFECTS**

**M. İnanç ONUR**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN  
2007, 130 pages**

In this thesis, a general aspect of soil deformation subject is examined and especially large information and representative study on liquefaction as a frequently occurring outcome of earthquake dependent deformations have been presented.

The shaking of the ground surface and the mediums in which the vibrations that occur because of the sudden breakages in the ground mantle expands as waves is called as "EARTHQUAKE" Earthquake effects cause different deformations in different soil types and different earthquake characteristics. Earthquake sourced deformations can be ordered in this way: Surface rupture, Regional settlement, Slope movements, Volumetric squeeze, Liquefaction, Settlement and Bearing capacity failures, Creep failures, Horizontal expansions, Sand volcanos.

The soil deformation under dynamic effect is modelled by the Plaxis software dynamic module, the results are studied and reason-result relations were given in the evaluation part of the study

**Key Words:** Earthquake, Liquefaction, Soil Deformation, Plaxis

## TEŞEKKÜR

Mühendislik yorumlama gücümün gelişmesinde örnek aldığım tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa TUNCAN ile engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Ahmet TUNCAN' a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarımındaki yardım ve desteklerinden dolayı arkadaşlarım Gülşah AVCI, Ün UŐAR, Serkan GÜRBÜZ, Tolgay IŐIK ve yaşam kaynağım aileme teşekkür ederim.

**M. İNANÇ ONUR**

**Ağustos, 2007**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Konu Üzerine Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	2
<b>2. DEPREMLER</b> .....	<b>12</b>
2.1. Deprem nedir?.....	12
2.2. Depremlerin Oluş nedenleri.....	13
2.3. Depremlerin Oluşum Mekanizması.....	15
2.4. Deprem Türleri.....	19
2.5. Deprem Parametreleri.....	20
2.5.1. Odak Noktası.....	20
2.5.2. Dış Merkez.....	20
2.5.3. Odak Derinliği.....	21
2.5.4. Eş Şiddet Eğrileri.....	21
2.5.5. Şiddet.....	22
2.5.6. Magnitüd.....	23
2.6. Deprem Şiddet ve Büyüklük Ölçüleri.....	24
2.6.1. Mercalli Şiddet Ölçüsü.....	25
2.6.2. Richter Yerel Büyüklüğü.....	27
2.6.3. Cisim Dalgası Büyüklüğü.....	28
2.6.4. Yüzey Dalgası Büyüklüğü.....	29
2.6.5. Sismik Moment.....	29
2.6.6. Moment Büyüklüğü.....	29

2.6.7. Sismik Enerji.....	30
2.7. Yeryüzünde Faylar ve Tektonik Bölgeler.....	31
2.8. Türkiye’de Faylar ve Tektonik Bölgeler.....	33
2.9. Deprem Dalga Hareketi.....	35
2.10. Deprem Zemin İlişkisi.....	37
<b>3. DİNAMİK ETKİ ALTINDA ZEMİN ÖZELLİKLERİ</b>	<b>39</b>
3.1. Dinamik Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi.....	39
3.2. Arazi Deneyleri.....	39
3.2.1. Düşük Deformasyon Deneyleri.....	39
3.2.2. Yüksek Deformasyon Deneyleri.....	40
3.2.3. Diğer Arazi Deneyleri.....	40
3.3. Laboratuvar Deneyleri.....	41
3.3.1. Düşük Deformasyon Eleman Deneyleri.....	41
3.3.2. Yüksek Deformasyon Eleman Deneyleri.....	41
3.3.3. Model Deneyleri.....	43
3.4. Tekrarlı Yüklenen Zemin Davranışı.....	43
3.4.1. Eşdeğer Doğrusal Model.....	44
3.4.2. Tekrarlı Doğrusal Olmayan Model.....	45
3.4.3. İleri Yapıcı Model .....	45
3.5. Tekrarlı Yüklenen Zeminlerin Dayanımı.....	45
<b>4. DİNAMİK ETKİ ALTINDA ZEMİN DEFORMASYONU</b>	<b>47</b>
4.1. Yüzey Yırtılması .....	47
4.2. Bölgesel çökme.....	48
4.3. Yamaç Hareketi.....	48
4.4. Hacimsel Sıkışma.....	48
4.5. Sıvılaşma.....	49
4.5.1. Oturma ve Taşıma Gücü Yenilmeleri.....	50
4.5.2. Akma Kaymaları.....	50
4.5.3. Kum Volkanları.....	51

<b>5. SIVILAŞMA</b>	<b>52</b>
5.1. Sıvılaşma Olgusu.....	52
5.2. Sıvılaşmaya Neden Olan Zemin Koşulları.....	53
5.3. Sıvılaşma Tahmini İçin Gerekli Ön Parametreler.....	54
5.4. Sıvılaşma Hesapları.....	54
5.4.1. Depreme Olan Uzaklık.....	55
5.4.2. Eşik İvme Kriteri .....	55
5.4.3. Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri.....	56
5.4.4. Maksimum Yer İvmesi Kriteri .....	58
5.4.5. Cpt Verileri İle Sıvılaşma Kriteri.....	59
5.4.6. Sıvılaşma Dizini.....	60
5.4.7. Sıvılaşma Tayini İçin Japon Kriterleri.....	61
5.4.8. Kohezyonlu Zeminler İçin Çin Kriterleri.....	62
5.5. Sıvılaşma Üzerine Deneysel Çalışmalar.....	63
5.6. Sıvılaşmaya Karşı Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	67
<b>6. BİLGİSAYAR ORTAMINDA ZEMİN DEFORMASYONUN MODELLENMESİ</b>	<b>69</b>
6.1. Kullanılacak Paket Program Hakkında Bilgi.....	69
6.1.1 Statik Modül.....	69
6.1.2 Dinamik Modül.....	70
6.1.3 Deprem Etkisinin Modellenmesi.....	71
<b>7. ÖRNEK MODELLEME ÇALIŞMALARI</b>	<b>73</b>
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>89</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>91</b>
<b>EK-1 (Plaxis Sonuçları)</b>	<b>94</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Kabuk tabakası, manto tabakası, dış çekirdek ve iç çekirdek.....	15
2.2. Fay türleri [27].....	18
2.3. Odak noktası, dış merkez ve sismik deprem dalgalarının yayılışı [26].....	20
2.4. Deprem inmesinin faydan olan uzaklığına bağlı değişimi [27].....	30
2.5. Ayrılan levhalar.....	32
2.6. Çarpışan levhalar.....	32
2.7. Türkiye deprem bölgeleri haritası [1].....	33
2.8. P ve S dalgalarının yayılım mekanizması [26].....	36
2.9. Maksimum hız-depreme olan uzaklık [26].....	37
2.10. Maksimum ivme-depreme olan uzaklık [26].....	38
2.11. Farklı zemin durumları için ivme spektrumunu [26].....	38
5.1. Periyodik yatay kayma gerilmesinin ( $\tau_s$ ) efektif düşey gerilmeye ( $\sigma'_v$ ) oranı ( $\alpha$ ) ile spt arasındaki ilişkiler [31].....	57
5.2. Çevrimsel gerilme oranı (crr) ile düzeltilmiş spt arasındaki ilişki [31].....	59
5.3. Tekrarlı gerilme oranı (csr) ile düzeltilmiş cpt uç direnci arasındaki ilişki [31].....	60
5.4. Kohezyonlu zeminler için çin kriteri [31].....	63
5.5. Orta sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29].....	64
5.6. Sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29].....	64
5.7. Orta sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29].....	65
5.8. Sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29].....	66
7.1. 15.10.2006 Havai depremi[33].....	74
7.2. 15.06.2005 Kaliforniya depremi[33].....	74
7.3. Örnek-1 zemin profili.....	75
7.4. Örnek-1 kuru zemin deprem şiddeti-deformasyon.....	76
7.5. Örnek-1 kuru zemin deprem şiddeti-hız.....	77
7.6. Örnek-1 kuru zemin deprem şiddeti-ivme.....	77
7.7. Örnek-1 kuru ve doymuş zemin deprem şiddeti-deformasyon.....	77
7.8. Örnek-1 kuru ve doymuş zemin deprem şiddeti-hız.....	78

7.9. Örnek-1 kuru ve doygun zemin deprem şiddeti-ivme.....	78
7.10. Örnek-2 zemin profili.....	75
7.11. Örnek-2 deprem şiddeti-deformasyon.....	80
7.12. Örnek-2 deprem şiddeti-hız.....	80
7.13. Örnek-2 deprem şiddeti-ivme.....	80
7.14. Örnek-3 zemin profili.....	81
7.15. Örnek-4 zemin profili.....	82
7.16. Örnek-5 zemin profili.....	83
7.17. Örnek-5 deprem şiddeti-deformasyon.....	84
7.18. Örnek-5 deprem şiddeti-hız.....	84
7.19. Örnek-5 deprem şiddeti-ivme.....	84
7.20. Örnek-6 zemin profili.....	85
7.21. Örnek-6 deprem şiddeti-deformasyon.....	86
7.22. Örnek-6 deprem şiddeti-hız.....	86
7.23. Örnek-6 deprem şiddeti-ivme.....	87
7.24. Örnek-7 zemin profili.....	87
7.25. Örnek-7 deprem şiddeti-deformasyon.....	88

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. 1900 lü yıllardan bu yana depremlerin meydana geliş sıklığı.....	12
2.2. 1990-2005 yılları arasında en çok kayıp yaşanan depremler.....	13
2.3. Kaydedilen en şiddetli depremler .....	22
2.4. Şiddet ve Magnitüd arasındaki dönüşüm[27].....	23
2.5. Mercalli şiddet cetveli .....	24
2.6. 1900 den bu yana Türkiye’ de hasar yapan depremler.....	33
5.1. Sıvılaşma dizinine bağlı sıvılaşma potansiyeli.....	59
7.1. Paket program girdileri [32].....	73
7.2. Örnek-1 modelleme sonuçları-a.....	75
7.3. Örnek-1 modelleme sonuçları-b.....	75
7.4. Örnek-1 modelleme sonuçları-c.....	76
7.5. Örnek-1 modelleme sonuçları-d.....	76
7.6. Örnek-2 modelleme sonuçları-a.....	79
7.7. Örnek-2 modelleme sonuçları-b.....	79
7.8. Örnek-3 modelleme sonuçları.....	81
7.9. Örnek-4 modelleme sonuçları.....	82
7.10. Örnek-5 modelleme sonuçları-a.....	83
7.11. Örnek-5 modelleme sonuçları-b.....	83
7.12. Örnek-6 modelleme sonuçları-a.....	85
7.13. Örnek-6 modelleme sonuçları-b.....	86
7.14. Örnek-7 modelleme sonuçları.....	88

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\emptyset$	: içsel sürtünme açısı
C	: kohezyon
$\gamma$	: birim hacim ağırlığı
$\gamma_{\text{sat}}$	: suya doymun birim hacim ağırlığı
$\gamma_w$	: suyun birim hacim ağırlığı
$\delta$	: deplasman
$\sigma_v$	: düşey gerilme
$K_x$	: x yönündeki permeabilite
$K_y$	: y yönündeki permeabilite
G.W.T	: yer altı su seviyesi
E	: elastisite (Young) modülü
$\sigma_d$	: serbest kuşatan gerilme
$G_{\text{max}}$	: küçük birim deformasyon kesme modülü
w	: iş
P	: birincil deprem dalgası
S	: ikincil deprem dalgası
$\lambda$	: yer değiştirme vektörünün yatayla yaptığı açı
$\delta$	: fay yüzeyinin yatayla yaptığı açı
g	: yer çekimi ivmesi
A	: yer hareketinin genliği
T	: dalganın periyodu
$\Delta$	: ölçüm noktası
f	: $\Delta$ ölçüm noktasının depremin merkez üssüne olan uzaklığı
h	: depremin odak derinliği nedeniyle ortaya çıkan düzeltme
$C_s$	: ölçüm yapılan zemin şartlarının etkisi için düzeltme katsayısı
$C_r$	: kaynaktaki zemin şartlarının etkisi için düzeltme katsayısı
$M_L$	: Richter yerel büyüklüğü
$A_o$	: genliği $1 \times 10^{-3}$ mm olan deprem
$m_b$	: cisim dalgası büyüklüğü
$M_s$	: yüzey dalgası büyüklüğü

- $A_{20}$  : 20 saniye periyotlu Rayleigh yüzey dalgasının genliği
- $M_o$  : sismik moment
- $A$  : yırtılma alanı
- $\mu$  : kayma rijitliği
- $\check{D}$  : faydaki ortalama yer değiştirme
- $M_w$  : moment büyüklüğü
- $E_s$  : sismik enerji
- $G_{sec}$  : histerez döngüsü genel eğimi
- $G_{tan}$  : zemin rijitlik derecesinin yükleme sırasında herhangi bir noktada yaptığı tanjant kayma modülü
- $\tau_c$  : kayma gerilmesi
- $\gamma_c$  : kayma birim deformasyon genliği
- $\tau_{ort}$  : ortalama kayma gerilmesi
- $\tau_{dev}$  : devirsel kayma gerilmesi
- $D_r$  : zeminin rölatif sıkılığı
- $\tau_{max}$  : maksimum kayma deformasyonu
- $a_{max}$  : pik yer ivmesi
- $D_{60}$  : ağırlık olarak malzemenin %60'ının geçtiği çap
- $D_{10}$  : ağırlık olarak malzemenin %10'unun geçtiği çap
- $V_s$  : zemin kesme dalga hızı
- $M_w$  : bölgede beklenen en büyük depremin şiddeti
- $d$  : odak derinliği
- $N_{30}$  : son 30cm için SPT sayısı
- $\sigma'_v$  : efektif düşey gerilme
- $\gamma_n$  : doğal birim hacim ağırlığı
- $U_o$  : boşluk suyu basıncı
- $L_f$  : bölgenin en yakın diri kırığa, faya uzaklığı
- $M_{enb}$  : göz önüne alınan kırık boyunca geçmişte olmuş en büyük depremin şiddeti
- $D$  : deprem büyüklüğüne bağlı sıvılaşma uzaklığı
- $F_a$  : eşik ivme kriterinde emniyet katsayısı
- $a_t$  : sıvılaşmanın gerçekteşebilmesi için gerekli başlangıç (eşik) ivmesi

- $a_{\max}$  : depremin meydana getireceği en büyük yer ivmesi
- $\gamma_t$  : eşik kayma şekil değiştirmesi
- $r_d$  : yerin derinlikle artan sıvılaşmaya karşı direnci
- $z$  : derinlik
- $\tau_s$  : çalışma alanında sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi
- $\tau_o$  : aynı alanda bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesi
- $C_N$  : SPT değeri düzeltme katsayısı
- $\tau_s$  : periyodik yatay kayma gerilmesi
- $\alpha$  : efektif dūřey gerilmeye ( $\sigma'_v$ ) oranı
- $N_1$  : düzeltilmiş SPT değeri
- CSR : normalize edilmiş çevrimsel gerilme oranı
- CRR : normalize edilmiş çevrimsel yük mukavemeti
- $N_m$  : deneyde bulunan SPT darbe sayısı
- $C_E$  : enerji oranı (ER) düzeltme katsayısı
- $C_B$  : kuyu çapı düzeltme katsayısı
- $C_R$  : tij uzunluğu için düzeltme katsayısı
- $C_S$  : gömlekli veya gömleksiz numune alıcılar için düzeltme faktörü
- $(N_1)_{60}$  : normalize edilmiş çevrimsel yük mukavemetinin (CRR) belirlenmesi ve düzeltilmiş SPT değeri
- $F_L$  : sıvılaşma emniyet katsayısı
- Pa : 1 atm basınç
- $q_c$  : koni penetrasyon uç direnci
- $I_L$  : sıvılaşma potansiyeli dizini
- $\Delta z$  : tabaka kalınlığı
- $\sigma_{vo}'$  : başlangıç efektif gerilme değeri
- $\sigma_{dc}$  : devirsel deviatör gerilmesi

## Alt ve üst indisler

v	: düşey
h	: yatay
u	: drenajsız
w	: ıslak
d	: kuru
sat	: doygun
'	: efektif

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı; yıllardır dünyada, ülkemizde ise ancak son zamanlarda üzerinde çalışılmaya başlanan geoteknik deprem mühendisliği içerisinde önemli bir yere sahip olan deprem yükleri altında zemin deformasyonu konusuna genel bir bakış sağlamaktır. Özellikle deprem oluşum mekanizmasını açıklayarak, depremler sonucu oluşan deformasyonlar içerisinde sıkça görülen bir durum olan sıvılaşma olayı hakkında geniş bilgi ve örnek çalışmalar sunmaktır. Ayrıca zemin iyileştirme çalışmalarının depremler sonucu oluşan deformasyonları azaltmaya yönelik faydalarını araştırmaktır.

Zemin dinamiği; zeminlere etkiyen veya etkiyebilecek dinamik yüklerin belirlenerek; etkilerine karşı direnç göstermek amacıyla projelerin tasarımı ile ilgilenen, geoteknik mühendisliği içerisinde özel bir disiplindir. Geoteknik deprem mühendisliği ise son yıllarda kullanılmaya başlanan bir terim olarak geoteknik açıdan deprem mühendisliğine yeni yaklaşımlar getirmeyi amaçlamaktadır.

Zeminlerde deformasyonların meydana gelmesine sebep olan dinamik etkiler şu şekilde sınıflandırılmaktadır;

- Deprem etkisi,
- Kazık vb. yapı elemanlarının zemine çakılması esnasında meydana gelen dinamik etkiler,
- Köprü ayakları ve karayolları alt zeminlerinde araç geçişi esnasında meydana gelen dinamik etkiler,
- Patlatmalar,

Bu dinamik etkilerden zeminlerde en büyük deformasyonlara sebep olan ve en yaygın görüleni deprem etkileridir. Yerkabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsma olayına "DEPREM" denir [1].

Deprem etkisi farklı deprem karakteristiklerinde ve farklı zemin türlerinde farklı deformasyonlara sebep olmaktadır. Deprem kaynaklı deformasyonların ise şu şekilde sıralanabilmesi mümkündür;

- Yüzey yırtılması,
- Bölgesel çökme,
- Yamaç hareketleri,
- Hacimsel sıkışma,
- Sıvılaşma
  - Oturma ve taşıma gücü yenilmeleri,
  - Akma kaymaları,
  - Yanal yayılmalar,
  - Kum volkanları,

Bu deformasyonlara karşı önlem alınabilmesi veya tolere edilebilir değerlere indirilebilmesi için hem dinamik etkinin karakteristiklerinin tam olarak ortaya konulması hem de zemin özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerin dinamik etkiler altındaki deformasyonun en sık görülen durum sıvılaşma olgusudur. Zeminlerde dinamik etkilerin oluşturduğu deformasyonlara karşı direnç sağlayabilmek için sıvılaşma konusu üzerine detaylı incelemeler yapılmış sıvılaşma riski için laboratuvar ve in-sitü deneyleri sonucu tablolar ile çeşitli ampirik formüller verilmiştir.

### **1.1. Konu Üzerine Daha Önce Yapılan Çalışmalar**

Periyodik yükleme altında killi zeminlerin sıvılaşması isimli makalelerinde Gratchev ve arkadaşları çalışmalarını şöyle özetlemişlerdir. Araştırma, yapay kil-kum karışımları ile deprem nedenli yer kaymalarının kayma yüzeylerinden toplanan doğal killi zeminler üzerinde yapılmıştır. Periyodik yüklemede normal konsolide killi zeminlerin drenajsız davranışı için kesme-halkası aparatı ile çalışılmıştır. Yapay kil-kum karışımları için küçük miktarda bentonit varlığı ( $\leq \% 7$ ) hızlı sıvılaşmaya yol açarken bentonit içeriğindeki artışın ( $\geq \% 11$ ) sıvılaşmaya karşı zemin direncinde önemli derecede karşıt etki ürettiği bulunmuştur. Bu göstermektedir ki; bentonit-kum karışımları aynı kil içeriklerinde kaolin ve illit karışımlarına göre sıvılaşmaya karşı daha dirençlidir. Plastik zeminlerin test sonuçları zemin sıvılaşma direnci üzerinde plastisitenin

önemli etkisini açığa çıkarmıştır. Killi zeminlerin mikro yapısı elektron mikroskobu taraması ile incelenmiştir. Analiz göstermiştir ki; zeminlerin sıvılaşma potansiyeli tane düzeni ile güçlü şekilde ilişkilidir. Örnek olarak zeminin sıvılaşmaya hassas olduğu açık mikro yapı, kil agregalarının kum tanecikleriyle genel olarak bir araya geldiği kontak noktalarında periyodik yükleme süresince kolayca yıkılan düşük dirençli kil köprüleri olduğu yapıdır. Diğer yandan, zemin mikro yapısı daha sıkı olduğunda kum taneciklerini sıvılaşmadan koruyan kil üretimi matrix ile sıvılaşmaya karşı daha dirençli gözükmektedir. Doğal zemin durumunda elde edilen sonuçlar periyodik davranışlarının aynı şekilde kil miktarı, kil mineralojisi ve plastisite gibi faktörlerden etkilendiğini göstermiştir. Doğal zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ile mikro yapı arasındaki ilişki oraya konulmuş ve killi zeminlerin sıvılaşma mekanizması belirlenmiştir [2].

Wichtman ve arkadaşları periyodik ve dinamik yükleme geçmişinin kuru kumların dinamik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Periyodik birim deformasyon geçmişi nedenli zemin ilk yapısı periyodik yükleme altındaki ileri deformasyon birikimi ile ilgili olarak boşluk oranı, gerilme durumu ve genlik gibi önemli bir parametredir. Tanecik yapısının ilk hali veya zemin periyodik yüklemesi geçmişinin tahmini için belirleme metotları çok önemlidir. Bu çalışmada kohezyonsuz zeminlerin küçük deformasyon rijitliği ile periyodik yükleme geçmişi arasında ilişki kurulması için çalışma yapılmıştır. Bu amaç için devirsel aksenal yükleme altındaki numunelere periyodik üç eksenli testleri uygulanmış ve periyodik yüklemeye bağlı küçük deformasyon değişimleri çalışılmıştır. Tüm bu çalışmalar, farklı sınır koşullarından bağımsız olarak yalnızca küçük deformasyon rijitliğinde orta dereceli değişiklikler göstermiştir. Sonuç olarak yapı veya deformasyon geçmişi ile küçük deformasyon rijitliği arasında bir ilişki görülmesi mümkün değildir [3].

Elgamal ve arkadaşları devirsel hareketlilik ve sıvılaşma başlangıcı site tepkisinin ölçümlene modeli ismini verdikleri çalışmalarında şu analizleri yapmışlardır. Sismik uyarı altında sıvılaşan orta-sıkı kohezyonsuz zeminler geniş kesme deformasyon titreşimlerinde yüksek seviyede kesme direncine tekrar ulaşabilir. Bu durum “cyclic mobility” devirsel hareketliliğin bir formu olarak

bilinmektedir. Plastisite tabanlı model devirsel hareketlilik davranışın simülasyonu ve kesme gerilmesinin etkisi ile geliştirildi. Model tüm birleştirilmiş sonlu elemanlar kodunun iki fazda (katı-sıvı) birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Model kalibrasyonu laboratuvar testleri ile tanımlanmış ve bu testlerde % 40 sıklıktaki nevada kumları kullanılmıştır. Devirsel hareketlilik ile kalibrasyon enerjisinin dinamik site davranışlarındaki yeni etkileri odaklanmıştır. Model kullanılarak geçmiş sıvılaştırma yer deformasyonlarının sismik uyarıların etkisi için nümerik çözüm üretilmiştir [4].

Naeini ve Baziar ince tane miktarının, karıştırılmış ve tabakalanmış kum numunelerinin kararlı-haline ve direnç artışına etkilerini araştırmışlardır. Bir seri tek düze ve dinamik üç eksenli basınç testleri % 0 dan % 100 e değişen bir ince tane içerikleri ile iki tip test numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Kum-kil karışımı birinci tip ile kum kil katmanı değişen ikinci tip bu numuneler doyurulmuş Ardebil kumu kullanılarak oluşturulmuştur. Numuneler kompaksiyon ve su sedimantasyonu numune hazırlama metodu ile en gevşek halde hazırlanmıştır. Çalışmada her iki seri numunede silt miktarı % 35 e kadar artmaktayken, kararlı hal çizgisinde aşağıya doğru bir hareket ve normalize edilmiş kayma direncinde azalma bulunmuştur. Bununla birlikte karıştırılmış numunelerle aynı silt miktarında tabakalı numunelerin kararlı hal çizgisinde aşağı yönlü hareketin daha büyük olduğu gözlenmiştir [5].

Permeabilitenin sıvılaştırmaya etkisini Yang ve Elgamel kesme deformasyonu sonuçlu sıvılaştırma üzerine permeabilite etkisi isimli makalelerinde ortaya koymuşlardır. Sıvılaştırabilir zemin profili geçirgenliği; deprem uyarısı süresince boşluk basıncı oranı artışı ve sonrasında sönümlenmesini etkilemektedir. Bu nedenle kesme deformasyonuna karşı efektif zemin direnci çoğu pratik durumda geçirgenliğe bağlı olabilmektedir. Mevcut permeabilitedeki uzaysal değişim mevcut kayma direnci üzerinde derin bir etkiye sahiptir. Geçmiş vakalar ve deneysel kanıtlar göstermektedir ki; katmanlı yapıda sıvılaştırabilir birikintilerde uzaysal permeabilite değişimi doğal ve birleşmiş yanal deformasyonlar üzerinde yüksek bir etkiye sahiptir. Aynı durumlarda sıklık nedeni sıvılaştırma başlangıcı su içerisinde veya suya doygun ince ara katmanlar altında uzanan düşük geçirgenlikli katmanlarda sonuçlanabilir. Bu mevcut durumda düşük kayma dayanımlı ara

katmanlar aşırı kesme deformasyonlarına tetikleyici olabilir. Bu çalışmada geçirgenlik etkisini araştırmak ve uzaysal değişim nedenli sıvılaşma sonucu kayma deformasyonlarını incelemek için nümerik modelleme çalışılmıştır. Tepki karakteristikleri birleştirilmiş iki fazlı sonlu elemanlar programı kullanılarak nümeriksel modelleme yapılmıştır [6].

Hwang ve arkadaşları Memphis, USA ve Lonzhou, Çin löslerinin sıvılaşma analizlerini karşılaştırarak şu sonuçları çıkarmışlardır. Çalışmalarında topografi, stratigrafi ve lös oluşumu incelenerek karşılaştırılmıştır. Muhtelif lös numuneleri alınmış ve fiziksel göstergeleri tanımlanmıştır. İlave olarak löslerin mikro yapıları elektron mikroskopunda incelenmiş ve yapay sismik dalgalar kullanılarak dinamik üç eksenli testleri uygulanmıştır. Araştırma sonuçları göstermektedir ki; Memphis ve Lonzhou lösleri sıvılaşma potansiyeline sahiptir, ancak Memphis lösleri daha az duyarlıdır. Bunun yanı sıra, Memphis ve Lonzhou lösleri yer sarsıntıları süresince farklı davranışlar göstermektedir [7].

Lancelot ve arkadaşları ise değişen sınırlı basınçlarda (20~100 kPa) orantılı birim deformasyon yönü üzerinde Houston RF kumunun davranışını incelemiştir. Boşluk oranı artışı veya düşüşü olağan özellikleri test sırasında kırılma sırasında genleşme oranı tesirine bağlı olarak gözlemlenmiştir. Çalışmada kesme boyunca devamlı boşluk basıncı artışına sebep olan genleşme oranı tesire sağlayan sıkı ve gevşek kumlarda gözlemlenen statik sıvılaşma olgusuna özel olarak dikkat edilmiştir. Çalışma sonucunda birim deformasyon yönü testlerinde kararsızlık çizgisinin uç deviatör gerilme çizgisi ile uyuşmamasına rağmen genel olarak  $d^2w = 0$  doğrusuyla (toplam işin sıfır ikincil artışı) uyum gösterdiği bulunmuştur [8].

Farklı tane gradasyonlarında tanecikli zeminlerin drenajsız kesme direnci isimli makalelerinde Kokusha ve arkadaşları bir seri drenajsız testi laboratuvarında farklı farklı rölatif sıklıklarda ve farklı gradasyonlarda hazırlanan kum çakıl içeren tanecikli zemin numunelerine uygulamışlar ve sonuçları yorumlamışlardır. Gradasyonda büyük farklılıklar olmasına rağmen aynı rölatif sıklığa sahip numuneler için % 5 çift genlik eksensel birim deformasyona sahip olan devirsel gerilme olarak tanımlanan sıvılaşma direnci veya drenajsız devirsel kesme direncinde çok küçük farklar gözlemlenmiştir. Ayrıca drenajsız periyodik

yükleme sonrasında büyük deformasyonlarda tanımlanan drenajsız tekdüze kesme mukavemeti aynı rölatif sıklıkta olmasına rağmen iyi derecelendirilmiş zeminlerin kötü derecelendirilmiş zeminlere göre en az sekiz kat büyüktür. Buda göstermektedir ki; sıvılaştan zemin deformasyonu ile yıkıcı göçmeler aynı sıklıkta iyi derecelendirilmiş tanecikli zeminlerde kötü derecelendirilmiş kumlara göre daha az gelişebilmektedir. Bunun yanı sıra ayrışmış granit gibi kırılabilir iyi derecelendirilmiş çakıl taneciklerinin drenajsız tekdüze dayanımları kötü derecelendirilmiş kumlardan dikkat çekici ölçüde daha düşüktür [9].

Bird ve arkadaşları ise sıvılaşma nedenli yapısal hasar değerlendirilmesi için hassaslık fonksiyonu gerekliliği üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında uniform ve farklı yer hareketi için bina tepkisi ana modları tartışılmış ve belirsizliklere dikkat çekilmiştir. Uniform veya farklı yer hareketleri için rijit temeller üzerinde rijit gövde yapı tepkisini içeren ana modlar değerlendirilerek kullanılması için bir hasar ölçeği önerilmiştir. Yer sarsıntısı nedenli yapısal hasar ve sıvılaşma etkileşimi incelenmiştir. Çalışma ile sıvılaşma potansiyeli bölgelerindeki kayıp tahmini için yeni bir bakış açısı sunulmuştur [10].

Okada ve arkadaşları ince silika ve hava tesirine uğramış granitik kumların geniş kesme deformasyonuna tabi tutulduğunda drenajsız kesme davranışını incelemişlerdir. Yer kaymalarında akıcı hareketin ana faktörü olan drenajsız kesme direncini incelemek amacıyla başlangıç boşluk oranının geniş bir aralığında zemin numuneleri üzerine halka kesme ve üç eksenli basınç testleri uygulanmıştır. Genelde halka kesme testlerinde üç eksenli testlerinden küçük kararlı hal drenajsız kesme dencine ulaşılmıştır, bu durum muhtemelen halka kesme testinde oluşan kesme bölgesi içerisinde tanecik ezilmesi ile aşırı boşluk basıncı üretimi sonucudur. Drenajlı halka kesme testleri kullanılarak aşırı boşluk basıncı üretimi tahmini çalışması yapılmıştır. Genellikle yer kaymalarında görülen geniş kesme deformasyonlarında aşırı boşluk basıncı tahmini için bir parametre olarak hacim değişimi katsayısı şeklinde eşdeğer normal gerilme hesaplanmıştır. Kararlı halde, drenajlı testlerden elde edilen eşdeğer normal gerilme ile 1 metre kesme deformasyonu ile drenajsız testlerde oluşan aşırı boşluk basıncı üretimi neredeyse aynıdır [11].

Zhou ve Chen doygun kumların küçük birim deformasyon kesme modülü üzerinde sismik periyodik yükleme geçmişinin etkisi isimli makalelerinde şu konulara değinmişlerdir. Küçük birim deformasyon kesme modülü  $G_{max}$  zeminlerin dinamik davranışı için gerilme durumu ve kesme deformasyon genliği ile birlikte anahtar parametredir. Devirsel yüklemelerde doygun zeminler üzerinde zemin direnci ve drenajsız rijitlik içerisinde bir bozulma, efektif gerilmede düşüş ve zemin iskeletinde yeniden yapılanma olmasına rağmen, sismik tepki analizinde yaygın olarak kullanılan ve zemin yapısındaki değişimi ihmal eden Hardin ve Richart eşitliklerinde  $G_{max}$  için yalnızca efektif stres azaltım katkısı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada deprem süresince küçük deformasyon kesme modülü  $G_{max}$  üzerinde sismik devirsel yükleme geçmişinin etkisini görmek amacıyla normal ve isotropik konsolide doygun kumlar üzerinde sıvılaşma sırasında bender element ile aralıklı olarak kesme dalga hızı ölçümüyle birlikte devirsel üç eksenli testleri uygulanmıştır. Testler sırasında karşılaştırma amacıyla numunelerin  $G_{max}$  değerleri incelenmiştir. Test sonuçları, geçmiş yüksek genlikli sismik periyodik yükleme etkisi altındaki kumlarda  $G_{max}$  değerinin, aynı efektif gerilme değerinde devirsel olmayan yükleme etkisindeki  $G_{max}$  değerinden kısmen küçük olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda gerçekçi yer tepkileri tahmini için sismik tepki analizi içerisinde  $G_{max}$  değerinin belirlenmesi gerekliliği ortaya konulmuştur [12].

Laboratuar testleri temelinde sıvılaşma direnci ile kesme dalga hızı korelasyonu makalelerinde Yunmin ve arkadaşları Hangzou kumları üzerindeki periyodik üç eksenli test sonuçlarına göre sıvılaşma direnci ve elastik kesme modülü arasında bir korelasyon sunmuşlardır. Sabit malzeme ancak serbest kuşatan gerilme  $(\sigma_d/2)^{1/2}$  ile  $G_{max}$  arasındaki lineer ilişkisini göstermektedir. Farklı zeminlerde uygulanması için Tokimatsu tarafından önerilen metod, minimum boşluk oranına uygun olarak kesme modülünün normalizasyonu için kullanılmıştır. Basitleştirilmiş bir eşitlik kesme dalga hızı ile sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için geliştirilmiştir. Sıvılaşmada kritik kesme dalga hızı, derinliğin  $1/4$  üssü ve deprem süresince yatay pik yer yüzey ivmesi ile lineer olarak ilişkilidir. Bu çalışmada önerilen eşitlik geçmiş metodlar ile özellikle Andrus tarafından önerilen prosedür ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kumlara

uygulandığında kullanılabilirliği ve etkinliğini göstermiştir ancak, geçerlilik için yüksek ince içeriğine sahip kumlar üzerinde uygulamaya ihtiyaç vardır [13].

Dawson ve Baise çalışmalarında 1994 Northridge depremi sırasında aynı bölgede 2 farklı sıvılaştırılabilir malzeme miktarının değeri için 3 boyutlu geoistatistik interpolasyon yöntemini kullanmışlardır. San-Fernando vadisindeki bu bölgelerin seçilme sebebi; tabakalaşmaları ve tahmini max. yer ivmeleri (0.84g ve 0.51g) belirlenen bu alanların sıvılaştırma analizlerinin bilinen tekniklerle tam olarak yapılamamasıdır. Deprem sırasında siteler izlenmiş, bölgelerdeki temellerde ve zemine gömülü yapılarda hasarlar oluştuğu görülmüştür. Deprem öncesi ve sonrası yapılan zemin araştırmalarından elde edilen SPT ve CPT sonuçları incelenerek Seed ve Idriss sıvılaştırma potansiyeli analizi yeniden güncelleştirilmiştir [14].

Sato, doymuş zeminlerde dinamik etki ile oluşan büyük deformasyonların nümerik olarak çözümü için yeni bir metot üzerine çalışmıştır. Bu nümerik çözüm sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerinin kullanılması ile Lagrangian metodun güncelleştirilmesidir. Formülasyon Biot iki fazlı karışım teorisi ile türevlenip, Lagrangian metoduyla güncelleştirilmiştir. Ana formülde iki bilinmeyen değişken; boşluk basıncı ve zemin yapısında oluşan deformasyondur. Formülasyonun çözümü için sonlu elemanlar metodu kullanılarak bir program yazılmış ve nümerik analiz yapılarak doymuş zemin profili için sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmış sonuçta metot başarılı bulunmuştur [15].

1995 Kobe depremi sırasında sıvılaştırma olduğu iddia edilen ve iyi dokümantasyonu yapılmış olan 2 bölgenin incelenmesini Ishihara ve Cubrinovski yapmıştır. Vertical Array (VA) ve Packing House (PH) isimli bölgeler alüvyon kil tabakası üzeri 18 metre dolgu tabakalaşması ile zemin yapısı olarak benzeşmektedir. Deprem öncesi bölgelerle ilgili şu veriler bulunmaktadır; VA bölgesinde herhangi bir zemin iyileştirme yöntemi uygulanmamış ve SPT değerleri 5 ile 10 arasındadır, PH bölgesinde dolgu tabakasına yüzeysel sıkıştırma (compaction) metodu ile iyileştirme yapılmış ve SPT olarak 20 ile 30 arası değerler elde edilmiştir. Özet olarak gevşek zemin ile sıkı zemin profillerinin deprem etkisi altındaki deprem etkisi farklı davranışlar gösterip göstermediği incelenmiştir. Deprem sonrası iki bölge içinde zemin etütleri, laboratuvar testleri ve

analizleri yapılmış, şu sonuçlar elde edilmiştir. Gevşek dolgu zemin bölgesinde tamamen sıvılaşma gömülmüş ve yeraltı su seviyesi altında % 4 oranında maksimum kesme deformasyonu görülmüştür. Aynı zamanda 25-30 cm. zemin oturması olduğu hesaplanmıştır. Kompaksiyon uygulanmış arazide ise sadece derinliklerde sıvılaşma olduğu ve ancak % 2 maksimum kesme deformasyonuna ulaşıldığı görülmüştür. Aynı zamanda 8 cm. zemin oturması olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak zemin sıklığının artırılması dolgularda sıvılaşma riskinin azaltılmasında etkili olduğu saptanmış ve yüzeysel derinlikler için deformasyon ve zemin oturmalarını azalttığı görülmüştür [16].

Thevanayagam ve Martin çalışmalarında siltli zeminlerde sıvılaşma olgusunu ve sıvılaşma riskinin azaltılabilmesi için önerilebilecek iyileştirme çalışmalarını incelemişlerdir. Doymun gevşek kumlarda hızlı kesme yüklemesinde geçici olarak mukavemetini yitirir ve boşluk suyu basıncı artar, zeminler sıvı gibi davranmaya başlar. Yapılan araştırmalar sonucu non-plastik siltli zeminlerinde doymun gevşek kumlar gibi davrandığı saptanmıştır. Analizler sonucu dinamik kompaksiyon ve dren ilaveli taş kolonların, ilave su basıncını karşılayarak istenilen sıklığı sağlayarak sıvılaşma riskini azalttığı belirlenmiştir [17].

Granüler malzemeler için anisotropinin sıvılaştırma direnci üzerine etkisini Çapar incelemiş ve periyodik drenajsız üç eksenli testleri ile anisotropi ve sıvılaşma arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Çalışmada numuneler üzerine dikey ve yatay P dalgaları ile kesme S dalgaları kuru ve doymun durumlar için birçok kez uygulanarak dalga hızları arasındaki farklılıklar verilmiştir. Testler sonucu S dalga hızlarının anisotropik durumlarda sıvılaşma direnci için belirleyici olduğu görülmüş ve anisotropi indisleri oluşturularak bu indislere bağlı S dalga hızları ve sıvılaşma direnci ilişkisini gösterir bağıntı ortaya konmuştur [18].

Yang, ve Sato çalışmalarında depremler sırasında gözlenen sıvılaşma olayının dikey ve yatay bileşenleri üzerine çalışma yapmış ve dikey hareketin zemin içinde dönüşümü ile yatay hareketin dönüşümünün farklı olduğu bulmuşlardır. Düşey hareketin etkisinin yatay harekete dönüşümü genellikle küçük olduğu çalışmaları sonucunda ortaya konmuştur. Ayrıca, sıvılaşma riski olan sitelerde düşey hareketin deprem sırasında zemine gelen hareketin yoğunluğundan bağımsız olduğu gözlemlenmiştir [19].

Adalier ve ElgamaI araştırmalarında sıvılaşma riskinin taş kolon tekniği ile azaltılabilirliği belirlemeye çalışmışlardır. Farklı vakalar incelenerek farklı bölgelerde farklı uygulamalar yapılarak sıvılaşmaya karşı taş kolon zemin iyileştirme yönteminin risk düzeyindeki azalma etkisini incelemişlerdir [20].

Basit kesme durumunda periyodik yükleme altındaki zeminde oluşan deformasyonlara matematiksel modellemesi zerine Osinov alışmıştır. Doygun zeminlerde efektif gerilme basıncı ve boşluk suyu basıncı dağılımına periyodik yükleme altında modelleme yapılarak nümerik zm verilmiştir. Modellemenin zm için sonlu farklar yöntemi ile bilgisayar programı yazılmıştır [21].

Texas niversitesinde doktora tezi kapsamında Chang yeni bir yerinde (arazi) dinamik sıvılaşma testi geliştirilmesi üzerine çalışmıştır. Testte zemin tepkisi ve boşluk suyu basıncının ölçülmesi amaçlanmıştır. Test bileşenleri ise bir dinamik yükleme kaynağı ve zemin tepkisi ile boşluk suyu durumunu gösterir zemin içine gömülmüş durum görüntüleme ekranından oluşmaktadır. Burada dinamik yükleme sistemi bir kamyon üzerine yerleştirilen titreşim yaratan ve yayan bir aygıttır. Tez kapsamında çeşitli zemin tabakalaşmalarına sahip arazilerde yerinde testler uygulanmıştır [22].

Dano, Hareb, ve Hicher dinamik etkilere karşı zemin direncinin tespiti için bender element testi üzerine çalışmışlardır. Basıncı dalgaları ve kesme dalgalarının gönderilebilmesi ve alınabilmesi için bender element aygıtı kullanılmış, isotropik ve deviator gerilme yönü boyunca kk deformasyon alanlarında Young's Modülünün ( $E_{max}$ ) ve kesme modülünün ( $G_{max}$ ) eşzamanlı tanımlanması yapılmıştır. Çalışmada Loire River kumu kullanılarak numunelerin isotropik gerilme yönünde  $E_{v,max}$  ve  $G_{vh,max}$  değişim grafikleri çizilmiştir [23].

Yunmin ve arkadaşları Hongzhou kumları üzerinde uyguladıkları periyodik üç eksenli test sonuçları üzerine sıvılaşma direnci ile elastik kesme modülü arasındaki ilişkiyi sunmuşlardır. Çalışma sonunda kesme dalga hızının yerinde ölümü ile kesme dalgası hızına karşı sıvılaşma direncinin laboratuvar ortamında değerlendirilmesinin karşılaştırılması basitleştirilmiş bir prosedürle verilmiştir [24].

Taka ve Berry çalışmalarında kesme dalga hızının zemin sıklılığı ile ilgili olduğu ve bununla bender element testi ile belirlenebileceği üzerine kaolin kili ile

alışmalar yapmışlardır. Bender element test sonuçları hem manüel metot kullanılarak hem de correlation metot kullanılarak grafiklere aktarılmış ve sonuçta her iki metodunda kesme dalga hızı belirlemede yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucu kesme dalga hızı ile zemin sıklığı arasında doğrusal ilişki olduğu bulunmuştur. Fakat alıcıların ancak düşük frekanslarda çalışmaları sebebiyle sonuçların yüksek frekanslar için anlam teşkil etmediği vurgulanmıştır [25].

## 2. DEPREMLER

### 2.1. Deprem Nedir?

Yerkabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsma olayına "DEPREM" denir. Deprem, insanın hareketsiz kabul ettiği ve güvenle ayağını bastığı yerkabuğunun da hareket edebileceğini ve üzerinde bulunan tüm yapılarda hasar oluşturup, can kaybına neden olacak şekilde yıkılabileceğini gösteren bir doğa olayıdır [1].

Ani bir enerji boşalması nedeniyle deprem anında yer sallanır. Yeraltındaki kayalarda bazen o kadar büyük bir gerilme birikir ki, kayalar bu büyük kuvveti artık tutamazlar, kırılırlar ve deprem meydana gelir [26].

Herhangi bir ön uyarı olmadan meydana gelmesi sebebiyle deprem, doğal afetler arasında kendine has farklı bir özelliğe sahiptir. Depremlerin sonucu oluşan büyük ve feci yıkımların önlenmesi amacıyla yüzyıllardır depremlerin önceden tahminine yönelik metotlar geliştirilmeye çalışılmışsa da henüz kesin ve güvenilir bir sonuç elde edilememiştir. Bunun sebebi deprem meydana gelmeden önce bazı ön işaretler görülebilse de, bu işaretlerin kesin bir yargıya varmak için yetersiz oluşudur. Depremin önceden tahmini konusunda literatürde kesin sonuç olan tek deprem 1975 Hai Cheng (Çin) depremidir. Bu deprem öncesi yapılan ön uyarı sonucu birçok insan hayatı kurtarılmıştır. Ancak, daha sonraki yıllarda birçok deprem önceden tahmin edilemeden meydana gelmiştir (Çizelge 2.1).

**Çizelge 2.1.** 1900 lü yıllardan bu yana depremlerin meydana geliş sıklığı

Tanım	Büüklük	Yıllık Ortalama Meydana Geliş Sayısı
Çok Büyük	+ 8	1
Büyük	7-7.9	18
Kuvvetli	6-6.9	120
Orta	5-5.9	800
Hafif	4-4.9	6200
Küçük	3-3.9	49000
Çok Küçük	< 3	90000

Depremın nasıl oluştuğunu, deprem dalgalarının yeryuvarı içinde ne Şekilde yayıldıklarını, ölçü aletleri ve yöntemlerini, kayıtların değerlendirilmesini ve deprem ile ilgili diğer konuları inceleyen bilim dalına "SİSMOLOJİ" denir. "Sismik" kelimesi Yunancadan gelir ve anlamı sallanmadır [1]. Yer hareketini inceleyen Sismoloji Bilimi depremlerin ve etkilerinin kayıtları ile ilgilenmektedir. Diğer bir deyişle sismoloji, depremin yer küresindeki etkisini bütün olarak inceleyerek, uzun dönem etkileri üzerine çalıőmaktadır.

Günümüzde de dünyanın dört bir yanında aletlerin kaydettiği ve insanlar tarafından farkına varılmayan çok sayıda yer hareketi meydana gelmektedir. Ancak dünyanın oluőumundan beri, sismik yönden aktif bulunan bölgelerde depremlerin ardışıklı olarak oluştuğu ve sonucundan da milyonlarca insanın ve barınakların yok olduğu bilinmektedir. 1990–2005 yılları arasında resmi kayıtlara göre en fazla ölümlerin yaőandığı dokuz deprem aşağıdaki çizelgede verilmiştir (izelge 2.2).

**Çizelge 2.2.** 1990–2005 yılları arasında en çok kayıp yaşanan depremler

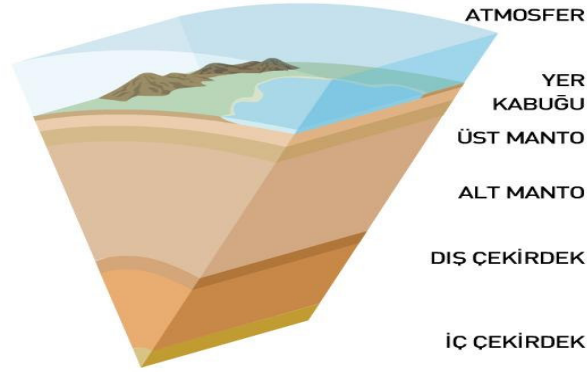
	<b>Tarih</b>	<b>Magnitude</b>	<b>Ölüm</b>	<b>Bölge</b>
1	20.06.1990	7.4	50000	İran
2	29.09.1993	6.2	9748	Hindistan
2	16.01.1995	6.9	5530	Japonya
4	30.05.1998	6.6	4000	Afganistan
5	17.08.1999	7.6	17118	Türkiye
6	26.01.2001	7.7	20023	Hindistan
7	26.12.2003	6.6	31000	İran
8	26.12.2004	9.0	283106	Sumatra
9	08.10.2005	7.6	80361	Pakistan

## **2.2. Depremlerin Oluş Nedenleri**

Depremin meydana gelmesi dünyanın yapısı ile ilgilidir. Dünyamız yaklaşık olarak, 64. km yarıçapında, küresel bir Őekle sahip olup, ortalama yoğunluğu  $5500 \text{ kg/m}^3$  civarında bulunmaktadır. Ancak, merkeze doğru basıncın artması nedeniyle yoğunluk büyümektedir [27]. Depremler yerkabuğunun titreşimi olduğu için, bunların yayılması dünyanın içindeki yapısal durumla yakından ilgilidir. Deprem titreőimlerinin yayılma hız ve doğrultulan incelenmesi

dünyanın içyapısı hakkında bilgi toplanmasına yardımcı olur. Yapılan bu incelemeler, dört ana tabakanın varlığına işaret etmektedir (Şekil 2.1).

**Kabuk Tabakası**, en dışta bulunan ve kayalardan oluşan tabaka olarak belirir. Kalınlığı kıtaların altında üstte granit ve altta bazalt özeliği gösteren iki tabaka halinde ortaya çıkar ve kalınlığı 25 – 60 km arasında bulunur. Bu tabaka derin okyanusların altında bazalt özeliği gösterir ve kalınlığı 4 – 6 km arasında değişir. Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan bu tabakada tektonik olarak faal olan plakalar ve bunların geçiş bölgeleri bulunur. **Manto Tabakası**, kabuk tabakasının altından başlayarak yaklaşık 2900 km derinliğe kadar iner ve kabuk tabakası ile çekirdek arasında sürekliliği sağlar. Yeryüzünü oluşturan kabuk tabakasının kalınlığı ve birleşimi oldukça farklılıklar gösterir. Yoğun silikat kayalarından oluşan bu tabakada basınç-çekme gerilmeleri oluşturan deprem dalgalarının yanında, kayma gerilmeleri oluşturan deprem dalgalarının yayılması, bu tabakanın katı ve olduğuna işaret etmektedir. Buna rağmen, mevcut yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle, jeolojik zaman içinde bu tabakanın da hareket ettiği tahmin edilmektedir. Deprem dalgalarının yayılışı, bu tabakanın üst kısmının rölatif olarak daha sert ve altının ise, yumuşak olduğunu göstermiştir. **Çekirdek** yaklaşık 3500 km yarıçapında olup, en azından dış tabakalarının sıvı olması nedeniyle, kayma gerilmeleri oluşumu ile ilerleyen dalgalar yayılamaz. **Dış Çekirdek** tabakasının sıvı olduğu ve esas olarak demir, oksijen ve silisten ibaret olduğu da deprem dalgalarının yayılışının incelenmesinden elde edilmiştir. Basınç-çekme gerilmeleri oluşumu ile yayılan deprem dalgalarının bir kısmının bu tabakayı geçebilmesi ve bir kısmının tabaka dış sınırından yansması yanında, kayma gerilmeleri oluşumu ile yayılan deprem dalgalarının bu tabakaya giremeyip yansımak zorunda kalması, bu tabakanın sıvı olduğuna işaret etmektedir. Yeryüzünün bir yerinde olan bir depremin çok uzaktaki kayıtlarının incelenmesi, merkezde katı olan bir **İç Çekirdek** tabakasının bulunması gerektiğini göstermiştir. Yüksek basınç nedeniyle katı olarak bulunan bu kürenin yan çapının 1220km civarında olduğu tahmin edilmektedir [27].



**Şekil 2.1.** Kabuk tabakası manto tabakası, dış çekirdek ve iç çekirdek.

Tabakaların yoğunluğu merkeze gittikçe artar. Dış kabukta  $2700 - 3000 \text{ kg/m}^3$  ve manto tabakasında  $3300 - 5600 \text{ kg/m}^3$  arasında değişen bu değer, çekirdek kısmında  $9700 \text{ kg/m}^3$  den başlayarak,  $17200 \text{ kg/m}^3$  gibi büyük değerlere erişir. Sıcaklık da dış kabukta  $30^\circ\text{C/km}$  hızla artarak bu tabakanın alt yüzünde olan okyanus altında  $150^\circ - 250^\circ \text{ C}$  ve kıtalar altında  $300^\circ - 800^\circ \text{ C}$  ye erişir. Manto tabakasında, depremlerin olduğu en büyük derinlik olarak kabul edilen  $700 \text{ km}$  de sıcaklık  $1000^\circ - 1500^\circ\text{C}$  civarındadır. Manto tabakasının iç yüzünde ise  $4000^\circ - 5000^\circ\text{C}$  ortalama bir değer olarak kabul edilebilir. Basınç da derinlikle artar ve manto tabakasının dış yüzünde  $900 \text{ MPa}$  değerine, çekirdek kısmında ise dış yüzde  $140 \times 10^3 \text{ MPa}$  değerinden başlayarak, merkezi kısımda  $3.7 \times 10^6 \text{ MPa}$  gibi çok yüksek bir değere ulaşır [27].

### 2.3. Depremlerin Oluşum Mekanizması

Depremlerin çok büyük bir bölümü, yer kabuğunda soğuma veya çeşitli etkilerden meydana gelen şekil değiştirme enerjisinin ani olarak açığa çıkmasından meydana gelir. Böyle bir olay sırasında yer kabuğunu oluşturan plakalar kendisini sınırlayan çizgiler olan faylar boyunca ani olarak kayar. Bu tür tektonik depremde ortaya çıkan yer değiştirme dalgaları sönümlenerek uzaklara yayılır. Deprem yer ve şiddetine göre yer kabuğunda yeni fayları da oluşturabilir. Deprem hareketinin bu tür açıklanması Elastik Geri Sekme Teorisi olarak isimlendirilir [27].

Yerkabuğunu oluşturan levhaların birbirine sürtündükleri, birbirlerini sıkıştırdıkları, birbirlerinin üstüne çıktıkları ya da altına girdikleri bu levhaların sınırları dünyada depremlerin oldukları yerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyada olan depremlerin hemen büyük çoğunluğu bu levhaların birbirlerini zorladıkları levha sınırlarında dar kuşaklar üzerinde oluşmaktadır. Birbirlerini iten ya da diğerinin altına giren iki levha arasında, harekete engel olan bir sürtünme kuvveti vardır. Bir levhanın hareket edebilmesi için bu sürtünme kuvvetinin giderilmesi gerekir. İtilmekte olan bir levha ile bir diğer levha arasında sürtünme kuvveti aşıldığı zaman bir hareket oluşur. Bu hareket çok kısa bir zaman biriminde gerçekleşir ve şok niteliğindedir. Sonunda çok uzaklara kadar yayılabilen deprem (sarsıntı) dalgaları ortaya çıkar. Bu dalgalar geçtiği ortamları sarsarak ve depremin oluş yönünden uzaklaştıkça enerjisi azalarak yayılır. Bu sırada yeryüzünde, bazen gözle görülebilen, kilometrelerce uzanabilen ve **FAY** adı verilen arazi kırıkları oluşabilir. Bu kırıklar bazen yeryüzünde gözlenemez, yüzey tabakaları ile gizlenmiş olabilir. Bazen de eski bir depremden oluşmuş ve yeryüzüne kadar çıkmış, ancak zamanla örtülmüş bir fay yeniden oynayabilir [1].

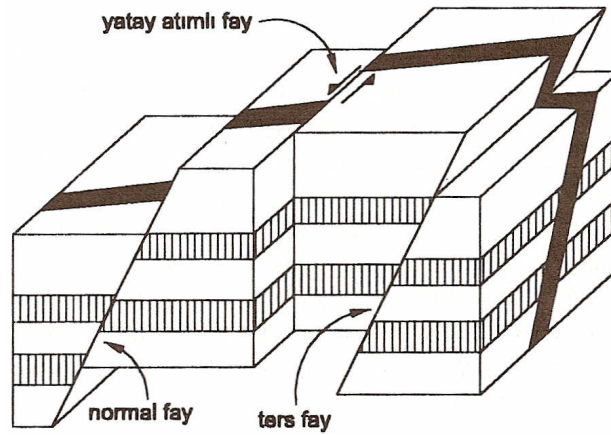
Depremlerinin oluşumunun bu şekilde ve "Elastik Geri Sekme Kuramı" adı altında anlatımı 1911 yılında Amerikalı Reid tarafından yapılmıştır ve laboratuvarlarda da denenerek ispatlanmıştır. Bu kurama göre, herhangi bir noktada, zamana bağımlı olarak, yavaş yavaş oluşan birim deformasyon birikiminin elastik olarak depoladığı enerji, kritik bir değere eriştiğinde, fay düzlemi boyunca var olan sürtünme kuvvetini yenerek, fay çizgisinin her iki tarafındaki kayaç bloklarının birbirine göreli hareketlerini oluşturmaktadır. Bu olay ani yer değiştirme hareketidir. Bu ani yer değiştirmeler ise bir noktada biriken birim deformasyon enerjisinin açığa çıkması, boşalması, diğer bir deyişle mekanik enerjiye dönüşmesi ile ve sonuç olarak yer katmanlarının kırılma ve yırtılma hareketi ile olmaktadır. Aslında kayaların, önceden bir birim yer değiştirme birikimine uğramadan kırılmaları olanaksızdır. Bu birim yer değiştirme hareketlerini, hareketsiz görülen yerkabuğunda, üst mantoda oluşan konveksiyon akımları oluşturmakta, kayalar belirli bir deformasyona kadar dayanıklılık gösterebilmekte ve sonrada kırılmaktadır. İşte bu kırılmalar sonucu depremler oluşmaktadır. Bu olaydan sonra da kayalardan uzak zamandan beri birikmiş olan

gerilmelerin ve enerjinin bir kısmı ya da tamamı giderilmiş olmaktadır [1].

Bazı depremler, volkanik hareketlere, yeraltı mağaraların çökmesine ve hatta yeraltına basılarak uzaklaştırılan kullanılmış suların ortaya çıkardığı gerilmelere bağlı olarak da oluşabilmektedir. Ancak tektonik olmayan bu depremlerin sayısı ve şiddetleri azdır. Plaka tektoniği olarak bilinen bilim dalı, yer kabuğunun bir kaç parçadan oluştuğunu, bu plakaların birbirlerine göre hareket ettiklerini kabul etmekte ve birçok tektonik olayı bu esasa göre açıklamaktadır. Bu plaka parçaları sınırlarda birbirlerine göre kaymakta veya biri diğerinin üzerine çıkabilmektedir. Bu hareketlerin ve yer kabuğu altında sıvı halde bulunan magmanın basıncında soğuma veya benzeri nedenlerle meydana gelen basınç değişimlerinin, yer kabuğunda gerilmeler oluşturacağı açıktır. Öte yandan kabuğun birçok yerde faylarla kesilmiş olduğu da bilinmektedir. Yer kabuğunda artan gerilmeler zayıf olan bu çizgiler üzerinde veya belirli zayıf bölgelerde yer kabuğunun taşıma gücünü aşarak ani bir kayma (yırtılma) olmasına neden olur. Bu durumda harekete karşı koyan sürtünme kuvveti yenilmiş olur. Kayma hareketi depremin odak bölgesinde başlayarak fay boyunca dışarı doğru yayılır. Böylece uzun zamanda toplanan şekil değiştirme enerjisi yırtılma ile deprem hareketi ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkarak boşalır ve yer kabuğunun taşıyabileceği seviyeye iner. Sözü edilen boşalma yer kabuğunda gevşeme meydana getirir. Bu tür bölgelerde gevşeme, yani depremlerin meydana gelme zaman aralığı açıldıkça, kabukta zamanla toplanan enerji de artar. Bu ise meydana gelecek yer hareketinin daha şiddetli sonucunu doğurur. Yer kabuğunda meydana gelen kaymanın bir dalga hareketi olarak yayılması sonucu oluşan yüzey titreşimleri deprem olarak algılanır [27].

Faydaki hareket Şekil 2.2. de gösterildiği gibi, iki blok arasındaki kayma olarak görülebilir. Hareketin meydana geldiği düzlem kuzey-güney doğrultusundaki düşey düzlemle yatay düzlemle yaptığı iki açı ile tanımlanabilir. Hareketi oluşturan yer değiştirmenin yönünü gösteren vektör de bu düzlem içinde herhangi bir doğrultuda bulunabilir. Bu vektörün düzlem içindeki yönü ve büyüklüğü genellikle değişken olarak ortaya çıkar. Eğer, yer değiştirme vektörü yatay ise ( $\lambda = 0^\circ, 180^\circ$ ), fay yüzleri arasında yatay kayma hareketi ortaya çıkar ve bu tür fay **Yatay Atımlı Fay** olarak adlandırılır. Bunun yanında fay yüzeyi

düseyse ( $\delta = 90^\circ$ ), bu durum düsey düzlemde yatay kayma hareketine karşı gelir ve **Düsey Düzlemde Yatay Atımlı Fay** söz konusu olur. Eğer fay yüzünün bir tarafından diğer tarafına bakıldığında, bulunulan yüz sağa ( $\lambda = 0^\circ$ ) ve karşı yüz sola doğru hareket ediyorsa, **Sol Atımlı Fay** ve fay yüzünün bir tarafından diğer tarafına bakıldığında, bulunulan yüz sola ( $\lambda = 180^\circ$ ) ve karşı yüz sağa doğru hareket ediyorsa, **Sağ Atımlı Fay** olarak isimlendirilir. Bunun yanında rölatif hareketin düsey olması durumunda **Düsey Atımlı Fay** ortaya çıkar. Karşı fay yüzünün yukarı doğru hareket etmesi durumu ( $\lambda = 270^\circ$ ) **Normal Düsey Atımlı Fay** olarak ve aşağı doğru hareket etmesi durumu ise ( $\lambda = 90^\circ$ ), **Ters Düsey Atımlı Fay** olarak bilinir. Ancak, fay düzlemi yer değıştirme vektörü genellikle değışik açılarla bulunur. Bu durumda bu sıfatlar birleştirilerek uygun isimlendirme yapılır [27].



Şekil 2.2. Fay türleri [27]

Fay çizgileri, yer kabuğunda iki plaka arasındaki süreksizliğin belirlediği dar bir şerit olarak ortaya çıkar. Bazı depremlerde yeni fay çizgilerinin meydana geldiğinden söz edilirse de, bunlar uzun zamandır aktif olmayan fayların tekrar faaliyete geçmesi şeklinde de görülebilir. Bazı faylar yüzeye çok yakın oldukları ve kolayca belirlenebildikleri halde, bazıları da, yeraltı tabakalarında olduğundan yeryüzünden kolayca fark edilmeyebilir. Bunların varlığı, ancak yeryüzündeki yer değıştirilmelerin ölçülmesi sonucu belirlenebilir [1].

Depremın büyüklüğüne etki eden en önemli faktörlerden biride fayda oluşan yırtılmanın veya kaymanın yüzey üzerinde etki ettiğı alanın büyüklüğüdür.

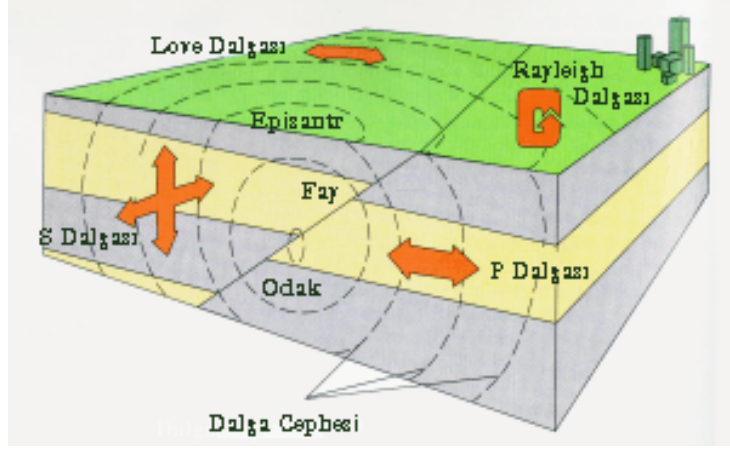
Kaymanın veya yırtılmanın etki ettiği alan fay alanı büyüdükçe, deprem daha geniş bir alanda hissedilir. Örnek olarak; kayan fay boyu 1 km den 100 km ye çıkarsa, deprem büyüklüğü de yaklaşık olarak iki katına çıkmaktadır.

#### 2.4. Deprem Türleri

Depremler oluş nedenlerine göre değişik türlerde olabilir. Dünyada olan depremlerin büyük bir bölümü yukarıda anlatılan biçimde oluşmakla birlikte az miktarda da olsa başka doğal nedenlerle de olan deprem türleri bulunmaktadır. Yukarıda anlatılan levhaların hareketi sonucu olan depremler genellikle "**TEKTONİK**" depremler olarak nitelenir ve bu depremler çoğunlukla levhalar sınırlarında oluşurlar. Yeryüzünde olan depremlerin %90'ı bu gruba girer. Türkiye'de olan depremler de büyük çoğunlukla tektonik depremlerdir. İkinci tip depremler "**VOLKANİK**" depremlerdir. Bunlar volkanların püskürmesi sonucu oluşurlar. Yerin derinliklerinde ergimiş maddenin yeryüzüne çıkışı sırasındaki fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda oluşan gazların yapmış oldukları patlamalarla bu tür depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Bunlar da yanardağlarla ilgili olduklarından yereldirler ve önemli zarara neden olmazlar. Japonya ve İtalya'da oluşan depremlerin bir kısmı bu gruba girmektedir. Türkiye'de aktif yanardağ olmadığı için bu tip depremler olmamaktadır. Bir diğer tip depremler de "**ÇÖKÜNTÜ**" depremlerdir. Bunlar yeraltındaki boşlukların (mağara), kömür ocaklarında galerilerin, tuz ve jipsli arazilerde erime sonucu oluşan boşlukları tavan bloğunun çökmesi ile oluşurlar. Hissedilme alanları yerel olup enerjileri azdır fazla zarar getirmezler. Büyük heyelanlar ve gökten düşen meteorların da küçük sarsıntılara neden olduğu bilinmektedir. Odağı deniz dibinde olan derin deniz depremlerinden sonra, denizlerde kıyılara kadar oluşan ve bazen kıyılarda büyük hasarlara neden olan dalgalar oluşur. Bazen büyük bir deprem olmadan önce küçük sarsıntılar olur. Bu küçük sarsıntılara "**ÖNCÜ DEPREMLER**" denilmektedir. Büyük bir depremin oluşundan sonra da belki birkaç yüz adet küçük deprem olmaya devam etmektedir. Bu küçük depremler "**ARTÇI DEPREMLER**" olarak isimlendirilir ve büyük depremin oluş anına göre bunların şiddetinde ve sayısında azalım görülür [1].

## 2.5. Deprem Parametreleri

Depremlerin tanımlanabilmesi için literatürde deprem parametreleri olarak adlandırılan bazı kavramlar verilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Odak noktası, dış merkez ve sismik deprem dalgalarının yayılışı [26]

### 2.5.1. Odak Noktası (Hiposantr)

Odak noktası yerin içinde depremin enerjisinin ortaya çıktığı noktadır. Bu noktaya odak noktası veya iç merkez de denir. Yırtılma bölgesi yeryüzüne yakın olabildiği gibi derinlerde de bulunabilir. Deprem hareketinin başladığı bu bölge, Deprem Odağı (Hiposantr) olarak adlandırılır. Gerçekte, enerjinin ortaya çıktığı bir nokta olmayıp bir alandır, fakat uygulamalarda nokta olarak kabul edilmektedir [1].

### 2.5.2. Dış Merkez (Episantr)

Odak noktasına en yakın olan yer üzerindeki noktadır. Burası aynı zamanda depremin en çok hasar yaptığı veya en kuvvetli sallanarak hissedildiği noktadır. Aslında bu, bir noktadan çok bir alandır. Deprem dış merkez alanı depremin şiddetine bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde olabilir. Bazen büyük bir depremin odak noktasının boyutları yüzlerce kilometreyle de belirlenebilir. Bu

nedenle "Episantr Bölgesi" ya da "Episantr Alanı" olarak tanımlama yapılması gerçeğe daha yakın bir tanımlama olacaktır [1].

Merkez üstü, depremin en kuvvetli hissedildiği bölgedir. Bu bölgede önemli derecede düşey titreşimler hissedilirse de, bunlar hızlı bir şekilde söner ve yatay titreşimler daha önemli ve belirgin hale gelir. Meydana gelen titreşim dalgaları; zemindeki yansıma kırılmalar yanında, özellikle odak noktasındaki plastik şekil değiştirmeler nedeniyle sönümlenerek yayılır. Merkez üstünden uzaklaştıkça kısa periyotlu titreşimler, uzun periyotlulara göre daha çabuk sönümlenir [27].

### **2.5.3. Odak Derinliği**

Depremde enerjinin açığa çıktığı noktanın yeryüzünden en kısa uzaklığı, depremin odak derinliği olarak adlandırılır. Odak derinliği de depremin oluşturacağı hasar konusunda önemli bir büyüklüktür. Depremler odak derinliklerine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma tektonik depremler için geçerlidir. Yerin 0–60 km. derinliğinde olan depremler sığ deprem olarak nitelenir. Yerin 70–300 km. derinliklerinde olan depremler orta derinlikte olan depremlerdir. Derin depremler ise yerin 300 km.den fazla derinliğinde olan depremlerdir. Türkiye'de olan depremler genellikle sığ depremlerdir ve derinlikleri 0–60 km. arasındadır. Orta ve derin depremler daha çok bir levhanın bir diğer levhanın altına girdiği bölgelerde olur. Derin depremler çok geniş alanlarda hissedilir, buna karşılık yaptıkları hasar azdır. Sığ depremler ise dar bir alanda hissedilirken bu alan içinde çok büyük hasar yapabilirler. [1] İstatistiklere göre depremlerin oluşum sıklığı derinlikle azalmaktadır. Derin depremler yüzeyde daha az hasar verirken, yıkıcı depremler ise, genelde sığ depremlerdir.

### **2.5.4. Eşşiddet (İzoseit) Eğrileri**

Aynı şiddetle sarsılan noktaları birbirine bağlayan noktalara denir. Bunun tamamlanmasıyla eşşiddet haritası ortaya çıkar. Genelde kabul edilmiş duruma göre, eğrilerin oluşturduğu yani iki eğri arasında kalan alan, depremlerden

etkilenme yönüyle, şiddet bakımından sınırlandırılmış olur. Bu nedenle depremin şiddeti eşşiddet eğrileri üzerine değil, alan içerisine yazılır [1].

### 2.5.5. Şiddet

Herhangi bir derinlikte olan depremin, yeryüzünde hissedildiği bir noktadaki etkisinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle depremin şiddeti, onun yapılar, doğa ve insanlar üzerindeki etkilerinin bir ölçüsüdür. Bu etki, depremin büyüklüğü, odak derinliği, uzaklığı yapıların depreme karşı gösterdiği dayanıklılık dahi değişik olabilmektedir. Şiddet depremin kaynağındaki büyüklüğü hakkında doğru bilgi vermemekle beraber, deprem dolayısıyla oluşan hasarı yukarıda belirtilen etkenlere bağlı olarak yansıtır [1].

Şiddet ölçüsü yapıların hasar ve yıkılma düzeyini esas aldığından depremin mutlak bir ölçüsü olarak alınamaz. Aynı deprem sağlam yapılar olan bir bölgede daha az şiddetli veya zayıf yapıların bulunduğu başka bir bölgede daha şiddetli olabilir [27]. Şiddeti tanımlarken binalardaki hasar ile birlikte zemin ivmesinin büyüklüğü de göz önüne alınmalıdır (Çizelge 2.3).

**Çizelge 2.3.** Kaydedilen en şiddetli depremler

No	Şiddet	Tarih	Bölge
1	9.5	22.05.1960	Çin
2	9.2	28.03.1964	Alaska
3	9.1	26.12.2004	Sumatra
4	9.0	04.11.1952	Kamchatka
5	8.8	31.01.1906	Ekvator
6	8.7	04.02.1965	Alaska
7	8.6	28.03.2005	Sumatra
8	8.6	09.03.1957	Alaska
9	8.6	15.08.1950	Tibet

Depremin şiddeti, depremlerin gözlenen etkileri sonucunda ve uzun yılların vermiş olduğu deneyimlere dayanılarak hazırlanmış olan "Şiddet Cetvelleri"ne göre değerlendirilmektedir. Diğer bir deyişle "Deprem Şiddet Cetvelleri" depremin etkisinde kalan canlı ve cansız her şeyin depreme gösterdiği

tepkiyi değerlendirmektedir. Önceden hazırlanmış olan bu cetveller, her şiddet derecesindeki depremlerin insanlar, yapılar ve arazi üzerinde meydana getireceği etkileri belirlemektedir [1].

### **2.5.6. Magnitüd**

Deprem sırasında açığa çıkan enerjinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Enerjinin doğrudan doğruya ölçülmesi olanağı olmadığından, Amerika Birleşik Devletleri'nden Prof.C. Richter tarafından 1930 yıllarında bulunan bir yöntemle depremlerin aletsel bir ölçüsü olan "Magnitüd" tanımlanmıştır. Prof. Richter, episantrdan 100 km. uzaklıkta ve sert zemine yerleştirilmiş özel bir sismografla (2800 büyütme, özel periyodu 0,8 saniye ve %80 sönümü olan bir Wood-Anderson torsiyon Sismografı ile) kaydedilmiş zemin hareketinin mikron cinsinden (1 mikron 1/1000 mm) ölçülen maksimum genliğinin 10 tabanına göre logaritmasını bir depremin "magnitüdü" olarak tanımlamıştır. Bugüne dek olan depremler istatistik olarak incelendiğinde kaydedilen en büyük magnitüd değerinin 8.9 olduğu görülmektedir (31 Ocak 1906 Colombiya-Ekvator ve 2 Mart 1933 Sanriku-Japonya depremleri) [27].

Magnitüd, aletsel ve gözlemsel magnitüd değerleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Aletsel magnitüd, yukarıda da belirtildiği üzere, standart bir sismografla kaydedilen deprem hareketinin maksimum genlik ve periyot değeri ve alet kalibrasyon fonksiyonlarının kullanılması ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmektedir. Aletsel magnitüd değeri, gerek hacim dalgaları ve gerekse yüzey dalgalarından hesaplanılmaktadır.

Genel olarak, hacim dalgalarından hesaplanan magnitüdü ( $m$ ), ile yüzey dalgalarından hesaplanan magnitüdü ( $M$ ) ile gösterilmektedir. Her iki magnitüd değerini birbirine dönüştürecek bazı bağıntılar mevcuttur. Gözlemsel magnitüd değeri ise, gözlemsel inceleme sonucu elde edilen episantr şiddetinden hesaplanmaktadır. Ancak, bu tür hesaplamalarda, magnitüd-şiddet bağıntısının incelenilen bölgeden bölgeye değiştirdi de göz önünde tutulmalıdır. Gözlemleri tarafından bildirilen bu depremin magnitüdü depremin enerjisi hakkında fikir vermez. Çünkü deprem sığ veya derin odaklı olabilir. Magnitüdü aynı olan iki

depremden sığ olanı daha çok hasar yaparken, derin olanı daha az hasar yapacağından arada bir fark olacaktır. Yine de Richter ölçeği (magnitüd) depremlerin özelliklerini saptamada çok önemli bir unsur olmaktadır. Depremlerin şiddet ve magnitüdüleri arasında birtakım ampirik bağıntılar çıkarılmıştır. Bu bağıntılardan şiddet ve magnitüd değerleri arasındaki dönüşümleri aşağıda Çizelge 2.4 de verilmiştir [27].

**Çizelge 2.4.** Şiddet ve Magnitüd arasındaki dönüşüm [27]

Şiddet	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Richter Magnitüdü	4	4.5	5.1	5.6	6.2	6.6	7.3	7.8	8.4

Eğer bir deprem hareketini meydana getiren fayın yırtılmaya maruz bölgesinde basit tek bir kayma hareketi meydana geldiği kabul edilirse, bu hareketin odaktan yeteri kadar uzak bir bölgede bir yer değiştirme, hız ve ivme etkisi ortaya çıkaracağı söylenebilir. Yer değiştirme, hız ve ivme değişimi çok karmaşıktır. Araştırmalar, deprem hareketinin birbirini izleyen bir kayma veya yırtılma hareketiyle meydana geldiğini göstermektedir. Her bir küçük kayma boyunun fayın değişik yerlerinde meydana gelmesiyle, deprem hareketinin oluştuğu ve çeşitli tabakalardan kırılma ve yansımalarla bu hareketin daha da karmaşıklaştığı kabul edilebilir. Genel olarak, deprem hareketinin düşey bileşenlerinin diğer bileşenlere göre yüksek frekansa sahip olduğu söylenebilir. Buna karşılık düşey deprem ivmesi, yatay ivmeden küçüktür. Bu fark depremden depreme değişmekle beraber aralarındaki oran  $1/2 \sim 1/3$  kabul edilebilir [27].

## 2.6. Deprem Şiddet Ve Büyüklük Ölçüleri

Deprem şiddet ve büyüklüklerinin belirlenmesi için ampirik formüllere dayanan farklı tanımlamalar verilmiştir. Literatürde verilen bu büyüklük ve şiddet ölçüleri genel olarak kaynağını yerel zemin koşulları ve meydana gelmiş depremler sonucunda ortaya çıkmıştır.

### 2.6.1. Mercalli Şiddet Ölçüsü (Lo)

Bir deprem oluştuğunda, bu depremin herhangi bir noktadaki şiddetini belirlemek için, o bölgede meydana gelen etkiler gözlenir. Bu izlenimler Şiddet Cetveli'nde hangi şiddet derecesi tanımına uygunsa, depremin şiddeti, o şiddet derecesi olarak değerlendirilir. Örneğin; depremin neden olduğu etkiler, şiddet cetvelinde VIII şiddet olarak tanımlanan bulguları içeriyorsa, o deprem VIII şiddetinde bir deprem olarak tariflenir. Deprem Şiddet Cetvellerinde, şiddetler romen rakamıyla gösterilmektedir. Bugün kullanılan batılıca şiddet cetvelleri değiştirilmiş "Mercalli Cetveli (MM)" ve "Medvedev-Sponheur-Karnik (MSK)" şiddet cetvelidir. Her iki cetvelde de XII şiddet derecesini kapsamaktadır. Bu cetvellere göre, şiddeti V ve daha küçük olan depremler genellikle yapılarda hasar meydana getirmezler ve insanların depremi hissetme şekillerine göre değerlendirilirler. VI-XII arasındaki şiddetler ise, depremlerin yapılarda meydana getirdiği hasar ve arazide oluşturduğu kırılma, yarıлма, heyelan gibi bulgulara dayanılarak değerlendirilmektedir [1].

Mercalli Şiddet Cetveli, değiştirilmiş biçimi ile tablo olarak verilmiştir. Bu tablodan görüleceği gibi en düşük şiddet I, duyarlı aletlerle kaydedilen depremi; en büyüğü XII, tam yıkıma karşı gelen depremi göstermektedir. Bu şiddet ölçüsü yapıların hasar ve yıkılma düzeyini esas aldığından, depremin mutlak bir ölçüsü olarak alınamaz. Meydana gelen hasar, yapıların dayanım düzeyi ile çok yakından ilişkili olduğu için; aynı bir deprem, sağlam yapılardan oluşan bir yörede daha az şiddetli, dayanım düzeyi düşük yapılardan oluşan yörede ise daha şiddetli görülebilir [27]. Ancak, yapılar için dayanımın çok fazla değişmediği kabul edilerek değerlendirme kolaylığı bakımından, özellikle ölçü aletlerinin gelişmediği dönemde yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Çizelge 2.5).

Mercalli Şiddet Cetveli, depremin büyüklük tanımı iki basit kabule dayanır. Bunlardan birincisi büyük depremin büyük genlikli dalgalar üreteceği ve ikincisi de depremin genliğinin uzaklıkla azalmasının bilinen kurallara göre olmasıdır. Buna göre bir depremin büyüklüğü;

$$M = \log (A/T) + f (\Delta,h) + C_s + C_r \quad (2-1)$$

olarak tanımlanır. Burada A yer hareketinin genliğini, T gelen dalganın periyodunu ve f fonksiyonu da  $\Delta$  ölçüm noktasının depremin merkez üssüne olan uzaklığını ve h depremin odak derinliği nedeniyle ortaya çıkan düzeltmeyi göstermektedir. Diğer  $C_s$  ve  $C_r$  sabitleri sıra ile ölçüm yapılan ve kaynaktaki zemin şartlarının etkisi için gerekli düzeltme terimleridir. Deprem dalgalarının genlikleri çok farklı değerlerde bulunduğu için logaritmik ölçek kullanılmıştır. Buna göre büyüklükte bir birim büyüme genlikte 10 kat büyümeye karşı gelmektedir. Ayrıca, dar bir aralıkta ortaya çıkan yüksek frekanslı titreşimlerin ağır hasarlara sebep olduğu bilindiği için, depremin büyüklüğü dalga hareketinin periyodu ile ters orantılı olarak ilişkilendirilmiştir [27].

**Çizelge 2.5.** Mercalli Şiddet Cetveli [27]

Şiddeti	Tanım	Zemin ivmesi (cm/s <sup>2</sup> )	g (yerçekimi ivmesi)
I	Sadece duyarlı aletler algılar.	~ 1	0.001 g
II	Üst katlarda, dinlenen kişiler hissedebilir, asılı cisimler sallanabilir.	2~3	0.002~0.003g
III	Binada hissedilir, duran bir aracın yanından kamyon geçmiş gibi sallanır.	3~7	0.003~0.007g
IV	Binada çoğunluk ve dışarıda az kişi hisseder, kap kacak sallanır.	7~15	0.007~0.015g
V	Herkes hisseder, tabak, pencere v.b. kırılır.	15~30	0.015~0.03g
VI	Herkes hisseder, birçoğu korkup dışarı fırlar, baca, sıva düşer, hafif hasar olur.	30~70	0.03~0.07g
VII	Herkes dışarı kaçar, yapı sağlamlığına göre hasar olur, otomobildekilerde hisseder.	70~150	0.07~0.15 g
VIII	Duvarlar çerçevelerden ayrılır, baca, duvar devrilebilir. Kum, çamur fışkırır.	150~300	0.15~0.3 g
IX	Yapı temelden ayrılır, çatlar, eğilir. Zemin ve yeraltı boruları çatlar.	300~700	0.3~0.7 g
X	Kargir ve çerçeve yapıların çoğu tahrip olur, zemin çatlar, raylar eğilir, toprak kaymaları olur.	700~1500	0.7~1.5 g
XI	Yeni tip yapılar ayakta kalabilir, köprüler yıkılır, toprak kayar, raylar bükülür.	1500~3000	1.5~3 g
XII	Hemen her şey harap olur, toprak yüzeyinde dalgalanma görülür, cisimler havaya fırlar.	3000~7000	3~7 g

## 2.6.2. Richter Yerel Büyüklüğü ( $M_L$ )

C. Richter tarafından 1930 lu yıllarda geliştirilmiştir. Ölçümlerde basit Wood-Anderson burulma sismometresi kullanılmıştır. Wood-Anderson sismografinin kullanımının günümüzde tercih edilmediği için, Richter Büyüklüğü orijinal kavramı ile kullanılmaktadır. Ancak, ilk kullanılan büyüklük ölçüsü olması sebebiyle daha sonraki yıllarda geliştirilen ölçüler bu kavram ile ilişkilendirilmiştir. Bir referans depremine göre göz önüne alınan bir depremin büyüklüğü;

$$M_L = \log (A/A_0) \quad (2-2)$$

olarak tanımlanır. Richter büyüklüğünü  $M_L = 0$  kabul ettiği referans depremi olarak ölçüm yerine merkez üssü uzaklığı 1000 km olan ve  $A_0 = 1 \times 10^{-3}$  mm genliği olan depremi seçmiştir. Bu tanım altında son ifade,

$$M_L = \log A - 2.48 + 2.76 \log \Delta \quad (2-3)$$

olarak yazılır. Burada, A (mm) ve  $\Delta$  (km) olarak kullanılacaktır. Deprem hareketinin ölçülen en büyük genliği, kayma veya yırtılmanın meydana geldiği bölgeye olan mesafe ile değişir. Genliğin değişimi merkez üstünde (episantrda) bir tepe oluşturacak şekilde belirir. Gerçekte pratik olmamakla beraber bu tepenin altında kalan hacim, depremin büyüklüğü için iyi bir ölçüdür. Richter ölçüsüne göre depremin büyüklüğünü hesaplamak için formülünde, episantrdan 100 km uzaklıktaki en büyük genlik hesaba katılır. Büyüklüğü sıfır olan referans depremi için ise aynı mesafede en büyük genlik  $A_0 = 0.001$  mm olarak kabul edilir [27].

Yer kabuğu koşullarının homojen olmaması, Richter ölçüsünün matematiksellikten uzaklaşmasına sebep olmaktadır ve ölçüm sonuçları yaklaşık değerler olarak verilebilmektedir. Bunun sonucu olarak da bir deprem için farklı ölçüm istasyonlarından yaklaşık ancak farklı büyüklükler verilebilmektedir.

Mühendislik amaçları için depremin şiddeti genellikle depremin mutlak ölçüsü olarak kabul edilir. Ancak, aynı şiddetteki iki deprem farklı frekans gruplarının birleşmesiyle ortaya çıkabilir, fay derinliği oluşum mekanizması farklı olabilir. Önemli olan noktalardan biri Richter ölçeğinin logaritmik olması yüzünden, genliklerin bir birimden diğer birime, örneğin  $M_L = 6$  Richter ölçeğinden  $M_L = 7$  Richter ölçeğine geçerken on kat artmasıdır [27].

### 2.6.3. Cisim Dalgası Büyüklüğü( $m_b$ )

Elastik bir cisim içinde yayılan dalgaları, sınırlardan bağımsız olarak üç boyutlu cisim içinde yayılan basınç-çekme gerilmeleri veya kayma gerilmeleri doğurarak yayılan Cisim Dalgaları ve elastik cismin yüzeyinde ilerleyen Yüzey Dalgaları olarak iki bölüme ayırmak mümkündür. Bu yerel büyüklük kullanışlı olmasına rağmen, kullanılan alet türü ve deprem büyüklüğünün yeryüzünün her yerinde kullanılması bakımından bazı sınırlamalara sahiptir. Cisim dalgalarından basınç-çekme gerilmeleri doğurarak yayılan dalgaların yerel mesafeleri aşarak daha uzak mesafelere ulaşması bu dalganın genliği esas alınarak bir büyüklük - tanımını ortaya koymuştur. Bu dalganın ilk birkaç periyodu esas alınarak Cisim Dalgası Büyüklüğü  $m_b$  aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$m_b = \log (A/T) + Q (h,\Delta) \quad (2-4)$$

Dalğanın yansımaları ve kırılmaları nedeniyle ortaya çıkabilecek karmaşık titreşimlerin etkisi önlenmek amacıyla sadece ilk birkaç titreşimin parametreleri kullanılır. Burada mikron olarak yer hareketinin genliği ve T saniye olarak karşı gelen hareketin periyodunu ve  $Q (h,\Delta)$  derinlik ve uzaklıkla ilgili düzeltmeyi göstermektedir. Bu şekilde mesafe, merkez üssü ile ölçüm yapılan nokta arasındaki merkezsel açı ile gösterilmiştir. Mesafenin, dolayısıyla merkezsel açının küçük olması duru dalga yeryüzünün üst kabuk tabakasından yayılacağı ve bu tabakanın karmaşık bir yapıya sahip olmasındandır [27].

#### 2.6.4. Yüzey Dalgası Büyüklüğü ( $M_s$ )

Odak derinliği az olan depremlerin 600 km den uzaktaki sismograf kayıtlarında, yüzey dalgalarının uzun mesafede saçılması nedeniyle, yaklaşık 20s periyotlu olan dalgalar etkin durumda bulunur. Yüzey dalgalarının genlikleri, cisim dalgalarının genliklerinden daha farklı olarak mesafeden ve daha kuvvetli bir şekilde odak derinliğinden etkilenirler. Derin depremler belirgin yüzey dalgaları oluşturmadığı için bunların derinlik düzeltmesi söz konusu olmaz. Buna göre Yüzey Dalgası Büyüklüğü ( $M_s$ )  $A_{20}$  20 s periyotlu Rayleigh yüzey dalgasının genliğini (mikron) ve  $\Delta$  (km) ara mesafeyi göstermek üzere aşağıdaki gibi tanımlanır [27]:

$$M_s = \log A_{20} + 1.66 \log \Delta + 2.0 \quad (2-5)$$

#### 2.6.5. Sismik Moment ( $M_0$ )

Sadece 20s periyotlu titreşimi esas aldığı için, Şili (1960) ve Alaska (1964) depremleri gibi büyük depremlerde, yüzey dalga büyüklüğü farklı fay yırtılma boyuna sahip iki depremi belirgin bir şekilde ayırt edememektedir. Bu amaçla ayrı bir ölçü sisteminin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Fay kayma bölgesinde,  $\mu$  kayma rijitliği,  $A$  yırtılma alanı ve  $\check{D}$  faydaki ortalama yer değiştirme olmak üzere, boyutlu bir büyüklük olan Sismik Moment  $M_0 = \mu A \check{D}$  şeklinde ifade edilmiştir. Sismik moment belirlenmesi zor bir büyüklük olup, yapısal jeolojik incelemeler sonucu hesap edilebilir [27].

#### 2.6.6. Moment Büyüklüğü ( $M_w$ )

Sismik momente bağlı olarak Moment Büyüklüğü  $M_w$  aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$M_w = (\log M_0) / 1.5 - 6.0 \quad (2-6)$$

### 2.6.7. Sismik Enerji ( $E_s$ )

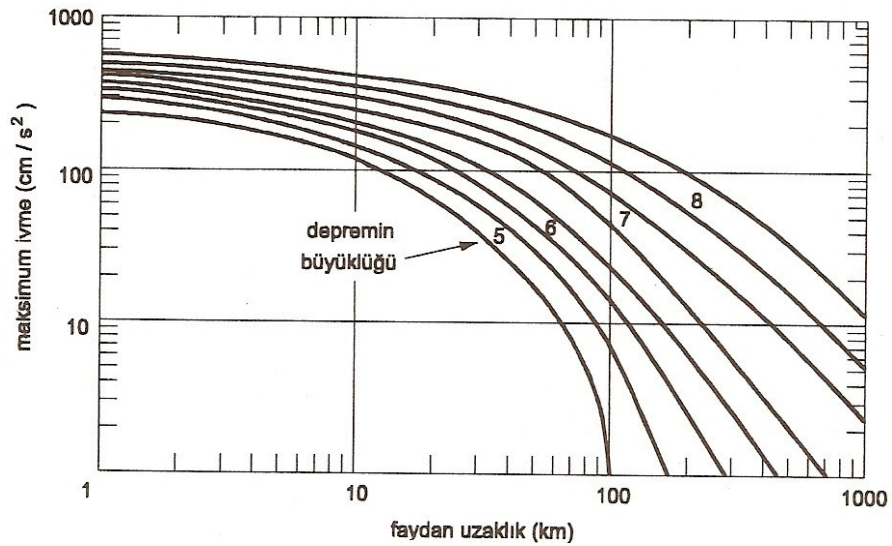
Depremde ortaya çıkarak yayılan enerji,  $\Delta\sigma$  ortaya çıkan gerilme düşüşü olmak üzere,

$$E_s = \frac{1}{2} \Delta\sigma A \check{D} \quad (2-7)$$

şeklinde yaklaşık olarak ifade edilebilir. Sismik moment kullanılarak;

$$E_s = \Delta\sigma M_o / (2\mu) \quad (2-8)$$

yazılabilir. Enerjinin zaman içinde daha geniş ortama yayılması ve ortamdaki sönüm nedeniyle deprem hareketinin maksimum ivmesi faydan uzaklaştıkça azalır. Çeşitli depremlerden elde edilen ölçümlerden faydalanılarak, bulunan bu tür azalma şekli Şekil 1.16. da depremin büyüklüğüne bağlı olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, depremin merkez üstünde uzaklaştıkça, depremin enerjisinin yayıldığı yer kabuğu hacminin büyümesi ve bu arada meydana gelen sönümler, maksimum ivmenin hızla düşmesine sebep olmaktadır. Eğriler deprem maksimum ivmesinin bir üst sınır değerinin bulunduğu işaret etmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Depremin maksimum ivmesinin faydan olan uzaklığına bağlı değişimi [27]

Deprem hareketi sırasında açığa çıkan enerji  $E_s$  ile depremin büyüklüğü arasında

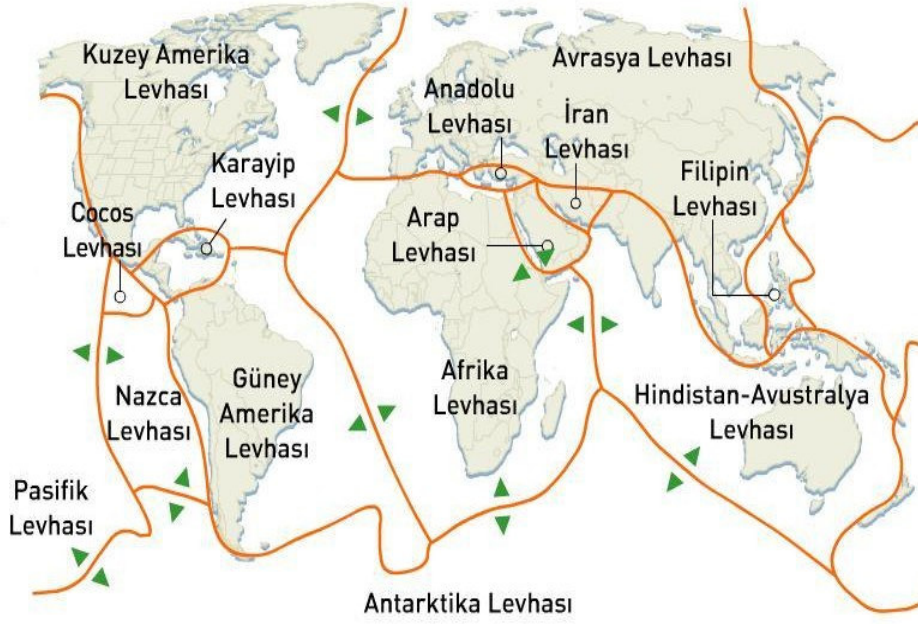
$$\log E_s = 1.5 M_s + 4.8 \quad (2-9)$$

$$\log E_s = 2.4 m_b - 1.2 \quad (2-10)$$

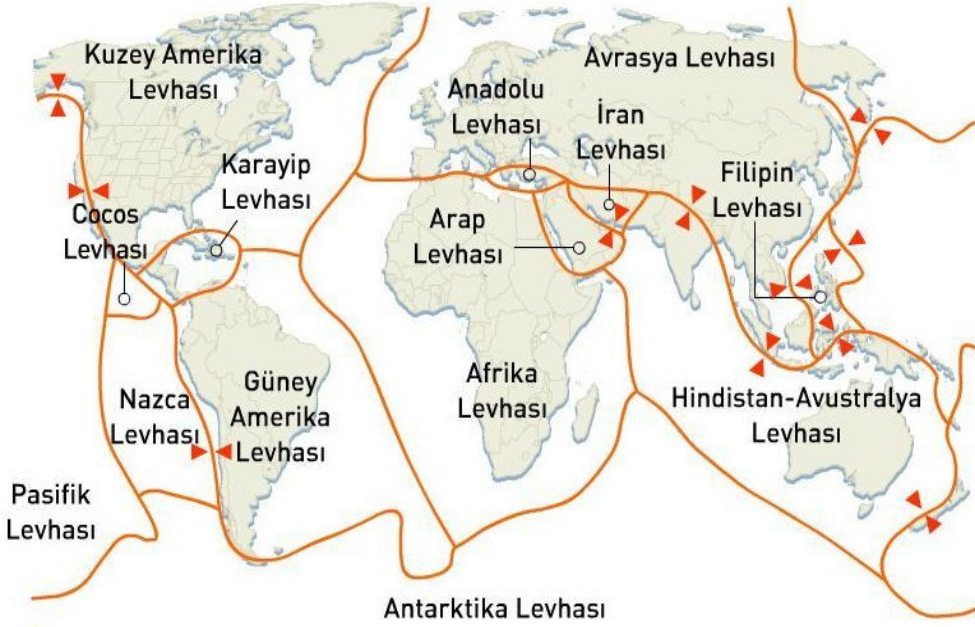
gibi bağıntılar verilir. [27].

## 2.7. Yeryüzünde Faylar ve Tektonik Bölgeler

Dünyamızda orta ve şiddetli depremler genellikle yeryüzünün belirli bölgelerinde daha sık olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle aşağıdaki şekilden de anlaşılacağı gibi bu bölgelerdeki fayların birbirine göre rölatif hareketi sonucu ortaya çıkan dalgalar yayılarak depremleri oluştururlar. Yeryüzünün kabuk tabakasında deprem hareketinin meydana geldiği fay çizgileri ile sınırlanan kısımları “Tektonik Plakalar” olarak adlandırılır. Tektonik plakaların sınırlarında rölatif hareket ortaya çıkarken, iç kısmında önemli şekil değiştirme ve rölatif yer değiştirmeler oluşmaz [27]. Yeryüzündeki kalın alüvyon dolgularının bulunduğu bölgelerde bu plakaların ayrımlarındaki fay yüzeylerinin üst sınırlarını tespit etmek kolay değildir. Bunun gibi, yer küresinin yapısı nedeniyle plakaların alt sınırlarını da keskin çizgilerle belirlemek mümkün değildir. Levha tektoniği üzerine çalışan araştırmacılar yeryüzünde ayrılan levhalar ve çarpışan levhalar olarak levhaların rölatif hareketlerine göre haritalama yapmışlardır (Şekil 2.5 ve 2.6).



Şekil 2.5. Ayrılan Levhalar

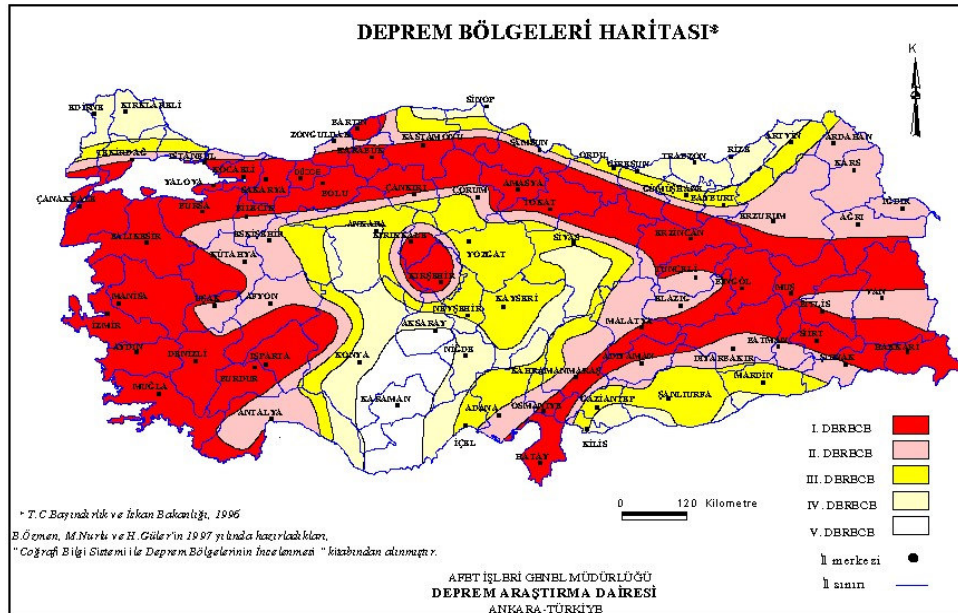


Şekil 2.6. Çarpışan Levhalar

## 2.8. Türkiye’de Faylar ve Tektonik Bölgeler

Ülkemizde geçmiş çağlardan bu yana hasar getiren depremler süre gelmektedir. Çeşitli kaynak ve belgelere göre en eski deprem kayıtları Çin ve Akdeniz ülkelerinden sonra Anadolu’ya aittir. Yıllardır yapılan araştırmalar, yeryüzü çalışmaları ve uzaydan çekilen fotoğraflar sonucunda Suudi Arabistan’dan başlayan ve yurdumuz üzerinden geçerek İtalya ve kuzeye devam eden S şeklinde yer hareketi hız alanı bulunduğu belirlenmiştir. Avrasya plakası tarafından Arap plakasının hareketi engellenmiş bunun sonucunda da **Kuzey Anadolu** ve **Doğu Anadolu Fayları** oluşmuştur. Anadolu plakası bu sağ ve sol atımlı fayların etkisiyle batıya doğru hareket etmektedir [27].

Ayrıca Afrika plakası, Avrasya plakası altına dalma hareketi yapmaktadır. Bu plaka hareketleri sonucu plakaları ayıran faylar boyunca sıkışma, kayma, yırtılma yanı sıra dalma ve batma hareketleri de ortaya çıkmaktadır. **Ege Çöküntü Bölgesinde** farklı büyüklüklerde karmaşık yapılar sahip, küçük atımlı faylarla sınırlı birçok blok bulunmaktadır [27].



Şekil 2.7. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası [1].

Yurdumuzda meydana gelmiş depremler için çeşitli tarihi belgelere dayanılarak istatistikî kayıtlar çıkarılsa da 1970 yılından sonra ülkemizin çeşitli bölgelerinde kurulan ölçüm istasyonları ile aletsel ölçümler sonucu ülkemizin depremselliği hakkında gerçekçi sonuçlar ortaya çıkarılmıştır. Ülke topraklarımız depremsellik yönünden I. Derece, II. Derece, III. Derece, IV. Derece ve V. Derece olmak üzere beş bölgeye ayrılmıştır (Şekil 2.7).

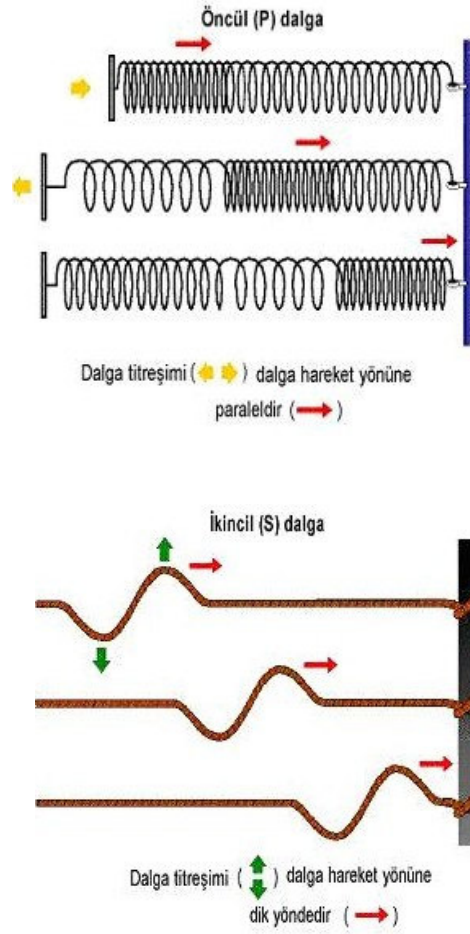
Dünya çapında en dinamik fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fayı (KAF) doğu batı yönünde uzandığı ülkemizde büyük felakete yol açmıştır. 1939 Erzincan depremi ile Kuzey Anadolu Fay hattı faal bir döneme girmiştir. Bu depremlerle başlayan hareket, fayda biriken enerjinin batıya doğru ilerleyen kaymalarla boşalarak 13 depremin oluşmasına sebep olmuştur. Ancak son 1999 Gölcük ve Düzce depremleri sonrasında fay hattı üzerinde yeni bir hareketlilik başladığına dair çeşitli araştırmacıların görüşleri bulunmaktadır. Aynı dönem içerisinde Ege Çöküntü Sisteminde küçük ve orta şiddetli depremlerin oluşturduğu deprem hareketliliği gözlene de büyük kayıp ve hasarlar yaşanmamıştır. Doğu Anadolu Fay Bölgesinde ise etkinlik artışı görülmemiş az sayıda orta şiddetli depremler kaydedilmiştir. Ancak son 1999 Gölcük depremi sonrasında yeni bir ivme kazanan deprem araştırmaları sonucunda Doğu Anadolu Fay hattı üzerinde de bir enerji birikimi olduğuna dair görüşler ortaya konmuştur. Bir fikir vermesi amacıyla tarihi belgeler incelendiğinde Kuzey Anadolu Fayı üzerinde İstanbul ve çevresinde şiddeti IX ve X üzerinde olan on iki civarında (325, 427, 478, 553, 865, 986, 1344, 1462, 1509, 1766, 1894) deprem olduğu görülmektedir. Özellikle çok büyük yıkıma sebep olduğu için halk ve tarihçiler tarafından Küçük Kıyamet ismi verilen 1509 depremi bölge depremselliğinin büyük şiddette depremlere sebep olabildiğini göstermektedir. Çizelge 2.6 de ülkemizde hasar ve can kaybına neden olan başlıca 20 büyük deprem verilmiştir.

**Çizelge 2.6.** 1900 den bu yana Türkiye’ de hasar yapan depremler

No	Büyükük	Tarih	Yer	Can Kaybı
1	Ms: 7.3	09.08.1912	Mürefte	216
2	Ms: 7.0	31.03.1928	İzmir	50
3	Ms: 7.2	06.05.1930	Hakkâri	2514
4	Ms: 7.1	22.09.1939	İzmir	60
5	Ms: 7.9	26.12.1939	Erzincan	32962
6	Ms: 7.0	20.12.1942	Niksar	3000
7	Ms: 7.2	26.11.1943	Tosya	2824
8	Ms: 7.2	01.02.1944	Gerede	3959
9	Ms: 7.0	06.10.1944	Edremit	27
10	Ms: 7.0	17.08.1949	Karlıova	450
11	Ms: 7.4	18.03.1953	Yenice	265
12	Ms: 7.1	25.04.1957	Fethiye	67
13	Ms: 7.1	26.05.1957	Abant	52
14	Ms: 7.2	22.07.1967	Adapazarı	89
15	Ms: 7.2	28.03.1970	Gediz	1086
16	Ms: 7.2	24.11.1976	Muradiye	3840
17	Ms: 6.8	30.10.1983	Erzurum	1155
18	Ms: 6.8	13.03.1992	Erzurum	653
19	Mw:7.4	17.08.1999	Gölcük	17000
20	Mw: 7.2	12.11.1999	Düzce	845

## 2.9. Deprem Dalga Hareketi

Depremler sırasında yer kabuğu içerisinde iki farklı dalga hareketinin oluşmaktadır. Bu dalgalardan ilki Primary wave, öncül dalga veya Ana dalga olarak da isimlendirilen P dalgalarıdır. P dalgaları yeryüzüne paralel salınımlar şeklinde yayılarak geçtikleri ortamda hacimsel değişikliklere sebep olurlar. P dalgalarına göre hızları daha yavaş olan Secondary wave, ikincil dalga veya Kayma dalgası olarak bilinen S dalgaları geçtikleri ortamda hacim değişikliği olmadan biçim değişikliğine sebep olmaktadır [26].



Şekil 2.8. P ve S dalgalarının yayılım mekanizması [26]

P dalgaları, S dalgalarından daha hızlı olarak hareket ettiğinden ilk olarak yapıya etki ederler ancak yapılarda S dalgalarına kıyasla daha az hasar verirler. S dalgaları sıvı ortamlarda ilerleyemediği için yer kabuğunda Dış Çekirdek katmanını içerisinde hangi bir yayılımı gözlenmez (Şekil 2.8).

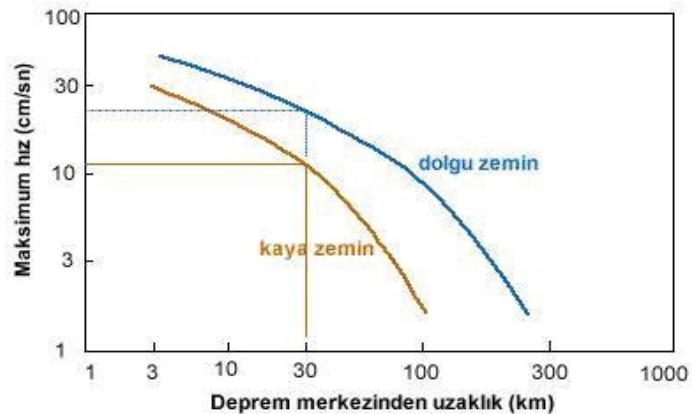
Deprem hareketi birçok farklı periyot, frekans, sönümlenme veya genliklere sahip üst üste binmiş harmonik titreşimler olarak da tanımlanabilmektedir. Periyot dalga hareketinin iki tepe noktası arasındaki zaman aralığı, frekans; birim zamanda kaydedilen periyodik hareket sayısı, sönüm ise hareketin zaman içerisinde büyüklüğünü kaybetmesi olarak ifade edilir. Depremler için frekans birimi Hertz (Hz) olarak kabul edilmiştir. Deprem harmonik etkilerinin binalar üzerinde oluşturduğu tepkileri gösteren deprem

spektrum grafikleri çizilir. Bu grafiklerde dinamik etkiye maruz binanın ivme, yer değiştirme gibi tepkileri gösterilir. Farklı periyotlar için oluşan maksimum hız, ivme ve yer değiştirme değerleri ile spektrum eğrisi çizilir. Spektrumları etkileyen iki önemli faktör vardır bunlar zemin özelliği ve sönüm oranıdır [26].

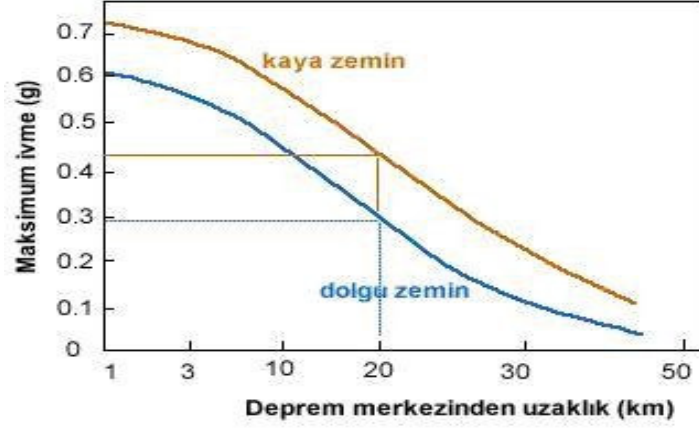
## 2.10. Deprem Zemin İlişkisi

Aynı deprem büyüklüklerinin farklı zemin türlerinde farklı ivme ve şiddetlere sebep oldukları çeşitli araştırma ve ölçümler sonucunda ortaya konmuştur. Deprem hızları ve deprem ivmelerinin kaya zeminler ile zayıf dolgu zeminler içerisindeki durumları incelendiğinde deprem hızının dolgu zeminde kaya zemine göre yaklaşık 1,5 kat büyük olduğu ancak ivme değerlerinde ise kaya zemin ivme değerinin dolgu zemin ivme değerinden fazla olduğu tespit edilmiştir. Fakat burada sağlam zeminler için maksimum ivmelerin oluştuğu periyot aralığı kısadır ve eğer üst yapının periyodu da kısa ise, sağlam zeminde deprem ivmesi yarı yarıya daha az hissedilir. Zayıf zeminlerin ise periyot aralığı çok daha uzundur ve periyodu uzun yüksek katlı binalarda büyük tehlikeler oluşumu gözlenebilmektedir [26].

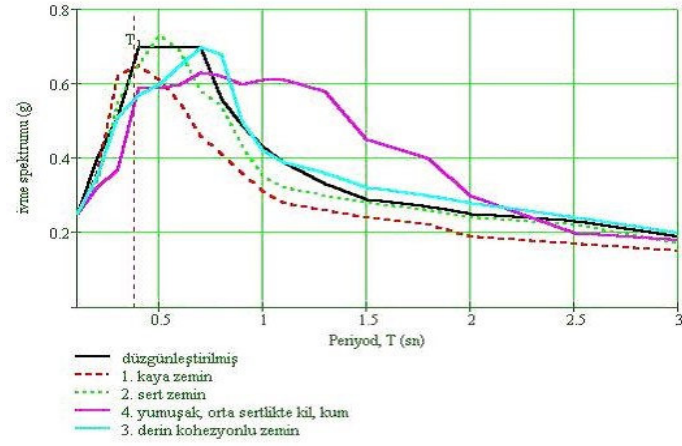
Şekil 2.9, 2.10 ve 2.11'de dolgu zeminler ile kaya zeminler için maksimum hız- deprem merkezine uzaklık ve maksimum ivme- deprem merkezine uzaklık grafikleri ile farklı zemin durumları için ivme spektrumu grafiği verilmiştir.



Şekil 2.9. Maksimum hız- deprem merkezine uzaklık [26]



Şekil 2.10. Maksimum ivme- deprem merkezine uzaklık [26]



Şekil 2.11. Farklı zemin durumları için ivme spektrumu [26]

### 3. DİNAMİK ETKİ ALTINDA ZEMİN ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Dinamik Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Dinamik etkileye maruz kalan bir zeminin verebileceği tepkileri önceden yorumlayabilmek için dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla çeşitli arazi, laboratuvar ve model deneyleri geliştirilmiştir.

Dinamik zemin özelliklerini belirlemek için bir inceleme yapılırken zeminlerin kendine has yapıları, anizotropi şartları, ekipman kısıtlamaları, deneysel ve yorumlama hataları göz ardı edilmeden bu tip etkiler minimuma indirilmeye çalışılmalıdır [28].

#### 3.2. Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri zemin özelliklerinin mevcut doğal koşullarda ölçülebilmesi amacıyla geliştirilmiştir ve her hangi bir numune alınması söz konusu olmadan mevcut şartların tanımlanabilmesinde kolaylıklar sağladığı için tercih edilmektedir.

##### 3.2.1. Düşük Deformasyon Deneyleri

Bu tip deneyler zeminler üzerine % 0.001 ve altındaki kayma birim deformasyonları düzeyinde uygulanır. Dalga yayılma teorisine bağlı olarak düşük birim deformasyon modülleri ile cisim dalgası hızı ilişkilendirilmesi yapılır. Sismik jeofizik deneyleri ile sığ derinliklerde patlatma, düşey çarpma ve yatay çarpma gibi metotlarla P ve S dalgaları oluşturulmaya çalışılır [28].

Zemin katmanlarının dalga iletme hızı ve kalınlıklarını belirleme amacıyla **sismik yansıma deneyi**, P ve S dalgalarının farklı mesafelerden geliş zamanlarını belirlemek için **sismik kırılma deneyi**, dalga enerjisine dayalı **yatay katmanlanma ve eğimli, düzensiz katmanlanma deneyleri** uygulanmaktadır. Ayrıca kuyu içerisinde P ve S dalgaları geliş zamanların ölçülen **askıda loglama deneyi**, yüzeye yakın kesme dalgası hızlarını belirlemede kullanılan **Rayleigh**

**Dalgası Deneyi**, yatay yöndeki dalga yayılma hızlarını belirlemede kullanılan **kuyudan-kuyuya sismik deneyi** gibi farklı uygulamaları vardır [28].

### 3.2.2. Yüksek Deformasyon Deneyleri

Bu tip deneyler geoteknik mühendisliğinde çok kullanılan standart penetrasyon deneyi, konik penetrasyon deneyi, dilatometre deneyi ve presiyomere deneyidir. Bu deneyler zemin dayanımı gibi yüksek deformasyon özelliklerini ölçmeye yönelik olarak kullanılmakta ve deney sonuçları düşük deformasyon karakteristikleri ile karşılaştırılarak çeşitli çıkarımlar yapılmaktadır [28].

**Standart penetrasyon testinde** 45 cm lik numune alıcının son 30 cm lik kısmını çakmak için gerekli darbe sayısı standart penetrasyon direnci N olarak kaydedilir ve çeşitli düzeltme katsayıları ile korale edildikten sonra çeşitli zemin özellikleriyle ilişkilendirilir. **Konik penetrasyon deneyi** ile zeminlerin uç dirençleri ile birlikte boşluk suyu basıncı ve dalga yayılma hızları daha kolay ve daha hızlı bir şekilde ölçülebilmekte, zemin profilindeki ince katmanlar tespit edilebilmektedir. **Presiyomere deneyi** zeminlerin gerilme birim deformasyon ve dayanım özelliklerini ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Boşluk genişleme teorisi kullanılarak basınç hacim eğrisinden zeminlerin gerilme birim deformasyon davranışları hesaplanmaktadır [28].

### 3.2.3. Diğer Arazi Deneyleri

Son yıllarda geliştirilen jeotomografi yöntemi ve kuyuda burulma deney sistemi, zeminlerin arazide dinamik özelliklerini belirlemede kullanılmaya başlanan yeni yöntemlerdir. Jeotomografi yöntemi ile zeminin derinlik boyunca iki ve üç boyutlu analizi yapılmakta iken kuyuda burulma deney sistemi ile zeminin gerilme birim deformasyon eğrileri oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu alanda arazi koşullarını daha iyi tanımlamak amacıyla yeni yöntemler ve ekipmanların geliştirilmesi üzerine çalışmalar sürmektedir [28].

### 3.3. Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneyleri zemin numunelerine uygulanan çeşitli testlerle temsil ettiği zemin kütlelerinin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Numuneler uniform başlangıç gerilmelerine maruz, uniform gerilme ve birim deformasyon şartlarında elemanlar olarak deneylere tabi tutulmaktadır [28].

Laboratuvar deneylerinden zeminlerin yerindeki davranışlarını daha iyi yansıtan sonuçlar elde edebilmek için örselenmemiş numuneler alınması veya doğal zemin koşullarına göre yapılandırılmış numuneler hazırlanması gerekir.

#### 3.3.1. Düşük Deformasyon Eleman Deneyleri

Zemin özelliklerini düşük deformasyon düzeyinde tanımlayan bu deneyler; rezonant kolon deneyi, ultrasonik pals deneyi ve piyezoelektrik bender element deneyidir.

En sık kullanılan **Rezonant kolon deneyi** ile silindirik numuneler elektromanyetik yükleme sistemi vasıtasıyla harmonik burulma veya eksenel yüklemeye maruz bırakılır. Deney ile zemin rijitlik ve sönümlenme özellikleri ölçülerek, efektif çevre basıncı, birim deformasyon genliği ve zaman etkileri incelenir. **Ultrasonik pals deneyi** ile numune ucuna ultrasonik alıcı ve verici yerleştirilerek verilen gerilmeye bağlı olarak dalga yayılma hızları bulunur. Genellikle deniz tabanı çökelleri gibi yumuşak malzemelerde kullanılmaktadır. Kesme dalga hızlarını ölçmede kullanılan **Piyezoelektrik bender element deneyi** ile numunenin her iki ucuna zıt uçlar batırılıp, S dalgaları üretilir ve hız ölçümü yapılır [28].

#### 3.3.2. Yüksek Deformasyon Eleman Deneyleri

Yüksek kayma birim deformasyonu genliklerinde zeminlerde hacim değişimi görülmektedir. Drenajlı yükleme koşullarında hacimsel birim deformasyon gözlenirken, drenajsız yükleme şartlarında boşluk suyu basınçlarında ve efektif gerilmelerde değişimler olmaktadır. Yüksek deformasyon

eleman deneyleri; tekrarlı üç eksenli deneyi, tekrarlı doğrudan basit kesme ve tekrarlı burulmalı deneyleridir [28].

**Tekrarlı üç eksenli deneyde**, silindirik bir zemin numunesi ince kauçuk bir membran ile kuşatılmış olarak iki yükleme plakası arasına yerleştirilir ve hava basıncı şeklinde uygulanan bir yatay gerilme ile eksenel gerilme uygulanır. Deneyde deviatör gerilme havalı yada hidrolik yükleyici ile gerilme kontrollü olarak veya mekanik yükleyici ile deformasyon kontrollü olarak uygulanır. Tekrarlı üç eksenli deneylerinde çoğunlukla yatay gerilmeler sabit olup, eksenel yükler ise 1 Hz frekanslarda tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Deneyler izotropik veya anizotropik konsolide şartlarında tekrarlanabilmektedir. İzotropik olarak konsolide edilen deneyler kayma gerilmelerinin sıfır olduğu düz yüzeyli sahaları temsil etmek amacıyla uygulanır. Başlangıç anında statik kayma gerilmelerinin mevcut olduğu yamaçların içindeki ve altındaki şartları modellemek için anizotropik olarak konsolide edilmiş üç eksenli deneyleri tercih edilir. Bazı durumlarda hücre basıncı tekrarlı olarak uygulanarak, S dalgalarına benzer şekilde mohr dairesi etrafında gerilme izleri belirlenir. Üç eksenli basınç deneyinde ölçülen gerilme ve birim deformasyonlar kayma modülü ve sönümleme oranını hesaplamada kullanılmaktadır. İri kum ve çakıllar üzerinde uygulanan deneylerde membran penetrasyon etkileri dikkate alınmalı ve efektif gerilmelerin, rijitlik ve sönümleme oranı ölçümlerinde hatalara sebep olması engellenmelidir. **Tekrarlı doğrudan basit kesme deneyi** ile deprem gerilme şartları daha gerçekçi olarak modellenebilmektedir ve sıvılaşıma potansiyelini belirlemede en sık kullanılan yöntemdir. Silindirik numune rijit sınır plakaları veya üst üste yığılmış halkalar ile sınırlandırılarak, tekrarlı yatay kayma gerilmelerine maruz bırakılır. Numune tabanı veya tepesine uygulanan bu kayma gerilmeleri sonucu S dalgalarına maruz kalan zeminlere benzer şekilde numunelerde deformasyonlar oluşur. Deneyde kayma gerilmelerinin yalnızca taban ve üst yüzeylere uygulanması uniform olmayan gerilmelere sebep olur. Ancak uniform olmayan gerilme etkileri numunenin çap/yükseklik oranı artırılarak azaltılabilir. **Tekrarlı burulmalı kesme deney** sistemi ile izotrop veya anizotrop gerilme şartlarına izin verilerek yatay düzlemde tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanır. Geniş bir aralığa sahip

deformasyon düzeyi içerisinde rijitlik ve sönümlenme özellikleri tespit edilir. Farklı araştırmacılar tarafından çeşitli deney düzenekleri geliştirilmiştir [28].

### 3.3.3. Model Deneyleri

Model deneyleri bir prototip üzerine uygulanan tekrarlı yükleme sonuçlarının genel konu üzerine yorumlanmasına dayanmaktadır. Zemin davranışı gerilme düzeyine karşı hassastır, yüksek gerilmeler altında büzülme davranışı gösteren zeminler düşük gerilme seviyelerinde genişleme davranışı gösterebilirler. Bu sebeple model deneylerinde gerilmeye karşı hassaslığı arazi şartlarında olan prototiplerin geliştirilmesi gereklidir. Model deneyleri içerisinde, **sarsma tablası deneyleri** ile **santrifüj deneyleri** en sık kullanılan deney sistemleridir. Her iki deney sistemi içinde sınır koşulları etkilerinin arazi koşullarını yansıtmayı yansıtmadığına dikkat edilmelidir [28].

### 3.4. Tekrarlı Yüklenen Zemin Davranışı

Dinamik zemin özellikleri yoğunluk ve gerilme şartlarına ek olarak zemin yapısı, yaş gerilme deformasyon tarihçesi ve çimentolanma gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Zemin rijitliğinin tekrarlı birim deformasyon genliği, boşluk oranı, ortalama asal efektif gerilme, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı ve tekrarlı yük sayısı gibi faktörlere bağlı olduğu laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlarla ortaya konmuştur. Ancak tekrarlı yükler altında zemin davranışının daha iyi açıklanabilmesi amacıyla üç model geliştirilmiştir. Bu modeller; eşdeğer doğrusal modeller, tekrarlı doğrusal olmayan modeller ve ileri yapıcı modellerdir [29].

Bu modellerin daha iyi anlaşılabilmesi için taneli madde davranışının temel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Zeminin özel elastik partiküllerden oluştuğu varsayımı ile düşük deformasyon zemin davranışları açıklanabilmektedir. Zemin partikülleri arasındaki etkileşimlerin analizi ile mikro mekanik modeller geliştirilmektedir.

### 3.4.1. Eşdeğer Doğrusal Modeller

Eşdeğer doğrusal modeller, simetrik tekrarlı yüklemeye maruz zeminlerin histerez döngüsü sergilediğini ve bu döngünün iki önemli özelliğinin eğim ve genişlik olduğunu belirtmektedir. Döngünün eğimi zeminin rijitlik derecesine bağlıdır. Zemin rijitlik derecesi yükleme sırasında herhangi bir noktada tanjant kayma modülü  $G_{tan}$  olarak tanımlanmakta ve döngü sırasında sürekli değişmektedir. Döngünün genel eğimi  $G_{sec}$  olarak kabul edilir ve  $\tau_c$  kayma gerilmesi,  $\gamma_c$  kayma birim deformasyon genliği olmak üzere;

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \quad (3-1)$$

şeklinde ifade edilir. Eşdeğer doğrusal modeller zeminlerin doğrusal olmayan davranışını modellemede yaklaşık bir model olduğundan kalıcı deformasyon veya gerilme problemlerinde kullanılamamaktadır. Model tekrarlı yüklemeye sonra birim deformasyonun daima sıfıra döneceğini ifade etmektedir [28].

Eşdeğer doğrusal modeller kayma modülü, maksimum kayma modülü ve sönümlenme oranı ifadelerini şu şekilde açıklamaktadır. Bir elemanın **sekant kayma modülü**  $G_{sec}$  tekrarlı kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak değişmektedir. Ancak bu değişim ters orantılı olup birim deformasyon genliği artarken sekant kayma modülü azalmaktadır. Farklı tekrarlı birim deformasyon genliklerinin histerez döngülerinin uç noktaları birleştirilerek omurga eğrisi oluşturulur ve bu eğrinin orijindeki eğimi **maksimum kayma modülü**  $G_{max}$  1 ifade eder. Tekrarlı eşik kayma deformasyonunun altındaki birim deformasyonlarda enerjinin histerez sönümlenmesi teorik olarak beklenmemesine karşın deneysel araştırmalar sonucunda düşük birim deformasyon değerlerinde de enerji sönümlenmeleri gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu araştırmalar **sönümlenme oranının** hiçbir zaman sıfır olmadığı ve birim deformasyon genliği ile arttığını göstermiştir [28].

### 3.4.2. Tekrarlı Doğrusal Olmayan Modeller

Tekrarlı doğrusal olmayan modeller zemin kayma dayanımını boşluk suyu basınçlarıyla birlikte, drenajsız tekrarlı yükleme altında efektif gerilmedeki değişimleri de ortaya koyabilmektedir. Omurga eğrisi, boşaltma yükleme davranışı ve rijitlik düşüşü gibi ortak temeller üzerine kurulan bu modellerde düzensiz yükleme, yoğunlaşma, boşluk suyu basıncı değişimi gibi etkiler modellenmeye çalışılmıştır. Zemin tepkisini hesaplama modellerinde kullanıldığında, deprem sarsıntısı sırasında başlık suyu basıncı oluşumunun, değişiminin ve sönümlenmesinin belirlenmesine imkân vermektedir [28].

### 3.4.3. İleri Yapıcı Modeller

İleri yapıcı modeller genel başlangıç gerilme şartları, gerilme izleri, asal gerilme eksenleri, tekrarlı yükleme, birim deformasyon hızları, drenajlı ve drenajsız zemin davranışı ilkeleri üzerine geliştirilmiştir. İleri yapıcı modeller zeminlerin tekrarlı yükleme davranışlarını genelleştirmeye imkân vermesine rağmen çok fazla parametreye ihtiyaç olduğunda kullanımı sınırlıdır [28].

## 3.5. Tekrarlı Yüklenen Zeminlerin Dayanımı

Tekrarlı yükleme altındaki zeminlerin sınır dayanımlarının bilinmesi, şev stabilitesi, temel dizaynı, istinat yapıları dizaynı problemlerinde hayati öneme sahiptir. Özellikle iri taneli kohezyonsuz zeminler ile ince taneli kohezyonlu zeminlerin deprem etkisi altındaki deformasyon şartlarının belirlenmesi güvenlik faktörlerinin yükseltilmesi için gereklidir.

Bir zemin elemanının devirsel dayanımı ortalama kayma gerilmesi  $\tau_{ort}$  ile devirsel kayma gerilmesi  $\tau_{dev}$  arasındaki ilişkiye bağlıdır. Ortalama kayma gerilmesi büyüdükçe tekrarlı kayma gerilmesi küçük dahi olsa önemli deformasyonlar oluşmaktadır. Statik ve devirsel kayma gerilmeleri toplamı dinamik yenilme dayanımını aştığı durumlarda büyük kalıcı deformasyonlar gözlenmektedir [28].

Çalışmalar sonucu deprem etkisine uğramış şevlerin ve istinad yapılarını stabilitesi ile temellerin taşıma kapasitelerinin yeniden değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Tekrarlı yüklemeler aşırı boşluk suyu basıncına neden olduğundan efektif gerilmede düşüş gözlenmektedir. Bu durumda zeminlerin tekrarlı yükleme sonrasında genleşme davranışı göstermesine ve drenajsız yüklemelerde rijitlikte düşüşe sebep olmaktadır [28].

#### 4. DİNAMİK ETKİ ALTINDA ZEMİN DEFORMASYONU

Dinamik etkiler zeminlerde deformasyonlara sebep olmaktadır. Dinamik etkiler sonucu zeminlerde gözlemlenen deformasyonlar şu şekilde sıralanmaktadır;

- Yüzey yırtılması,
- Bölgesel çökme,
- Yamaç hareketleri,
- Hacimsel sıkışma,
- Sıvılaşma
  - Oturma ve taşıma gücü yenilmeleri,
  - Akma kaymaları,
  - Yanal yayılmalar,
  - Kum volkanları,

Dinamik etkiler özellikle deprem etkisi farklı deprem karakteristiklerinde ve farklı zemin türlerinde yukarıda sıralanan deformasyonlara sebep olmaktadır. Deprem kaynaklı bu deformasyonların detaylı şekilde incelenmesi bu bölümde verilecektir.

##### 4.1. Yüzey Yırtılması

Fay yer değiştirmesi, Bonilla tarafında 1970 de belirli bir yönde ölçülen bir fayın iki kenarının göreceli hareketi olarak tanımlanmıştır. Transform fay sınırlarındaki büyük depremler genel olarak doğrultu atımlı faylar üzerindeki yüzey kırığı ile birlikte gelişmektedir. Depremler sırasında fayların yırtılma uzunluğu yüzey yırtılmalarının etkisinin gözlenebilmesi için oldukça önemlidir. Binalarda, köprülerde, barajlarda, tünellerde, kanallarda ve yeraltı tesislerinde ciddi hasarların gözlemlendiği yüzey yırtılmaları gözlemlenmiştir. Büyük hasarlara neden olmasından dolayı yüzey yırtılmaları incelenmesi gereken bir olgudur. 21 Eylül 1999 Chi-chi (Tayvan) depremi sırasında oluşan yüzey

kırığından barajlar ve köprüler zarar görmüş, baraj gövdesi ve köprü ayakları yıkılmıştır [29].

#### **4.2. Bölgesel Çökme**

Yüzey kırıklarından farklı olarak, depremlerle birlikte gelişen diğer tektonik etkiler de yükselme veya bölgesel çökmeler olarak gözlemlenmiştir. Örneğin, kıta-kıta çarpışma bölgelerinde levhaların çarpışması sonucunda yer yüzeyinde sıkışma, kıvrımlanma, şekil değiştirme ve yukarı doğru itilme gibi deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Yükselme hareketinden farklı olarak depremler sonucunda birlikte bölgesel çökmelerde oluşabilmektedir. Ülkemizde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi nedenli bölgesel çökmeler ve bölgesel çökmeler sonuçlu büyük hasarlar meydana gelmiştir [29].

#### **4.3. Yamaç Hareketi**

Depremlerin ikincil etkilerinden biriside yamaç hareketleridir. Deprem kökenli yamaç hareketi düşmeler ve kaymalar olarak iki gruba ayrılır. Düşmeler, deprem sırasında oluşan yer sarsıntısı etkisiyle oluşan serbest düşme özelliği ile tanımlanmaktadır. Bu düşmeler genel olarak kaya parçalarının uçurum, dik yamaç, mağara, kemer veya tünelden ayrılmasıyla oluşmaktadır. Kaymalarda düşmelerden farklı olarak belirgin bir göçme veya kayma yüzeyi boyunca kayma deplasmanı ve deformasyonu oluşmaktadır. Deprem kökenli kaya düşmesi hareketi için, yamaç eğimi genel olarak 40° veya üzerinde olmalıdır. 31 Mayıs 1970 Peru depreminin tetiklediği bir moloz çığı yıkıma neden olmuştur [29].

#### **4.4. Hacimsel Sıkışma**

Hacimsel sıkışma, zemin sıkılaşması olarak da verilmektedir. Hacimsel sıkışma olgusu, zemin danelerinin sıkılaşmasına neden olan deprem kökenli yer sarsıntısı ile meydana gelir. Kuru ve gevşek kumlar veya çakıllar gibi çimentolanmamış kohezyonsuz zeminler, bu tip harekete daha fazla duyarlıdır.

Hacimsel sıkışma, büyük ölçekli zemin yüzeyi oturması ile sonuçlanmaktadır. Örneğin, Grantz vd. 1964 Alaska depremi sırasında alüvyonda 0,8 m kadar oturma gibi ilginç bir durumu gözlemlemişlerdir [29].

Silver ve Seed kuru kohezyonsuz zeminlerin deprem kökenli oturmasını üç ana faktöre bağlamıştır;

- Zeminin rölatif sıklığı (Dr): Zemin sıklığına bağlı olarak hacimsel sıkışma hareketinin etkisi değişmektedir. En düşük bağıl sıklıktaki kohezyonsuz zeminler, zemin sıkılaşmasına en çok duyarlıdır. Zemin ne kadar gevşek ise, hacimsel sıkışmaya karşı o kadar duyarlıdır. Zeminin sıklık durumunu belirlemek için genellikle standart penetrasyon deneyi kullanılmaktadır.
- Depremin neden olacağı maksimum kayma deformasyonu  $\tau_{max}$ : Depremin neden olacağı kayma deformasyonu büyüklüğüne göre, kohezyonsuz bir zeminin sıkılaşma eğilimi de artmaktadır. Kayma deformasyonunun miktarı, pik yer ivmesi  $a_{max}$ 'a bağlı olarak değişmektedir, yüksek  $a_{max}$  değerlerinde büyük deformasyonlar oluşmaktadır.
- Kayma deformasyonu devir sayısı: Kayma deformasyonu devir sayısı gevşek zemin yapısının sıkılaşma eğilimini artırmaktadır. Örnek olarak, gevşek kumlarda titreşime maruz kalma süresi arttıkça oturmanın da o kadar büyük olduğu gözlemlenmiştir. Kayma deformasyonu devir sayısı ise deprem büyüklüğü ile ilişkili olarak değişmektedir.

#### 4.5. Sıvılaşma

Bir deprem anında, kayma dalgalarının yayılımının neden olduğu devirsel kayma gerilmelerinin uygulanması, boşluk suyu basıncında bir artışa ve gevşek kumun büzülmesine neden olmaktadır. Bu sismik sarsıntı çok hızlı meydana geldiği için, kohezyonsuz zemin drenajsız yüklemeye maruz kalır ve boşluk suyundaki artış, çamur fişkirmaları veya kum kaynamaları şeklinde zemin yüzeyine doğru akışa neden olur. Yer sarsıntısı nedeniyle yüksek boşluk suyu basınçlarının gelişimi ve suyun yukarı doğru akışı, kumda sıvılaşma denilen olayı

meydana getirir. Sıvılaşmanın olgusu sırasında efektif gerilme sıfırdır ve her bir zemin daneleri suda yüzyormuş gibi davranış göstererek herhangi bir tutucu kuvvet kalmadan hareket eder [29].

Sıvılaşma olgusu üç farklı şekilde gözlemlenmektedir. Oturma ve taşıma gücü yenilmeleri, akma kaymaları ve kum volkanları olarak sınıflandırılan bu üç farklı hareket deprem etkisine bağlı olarak sıvılaşma olgusu içerisinde meydana gelmektedir.

#### **4.5.1. Oturma Ve Taşıma Gücü Yenilmeleri**

Sıvılaşma olay sırasında zemin sıvı gibi davranmaya başlamakta ve böylece zeminin kayma mukavemeti sıfıra düşmektedir. Kayma mukavemeti sıfıra düşen sıvılaşmış zeminin, üzerine gelen yükü taşıması ya da üzerindeki yapıyı desteklemesi imkânsızdır. Yüzeğe yakın sıvılaşma oluşumu sonucunda binalarda oturmalar batmalar, köprü ayaklarında devrilmeler, gömülü tanklarda yüzeğe doğru yükselmeler meydana gelebilmektedir. Niigata'daki (Japonya) Kawagishi-cho apartmanları 16 Haziran 1964 Niigata (Japonya) depremi sırasında sıvılaşmadan kaynaklanan taşıma kapasitesi yenilmesini anlatan örneklerden biridir [29].

#### **4.5.2. Akma Kaymaları**

Sıvılaşma olayı şevlerin yanal hareketine neden olduğu gibi akma kaymalarına da sebep olabilmektedir. Seed, akma kaymaları için şu şekilde bir tanımlama getirmiştir; sıvılaşma eğimli bir zemin kütlesi içinde veya altında meydana gelirse, tüm kütle akma kayması şeklinde akar veya yanal olarak desteksiz bir kenara ötelenir. Bu şekilde oluşan kaymalar, deprem anında gevşek, suya doymun malzemelerde gelişmektedir. Şili'de (1960), Alaska'da (1964) ve Niigata'da (1964) depremlerinde böyle kaymaların oluştuğu rapor edilmiştir. 9 Şubat 1971 San Fernando depreminde Aşağı San Fernando barajında akma kayması görülmüştür ve büyük hasarlar oluştuğu gözlemlenmiştir [29].

### 4.5.3. Kum Volkanları

Kum volkanları veya kaynamaları sıvılaşma kökenli bir zemin kaybı olgusu olarak tanımlanmaktadır. Yüzeğe yakın örtünün ince olması durumunda, altta bulunan ve sıvılaşan kum çökeline gelişen aşırı boşluk suyu basıncı, kum kaynaması ve çatlak gibi yer yarılmasına neden olarak kolayca yüzeydeki zemin tabakasını kırıp geçer. Kum kaynamaları çoğunlukla bir dizi şekilde gözlemlenir ve bu volkanlar zemindeki çatlak veya yarıkları takip ederek oluşur [29].

Zeminlerde dinamik etkiler sonucunda oluşan deformasyonlar arasından en yaygın olarak görüleni sıvılaşma olgusudur. Sıvılaşma olayı sonucu oluşacak büyük hasarların önüne geçebilmek amacıyla konu üzerinde detaylı incelemeler yapılmıştır. Sıvılaşma konusu üzerine yapılan bu araştırmalar bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak verilecektir.

## 5. SIVILAŞMA

Zeminlerin dinamik etkiler altındaki deformasyonunda en sık gözlemlenen durum sıvılaşma olgusudur. Zeminlerde dinamik etkilerin oluşturduğu deformasyonlara karşı direnç sağlayabilmek için sıvılaşma konusu üzerine ayrıntılı inceleme yapılması gerekmektedir.

Sıvılaşma konusu üzerine ilk detaylı incelemeler 1930'lu yılların sonlarında Casagrande tarafından yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise meydana gelen depremler ve sıvılaşma nedenli hasarlar araştırmacıları konu üzerine çalışmaya itmiştir. Özellikle 1970'lerden sonra Seed, Idriss ve Ishihara'nın çalışmaları ile sıvılaşma konusu daha iyi anlaşılmıştır.

### 5.1. Sıvılaşma Olgusu

Sıvılaşmaya duyarlı zemin tipi, yüzeye yakın yeraltı su seviyesine sahip yeni çökelmiş veya dolgu yapılmış gevşek kumlardır. Dinamik etki sonucu yeraltı suyunun hareketi ile boşluk suyu basıncı artımı ve efektif gerilmenin sıfırlanması sonucu sıvılaşma olayı meydana gelmektedir. Zeminlerde sıvılaşma süresi aşağıda verilen iki ana faktöre bağlı olarak değişmektedir:

- Deprem nedeniyle sismik sarsıntının süresi,
- Sıvılaşan zeminin drenaj şartları,

Depremden kaynaklanan devirsel kayma gerilmelerinin zemin üzerine etkidiği sürenin uzunluğuna ve büyüklüğüne bağlı olarak sıvılaşma durumunun süresi de değişir. Bunun yanı sıra, sıvılaşan zemin katmanı alttan ve üstten sınırlı ise, sıvılaşan zeminden suyun akışı ve aşırı boşluk suyu basıncının düşüşü daha uzun süre alır [30].

Dinamik etki sönümlendikten ve zemin sıvılaştıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı düşmeye başlar ve ilk değerlerine geri döner. Sıvılaşma olayı tamamlandıktan sonra, zemin biraz daha sıkı hale geçer.

## 5.2. Sıvılaşmaya Neden Olan Zemin Koşulları

Sıvılaşma olayının meydana geldiği zemin özelliklerinin iyi bilinmesi sıvılaşma olayının önceden tahmini için gereklidir. Sıvılaşma olayının sık gözlemlendiği zemin özellikleri şu şekilde verilebilir [30];

- Jeolojik Açısından:  
Zemin yüzeyinden ilk 15 m ile 20 m arası derinlikte bulunan ve taşıma gücü düşük, suya doymuş kumlu, siltli kumlu ve az killi kumlu birimler sıvılaşma riski taşır. Kayalık alanlar için sıvılaşma tehlikesi yoktur.
- Dane Boyutu Açısından:  
 $D_{60} / D_{10} < 10$  olan kum – silt türü zeminler ve  $D_{10}$  değerinin 0.005 ile 0.15 mm arasında olduğu zeminler için sıvılaşma riski vardır.
- Zemin Sıklığı Açısından:  
Standart penetrasyon deneyi sayısı yüzeye yakın derinliklerde  $N < 10$  ve 20 metre civarındaki derinliklerde  $N < 20$  olan özellikle düşük rölatif sıklıktaki kumlu katmanlar, sıvılaşabilir zeminleri oluşturmaktadır.
- Yeraltı su seviyesi:  
Genellikle yüzeyden ilk 3 metre ile 20 m derinliğe kadar yeraltı suları sıvılaşmanın meydana gelmesinde rol oynamaktadır.
- Zemin Dalga Hızı Açısından:  
İlk 3–5 metrede;  $V_s \leq 200$  m/sn poisson oranı  $> 0,30$  veya  $N_{30} < 10$  ise, sıvılaşma tehlikesi vardır.  
İlk 20 metrede;  $V_s \leq 330$  m/sn poisson oranı  $> 0,25$  veya  $N_{30} < 30$  ise, sıvılaşma tehlikesi vardır.

### 5.3. Sıvılaşma Tahmini İçin Gerekli Ön Parametreler

Bir bölgede sıvılaşma olgusunun tahmini için o bölgenin ve zeminin çeşitli özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Aşağıda verilen parametrelerin bilinmesiyle sıvılaşmanın meydana gelebilirliğinin belirlenmesi daha doğru olarak yapılabilir [30].

- Bölge için beklenen en büyük deprem büyüklüğü ( $M_w$ )
- Bölgenin faya olan uzaklığı, deprem odak derinliği ( $d$ )
- O bölgede beklenen en büyük yer ivmesi ( $a$ )
- Yeraltı suyu seviyesi ve su tutan katman kalınlığı
- Zemin katmanları ve katmanların türü (Kum, Kil, Silt Oranı, Tane Boyu)
- Katmanların ( $V_s$ ) kesme dalgası hızı ya da ( $N_{30}$ ) değerleri
- Boşluk suyu basıncı değerleri ( $U_0$ )
- Yapının temel boyutu, ağırlığı ve oturuş biçimi
- Katmanların doğal birim hacim ağırlığı değerleri ( $\gamma_n$ )
- Toplam düşey gerilme değerleri ( $\sigma_v$ )
- Efektif düşey gerilme değerleri ( $\sigma'_v$ )

### 5.4. Sıvılaşma Hesapları

Sıvılaşma olayı nedeniyle geçmiş depremlerde oluşan hasarlar gibi, olası depremler nedeniyle büyük hasarların oluşabilmesi de muhtemeldir. Oluşabilecek bu hasarların önüne geçebilmek için sıvılaşma tahminin doğru olarak yapılması gerekmektedir. Sıvılaşmanın belirlenmesi için, konu üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Ancak elde edilen bağıntılar genelde ortama özeldir. Jeofizik bilgilere dayalı hesaplamalar genelde depremin oluşturacağı ivme üzerine yoğunlaşmıştır. Geoteknik bilgilere dayalı hesaplamalar ise genelde dane boyutları ve içsel gerilmeler üzerine yoğunlaşmıştır. Her koşulda ve ortamda çalışan bir bağıntı olmadığından her çalışma alanında değişik parametreler kullanan birden fazla bağıntı ile çalışma yapılmalıdır. Her ortam için ilk olarak parametreler belirlenip en uygun bağıntılar seçilerek sıvılaşma hesapları yapılmalıdır.

### 5.4.1. Depreme Olan Uzaklık

Bağıntıya göre ilk olarak bölgenin en yakın diri kırığa, faya dik uzaklığı ( $L_f$ ) bulunur. Bu kırık boyunca geçmişte olan en büyük deprem büyüklüğü ( $M_{enb}$ ) belirlenir. Bu değer, deprem büyüklüğüne bağlı sıvılaşma uzaklığı ( $D$ ) bağıntısına konular ve sıvılaşma uzaklığı bulunur.

$$\log_{10} D = 0.77 M - 3.6 \quad (5-1)$$

Diğer bir bağıntı ise Wang ve Law tarafından 1994te verilmiştir;

$$D_{enb} = 0.82 \cdot 10^{0.862 (M-5)} \quad (5-2)$$

Eğer;  $D > L_f$  ise çalışma alanı sıvılaşma etki alanı içerisinde denir. [30].

### 5.4.2. Eşik İvme Kriteri

Eşik ivme kriterinde emniyet katsayısı ( $F_a$ ) için;  
 $a_t$  = sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç (eşik) ivmesi,  
 $a_{max}$  = depremin meydana getireceği en büyük yer ivmesi olmak üzere

$$F_a = 1.6 a_t / a_{max} \quad (5-3)$$

tanımı yapılmaktadır. Bağıntı için eğer;

$F_a < 1$  sıvılaşma potansiyeli yüksek

$F_a > 1$  sıvılaşma potansiyeli düşüktür

Eşik ivme kriteri için kayma dalgası hızı kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ise  $V_s$  'ye bağlı olarak, kabul edilen bir "eşik kayma şekil değiştirmesi ( $\gamma_t$ ) ve derinliğe bağlı olarak aşağıdaki formül şeklinde verilmiştir.

$$(a_t/g) = [\gamma_t (G/G_{max})_t (Vs)^2 ] / [g.z.r_d] \quad (5-4)$$

Burada  $r_d$  = yerin derinlikle artan sıvılaşmaya karşı direncini temsil eden bir azaltma katsayısıdır ve  $z$  = derinlik olmak üzere;

$$r_d = 1 - 0.015 z \quad (5-5)$$

şeklinde hesaplanır [30].

### 5.4.3. Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri

Bu kriterde sıvılaşma emniyet katsayısı;

$$F_s = \tau_s / \tau_o \quad (5-6)$$

olarak verilmektedir. Burada;

$\tau_s$  = çalışma alanında sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi,

$\tau_o$  = aynı alanda bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir.

$F_s > 1$  sıvılaşma olasılığı yok

$F_s < 1$  sıvılaşma olasılığı var.

Çeşitli depremlerden elde edilen sıvılaşma anındaki, periyodik yatay kayma gerilmesinin ( $\tau_s$ ) efektif düşey gerilmeye ( $\sigma'_v$ ) oranı ( $\alpha$ ) ile SPT arasındaki ilişkiler, Seed vd (1981, 1984) tarafından grafik olarak verilmiştir. Düzeltilmiş SPT değerleri, ham veriler  $C_N$  düzeltme katsayısı ile çarpılarak elde edilmektedir.

$$N_1 = C_N N \quad (5-7)$$

$N_1$  = düzeltilmiş SPT değerleridir. Düzeltme faktörü  $C_N$ , tekdüze bir efektif düşey basınca karşı gelen ve derinliğe bağlı olarak değişen bir katsayıdır.

$$C_N = 0.85 \log(145 / \sigma'_v) \quad (5-8)$$

Burada  $\sigma'_v$  = efektif düşey basınç değeridir ve ton/m<sup>2</sup> alınmalıdır. İstenilen deprem büyüklüğü için,  $\alpha = \tau_s / \sigma'_v$  oranı şekilden alınır (Şekil 5.1).

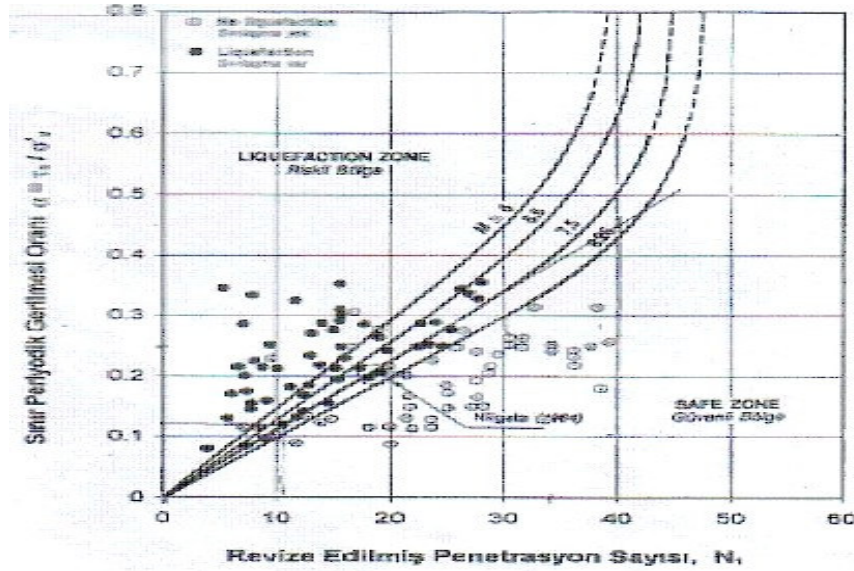
Bu orana, periyodik sıvılaşma gerilmesi oranı denilir. Bu oran bulunduktan sonra, sıvılaşma için gerekli yatay kayma gerilmesi,  $\tau_s$  için,

$$\tau_s = \alpha \cdot \sigma'_v \quad (5-9)$$

bağıntısı verilir. Deprem oluşturacağı en büyük ivme  $a_{\max}$ ' in etkisi ile meydana getireceği ortalama yatay kayma gerilmesi ise,

$$\tau_0 = (a_{\max} / 1.6 g) \sigma'_v \cdot r_d \quad (5-10)$$

bağıntısından hesaplanır [31].



Şekil 5.1. Periyodik Yatay Kayma Gerilmesinin ( $\tau_s$ ) Efektif Düşey Gerilmeye ( $\sigma'_v$ ) Oranı ( $\alpha$ ) İle SPT Arasındaki İlişkiler [31]

#### 5.4.4. Maksimum Yer İvmesi Kriteri

Bu yöntemde sarsma tablası kullanılarak tanımlı sınır şartları altında sismik yük simüle edilerek, ampirik formüllerin yardımıyla sınıvlaşma potansiyeli belirlenir. Normalize edilmiş çevrimsel gerilme oranının belirlenmesi için;

$$CSR = 0.65(a_{\max} / g) (\sigma_0 / \sigma'_0) r_d \quad (5-11)$$

formülü kullanılır. Burada;  $(a_{\max} / g)$  = yerçekimi ivmesinin oranı olarak maksimum yer ivmesi,  $\sigma_0$  = incelenen derinlikteki toplam gerilme,  $\sigma'_0$  = incelenen derinlikteki efektif gerilme,  $r_d$  = zemin deformasyonlarına bağlı azaltma faktörüdür. NCEER, 1997 değerlerine göre;

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

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

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

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

Buradan sonra izlenecek adım, normalize edilmiş çevrimsel yük mukavemetinin (CRR) belirlenmesi ve düzeltilmiş SPT değeri olan  $(N_1)_{60}$  ile karşılaştırılmasıdır.

$N_m$  = deneyde bulunan SPT darbe sayısı,

$C_N$  =  $N_m$  değerini bir referans jeolojik yüke tahvil etmek için katsayı,

$C_E$  = enerji oranı (ER) düzeltme katsayısı,

$C_B$  = kuyu çapı düzeltme katsayısı,

$C_R$  = tij uzunluğu için düzeltme katsayısı,

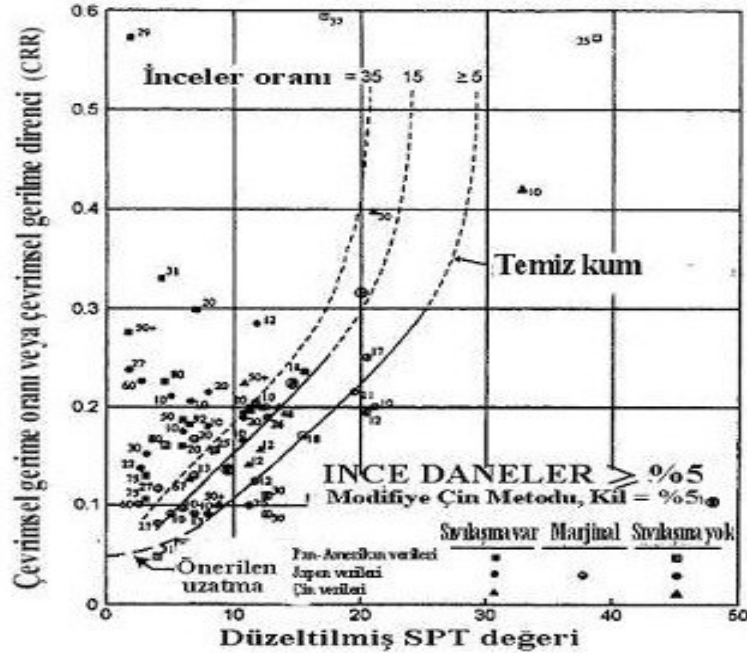
$C_S$  = gömlekli veya gömleksiz numune alıcılar için düzeltme faktörü olmak üzere;

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (5-12)$$

ile ifade edilmektedir. Ayrıca  $C_N$  için aşağıdaki ifade verilmiştir [31];

$$C_N = 2.2 / [1.2 + \sigma'_{vo}/Pa] \quad (5-13)$$

$(N_1)_{60}$  değerlerine karşılık CRR değerleri çizilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Çevrimsel Gerilme Oranı (CRR) İle Düzeltilmiş SPT Arasındaki İlişki [31]

Sıvılaşma tehlikesinin belirlenmesi için son olarak  $F_L$  güvenlik sayısı belirlenir.

$$F_L = CRR / CSR \quad (5-14)$$

Eğer belirlenen  $F_L$  değeri 1,0'dan büyükse sıvılaşma tehlikesi yoktur ancak  $F_L$  değeri 1,0'a eşit veya 1,0'dan küçükse, sıvılaşma tehlikesi vardır [31].

#### 5.4.5. Cpt Verileri İle Sıvılaşma Kriteri

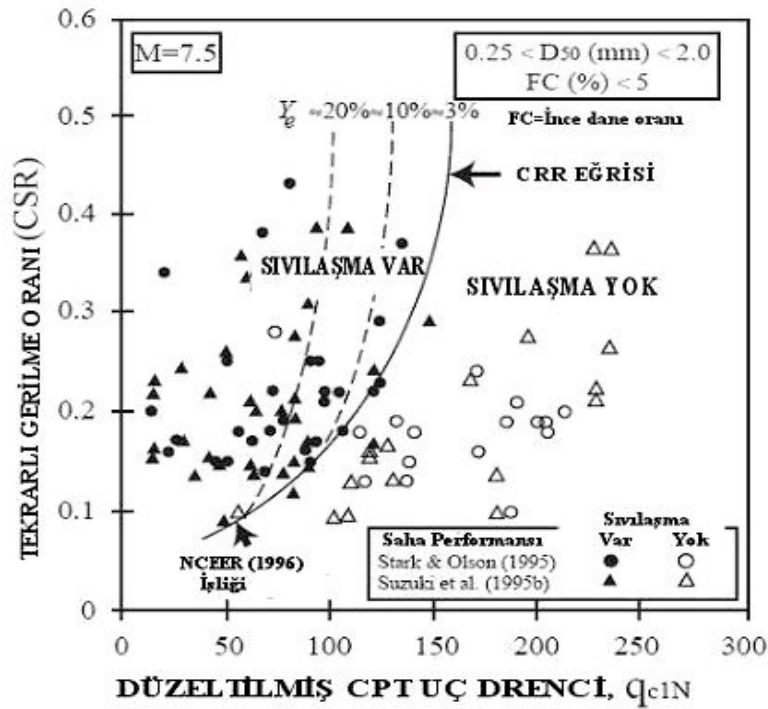
Seed-Idriss yöntemi ile hesaplanan CRR değeri normalize edilerek verilen abak yardımıyla sıvılaşma tehlikesi belirlenir.

Burada;  $P_a = 1$  atm basınç,  $n = 0.5 \sim 1$   $q_c =$  koni penetrasyon uç direnci olmak üzere,

$$C_Q = (P_a / \sigma_v')^n \quad (5-15)$$

$$q_{c1N} = C_Q(q_c / P_a) \quad (5-16)$$

şeklinde normalize edilir [31] (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Tekrarlı Gerilme Oranı (CSR) İle Düzeltilmiş CPT Uç Direnci Arasındaki İlişki [31]

#### 5.4.6. Sıvılaşma Dizini

Bir tabakanın sıvılaşma potansiyelini belirleyebilmek ve özellikle derinliğin bu potansiyel üzerindeki etkilerini göz önüne alınarak, tabakalı ortamlar için aşağıda verilen  $I_L$  sıvılaşma potansiyeli dizini hesaplanır.

$$I_L = (F.W.h)_1 + (F.W.h)_2 + (F.W.h)_3 + \dots + (F.W.h)_n \quad (5-17)$$

n = tabaka sayısıdır.

$$\begin{array}{llll} F = 1 - F_L & F_L < 1 & W = 10 - 0,5.z & z < 20 \text{ metre} \\ F = 0 & F_L > 1 & W = 0 & z > 20 \text{ metre} \end{array}$$

z = tabaka orta noktasının derinliği (metre)

h =  $\Delta z$  = tabaka kalınlığı (metre)

Her tabaka için  $I_L$  değeri tek tek hesaplanır ve yukarıdan aşağı toplamlar alınarak her tabakanın  $I_L$  değeri bulunur. Sıvılaşma dizini kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için genel değerleri için aşağıdaki tablo verilmiştir (Çizelge 5.1).

**Çizelge 5.1.** Sıvılaşma dizinine bağlı sıvılaşma potansiyeli

Sıvılaşma Dizini	Sıvılaşma Olasılığı
0	Çok Düşük
$0 < I_L < 5$	Düşük
$5 < I_L < 15$	Yüksek
$15 < I_L$	Çok Yüksek

#### 5.4.7. Sıvılaşma Tayini İçin Japon Kriterleri

Kritere göre aşağıda verilen durumlar için sıvılaşma olasılığının arttığı verilmiştir.

- Suya doymun zeminlerde düşük ince dane oranı
- Suya doymun zeminlerde düşük SPT-N darbe sayısı
- Yeraltı su tablasının zemin yüzeyine yakınlığı,
- Büyük deprem hareketi

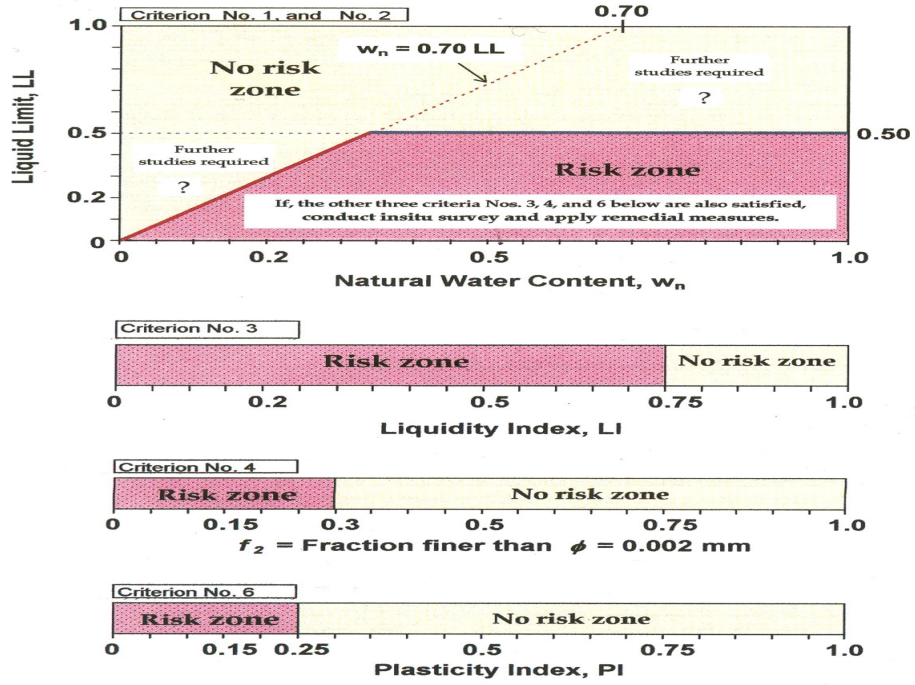
Ayrıca, ince dane oranı %35'den az olan zemin katmanlarının bulunduğu yerlerde sıvılaşma riskinin yoğun olduğu ve özelliklede siltlerde, su içeriğinin likit limite yakın veya plastisitelerinin düşük olduğu durumlarda sıvılaşma potansiyellerinin incelenmesi gerektiği verilmiştir [31].

#### **5.4.8. Kohezyonlu Zeminler İçin Çin Kriterleri**

Kohezyonlu zeminler için verilen Çin kriterlerine göre, aşağıdaki şartlarda sıvılaşma potansiyeli beklenmektedir;

- Kil (dane boyutu 0.005 mm'den küçük olan zemin) oranı %15'den az
- Likit limit %35'den küçük
- Doğal su muhtevası likit limitin %90'ından fazla

Bu kriter kil tanelerinin üst boyutunu 0.002 mm kabul edilerek Andrew ve Martin tarafından yeniden değerlendirilerek modifiye Çin kriterleri olarak literatürde verilmiştir. Şartnamede kil oranının %10'dan az ve 40 nolu elek altında kalan malzemenin likit limit değerinin %32'den büyük veya eşit olması durumunda zeminin sıvılaşmasının muhtemel olduğu, %10'dan fazla kil oranı içeren ve likit limit değerinin %32'den büyük olduğu durumlarda ise çevrimsel kaynaklı sıvılaşma riski potansiyeli olduğu belirtilmiştir [30] (Şekil 5.4).

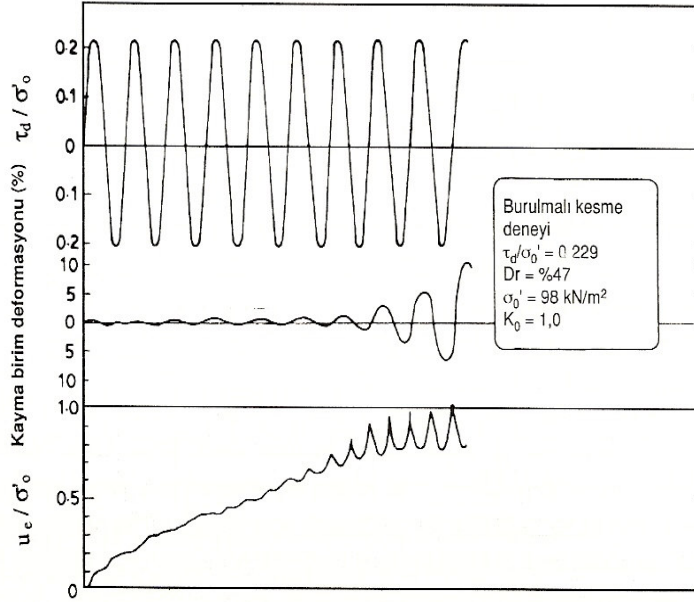


Şekil 5.4. Kohezyonlu Zeminler İçin Çın Kriteri [31]

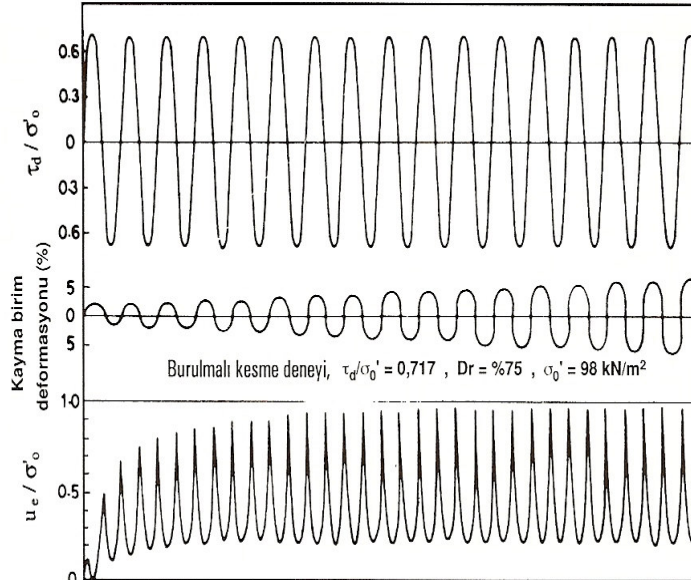
## 5.5. Sıvılaşıma Üzerine Deneysel Çalışmalar

### ➤ Ishihara'nın Laboratuar Verileri

Suya doymun Fuji nehri kumu üzerinde burulmalı kayma deney aleti ile çalışmalar yapılmış ve deneye tabi tutulan içi delik silindirik numunelerin laboratuar deney sonuçları incelenmiştir. Deney için ortak sıkı ( $Dr = \%47$ ) ve sıkı ( $Dr = \%75$ ) olmak üzere iki farklı numune tipi hazırlanmıştır. Devirsel kayma deneyi öncesinde, her iki zemin numunesi  $98 \text{ kN/m}^2$  lik bir çevre basıncına tabi tutulmuştur. Daha sonra, suya doymun kum numuneleri devirsel kayma gerilmesinin uygulanması esnasında drenajsız şartlara tabi tutulmuştur. Deney sonuçları ilk şekilde orta sıkı ( $Dr = \%47$ ) suya doymun kum numuneler için, ikinci şekilde ise sıkı ( $Dr = \%75$ ) suya doymun kum numuneler için verilmiştir. Deney sonuçları; normalize edilmiş devirsel kayma gerilmesi, yüzde kayma deformasyonu ve normalize edilmiş aşırı boşluk suyu basıncı grafikleri ile verilmiştir [29] (Şekil 5.5 ve 5.6).



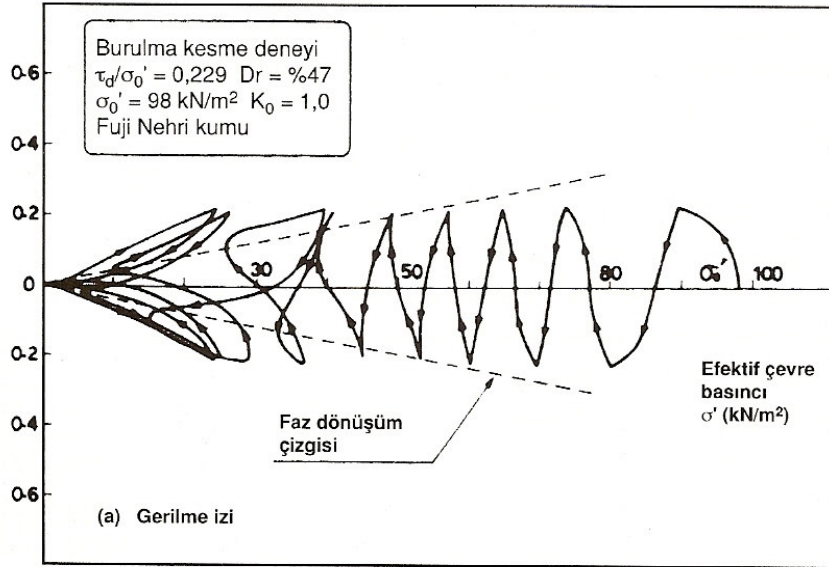
Şekil 5.5. Orta sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29]



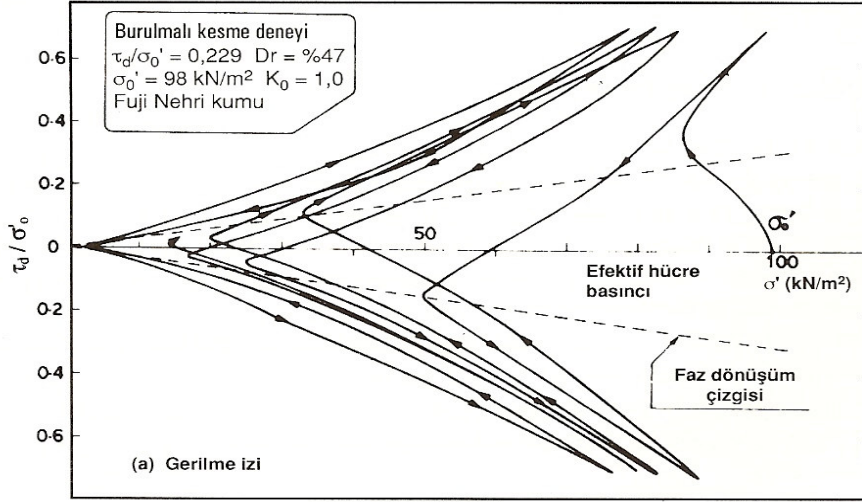
Şekil 5.6. Sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29]

En üstteki grafikte, uygulanan sabit genlikli ve sinüsoidal devirsel kayma gerilmesi görülmektedir. Uygulanan devirsel kayma gerilmesi başlangıç efektif çevre basıncına bölünerek normalize edilmiştir. Orta sıkı kum için  $(\tau_d / \sigma'_{vo}) =$

0,229, sıkı kum için ise  $(\tau_d/\sigma_{v0}') = 0,717$  değerleri ile orta sıkı kum için sıkı kuma göre daha düşük sabit genlikli devirsel kayma gerilmeleri uygulanmıştır. Orta sıkı kum için, kayma deformasyonunda yüzde 20 kadar yüksek, ani ve hızlı bir artış varken, sıkı kum için kayma deformasyonunda ani ve anormal bir artış yoktur. Orta sıkı kum numuneler için efektif gerilme değeri sifıra yaklaştığında kayma deformasyonu aşırı bir artış göstermektedir. Efektif gerilme sıfır olduğu zaman sıvılaşma olayı meydana gelmekte ve sıvılaşma olgusu ile kayma deformasyonunda önemli bir artış gözlenmektedir. Sıkı kum için, devirsel kayma gerilmesi uygulandığı esnasında  $(u_d/\sigma_{v0}') = 1$  'e eşit olmasına rağmen sıkı kumda büyük kayma deformasyonları oluşmamaktadır. Çünkü devirsel kayma gerilmesi tersine çevrildiğinde, sıkı kum artan drenajsız kayma gerilmesi ile sonuçlanan hacimsel büyüme eğilimi göstermekte dolayısıyla da sıkı kum için sıvılaşma yalnızca anlık bir durum olarak meydana gelmektedir. Bu durum için, sınırlı deformasyon potansiyeli ile yüzde yüz pik devirsel boşluk suyu basıncı oranı tanımı yapılmaktadır. [29].



Şekil 5. 7. Orta sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29]



Şekil 5.8. Sıkı kum için burulmalı deney sonuçları [29]

Şekillerden de anlaşılacağı gibi, orta sıkı ( $Dr = \%47$ ) kum için gerilme izi, sabit genlikli kayma gerilmesinin her bir ilave devri ile sola hareket ederken, kayma direncinde kalıcı bir kayıp oluşmaktadır ancak sıkı kumda ( $Dr = \%75$ ) sabit genlikli kayma gerilmesinin ilave devirlerinin uygulanışı esnasında kayma direncinde kalıcı bir kayıp yoktur [29] (Şekil 5.7 ve 5.8).

### ➤ Seed ve Lee'nin Laboratuvar Verileri

Deney için suya doymuş, farklı boşluk oranlarında Sacramento Nehri kumu numuneleri hazırlanmış ve öncelikle 100 kPa'lık bir efektif çevre basıncına tabi tutulduktan sonra; drenajsız şartlarda üç eksenli deney düzeneğinde devirsel deviator gerilme uygulanmıştır. Kum numuneleri devirsel deviator gerilmesi  $\sigma_{dc}$ 'nin farklı değerlerine tabi tutulmuş ve başlangıç sıvılaşması ile yüzde 20 eksenel deformasyon üretmek için gerekli deviator gerilme devirlerinin sayısı kaydedilmiştir [29].

Laboratuvar verileri sonucunda görülmüştür ki; aynı başlangıç boşluk oranı ve aynı efektif çevre basıncındaki kumda devirsel deviator gerilme ne kadar yüksek ise, sıvılaşma için gerekli başlangıç deviator gerilmenin devir sayısı o kadar düşüktür. Aynı efektif çevre basıncındaki kumda, zemin ne kadar sıkı ise sıvılaşmaya karşı dirençte o kadar büyüktür. Böylece, sıkı bir zeminde, gevşek

durumdaki aynı zemine kıyasla, başlangıç sınıvlaşmasının oluşması için daha yüksek bir devirsel deviatör gerilmeye veya deviatör gerilmenin daha çok devrine ihtiyaç vardır [29].

## 5.6. Sınıvlaşmaya Karşı Zemin İyileştirme Yöntemleri

Depremler sırasında yapılarda ortaya çıkan hasarların ana sebeplerinden biri zeminin sınıvlaşması sonucu temellerde meydana gelen deplasmanlardır. Sınıvlaşma sonucu oluşan yüksek oturma veya dönme hareketi ile büyük hasarlar oluşur. Bu hasarların önlenmesi için sınıvlaşma potansiyeline sahip zeminlerde temel zemininin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Sınıvlaşma potansiyeli bulunan gevşek kumlu zeminlerin titreşimli sıkıştırma yöntemleri ile kuru birim hacim ağırlığı artırma yöntemi en güvenilir ve en çok uygulanan yoldur. Genel olarak uygulanan bu yöntemler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Vibrasyonlu (titreşimli) yöntemler
  - Vibroflotasyon
  - Vibrasyonlu sondalar ile sıkıştırma
  - Patlatma
- Deplasman Teknikleri
  - Kompaksiyon Kazıkları
  - Ağırlık Düşürme
  - Kompaksiyon Enjeksiyonu
- Karıştırma Teknikleri
  - Kireç kolonları
  - Derin Karıştırma
  - Jet Enjeksiyonu
- Diğer Yöntemler
  - Zemini değiştirme ve yapısal dolgular
  - Çakıl dren kuyuları
  - Y.A.S.S. düşürme yöntemleri (kuyular, hendekler, vb.)
  - Permeasyon (Sızdırma) Enjeksiyonu

Vibrasyonlu yöntemler çok kirli olmayan kohezyonsuz zeminler için uygundur. Ancak zemindeki ince oranı fazla ise vibrasyon yöntemleri etkisini kaybetmektedir. Üçüncü grup yöntemlerde bir bağlayıcı katkı malzemesiyle (çimento, kireç gibi) zemin karıştırılarak tanecikler arası bağların mukavemeti artırılır. Ayrıca boşluk suyu basınçlarının zemine etkisi izole edilerek sıvılaşma önlenmektedir [31].

Zemin iyileştirme yöntemleri dışında sıvılaşma için şu yöntemlerde önerilmektedir:

- Kazıklı Temel kullanımı
- Yapı etrafına diyafram duvar, palplanş perdelerle yalıtımı

Sıvılaşma potansiyelinin irdelenip eğer risk görülüyorsa bölge ve proje için en uygulanabilir iyileştirme yöntemi seçilmelidir. Her yönteminin uygulama alanı farklılıklar gösterdiği için zemin özellikleri belirlenip, proje kriterleride göz önüne alınarak sıvılaşma tehlikesi önlenmelidir.

## 6. BİLGİSAYAR ORTAMINDA ZEMİN DEFORMASYONUN MODELLENMESİ

### 6.1. Kullanılacak Paket Program Hakkında Bilgi

Dinamik yükler altında zemin deformasyonunun modellenmesi için Plaxis v8.4 paket programı kullanılmıştır. Plaxis, deformasyon ve stabilite analizi için geoteknik mühendisliğinde kullanılan ve sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir paket programdır. Plaxis programı ile statik analizler için 2D ve 3D modelleme yapılabilirken dinamik analizler ancak 2D modelleme ile yapılabilmektedir.

#### 6.1.1. Statik Modül

Plaxis programında genel olarak 2D statik modelleme üç bölümden oluşur. İlk olarak girdi bölümünde geometri oluşturulur, hesaplama fazları belirlenir ve son olarak sonuçlar irdelenir.

Analiz edilecek her yeni proje için ilk olarak geometri modelini oluşturmak gerekir. Noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan geometri modeli gerçek bir problemi temsil eder. Bir geometri modeli farklı zemin tabakalarını, yapısal elemanları, inşa aşamalarını ve yükleri kapsar. Problemin sonuçlarını etkilememesi için seçilen modelin sınırlarını yeterince geniş olmalıdır. Noktalar, çizgiler ve hücreler ile geometri oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar ağı otomatik olarak oluşur. Plaxiste giriş, fare ve klavyenin kombinasyonu ile yapılır. Seçimler ise yuvarlak butonlar, onay kutuları veya combo box ile yapılabilir. Bir problemin çözümü genel olarak şu şekilde yapılır:

Girdi (input) aşaması:

- Program başlatıldıktan sonra projenin genel özellikleri, kullanılacak birimler tanımlanır ve çizim bölgesinde geometri tanımlanır.
- Malzeme özellikleri “Material Sets” ile belirtildikten sonra sonlu elemanlar ağı “Mesh” butonu ile otomatik olarak yaptırılır. Yeraltı

suju gibi başlangıç koşulları “İnitial Conditions ” bölümünde oluşturulur.

Hesap (calculations) aşaması:

- Kazıklar, radye temel ve uygulanacak yükler aşamalı olarak tanımlanır.
- Yük-deplasman grafiği için noktalar işaretlendikten sonra “Calculate” butonuna basılır.
- Dosya kaydedilir.

Çıktı (Output) aşaması:

- Hesap tamamlandığını belirten her phase için (√) işaretinin çıkması ile sonuçları görmek için output kısmına geçilir. “Output...” butonu ile output programı açılır. İlk olarak ekrana sistemin son hesap kademesinde oluşmuş deforme ağı gelir.
- “Deformations” ve “Stresses” menülerinden farklı sonuçlar görüntülemek üzere değişik opsiyonlar seçilebilir.
- “Curves” butonu ile hesaplama aşamasında belirlenen özel noktalar için deformasyon grafikleri çizdirilir.

### 6.1.2. Dinamik Modül

Zeminler yalnızca statik yükler değil aynı zamanda dinamik yüklerin etkisine de maruz kalabilir. Zeminlere etkiyen dinamik yükler Plaxis programı ile titreşimler şeklinde modellenmektedir. Bu titreşimler depremler gibi doğal etkiler sonucu olabileceği gibi, zemine kazık çakımı, araç hareketi veya makine hareketi gibi yapay etkiler sonucu oluşabilir. Dinamik analizde titreşim frekansı, zemin atalet hali ve zaman değişimi etkileri göz önüne alınarak lineer elastik model yöntemi kullanımı ile çözüm yapılmaktadır. Analizde drenajsız zemin davranışı için artık boşluk basıncı göz önüne alınırken sıvılaşma olgusu tam olarak modellenememektedir.

Dinamik modülde statik modüle göre modellemede farklar şunlardır. İlk olarak girdi aşamasında yükler veya yer değiştirme uygulama noktasına verildikten sonra yükler ana menüsünden dinamik etki işaretlenerek belirlenen yükleme için dinamik etki aktif hale getirilir. İkincil olarak ise hesaplama aşamasında, dinamik yükleme çarpanlar bölümünden etkinleştirilip, karakteristikleri belirlenir.

### 6.1.3. Deprem Etkisinin Modellenmesi

Bu bölümde bir zemin üzerine deprem etkisinin uygulanarak dinamik modellemenin oluşturulması ve çıktıların alınması süreci aşama aşama anlatılacaktır.

Girdi (input) aşaması:

- Program başlatıldıktan sonra ilk olarak “General Settings” penceresinde projenin genel özellikleri ve kullanılacak birimler tanımlanır.
- Çizim bölgesinde geometri oluşturulur.
- Deprem etkisi, “Prescribed Displacement” butonu ile çizim bölgesinin tabanına uygulanır.
- Yükler ana menüsünden dinamik etki bölümünden “Prescribed Displacement” işaretlenerek yükleme aktif hale getirilir.
- Yükler ana menüsünden “Absorbent Boundary” ile çizim alanı deprem dalgalarının emilimine karşı sınırlandırılır.
- Malzeme özellikleri “Material Sets” ile belirtildikten sonra sonlu elemanlar ağı “Mesh” butonu ile otomatik olarak yaptırılır.
- Yeraltı suyu gibi başlangıç koşulları “Initial Conditions ” bölümünde oluşturulur.

Hesap (calculations) aşaması:

- Eğer varsa statik yükleme aşamaları tanımlanır.

- Dinamik yükleme için öncelikle “Dynamic Analysis” seçeneği belirlenir.
- Dinamik analiz için zaman aralığı girilir.
- Tanımlama butonu ile çarpanlar bölümü açılır.
- $\Sigma$ -Mdisp çarpanı bölümü tıklanır ve açılan Loading-Displacements kutucuğundan harmonik yükleme çarpanı seçeneği altındaki girdiler tanımlanır veya data dosyası yükleme seçeneği ile kayıtlı bir “.smc” deprem özellikleri tanımlanır.
- Yük-deplasman grafiği için noktalar işaretlendikten sonra “Calculate” butonuna basılır.
- Dosya kaydedilir.

#### Çıktı (Output) aşaması:

- “Output...” butonu ile output programı açılır. İlk olarak ekrana sistemin son hesap kademesinde oluşmuş deforme ağı gelir.
- Hız ve ivme değerleri ile diğer farklı sonuçlar görüntülenmek istenirse menülerden değişik opsiyonlar seçilebilir.
- “Curves” butonu ile hesaplama aşamasında belirlenen özel noktalar için istenilen grafikler çizdirilir.

## 7. ÖRNEK MODELLEME ÇALIŞMALARI

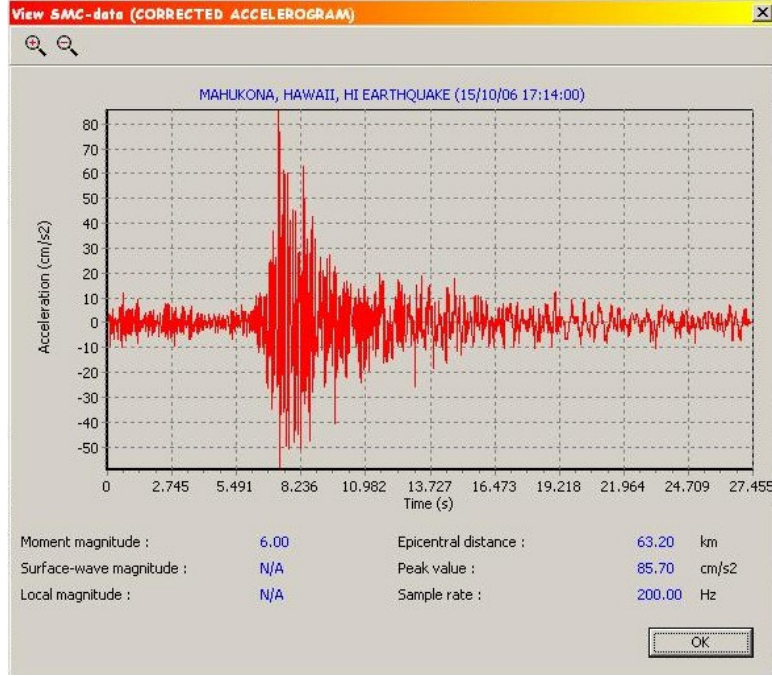
Bu bölümde farklı durumlar için dinamik deprem analizleri modellenerek çıkan sonuçlar değerlendirilip, bir korelasyon oluşturulmaya çalışılmıştır. Modellemelerde kullanılan zemin parametreleri literatür taramasına, Eskişehir ili için geçmişte yapılan etüt çalışmalarına ve mühendislik kabullerine göre belirlenmiştir. (Çizelge 7.1)

**Çizelge 7.1.** Paket program girdileri [32]

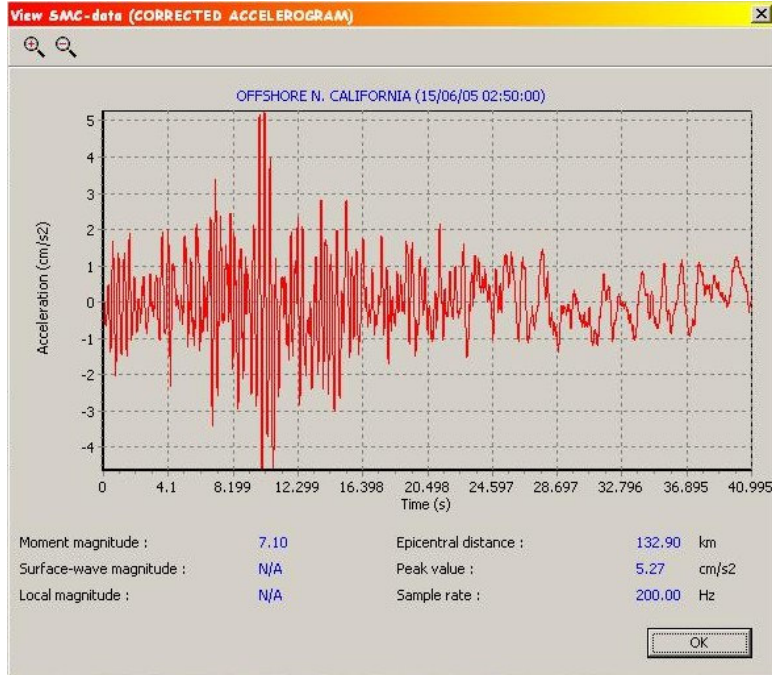
Tabaka İsmi	Kil-1 (NCC)	Kil-2 (OCC)	Siltli Kil	Gevşek Kum
SPT N <sub>30</sub>	5	12	6	5
Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{dry}=17.4$ $\gamma_{sat}=18.4$	$\gamma_{dry}=18.2$ $\gamma_{sat}=18.9$	$\gamma_{dry}=18.0$ $\gamma_{sat}=18.5$	$\gamma_{dry}=19.0$ $\gamma_{sat}=19.5$
C (kN/m <sup>2</sup> )	12.5	38.0	22.5	10.0
$\phi$ (°)	5	6	6	26
k <sub>x</sub> (m/gün)	0,00001	0,0001	0,00002	0,005
k <sub>y</sub> (m/gün)	0,00001	0,0001	0,00002	0,005
E (kN/m <sup>2</sup> )	3000	18000	7500	15000
$\nu$	0,25	0,30	0,30	0,30

Deprem etkisi için veriler, Amerikan jeolojik araştırma kurumu web sitesinden ivme kayıtları olarak alınmıştır. Bu kayıtların Plaxis dinamik modül programında kullanılabilmesi için “.smc “ uzantılı kayıtlar olarak alınması gerekmiştir. Ülkemizde meydana gelen deprem karakteristiklerine uygun olması bakımından analizlerde 15.10.2006 tarihi 17:14 saatinde meydana gelen Havai depremi ile 15.06.2005 tarihi 02:50 saatinde meydana gelen Kuzey Kaliforniya depremi kayıtları kullanılmıştır. Havai depremi karakteristik olarak Eskişehir ili için 20.02.1956 yılında meydana gelen ve hasarlara sebep olan Mw = 5.9 şiddetindeki deprem ile benzerlikler göstermektedir. Kuzey Kaliforniya depremi

ise 17.08.1999 Mw: 7.4 Gölçük depremi ile enerji boşalımlarının olduğu faylar açısından büyük benzerlikler göstermektedir. (Şekil 7.1 ve 7.2)



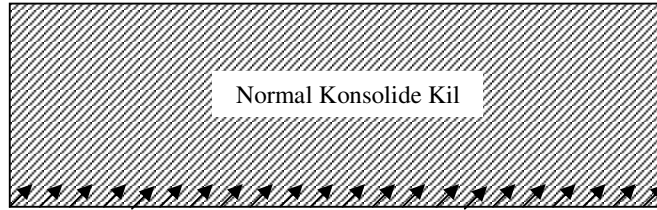
Şekil 7.1. 15.10.2006 Havai depremi [33]



Şekil 7.2. 15.06.2005 Kaliforniya depremi [33]

## Örnek-1

İlk örnek modelleme çalışması için Şekil 7.3' de zemin profili verilen normal konsolide kil tabakası üzerine kuru ve doymuş haller için 5 saniye süre ile  $M_w = 6.0$  Havai depremi ile  $M_w = 7.1$  Kaliforniya depremi etkisi verilerek sonuçlar irdelenmiştir. Sonuçlar ayrıca grafik olarak da verilmiştir (Şekil 7.3-7.9) (Çizelge 7.2-7.5).



Şekil 7.3. Örnek-1 zemin profili

Çizelge 7.2. Örnek-1 modelleme sonuçları-a

NK Kil $M_w$ : 6.0 (5 saniye)			
Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
2.5033E-07	3.21E-15	5.01E-5	537.32

Çizelge 7.3. Örnek-1 modelleme sonuçları-b

NK Kil $M_w$ : 7.10 (5 saniye)			
Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.77879	0.29645	2.72	582.8

Çizelge 7.4. Örnek-1 modelleme sonuçları-c

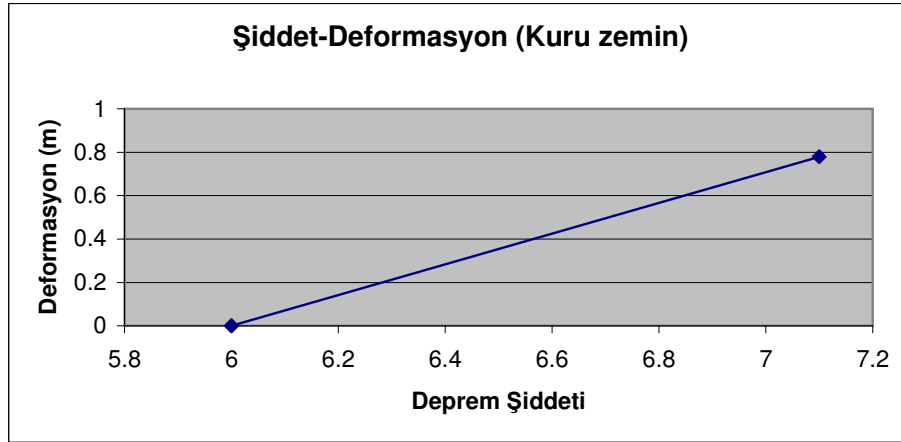
NK Kil Mw: 6.0 (5 saniye) Suya Doygun zemin

Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.65208	4.42E-15	3.14E-5	282.73

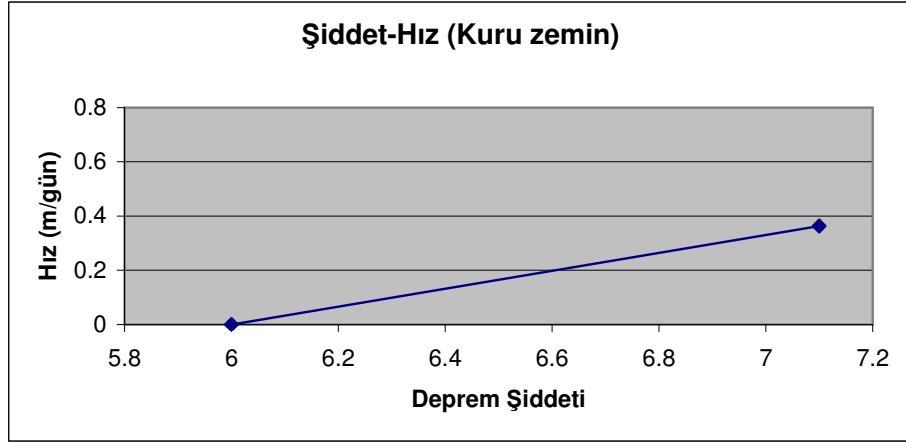
Çizelge 7.5. Örnek-1 modelleme sonuçları-d

NK Kil Mw: 7.10 (5 saniye) Suya Doygun zemin

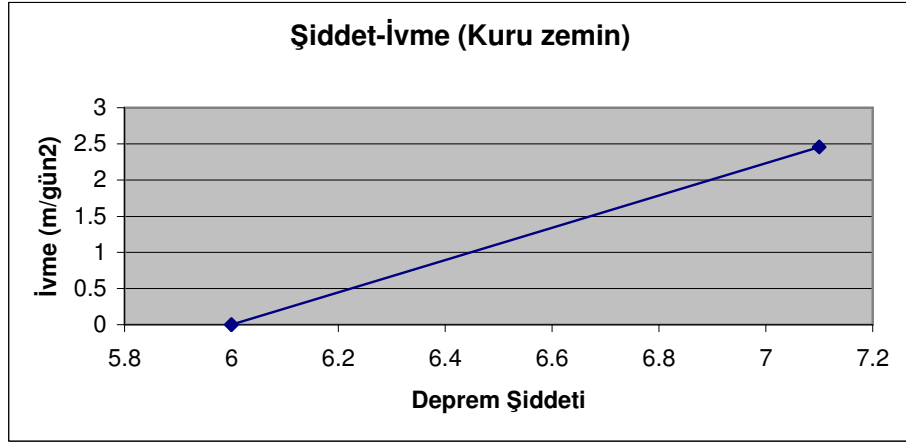
Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.77936	0.36341	2.46	298.1



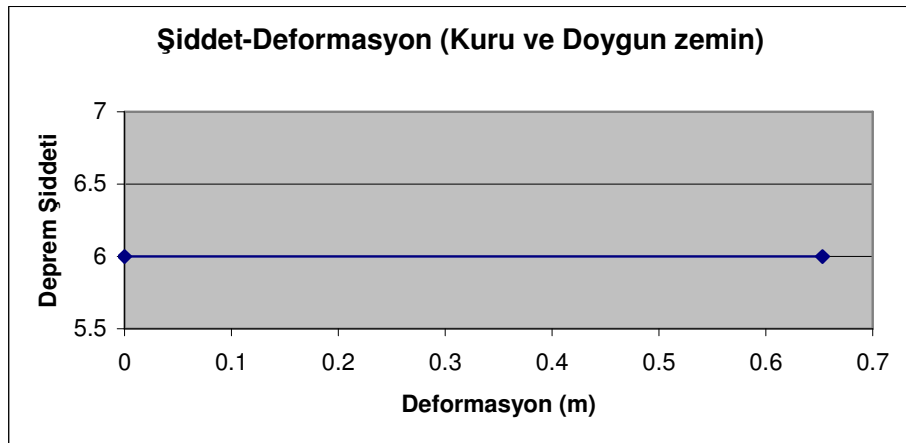
Şekil 7.4. Örnek-1 kuru zemin deprem şiddeti-deformasyon



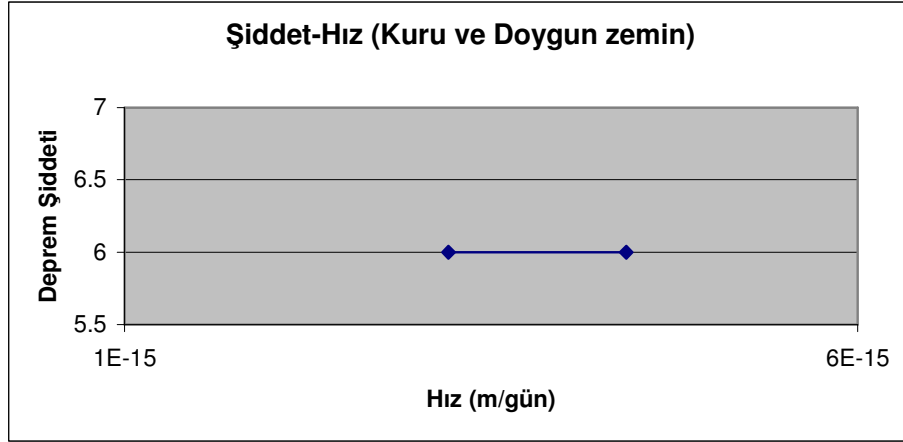
Şekil 7.5. Örnek-1 kuru zemin deprem şiddeti-hız



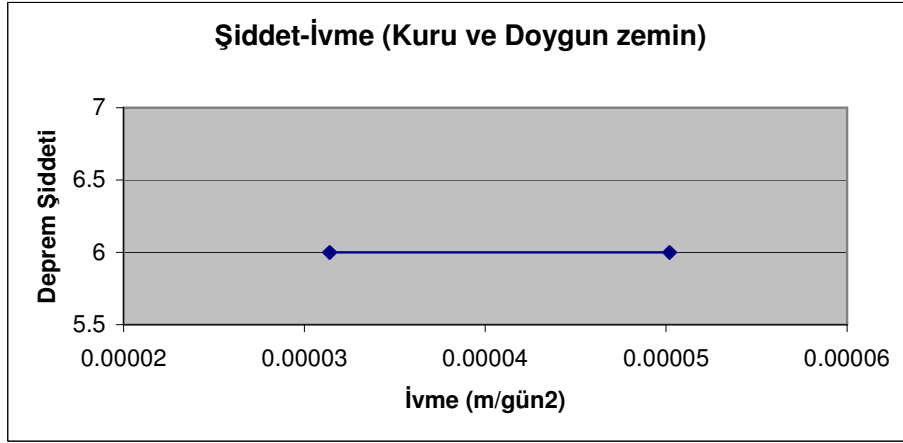
Şekil 7.6. Örnek-1 kuru zemin deprem şiddeti-ivme



Şekil 7.7. Örnek-1 kuru ve doygun zemin deprem şiddeti-deformasyon



Şekil 7.8. Örnek-1 kuru ve doygun zemin deprem şiddeti-hız

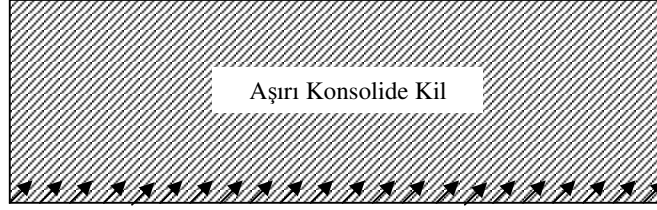


Şekil 7.9. Örnek-1 kuru ve doygun zemin deprem şiddeti-ivme

Bu sonuçlar göstermektedir ki; aynı deprem büyüklüklerinde zeminlerin doygun olması meydana gelen deformasyonlarda artışa neden olmaktadır. Ancak deprem hızının doygun zeminde sıkı zemine göre büyük olduğu ancak ivme değerlerinde ise bu durumun tersi olduğu tespit edilmiştir.

## Örnek-2

İkinci örnek modelleme çalışması için Şekil 7.10' da zemin profili verilen aşırı konsolide kil tabakası üzerine kuru ve doymun haller için 5 saniye süre ile  $M_w = 7.1$  Kaliforniya depremi uygulanmıştır (Şekil 7.10-7.13) (Çizelge 7.6-7.7).



Şekil 7.10. Örnek-2 zemin profili

Çizelge 7.6. Örnek-2 modelleme sonuçları-a

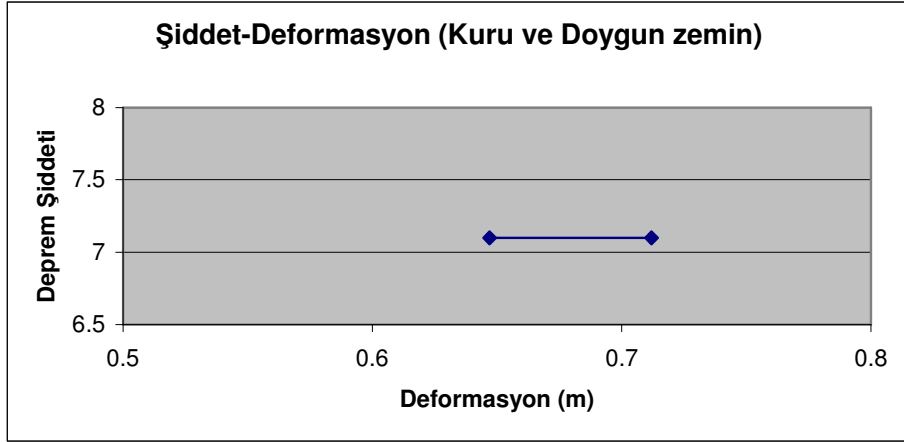
A.K Kil  $M_w$ : 7.10 (5 saniye)

Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.6471	0.229	6.12	678.26

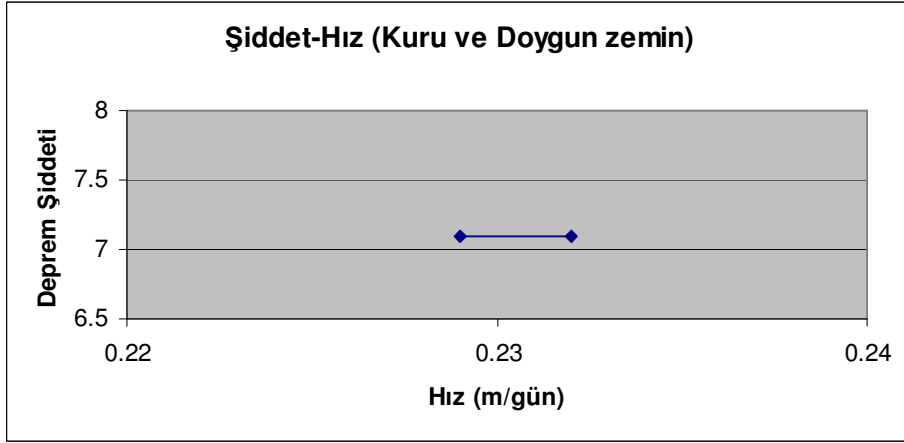
Çizelge 7.7. Örnek-2 modelleme sonuçları-b

A.K Kil  $M_w$ : 7.10 (5 saniye) Suya Doymun zemin

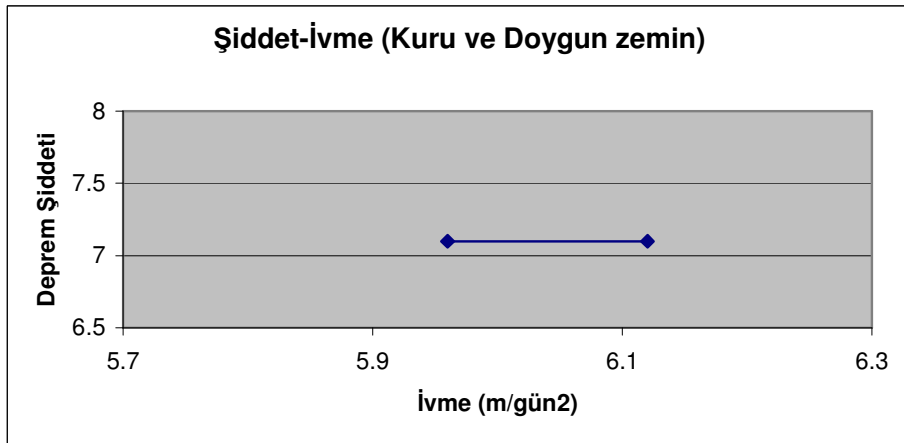
Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.71123	0.232	5.96	592.04



Şekil 7.11. Örnek-2 deprem şiddeti-deformasyon



Şekil 7.12. Örnek-2 deprem şiddeti-hız

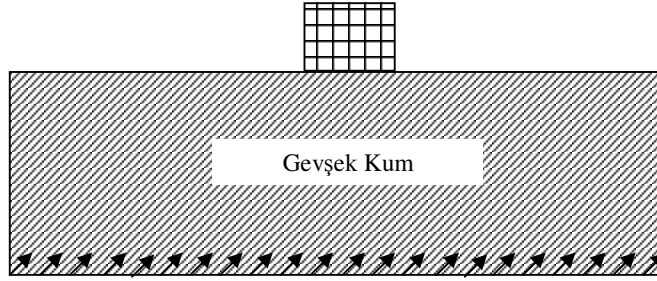


Şekil 7.13. Örnek-2 deprem şiddeti-ivme

Bu sonuçlar irdelendiğinde anlaşılmaktadır ki; deprem büyüklükleri farklı zeminlerde farklı deformasyonlara neden olmaktadır. Yine aynı şekilde hız ve ivme değerlerinde de değişmektedir.

### Örnek-3

Üçüncü örnek modelleme çalışması için Şekil 7.13' de zemin profili gevşek kum tabakası üzerine doymun hal için 45 saniye süre ile  $M_w = 7.1$  Kaliforniya depremi etkisi verilmiş ve 8 katlı bina bulunduğu düşünülmüştür (Şekil 7.14) (Çizelge 7.8).



Şekil 7.14. Örnek-3 zemin profili

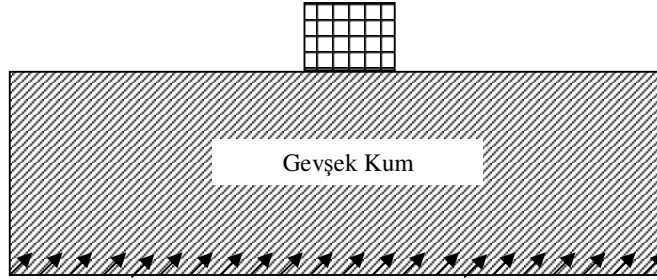
Çizelge 7.8. Örnek-3 modelleme sonuçları

Gevşek Kum 8 katlı bina  $M_w: 7.10$  (45 saniye)

Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
2.77	1.59	5.85	482.64

#### Örnek-4

Dördüncü örnek modelleme çalışması için Şekil 7.14' de zemin profili verilen gevşek kum tabakası üzerine doygun hal için 5 saniye süre ile  $M_w = 6.0$  Havai depremi etkisi verilmiştir. Ayrıca 5 katlı bina yükü bulunduğu düşünülmüştür (Şekil 7.15) (Çizelge 7.9).



Şekil 7.15. Örnek-4 zemin profili

Çizelge 7.9. Örnek-4 modelleme sonuçları

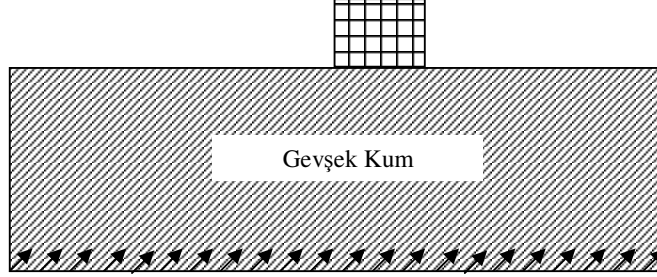
Gevşek Kum 5 katlı bina yükleme  $M_w: 6.0$  (5 saniye)

Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.23177	0.10903	1.96	429.11

Bu sonuçlar göstermektedir ki; depremler farklı zeminlerde ve farklı yapı tiplerinde yıkıcı deformasyonlara neden olabilmektedir. Aynı şekilde hız ve ivme değerlerinde de zemin türüne, depreme ve düşey yüke bağlı olarak değişmektedir.

#### Örnek-5

Beşinci örnek modelleme çalışması için Şekil 7.15' de zemin profili verilen gevşek siltli kum tabakası üzerine doygun hal için 5 saniye süre ile  $M_w = 6.0$  Havai depremi etkisi verilmiştir. Ayrıca 5 katlı bina yükü bulunduğu düşünülmüştür (Şekil 7.16-7.19) (Çizelge 7.10-7.11).



Şekil 7.16. Örnek-5 zemin profili

Çizelge 7.10. Örnek-5 modelleme sonuçları-a

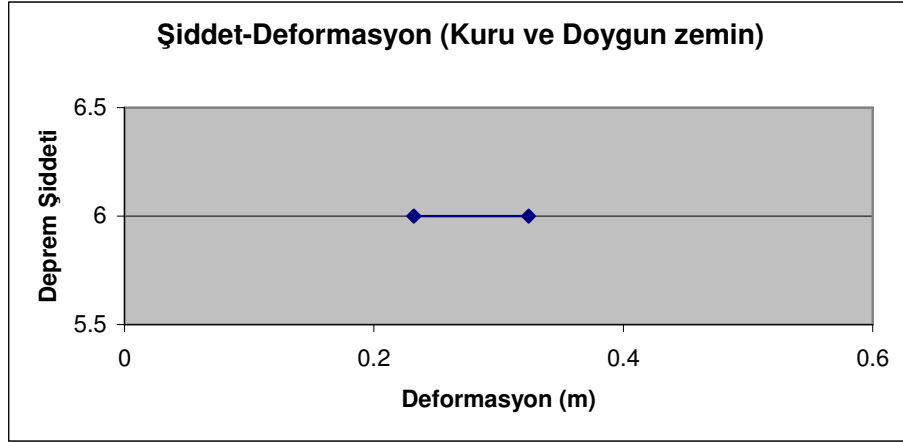
Gevşek Kum  $M_w: 6.0$  (5 saniye)

Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.1866	0.26526	12.64	328.55

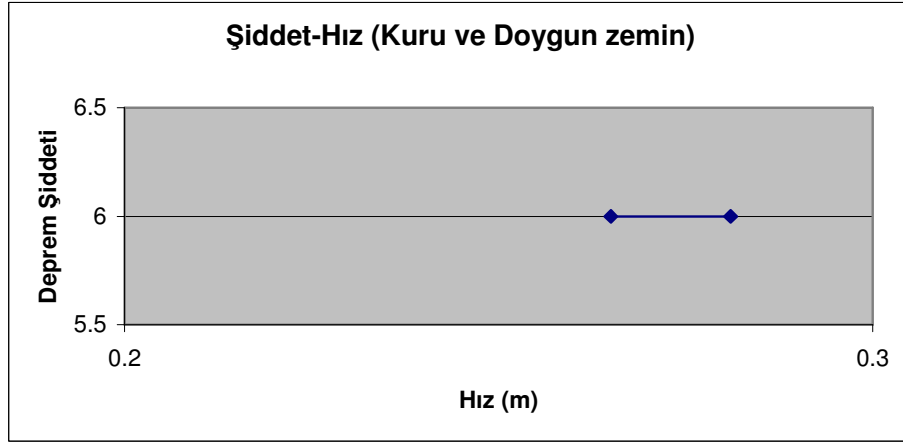
Çizelge 7.11. Örnek-5 modelleme sonuçları-b

Gevşek Kum  $M_w: 6.0$  (5 saniye) Suya Doygun zemin

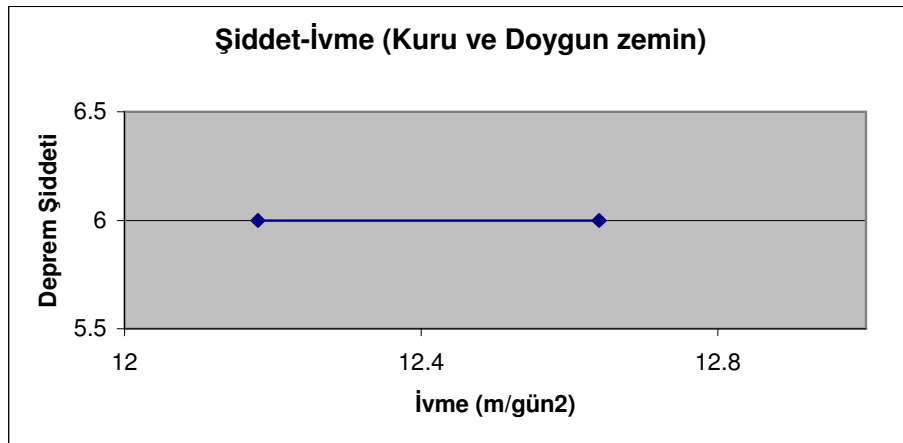
Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.3424	0.28084	12.18	252.28



Şekil 7.17. Örnek-5 deprem şiddeti-deformasyon



Şekil 7.18. Örnek-5 deprem şiddeti-hız

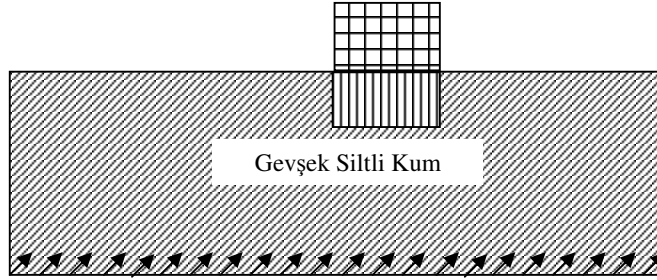


Şekil 7.19. Örnek-5 deprem şiddeti-ivme

Bu modelleme sonuçları Eskişehir ilinde beklenen bir deprem sonucu oluşabilecek deformasyonları, hız ve ivme değerlerini göstermektedir. Eskişehir ili zemin özellikleri ve genel bina tercihleri dikkate alındığında zeminin doygunluğunun da deprem sonrası oluşacak deformasyon üzerindeki etkisi de görülmektedir.

### Örnek-6

Bu örnek modelleme çalışması için Şekil 7.19' da zemin profili verilen gevşek siltli kum tabakası üzerine doygun hal için 5 saniye süre ile  $M_w = 6.0$  Havai depremi etkisi verilmiştir. Ayrıca 5 katlı bina yükü bulunduğu düşünülmüştür ve binanın altında jet-grout kolonları bulunduğu varsayımı ile taş kolon iyileştirme yöntemi uygulandığı varsayımı yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 7.20-7.23) (Çizelge 7.12-7.13).



Şekil 7.20. Örnek-6 zemin profili

Çizelge 7.12. Örnek-6 modelleme sonuçları-a

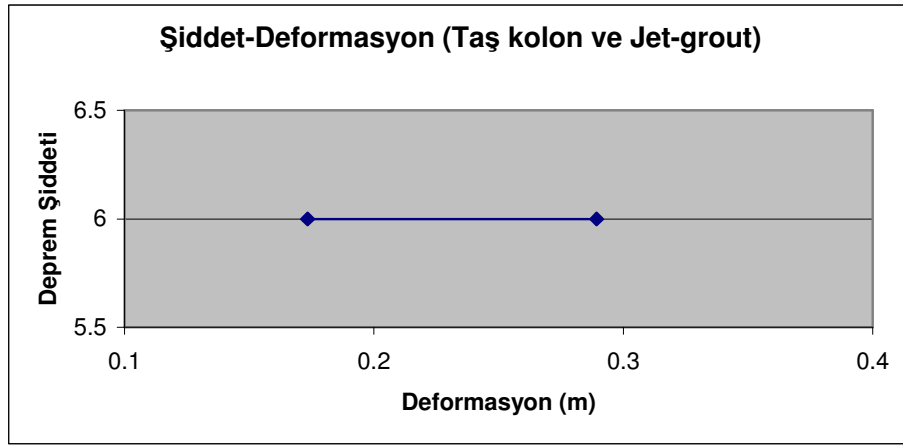
Gevşek Siltli Kum  $M_w: 6.0$  (5 saniye) (taş kolon)

Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.2893	0.2616	12.16	358.16

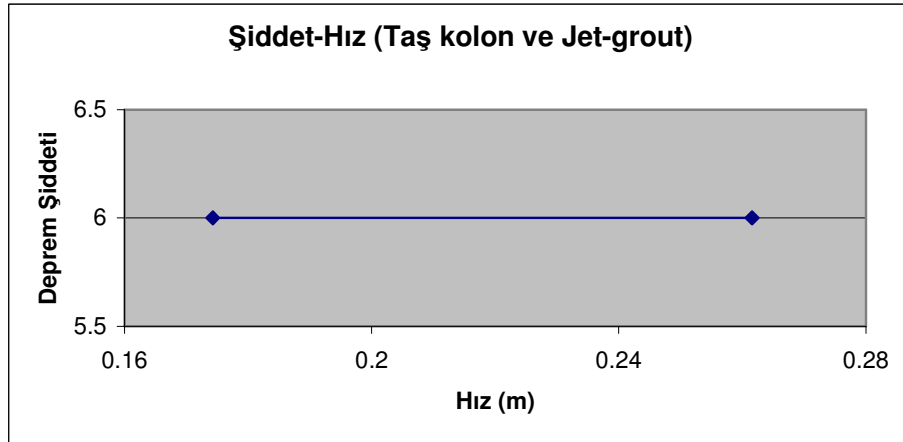
**Çizelge 7.13.** Örnek-6 modelleme sonuçları-b

Gevşek Siltli Kum Mw: 6.0 (5 saniye) (jet-grout)

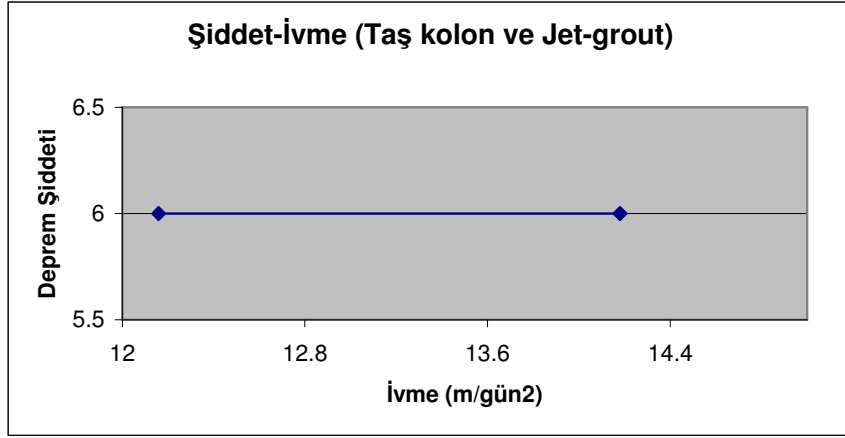
Deformasyon (m)	Hız (m/gün)	İvme (m/gün <sup>2</sup> )	Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0.1734	0.1743	14.18	402.65



**Şekil 7.21.** Örnek-6 deprem şiddeti-deformasyon



**Şekil 7.22.** Örnek-6 deprem şiddeti-hız

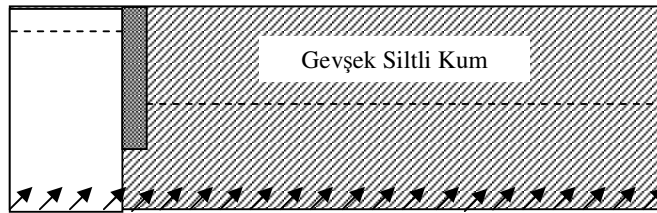


Şekil 7.23. Örnek-6 deprem şiddeti-ivme

Bu modelleme sonuçları Eskişehir ilinde beklenen bir deprem sonucu taş kolon ya da jet-grout zemin iyileştirme yöntemi uygulanmış bina zemini için oluşabilecek deformasyonları, hız ve ivme değerlerini göstermektedir. Jet-grout yöntemi; taş kolon yöntemine göre deprem etkisi altında daha etkili bir metod olmasına karşın üst yapıyı etkileyebilecek deformasyonlarda oluşmaktadır.

### Örnek-7

Bu örnek modelleme çalışması için Şekil 7.23' de zemin profili verilen bir akarsu kaynağı kenarında gevşek siltli kum tabakasını tutan palplanj yapısına 2, 5 ve 20 saniye süre ile  $M_w = 6.0$  Havai depremi etkisi verilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 7.24-7.25) (Çizelge 7.14).

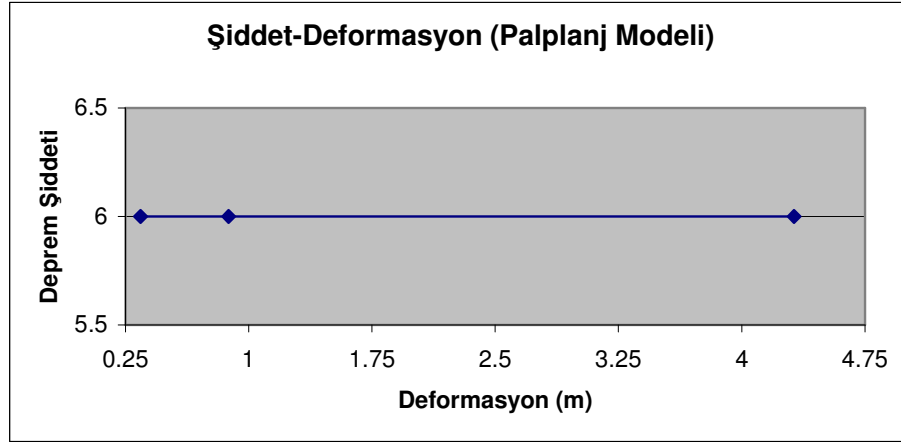


Şekil 7.24. Örnek-6 zemin profili

**Çizelge 7.14.** Örnek-7 modelleme sonuçları

Palplanj Modeli Mw: 6.0

Deformasyon (m) (2 saniye)	Deformasyon (m) (5 saniye)	Deformasyon (m) (20 saniye)
0.3417	0.8793	4.32



**Şekil 7.24.** Örnek-7 deprem şiddeti-deformasyon

Bu modelleme sonuçları bir akarsu kaynağı kenarında gevşek siltli kum tabakasını tutan palplanj yapısı için farklı sürelerde etkiyen aynı şiddetteki deprem ile oluşabilecek deformasyon değerlerini göstermektedir. Süre arttıkça deformasyonlarda artmaktadır.

## 8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Deprem, hazırlıksız yakalanıldığında büyük yapısal hasarlara ve ölümlere sebep olan bir doğa olayıdır. Herhangi bir ön uyarı olmadan meydana gelmesi sebebiyle deprem, doğal afetler arasında kendine has farklı bir özelliğe sahiptir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de geçmiş çağlardan bu yana hasar getiren depremler süre gelmekte ve büyük felaketler yaşanmaktadır. Bu felaketlerin en az etki ile şekilde atlatılabilmesi için detaylı araştırmaların yapılması zorunludur.

Yapılan bu tez çalışması sonucunda şu değerlendirmeler yapılabilir;

- Deprem kaynaklı olarak zeminler üzerinde oluşan dinamik etkiler yerel zemin koşullarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Aynı deprem büyüklükleri; farklı mühendislik yapılarında ve farklı zemin türlerinde farklı hareketlere, deformasyonlara ve ivme değerlerine sebep olmaktadır.
- Deprem hızları ve deprem ivmelerinin sıkı zeminler ile zayıf gevşek zeminler içerisindeki durumları incelendiğinde deprem hızının gevşek zeminde sıkı zemine göre büyük olduğu ancak ivme değerlerinde ise bu durumun tersi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca periyot aralıkları da sıkı zeminlerde daha kısadır.
- Deprem kaynaklı olarak zeminler üzerinde oluşan dinamik deformasyonlar hakkında kesin yargılar için deneysel çalışmalara da ihtiyaç vardır.
- Dinamik etkiler sonucu oluşan deformasyonlara karşı gerçekçi önlemlerin alınabilmesi için geçmiş deprem karakteristiklerinin ve yerel zemin koşullarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir.
- Depreme karşı güvenilir bir yapılaşma için imar planlarının hazırlanmasından önce, sahanın yapılaşma açısından uygunluk derecesi mutlaka araştırılmalıdır. Ayrıca bina etkileşimini önlemek için binaların yerleştirilmesine dikkat edilmelidir.
- Geçmiş deprem karakteristiklerinin bilinmesi, yapısal tasarım içinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle sivilaşma riski yüksek bölgelerde olası deprem etkileri belirlenmeli ve hem yapısal çözüm

önlemleri hem de yapılaşma alanlarında zemin iyileştirme önlemleri alınmalıdır.

- Zemin iyileştirme metotlarının seçiminde yerel zemin koşulları ve deprem karakteristiklerine dikkat edilmeli, iyileştirme metotlarının deprem etkisi altındaki davranışları mutlaka incelenmelidir. Ayrıca iyileştirme sonrasında uygulama alanında mutlaka test yapılmalıdır.
- Eskişehir ili için ekonomiklik yönü nedeniyle tercih edilen zemin iyileştirme metotlarından, taş kolon metodunun deprem dinamik etkisi karşısında yetersiz kaldığı, jet-grout metodunun kısmen yeterli olduğu, ancak özellikle sıvılaşma riski bulunan derinliklere mutlaka inilmesi gerektiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.deprem.gov.tr/deprem.htm>
- [2] Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I., Sokolov, V.N., “The liquefaction of clayey soils under cyclic loading,” *Engineering Geology*, **86**, 70-79, 2006
- [3] Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th., “Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part II: cyclic axial preloading,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 789-794, 2004
- [4] Elgamal, A., Yang, Z., Para, E., “Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 259-268, 2002
- [5] Naeini, S.A., Baziar, M.H., “Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of sand,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 181-193, 2004
- [6] Yang, Z., Elgamal, A., “Influence of permeability of liquefaction-induced shear deformation,” *ASCE*, **128**, 720-732, 2002
- [7] Hwang, H., Wang, L., Yuan, Z., “Comparison of liquefaction potential of loess in Lanzhou, China, and Memphis,USA,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **20**, 389-398, 2000
- [8] Lancelot, L., Shahrour, I., Al Mahmoud, M., “Instability and static liquefaction on proportional strain paths for sand at low stresses,” *ASCE*, **130**, 1365-1373, 2004
- [9] Kokusho, T., Hara, T., Hiraoka, R., “Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations,” *ASCE*, **130**, 621-630, 2004
- [10] Bird, J.F., Brommer, J.J., Crowley, H., Pinho, R., “Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 15-26, 2005
- [11] Okada, Y., Sassa, K., Fukuoka, H., “Undrained shear behavior of sands subjected to large shear displacement and estimation of excess pore-pressure generation from drained ring shear tests,” *Canadian Geotechnical Journal*, **42**, 787-800, 2005

- [12] Zhou, Y., Chen, Y., “Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 341-351, 2005
- [13] Yunmin, C., Han, K., Ren-peng, C., “Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 461-474, 2005
- [14] Kevin, M., Dawson, L., Baise, G., “Three-dimensional liquefaction potential analysis using geostatistical interpolation,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 369-380, 2005
- [15] Yuan, D., Tadunbu, S., “A practical numerical method for large strain liquefaction analysis of saturated soils,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 251-265, 2004
- [16] Ishihara, K., Cubrinovski, M., “*Journal of Earthquake Engineering*, **9**, 1-16, 2005
- [17] Thevanayagam, S., Martin, G.R., “Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 9-23, 2002
- [18] Çapar, Ö.F., Determination of anisotropy of granular material to liquefaction resistance under cyclic loading, Doktora Tezi, Old Dominion University, 2000
- [19] Yang, J., Sato, T., Savidis, S., Li, X.S., “Horizontal and vertical components of earthquake ground motions at liquefiable sites,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 229-246, 2002
- [20] Adalier, K., Elgamal, A., “Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by Stone columns,” *Engineering Geology*, **72**, 275-291, 2004
- [21] Osinov, V.A., “Cyclic shearing and liquefaction of soil under irregular loading: an incremental model for the dynamic earthquake-induced deformations,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**, 535-551, 2003
- [22] Cheng, W., Development of an in situ dynamic liquefaction test, Doktora tezi, The University of Texas at Austin, 2002

- [23] Dano, C., Hareb, H., Hicher, P., “Characterization of Loire river sand in the small strain domain using new bender-extender elements,” 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2003
- [24] Yunmin, C., Han, K., Ren-peng, C., “Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 461-469, 2005
- [25] Taka, D., Berry, Y., “Measurement of soil stiffness using bender element test in the triaxial apparatus,” [noar.technion.ac.il/scitech2002/civil\\_eng2.pdf](http://noar.technion.ac.il/scitech2002/civil_eng2.pdf)
- [26] Aksel, T., Deprem alanı, 2007. <http://www.benkoltd.com/>
- [27] Celep, Z., Kumbasar, N., *Deprem mühendisliğine giriş*, İTÜ, İstanbul, 2004
- [28] Kayabalı, K., *Geoteknik deprem mühendisliği*, Gazi, Ankara, 2003
- [29] Kayabalı, K., *Geoteknik deprem mühendisliğine giriş*, Gazi, Ankara, 2003
- [30] <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>
- [31] Anonim, Parsel bazında zemin-temel etütleri ve zemin iyileştirme işleri hakkında yönetmelik taslağı ön raporu, Afet işleri genel müdürlüğü, 2005
- [32] Das B.M., *Principles of Foundation Engineering*, Brooks Cole Engineering Division, America, 1984
- [33] <http://www.earthquake.usgs.gov/eqcenter>

## EK-1 Plaxis Sonuçları

