

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLGİSAYAR PROGRAMI  
YARDIMI İLE KUMLU ŞEVLERİN  
DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Osman Turan YAKAR**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik  
Mühendisliği**

**OCAK 2009**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLGİSAYAR PROGRAMI  
YARDIMI İLE KUMLU ŞEVLERİN  
DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Osman Turan YAKAR  
501051311**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Ocak 2009**

**Tez Danışmanı : Yrd. Dr. Berrak TEYMUR (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Recep İYİSAN (İTÜ)**

**Yrd. Doç. Dr. SADIK ÖZTOPRAK (İÜ)**

**OCAK 2009**

## ÖNSÖZ

Tüm istatistiksel veriler ülkemiz topraklarında deprem riskinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Doğal ve sonradan kullanım amacı doğrultusunda oluşturulan şevlerin davranışı, çevre can ve mal emniyeti açısından büyük bir öneme sahiptir. Şevlerin dinamik yükler altında stabilitesi ise; yüksek bir öneme sahip bir konu olup bu çalışma kapsamında literatüre katkısının da olacağı düşünülerek şevlerin dinamik yükler altındaki davranışına ve dinamik yüklerin bir sonucu olarak karşımıza çıkan sivilaşma konusuna yer verilmiştir.

Tez çalışmam boyunca deneyimini ve desteğini benden esirgemeyen Yard. Doç. Dr. Berrak TEYMUR'a bu vesile ile teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlık aşamasında desteğini benden esirgemeyen Doç.Dr. Recep İYİSAN ve Yard. Doç. Dr. Aykut ŞENOL'a, İstanbul Beyoğlu Belediyesi Başkan yardımcısı Mimar İlhan TURAN'a İmar ve Şehircilik Müdürlüğü İmar müdürü İnşaat Mühendisi Mehmet Ali KİPSÖZ'e, İmar müdür yardımcısı İnşaat Mühendisi Süleyman HUT'a, yapı denetim şefi İnşaat Mühendisi Faruk BARAN'a ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hep hissettiğim aileme ve arkadaşlarıma, babama, anneme, ablam Kimya Mühendisi Ayşenur YAKAR'a, kadim dostum İnş. Yük. Müh. Bilal EROL'a yakın arkadaşlarım olan Serdar ÖZBAYRAK ve İsmail ATALAR'a eğitimim ve tez çalışmam süresince gösterdikleri sabır ve anlayış için yürekten teşekkür ederim.

Ocak, 2009

Osman Turan YAKAR  
İnşaat Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                                                                                      | xi           |
| SUMMARY .....                                                                                                                   | xii          |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                                                                           | <b>1</b>     |
| 1.1 Çalışmanın Amacı .....                                                                                                      | 1            |
| 1.2 Çalışmanın Kapsamı .....                                                                                                    | 2            |
| <b>2. ŞEV STABİLİTESİ STATİK ANALİZ METODLARI</b> .....                                                                         | <b>4</b>     |
| 2.1. Dilim Metodları .....                                                                                                      | 4            |
| 2.1.1. Fellenius metodu .....                                                                                                   | 5            |
| 2.1.2. Basitleştirilmiş Bishop metodu .....                                                                                     | 6            |
| 2.1.3. Janbu metodu .....                                                                                                       | 7            |
| 2.1.4. Spencer metodu .....                                                                                                     | 7            |
| 2.1.5. Sarma metodu .....                                                                                                       | 8            |
| 2.1.6. Mongenstern-Price metodu .....                                                                                           | 9            |
| 2.2. Blok Analizi .....                                                                                                         | 10           |
| 2.3. Stabilité Abakları .....                                                                                                   | 11           |
| 2.3.1. Taylor abakları .....                                                                                                    | 12           |
| 2.3.2. Janbu abakları .....                                                                                                     | 12           |
| 2.3.3. Spencer abakları .....                                                                                                   | 13           |
| 2.4. Dairesel Yüzey Analizi .....                                                                                               | 14           |
| 2.4.1. Dairesel yay ( $\Phi = 0$ ) metodu .....                                                                                 | 14           |
| 2.4.2. Sürtünme dairesi metodu .....                                                                                            | 15           |
| 2.5. Sonlu Elemanlar Analizi .....                                                                                              | 16           |
| 2.6. Sonlu Farklar Çözümü .....                                                                                                 | 17           |
| <b>3. ZEMİNLERİN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME VE MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ŞEV STABİLİTESİNE ETKİSİ</b> ..... | <b>8</b>     |
| 3.1. Kaba Daneli Zeminlerin Mukavemet Özellikleri .....                                                                         | 19           |
| 3.2. İnce Daneli Zeminlerin Mukavemet Özellikleri .....                                                                         | 21           |
| 3.3. Tekrarlı Gerilmeler Altında Zemin Davranışları .....                                                                       | 22           |
| <b>4. SİSMİK ŞEV STABİLİTE ANALİZİ</b> .....                                                                                    | <b>25</b>    |
| 4.1. Atalet Kuvvetlerinden Kaynaklı Duraysızlık Analizi .....                                                                   | 25           |
| 4.1.1. Psödo-statik (yarı statik) analizi .....                                                                                 | 26           |
| 4.1.1.1. Psödo-statik katsayıların seçimi .....                                                                                 | 27           |
| 4.1.1.2. Psödo-statik yaklaşımın sınırları .....                                                                                | 28           |
| 4.1.2. Newmark kayan blok analizi .....                                                                                         | 29           |
| 4.1.3. Modifiye Newmark metodu .....                                                                                            | 31           |
| 4.1.3.1. Efektif gerilme Newmark metodu .....                                                                                   | 32           |
| 4.1.3.2. Efektif gerilme Newmark metodu ve residual gerilme .....                                                               | 32           |
| 4.1.4. Makdisi-Seed analizi .....                                                                                               | 33           |
| 4.1.5. Gerilme-deformasyon analizi .....                                                                                        | 34           |
| 4.1.5.1. Birim deformasyon potansiyel analizi .....                                                                             | 35           |
| 4.1.5.2. Rijitlik azalması yaklaşımı .....                                                                                      | 35           |
| 4.1.5.3. Doğrusal olmayan analiz yaklaşımı .....                                                                                | 36           |
| 4.2. Zayıflatan duraysızlık analizi .....                                                                                       | 36           |
| 4.2.1. Akma yenilmesi analizi .....                                                                                             | 36           |
| 4.2.1.1. Stabilité analizi .....                                                                                                | 37           |
| 4.2.1.2. Deformasyon analizi .....                                                                                              | 37           |

|                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.2. Deformasyon yenilme analizi .....                                                                                                               | 37        |
| 4.2.2.1. Hamada vd. yaklaşımı .....                                                                                                                    | 37        |
| 4.2.2.2. Youd ve Perkins (sıvılaşma yıkım indisi) .....                                                                                                | 38        |
| 4.2.2.3. Bryan yaklaşımı .....                                                                                                                         | 39        |
| 4.2.2.4. Baziar ve diğer yaklaşımı .....                                                                                                               | 41        |
| <b>5. DEPREM YÜKLERİ ALTINDA ZEMİNLERDE MEYDANA GELEN SIVILAŞMA .....</b>                                                                              | <b>42</b> |
| 5.1. Sıvılaşmanın Tanımı .....                                                                                                                         | 42        |
| 5.2. Sıvılaşma Türleri .....                                                                                                                           | 43        |
| 5.2.1. Akma türü sıvılaşma .....                                                                                                                       | 43        |
| 5.2.2. Devirsel hareketlilik .....                                                                                                                     | 44        |
| 5.3. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler .....                                                                                                             | 45        |
| 5.3.1. Deprem şiddeti ve süresi .....                                                                                                                  | 45        |
| 5.3.2. Yeraltı su seviyesi .....                                                                                                                       | 46        |
| 5.3.3. Zemin tipi .....                                                                                                                                | 47        |
| 5.3.4. Zeminin relatif sıkılığı .....                                                                                                                  | 48        |
| 5.3.5. Dane boyu dağılımı .....                                                                                                                        | 50        |
| 5.3.6. Yerleştirme ve çökelme ortamı .....                                                                                                             | 50        |
| 5.3.7. Drenaj şartları .....                                                                                                                           | 50        |
| 5.3.8. Çevre basınçları .....                                                                                                                          | 51        |
| 5.3.9. Dane şekli .....                                                                                                                                | 51        |
| 5.3.10. Yaş ve çimentolama .....                                                                                                                       | 51        |
| 5.3.11. Tarihsel ortam .....                                                                                                                           | 51        |
| 5.4. Sıvılaşmaya Potansiyeli Analiz Yöntemleri .....                                                                                                   | 52        |
| 5.4.1. Devirsel gerilme yaklaşımı .....                                                                                                                | 52        |
| 5.4.2. Deprem yüklerinin tanımlanması .....                                                                                                            | 53        |
| 5.4.2.1. Seed ve Idriss (1971) .....                                                                                                                   | 53        |
| 5.4.2.2. Tokimatsu ve Yoshimi (1983) .....                                                                                                             | 54        |
| 5.4.2.3. Iwasaki vd. (1981) .....                                                                                                                      | 55        |
| 5.4.3. Sıvılaşma başlangıcının belirlenmesi .....                                                                                                      | 55        |
| <b>6. BİLGİSAYAR PROGRAMI (QUAKE/W) YARDIMI İLE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA ŞEVLERİN DAVRANIŞININ SANTRİFÜJ DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI .....</b> | <b>58</b> |
| 6.1. Programın Tanımı .....                                                                                                                            | 58        |
| 6.2. Problem Verileri ve Veri Girişlerinin Düzenlenmesi .....                                                                                          | 58        |
| 6.2.1. Statik analiz .....                                                                                                                             | 59        |
| 6.2.1.1. Geometrinin oluşturulması .....                                                                                                               | 59        |
| 6.2.1.2. Zemin parametrelerinin ve uygun model tayini .....                                                                                            | 60        |
| 6.2.1.3. Uygun ağ sisteminin tayini .....                                                                                                              | 60        |
| 6.2.1.4. Uygun sınır koşullarının tayini .....                                                                                                         | 61        |
| 6.2.2. Dinamik analiz .....                                                                                                                            | 61        |
| 6.2.2.1. Zemin parametrelerinin ve uygun model tayini .....                                                                                            | 61        |
| 6.2.2.2. Uygun sınır koşullarının tayini .....                                                                                                         | 67        |
| 6.2.2.3. İstenilen deprem ivme girişinin yapılması .....                                                                                               | 68        |
| 6.3. Sonuçlar .....                                                                                                                                    | 69        |
| <b>7. 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ'NİN ANALİZİ VE QUAKE/W PROGRAMI İLE YAPILAN SAYISAL ÇÖZÜMLER .....</b>                                           | <b>74</b> |
| 7.1. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Genel Özellikleri .....                                                                                       | 75        |
| 7.2. Eğimi 10° olan Şevde Sıvılaşma Analizi .....                                                                                                      | 76        |
| 7.2.1. Relatif sıkılığı (Dr: %35)'lik ve YASS: 0 m olan zeminde sıvılaşma analizi .....                                                                | 76        |
| 7.2.2. Relatif sıkılığı (Dr: %35)'lik ve YASS: ½ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi .....                                             | 80        |
| 7.2.3. Relatif sıkılığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi .....                                                            | 84        |

|                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.4. Relatif sıklığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 87         |
| 7.3. Eğimi 15° olan Şevde Sıvılaşma Analizi .....                                                         | 88         |
| 7.3.1. Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: 0 m olan zeminde sıvılaşma analizi.....                     | 89         |
| 7.3.2. Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: ½ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi ..... | 92         |
| 7.3.3. Relatif sıklığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 94         |
| 7.3.4. Relatif sıklığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 97         |
| 7.4. Eğimi 20° Olan Şevde Sıvılaşma Analizi.....                                                          | 98         |
| 7.4.1. Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: 0 m olan zeminde sıvılaşma analizi.....                     | 98         |
| 7.4.2. Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: ½ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi ..... | 101        |
| 7.4.3. Relatif sıklığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 103        |
| 7.4.4. Relatif sıklığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 106        |
| 7.5. Eğimi 10° olan Şevde Sıvılaşma Analizi .....                                                         | 107        |
| 7.5.1. Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: 0 m olan zeminde sıvılaşma analizi.....                     | 107        |
| 7.5.2. Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: ½ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi ..... | 110        |
| 7.5.3. Relatif sıklığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 112        |
| 7.5.4. Relatif sıklığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi.....                 | 115        |
| <b>8. SONUÇLAR .....</b>                                                                                  | <b>116</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                    | <b>121</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                     | <b>123</b> |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|                    | Sayfa No                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Çizelge 2.1</b> | Dilim metotlarının moment-kuvvet dengesi sağlanması açısından karşılaştırılması (Abramson, 1996)..... 10                                                                                                                         |
| <b>Çizelge 4.1</b> | Deprem sırasında yenilen toprak barajların yarı-statik analiz sonuçları (Kramer, 1996)..... 29                                                                                                                                   |
| <b>Çizelge 4.2</b> | Sıvılaşabilir Zeminlerin genişçe yayılım gösterdiği alanlarda farklı LSI değerleri için sıvılaşma etkilerinin genel karakteri ve çokluk durumu. (Youd ve Perkins 1987)..... 40                                                   |
| <b>Çizelge 5.1</b> | Yerel büyüklük ( $M_L$ ) ile maksimum yatay yer ivmesi ( $a_{max}$ ), deprem süresi ve fay yırtılmasında meydana gelen hasarın Modifiye Mercalli deprem Şiddet derecesi arasındaki yaklaşık ilişkileri (Yeats vd., 1997)..... 46 |
| <b>Çizelge 5.2</b> | Modifiye Mercalli Büyüklük ölçeği (Day, 2002)..... 47                                                                                                                                                                            |
| <b>Çizelge 5.3</b> | Relatif sıklığa göre zeminlerin sınıflandırılması..... 49                                                                                                                                                                        |
| <b>Çizelge 5.4</b> | Farklı ivme değerlerinde sıvılaşma riski taşıyan bölgelerdeki relatif sıklık değerleri (Seed ve Idriss, 1971) ..... 49                                                                                                           |
| <b>Çizelge 6.1</b> | Program statik bölümünde kullanılan zemin durumu ve zemin özellikleri..... 60                                                                                                                                                    |
| <b>Çizelge 6.2</b> | Santrifüj Deneylerinde Girilen Deprem Özellikleri..... 69                                                                                                                                                                        |
| <b>Çizelge 6.3</b> | Santrifüj deney sonucu tahmin edilen ve gözlenen deplasman değerleri Haigh vd.(1998) ..... 69                                                                                                                                    |
| <b>Çizelge 6.4</b> | 68,74,71,132,131,130,187,188 sayılı düğüm noktalarında sıvılaşma durumu) ..... 70                                                                                                                                                |
| <b>Çizelge 7.1</b> | Analizlerde kullanılan girdi parametreleri ..... 74                                                                                                                                                                              |
| <b>Çizelge 7.2</b> | 10° Eğimde oluşturulan şevde tayin edilen düğüm noktaları..... 78                                                                                                                                                                |
| <b>Çizelge 7.3</b> | 10° Eğimde yass:1/2 profil yüksekliğinde olan şevde tayin edilen düğüm noktaları ..... 82                                                                                                                                        |
| <b>Çizelge 7.4</b> | 10° Eğimde yass: 0 m'de relatif sıklık değeri %50, malzeme özelliğine sahip şevde belirlenen düğüm noktalarında sıvılaşma durumu ..... 84                                                                                        |
| <b>Çizelge 8.1</b> | Program analiz sonuçları..... 117                                                                                                                                                                                                |
| <b>Çizelge 8.2</b> | Program % deplasman analiz sonuçları ..... 118                                                                                                                                                                                   |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                      | <b>Sayfa No</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Şekil 2.1</b> : Tek bir dilime etkiyen kuvvetler (Bromhead, 1986).....                                                                                                                                            | 5               |
| <b>Şekil 2.2</b> : Dikey dilimlerin görüldüğü dairesel kayma yüzeyi (Bromhead, 1986) ..                                                                                                                              | 6               |
| <b>Şekil 2.3</b> : $c/F_s \gamma H - \beta$ , $f_d$ ve $r_u$ ilişkisi (Bromhead, 1986) .....                                                                                                                         | 8               |
| <b>Şekil 2.4</b> : Blok analizinde ele alınan göçme yüzeyi (Abramson ve diğ., 1996).....                                                                                                                             | 10              |
| <b>Şekil 2.5</b> : $\Phi = 0$ ve $\Phi > 0$ durumları için Taylor'un stabilite abakları (Abramson ve diğ. 1996).....                                                                                                 | 12              |
| <b>Şekil 2.6</b> : Janbu stabilite abakları (Abramson ve diğ., 1996) .....                                                                                                                                           | 13              |
| <b>Şekil 2.7</b> : Farklı boşluk suyu basınç oranları için Spencer Abakları (Abramson ve diğ., 1996) .....                                                                                                           | 14              |
| <b>Şekil 2.8</b> : Şevin güvenlik katsayısını, yani kaydıran kuvvetlerin daire merkezine göre momentinin kaymaya karşı koyan kuvvetlerin momentine oranını veren denklem (Abramson ve diğ., 1996) .....              | 15              |
| <b>Şekil 2.9</b> : Sürtünme dairesi şematik gösterimi (Abramson ve diğ., 1996).....                                                                                                                                  | 16              |
| <b>Şekil 3.1</b> : Çeşitli histerisiz eğrileri (Yasuhara vd.1982).....                                                                                                                                               | 23              |
| <b>Şekil 4.1</b> : Psödo-statik şev stabilite analizinde düzlemsel yenilme yüzeyini üzerindeki üçgen zemin kaması üzerine etkiyen kuvvetler.....                                                                     | 26              |
| <b>Şekil 4.2</b> : (a) Potansiyel heyelan ve (b) eğimli düzlem üzerinde sükunetteki blok arasındaki benzerlik (Kramer,1996).....                                                                                     | 30              |
| <b>Şekil 4.3</b> : Eğimli düzlem üzerinde duran bloğa etkiyen kuvvetler: (a) statik şartlar; (b) dinamik şartlar.....                                                                                                | 30              |
| <b>Şekil 4.4</b> : 20° eğimli düzlem üzerindeki blok için psödo-statik emniyet katsayısının yatay psödo-statik katsayı ile değişimi. $f=20^\circ$ için, blok statik şartlarda yenilme noktasındadır ( $FS=1$ ) ..... | 31              |
| <b>Şekil 4.5</b> : Barajlar ve dolgularda ortalama maksimum ivmenin potansiyel yenilme yüzeyi derinliği ile değişimi (Makdisi ve Seed, 1978). .....                                                                  | 34              |
| <b>Şekil 4.6</b> : Normalize edilmiş kalıcı yer değiştirmenin değişik büyüklükteki depremlerin yenilme ivmesi ile değişimi: birkaç deprem ve baraj/dolgu için özet; ortalama değerler (Makdisi ve Seed 1978).....    | 34              |
| <b>Şekil 4.7</b> : LSI'nın uzaklık ve deprem büyüklüğü ile değişimi (Youd ve Perkins 1986).....                                                                                                                      | 39              |
| <b>Şekil 4.8</b> : Byrne (1991)'in deformasyon hesaplama modeli için gerilme, birim deformasyon ve geometrik notasyonları .....                                                                                      | 41              |
| <b>Şekil 5.1</b> : Sıvılaşmanın fiziksel süreci (Kramer,1996).....                                                                                                                                                   | 43              |
| <b>Şekil 5.2</b> : Suyu doygun gevşek zeminin drenajsız şartlarda davranışı (Kramer, 1996).....                                                                                                                      | 44              |
| <b>Şekil 5.3</b> : Suyu doygun sıkı zeminin drenajsız şartlarda davranışı (Kramer, 1996). ..                                                                                                                         | 44              |
| <b>Şekil 5.4</b> : Zeminlerde sıvılaşabilir granülometri aralığı (Balkerna, 1997).....                                                                                                                               | 50              |
| <b>Şekil 5.5</b> : Basitleştirilmiş yöntemde maksimum kayma gerilmesinin şematik gösterimi (Seed ve Idriss, 1971).....                                                                                               | 54              |
| <b>Şekil 5.6</b> : DGO ve sıvılaşmaya neden olan devir sayısı arasındaki ilişki (Seed ve Idriss, 1982).....                                                                                                          | 56              |
| <b>Şekil 6.1</b> : Analizde kullanılan (1/2 ölçekli) şev geometrisi .....                                                                                                                                            | 59              |
| <b>Şekil 6.2</b> : Santrifüj model analizinde kullanılan uygun ağ sistemi .....                                                                                                                                      | 61              |
| <b>Şekil 6.3</b> : Santrifüj modelinde kullanılan şev geometrisine ait sınır koşulları gösterimi.....                                                                                                                | 61              |
| <b>Şekil 6.4</b> : Quake/W programının referans aldığı devirsel orana karşılık gelen boşluk suyu basınç oranı, DeAlba vd. (1975).....                                                                                | 62              |
| <b>Şekil 6.5</b> : Düzeltme faktörü $K_a$ 'nın ilksel kayma gerilmesi/normal gerilme oranı ile değişimi(Kramer,1996).....                                                                                            | 63              |
| <b>Şekil 6.6</b> : Düzeltme faktörü $K_a$ 'nın efektif örtü basıncı ile değişimi (Marcuson vd,1990).....                                                                                                             | 66              |

|                   |                                                                                                                                                   |    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.7</b>  | : a) $G_{sec}$ 'in kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga eğrisi b)Modül azalım eğrisi (Kramer,1996).....                  | 66 |
| <b>Şekil 6.8</b>  | : Suya doygun kumlardaki sıvılaşıma sonrası hacimsel değişim ( Tokimatsu ve Seed, 1987).....                                                      | 68 |
| <b>Şekil 6.9</b>  | : Santrifuj modeli için kullanılan sınır koşulları.....                                                                                           | 68 |
| <b>Şekil 6.10</b> | : Santrifuj modelinde kullanılacak olan 0.5 g sinusoidal ivmesindeki deprem .....                                                                 | 69 |
| <b>Şekil 6.11</b> | : Analiz sonucunda meydana gelen deformasyon .....                                                                                                | 70 |
| <b>Şekil 6.12</b> | : 132 sayılı düğüm noktasına ait x doğrultu deplasman-zaman grafiği..                                                                             | 71 |
| <b>Şekil 6.13</b> | : 132 Numaralı düğüm noktasına ait y doğrultu deplasman-zaman grafiği .....                                                                       | 71 |
| <b>Şekil 6.14</b> | : 132 sayılı düğüm noktasına ait x doğrultu hız-zaman grafiği .....                                                                               | 72 |
| <b>Şekil 6.15</b> | : 132 sayılı düğüm noktasına ait x doğrultu ivme-zaman grafiği .....                                                                              | 72 |
| <b>Şekil 6.16</b> | : Santrifuj modelinde ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basıncının kontur çizgilerine göre sayısal değeri .....                                      | 73 |
| <b>Şekil 7.1</b>  | : Sakarya istasyonu deprem kayıt verilerine göre 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ivme-zaman grafiği.....                                          | 76 |
| <b>Şekil 7.2</b>  | : 10° Eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri.....                                                                          | 76 |
| <b>Şekil 7.3</b>  | : 10° Eğimde yass=0 m olan şev.....                                                                                                               | 77 |
| <b>Şekil 7.4</b>  | : 10° Eğimli şevde yass=0 m durumunda $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı.....                                                  | 77 |
| <b>Şekil 7.5</b>  | : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği.....                                                                               | 78 |
| <b>Şekil 7.6</b>  | : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği .....                                                                                | 79 |
| <b>Şekil 7.7</b>  | : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 79 |
| <b>Şekil 7.8</b>  | : Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 80 |
| <b>Şekil 7.9</b>  | : 10° eğimde yass:1/2 profil yüksekliğinde olan şev.....                                                                                          | 81 |
| <b>Şekil 7.10</b> | : 10° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass=1/2 profil yüksekliği durumunda $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı.....      | 81 |
| <b>Şekil 7.11</b> | : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                              | 81 |
| <b>Şekil 7.12</b> | : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği .....                                                                                | 82 |
| <b>Şekil 7.13</b> | : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 83 |
| <b>Şekil 7.14</b> | : Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 83 |
| <b>Şekil 7.15</b> | : 10° Eğimli %50 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı..... | 85 |
| <b>Şekil 7.16</b> | : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme - zaman grafiği .....                                                                             | 85 |
| <b>Şekil 7.17</b> | : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği .....                                                                               | 86 |
| <b>Şekil 7.18</b> | : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 86 |
| <b>Şekil 7.19</b> | : Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 87 |
| <b>Şekil 7.20</b> | : 10° Eğimli %85 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....  | 88 |
| <b>Şekil 7.21</b> | : Relatif sıklık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli.....                                                              | 88 |
| <b>Şekil 7.22</b> | : 10° Eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri.....                                                                          | 89 |
| <b>Şekil 7.23</b> | : 15° Eğimde yass=0 m olan şev .....                                                                                                              | 89 |
| <b>Şekil 7.24</b> | : 15° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....  | 90 |
| <b>Şekil 7.25</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                              | 90 |
| <b>Şekil 7.26</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği .....                                                                                | 91 |
| <b>Şekil 7.27</b> | : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 91 |
| <b>Şekil 7.28</b> | : Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği                                                                                 | 92 |
| <b>Şekil 7.29</b> | : 15° eğimde yass:1/2 profil yüksekliğinde olan şev .....                                                                                         | 92 |
| <b>Şekil 7.30</b> | : 15° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass=1/2 profil yüksekliği durumunda $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı.....      | 93 |
| <b>Şekil 7.31</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                              | 93 |
| <b>Şekil 7.32</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği .....                                                                                | 94 |
| <b>Şekil 7.33</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman-zaman grafiği .                                                                              | 94 |
| <b>Şekil 7.34</b> | : 15° Eğimli %50 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda                                                                               |    |

|                   |                                                                                                                                                                                                        |     |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                   | olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                                                                                           | 95  |
| <b>Şekil 7.35</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                   | 95  |
| <b>Şekil 7.36</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                    | 96  |
| <b>Şekil 7.37</b> | : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman- zaman grafiği.                                                                                                                                   | 96  |
| <b>Şekil 7.38</b> | : Relatif sıklık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli.....                                                                                                                   | 97  |
| <b>Şekil 7.39</b> | : Relatif sıklık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli.....                                                                                                                   | 97  |
| <b>Şekil 7.40</b> | :20° Eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri.....                                                                                                                                | 98  |
| <b>Şekil 7.41</b> | :20° eğimde yass:0 m olan şev .....                                                                                                                                                                    | 98  |
| <b>Şekil 7.42</b> | :20° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                        | 99  |
| <b>Şekil 7.43</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                    | 99  |
| <b>Şekil 7.44</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                     | 100 |
| <b>Şekil 7.45</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman- zaman grafiği.                                                                                                                                    | 100 |
| <b>Şekil 7.46</b> | : 20° eğimde yass: 1/2 profil yüksekliğinde olan şev .....                                                                                                                                             | 101 |
| <b>Şekil 7.47</b> | : 20° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass=1/2 profil yüksekliği durumunda $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı.....                                                           | 101 |
| <b>Şekil 7.48</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                    | 102 |
| <b>Şekil 7.49</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                     | 102 |
| <b>Şekil 7.50</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman- zaman grafiği.                                                                                                                                    | 103 |
| <b>Şekil 7.51</b> | :20° Eğimli %50 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                        | 104 |
| <b>Şekil 7.52</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                    | 104 |
| <b>Şekil 7.53</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                     | 105 |
| <b>Şekil 7.54</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği .....                                                                                                                                  | 105 |
| <b>Şekil 7.55</b> | : 20° Eğimli %85 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                       | 106 |
| <b>Şekil 7.56</b> | : Relatif sıklık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli.....                                                                                                                   | 106 |
| <b>Şekil 7.57</b> | :25° Eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri.....                                                                                                                                | 107 |
| <b>Şekil 7.58</b> | :25° eğimde yass:0 m olan şev.....                                                                                                                                                                     | 107 |
| <b>Şekil 7.59</b> | :25° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                        | 108 |
| <b>Şekil 7.60</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                       | 108 |
| <b>Şekil 7.61</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                        | 109 |
| <b>Şekil 7.62</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği .....                                                                                                                                  | 109 |
| <b>Şekil 7.63</b> | : 25° eğimde yass: 1/2 profil yüksekliğinde olan şev .....                                                                                                                                             | 110 |
| <b>Şekil 7.64</b> | : 25° Eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde yass=1/2 profil yüksekliği durumunda $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı.....                                                           | 110 |
| <b>Şekil 7.65</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                       | 111 |
| <b>Şekil 7.66</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                        | 111 |
| <b>Şekil 7.67</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği .....                                                                                                                                  | 112 |
| <b>Şekil 7.68</b> | :25° Eğimli %50 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                        | 113 |
| <b>Şekil 7.69</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu ivme- zaman grafiği .....                                                                                                                                       | 113 |
| <b>Şekil 7.70</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu hız- zaman grafiği .....                                                                                                                                        | 114 |
| <b>Şekil 7.71</b> | :439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği .....                                                                                                                                  | 114 |
| <b>Şekil 7.72</b> | : 25° Eğimli %85 relatif sıklığa sahip şevde yass zemin üst kotunda olduğu duruma göre $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen devirsel gerilme oranı....                                                       | 115 |
| <b>Şekil 7.73</b> | : Relatif sıklık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli.....                                                                                                                   | 115 |
| <b>Şekil 8.1</b>  | : Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan şevlerin ağırlığı %deplasman ilişkisi.....                                                                                                                     | 118 |
| <b>Şekil 8.2</b>  | :Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan şev eğimi % deplasman ilişkisi..                                                                                                                                | 119 |
| <b>Şekil 8.3</b>  | : Yapılan analizler sonucu belirlenen yüzeysel bir noktadaki 10°,15°,20° ve 25° eğimli $D_r$ %35 ve yass zemin üst kotu durumunda olan şevlerde, etkiyen deprem sonrası boşluk suyu zaman grafiği..... | 119 |
| <b>Şekil 8.4</b>  | : Analizler sonucu ortaya çıkan şevlere ait spektral ivme değerleri ve Z4 türü zeminlerde bulunan yapılara ait spektral ivme grafiği                                                                   | 120 |

## SEMBOLLER

|            |                                                                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_h$      | : Yatay Psödo-statik İvmeler                                                                                     |
| $a_{maks}$ | : Deprem Pik İvme Değeri                                                                                         |
| $a_v$      | : Düşey Psödo-statik İvmeler                                                                                     |
| $a_y$      | : Yenilme ivmesi                                                                                                 |
| $\alpha$   | : Dilimin Tabanıyla Yatay Düzlem Arasındaki Aç                                                                   |
| $b$        | : Dilim Genişliği                                                                                                |
| $\beta$    | : Şev Eğimi                                                                                                      |
| $c'$       | : Zemin Efektif Kohezyon Değeri                                                                                  |
| $c_m$      | : Mobilize Olan Kohezyon Değeri                                                                                  |
| $c_u$      | : Drenajsız Kayma Mukavemeti                                                                                     |
| $D_r$      | : Relatif Sıkılık (%)                                                                                            |
| $D_s$      | : Statik Kaydırıcı Kuvvet                                                                                        |
| $D(m)$     | : Kalıcı Yatay Zemin Yer Değiştirmesi                                                                            |
| $DDO$      | : Devirsel Direnç Oranı                                                                                          |
| $DGO$      | : Deprem Nedeniyle Oluşan Devirsel Gerilme Oranı                                                                 |
| $E$        | : Elastisite Modülü                                                                                              |
| $e_{maks}$ | : Zeminin En Gevşek Durumdaki Boşluk Oranı                                                                       |
| $e_{min}$  | : Zeminin En Sıkı Durumdaki Boşluk Oranı                                                                         |
| $E_n$      | : Dilimler Arası Yatay Kuvvetler                                                                                 |
| $e_0$      | : Zeminin Tabii Boşluk Oranı                                                                                     |
| $F_c$      | : Sürtünme Dairesi Metodunda kullanılan kohezyon değeri temel alınarak elde edilen Nihai Güvenlik Katsayısı      |
| $F_h$      | : Yatay Atalet Kuvveti                                                                                           |
| $F_v$      | : Düşey Atalet Kuvveti                                                                                           |
| $F_\phi$   | : Sürtünme Dairesi Metodunda kullanılan içsel sürtünme açısı temel alınarak elde edilen Nihai Güvenlik Katsayısı |
| $\phi'$    | : Efektif Kayma Mukavemeti Açısı                                                                                 |
| $\phi_d$   | : Drenajlı Durumda Kayma Mukavemeti Açısı                                                                        |
| $\phi_u$   | : Drenajsız Kayma Mukavemet Açısı                                                                                |
| $f(x)$     | : Dilimler Arası Kuvvetlerin Görelî Eğimini                                                                      |
| $G_s$      | : Güvenlik Katsayısı                                                                                             |
| $G_{maks}$ | : Kayma Modülü En Büyük Değeri                                                                                   |
| $G_{sec}$  | : Sekant Kayma Modülü                                                                                            |
| $H$        | : Şev Yüksekliği                                                                                                 |
| $h$        | : Sıvılaşan Zeminin Kalınlığı (m)                                                                                |
| $K_A$      | : Aktif Toprak Basıncı Katsayısı                                                                                 |
| $K_\alpha$ | : İlksel Kayma Gerilmesi Düzeltme Faktörü                                                                        |
| $k_h$      | : Yatay Psödo-statik İvme Katsayısı                                                                              |
| $k_h(t)$   | : Psödo-statik Sismik Katsayı Zamana Bağlı Fonksiyonu                                                            |
| $K_P$      | : Pasif Toprak Basıncı Katsayısı                                                                                 |

|                   |                                                                                         |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $K_g$             | : Jeolojik Gerilme Düzeltme Faktörü                                                     |
| $\xi$             | : Sönüm Oranı                                                                           |
| $k_v$             | : Düşey Psödo-statik İvme Katsayısı                                                     |
| $k_y$             | : Yenilme Katsayısı                                                                     |
| $L$               | : Kayma Yüzeyinin Tabaka Boyunca Uzunluğu                                               |
| $LSI$             | : Yıkım İndisi                                                                          |
| $L_{ab}$          | : Kayma Düzleminin Uzunluğu                                                             |
| $L_{kiriş}$       | : Kayma Yüzeyini Tanımlayan Kirişin Uzunluğu                                            |
| $L_{yay}$         | : Kayma Yüzeyini Tanımlayan Yayın Uzunluğu                                              |
| $\gamma_{lim}$    | : Sınırlayıcı Kayma Birim Deformasyonu                                                  |
| $\gamma$          | : Ortalama Birim Hacim Ağırlık                                                          |
| $\lambda$         | : Çarpım Katsayısı                                                                      |
| $m$               | : Hoek Çarpanı                                                                          |
| $M$               | : Deprem Büyüklüğü (Richter Ölçeğine göre)                                              |
| $MDF$             | : Büyüklük Düzeltme Faktörü                                                             |
| $N$               | : Harmonik Yüklemedeki Eşdeğer Çevrim Sayısı                                            |
| $N_L$             | : Sıvılaşmaya Sebep Olan Çevrim Sayısı                                                  |
| $n$               | : Lowe ve Karafiath Metoduna Göre Toplam Denklem Sayısı                                 |
| $P$               | : Kayma Yüzeyine Etkiyen Bileşke Kuvveti                                                |
| $P_a$             | : Aktif Toprak Basıncı İtkisi                                                           |
| $P_p$             | : Pasif Toprak Basınç İtkisi                                                            |
| $r$               | : Tam sıvılaşmış zeminin kalıcı kayma gerilmesinin, pik gerilmeye oranı                 |
| $R$               | : Dairesel Yüzeyin Yarıçapı                                                             |
| $R_c$             | : Kuvvetten Merkeze Dik Uzaklık                                                         |
| $R_m$             | : Sismik Enerji Kaynağından Yatay Uzaklık (km)                                          |
| $R_s$             | : Statik Korumucu Kuvvet                                                                |
| $r_d$             | : Gerilme azaltma katsayısı                                                             |
| $r_n$             | : Deprem Büyüklüğü Düzeltme Faktörü                                                     |
| $S_r$             | : Sıvılaşan Zeminin Kalıcı Dayanımı                                                     |
| $\sigma_A$        | : Aktif Toprak Basıncı (Gerilme)                                                        |
| $\sigma'_c$       | : Kritik Gerilme                                                                        |
| $\sigma_p$        | : Pasif toprak Basıncı (Gerilme)                                                        |
| $\sigma'_v$       | : Düşey Efektif Gerilme                                                                 |
| $\sigma'_{1,2,3}$ | : Asal Gerilmeler                                                                       |
| $T_L$             | : Sıvılaşan Katmanın Kalınlığı (m)                                                      |
| $\theta$          | : Zemin Yüzeyi Eğimi ile Sıvılaşan Zeminin Alt Sınırının Eğimi Arasında Büyük Olanı (%) |
| $\tau_d$          | : Tekrarlı Kayma Gerilmesi                                                              |
| $\tau_{ort}$      | : Tekrarlı Ortalama Kayma Gerilmesi                                                     |
| $\tau_{st}$       | : Statik Denge İçin Gerekli Ortalama Kayma Gerilmesi                                    |
| $\tau_m$          | : Dilim Tabanına Etkiyen Toplam Kayma Gerilmesi                                         |
| $U$               | : Toplam Boşluk Suyu Basıncı                                                            |
| $u$               | : Dilim Tabanına Etkiyen Boşluk Suyu Basıncı                                            |
| $v_{maks}$        | : Pik Yatay Hız                                                                         |
| $v_0$             | : Sıvılaşma Anında Kütlenin Hızı                                                        |

|       |                                                                           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|
| $x$   | : Daire merkezi O ile Kayan Kütle Ağırlık Merkezi Arasındaki Yatay Mesafe |
| $X_n$ | : Dilimler Arası Düşey Kuvvetler                                          |
| $W$   | : Şev Dilim Ağırlığı                                                      |
| $w$   | : Kayan Kütle Ağırlığı                                                    |
| $z$   | : Zemin yüzeyinden itibaren derinlik (m)                                  |

## **BİLGİSAYAR PROGRAMI YARDIMI İLE DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ ŞEVLERİN DAVRANIŞI**

### **ÖZET**

Şev stabilitesi, geoteknik mühendisliği konuları içerisinde önemli bir yere sahiptir. Şev stabilitesinin doğasının anlaşılmasıyla birçok şev yenilmesi sorunu çözülebilir ve bundan kaynaklanacak sorunlar önlenebilir. Çünkü şev yenilmeleri belirli etkenlerce tetiklenirler. Bu yenilmeler statik kaynaklı olabildiği gibi dinamik kaynaklı da olabilmektedir. Deprem yükleri altında meydana gelen şev yenilmelerinin esas nedenlerinden biri olan sıvılaşmanın insan hayatına yıkıcı ve olumsuz etkilerini en aza indirmek amaçlı bu doğrultuda yapılan çalışmalar günden güne artış göstermektedir. Bu konuda bir örnek teşkil edeceği düşünülen bu çalışmada, sismik yükler altında şev davranışı incelenmiş, sıvılaşma mekanizması ve bu mekanizmaya etki eden faktörler ile analiz yöntemleri açıklanmıştır.

Bu çalışmanın asıl amacı, deprem yükleri altında değişik zemin relatif sıkılığında ve değişen yer altı su seviyelerinde farklı şev açılarında sahip yapay ve doğal şevlerin davranışlarının incelenmesidir. Bu amaçla santrifüj deney sonuçları ile "Quake/W" programı analiz sonuçlarının paralelliği uygun sınır koşulları tayini ile sağlanarak analiz karşılaştırmaları yapılmıştır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Deprem ivme verileri kullanılarak aynı program ile değişik zemin relatif sıkılık değerlerinde ve değişen yer altı su seviyelerinde şevlerin davranışı analiz edilmiştir. Analizlere dayanarak depremden önce ve sonra kayma deformasyonları, kayma gerilmeleri, ivmeleri, relatif hızları, relatif yer değiştirmeleri, şekil değiştirmeleri ve spektral ivmeleri elde edilmiştir. Bunların etkiyen deprem süresince değişimleri sunulmuştur.

## **ASSESSMENT OF THE BEHAVIOUR OF SANDY SLOPES UNDER THE EARTHQUAKE LOADS BY USING COMPUTER PROGRAM**

### **SUMMARY**

Slope stability is one of the major research subjects in geotechnical engineering. By understanding its nature, many slope failure problems may be solved and accidents regarding to these circumstances may be prevented. Slope failures can be triggered by static conditions as well as dynamic conditions. Researches has been conducted to decrease the negative effect of the slope failures. Liquefaction is one of the main reasons of slope failure under earthquake loads. In this thesis, slopes under seismic loads, liquefaction mechanism and the major factors that can affect liquefaction are researched.

The main reason of this study is to examine the behavior of different artificial or natural slope sections under earthquake loads with different soil relative density, ground water table and slope angles. To achieve this centrifugal experiment results has been compared with the analysis results of the "Quake/W" program. In this program, acceleration data of the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake is used on different slopes with different soil relative densities and ground water levels. From the analysis shear deformations, shear stresses, accelerations, relative speeds, relative movements, shape deformations and spectral accelerations of the slopes have been obtain for before and after the earthquake. Different results obtained are discussed.

## 1. GİRİŞ

Şev, doğal olarak bulunan yada çeşitli mühendislik amacı için yapay olarak açılan eğimli yüzeyler olarak bilinmektedir. Şev stabilite çalışmaları, geoteknik mühendisliğin araştırma konuları içerisinde önemli yere sahiptir. Şev stabilite çalışmalarını, şevde stabilite açısından bozulma olasılığının olup olmadığının araştırılması ve belirlenen bir güvenlik sayısı için şev stabilitesini sağlayacak önlemlerin alınması olarak ayırmak mümkündür.

Şev yenilmeleri, dünyanın her yerinde belirli bir prensip içerisinde oluşmaktadır. Bir deprem meydana geldiği zaman, depremden kaynaklanan yer sarsıntısı çoğu zaman depremden önce duraylı olan şevlerin yenilmesine neden olabilmektedir. Bu bağlamda sismik şev stabilitesinin değerlendirilmesi, geoteknik deprem mühendisinin en önemli konularından biridir. Deprem yükleri altında meydana gelen şev yenilmelerinin bir nedeni de sıvılaşmadır. Genel olarak sıvılaşma, deprem kökenli tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kohezyonsuz zeminlerde hızlı kayma mukavemeti kaybıdır. Bazen kayma dayanımı neredeyse tamamen kaybolurken, bazen de çok küçük değerlere iner. Her iki durumda da sıvılaşma çok çeşitli hasarlara yol açabilir. Bu nedenle, sıvılaşmanın meydana geliş nedenleri ile birlikte değerlendirilmesi geoteknik deprem mühendisliğinin en önemli, ilginç ve üzerinde tartışılması gerekli konularından birini oluşturmaktadır. Sıvılaşmanın yıkıcı etkilerinin geoteknik mühendislerinin dikkatini çekmesi 1964 yılında üç aylık dönem içinde ardı ardına meydana gelen Alaska'daki "Good Friday" ( $M=9.2$ ) depremi ile Japonya'daki Niigata ( $M=7.5$ ) depremi ve ülkemizde meydana gelen 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremiyle olmuştur. Bu üç depremde şev yenilmeleri ve sıvılaşmadan kaynaklanan hasarlar meydana gelmiştir. Özellikle Kocaeli depreminde Adapazarı ve Gölcük bölgesinde kum kaynamaları, taşıma gücü kayıpları, farklı oturmalar, şev hareketleri meydana gelmiştir. Bu tehlikeleri azaltmak için o bölge zeminin tekrarlı yükler etkisi altında nasıl davranacağını, zeminin nasıl ve ne kadar deformasyona uğrayacağını belirlemek ve ayrıca deplasman ve deformasyonların izin verilebilir sınırlar içerisinde olup olmadığının belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Sıvılaşma konusu bu depremlerden sonra dünyanın değişik yerlerindeki çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çok değişik terminoloji, prosedür ve analiz yöntemleri öne sürülmüş

olup, diğetine üstün gelen bir yaklaşımın doğması çok yavaş olmuştur lakin yeni araştırmalar ve teknolojik yazılımlar sayesinde bu konu üzerinde çalışılan analiz yöntemleri gün geçtikçe sayılarını artırdığı görülmektedir.

### **1.1 Çalışmanın Amacı**

Ülkemiz sınırları içerisinde meydana gelen 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi sırasında, değişen relatif sıklık değerlerine sahip tek tabaka kumlu zeminlerin değişken yer altı su seviyelerinde farklı şev açılarında Quake/W programı yardımı ve uygun sınır koşulları seçimi ile şevlerin deprem yükleri altındaki davranışlarının belirlenmesine yardımcı olmak amacıyla çalışmalar yürütülmüştür.

### **1.2 Çalışmanın Kapsamı**

Bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Quake/W programının esas aldığı temel metotlar ile statik şev stabilite konusunda geliştirilmiş olan metotlar, Bölüm 2’de ayrıntılı olarak açıklanmakta ve uygun güvenlik sayıları ile stabiliteyi ortaya koymaktadır. Bölüm 3’te zeminlerin deprem yükleri altında gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin şev stabilitesine etkisi ele alınmıştır. Şevlerin dinamik yükler altında davranışı Bölüm 4’te ayrıntılı olarak açıklanarak dinamik yüklerin sonucu olan sıvılaşma mekanizması Bölüm 5’te açıklanmış, bu mekanizmaya etki eden faktörler ve analiz yöntemlerine yer verilmiştir. Bölüm 6’da santrifüj deney sonuçları ile “Quake/W” programı analiz sonuçlarının paralelliği; uygun sınır koşullarının tayini, lineer ve eşdeğer lineer metotlar yardımı ile sağlanarak elde edilen deney sonuçları program sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 7’de, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Deprem ivme verileri kullanılarak aynı program ile uygun sınır koşulları ile değişen zemin relatif sıklık değerlerinde ve değişken yeraltı su seviyesine sahip şevlerin davranışı ve sıvılaşma durumları incelenmiştir. Sismik şev stabilitesinde ve zemin sıvılaşmasında relatif sıklığın, yeraltı su seviyesi durumunun ve şev geometrilerinin ne denli öneme sahip olduğu analiz sonuçlarıyla ortaya konulmuştur. Analizlere dayanarak depremden önce ve sonra kayma

deformasyonları, kayma gerilmeleri, ivmeleri, relatif hızları, relatif yer değiştirmeleri, şekil değiştirmeleri ve spektral ivmeleri elde edilmiş. Bunların değişimleri Bۆlۆm 8'deki sonuçlarda sunulmuştur.

## 2. ŞEV STABİLİTESİ VE ANALİZ METOTLARI

Şevlerde denge durumunu hesaplamak için pek çok yöntem geliştirilmiş olmakla beraber doğru çözüme en yakın sonuçlar, sonucun sayısal ve kesin olarak bulunduğu varsayılan deterministik yöntemlerle ya da istatistiksel-gözlemsel, olasılık teorisine dayanan yöntemlerle yapılmaktadır. Ayrıca son yıllarda bilgisayarlar ile yapılan sonlu elemanlar analizleri de stabilite analizlerinde kullanılmaktadır.

Bu yöntemlerin içerisinde yer alan limit denge yöntemleri uygulamalarında Mohr-Coulomb gibi ortamdaki ötelemeleri göz önüne almayan elasto-plastik yenilme kriterinden yola çıkarak analiz yapılmaktadır. Ancak şevlerdeki hareketler çoğu kez önemli hareketler sonrasında meydana gelmektedir. Bu amaçla geliştirilen limit gerilme yöntemleri zeminin gerilme-boy değiştirme özelliklerini hesaplarında içerir. Sonlu elemanlar, ayırık elemanlar ve plastisite teorisi limit gerilme yöntemlerinden bazılarıdır (Önalp ve Arel, 2004).

Bu bölümde, literatürde sıkça kullanılan ve çalışma kapsamında dinamik analizlerin ön koşulu olan statik analizlerde Quake/W programının temel aldığı statik analiz metodlarından dilim metodları, blok analizi metodları, stabilite abaklarına, dairesel yüzey analizi metoduna, sonlu elemanlar, sonlu farklar çözümüne ve non-lineer kırılma metodlarına yer verilmiştir.

### 2.1 Dilim Metodları

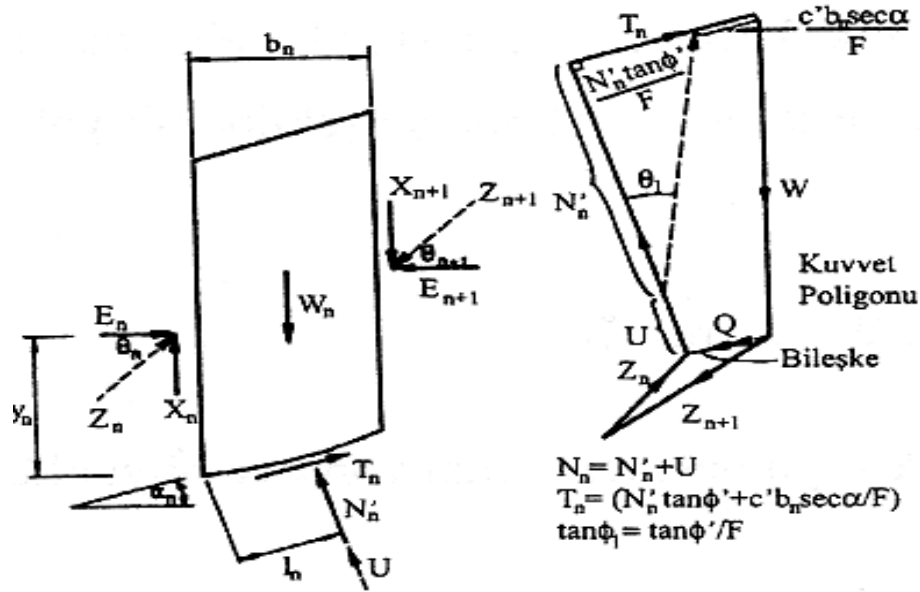
Dilim metodları limit denge yöntemleri ile kaymanın belirli bir yüzeyde olduğu kabulüne dayanır. Limit denge analizlerinde kayan kütle bir bütün olarak veya dilimler ayrılarak çözüm yapılmaktadır. Kayan kütle bütünü olarak ele alınması, yüzeyin bir doğrudan eğriye sapmasıyla normal gerilme dağılımı değiştirerek hiperstatik bir sistem oluşturmakla ve buna bağlı olarak çözümde kütle içi kuvvetler ihmal edildiği için hatalar ortaya çıkmaktadır (Önalp ve Aker, 2004). Bu hataları önlemek amacıyla kayan kütleyi dilimlere bölerek, her bir kütle bütünü dengesini ve bu dilimlerin kayan kütle bütününe olan etkisini inceleme yoluna gidilmiştir.

Limit denge analizlerini kayan kütleyi dilimlere bölerek hesaplamayan Bishop, Janbu, Sarma, Lowe ve Karafiath metodları gibi pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu

yöntemlerin dışında Taylor, Spencer abakları, plastisite teorisine dayanan metotlar, sonlu eleman analizleri ya da deneysel metotlar kullanılarak da stabilite analizleri yapılmaktadır. Yöntemlerin dayandığı kabullerin ve denge koşullarının sağlanmasındaki farklılıklar, aynı şev için yapılan analizlerde bile güvenlik sayılarının farklı olmasına yol açmaktadır.

### 2.1.1 Fellenius metodu

Fellenius metodunda dairesel kayma yüzeyi dilimlere bölünür ve her bir dilime etkiyen kuvvetler gözönüne alınır. Herhangi bir dilimin serbest cisim diyagramı şekil 2.1'de verilmektedir (Bromhead, 1986).

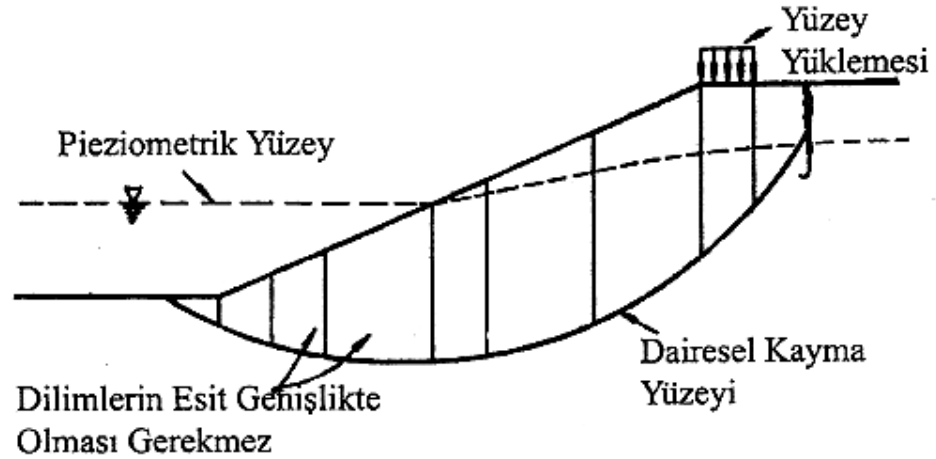


Şeki 2.1 : Tek bir dilime etkiyen kuvvetler (Bromhead, 1986)

Dilimler arası etkiyen düşey kuvvetler  $X_n$  ve  $X_{n+1}$  eşit ve zıt yönlere sahiptir ve birbirlerini sıfırlayacakları varsayılır. Aynı şekilde yatay kuvvetler  $E_n$ ,  $E_{n+1}$  birbirlerine eşit ve zıt yönde varsayılır. Başka bir varsayım da bir dilimin kayma yüzeyi boyunca harekete geçen kayma gerilmesi  $\tau_m$  in toplam mevcut kayma gerilmesinin bir kesiri olacağıdır

(örneğin:  $\tau_m = (c' + \phi' \tan \phi') / G_s$ ). Kayma dairesinin merkezine göre moment alınarak Şekil 2.2'deki şev için güvenlik katsayısı şu şekilde bulunur (Bromhead, 1986).

$$G_s = \frac{\sum (c' b \sec \alpha + ((W \cos \alpha - u) \tan \phi'))}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2 : Dikey dilimlerin görüldüğü dairesel kayma yüzeyi (Bromhead, 1986)

Denklemden  $W$  dilimin toplam ağırlığını,  $u$  dilimin tabanındaki toplam boşluk suyu basıncıdır (Bromhead, 1986).

### 2.1.2 Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi

Bishop metodunda dilimler arası kuvvetler, düşey kuvvet  $X$  ve yatay kuvvet  $E$  'nin de hesaba katıldığı bir metod önerilmiştir. Matematiksel olarak doğru bir statik çözüm için kuvvet ve moment dengesi tüm dilimler için olduğu gibi her bir dilim için de sağlanmalıdır. Bazı bilinmeyen değerler olduğundan varsayımlara gidilmiş ve düşey kuvvetlerinin bileşke çizgisi  $y$  'nin her bir dilimin moment dengesini sağlayacak bir çizgiden geçtiği varsayılmıştır. Sarma (1979) 'nın da belirttiği gibi Bishop dilimler altındaki normal kuvvetin etki noktasını hesaba katmayarak başka bir bilinmeyeni elemiştir. Bishop' un bilinen notasyonuyla güvenlik katsayısı şu şekildedir (Bromhead, 1986),

$$G_s = \frac{\sum (c' b + ((W \cdot ub) + \Delta X) \tan \phi') / m_a}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.2)$$

$$m_a = \cos \alpha \left( 1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{G_s} \right) \quad (2.3)$$

Bu denklemden,

$b$  : dilim genişliği

$W$  : dilimin toplam ağırlığı

$c'$  : kohezyon

$\phi'$  : efektif kayma mukavemeti açısı

$u$ : dilim tabanına etkiyen boşluk suyu basıncı

$\alpha$ : dilimin tabanıyla yatay arasındaki açısı

ifade etmektedir.

$X$  kuvvetindeki değişim ( $\Delta X$ ) in hesaba katılması hesabı karmaşıktır ve bu yüzden birçok durumda denklemdaki  $\Delta X$  faktörü ihmal edilmektedir. Bu durumdaki analiz genelde yeterli doğruluğu sağlamaktadır (Bromhead, 1986).

### 2.1.3 Janbu Metodu

Janbu 1956 yılında her biçimde kayma yüzeyi için uygulanabilen ve kuvvet dengesi koşullarını sağlayan bir yöntem geliştirmiştir. Daha sonra 1968 yılında ayrıntılardan kaçınarak Bishop yöntemine benzeyen Janbu yöntemini geliştirmiştir. Janbu metodunda bir kayma yüzeyi ve bunu belirleyen etki çizgisinin olduğu varsayılır ve bu doğrultuda denge denklemleri çözülür. Sarma (1979)'da Janbu methodunun zahmetli bir metot olmadığını çünkü son dilim için moment dengesinin sağlanmadığını belirtmiştir. Bu durum etki çizgisine tesir etmekte ancak güvenlik sayıları önemli bir etkisi yoktur (Bromhead, 1986).

### 2.1.4 Spencer Metodu

Spencer (1967) moment eşitliğinin sağlandığı, ancak kuvvet eşitliğinin sağlanmadığı bir metod geliştirmiştir. Metotta dilimler arası kuvvetler  $X_n$ ,  $E_n$ ,  $X_{n+1}$ ,  $E_{n+1}$  göz önüne alınır. İncelenen şev  $H$  yüksekliğinde, ortalama birim ağırlık, kohezyon ve kırılma açısı değerleri  $\gamma$ ,  $c$  ve  $\phi$  değerleri olan şevdir. Şekil 2.3' te  $c/G_s\gamma H$  değerinin şev eğimi  $\beta$ ,  $\phi_d$  ve  $r_u$  değerlerine göre değişimi görülmektedir (Bromhead, 1986).

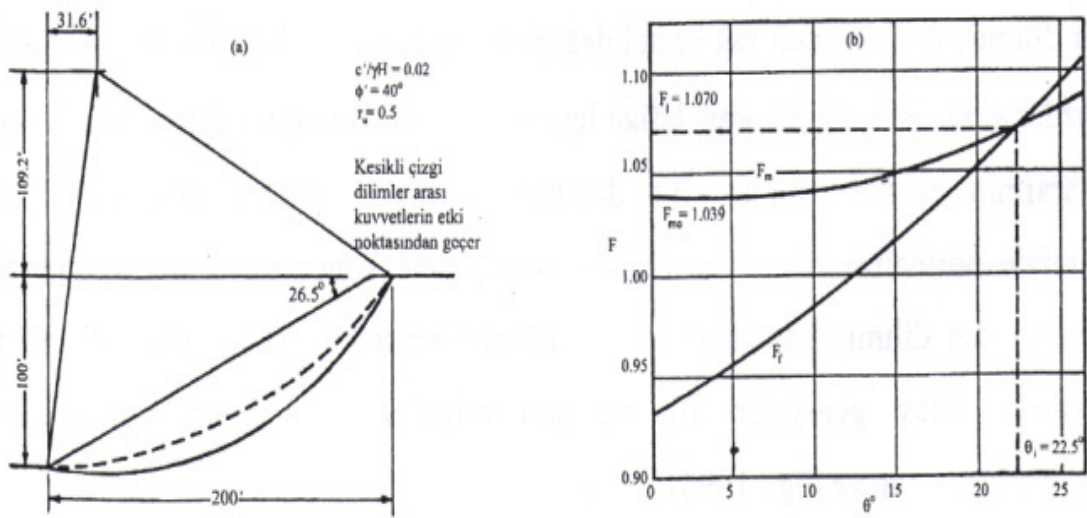
$$(\phi_d = \tan^{-1}(\frac{\tan \phi}{G_s}))$$

(2.4)

Metotta Spencer tarafından hazırlanan ve Şekil 2.3'te verilen abaklar kullanılır.

Hesap aşamaları şu şekildedir (Bromhead, 1986),

- Verilen şev için  $c$ ,  $\gamma$ ,  $H$ ,  $b$ ,  $\phi$ ,  $r_u$  değerleri belirlenir.
- Herhangi bir  $G_s$  değeri varsayılır.
- $c/[G_s \text{ varsayılan } \gamma H]$  değeri hesaplanır.
- Hesaplanan  $c/[G_s \text{ varsayılan } \gamma H]$  ve şev açısı,  $\beta$  değerleriyle grafikten  $\phi_d$  değeri bulunur.
- $G_s = \tan \phi / \tan \phi_d$  değerleri hesaplanır.
- Hesaplanan  $G_s$  değeri varsayılanla aynı değilse yeni bir değer denenerek değer varsayılan değere eşit oluncaya kadar hesap aşamaları tekrarlanır.



Şekil 2.3 :  $c/G_s\gamma H$  -  $\beta$ ,  $\phi_d$  ve  $r_u$  ilişkisi (Bromhead, 1986)

### 2.1.5 Sarma metodu

Sarma (1973) şev güvenliğinin zemin kütlesini limit denge durumuna getirecek yatay ivmeye bağlı olduğu bir yöntem geliştirmiştir. Önerilen hesap elle yapılıyor ve iterasyon gerektirmiyordu. Konvansiyonel bir güvenlik katsayısının gerekmesi durumunda kayma mukavemeti azaltılarak 0 yatay ivme gerektiği ana kadar iterasyon yapılıyordu. Böyle bir durumda üç iterasyon yeterli olmaktadır. Tüm denge denklemleri sağlanmaktadır (Konuk, 2005)

Sarma (1979) metodunu eğimli ara dilim sınırları için de geliştirmiştir. Bu methoda dilimler istenildiği kadar geniş tutulabilir ve kayma yüzeyinin eğimi tarafından belirlenirler. Metod minimum bir kritik ivme değeri bulmak için her dilim sınırı arasındaki eğim değerini değiştirir. Sarma metodun uzun bir çözüm süreci gerektirdiğinden, çok sayıda kayma yüzeyinin incelenmesini gerektiren durumlar için uygun olmadığını

belirtmiştir (Bromhead, 1986).

### 2.1.6 Morgenstern-Price metodu

Morgenstern-Price (1965) tarafından önerilen metotta tüm statik denge denklemleri sağlanmaktadır. Ancak elde edilen sonucun fiziksel geçerliliği kontrol edilmelidir. Problem dilimler arası normal ve kesme kuvveti arasında bir ilişki olduğu varsayımıyla tanımlı hale getirilmiştir. Fonksiyon  $f(x)$  diye adlandırılmakta bilgisayar programlarında değişik biçimlerde tanımlanabilmektedir. Böyle bir fonksiyonun seçilmesi problemi gereğinden fazla tanımlı hale getirir ve çözümün bir bölümü de çarpım katsayısı  $\lambda$ 'nın bulunması için kullanılır.  $f(x)$  dilimler arası kuvvetlerin göreceli eğimini,  $\lambda$  ise büyüklüğünü tanımlar. Şevdeki  $n$  diliminin dilimler arası kuvvetleri denklemde gösterildiği gibidir (Bromhead, 1986),

$$X_n = \lambda f(x) E_n \quad (2.5)$$

Morgenstern ve Price'ın metodunun problemin her dilimden integre edilen differansiyel denklemlerin formüle edilmesiyle kurulmuştur. Bu yüzden zeminin tek bir sınıftan oluştuğu durumlarda dilim oldukça büyük olabilir (Bromhead, 1986). Herhangi bir problem için denge denklemlerini sağlayacak birden fazla  $f(x)$  fonksiyonu olabilir. Dilimler arası kuvvetlerin etki çizgisi ve dilimin yan yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesinin tabanındaki normal gerilmeye oranı elde edilen çözümün bir parçasıdır ve  $f(x)$ 'e bağlıdır. Çözümün kabul edilebilir olması için gerekli koşullar aşağıdaki verilmektedir (Bromhead, 1986).

- Etki çizgisi dilimler arası kuvvetlerin toplamının dilim tabanından itibaren yüksekliğin 1/3'ünden etki ettirecek şekilde olmalıdır. Bu her dilimin yan yüzü boyunca çekme gerilmesi oluşmamasına eşdeğerdir.
- Zemin için göçme kriterlerinin öngördüğü değerler aşılmamalıdır.
- Her bir dilimin tabanındaki normal gerilmeler basınç gerilmeleri olmalıdır (Bromhead, 1986).

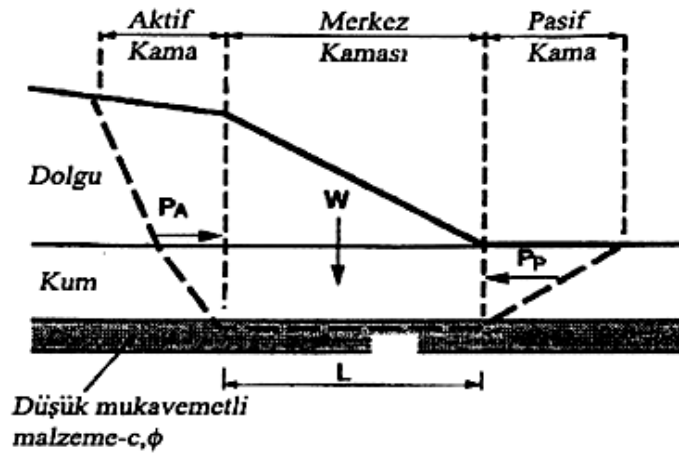
Dilim metotlarının moment ve kuvvet dengelerini sağlamaları açısından karşılaştırılması çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu çizelgede (+) işareti bu dengelerin sağlandığını (-) işareti ise sağlanmadığını göstermektedir. Örneğin Fellenius metodu  $x$  ve  $y$  yönünde kuvvet dengelerini sağlamamaktadır. Janbu metodu ise moment dengesini sağlamamaktadır.

**Çizelge 2.1 :** Dilim metodlarının moment-kuvvet dengesi sağlanması açısından karşılaştırılması (Abramson, 1996)

| Metot                    | Kuvvet Dengesi |   | Moment Dengesi |
|--------------------------|----------------|---|----------------|
|                          | x              | y |                |
| Fellenius Metodu         | -              | - | +              |
| Bishop Metodu            | +              | + | +              |
| Janbu Metodu             | +              | + | -              |
| Lowe ve karafiath        | +              | + | -              |
| Spencer Metodu           | +              | + | +              |
| Sarma Metodu             | +              | + | +              |
| Morgenstern-Price Metodu | +              | + | +              |

## 2.2 Blok Analizi

Blok analizi, dolgu zemininin taban zemininden daha mukavim olduğu durumlarda kaymaya karşı güvenlik katsayısını hesaplamak için kullanılabilir. Bu gibi hallerde dolgu zemininin kendi içinden geçen bir göçme yüzeyinden kayma durumu gibi taban zeminin içinden geçen bir göçme yüzeyinden kayabileceği de düşünülmelidir. Zayıf zemin tabakası inceyse büyük ölçüde düzlemsel bir kayma yüzeyi oluşur. Stabilite zayıf taban zeminine doğru kesme yapan bir kayma bloğuna göre incelenebilir (Abramson ve diğ., 1996).



**Şekil 2.4:** Blok analizinde ele alınan göçme yüzeyi (Abramson ve diğ., 1996)

Kayma yüzeyine örnek Şekil 2.4'te görülebilmektedir. Analizde potansiyel kayma yüzeyi aktif, merkez ve pasif blok olmak üzere üç kamaya bölünür. Kaymaya karşı güvenlik katsayısı yatay kuvvet dengesinden hesaplanır (Abramson ve diğ., 1996).

$$G_s = \frac{P_p + c_m' L + (W - u) \tan \phi_m'}{P} \quad (2.6)$$

P<sub>a</sub>: Aktif itki (kaydırıcı)

P<sub>p</sub>: Pasif itki (kaymayı önleyici)

L: kayma yüzeyinin kil tabakası boyunca uzunluğu

u: boşluk suyu basıncı

c<sub>m</sub>' ve φ<sub>m</sub>: efektif ağırlığı (W-u) olan merkez bloğun tabanındaki zeminin mukavemet parametreleri

Blok analizinde kullanılan aktif ve pasif yanal toprak basıncıları aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\sigma_{A,p} = K_{A,p} \sigma_v' \pm 2c_m \sqrt{K_{A,p}} \quad (2.7)$$

$$K_A = tg^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$K_p = tg^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.9)$$

K<sub>A</sub>: aktif toprak basıncı katsayısı

K<sub>P</sub>: pasif toprak basıncı katsayısı

σ<sub>v</sub>': düşey efektif gerilme

c<sub>m</sub>: mobilize olan kohezyon değeri

σ<sub>A</sub>: aktif toprak basıncı

σ<sub>p</sub>: pasif toprak basıncı

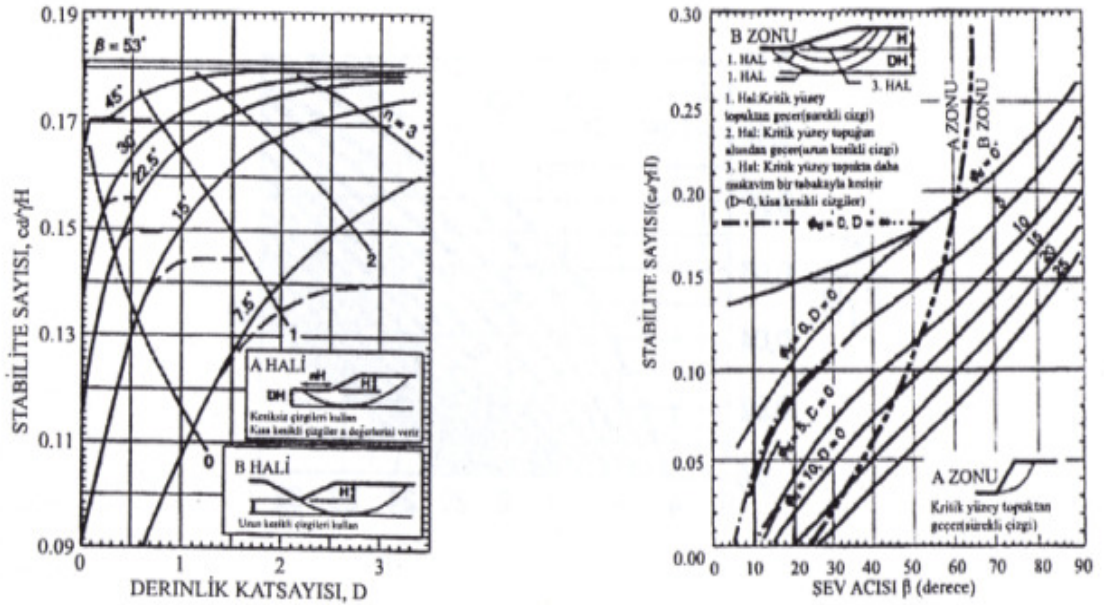
### 2.3 Stabilité Abakları

Şev stabilite analizlerinde kullanılan diğér bir metotta literatürde yapılmış analizlerin sonucu olarak oluşturulmuş olan abaklardır. Bunları Taylor stabilite, Janbu ve Spencer abaklarıdır. Bu abaklar sayesinde belli şev eğimlerine karşılık gelen güvenlik sayıları elde edilebilmektedir.

### 2.3.1 Taylor Abakları

Taylor şev açısı  $\beta$ , yüksekliği  $H$ , taban zemini topuktan  $DH$  kadar alçakta şevler için ( $D$ =derinlik oranı) stabilite abakları hazırlamıştır. Şekil 2.5'te verilmiş olan abaklar kalın çizgiler yardımıyla oluşan kohezyon,  $c_d$  ve kesikli çizgilerle topuktan göçme yüzeyine uzaklık  $nH$  değerlerini bulmakta kullanılabilir (Abramson ve diğ., 1996).

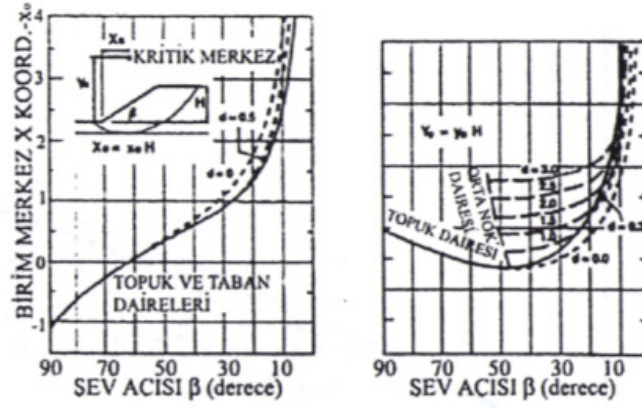
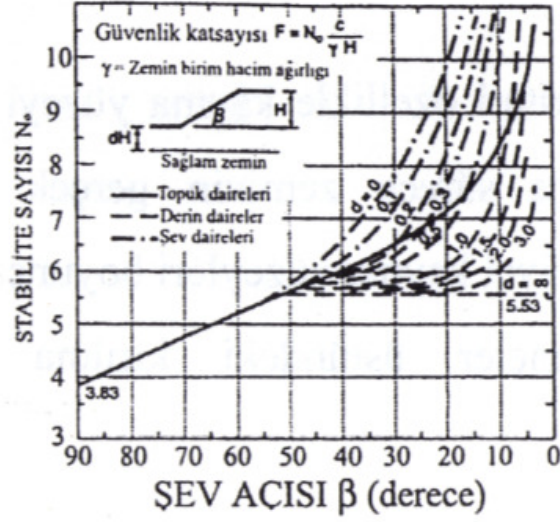
Topuk dışında göçme dairesinin topuk altından geçmesini önleyen yüklemeler varsa kohezyon uzun kesikli çizgiler yardımıyla hesaplanır,  $n$  değeri 0'a yaklaştıkça kalın ve uzun kesikli çizgiler yakınsar. Soldaki eğrilerin belirttiği  $n=0$  dairesi topuğun altından geçmez yani topuk dışındaki yüklemenin oluşan kohezyona etkisi yoktur (Abramson ve diğ., 1996).



Şekil 2.5 :  $\phi = 0$  ve  $\phi > 0$  durumları için Taylor'un stabilite abakları (Abramson ve diğ., 1996)

### 2.3.2 Janbu abakları

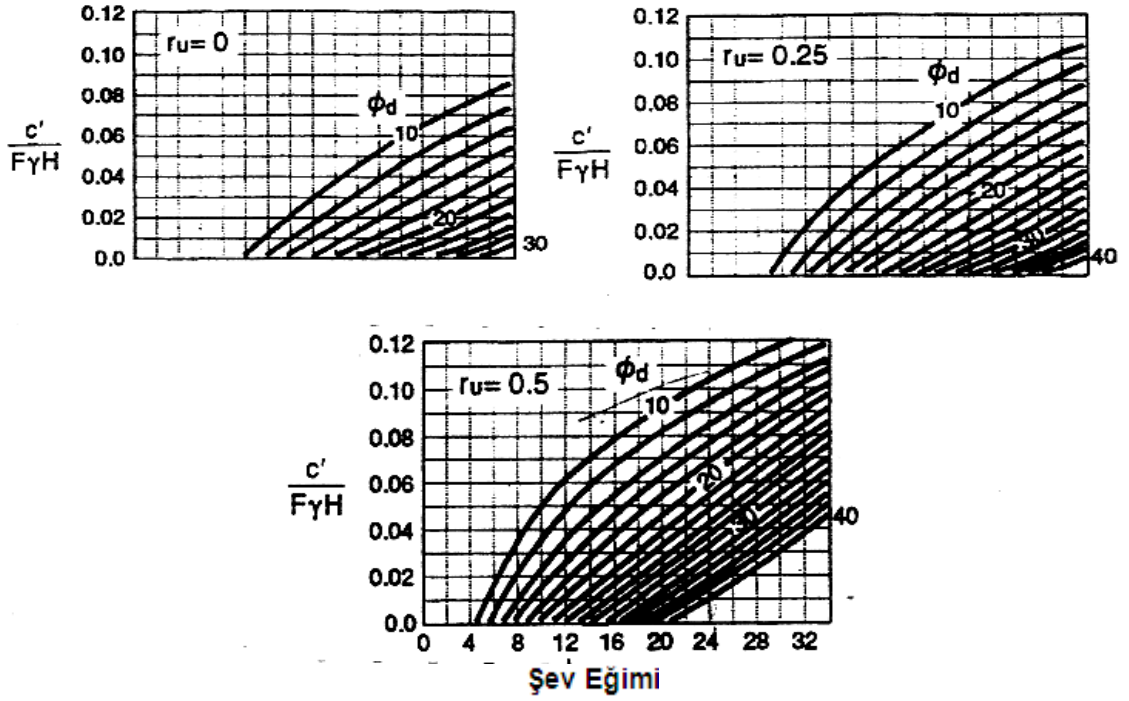
Janbu'nun (1967) önerdiği abaklar  $\beta = 0$  ve  $\phi > 0$  durumları için kullanılır. Abaklar değişik durumlara göre ayrılmıştır ve şev tepesinde sürşarj ve şevde oluşabilecek gerilme çatlakları için katsayılar belirtirler. Janbu stabilite abakları Şekil 2.6'da görülebilir (Das, 1998).



Şekil 2.6 : Janbu stabilite abakları (Abramson ve diğ., 1996)

### 2.3.3 Spencer abakları

Spencer (1967) abaklarını tüm denge denklemlerini sağlayan Spencer metoduyla hazırlamıştır. Abaklar sağlam tabakanın çok derinlerde bulunduğu varsayımına dayanır ve genel olarak önceden belirlenmiş bir güvenlik katsayısı değerine göre şev açısını belirlemede kullanılır. Üç farklı boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u=0, 0.25$  ve  $0.5$ ) durumuna göre çözüm mevcuttur (Abramson ve diğ., 1996).



Şekil 2.7 : Farklı boşluk suyu basınç oranları için Spencer Abakları (Abramson ve diğ., 1996)

## 2.4 Dairesel Yüzey Analizi

Dairesel kayma yüzeyleri genel olarak homojen malzemeden oluşan şevlerde meydana gelir (Abramson ve diğ., 1996).

### 2.4.1 Dairesel yay ( $\phi_u=0$ ) metodu

En basit dairesel analiz yöntemi rijit, silindirik bir bloğun merkez etrafında dönmeye geçeceği ve kayma yüzeyi boyunca kayma mukavemetinin drenajsız mukavemetle tanımlı olduğu durumla yapılandır. Drenajsız kayma mukavemeti kullanıldığı için  $\phi$  açısının sıfır olduğu kabul edilir (Abramson ve diğ., 1996).

$$G_s = \frac{c_u LR}{Wx} \quad (2.10)$$

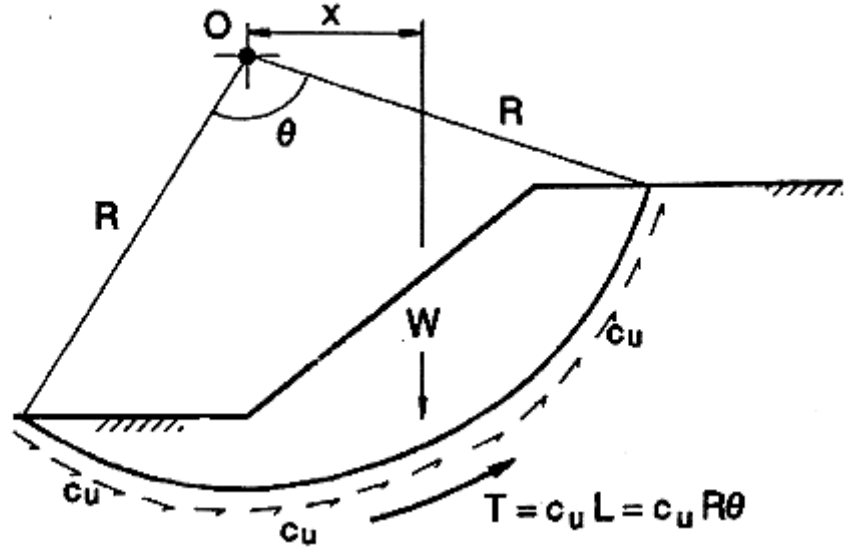
$c_u$ : drenajsız kayma mukavemeti

R: dairesel yüzeyin yarıçapı

W: kayan kütlenin ağırlığı

x: daire merkezi O ile kayan kütle ağırlık merkezi arasındaki yatay mesafe

Drenajsız kayma mukavemetinin kayma yüzeyi boyunca değiştiği durumlarda  $c_u L$  terimi denklemde değişken bir değer olarak verilmelidir (Abramson ve diğ., 1996).



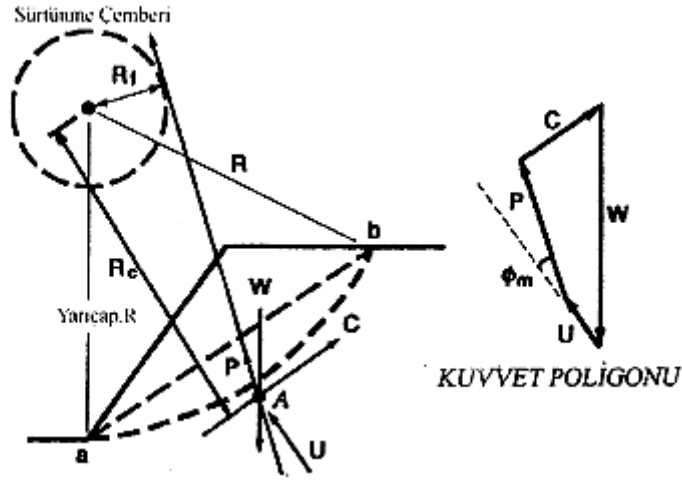
**Şekil 2.8 :** Şevin güvenlik katsayısını, yani kaydırıcı kuvvetlerin daire merkezine göre momentinin kaymaya karşı koyan kuvvetlerin momentine oranını veren denklem (Abramson ve diğ., 1996)

#### 2.4.2 Sürtünme dairesi metodu

Sürtünme dairesi metodu sürtünme ve kohezyonun stabiliteye beraber katkı sağladığı, homojen zeminler için kullanılabilir. Metoda harekete geçen sürtünme kuvveti ve normal kuvvet bileşeni dikkate alınır ve iki kuvvetin itki yönünün  $R_f = R \sin \phi_m$  denklemiyle belirtilen bir sürtünme dairesine teğet olduğu varsayılır. Varsayım alt sınırda bir güvenlik katsayısı değeri verecektir (Abramson ve diğ., 1996). Şekil 2.9'da  $R_f$  ve R gösterilmektedir.

Şekil 2.9 daki kayma yüzeyinin tabanındaki kohesif kayma gerilmelerinin bileşkesi  $c_m$ , şekil 2.9'da ab yayına paralel olacaktır.  $c_u$  'nun konumu dağılım ve bileşkenin daire merkezine göre momenti alınarak bulunabilir.  $c_u$  'nun yerini veren denklem (Abramson ve diğ., 1996),

Gerçek etki noktası A, efektif ağırlık kuvvetinin kesişimi, yani ağırlık ve boşluk suyu basıncının kesişim noktasında bulunur. Normal ve sürtünme (kayma) kuvvetinin bileşkesi P sürtünme dairesi ve A noktasının teğetine paraleldir.  $c_u$  'nun yönü bilindiğine göre kuvvet poligonu kapatılarak harekete geçmiş kohesif kuvvetin değeri bulunur. Nihai güvenlik katsayısı  $F$ ;  $F = F_\phi = F_c$  alınarak bulunur. Çözüm aşaması genelde grafik olarak yürütülür ve aşağıdaki yol izlenir (Abramson ve diğ., 1996):



**Şekil 2.9 :** Sürtünme daresi şematik gösterimi (Abramson ve diğ., 1996)

- Kama ağırlığı,  $W$  hesaplanır.
- Toplam boşluk suyu basıncı  $U$ ' nun yönü ve büyüklüğü hesaplanır.
- $c_m$ ' in etki çizgisine dik uzaklık hesaplanır.
- $W$  ve  $U$  'dan efektif ağırlık itkisi ve  $A$ 'daki  $c_m$  ile kesişimi hesaplanır.
- $F_\phi$ , için bir değer varsayılır.
- Harekete geçen kırılma açısı değeri  $\phi_m = \tan^{-1}(\tan \phi / F_\phi)$  olarak hesaplanır.
- Yarıçapı  $R_f = R \sin \phi_m$  olan sürtünme daresi çizilir.
- $W$  nin eğimi yaklaşık olarak belirtilerek ve  $A$ 'dan geçirilerek kuvvet poligonu çizilir.
- Sürtünme dairesine teğet olarak  $P$ 'nin yönü çizilir.
- Dairesel kayma yüzeyini birleştiren yayın eğimine göre  $c_m$ 'in yönü çizilir.
- Kapalı poligondan  $c_m$ 'in değeri bulunur.
- $c_m$ 'in değerinden  $F_c = cL_{kırış} / c_m$  hesaplanır.
- $F_c$ ,  $F_m$  'e eşit olana kadar 5. aşamadan 12.' e kadar olan aşamalar tekrarlanır (Abramson ve diğ., 1996).

## 2.5 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar metodunda zemin düğüm noktalarında birleşen elemanlara bölünmektedir. Analiz sonucunda her düğüm noktasındaki deplasmandan yola çıkılarak gerilme ve şekil değiştirmeler bulunur. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan modelde tüm elemanların aynı yapısal davranışa göre davranmaları sağlanır.

Kullanılan modelleme genelde göçmenin oluşumuna kadar elastik, göçme sonrası tam plastik davranış olduğu varsayılır. Kullanılan kırılma hipotezi genelde Mohr-Coulomb kriteridir (Bromhead, 1986).

## **2.6 Sonlu Farklar Çözümü**

Şev problemlerinde sonlu farklar yöntemi de çözüme ulaşmada kullanılabilir. Ancak Cundall'ın (1976) da işaret ettiği gibi integrasyon metodları uygulandığı sürece sonuç denklemleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak bulunanlarla aynıdır (Bromhead, 1986).

### **3 ZEMİNLERİN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA GERİLME - ŞEKİL DEĞİŞTİRME VE MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ŞEV STABİLİTESİNE ETKİSİ**

Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altındaki davranışlarının incelenmesine yol açan en önemli neden, bu tip gerilmelerin etkisinde kalan zemin tabakalarında gerilme - şekil değiştirme ilişkilerinin ortaya çıkarılması ve kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişmelerin bulunmasıdır. Depremler sırasında oluşan yer hareketleri değişken olup düşey ve yatay bileşenlere sahiptir. Buna rağmen bir depremde zemin tabakalarında meydana gelen hacim ve şekil değiştirmelere sadece yatay doğrultuda ve ana kayadan yukarı, zemin yüzüne doğru hareket eden kayma dalgalarının yol açtığı varsayılır. Bu kayma dalgaları düzensiz bir yükleme niteliği gösterirler ve zemin tabakalarında tekrarlı fakat düzensiz (sabit genlikte olmayan) kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar. Depremler sırasında, doğal zemin tabakaları, toprak barajlar ve diğer zemin yapıları, yön ve şiddet değiştiren bu dinamik kayma gerilmelerinin etkisi altında kalırlar. Zeminlerde, depremler ve tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan boşluk suyu basınçları ile deformasyonların ve dolayısıyla göçmeye karşı stabilitenin hesaplanması, o zemine ait belirli gerilme koşulları altında ve tekrarlı kayma gerilmesi etkisindeki mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin bilinmesi ile mümkün olabilmektedir (Siyahi, 1994).

Zeminler tekrarlı kayma gerilmeleri altında cinslerine, sıklıklarına, aşırı veya normal konsolide olmalarına, statik kayma gerilmelerine ve tekrarlı yükleme özelliklerine yani çevrim sayısına ve etkiye süresine göre farklı davranış sergilerler. Depremin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin genliğine bağlı olarak ortaya çıkan şekil değiştirmeler nedeniyle kayma mukavemetinde ve dolayısıyla zeminin rijitliğinde de azalma ortaya çıkabilmektedir. Kayma mukavemetinde ortaya çıkan bu azalmanın büyüklüğü zemin ve gerilme özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Zemin yapılarının stabilite hesaplarında bu azalma göz önüne alınarak, deprem riski taşıyan bölgelerde veya tekrarlı gerilmelerin etkisinde kalabilecek zemin yapılarında bu etkilerin hesaplara katılması gerekmektedir. Aksi takdirde tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisinde kalabilecek bölgelerde, statik durumdaki kayma mukavemeti değeri ile yapılacak stabilite hesapları ve elde edilecek güvenlik faktörleri ile güvensiz tarafta kalınacağı ortadadır (Siyahi, 1994).

Özellikle şev stabilite analizinde her zaman yapılan güvenlik hesabının anlamlı olabilmesi için, bu etkilerin ve göçme mekanizmalarının gerçekçi olarak tanımlanması gereklidir. Depremlerin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmeleri, zemin elemanlarının her birinde tek başına akma veya göçme oluşturmamasına rağmen bu etkiler toplanarak artar ve nihai etki büyük Kalıcı şekil değiştirmeler, büyük boşluk suyu basıncı artışları ve sonunda göçme şeklinde kendini göstermektedir. Zeminler cinslerine göre belirli kritik tekrarlı gerilme değerinden küçük gerilme mertebelerinde toptan göçme olmadan da gerilmeleri uzun süre taşıyabilmektedir. Bu kritik gerilme oranının zemin cinsine ve gerilme tipine göre tanımlanması gerekmektedir (Siyahi, 1994).

### **3.1 Kaba Daneli Zeminlerin Mukavemet Özellikleri**

Kaba daneli zeminlerin davranışına etki eden temel özellikler olarak danelerin mineralojik özellikleri, dane şekli ve boyutları, danelerin yerleşimi ve yapısı ve buna bağlı boşluk oranı, su muhtevası ve doygunluk derecesi, yapılan deneylerin sınır koşulları ve hazırlanış biçimleri sıralanabilir. Tekrarlı kayma gerilmeleri etkisi altında, gevşek-orta sıkılıkta ve suya doygun kaba daneli zeminlerde özellikle üniform orta-ince kumlarda, yapılarına ve sıkılıklarına bağlı olarak drenajlı koşullarda hacim değişikliği veya drenajsız koşullarda da boşluk suyu basıncı artışları ortaya çıkar. Bu artışın nedeni bu tip zeminlerin tekrarlı kayma gerilmeleri altında hacimlerini azaltmak yani daha sıkı konuma geçmek istemeleri ve buna suya doygun zeminlerde daneler arasını dolduran boşluk suyunun karşı koymasındır. Boşluk suyu basıncının tekrarlı yükleme ile sürekli olarak artması efektif gerilmelerin azalmasına ve hatta sıfır değerine ulaşmasına neden olur. Kaba daneli zeminlerde efektif çevre gerilmesinin sıfır olması hali kayma mukavemetinin çok azalmasını ve zemin elemanlarının sıvı özellikleri göstermesini yani sıvılaşmasını tanımlar. Boşluk suyu basıncı artarak çevre basıncına eş bir değere yaklaşırken şekil değiştirmelerde artış gözlenmeye başlar. Eğer zemin gevşek ise boşluk suyu basıncı ani bir artış göstererek çevre basıncına eşit değer alır ve kumda büyük şekil değiştirmeler, % 20' i geçen birim kayma oranları oluşur. Kaba daneli zeminlerin tekrarlı yükler altında

davranışlarını, statik yükleme durumunda da olduğu gibi belirleyen en önemli etken zeminin sıklık oranıdır. Relatif sıklığı yüksek olan sıkı kumlarda tekrarlı kayma gerilmeleri altında boşluk suyu basıncı sürekli olarak daha yavaş biçimde artar. Ansal vd. (1981), aynı tekrarlı kayma gerilme şartları altında sıkı kumların kayma mukavemetlerini kaybetmelerinin gevşek kumlara oranla daha zor olduğunu söylemişlerdir. Relatif sıklığın artması, sıvılaşma başlangıcının daha küçük şekil değiştirmelerde olmasını gerektirir. Tipik alüvyon kumları için gerçek sıvılaşmanın oluşacağı maksimum relatif sıklık ( $D_r$ ), %40 ile %50 arasındadır. Relatif sıklığı % 50 ile % 60 arasında olan hacim değişmesi gösteren orta sıklıktaki kumlarda tekrarlı gerilmeler büyük şekil değiştirmelere neden olur. Sıvılaşmaya etki eden faktörlerden Biri de zemin tabakalarının jeolojik yük altında kaldıkları süredir. Ansal vd. (1981), gerilme altında kalma süresinin artması ile sıvılaşmaya karşı dayanımın % 75 oranında artabileceğini göstermiştir. Bunun nedeninin de Uzun süre yük altında kalmanın bir sonucu olarak daneler arası kaynaşmanın ve çimentolaşmanın oluşması olarak açıklamıştır.

Kum zeminin sıvılaşmaya karşı mukavemeti üzerinde kum zeminin daha önce tekrarlı yükler etkisinde kalmış olup olmaması önemlidir. Ansal vd. (1981), tekrarlı kayma gerilmesi etkisinde kalmış numunelerde ön sıvılaşma için gereken gerilme oranlarının, hiç kayma gerilmesi etkisinde kalmayan numunelere oranla % 50 daha büyük olacağını göstermiştir. Buradan da geçmişte deprem etkisinde kalmış kum tabakalarının sıvılaşmaya karşı dirençleri artmaktadır. Ansal vd. (1981), numunelerde oluşan şekil değiştirme mertebelerinin büyük ve sıvılaşmanın meydana gelmiş olmasının sıvılaşmaya karşı direnci azalttığını belirtmişlerdir.

Tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanan zeminin davranışına başlangıçta üzerinde bulunan kayma gerilmelerinin varlığı ve büyüklüğü etkili olmaktadır. Doğada zemin elemanlarına etkiyen farklı düşey ve yatay gerilmeler bu elemanlar üzerinde kayma gerilmelerine neden olur ve bu da zeminin dinamik davranışını etkiler. Zemin elemanları üzerinde başlangıç kayma gerilmelerinin olması durumunda tekrarlı kayma gerilmeleri altında oluşan boşluk suyu basınçlarının azaldığını ifade etmektedir. Ansal vd. (1981), gevşek kumlarda başlangıç kayma gerilmelerinin olmasının sıvılaşma olasılığını arttırdığını ve kolaylaştırdığını belirtmektedirler. Başlangıç  $K_o$  (konsolidasyon oranının) değerinin büyümesi ile daha küçük dinamik gerilme değerinin, sıvılaşmaya ve büyük şekil değiştirmelere yol açacağını göstermiştir. Örneğin; konsolidasyon oranı,  $K_o=2.0$  olan bir zemin numunesinde başlangıç kayma gerilmelerinin meydana getirdiği stabilitesizlikten doğan ek gerilmeler ile ani sıvılaşma oluşabileceğini, ancak

sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için uygulanacak dinamik gerilme oranının,

$$\tau / \sigma_{3c} = 0.5(Ko - 1) \quad (3.1)$$

olduğunu ve numunenin çift yönlü gerilmeler etkisinde olması gerektiğini belirtmektedirler. Aynı relatif sıkılıkta ve aynı koşullarda hazırlanmış değişik kum numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre sıvılaşmayı gerektiren gerilmelerde farklılıklar görülmüştür. Annaki (1977), dört değişik kum üzerindeki deneylerde % 20' ye kadar varan değişik sıvılaşma oluşturacak gerilme değerleri bulmuştur. Annaki (1977), en kolay sıvılaşabilen kumların ortalama dane çapının 0.05-0.06 mm. civarında olduğunu belirtmektedirler. Ansal vd. (1981), arazide başlangıç kayma gerilmelerinin etkisinde suya doymun kohezyonsuz zemin tabakalarında meydana gelen sıvılaşmanın titreşim tipine de bağlı olduğundan söz etmektedir. Bu zemin tabakalarında oluşacak sıvılaşma önce şok etki yaratan sonra da küçük titreşimleri süren tipte yükleme nedeniyle olmaktadır.

### 3.2 İnce Daneli Zeminlerin Mukavemet Özellikleri

Tekrarlı kayma gerilmelerinin çeşitli temel yapılan altındaki veya dolgu ve şevlerdeki ince daneli zeminlerde neden olduğu mukavemet azalması bir çok yönü ile araştırılmıştır. Depremi yol açtığı kayma gerilmelerinin özellikleri, zeminin mukavemet özellikleri ve gerilme geçmişi bu mukavemet azalmasının boyutlarını değiştirmektedir. Yoshimi vd.(1989), tekrarlı drenajsız mukavemetin yüklemenin frekansından ve Süresinden bağımsız olduğunu ileri sürmüştür. Ayrıca örselenmenin tekrarlı kayma mukavemetini azaltmaya eğilimli yönde olduğunu belirtmişlerdir. Tekrarlı mukavemetin şekil değiştirme genliğine de bağlı olduğunu,

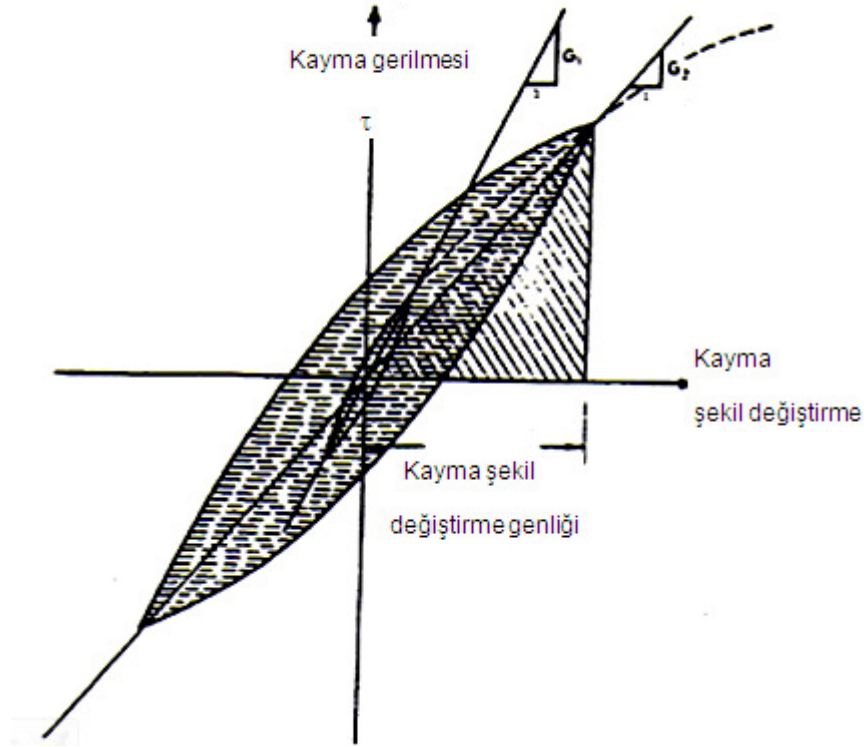
% 15 şekil değiştirme genliğine kadar anizotropik ve izotropik killerde mukavemetleri arasında bir fark olmadığını bulmuşlardır. Ansal vd. (1982), farklı şekilde hazırlanmış numunelerde aynı frekans ve değişik tekrarlı kayma gerilmesi oranları için çevrim sayısına bağlı olarak değişen bir dinamik kayma mukavemetinin bulunduğu ve bu değerinde statik kayma mukavemetinin % 50' si civarında olduğunu gözlemişlerdir. Seed vd.(1966), tekrarlı kayma gerilmelerinin uygulanmasından sonra zamana bağlı sünme ve kayma olaylarının olacağını ve tekrarlı gerilme değeri, drenajsız kayma mukavemetine ulaştığında büyük kalıcı deformasyonlar oluşacağını belirtmişlerdir. Andersen (1976), ise tekrarlı yükleme sonrasında kayma mukavemetindeki azalmanın % 25' i geçmeyeceğini öne sürmüştür. Tekrarlı kayma

gerilmeleri sonrası mukavemet kaybının çok yüksek değerler olmadığını ve çok büyük deformasyonlar mertebesinde bu azalmanın % 10 ile % 20 oranında kalacağını belirtmiştir. Kil numunelere % 5 dinamik kayma deformasyon genliğinde tekrarlı kayma gerilmeleri uygulayarak, numunelerin kayma mukavemetlerini % 40 oranında kaybettiklerini gözlemişlerdir. Tekrarlı kayma mukavemeti üzerinde gerilme geçmişinin önemini bulabilmek amacıyla da çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Aşırı konsolidasyon oranı düşük olan numunelerde, tekrarlı yükleme etkisi ile mukavemet kaybının büyük olduğunu, aşırı konsolidasyon oranı yüksek killerde mukavemette çok fazla bir değişiklik olmadığını ifade etmişlerdir. Değişik aşırı konsolidasyon oranlı killerde deneyler yaparak aynı değerde göçme olabilmesi için yüksek AKO değeri olan killerde daha fazla çevrim sayısına gerek olduğunu ve aşırı konsolidasyon oranının artmasının, dinamik mukavemeti artıracağını göstermiştir. Tekrarlı yüklemeye bağlı kayma mukavemetindeki azalma önceden yüklenmemiş yani normal konsolide killerde, aşırı konsolide killere oranla daha fazladır. Zeminin aşırı konsolide olması, daha önceleri zeminin üzerinde bir takım yüklerin olduğunu ve bu yükleme sonucunda gene bir takım düşey hareketlerin yani oturmaların olduğunu gösterir. Bu oturmaların sonucunda zemin daha önce yüklenmemiş zemine göre daha yoğun hale gelir. Ansal vd.(1989), aşırı boşluk suyu basıncı sönmümlenmeden, tekrarlı yüklemeyi takiben mukavemet azalmasının tekrarlı gerilme oranından çok çevrim sayısına bağlı olduğunu bulmuşlardır. Ansal vd.(1989), boşluk suyu basıncının tekrarlı yüklemenin frekansından etkilendiğini ve tekrarlı yükleme frekansı ne kadar küçükse dinamik boşluk suyu basıncının da o kadar yüksek olduğunu bulmuşlardır. Castro vd. (1976), tekrarlı yüklemeler sırasında boşluk suyu basınçlarının arttığını dolayısıyla efektif gerilmelerin azaldığını, kayma mukavemetinin azalıyormuş gibi görünebileceğini fakat statik kesme sırasında negatif boşluk suyu basıncı oluşma eğiliminin zeminin kayma mukavemetinin değişmesini önlediğini belirtmişlerdir.

### **3.3 Tekrarlı Gerilmeler Altında Zemin Davranışları**

Tekrarlı yükleme sırasında uygulanan maksimum gerilmeler nedeniyle ortaya çıkan şekil değiştirmeler genellikle aynı genlikte statik gerilme ile üretilenden farklıdır. Tekrarlı gerilmenin çevrim sayısı arttıkça şekil değiştirmeler çeşitli faktörlere bağlı sürekli olarak artar. Bu faktörlerden en önemlisi şekil değiştirme genliğidir. Zemin dinamiği problemlerinde tekrarlı yükleme iki gruba ayrılır: birinci grup, titreşim ortaya çıkaran makinaların ürettiği şekil değiştirme genliği  $10^{-4}$  ile  $10^{-3}$  arasında değişen yükleme biçimidir. İkinci grup ise şekil değiştirme genliği  $10^{-2}$  ile  $10^{-1}$  ve daha büyük

olan değerlerde yükleme ile depremlerdir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi büyük ve küçük şekil değiştirme genliklerine bağlı olarak farklı biçimlerde ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.1.'den de görülebildiği gibi küçük şekil değiştirme genliklerinde zeminlerde daha büyük elastisite modülü değeri elde edilir. Bu iki grubu tekrarlı gerilme etkisinde gerilme-şekil değiştirme modülü, sönüm ve mukavemet davranışları bakımından ayrı ayrı analiz etmek gerekmektedir. Ayrıca zeminlerin gerilme - şekil değiştirme davranışları çevrim sayısına, gerilme genliğine, yükleme süresine de bağlıdır (Siyahi, 1994).



**Şekil 3.1 : Çeşitli histerisiz eğrileri**

Deprem etkisindeki büyük şekil değiştirme genliklerinde, histerisiz ilmeğinin ucunu birleştiren doğrunun eğimi de kayma modülünü ( $G$ ) vermektedir. Artan çevrim sayılarında ve şekil değiştirme genliklerinde kayma modülü azalmakta ve sönüm artmaktadır. Bu artış ve azalma miktarları çeşitli deneyler ve amprik yaklaşımlar ile bulunabilmektedir. Kuru veya az doymun zeminlerde kayma modülü yükleme çevrimleri ile bir artma gösterebilir. Gerilme - şekil değiştirme ilişkisi ve tekrarlı yükleme altında boşluk suyu basınçları gerilme seviyesine, gerilme geçmişine, yükleme tipine, çevrim sayısına ve doymunluk derecesine büyük ölçüde bağlıdır (Siyahi, 1994).

Tarih boyunca depremler ve diğer dinamik yükler etkisiyle meydana gelen yer titreşimlerinin zemin tabakalarında hasarlara yol açtığı ve özellikle kohezyonsuz zemin

tabakalarının bu titreşimlerden daha fazla etkilendikleri ve bu tip yükler altında daha dayanıksız oldukları gözlenmiştir. Dinamik yükler altında kumlu zemin tabakalarında bir sıkışma olmakta ve bu da zemin yüzeyinde büyük oturmalara yol açabilmektedir (Siyahi, 1994).

#### 4. SİSMİK ŞEV STABİLİTESİ ANALİZİ

Statik şev stabilite analizinde daha önce tanımlanan yöntemler çok sayıdaki gerçek şev yenilmesine uygulanmış ve eksik yönleri tamamlanmıştır. Sismik şev stabilite analizi veri tabanı bu anlamda henüz çok geniş değildir. Şevlerin sismik stabilite analizinde şu etkilerin göz önüne alınmasını gerektirdiğinden dolayı daha da karmaşılaşmaktadır: deprem sarsıntısı ile oluşan dinamik gerilmeler ve bu gerilmelerin şev malzemesinin dayanımı ve gerilme-birim deformasyonu üzerine etkisi.

Belirli bir şevde bu etkilerden hangisinin egemen olduğuna dayalı olarak, sismik şev stabilite analizleri iki sınıfa ayrılabilir: Atalet kuvvetlerinden kaynaklı duraysızlık ve mukavemet kaybından kaynaklı duraysızlıklardır. Atalet kuvvetlerinden kaynaklı duraysızlıklarda zeminin kayma dayanımı nispeten sabit kalır, fakat şev deformasyonları dinamik deprem dalgalarının ürettiği tekrarlı kayma gerilmelerinin geçici olarak dayanımı aşmasıyla oluşmaktadır. Mukavemet kaybından kaynaklı duraysızlıklarda, depremin zemini, depremden kaynaklanan gerilmeler altında duraylı kalamayacak derecede zayıflattığı durumlarıdır. Zayıflatan duraysızlığın en yaygın örnekleri akma sıvılaşması ve devirsel hareketliliklerdir. Sismik duraysızlığın iki sınıfı için de hem limit denge hem de gerilme-deformasyon analizlerine dayalı çok sayıda analitik yöntem mevcuttur ve bu yöntemler aşağıda açıklanmaktadır (Kramer, 1996).

##### 4.1 Atalet Kuvvetlerinden Kaynaklı Duraysızlık Analizi

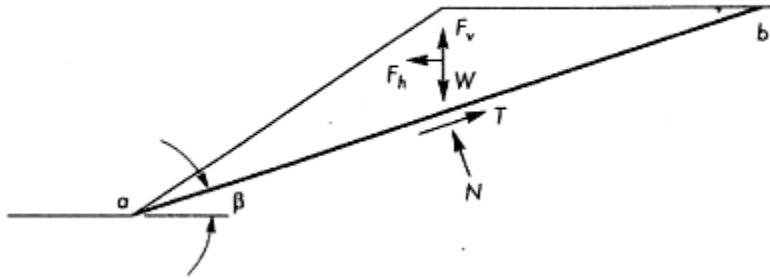
Deprem hareketleri şevlerde önemli büyüklükte yatay ve düşey dinamik gerilmeler oluşturur. Bu gerilmeler bir şev içindeki potansiyel yenilme yüzeyleri üzerinde dinamik normal gerilmeler ve kayma gerilmelerinin meydana gelmesine yol açarlar. Dinamik gerilmeler daha önce mevcut olan statik kayma gerilmeleri ile birleştiğinde zeminde mevcut kayma dayanımını aşabilir ve şevde ataletsel duraysızlık oluşturur. Ataletsel duraysızlığın analizi konusunda çok sayıda yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler arasındaki başlıca fark, deprem hareketini ve şevin dinamik tepkisini temsil etmedeki doğruluk derecesidir. Sismik şevin yarı statik analiz ile bulunan

yenilmeye karşı emniyet katsayısı, statik şev yenilmesine karşı limit denge analizinde bulunan emniyet katsayısı ile çok yönden benzerlik gösterir. Diğer yöntemlerin tümü ise, deprem sarsıntısı ile oluşan kalıcı şev yer değiştirmelerini değerlendirmektedir. Aşağıda analiz için kullanılan yöntemlerden bazıları detaylı olarak anlatılacaktır.

#### 4.1.1 Psödo-statik (Yarı statik) analiz

Toprak yapıların sismik stabilitesi, 1920'lerde başlayan ve depremin etkilerinin sabit yatay ve/veya düşey ivmelerle temsil edildiği psödo-statik yaklaşım ile analiz edilmektedir. Psödo-statik yaklaşım sismik şev stabilitesinde açık bir şekilde ilk kez uygulanması Terzaghi (1950) tarafından kullanılmıştır.

Psödo-statik analizlerde deprem sarsıntısının etkileri, genellikle atalet kuvvetleri üreten psödo-statik ivmeler ile temsil edilmektedir.  $F_h$  ve  $F_v$  şeklindeki bu atalet kuvvetleri, yenilen kütlelerin ağırlık merkezinden geçmektedir. Şekil 4.1' de Psödo-statik şev stabilize analizinde düzlemsel yenilme yüzeyinin üzerindeki üçgen zemin kaması üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmektedir. Psödo-statik kuvvetlerin büyüklüğü yatay ( $F_h$ ) ve düşey ( $F_v$ ) bileşenleri sırasıyla aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.



**Şekil 4.1 :** Psödo-statik şev stabilize analizinde düzlemsel yenilme yüzeyinin üzerindeki üçgen zemin kaması üzerine etkiyen kuvvetler.

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (4.1)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (4.2)$$

$a_h$  ve  $a_v$ : yatay ve düşey ivmeler,

$k_h$  ve  $k_v$ : boyutsuz yatay ve düşey ivme katsayıları

$w$ : kayan kütle ağırlığı

Psödo-statik ivmelerin büyüklükleri, beklenen yer hareketinin şiddet derecesi ile ilişkilidir ve bu ivmelerin seçimi zordur. Potansiyel yenilme kütlesi üzerine etkiyen kuvvetleri yenilme yüzeyine paralel yönde bileşenlerine ayırarak,

$$G_s = \frac{\text{Koruyucu Kuvvet}}{\text{Kaydırıcı Kuvvetler}} = \frac{cl_{ab} + \tan \theta [(W - F_v) \cos \beta - F_h \sin \beta]}{(W - F_v) \sin \beta + F_h \cos \beta} \quad (4.3)$$

elde edilir.

$c$  ve  $\phi$ : kohezyon ve kayma mukavemeti açısı

$L_{ab}$ : kayma düzleminin uzunluğudur.

Yatay psödo-statik kuvvet kayma mukavemeti açısı sıfırdan büyük olduğu zaman koruyucu kuvvetleri azalmakta ve kaydırıcı kuvvet artmaktadır. Hem kaydırıcı kuvveti hem de tutucu kuvveti azalttığından (veya yönüne bağlı olarak arttırdığından) dolayı düşey psödo-statik kuvvetin emniyet katsayısı üzerindeki etkisi azdır. Sonuçta, psödo-statik analizlerde düşey ivmeler çoğu zaman dikkate alınmamaktadır. Bu yaklaşım düzlemsel, dairesel ve dairesel olmayan yüzeylerin psödo-statik emniyet katsayılarını hesaplamada kullanılabilir.

#### 4.1.1.1 Psödo-statik katsayıların seçimi

Psödo-statik analiz sonuçları sismik katsayı  $k_h$  'nin değerine kritik şekilde bağlıdır. Psödo-statik stabilite analizinin en önemli ve en zor kısmı, uygun bir psödo-statik katsayının seçimidir. Sismik katsayı, yenilme kütlesi üzerindeki psödo-statik kuvveti kontrol eder; bu nedenle, sismik katsayının değeri, potansiyel olarak duraysız malzeme içinde gelişen atalet kuvvetinin büyüklüğü ile ilişkili olmalıdır. Şev malzemesinin rijit olması durumunda, potansiyel kayma kütlesi üzerindeki atalet kuvveti, gerçek yatay ivme ile duraysız malzemenin kütlesinin çarpımına eşit olur.

Yatay ivme maksimum değerine ulaştığında bu atalet kuvveti de en yüksek değerine ulaşır. Gerçek şevlerin rijit olmadığı ve pik ivmelerin de sadece kısa bir süre içinde etkili olduğu gerçeğinden hareketle, pratikte kullanılan psödo-statik katsayılar genellikle  $a_{max}$  'ın çok altındaki değerlerine karşılık gelmektedir. Seed (1979) deprem kuşağında bulunan 10 ülkedeki 14 baraja ait psödo-statik tasarım kriterlerini incelemiş ve bunların 12'sinde minimum emniyet katsayısı 1,0 ile 1,5 arasında olacak şekilde psödo-statik katsayılar 0,10 ile 0,12 arasında alındığını gözlemlemiştir. Seed (1979) barajın maruz kaldığı büyütme veya küçültme de dahil olmak üzere, barajlar için uygun psödo-statik katsayısının, maksimum ivmenin üçte biri ile yarısı arasında alınmasını önermiştir. Seed (1979) sünek zeminler (yüksek derecede boşluk suyu basıncı oluşturmayan veya tekrarlı yüklemeyle maruz kaldığında dayanımının %15'inden fazlasını kaybeden zeminler) kullanılarak inşa edilen toprak barajlarda 0.75g' den daha küçük pik ivmelerinde, psödo-statik emniyet katsayısının en az 1.15 ve  $k_h=0.1$  ile ( $M=6.5$ )  $k_h=0.15$  ( $M=8.25$ ) olduğu şartlarda deformasyonların kabul edilebilir düzeyde düşük olduğunu belirtmiştir. Bu ltler, pik ivmesinin %13 ile %20'si kadar düşük psödo-statik ivmelerin kullanımına izin vermekte olup bu yaklaşımın sınırlarını gündeme getirmektedir.

#### **4.1.1.2 Psödo-statik yaklaşımın sınırları**

Deprem sarsıntısının karmaşık ve dengesiz etkilerinin sabit ve tek yönlü psödo-statik ivme ile temsil edilmesi oldukça kaba bir yaklaşımdır. Psödo-statik yaklaşımın sınırlamaları bu yaklaşımın ilk evrelerinde net olarak ortaya konmuştur. Terzaghi (1950) "en azından belirtmek gerekir ki, depremin etkisini şevlere yansıtan kavram çok yanıştır" demiş ve hesaplanan psödo-statik emniyet katsayısının 1.0'den büyük olması durumunda bile şevin duraysız olabileceğini belirtmiştir. Depremden kaynaklanan tarihsel ve güncel heyelanlar üzerinde yapılan ayrıntılı incelemeler yarı statik yaklaşımın eksikliklerini ortaya koymuştur. Bu konudaki deneyimler, yüksek derecede boşluk suyu basıncı oluşturan veya deprem sarsıntısından dolayı dayanımının %15' den fazlasını kaybeden zeminlerde psödo-statik analizlerin güvenilir olmayabileceğini açık bir şekilde göstermiştir. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, psödo-statik analize göre emniyet katsayısı 1.0'in çok üzerinde olan bazı barajlarda daha sonra deprem sırasında yenilme meydana gelmiştir. Bu rnekler, zayıflatan duraysızlığa duyarlı şevlerin stabilitesini güvenilir bir şekilde değerlendirmede psödo-statik yöntemin yetersiz kaldığını göstermektedir. Ancak, psödo-statik yaklaşım, stabilite için mutlak olmasa da kaba bir göreceli stabilite indisi verebilmektedir.

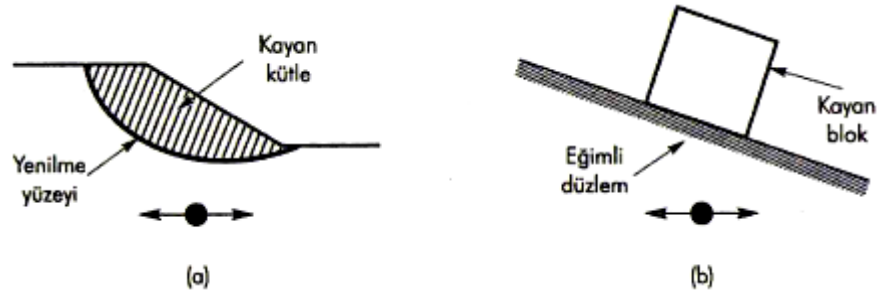
**Çizelge 4.1** Deprem sırasında yenilen toprak barajların psödo-statik analiz sonuçları.  
(Kramer, 1996).

| Baraj                       | $k_h$ | GS    | Deprem Etkisi                                                                       |
|-----------------------------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Sheffield Barajı            | 0.10  | 1.2   | Tamamen Yıkılma                                                                     |
| Aşağı San Fernando Barajı   | 0.15  | 1.3   | Memba Yüzeyi Şev Yenilmesi                                                          |
| Yukarı San Fernando Barajı  | 0.15  | 2-2.5 | Kret de dahil olmak üzere<br>mansap yüzü yaklaşık 1.8m<br>mansap yönünde kaymıştır. |
| Maden Atık Barajı (Japonya) | 0.20  | 1.3   | Baraj yenilmesi ve atıkların<br>yayılması                                           |

#### 4.1.2 Newmark kayan blok analizi

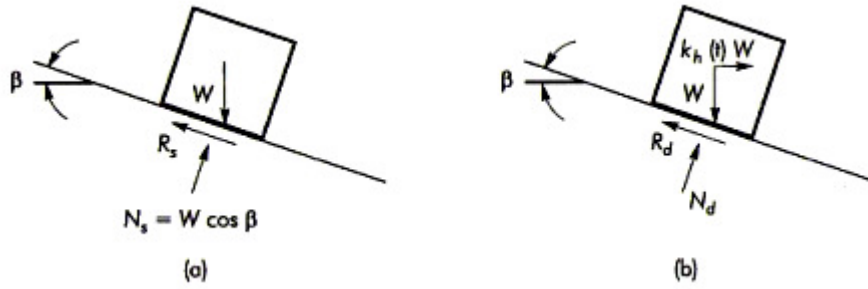
Diğer tüm limit denge yöntemlerinde olduğu gibi, psödo-statik analiz yöntemi bir güvenlik sayısını verir fakat şev yenilmesi ile ilgili deformasyonlar hakkında herhangi bir bilgi vermez. Herhangi bir depremden sonra bir şevin kullanılabilirliği, deformasyonlar tarafından kontrol edildiğinden, şev yer değiştirmelerini kestiren analizler sismik şev stabilitesi hakkında daha yararlı bilgiler sağlamaktadır. Depremin oluşturduğu ivmeler zaman içinde değiştiğinden, yarı-statik güvenlik sayısı da depremin başından sonuna kadar sürekli değişecektir. Potansiyel kayma kütlesi üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin, toplam kaydırıcı (statik artı dinamik) kuvvetler, mevcut tutucu kuvvetleri aşacak kadar büyük olması halinde, güvenlik sayısı 1.0'in altına düşecektir. Newmark (1965) böyle şartlar altındaki bir şevin davranışını incelemiştir. Güvenlik sayısı, 1.0' den küçük olduğunda, potansiyel kayma kütlesi artık denge durumunda değildir. Sonuçta, dengesiz bir kuvvetle ivmelendirilecektir. Bu durum, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, eğimli bir düzlem üzerinde duran blok ile benzerdir. Newmark bu benzerliği kullanarak, herhangi bir yer hareketine maruz kalan bir şevdeki kalıcı yer değiştirmeyi kestirmeye yönelik bir yöntem geliştirmiştir.

Şekil 4.2 (b)' deki eğimli düzlem üzerinde statik denge halindeki duraylı bir bloğu ele alırsak, statik şartlarda bloğun dengesi (düzleme paralel yönde) mevcut statik tutucu kuvvet  $R_s$ 'nin statik kaydırıcı kuvvet  $D_s$ 'den büyük olmasını gerektirir. Şekil 4.3 'teki bloğun kaymaya karşı direncinin tamamıyla sürtünmeden kaynaklandığını ( $c=0$ ) kabul ederek güvenlik sayısı,



**Şekil 4.2 :** (a) Potansiyel heyelan ve (b) eğimli düzlem üzerinde sükunetteki blok arasındaki benzerlik (Kramer, 1996).

$$G_s = \frac{\text{MevcutKoruyucuKuvvet}}{\text{StatikKaydırıcıKuvvetler}} = \frac{R_s}{D_s} = \frac{W \cos \beta \tan \phi}{W \sin \beta} = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (4.4)$$



**Şekil 4.3 :** Eğimli düzlem üzerinde duran bloğa etkiyen kuvvetler: (a) statik şartlar; (b) dinamik şartlar.

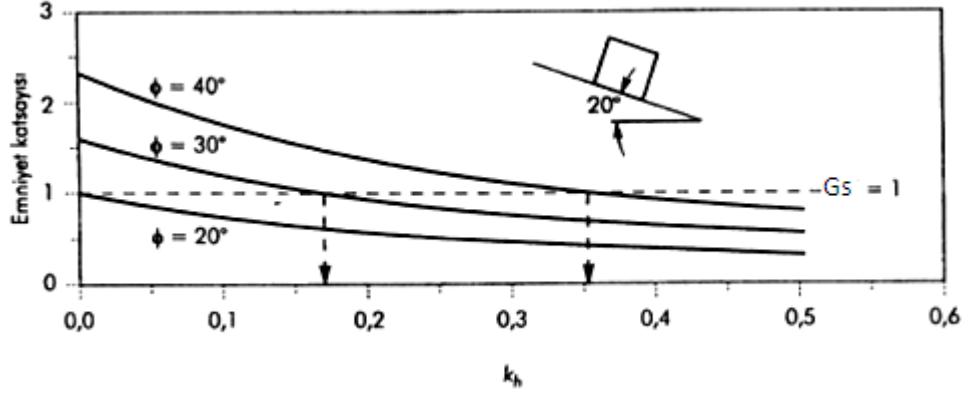
olur. Burada,  $\phi$ , blok ve düzlem arasındaki içsel sürtünme açısıdır. Şimdi de eğimli düzlemin  $a_h(t)=k_h(t)g$  ivmesi ile yatay yönde titreşmesiyle bloğa aktarılan atalet kuvvetlerini göz önüne alınır ( basitlik açısından düşey ivmelerin etkisi ihmal edilmiştir). Belirli bir anda bloğun yatay ivmesi, Şekil 4.3 b)' de görüldüğü gibi yatay atalet kuvveti  $k_h W$  'i oluşturacaktır. Atalet kuvvetinin eğimin aşağı yönünde etkilediği durumda kuvvetlerin eğimli düzleme paralel ve dik yönde bileşenlerine ayrılmasıyla,

$$G_{s_d}(t) = \frac{\text{MevcutKoruyucuKuvvet}}{\text{Psödo - statikKaydırıcıKuvvetler}} = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{[\cos \beta - k_h(t) \sin \beta] \tan \phi}{\sin \beta + k_h(t) \cos \beta} \quad (4.5)$$

olur. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi,  $k_h$  artarken dinamik emniyet katsayısı azalır ve statik olarak duraylı blok için  $k_h$  nın emniyet katsayısını 1.0 olarak veren pozitif bir

değeri vardır. Yenilme katsayısı  $k_y$ , olarak adlandırılan bu katsayı yenilme ivmesi  $a_y=k_y g$  ye karşılık gelir. Eşik ivmesi, blokta duraysızlığa neden olmak için gerekli minimum psödo-statik ivmedir. Şekil 4.3 'teki blokta aşağı yönde kayma için,

$$k_y = \tan(\phi - \beta) \quad (4.6)$$



**Şekil 4.4 :** 20° eğimli düzlem üzerindeki blok için psödo-statik emniyet katsayısının yatay psödo-statik katsayı ile değişimi.  $\phi=20^\circ$  için, blok statik şartlarda yenilme noktasındadır ( $G_s=1$ ).

olur. Eğim yukarı yönde kayma için ise bu durum  $\beta$  ve  $\phi$  küçük iken gelişir,

$$k_y = \frac{\tan \phi + \tan \beta}{1 + \tan \phi \tan \beta} \quad (4.7)$$

#### 4.1.3 Modifiye newmark metodu

Newmark (1965), Rankine dersinde depremler sırasında kuru şevlerin deplasman hesabı için basit bir iki blok modeli öngörmüştür. Bu temel model blok ile şev arasında sınırlayıcı bir sürtünme açısının var olduğunu öngörür, stabilite için bu açıdan daha büyük bir açı gerektiren herhangi bir taban ivmesi şev hareketine yol açacaktır. Mohr-Coulomb kriteri kullanılarak,  $\beta$  açısına ve  $\phi$  sürtünme açısına sahip bir şev üzerinde hareket olmaması için aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\frac{\tan \beta + \tan \phi}{\tan \beta \tan \phi - 1} < \frac{a}{g} < \frac{\tan \beta - \tan \phi}{1 + \tan \beta \tan \phi} \quad (4.8)$$

Burada  $a$  yatay taban ivmesidir. Bu yöntem etkili bir gerilme tabanlı yaklaşıma modifiye edilebilir ve sonuçlanan hareket üzerindeki boşluk basıncı etkisini dahil

edebilir. Aşırı boşluk basınçları oluşursa sıvılaşmaya gideceğinden, sınırlandırma ivmeleri düşer. Eşiklerin şev açısına denk gelen asimetrikleri, deprem sırasında ve sonrasında şev aşağısında deplasmanların toplanmasına yol açar. Newmark deformasyon modellemesi, iki toprak bloğu arasında oluşacak relatif hareket sayesinde belirli kritik ivmelerin varlığına dayanmaktadır. Eğimli bir zeminde, mevcut statik kayma gerilmeleri ivme eşiklerinin yukarı ve aşağı meyil yönlerinde birbirlerine eşit olmamalarına yol açacaktır. Bu durum, simetrik girdi ivmesi için bile sıfır olmayan nihai deplasmana yol açabilir, bu da yanal yayılmanın varlığına işaretler. Newmark modellemesi, taban sarsılmasına maruz kalan eğik düzlemler üzerinde rijit bloklar halinde toprak kaymasının davranış analizini temel almaktadır (Haigh vd.,2001).

Yapılan araştırmalar, şeve etki eden pik zemin ivmesi  $a_{max}$ 'ın akma ivmesi olan  $a_y$  'den her zaman büyük olma koşulu ile kaymanın gerçekleşeceği ifadesinin ve analizlerde yanal yayılmayı ihmal etmesi Newmark metodunun eksik yönlerinin olduğunu ortaya koymuştur (Day, 2001).

#### 4.1.3.1 Efektif gerilme Newmark metodu

Bu yöntem, zemine ait kayma gerilmesinin düzleme etkiyen efektif gerilme ile kayma mukavemet açısının tanjantının çarpımı olarak kabul edilmesine dayanır. Bu, denklem 4.9 'da görülebileceği gibi boşluk suyu basıncının ve boşluk suyu basıncından dolayı oluşan efektif gerilmenin zamanla değiştiği, sıvılaşabilen şevlerdeki zamana bağlı eşik ivmesi durumunu verir.

$$\frac{\left( \tan \beta + \tan \phi - \frac{u \tan \phi}{\sigma_v \cos \beta} \right)}{\tan \beta \tan \phi - 1} < \frac{a}{g} < \frac{\left( \tan \beta - \tan \phi - \frac{(u \tan \phi)}{\sigma_v \cos \beta} \right)}{1 + \tan \beta \tan \phi} \quad (4.9)$$

Bu modifiye Newmark metodu, deprem yüklerinin etkisiyle oluşan şevlerde deplasman tahminine, boşluk suyu basınç gelişim tahminine izin vermekte ancak tam sıvılaşma esnasında residüel dayanım tahminine cevap verememektedir (Haigh, 2002).

#### 4.1.3.2 Efektif gerilme newmark metodu ve residüel gerilme

Deprem sonrası, zeminlerde sıfıra yakın efektif gerilmeye rağmen residüel gerilme oluşabilir. Bu kabule göre eşik ivme değeri denklem 4.10'da görüldüğü gibi olup bu denklemde kullanılan  $r$  değeri tam sıvılaşmış zeminin residüel kayma gerilmesinin,

sıfır aşırı boşluk suyu basıncındaki pik gerilmeye oranı olarak bilinmektedir.

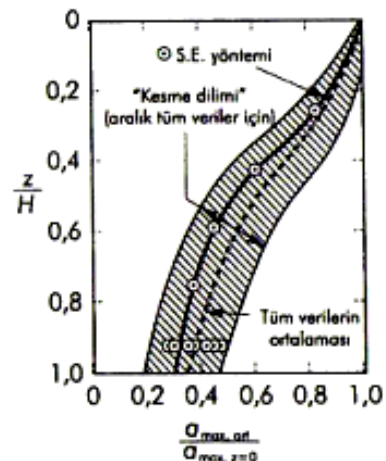
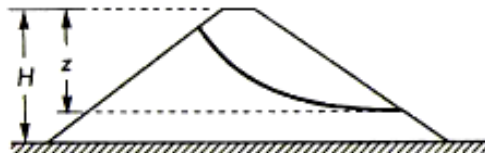
$$\frac{\left( \tan \beta + \tan \phi - \frac{u \tan \phi (1-r)}{\sigma_v \cos \beta} \right)}{\tan \beta \tan \phi - 1} < \frac{a}{g} < \frac{\left( \tan \beta - \tan \phi - \frac{(u \tan \phi)(1-r)}{\sigma_v \cos \beta} \right)}{1 + \tan \beta \tan \phi} \quad (4.10)$$

Bu kabul zeminin aşırı boşluk suyu basınç durumundan tam sıvılaşmış duruma zemin kayma gerilmesinin lineer değişimini verir (Haigh, 2002)..

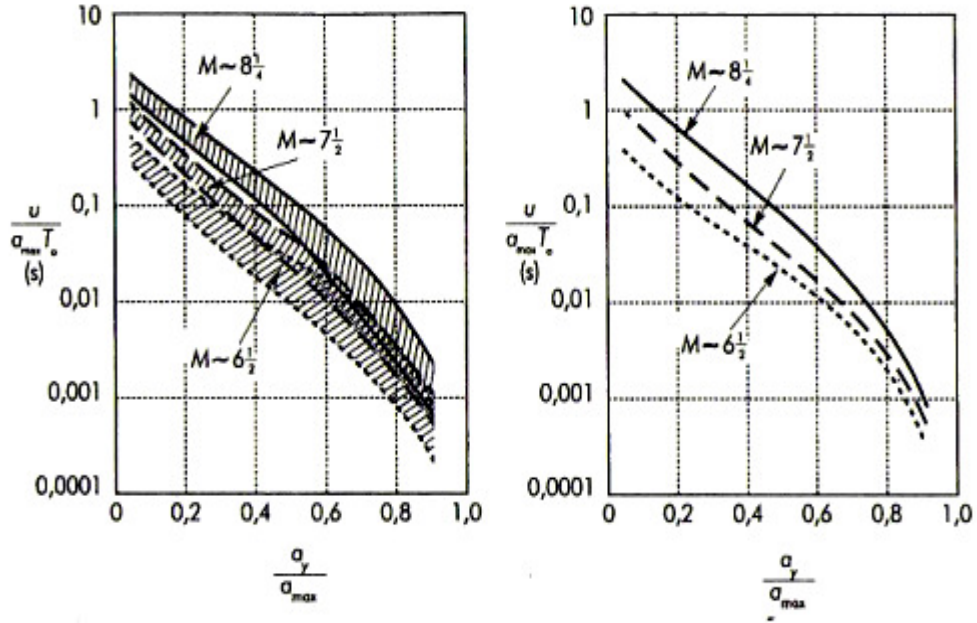
#### 4.1.4 Makdisi - Seed analizi

Makdisi ve Seed (1978) toprak baraj ve dolguların depremden kaynaklanan kalıcı deformasyonlarını hesaplamada, Chopra (1966) prosedürü ve kayan blok analizleri ile hesaplanan ortalama ivmeleri kullanmıştır. Böyle yapıların dinamik sonlu elemanlar ve kayma kirişi analiz sonuçlarında basitleştirici varsayımlar yapmak suretiyle, kalıcı deformasyonların hesaplamasına yönelik basitleştirilmiş bir yöntem geliştirilmiştir. Basitleştirilmiş yöntemde belirli bir potansiyel yüzeyinin yenilme ivmesi, zeminin dinamik yenilme dayanımı drenajsız dayanımın %80'i kullanılarak hesaplanmaktadır. Baraj veya dolgunun dinamik tepkisi, Şekil 4.5 'te görüldüğü gibi potansiyel yenilme yüzeyinin baraj veya dolgu yüksekliğine olan göreceli derinliğine göre değişen ivme oranı şeklinde hesaba katılır.

Makdisi ve Seed (1978) değişik büyüklükteki depremleri temsil etmek üzere yeniden ölçeklendirilmiş birkaç gerçek ve yapay yer hareketini birkaç gerçek ve kuramsal baraja uygulamak suretiyle, kalıcı yer değiştirmenin  $a_y/a_{max}$  oranı ve deprem şiddeti ile değişimini hesaplamıştır. Makdisi-Seed yöntemini kullanarak kalıcı yer değiştirmelerin hesaplanması Şekil 4.6'da gösterilen diyagramlarla gerçekleştirilmektedir. Makdisi-Seed basitleştirilmiş yöntemi, baraj ve dolgulardaki kalıcı yer değiştirmelerin hesaplanmasında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Yöntemin baraj ve dolguların dinamik tepki özelliklerine dayanmasından dolayı, diğer şev türlerine uygulandığında sonuçların dikkatlice yorumlanması gerekir.



**Şekil 4.5 :** Barajlar ve dolgularda ortalama maksimum ivmenin potansiyel yenilme yüzeyi derinliği ile değişimi (Makdisi ve Seed, 1978).



**Şekil 4.6 :** Normalize edilmiş kalıcı yer değiştirmenin değişik büyüklükteki depremlerin yenilme ivmesi ile değişimi: birkaç deprem ve baraj/dolgu için; ortalama değerler (Makdisi ve Seed 1978).

#### 4.1.5 Gerilme deformasyon analizi

Statik şev stabilitesinin gerilme-deformasyon analizleri genellikle statik sonlu eleman analizleri ile yapıldığı gibi, sismik şev stabilitesinin gerilme-deformasyon analizleri de genellikle dinamik sonlu eleman analizleri kullanılarak yapılmaktadır. Böyle analizlerde sonlu eleman ağının her elemanındaki sismik kökenli kalıcı birim deformasyonlar, şevin kalıcı deformasyonunu elde etmek üzere entegre edilirler. Her elemanın içindeki kalıcı birim deformasyonlar iki değişik şekilde hesaplanabilir. Birim deformasyon potansiyeli ve rijitlik azalması yaklaşımları kalıcı birim deformasyonları hesaplamada, deprem yüklemesine maruz kalan zeminlerin "rijitliğini" belirleyen laboratuvar deney sonuçlarını kullanırlar. Doğrusal olmayan analiz yaklaşımları, depremin tamamı boyunca kalıcı birim deformasyonların

gelişimini hesaplamak için, zeminin doğrusal olmayan inelastik gerilme-birim deformasyon davranışını kullanırlar.

#### **4.1.5.1 Birim deformasyon potansiyeli analizi**

Seed vd. (1973) Yukarı ve Aşağı San Fernando Barajları'nda 1971 San Fernando depreminde meydana gelen kaymaları inceleyen kilometre taşı niteliğindeki çalışmalarında, doğrusal veya eşdeğer doğrusal analizlerin sonuçlarından hareketle depremden kaynaklanan şev deformasyonunu hesaplamak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, dinamik sonlu elemanlar analizinin her elemanındaki devirsel kayma gerilmeleri hesaplanır. Tekrarlı laboratuvar deneylerinin sonuçlarını kullanarak hesaplanan devirsel kayma gerilmeleri, her eleman için kayma birim deformasyonu olarak ifade edilen birim deformasyon potansiyelini hesaplamada kullanılır. Sonra; deformasyonlar, şevdeki bir düşey kesit boyunca ortalama birim deformasyon potansiyeli ile o kesitin yüksekliğinin çarpımı şeklinde hesaplanır. Bu yöntemde; arazide gelişen birim deformasyonların, laboratuvar da benzer şekilde yüklenen deney numunelerindeki ile aynı olduğu ve maksimum kayma gerilmesinin tüm elemanlarda yatay yönde etki ettiği dolaylı olarak varsayılmaktadır. Buna göre, birim deformasyon potansiyeli yaklaşımı sadece yatay yer değiştirmeleri hesaplamaktadır. Birim deformasyon potansiyeli yaklaşımına dayalı analizler açıkça görüldüğü gibi çok kaba yöntemlerdir ve bunların sonuçlarının yorumlanması sırasında bu gerçek hatırdan çıkarılmamalıdır.

#### **4.1.5.2 Rijitlik azalması yaklaşımı**

Kalıcı şev deformasyonunu hesaplamada bir diğer yöntem de Lee (1974) ve Serff vd. (1976) tarafından geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, hesaplanan birim deformasyon potansiyelleri zeminin rijitliğini azaltmada kullanılır. Sonra, depremden kaynaklanan şev deplasmanı, iki statik sonlu elemanlar analizindeki düğüm noktası yer değiştirmeleri arasındaki fark olarak alınır. Bunlardan biri ilksel kayma modülünü, diğeri de azalmış kayma modülünü kullanır. Bu teknik, doğrusal veya doğrusal olmayan modellerde kullanılabilir. Birim deformasyon potansiyeli yaklaşımından farklı olarak, rijitlik azalması yaklaşımı yatay yer değiştirmelere ek olarak düşey yer değiştirmeleri de hesaplar. Bu yaklaşım kaba bir yaklaşımdır ve birim deformasyon potansiyelinin sınırlamalarının çoğu bunda da mevcuttur. Rijitlik azalması için daha esaslı bir yöntem ortaya koymada iş enerji ilkelerinden yararlanılabilir (Byrne, 1991; Byrne vd., 1992).

#### **4.1.5.3 Doğrusal olmayan analiz yaklaşımı**

Kalıcı şev deformasyonları doğrusal olmayan inelastik zemin modellerini kullanan sonlu elemanlar yöntemiyle de hesaplanabilir. Şevlerin sismik performansı devirsel gerilme-birim deformasyon modelleri (Finn vd., 1986) ve ileri yapıcı modellerin (Prevost, 1981; Mizuno ve Chen, 1982; Kawai, 1985; Daddazio vd., 1987) ikisini de kullanan iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmektedir. Bu tekniklerin en yaygın uygulama alanı toprak barajların analizidir.

#### **4.2 Mukavemet Kaybından Kaynaklı Duraysızlık Analizi**

Depremden kaynaklanan gerilmeler ve birim deformasyonlar, boşluk suyu basıncı artışı ve yapısal örseleme şeklinde bir süreç ile zeminin kayma dayanımını azaltabilir. Zayıflatan duraysızlıklar genellikle sıvılaşma olaylarında meydana gelir ve akma yenilmeleri ile deformasyon yenilmeleri olarak iki ana sınıfa ayrılır. Akma yenilmeleri, mevcut dayanımın bir şevdeki dengeyi sağlamak için gerekli kayma gerilmelerinden küçük olduğu durumda gelişir. Bu nedenle, akma yenilmelerine neden olan gerçekte statik gerilmelerdir. Çabucak ve herhangi bir uyarı işareti vermeden gelişen büyük deformasyonlar oluşturabilirler. Deformasyon yenilmeleri; zeminin kayma dayanımının, depremden kaynaklanan kayma gerilmeleri tarafından geçici bir süre aşıldığı noktaya düşmesi ile gelişmektedir. Ataletsel yenilmelere çok benzeyen deformasyon yenilmeleri, deprem sonunda duran bir dizi kalıcı yer değiştirme şeklinde gelişir. Akma yenilmeleri ve deformasyon yenilmelerinin analizi konusunda farklı yöntemler bulunmaktadır.

##### **4.2.1 Akma yenilmesi analizi**

Akma yenilmeleri genellikle dayanımda büyük azalmalara neden olduğundan, çoğu zaman büyük ve yıkıcı deformasyonlar meydana getirirler. Bunların analizinde birinci adım bu yenilmenin olup olmayacağını belirlemektir. Akma yenilmesi ile oluşan hasarın yayılımını hesaplamak için, akma yenilmesi deformasyonunu belirlemeye yönelik yöntemler de geliştirilmiştir.

##### **4.2.1.1 Stabilité analizi**

Potansiyel akma kayması duraysızlığı genellikle deprem sonrası şartlardaki zemin dayanımını kullanan geleneksel şev stabilité analizleri ile değerlendirilmektedir (Marcuson vd., 1990). Tipik bir analizde önce bir potansiyel yenilme yüzeyi üzerindeki tüm noktaların sıvılaşmaya karşı emniyet katsayısı hesaplanır, sonra

potansiyel yenilme yüzeyinde emniyet katsayısının 1.0'den küçük olan kısımları için rezidüel dayanımlar tayin edilir. Sıvılaşmaya karşı emniyet katsayısının 1.0'den büyük olduğu yerlerde dayanım değerleri, deprem sonundaki efektif gerilmelere dayanır bu da, deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncını dikkate alınması ile mümkün olur. Bu dayanımlarla birlikte geleneksel limit denge şev stabilite analizi kullanılarak akma kaymasına karşı genel emniyet katsayısı hesaplanır. Genel emniyet katsayısının 1.0'den küçük olması durumunda akma kaymasının oluşması beklenir. Bu tür stabilite değerlendirmelerinde kademeli yenilme ihtimali de dikkate alınmalıdır, ilerlemeli yenilmedeki gerilmelerin yeniden dağılımı limit denge analizlerinde doğrudan hesaba katılmamaktadır.

#### **4.2.1.2 Deformasyon analizi**

Stabilite analizlerine göre akma yenilmesinin oluşması muhtemel olduğu durumlarda, yenilmeden etkilenen bölgenin yayılımı akma yenilmesi deformasyonlarının analiziyle belirlenebilir. Akma kayması deformasyonlarına ait kaba tahminler akma kaymasının tetiklenmesinden önceki küçük deformasyonları ihmal ederek; limit denge, akışkanlar mekaniği ve gerilme-birim deformasyon analizi yöntemlerine dayalı olarak yapılabilmektedir.

#### **4.2.2 Deformasyon yenilme analizi**

Deformasyon yenilmelerindeki deformasyonlar akma kaymasına kıyasla genellikle düşük olsa da, büyük ölçüde hasara neden olabilmektedir. Deformasyon yenilmesinin en yaygın türü yanal yayılmadır. Son yıllarda çok sayıda araştırmacı deformasyon yenilmeleri ile oluşan kalıcı yer değiştirmeleri hesaplamada birçok yöntem geliştirmiştir. Deformasyon yenilmelerini oluşturan mekanizmalar çok karmaşık olduğundan, sonuçta gelişen yer değiştirmelerin kestirilmesi de daha çok ampirik yöntemlerle yapılmaktadır.

##### **4.2.2.1 Hamada vd. yaklaşımı**

Hamada vd. (1986), 1964 Niigata (M= 7.5), 1971 San Fernando (M= 7.1) ve 1983 Nihonkai-Chubu (M=7.7) depremlerinde üniform kumlarda gözlenen kalıcı zemin yer değiştirmelerindeki geoteknik ve topoğrafik etkilerini gözlemlemişlerdir. Kalıcı deformasyonların en çok sıvılaşan katmanın kalınlığı ile zemin yüzeyinin ve sıvılaşan zonun alt sınırının eğiminden etkilendiği bulunmuştur. Kalıcı yatay zemin yer değiştirmesi D 'nin aşağıdaki ampirik ilişkiye göre değiştiği bulunmuştur:

$$D(m) = 0.75H^{1/2}\theta^{1/3}$$

(4.11)

$H$ : sıvılaşan zeminin kalınlığı (m)

$\theta$ : zemin yüzeyi eğimi ile sıvılaşan zeminin alt sınırının eğimi arasında büyük olanı(% cinsinden).

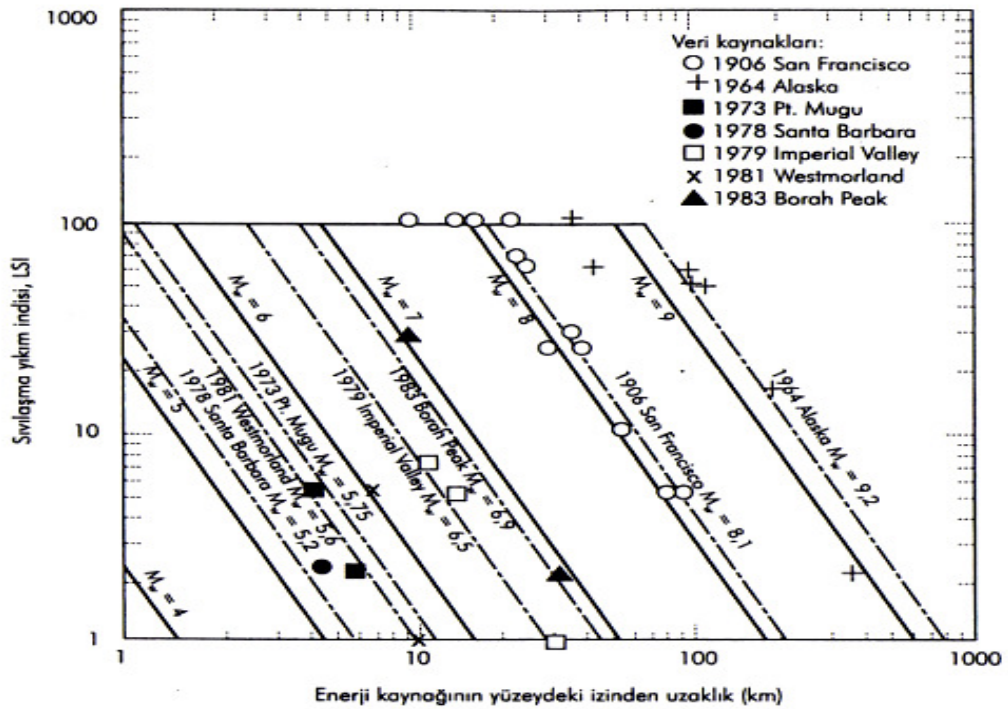
#### 4.2.2.2 Youd ve Perkins (Sıvılaşma yıkım indisi)

Çok sayıda arazi örneğinde gözlenen yanal yer değiştirmelere dayalı olarak, Youd ve Perkins (1987) sıvılaşma yıkım indisini (LSI) "geniş ve aktif sel düzlükleri, deltalar veya geç Holosen yaşlı nehir çökellerinin tatlı eğimli alanlarında gelişen yanal yayılmaların genel maksimum  $d$  değeri (inç olarak)" tanımlamıştır. Tanımda belirtildiği gibi, LSI belirli bir alandaki zemin yer değiştirmesini hesaplamada tutucu bir sonuç verir. Alanda, küçük yer değiştirmelerde bile yenilmeler beklenir. Örneklere dayalı bir veri tabanından LSI aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$\log(LSI) = -3.49 - 1.85 \log R + 0.98 M_w \leq 100 \quad (4.12)$$

$R$ : sismik enerji kaynağından yatay uzaklığı (km)

$M_w$ : Deprem büyüklüğü



**Şekil 4.7** : LSI'nın uzaklık ve deprem büyüklüğü ile değişimi (Youd ve Perkins, 1986).

LSI' nın M (depremin şiddeti) ve  $\phi$  (içsel sürtünme açısı) ile değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Farklı LSI değerlerine ait deformasyon yenilmelerinin nitel tanımlamaları Çizelge 4.2'de verilmektedir. LSI'nın şiddet ve mesafeye bağımlılığı onun probabilistik sismik tehlike analizinde kullanılmasına yardımcı olur. Youd ve Perkins (1987) bu yaklaşımı güney California'nın olasılıksal LSI haritalarının hazırlanmasında kullanmıştır.

**Çizelge 4.2** : Sıvılaşabilir Zeminlerin genişçe yayılım gösterdiği alanlarda farklı LSI değerleri için sıvılaşma etkilerinin genel karakteri ve çokluk durumu. (Youd ve Perkins, 1987)

| LSI | Açıklama                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5   | Çapı 5 m'ye kadar yayımlı kum kaynamaları; 0.1 m genişliğe kadar açıklıktaki zemin fisürleri ve 25 mm'ye kadar zemin oturmalarının çok seyrek dağılımlarını içeren <u>çok seyrek</u> zemin etkileri. Bu etkilerin gözlemlendiği yerler başlıca açığa çıkmış nehir yatakları, aktif sel düzlükleri, çamur düzlükleri, kıyı kenarları vb. gibi güncel çökme alanları ile sığ yeraltı suyunun birlikte bulunduğu yerlerdir.                                                                               |
| 10  | Yayılım alanı çapı 1 m'ye kadar olan kum kaynamaları; 0.3 m genişliğe kadar açıklıktaki zemin fisürleri ve gevşek kumla dolmuş kanal veya hendek gibi alanlarda birkaç cm boyutunda zemin oturmalarının <u>seyrekçe</u> dağılımları. Dik nehir kıyıları boyunca birkaç dm'ye kadar oturmalar. Bu etkiler başlıca su tablasının 3 m'den daha sığ olduğu güncel çökellerde gözlenmektedir.                                                                                                               |
| 30  | Yayılım çapı 2 m'ye kadar olan kum kaynamaları, birkaç dm genişlikteki zemin fisürleri, bazı çit ve yolların önemli ölçüde ötelenmesi, 0.3 m kadar olan ve ender görülen türde zemin oturmaları ve dik nehir kıyıları boyunca yaygın yerdeğiştirmelerde 0.3 m'ye kadar oturmalar içeren <u>genellikle seyrek fakat yerel olarak bol</u> zemin etkileri. Etkilerin önemli bir bölümü su tablasının 3 m'den daha sığ olduğu güncel çökellerde gözlenir.                                                  |
| 50  | Geniş fisür bantları ile genellikle birleşen ve yayılım çapı 3 m'ye kadar olan kum kaynamaları, 1.5 m genişliğe varan yarıklar, genellikle çok sayıda kola ayrılmış, nehre paralel veya çöküntü alanına doğru eğrili yarıklar, bazı yerlerde 1.5 m kadar birbirinden ayrılmış, ötelenmiş yol veya çitler, 0.3 m'den daha fazla yerel zemin oturmaları ve dik nehir kıyıları boyunca yaygın bir metrelik oturmalar şeklindeki <u>yaygın</u> zemin etkileri.                                             |
| 70  | Çok sayıda büyük çaplı kum kaynamaları (genellikle yarıklarla birleşen 6 m'den daha büyük yayılım çapında), nehirlere veya kıyılara paralel uzun yarıklar, genişliği 2 m'yi bulan ve çok sayıda kollara ayrılan yarıklar, nehirler veya diğer dik kıyılar boyunca çok sayıda büyük oturmalar, 30° den az eğimli yamaçlarda yarıklar arasında bütünlüğü bozulmadan 1-2 m yerdeğiştiren zemin kütleleri ve 0.3 m'den daha büyük ve sıkça gelişen zemin oturmaları şeklinde <u>yaygın</u> zemin etkileri. |
| 90  | Geniş çaplı ve çok sayıda kum kaynaması, bazı alanlarda %30 veya daha fazla kesimin yeni çökelmiş kumla kaplanması, genişliği 2 m veya daha fazla, nehirlere veya kıyı çizgilerine paralel, uzun yarıklar, 30° den az eğimli yamaçlarda yarıklar arasında bütünlüğü bozulmadan 2 m kadar yerdeğiştiren zemin kütleleri, nehir boylarında veya diğer dik kıyılarda büyük oturmalar ve 0.3 m'den daha büyük miktarda zemin oturmaları içeren çok yaygın zemin etkileri                                   |

#### 4.2.2.3 Bryan yaklaşımı

Byrne yaptığı çalışmada bir şevli sıvılaştırılmış bir zemin katmanını üzerinde oturan ve henüz doğal şekli bozulmamış sert bir kabuk şeklinde modellemiştir. Şekil 4.8'de deformasyon hesaplama modeli için gerilme, birim deformasyon ve geometrik notasyonlar belirtilmektedir. Bu modelde kalıcı şev deformasyonunu hesaplamada sıvılaştırılan zeminin elastik-tam plastik modeli ile birlikte iş-enerji ilkeleri kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, kalıcı yer değiştirme  $D$  aşağıdaki bağıntılardan elde edilir:

$$\frac{D^3 S_r}{3(\gamma_{\text{lim}} T_L)^2} - D \tau_{st} - \frac{1}{2} m v_0^2 = 0 \quad D < \gamma_{\text{lim}} T_L \quad (4.13)$$

$$D = \frac{3 m v_0^2 4 S_r \gamma_{\text{lim}} T_L}{6(S_r - \tau_{st})} \quad D \geq \gamma_{\text{lim}} T_L \quad (4.14)$$

Burada,

$S_r$ : sıvılaştırılan zeminin rezidüel dayanımı

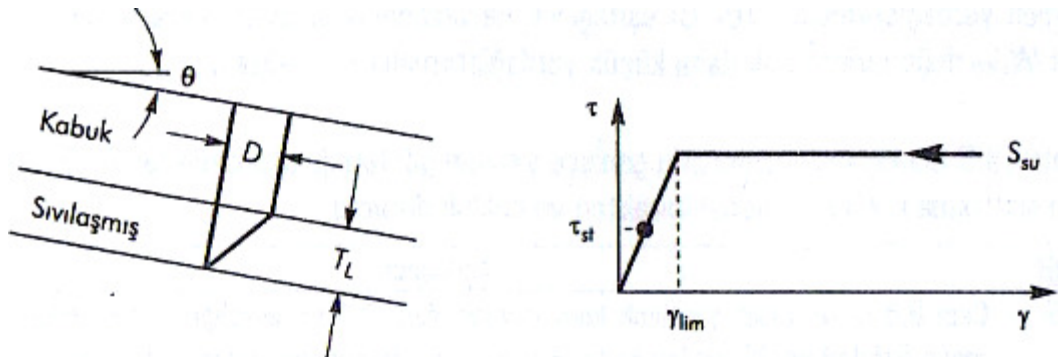
$\gamma_{\text{lim}}$ : sınırlayıcı kayma birim deformasyonu,

$T_L$ : sıvılaştırılan katmanının kalınlığı,

$\tau_{st}$ : statik denge için gerekli ortalama kayma gerilmesi, (sıvılaştırılan katmanının orta derinliğinden geçen yenilme yüzeyi üzerinde)

$m$ : yenilme düzlemi üzerindeki zeminin kütlesi

$v_0$ : sıvılaştırma anında kütlenin hızıdır.



**Şekil 4.8** : Byrne (1991)'in deformasyon hesaplama modeli için gerilme, birim deformasyon ve geometrik notasyonları

#### 4.2.2.4 Baziar ve diğer yaklaşımlar

Sismik Şev stabilitesinin temel özelliklerini tanımlamada kayan blok analizini kullanan Baziar vd. (1992) kalıcı yanal yer değiştirme için genel bir formül geliştirmiştir:

$$d = N \frac{v_{\max}^2}{a_{\max}} f \left( \frac{a_y}{a_{\max}} \right) \quad (4.15)$$

Burada;

$N$  : Harmonik Yüklemedeki devirlerin eşdeğer sayısı

$v_{\max}$ : Pik yatay hız

$a_{\max}$ : Pik yatay ivme

$a_y$  : Yenilme İvmesi'dir.

## **5. DEPREM YÜKLERİ ALTINDA ZEMİNLERDE MEYDANA GELEN SIVILAŞMA**

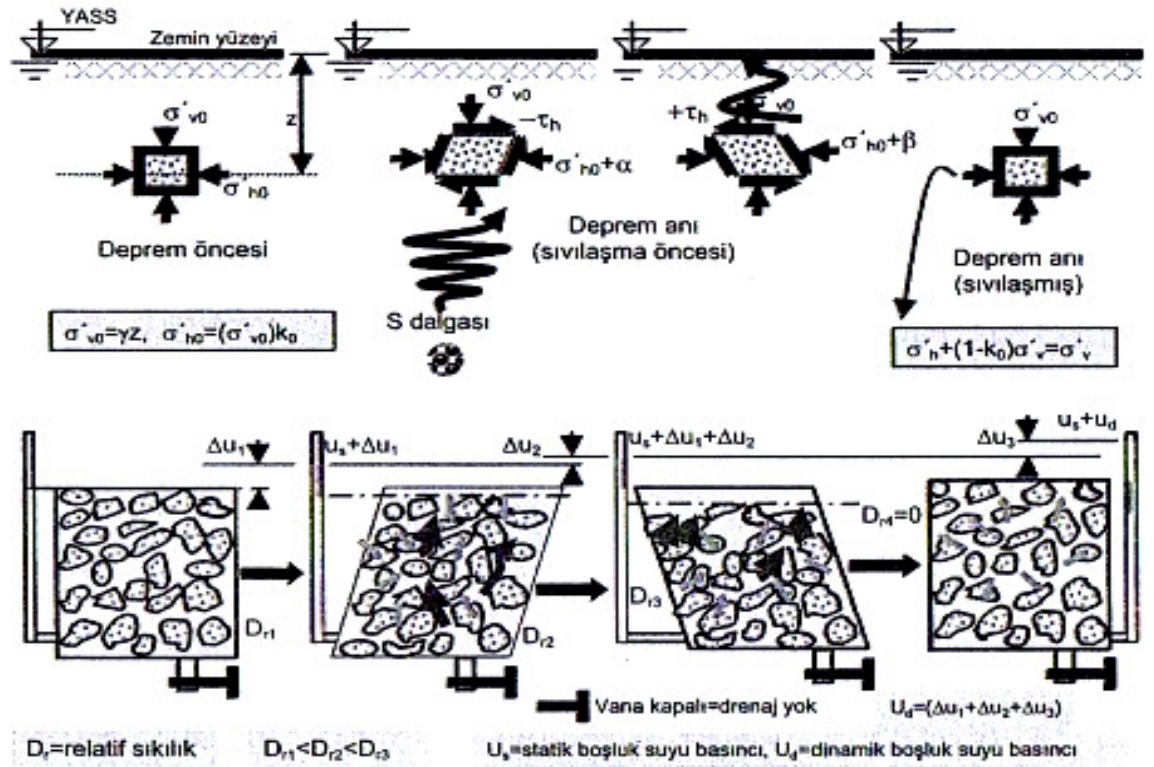
### **5.1 Sıvılaşmanın Tanımı**

Sıvılaşma, deprem kökenli tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kohezyonsuz zeminlerde hızlı kayma mukavemeti kaybıdır. Bazen kayma dayanımı neredeyse tamamen kaybolurken bazen de normalden daha düşük bir değere iner. Her iki durumda da sıvılaşma çok çeşitli hasarlara yol açabilir. Bu nedenle, değerlendirilmesi geoteknik deprem mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Bir deprem anında meydana gelen kayma dalga yayılımının neden olduğu devirsel kayma gerilmeleri gevşek, suya doymuş kohezyonsuz bir zeminde hacimsel azalmaya neden olur. Bu azalma zemin tanelerini daha sıkı konumda olmaya zorlar ve taneden taneye yük aktarımına neden olur. Bu yük transferi boşluk suyu basıncını artırır. Sismik sarsıntı çok hızlı meydana geldiği için, kohezyonsuz zemin drenajsız yüklemeye maruz kalır ve taneli yapı içinde aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Bu basınç, artmaya devam ederse, öyle bir düzeye ulaşır ki, taneden taneye aktarılan temas basıncı (efektif gerilmeler) kaybolur. Bu durumda, zemin katıdan çok bir sıvı gibi davranır. Bu aşamada sıvılaşma denilen olay meydana gelir. Sıvılaşmanın fiziksel süreci aşağıda Şekil 5.1’ de şematik olarak verilmektedir (Kramer,1996). Genellikle sıvılaşma olgusunun karşımıza çıktığı zemin türü olan ince-orta kumlarda hidrolik iletkenlik nispeten yüksek olmasına karşın, süre açısından bir deprem sırasında boşluk suyu basıncında olabilecek sönüm miktarının ihmal edilebilir olacağı ve drenajsız yükleme koşullarının geçerli olduğu varsayılmaktadır (Özaydın K., 1996).

Zemin sıvılaştıktan sonra, aşırı boşluk suyu basıncı sönümlenmeye başlayacaktır. Zeminin sıvılaşmış halde kalma süresi iki ana faktöre bağlıdır:

- Depremden kaynaklanan sismik salınımın süresine ve
- Sıvılaştırılmış zeminin drenaj şartlarına

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmeleri yüklemesi ne kadar uzun ve güçlü ise sıvılaşma hali o kadar kalıcı olacaktır. Eğer sıvılaştırılmış zemin altta ve üstte kil tabakası ile sınırlanmış ise, sıvılaştırılmış zeminden suyun akışı ile aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi de uzun süre alacaktır. Sıvılaşma işleminin tamamlanmasından sonra, zemin daha sıkı konumda olacaktır (Kramer,1996).



Şekil 5.1 : Sıvılaşmanın fiziksel süreci (Kramer,1996)

## 5.2 Sıvılaşma Türleri (Kramer,1996)

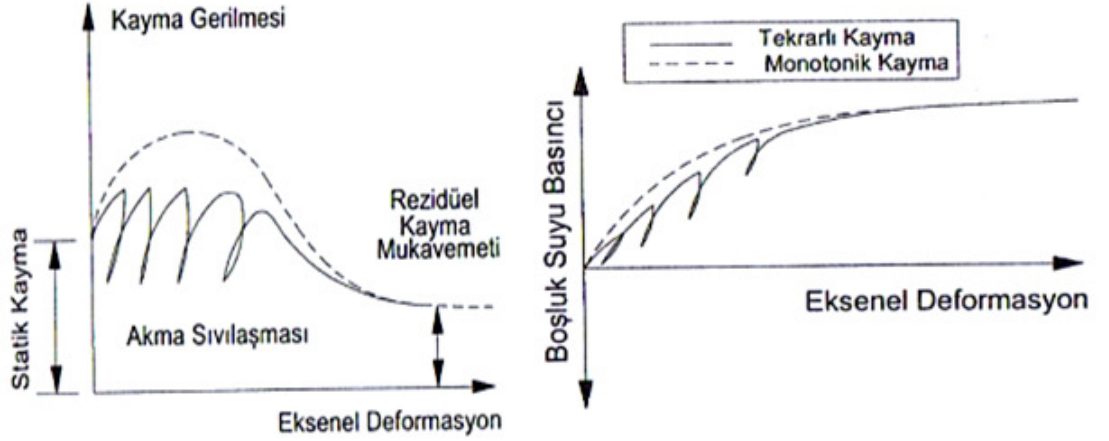
Neden olduğu hasar tipleri göz önüne alındığında iki çeşit sıvılaşmadan bahsedilebilir:

- Akma türü sıvılaşma ve
- Tekrarlı hareketlilik (mobilité)

### 5.2.1 Akma türü sıvılaşma

Akma türü sıvılaşma, büyük hasarların gözlemlendiği akma yenilmelerini oluşturur. Zeminin statik dengesi için gerekli kayma gerilmeleri, sıvılaştırılmış zeminin

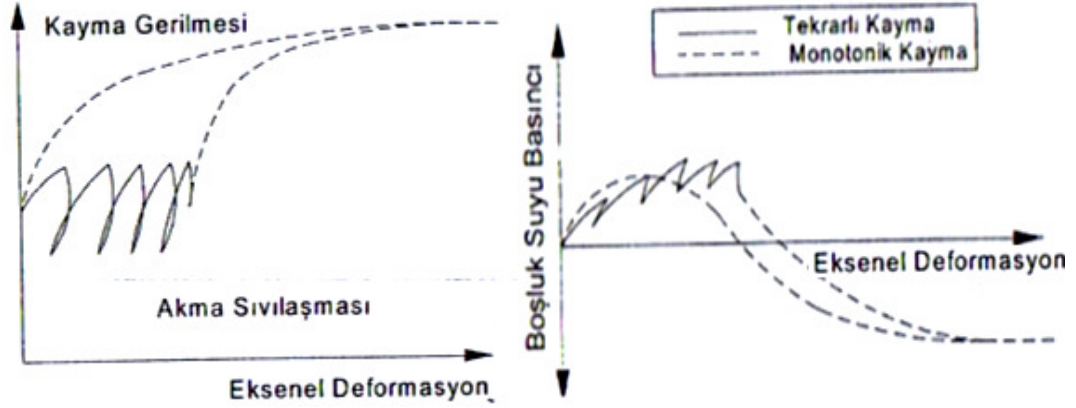
dayanımından (kalıcı dayanımdan) büyük olduğu durumlarda oluşur. Şekil 5.2’de suya doymun gevşek zeminin drenajsız şartlarda davranışı verilmektedir. Genellikle büyük bir zemin kütlesinin onlarca metre deplasman yapması şeklinde oluşan akma türü sıvılaşma, bir kez başladıktan sonra, tamamen statik kayma gerilmeleri tarafından sürdürülür (Kramer, 1996).



**Şekil 5.2 :** Suya doymun gevşek zeminin drenajsız şartlarda davranışı (Kramer, 1996)

### 5.2.2 Devirsel hareketlilik

Devirsel mobilite, kabul edilemeyecek kadar büyük, kalıcı deformasyonlar üreten bir başka sıvılaşma olayıdır. Zeminin statik dengesi için gerekli kayma gerilmelerinin, sıvılaşmış zeminin dayanımından (rezidüel dayanım) küçük olduğu durumlarda meydana gelir. Şekil 5.3’ te suya doymun gevşek zeminin drenajsız şartlarda davranışı gösterilmektedir. Tekrarlı hareketlilik nedeniyle oluşan deformasyonlar, deprem sarsıntıları süresince artarak devam eder. Yanal yayılma olarak adlandırılan bu tür deformasyonlar, su kütlelerinin yanındaki az eğimli veya hemen hemen düz yüzeyli zeminlerde görülür. Bu tip yanal yayılmalar, yapılaşmanın olduğu bölgelerde önemli hasarlara neden olabilir (Kramer, 1996).



**Şekil 5.3 :** Suya doygun sıkı zeminin drenajsız şartlarda davranışı (Kramer, 1996)

Devirsel mobilitenin özel bir durumu da, yüzeyde meydana gelen zemin sıvılaşmasıdır. Düz yüzeyli zeminlerde, yanal deformasyonları engelleyecek statik kayma gerilmelerinin bulunmayışı, dinamik kuvvetlere maruz kalan zeminlerde yer salınımı olarak bilinen büyük, düzensiz hareketler oluşmasına neden olur. Yer salınımı sonucu ise zeminde aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Bu salınım sonucu oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmüleme ihtiyacı, zemin içindeki suyun yukarı yönde hareket etmesine neden olur. Eğer boşluk suyu yeteri kadar hızlı hareket ederse, zemindeki çatlaklar arasından yüzeye kum taneleri taşınabilir. Bu kum taneleri kum tepelikleri veya kum kaynaması şeklinde birikir. Hidrolik denge için gerekli süreye bağlı olarak, deformasyonlar deprem sona erdikten sonra da görülebilmektedir. Aşırı düşey oturmalar ve kum kaynaması oluşumu, düz yüzeyli zemin sıvılaşmasının karakteristik belirtileridir.

### 5.3 Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Sıvılaşma vakası birçok parametreye bağlı olarak değişen oldukça karışık bir mekanizması olan bir kavramdır. Bunun sonucu olarak sadece birkaç parametreye bakarak kesin yargılara varılamaz. Değişik depremlerde meydana gelen sıvılaşmalar incelendiğinde her birinin yeni olgular doğurabildiği rahatlıkla söylenebilir (Özmen, 2005). Zeminde sıvılaşma oluşumunu etkileyen birçok faktör vardır. Laboratuvar deney sonuçları yanında arazi gözlemleri ve çalışmalarına dayalı olarak, sıvılaşmayı etkileyen en önemli faktörler aşağıda açıklanmıştır.

#### 5.3.1 Deprem büyüklüğü ve süresi

Zeminde sıvılaşmanın gerçekleşmesi için bir yer sarsıntısına ihtiyaç vardır. Zeminin hacimsel azalmasına ve aşırı boşluk suyu basıncının gelişmesine neden olan kayma deformasyonlarını, yer hareketinin ivme ve sarsıntı süresi gibi özellikleri belirler.

Sıvılaşmanın en yaygın nedeni, deprem anında açığa çıkan sismik enerjinin neden olduğu ivmedir. Deprem büyüklüğü ve sarsıntı süresi artarken, sıvılaşma için potansiyel de artmaktadır. Çizelge 5.1’ de yerel büyüklüklerine yaklaşık olarak karşılık gelen maksimum yatay yer ivmesi, deprem süresi ve Modifiye Mercalli şiddet derecesi görülmektedir. Çizelge 5.2 ‘de ise Modifiye Mercalli şiddet ölçeği tanımı verilmektedir.

**Çizelge 5.1 :** Yerel büyüklük ( $M_L$ ) ile maksimum yatay yer ivmesi ( $a_{maks}$ ), deprem süresi ve fay yırtılmasında meydana gelen hasarın Modifiye Mercalli deprem Şiddet derecesi arasındaki yaklaşık ilişkileri (Kramer, 1996).

| Yerel Büyüklük ( $M_L$ ) | Fay yırtılması yakınındaki tipik maksimum yatay yer ivmesi ( $a_{maks}$ ) | Fay yırtılması yakınındaki tipik deprem süresi | Fay yırtılması yakınındaki tipik Modifiye Mercalli Şiddet derecesi (Çizelge 5.2) |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $\leq 2$                 | -                                                                         | -                                              | I-II                                                                             |
| 3                        | -                                                                         | -                                              | III                                                                              |
| 4                        | -                                                                         | -                                              | IV-V                                                                             |
| 5                        | 0.09g                                                                     | 2s                                             | VI-VII                                                                           |
| 6                        | 0.22g                                                                     | 12s                                            | VII-VIII                                                                         |
| 7                        | 0.37g                                                                     | 24s                                            | IX-X                                                                             |
| $\geq 8$                 | $\geq 0.50g$                                                              | $\geq 34s$                                     | XI-XII                                                                           |

Veriler az olsa da, sıvılaşmanın oluşması için gerekli eşik bir sarsıntı değerinin olduğu tahmin edilmektedir. Bu eşik değerler, maksimum yatay yer ivmesi ( $a_{maks}$ ) için yaklaşık 0.10 g ve yerel büyüklük  $M_L$  için yaklaşık olarak 5'dir (Ishihara, 1993). Bu nedenle, 0.10 g' den daha küçük bir maksimum yatay yer ivmesinin ( $a_{maks}$ ) veya 5'den daha küçük bir yerel büyüklüğün ( $M_L$ ) söz konusu olduğu yerler için, sıvılaşma analizine gerek yoktur.

### 5.3.2 Yeraltı suyu seviyesi

Sıvılaşma için en elverişli koşullar, yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu zaman ortaya çıkmaktadır. Yeraltı su seviyesi üzerinde yer alan ve suya doymun olmayan zeminlerin sıvılaşması söz konusu değildir. Şu anda yeraltı su seviyesi üzerinde bulunan zeminler, hidrolojik rejim dikkate alındığında, gelecekte büyük olasılıkla doymunluk oluşmayacağını gösteriyorsa, genellikle sıvılaşma potansiyeli için değerlendirilmeye alınmaz.

Yeraltı su seviyesinin zaman içinde alçalıp yükseldiği yerlerde, sıvılaşma potansiyeli de paralel şekilde artar ve düşer. Diğer bilgi kaynakları su seviyesinde daha yüksek veya daha düşük bir seviyeyi işaret etmediği sürece, sıvılaşma analizinde geçmişte kaydedilmiş en yüksek yeraltı su seviyesi kullanılmalıdır (Kramer, 1996).

Poulos vd. (1985) sivilaşmanın, boşluklardan havanın kaçışını sınırlayacak kadar hızlı yüklenmiş kuru ve gevşek, çok büyük kum veya silt kütlelerinde de oluşabileceğini belirtmektedir. Kuru ve gevşek kumların böyle hareketinden akıcı kum veya akıcı zemin olarak söz edilir.

**Çizelge 5.2 : Modifiye Mercalli Büyüklük Ölçeği (Day, 2002)**

| Şiddet Düzeyi | İnsanların tepkisi ve yapılarda hasar türü                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I             | Tepkiler: Özel durumlarda, hassas birkaç kişi tarafından hissedilebilir.<br>Hasar: Yok                                                                                                                                                                                                                                                      |
| II            | Tepkiler: Özellikle üst katlarda dinlenme halindeki fertler tarafından hissedilir.<br>Hasar: Yok. Hassas şekilde asılı duran nesneler sallanabilir.                                                                                                                                                                                         |
| III           | Tepkiler: Bina içindeki ve üst katlardaki şahıslarca hissedilebilir. Çoğu insanlar bunun bir yer sarsıntısı olduğunu fark etmeyebilir. Sarsıntılar, yakından geçen ağır bir kamyon hissi verir.<br>Hasar: Park etmiş araçları hafifçe sallayabilir.                                                                                         |
| IV            | Tepkiler: Bina içindeki pek çok kişi ve dışarıda bulunan az sayıda insan tarafından hissedilir. Uykudakilerin bazılarını uyandırır. Sarsıntılar binaya çarpan ağır bir aracın etkisine benzer.<br>Hasar: Tabaklar, pencereler, kapılar tıkrır, duvarlardan kırılma sesine benzer sesler gelir. Park etmiş araçlar önemli derecede sarsılır. |
| V             | Tepkiler: Hemen hemen herkes tarafından hissedilir. Uykudakilerin pek çoğu uyanır.<br>Hasar: Tabak ve pencereler kırılabilir, desteksiz nesneler dengesini kaybeder, sarkaçlı saatler durur. Sıvalarda hafif çatlama, ağaç, direk vb. uzun nesnelerde örselenme görülür.                                                                    |
| VI            | Tepkiler: Herkes tarafından hissedilir ve çoğu insanları korkutacak kadar şiddetlidir.<br>Hasar: Hafif yapısal hasarlar görülür. Bazı ağır mobilyalar hareket eder, bocalarda hafif hasar gözlemlenir.                                                                                                                                      |
| VII           | Tepkiler: Herkes kapı dışarı kaçır. Sürücüler de hissedebilir.<br>Hasar: İyi yapılmış yapılarda hasar ihmal edilebilir. Derecede; ortalama yapılar için az-çok derecede hasar söz konusu, kötü yapılmış veya dizayn edilmiş yapılarda fazla hasar gözlemlenir.                                                                              |
| VIII          | Tepkiler: Araç sürücülerini etkiler.<br>Hasar: Özel olarak dizayn edilmiş yapılarda az hasar; ortalama yapılarda bazen göçmeye varan ileri derecede hasar; kötü inşa edilmiş binalarda ağır hasar gözlemlenir.                                                                                                                              |
| IX            | Hasar: Özel olarak dizayn edilmiş yapılarda orta derecede hasar, çelik yapılarda şakulden sapmalar. Orta büyüklükteki yapılarda büyük hasar ve kısmi göçük, binaların temellerinden oynaması. Yerde yarıklar ve yer altı nakil hatlarında kırılmalar.                                                                                       |
| X             | Hasar: Sağlamca yapılmış ahşap binaların tamamen yıkılması, çoğu yığma ve çelik yapıların temelinden yıkılması, demiryolu raylarının eğilmesi. Yerde önemli büyüklükte yarıklar ve nehir kıyılarında ve dik yamaçlarda önemli heyelanlar.                                                                                                   |
| XI            | Hasar: Çok az bina ayakta kalabilir, köprülerde yıkılma, demiryolu raylarında ileri derecede bükülmeler. Yerde geniş yarıklar. Yer altı hatları tamamen devre dışı. Yumuşak zeminde kaymalar ve arazi hareketleri gözlemlenir.                                                                                                              |
| XII           | Hasar: Afet derecesinde hasar, nesnelerin havaya fırlatılması. Yapıların pratikte tamamen yıkılması gözlemlenir.                                                                                                                                                                                                                            |

### 5.3.3 Zemin tipi

Ishihara (1985) sıvılaşmaya en duyarlı zemin türleri için şunu belirtmektedir: "Depremler esnasında zemin sıvılaşması ile ilişkili tehlikenin ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince taneler içeren kum çökellerinde karşılaşıldığı bilinmektedir. Bununla birlikte, sıvılaşmanın zaman zaman çakıllı zeminlerde de olduğu durumlar rapor edilmiştir."

Bu durumda, sıvılaşmaya duyarlı zemin türleri; plastik olmayan (kohezyonsuz) zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmaya karşı en az dirençliden en çok dirençliye kadar olan bir sıralaması kabaca; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar olarak verilebilir. Ishihara (1993) kayaunun suya doygun halde iken önemli bir kohezyona sahip olmadığını ve temiz bir kum gibi davrandığını belirtmektedir.

Seed vd. (1983) laboratuvar deneyi ve arazi performansına dayalı olarak, kohezyonlu zeminlerin büyük çoğunluğunun depremler esnasında sıvılaşmayacağını belirtmiştir. Başlangıçta Seed ve Idriss (1982) tarafından açıklanan ve sonradan Youd ve Gilstrap (1999) tarafından pekiştirilen kriterler kullanılarak, ince taneli zeminlerin (plastik siltlerin) sıvılaşması için, aşağıdaki üç kriterin tamamının karşılanması gerekmektedir:

- 0.005 mm'den daha ince partiküllerin zemindeki kuru ağırlıkça yüzdesi 15'den daha az olmalıdır.
- Likit limit değeri 35'den küçük olmalıdır.
- Zeminin su muhtevası likit limitin 0.9'undan daha büyük olmalıdır.

İnce taneli zeminin bu üç kriterin tümünü karşılamadığı durumda, zeminin genellikle sıvılaşmaya duyarlı olmadığı düşünülür. Kohezyonlu zeminde sıvılaşma olmasa da, sismik sarsıntıdan dolayı önemli bir drenajsız kayma direnci kaybı olabilir.

### 5.3.4 Zeminin relatif sıkılığı

Zemini oluşturan tanelerin boyut, biçim ve dağılım gibi özellikleri, zeminin deformasyon özelliğini etkiler. Deformasyon özelliği de aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunda etkili olduğundan, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde en önemli faktör zeminin sıkılık oranıdır. Relatif sıkılık oranı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$D_r = \frac{e_{maks} - e_0}{e_{maks} - e_{min}} \quad (5.1)$$

Burada,

$e_{maks}$  = zeminin en gevşek durumundaki boşluk oranı

$e_{min}$  = zeminin en sıkı durumundaki boşluk oranı

$e_0$  = zeminin tabii boşluk oranıdır.

Çizelge 5.3'de relatif sıkılık değerine göre zemin sınıflandırılması görülmektedir.

**Çizelge 5.3 :** Relatif sıkılığa göre zeminlerin sınıflandırılması (Kumbasar, 1999)

| Relatif Sıkılık ( $D_r$ %) | Açıklama   |
|----------------------------|------------|
| 0-15                       | Çok gevşek |
| 15-35                      | Gevşek     |
| 35-65                      | Orta sıkı  |
| 65-85                      | Sıkı       |
| 85-100                     | Çok Sıkı   |

Çizelge 5.4'te ise zeminler, farklı ivme değerlerinde relatif sıkılıkları göz önüne alınarak sıvılaşma riski açısından sınıflandırılmışlardır. İvme değeri arttıkça sıvılaşma riski sınıflamasına giren relatif sıkılık değerleri de artmaktadır.

**Çizelge 5.4 :** Farklı ivme değerlerinde sıvılaşma riski taşıyan bölgelerdeki relatif sıkılık değerleri (Seed ve Idriss, 1971)

Sıvılaşma Riski

| $a_{maks}$ | Yüksek       | Orta                | Düşük        |
|------------|--------------|---------------------|--------------|
| 0.10g      | $D_r < 0.33$ | $0.33 < D_r < 0.54$ | $D_r > 0.54$ |
| 0.15g      | $D_r < 0.48$ | $0.48 < D_r < 0.73$ | $D_r > 0.73$ |
| 0.20g      | $D_r < 0.60$ | $0.60 < D_r < 0.85$ | $D_r > 0.85$ |
| 0.25g      | $D_r < 0.70$ | $0.70 < D_r < 0.92$ | $D_r > 0.92$ |

Arazi çalışmalarından bilindiği kadarıyla, gevşek durumundaki kohezyonsuz zeminler sıvılaşmaya duyarlıdır. Gevşek ve plastik olmayan zeminler, aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişmesine neden olan sismik salınım esnasında hacimsel olarak büzülür. Başlangıç sıvılaşmasına erişildiğinde gevşek kumlar için kayma deformasyonunda ani ve anormal bir artış olur.

Sıkı kumlarda, başlangıç sıvılaşma durumu, tekrarlı kayma gerilmesi tersine çevrildiği zaman, kumun hacimsel artış eğiliminde olmasından dolayı, büyük deformasyonlara neden olmaz. Poulos vd. (1985) arazideki zeminde hacimsel artış olduğu gösterilebildiği takdirde, zeminin sıvılaşma açısından değerlendirilmesine gerek olmadığını belirtmektedir. Bunu sebebi bu tip zeminlerde drenajsız kayma

drenci, drenajlı kayma direncinden büyüktür. Gevşek kumlar titreşimle sıkışır. Depremler sırasında bu sıkışma yapılar zarar veren oturmalara yol açar. Dolayısıyla kumlu bir zeminde sıkılaşmaya karşı hassaslığın derecesi değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmeyi tam bir doğrulukla yapmak mümkün olmasa da relatif sıklığı %60 'ın altında olan veya SPT değeri 15'ten küçük olan kumlarda oturma riski yüksektir (Köleoğlu, 2002).

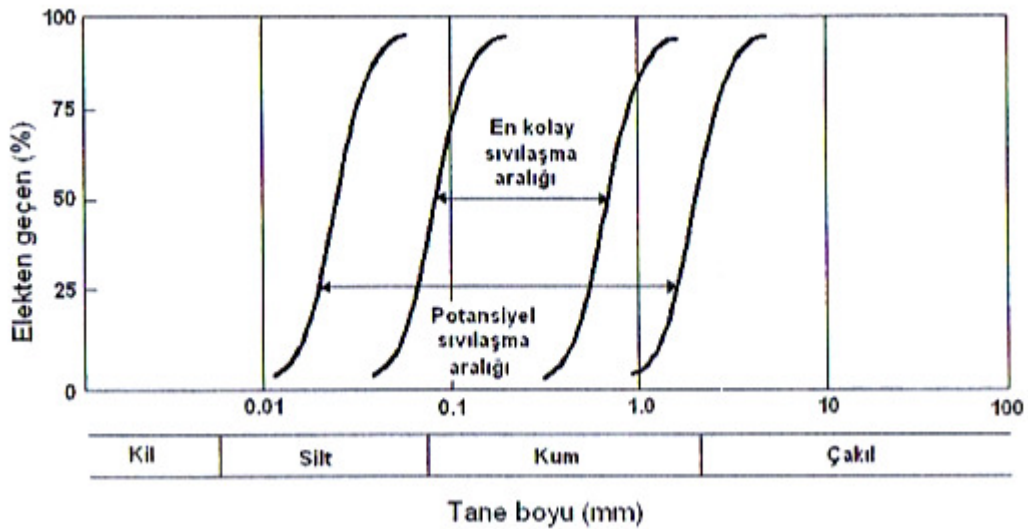
### 5.3.5 Dane Boyu Dağılımı

Üniform derecelenmiş plastik olmayan zeminler, dengesiz dane dizilimi oluşturma eğilimindedir ve bunların sıvılaşmaya duyarlılığı iyi derecelenmiş zeminlerden daha fazladır. İyi derecelenmiş zeminlerde büyük danelerin aralarını dolduran küçük danelerde vardır. Bu durum, deprem esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncında daha az artışa neden olmak suretiyle, zeminin potansiyel hacim azalmasında azalım eğilimindedir. Sıvılaşma yenilmelerinin çoğunun üniform derecelenmiş granüler zeminlerde geliştiğini gösteren arazi kanıtları vardır. Şekil 5.4'te zeminler için sıvılaşma potansiyeli ile granülometre eğrisi arasındaki ilişkiyi göstermektedir

(Ishihara, 1983).

### 5.3.6 Yerleştirme ve çökme ortamı

Su altında yerleştirilmiş olan dolgular, su içinde düşen zemin partikülleri ile oluşturulan gevşek ve dağınık zemin yapısı nedeniyle sıvılaşmaya oldukça duyarlı olma eğilimindedir. Göllerde, nehirlerde veya denizlerde oluşan doğal çökeller, gevşek ve dağınık zemin yapısı oluşturma eğiliminde olup, sıvılaşmaya daha duyarlıdır (Kramer, 1996).



Şekil 5.4 : Zeminlerde sıvılaşabilir granülometri aralığı (Ishihara, 1983)

### **5.3.7 Drenaj şartları**

Aşırı boşlu suyu basıncının hızlı sönümlenmesi durumunda zemin sıvılaşmayabilir. Böylece çok yüksek geçirimli çakıl drenler veya çakıl tabakalara bitişik zeminlerde sıvılaşma potansiyeli azalır (Kramer, 1996).

### **5.3.8 Çevre basınçları**

Çevre basıncı ne kadar büyükse, zeminin sıvılaşmaya karşı hassaslığı da o kadar azdır. Daha yüksek çevre basıncı oluşturan koşullar; daha derin bir yeraltı su seviyesi, zemin yüzeyinden oldukça derinde yer alan zemin tabakası ve zemin yüzeyine uygulanmış bir sürşarjdır. Arazi incelemeleri, olası sıvılaşma bölgesinin genellikle zemin yüzeyinden yaklaşık 15 m' lik bir derinliğe indiğini göstermektedir. Daha derinde yer alan zeminler, genellikle daha yüksek çevre basınçlarından dolayı sıvılaşmaz. Bu durum, 15 m' den daha derindeki zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmayacağı anlamına gelmez. Birçok durumda, 15 m' den daha derin zeminler için bir sıvılaşma analizi yapmak gerekebilir. Ayrıca, su içine gevşekçe dökülmüş herhangi bir zemin çökeli için bir sıvılaşma analizi yapılmalıdır. Benzer şekilde, alüvyonun hızlıca çökeldiği bir saha için de 15 m' den derin seviyeler için sıvılaşma analizi gerekebilir. Bir sıvılaşma analizinin hangi derinlikte sonlandırılması konusunda tecrübe ve mühendislik yargısı gereklidir (Seed, 1983).

### **5.3.9 Dane şekli**

Zeminin dane şekli de sıvılaşma potansiyelini etkileyebilir. Örneğin, yuvarlak daneli zeminler, köşeli zemin danelerinden daha kolay sıkışma eğilimindedirler. Dolayısıyla, yuvarlak zemin partikülleri içeren bir zemin, sıvılaşmaya karşı köşeli zemin partikülleri içeren bir zeminden daha duyarlıdır (Ishihara, 1993).

### **5.3.10 Yaş ve Çimentolanma**

Yeni çökelmiş zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı, eski zemin çökellerinden daha fazladır. Yoshimi vd. (1989), uzun süre çevre basıncına maruz kalan zeminlerin sıvılaşma direncinin, süreyle birlikte arttığını göstermişlerdir. Sıvılaşma direncinde zamanla meydana gelen artış, deformasyon veya zemin partiküllerinin daha duraylı dizilimde sıkışmasından ileri gelebilir. Danelerin temasında zaman içinde çimentolaşma gelişimi de olabilir. (Ishihara, 1985)

### **5.3.11 Tarihsel ortam**

Zeminin tarihsel ortamının sıvılaşma potansiyelini etkileyebileceği de belirlenmiştir. Örneğin, daha önce sismik sarsıntıya maruz kalmış eski zemin çökelleri, yeni

oluşturulmuş aynı sıklığa sahip aynı zemin numunesine kıyasla artan bir sıvılaşma direncine sahiptir (Seed vd., 1979).

Aşırı konsolidasyon oranında (AKO) ve sükûnetteki zemin toprak basınç katsayısındaki ( $K_0$ ) artış da sıvılaşma direncinin artmasına yol açar (Ishihara, 1985). Buna örnek olarak, erozyon nedeniyle zeminin üst tabakasının aşınması gösterilebilir. Altaki zemin ön yüklemeye maruz kaldığından dolayı, aşırı konsolidasyon oranı ve sükûnetteki zemin yanıl basınç katsayısı yüksek olacaktır. Ön yüklemeye maruz kalan böyle bir zeminin sıvılaşmaya direnci, ön yüklemeye maruz kalmamış aynı zeminden daha fazla olacaktır.

#### **5.4 Sıvılaşma Potansiyeli Analiz Yöntemleri**

Bir zeminin sıvılaşmaya duyarlı olması gerçeği, bir depremin meydana gelmesi halinde sıvılaşmanın oluşacağı anlamına gelmez. Sıvılaşmanın oluşması için, onu başlatacak olan bir tetikleme gerekir. Bu örselemenin karakterini tanımlamada birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunu tanımlayan yöntemlerden en çok kullanılanları: devirsel gerilme oranı yaklaşımı ve buna iyi bir alternatif olan, devirsel deformasyon yaklaşımıdır. Bunların yanı sıra, sönümlenmiş enerji yaklaşımı ve efektif gerilmeye dayalı tepki analizi yaklaşımı da sıvılaşma analizinde kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır.

Her yöntemin avantaj ve dezavantajları mevcuttur ve her bir yöntem farklı mühendis grupları tarafından kullanılmaktadır. Büyük önem taşıyan projelerde, sıvılaşma tehlikesinin belirlenmesinde, birden fazla yaklaşımın kullanılması sıkça karşılaşılan bir durumdur (Kramer, 1996).

##### **5.4.1 Tekrarlı gerilme yaklaşımı**

1960'lı ve 1970'li yıllarda H. B. Seed ve meslektaşları tarafından California Üniversitesinde yapılan çalışmalar, sıvılaşma olayının anlaşılmasında büyük rol oynamıştır. Bu çalışmalar, genellikle sıvılaşmayı tetikleyen yükleme koşullarının tespitine yönelik çalışmalardır. Sıvılaşmayı tetikleyen yükleme koşulları, devirsel kayma gerilmeleri olarak tanımlanmış ve sıvılaşma potansiyeli, deprem anında meydana gelen kayma gerilmelerinin devir sayısı ve büyüklüğü temel alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, günümüzde basitleştirilmiş yöntem olarak bilinmektedir.

1971 yılında Seed ve Idriss tarafından yayınlanan basitleştirilmiş yöntem sıvılaşma analizinde standart olarak kabul edilmiştir. Yöntem, arazi gözlemleri ve arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle geliştirilen, ampirik bir hesap

yöntemidir. Kum kaynaması, yüzey çatlakları veya yanal yayılma görülen zeminlerde sıvılaşmanın olduğu kabul edilerek toplanan veriler, çoğunlukla düz yüzeyli ve sığ derinliklerdeki (<15 m) alüvyon ve nehir sedimentlerinden alınmıştır. Orijinal yöntem bu arazi şartları için geliştirilmiş olup, sadece bu şartlarda uygulanabilir.

Zeminlerin sıvılaşma dirençlerinin belirlenmesi, iki değişkenin hesaplanmasını veya tahmin edilmesini gerektirir:

- Zemin tabakasındaki sismik talebi ifade eden devirsel gerilme oranı (DGO),
- Zeminin sıvılaşmaya karşı direncini gösteren devirsel direnç oranı (DDO) (Youd vd., 2001).

#### 5.4.2 Deprem yüklerinin tanımlanması

Sıvılaşmayı başlatmak için gerekli aşırı boşluk suyu basıncı seviyesi, deprem nedeniyle oluşan devirsel yüklerin büyüklüğüne ve süresine bağlıdır. Yaklaşık yöntem, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunun, devirsel kayma gerilmeleriyle ilgili olduğu tahminini temel almış ve bundan dolayı da deprem yükleri, devirsel kayma gerilmeleri cinsinden ifade edilmiştir. Yüklemeler iki yöntemle tahmin edilebilir: detaylı bir zemin tepki analizi veya yaklaşık yöntem.

Zemin tepki analizleri; bir zemin tabakasının farklı derinliklerindeki kayma gerilmelerinin zamanla değişimini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu tür analizler, gerçek deprem hareketlerinin, süresiz ve düzensiz karakteristiklerini gösterirler. Bununla birlikte, sıvılaşma dirençlerinin tahmin edildiği laboratuvar verileri, genellikle devirsel kayma gerilmelerinin üniform olduğu deneylerden elde edilirler. Bu yüzden yaklaşık yöntemde, deprem sırasında oluşan maksimum kayma gerilmesinin % 65'i alınarak, aynı boşluk suyu basıncını oluşturabilen üniform kayma gerilmeleri elde edilir (Seed ve Idriss, 1971).

##### 5.4.2.1 Seed ve Idriss (1971)

Seed ve Idriss (1971), bir deprem sırasında oluşan maksimum kayma gerilmesini aşağıdaki eşitlikle ifade etmişlerdir:

$$\tau_{maks} = \frac{\gamma_z}{g} a_{maks} r_d \quad (5.2)$$

Burada,

$a_{maks}$  = Zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesi

$g$ =Yerçekimi ivmesi

$\gamma$ =Zeminin birim hacim ağırlığı

$z$ =Zemin yüzeyinden itibaren derinlik (m)

$r_d$ =Gerilme azaltma katsayısıdır.

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad z < 9.15 \text{ m} \quad (5.3)$$

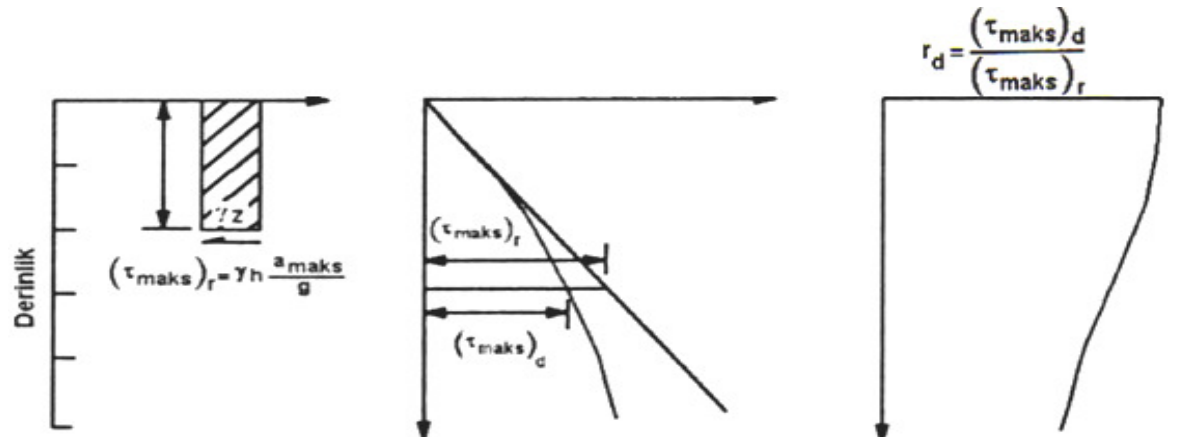
$$= 1.174 - 0.0267z \quad z = 9.15 - 23 \text{ m} \quad (5.4)$$

Zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesi  $a_{maks}$  olan "h" derinliğindeki bir zemin kolonu eğer rijit bir davranış gösterirse Şekil 5.5' te görüldüğü gibi "h" derinliği üstündeki tüm zemin kayma gerilmesine maruz kalır ve yatay düzlemdeki maksimum kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$F = ma = \frac{W}{g} a = \gamma h \frac{a_{maks}}{g} \quad (5.5)$$

Bununla birlikte zemin rijit bir kütle gibi davranmaz. Bundan dolayı "h" derinliğindeki gerçek maksimum kayma gerilmesi ile hesaplanan değerden daha düşük olacaktır. Zemin kütlesi "h" derinliğinde genellikle rijit zemin kütesinden daha az kayma gerilmesi uygular. Zeminin gerçek kayma gerilmesi değeri ile rijit davranışı göz önüne alınarak (deprem esnasında zemin kolonu rijit bir kütle gibi değil de, deforme olabilir bir kütle gibi etkidiğinden) tahmin edilen kayma gerilmesi arasındaki ilişki, gerilme azaltma katsayısı,  $r_d$  ile ifade edilir (Seed ve Idriss, 1971). Maksimum kayma gerilmesinin şematik gösterimi Şekil 5.5' te gösterilmektedir.

$$G_s = \frac{\tau}{\tau_{maks}} > 1 \quad \text{olmalıdır.} \quad (5.6)$$



**Şekil 5.5 :** Basitleştirilmiş yöntemde maksimum kayma gerilmesinin şematik gösterimi (Seed ve Idriss, 1971)

#### 5.4.2.2 Tokimatsu ve Yoshimi (1983)

Tokimatsu ve Yoshimi (1983), sıvılaşılan suya doymun kumların laboratuvar deney sonuçlarını dikkate almışlar ve sıvılaşılmaya neden olan sismik yer hareketi etkilerinin iki nicelikle gösterilebileceğini öne sürmüşlerdir. Bunlar; yatay yer ivmesi ve belli bir yer hareketinin devir sayısıdır. Tüm bunlar bir araya getirilerek, belirli derinlikteki devirsel kayma gerilmesi oranı için aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_{vo}} = \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d r_n \quad (5.7)$$

$\tau_d$ =Devirsel kayma gerilmesi

$a_{maks}$ =Zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesi

$\sigma_{v0}$ =Düşey toplam gerilme

$\sigma'_{v0}$ =Düşey efektif gerilme

$r_d$ =Gerilme azaltma katsayısı

$r_n$ =Deprem büyüklüğü düzeltme faktörüdür.

Bu noktada, Tokimatsu ve Yoshimi (1983), su seviyesinin zemin yüzeyinin üstünde yer aldığı bölgelerde, zemin yüzeyinin üstündeki su kütlesi kayma gerilmelerini iletemeyeceğinden,  $\sigma_{v0}$ 'ın toplam gerilme olarak alınamayacağını belirtmişlerdir.

#### 5.4.2.3 Iwasaki vd. (1981)

Iwasaki vd. (1981), deprem nedeniyle zeminde oluşan kayma gerilmelerini, sismik bir hareket nedeniyle zemine etki eden dinamik yükleme olarak tanımlamışlar ve aşağıdaki eşitlikle ifade etmişlerdir:

$$\frac{r_d}{\sigma'_{vo}} = \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \quad (5.8)$$

Iwasaki ve arkadaşları gerilme azaltma katsayısı için bir denklem oluşturmuşlardır:

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (5.9)$$

Burada, z metre cinsinden yüzeyden itibaren derinliği ifade etmektedir.

### 5.4.3 Sıvılaşma başlangıcının belirlenmesi

Sıvılaşma, deprem nedeniyle oluşan yüklerin, sıvılaşma direncini aştığı derinliklerde oluşur. Bu ifade, bir emniyet faktörü cinsinden aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

$$GS = \frac{DDO}{DGO} \quad (5.10)$$

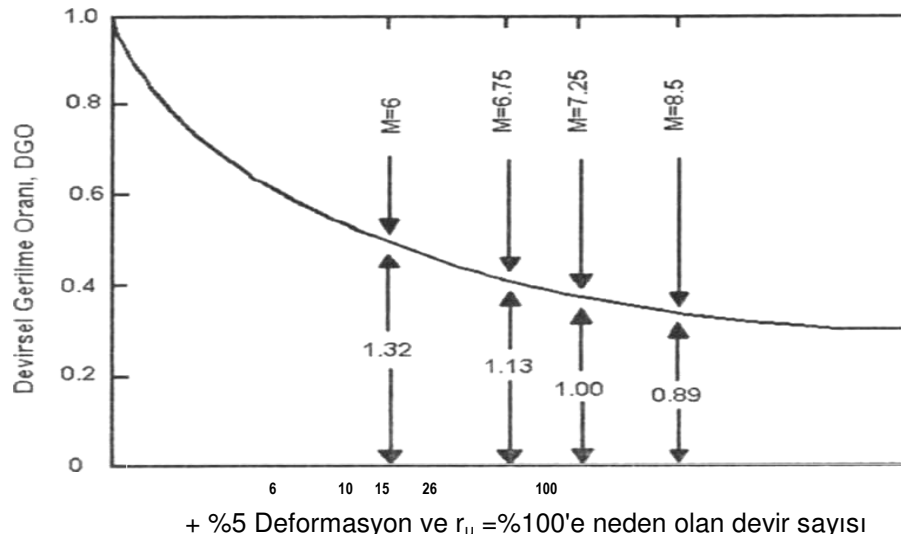
DGO = Deprem nedeniyle oluşan devirsel gerilme oranı

DDO = Devirsel Direnç Oranı

GS = Güvenlik Sayısı

Güvenlik sayısının 1'den küçük olduğu derinliklerde, sıvılaşmanın olduğu kabul edilmektedir (Kramer, 1996). Ancak güvenlik sayısının 1'in hafifçe üzerinde olan zeminler yine de bir deprem anında sıvılaşabilir. Örneğin alttaki tabakanın sıvılaşması durumunda yukarı doğru yükselen su akışı üstte yer alan ve güvenlik sayısının 1'den biraz büyük olan tabakanın sıvılaşmasına neden olabilir.

Bununla birlikte, Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yöntemi hariç, diğer yöntemlerde DDO' nu hesaplamak için verilen eğriler ve denklemler sadece  $M = 7.5$  büyüklüğündeki depremler için elde edilmişlerdir. Eğrilerin ve denklemlerin farklı deprem büyüklüklerinde de kullanılabilmesi için hesaplanan DDO' ların  $M = 7.5$  büyüklüğündeki depremlere göre düzeltilmesi gerekmektedir. Bunun için şiddet düzeltme faktörleri kullanılmaktadır (Seed ve Idriss, 1982).



**Şekil 5.6 :** DGO ve sıvılaşmaya neden olan devir sayısı arasındaki ilişki (Seed ve Idriss, 1982)

$$GS = \frac{DDO}{DGO} MDF \quad (5.11)$$

Burada; MDF büyüklük düzeltme faktörüdür. DGO ve sınılaşmaya neden olan devir sayısı arasındaki ilişki Şekil 5.6'da verilmiştir.

Fakat daha sonra Idriss (1997), konu hakkında tekrar çalışmış ve aşağıdaki ifadeyi ortaya çıkarmıştır:

$$MDF = 10^{2.24/M^{2.56}} \quad (5.12)$$

Burada;

M: deprem büyüklüğüdür.

## **6. BİLGİSAYAR PROGRAMI (QUAKE/W) YARDIMI İLE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA ŞEVLERİN DAVRANIŞININ SANTRİFÜJ DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

Bu bölümde kullanılan programın paralellik gösterip göstermediği ve kullanılacak olan sınır koşullarının belirlenmesi anlatılacaktır. Bu amaç için literatürde bulunan santrifüj deney sonuçlarından biri kullanılarak analiz yapılmış ve elde edilen deplasman değerleri karşılaştırılarak böylece uygun sınır koşulları tayin edilmiştir.

### **6.1 Programın Tanımı**

Quake/W®, yer altı yapılarının deprem, kazık çakımı, dinamit kullanımı ve buna benzer dinamik yüklemelerden kaynaklı; zemin-yapı etkilerini hesaplayan sonlu elemanlar tabanlı geoteknik yazılımıdır. Quake/W, Geostudio'nun Slope/w, Seep/w ve Sigma/w gibi bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu program parçasını oluşturduğu Geostudio'un içerisindeki programlarla beraber çalıştığı gibi tek başına da çalışabilmektedir.

Quake/W programı özet içeriği, teorileri ve prosedürleri geoteknik mühendisliğinde kullanılan Steven Kramer (1996) 'in Geoteknik Deprem Mühendisliği kitabını kaynak kitap olarak almıştır. Bununla birlikte hem Quake/W hem de Slope/W, yazılımları ve temel aldığı teorileri sayesinde birlikte çalıştırıldığında; Newmark'ın ortaya koyduğu blok analiz sonuçları ile paralellik göstermekte olup dinamik analiz kısmının bir bölümünde, sahip olduğu teorilerle sınılaşma analizine yer vermektedir (Geostudio manuals, 2005).

Bu özelliklerinin yanında kolay ulaşılabilir yardım dokümanları, kullanışlı ara yüzleri sayesinde kullanıcıya kolaylık sağlaması, hızlı ve seri çıktı eldesi özelliği ile de geoteknik mühendisleri için vazgeçilmez programlar arasındadır (Geostudio manuals, 2005).

## 6.2 Problem Verileri ve Veri Girişlerinin Düzenlenmesi

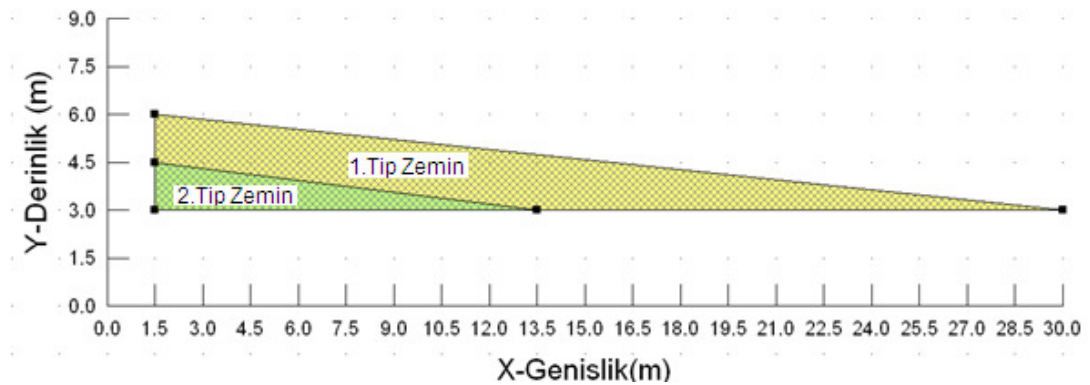
Quake/W programı analizleri iki kısımda yapmaktadır. Statik ve dinamik analiz olarak yapmaktadır. Programın dinamik analiz kısmı statik analiz kısmı ile beraber çalışmaktadır.

### 6.2.1 Statik analiz

Bu bölümde gerekli olan geometrinin oluşturulması, zemin parametrelerinin ve uygun model tayini, uygun ağ sistemi ile sınır koşulları tayini açıklanacaktır.

#### 6.2.1.1 Geometrinin oluşturulması

Quake/W programı ara yüzünde “Analyses settings” ikonu kullanılarak yapılacak analiz cinsinin statik olarak işaretlenmesi, istenilmesi durumunda ise de proje açıklaması bölümünün oluşturulması gereklidir. Model için yükseklik ve derinlik çizgileri uygun ölçek kullanılarak yapılmalıdır. Bu çalışma kapsamında program çizim ikonları kullanılarak 6° derecelik eğimle 6 m kalınlığında üçgensel şev geometrisi oluşturulmuştur. Programın santrifüj deneyleri ile uyumu için Haigh vd (1998) sonuçlarını verdiği SKH-8 deneyi seçilmiştir. SKH-8 deneyinin profili şekil 6.1’de verilmektedir. Bu deney Haigh vd. 1998 yılında 6m kalınlığında eğimli şevi etkin yer ivme değeri ile doğrudan orantılı olan belirli bir ölçek dahilindeki modelleyerek, deplasman ve aşırı boşluk su basınçlarına ulaşmıştır. Santrifüj deneyinde 2 farklı zemin profili kullanıldığından, 2. Tip zemin profilinin sınırı çizim ikonları ile oluşturulmuştur. Şekil 6.1’de oluşturulan santrifüj modeli gösterilmektedir.



**Şekil 6.1 :** Analizde Kullanılan (1/2 ölçeğindeki) şev geometrisi

### 6.2.1.2 Zemin parametrelerinin tayini ve uygun model seçimi

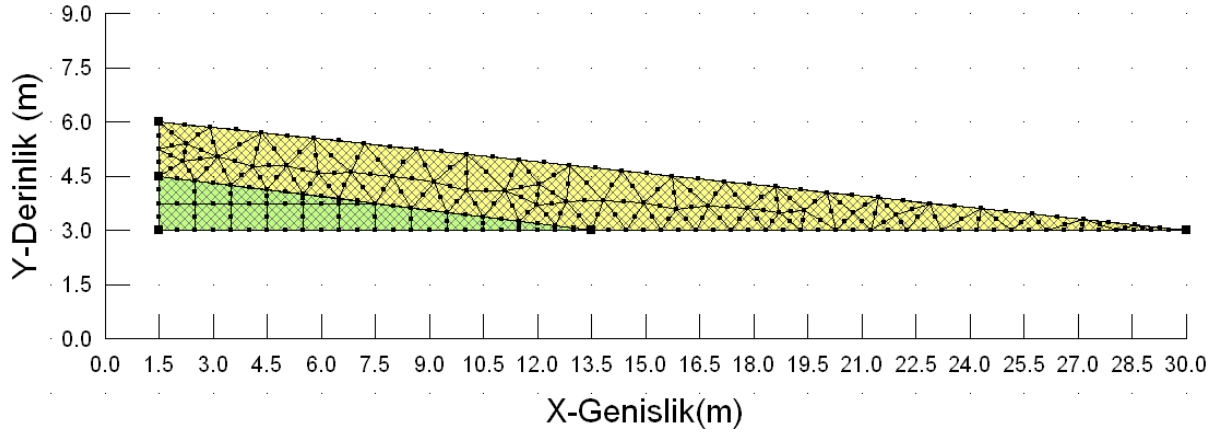
Quake/W programı, malzeme özellikleri bölümünde kullanılacak model ile birlikte zemin parametrelerinin kullanıcı tarafından girilmesini istemektedir. Statik analiz kapsamında program sadece Lineer elastik model seçimine imkan vermekte olup kullanıcı tarafından elastisite modülün, kayma modülünün ve poisson oranının girilmesi gerekmektedir. Çizelge 6.1 'de Programın Santrifuj deney sonuçları ile karşılaştırılması kapsamında yapılan çalışmanın statik bölümünde kullanılan zemin durumu ve zemin özellikleri gösterilmektedir.

**Çizelge 6.1 :** Program statik bölümünde kullanılan zemin durumu ve zemin özellikleri

|             | Zemin Durumu ve Zemin Özellikleri |                         |        |         |         |                                  |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------|--------|---------|---------|----------------------------------|
|             | Kullanılan Model                  | $\gamma(\text{kN/m}^3)$ | $\phi$ | E (MPa) | $D_r$ % | Y.A.S.S                          |
| 1.Tip Zemin | Lineer Elastik                    | 18                      | 25°    | 10      | 50      | Profil yüksekliğinde             |
| 2.Tip Zemin | Lineer Elastik                    | 22                      | 35°    | 50      | 50      | 1.Tip Zemin Profil Yüksekliğinde |

### 6.2.1.3 Uygun ağ sisteminin tayini

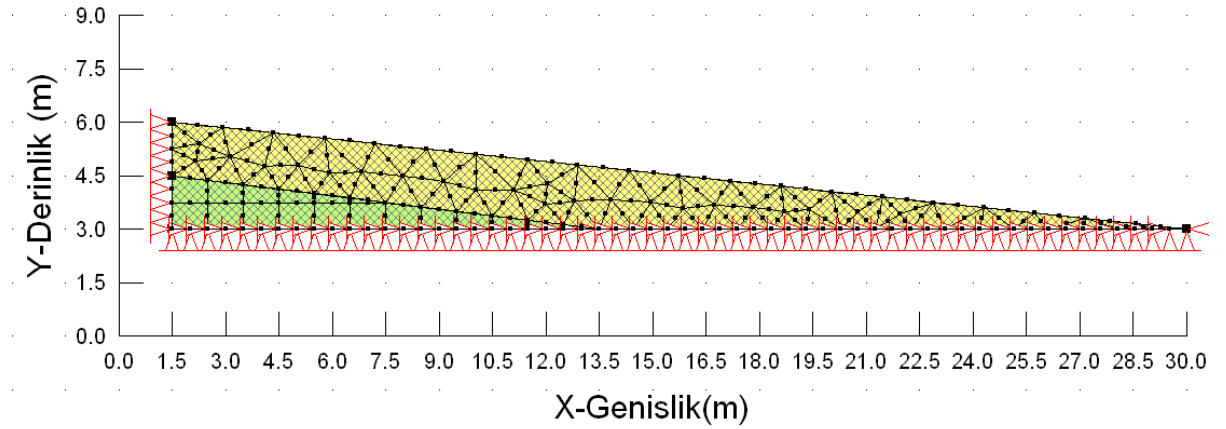
Programın temelini sonlu elemanlar metodu oluşturmaktadır. Bölüm 2.6'da anlatıldığı gibi sonlu elemanlar metodunda zemin düğüm noktalarında birleşen elemanlara bölünmekte olup analiz sonucunda her düğüm noktasındaki deplasmandan yola çıkılarak gerilme ve şekil değiştirme alanları bulunur. Program içerisinde kullanıcı tercihi bırakılmış çok çeşitli ağ sistem tayini bulunmaktadır. Gerçeğe yakın sonuç çıkarımı ve ağ sistemindeki uyum göz önünde bulundurulduğunda en kullanışlı ve tavsiye edilen ağ geometrisi üçgensel ve kare ağ geometrileri olmaktadır. Bu çalışma kapsamında (Genişlik×Derinlik), 0.25m×0.25m, 0.50m×0.50m, 1m×1m ağ sistemleri ile çalışılmış, harcanan zaman ve elde edilen veriler göz önünde bulundurularak 0.50m ağ sisteminin modelde kullanılmasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Şekil 6.2'de analizde kullanılan ağ görülmektedir.



**Şekil 6.2 :** Santrifüj model analizinde kullanılan uygun ağ sistemi

#### 6.2.1.4 Uygun sınır koşullarının tayini

Statik analizde program, zemin birim hacim ağırlık değerleri ve yer altı su seviyesinin konumuna göre gerilmeleri hesaplamaktadır. Zemin profil tabanının x ve y doğrultusundaki 2 adet serbestliğinin kaldırılması, gerçeğe yakın analiz için gereklidir. Derinlik boyutunda ise zemin kendi ağırlığı ile gerilme tayini ve yanal itki olmamasından kaynaklı, sadece x doğrultusundaki hareketini kısıtlamaktadır. Şekil 6.3'te analizde kullanılan sınır koşulları görülmektedir.



**Şekil 6.3 :** Santrifüj modelinde kullanılan şev geometrisine ait sınır koşulları

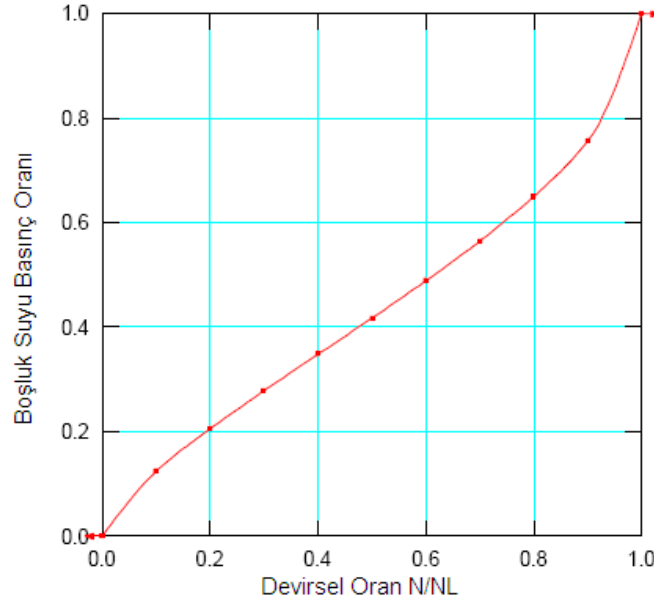
#### 6.2.2 Dinamik analiz

Bu bölümde programın analizi için gerekli olan ikincil kısmı teşkil etmekte olup, zemin parametrelerinin ve uygun zemin modelinin tayini, uygun sınır koşulları tayini ve istenilen deprem girdilerinin oluşturulması açıklanacaktır.

##### 6.2.2.1 Zemin parametrelerinin ve uygun modelin tayini

Programda dinamik analizde kullanıcı lineer elastik model tercih edebilir ancak lineer

elastik model tercihi halinde kullanıcı ayrıca kayma modülü azaltımı ve sönümleme oranı fonksiyon verilerini kullanamaz bu bahsi geçen tercih ikonları ancak eşdeğer lineer model seçiminde aktif halde bulunmaktadır. Programın kullandığı modellerden ilki lineer elastik model olup tamamen malzemenin lineer şekil değiştirme prensibine göre oluşturulan modeldir. Bu modelin doğal zemin özelliklerini programa yansıtmakta yetersiz kaldığı söylenebilir. Diğer zemin modeli olan eşdeğer lineer modeli ise zemin sıkılığının derinlikle değişimine, kayma modülü azalım fonksiyon değerlerinin ve sönümleme fonksiyonlarının tanımına olanak sağladığı için diğer modele kıyasla daha gerçekçi sonuçlar ortaya koymaktadır. Boşluk suyu fonksiyon tanımı; program ara yüz gerilme fonksiyon bölümünde bulunan sırasıyla  $k_\alpha$ (ilksel kayma gerilme düzeltme faktörü),  $k_\sigma$ (jeolojik gerilme düzeltme faktörü) fonksiyonlarının tanımlanması ve ardından hesaplanacak devirsel gerilme oran fonksiyonunun tanımı ile gerçekleştirilir. Programın kullandığı devirsel orana karşılık gelen boşluk suyu basınç oranı şekil 6.4'te gösterilmektedir. Örneğin devirsel oran 0.6 değeri için  $r_u = 0.5$  değerini almaktadır.



**Şekil 6.4 :** Quake/W programının referans aldığı devirsel orana karşılık gelen boşluk suyu basınç oranı, DeAlba vd. (1975).

Programda  $r_u$  aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{N_L} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \quad (6.1)$$

Burada;

$r_u$ : Devirsel gerilme oranına karşılık gelen boşluk suyu basıncı

$N$ : Deprem sarsıntısı ile oluşan eşdeğer devir sayısı

$N_L$ : Amprik formüller ile belirlenen ve sıvılaşmaya sebep olan devir sayısı

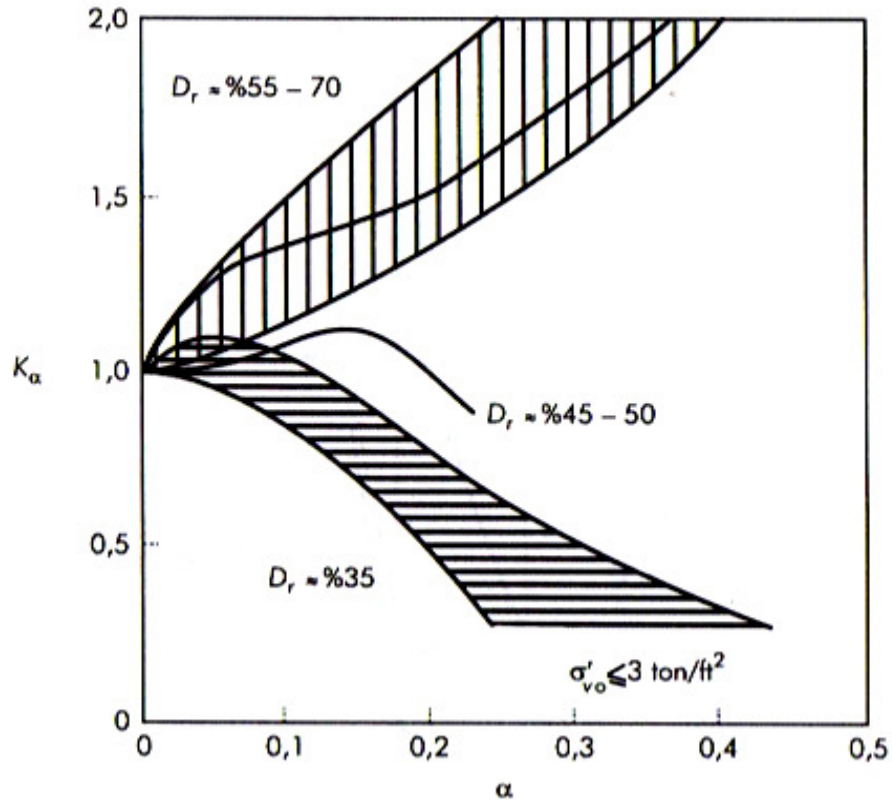
$\alpha$  : Veri girişinde program tarafından verilen ( $\alpha=0.7$ ) ve dolaylı olarak boşluk suyu basınç oranını hesaplamada kullanılan sabit değer.

$$(DGO_{arazi})_{\alpha\sigma} = (DGO)_{\alpha=0, \sigma < 3 \text{ ton/m}^2} K_{\alpha} K_{\sigma} \quad (6.2)$$

$$\alpha = \tau_{h,static} / \sigma'_{v0} \quad (6.3)$$

ve  $k_{\alpha}$  ile  $k_{\sigma}$  da sırasıyla ilksel kayma gerilmesi ile jeolojik gerilme düzeltme faktörleri

şekil 6.5 ve şekil 6.6'da gösterilmektedir.



**Şekil 6.5 :** Düzeltme faktörü  $K_{\alpha}$ 'nın ilksel kayma gerilmesi/normal gerilme oranı ile değişimi

(Kramer,1996).

Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı, zemin davranışı ve zemin yapı etkileşimi analizlerinin doğru hesabında önemli rol oynamaktadır. Kaba daneli zeminler üzerinde yapılan deneysel araştırmalardan pratikte kullanılmak üzere çeşitli amprik bağıntılar geliştirilmiştir.

Laboratuvar deneyleri, zeminin rijitliğinin; tekrarlı birim deformasyon genliği, boşluk oranı, ortalama asal efektif gerilme, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı ve tekrarlı yük sayısından etkilendiğini göstermektedir. Bir zemin elemanın sekant kayma modülü, tekrarlı kayma birim deformasyon genliği ile değişir. Düşük birim deformasyon genliklerinde sekant kayma modülü yüksektir, fakat birim deformasyon genliği artarken sekant kayma modülü azalır. Değişik tekrarlı birim deformasyon genliklerinin histerez döngülerin uçlarının bulunduğu noktaların birleşiminden omurga eğrisi oluşur şekil 6.7a' da gösterilmektedir. Bunun orijindeki eğimi kayma modülünün en büyük değerini  $G_{\max}$ 'ı temsil eder (Kramer,1996). Modül oranının devirsel birim deformasyon genliğine göre değişimi modül azalım eğrisi yardımıyla grafik olarak şekil 6.7b' deki gibi tanımlanır. Bu çalışmalara benzer şekilde, ancak kullanımda daha basit olacak amprik bağıntılar yapılan deney sonuçlarından elde edilmiştir (Okur, 2002). Regresyon analizlerinden kayma modülü oranı eğrisi,

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{B\gamma_a + 0.99} \quad (6.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bulunan regresyon katsayısı  $B$  plastisite indisi arasındaki bağıntı,

$$B = 35.09 \times \left(1 - 0.99 \times e^{(-18.97 PI^{-1.27})}\right) \quad (6.5)$$

şeklindedir.

(6.4) ve (6.5) bağıntıları birleştirilerek, dinamik kayma oranı için denklem,

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{35.09}{\frac{\gamma_a}{1 - 0.99 \times e^{(-18.97 \times PI^{-1.27})}} + 34.74}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu bağıntıda  $\gamma_a$  tekrarlı birim kayma genliği,  $PI$  plastisite indisi olup yüzde cinsindendir. (6.6)

Regresyon analizlerinden kayma modül oranı eğrisi, benzer biçimde sönüm oranı, deney sonuçlarının regresyon analizlerinde,

$$D = a \left(1.17 - e^{(-b\gamma)}\right) \quad (6.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bağıntıdaki  $a$  ve  $b$  plastisite indisine bağlı katsayılar olup şu şekilde ifade edilirler.

$$a = 21.05(0.99^{PI}) \quad (6.8)$$

$$b = 12.75(0.99^{PI}) \quad (6.9)$$

olarak ifade edilebilir. (6.8) ve (6.9) bağıntılarını, (6.7) bağıntısında yerine konularak, sönüm oranı,

$$D = 21.05 \times 0.99^{PI} \times \left( 1.17 - e^{(-12.75 \times 0.99^{PI} \gamma_a)} \right) \quad (6.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu bağıntıda  $\gamma_a$  tekrarlı birim kayma genliği,  $PI$  plastisite indisi olup yüzde cinsindendir.

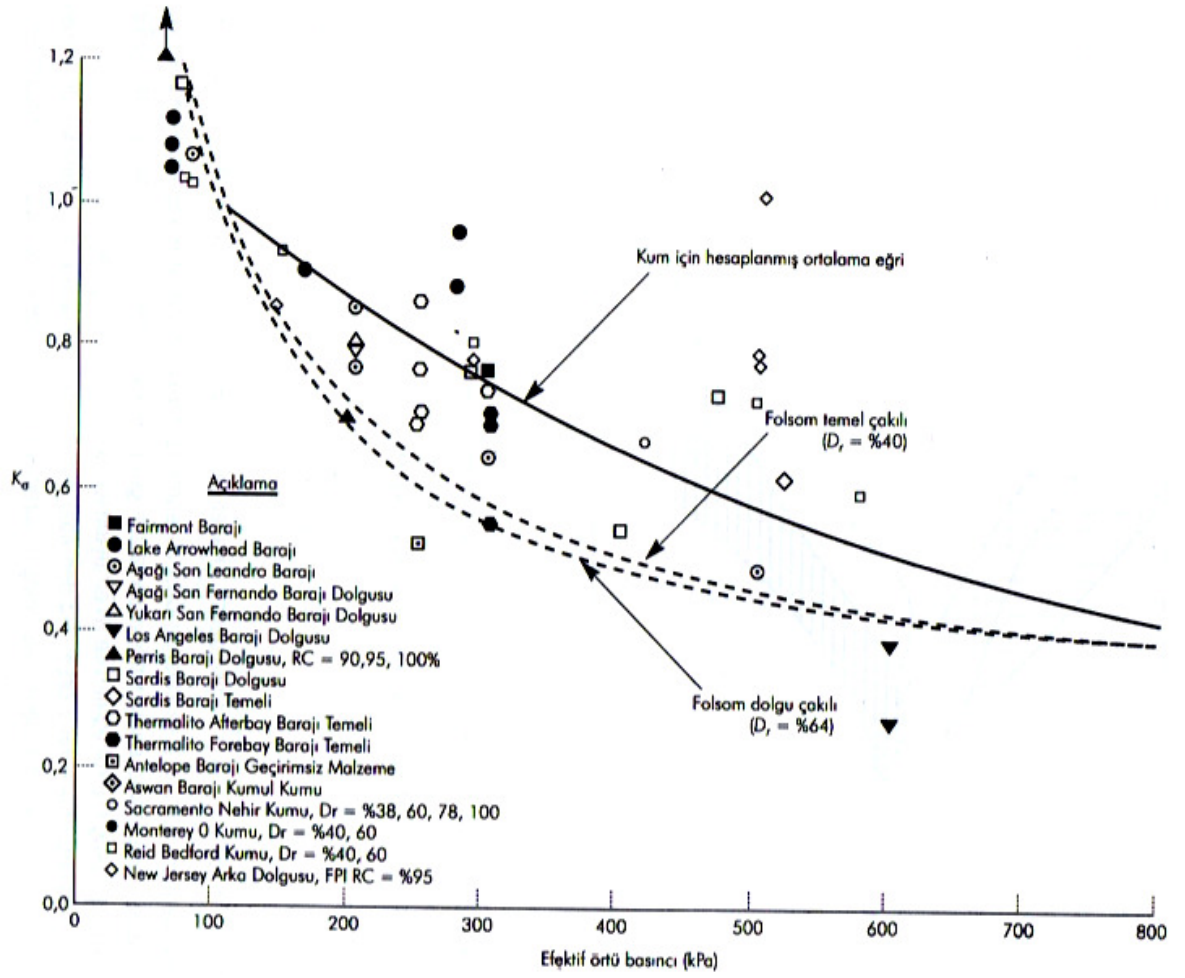
$PI=0$  modül azalım eğrisi; iri taneli ve ince taneli zeminle birbirinden ayrı değerlendirildiği zaman, kumlarda yaygın olarak kullanılmakta olan ortalama modül azalım eğrisine (Seed ve Idriss, 1970) çok benzemektedir. Modül azalım davranışı özellikle düşük plastisiteli zeminlerde olmak üzere efektif çevre basıncından da etkilenir (Iwasaki vd., 1978). Yüksek efektif çevre basınçlarındaki doğrusal tekrarlı eşik birim kayma deformasyonu, küçük efektif çevre basınçlarındakinden büyüktür. Efektif çevre basıncı ile plastisite indisinin modül azalım davranışı üzerindeki birleştirilmiş etkisi, Ishibashi ve Zhang (1993) tarafından aşağıdaki şekilde birleştirilmiştir:

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (6.11)$$

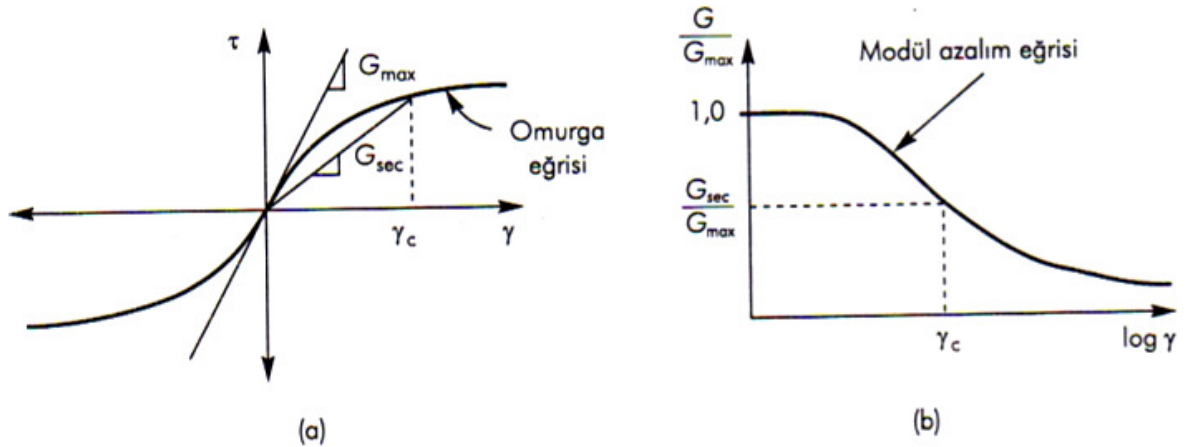
Burada,

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left[ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right] \quad (6.12)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left[ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right] \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (6.13)$$



Şekil 6.6 : Düzeltme faktörü  $K_\sigma$  'nın efektif örtü basıncı ile değişimi (Marcuson vd,1990)



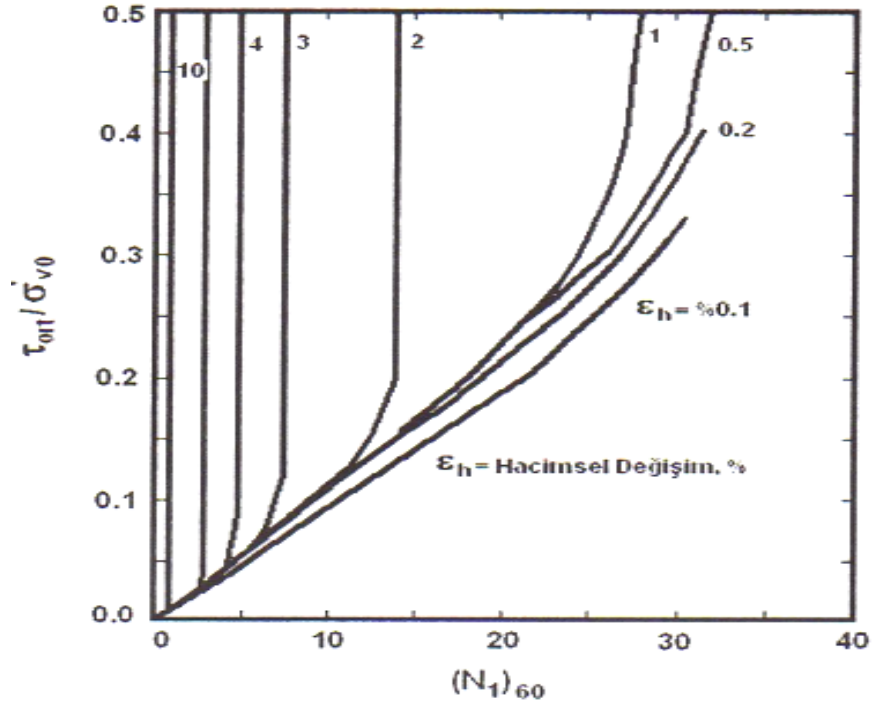
Şekil 6.7 : a)  $G_{sec}$  'in kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga eğrisi  
b) Modül azalım eğrisi (Kramer,1996).

Teorik olarak doğrusal tekrarlı eşik kayma birim deformasyonunun altındaki birim deformasyonlarda enerjinin sönümlenmesi söz konusu değildir. Ancak, deneysel bulgular çok düşük birim deformasyonlar seviyelerinde bile bazı enerji sönümlenmelerinin olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, sönümlenme oranı hiçbir zaman sıfır değildir. Tekrarlı yüklenen zeminin eşik birim deformasyonunun üzerindeki histerez döngülerinin genişliği, artan tekrarlı birim deformasyon genliği ile büyür. Bu durum, sönümlenme oranının artan birim deformasyon genliği ile birlikte arttığını gösterir. Ishibashi ve Zhang (1993) plastik zeminler ve plastik olmayan zeminlerin sönümlenme oranları için ampirik bağıntılar geliştirmiştir.

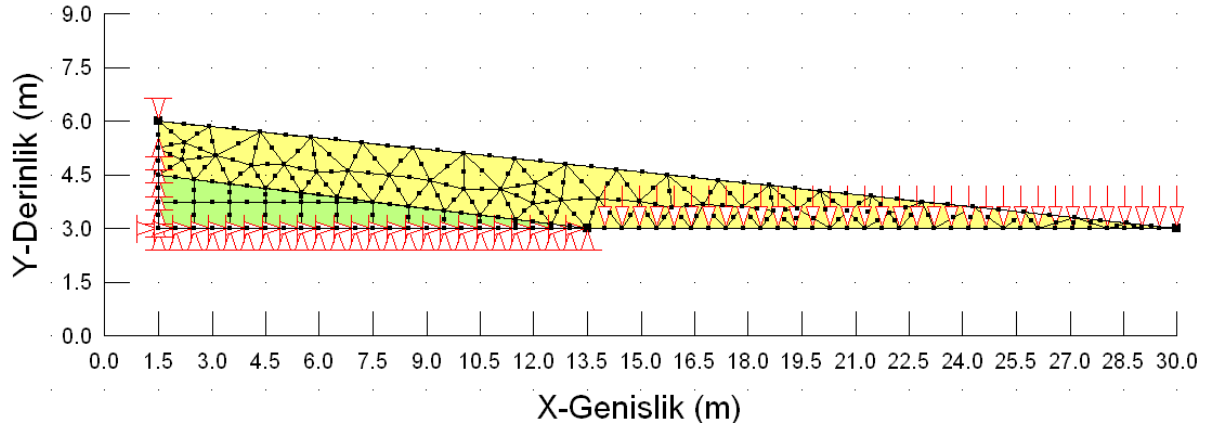
$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right] \quad (6.14)$$

#### 6.2.2.2 Uygun Sınır Koşullarının Tayini

Quake/W programı dinamik analiz bölümünde santrifuj deney modeli ile paralellik göstermesi ve 2. Tip zemin profilinin rijit olarak alınması sebebiyle 2. Tip zemin profil tabanının iki serbestliliği ortadan kaldırılmıştır, ayrıca yatay deprem etkisinin sonuçlara gerçeğe yakın yansımalarının sağlanması amacı ile profilin sol tarafında sadece y doğrultusunda hareket kısıtlandırılmıştır. Yapılan seri analizler sonucu, programın sivilaşma sonucu ortaya çıkan oturmayı değerlendirmede bu nedenle sivilaşabilen zeminin sınır koşulları için santrifuj deneyinde bulunan yüzeysel deplasman değeri ile uyum göstermesi amacıyla uygun mesnet çökme değeri programa tanımlanmıştır. Şekil 6.8’ de Tokimatsu ve Seed (1987) tarafından yapılan suya doygun kumlardaki sivilaşma sonrası hacimsel değişim oranları gösterilmektedir. Santrifuj modeli için buradan hesaplanan değerler kullanılmış ve kullanılan sınır koşulları şekil 6.1’de belirtilen 1.tip zemine göre göreceli rijit 2.tip zeminde genişlik yönünde x ve y doğrultularına ait serbestlikleri engellenmiş olup derinlik doğrultusunda sadece y doğrultusunda serbestliği engellenmiştir. Ayrıca 1.tip zeminde genişlik doğrultusunda uygun mesnet çökmeleri verilmiş olup şekil 6.9’ da gösterilmektedir.



**Şekil 6.8 :** Suya doymun kumlardaki sıvılaşıma sonrası hacimsel değişim ( Tokimatsu ve Seed, 1987)



**Şekil 6.9 :** Santrifuj modeli için kullanılan sınır koşulları

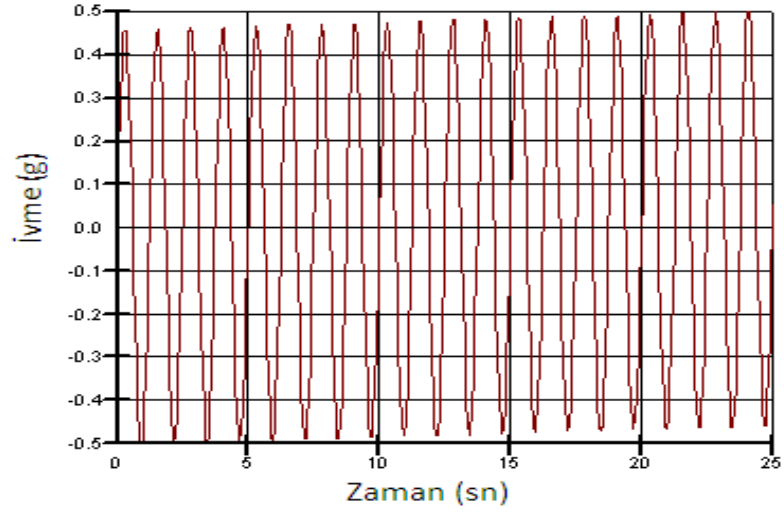
### 6.2.2.3 İstenilen Deprem İvme Girişinin Yapılması

Skh-8 Santrifüj deneyinde kullanılan zemin durumu, zemin özellikleri ve girilen deprem özellikleri Çizelge 6.2'de verilmektedir. Bu profile sinusoidal ivme uygulanmıştır.

Programda kullanılan sinusoidal deprem ivmesi Cyclic 1-d programı deprem itkileri klasöründen alınmış olup excelde yazılmış olan program ile Quake/W programına uygunluğu sağlanmıştır şekil 6.10 'da girilen deprem girdi ivmesi sunulmaktadır.

**Çizelge 6.2 :** Santrifuj deneyinde girilen deprem özellikleri

| Girilen Deprem Özellikleri |                 |           |
|----------------------------|-----------------|-----------|
| İvme(g)                    | Frekans<br>(Hz) | Süre (sn) |
| 0.5<br>(sinusoidal)        | 1               | 25        |



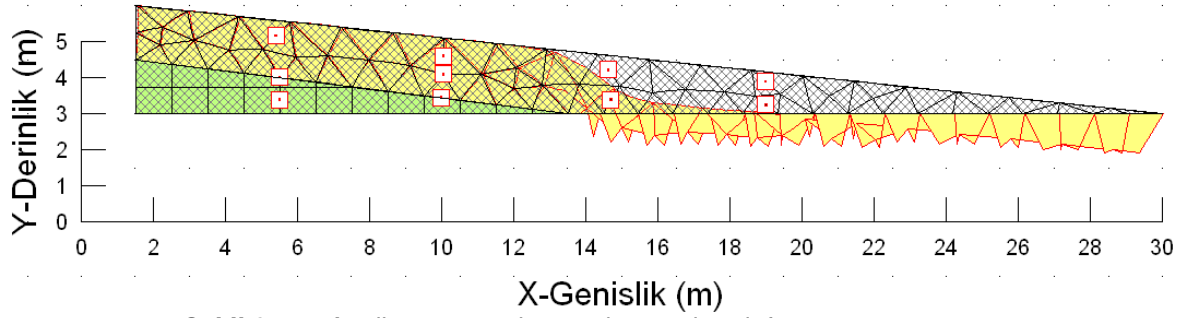
**Şekil 6.10 :** Santrifüj modelinde kullanılan deprem ivme girdisi (0.5 g)

### 6.3 Sonuçlar

Haigh vd. (1998) yılında yapmış olduğu santrifüj deneyinde SKH-8 modelinde beklenen en yüksek yüzeysel deplasman değerinin 0.6 m olduğu Çizelge 6.3 'te yapılan çeşitli modeller santrifüj deneyleri ile birlikte verilmektedir. Şekil 6.11'de program sonucunda elde edilen deformasyon eğrisi görülmektedir ve deplasmanın 0.57 m olduğu bulunmuştur.

**Çizelge 6.3 :** Santrifüj deney sonucu tahmin edilen ve gözlenen deplasman değerleri Haigh vd.(1998)

| Test   | Tahmini Deplasman/m | Gözlenen Deplasman/m |
|--------|---------------------|----------------------|
| SKH-5  | n/a                 | 1.00                 |
| SKH-8  | 0.8                 | 0.60                 |
| SKH-9  | 0.9                 | 0.75                 |
| SKH-10 | 1.1                 | 1.00                 |



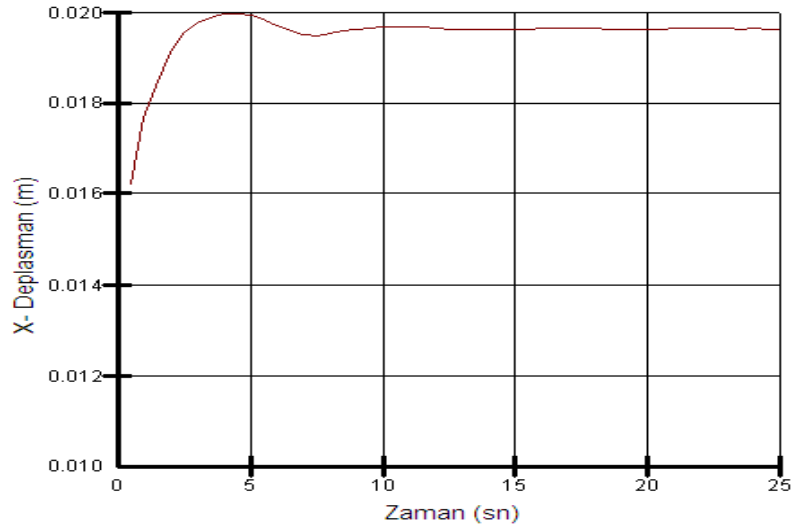
**Şekil 6.11** : Analiz sonucunda meydana gelen deformasyon

Quake/W programında tarihsel düğüm noktası olarak tabir edilen düğüm noktaları kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir ve bu noktalardaki aşırı boşluk suyu basınç oranları hesaplanabilir. Dolayısıyla sıvılaşmanın gerçekleşip gerçekleşmediği bu analiz sonucu bulunabilmektedir. Ayrıca bu düğüm noktaları sayesinde program, deplasman-zaman, hız-zaman, ivme-zaman grafiklerinin elde edilmesi ile seçilen noktaya göre gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilebilmektedir. Şekil 6.11 'de görülen düğüm noktaları için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

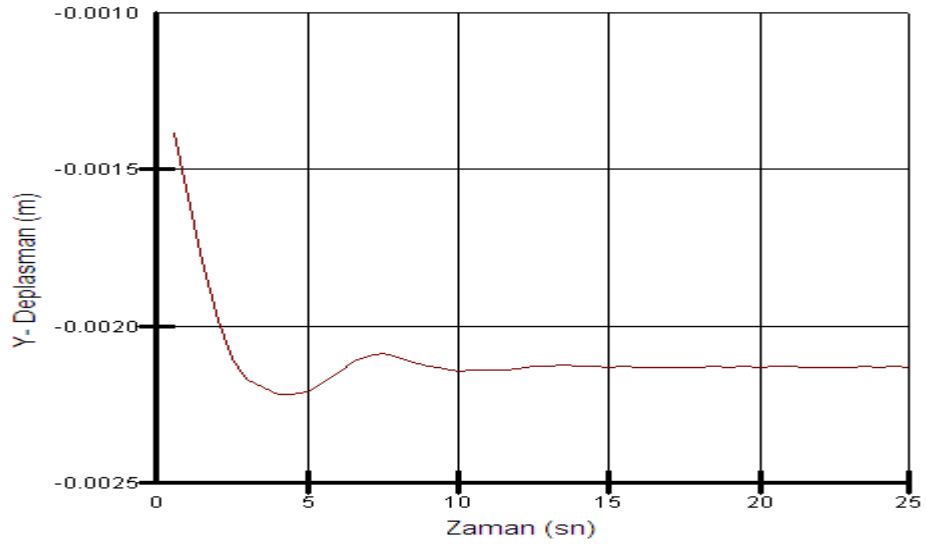
Şekil 6.12 ve şekil 6.13'te analiz sonucunda 132 sayılı düğüm noktası için sırasıyla x ve y doğrultusunda deplasman grafikleri görülmektedir. Bu noktanın x yönünde yaklaşık 0.2 m kadar hareket ettiği ve y yönünde ise 0.002 m kadar oturduğu görülmektedir. Çizelge 6.4'te santrifüj deney modelinde gösterilen bazı düğüm noktalara ait sıvılaşma durumu gösterilmektedir.

**Çizelge 6.4** : 68,74,71,132,131,130,187,188 sayılı düğüm noktalarında sıvılaşma durumu

| D.Noktası | #X Kordinatı (m) | #Y Kordinatı (m) | $\Delta u$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Efektif Gerilme<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $r_u$ |
|-----------|------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-------|
| 68        | 5.40             | 5.17             | 3.60                               | 3.45                                    | >1    |
| 74        | 5.50             | 4.00             | 6.08                               | 12.95                                   | 0.47  |
| 71        | 5.50             | 3.38             | 0.00                               | 20.56                                   | 0.00  |
| 132       | 10.00            | 4.60             | 6.09                               | 4.18                                    | >1    |
| 131       | 10.05            | 4.09             | 11.37                              | 8.36                                    | >1    |
| 130       | 10.05            | 3.44             | 5.07                               | 13.75                                   | 0.37  |
| 187       | 14.71            | 4.21             | 7.79                               | 3.41                                    | >1    |
| 188       | 14.64            | 3.38             | 10.16                              | 10.16                                   | 1.00  |
| 228       | 18.99            | 3.87             | 12.15                              | 7.6                                     | >1    |
| 229       | 19.01            | 3.24             | 6.23                               | 2.36                                    | >1    |



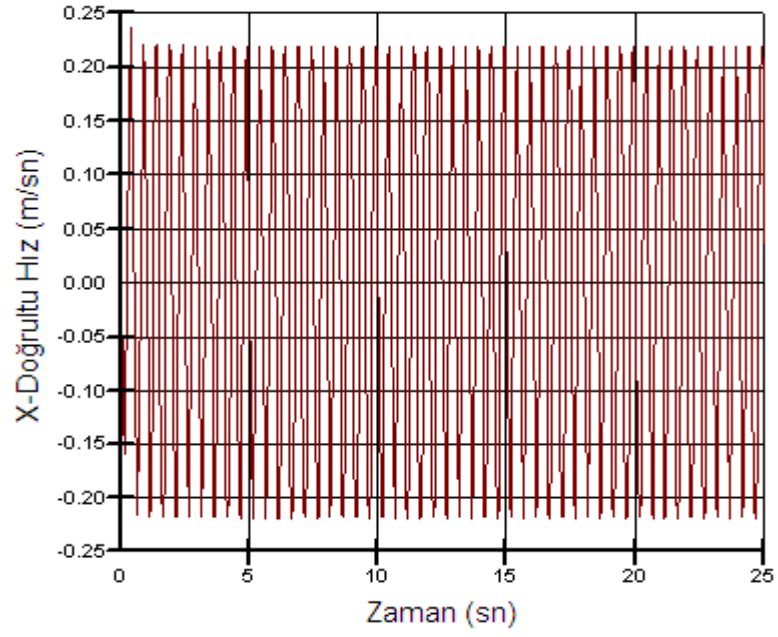
**Şekil 6.12** : 132 sayılı düğüm noktasına ait x doğrultusunda deplasman-zaman grafiği



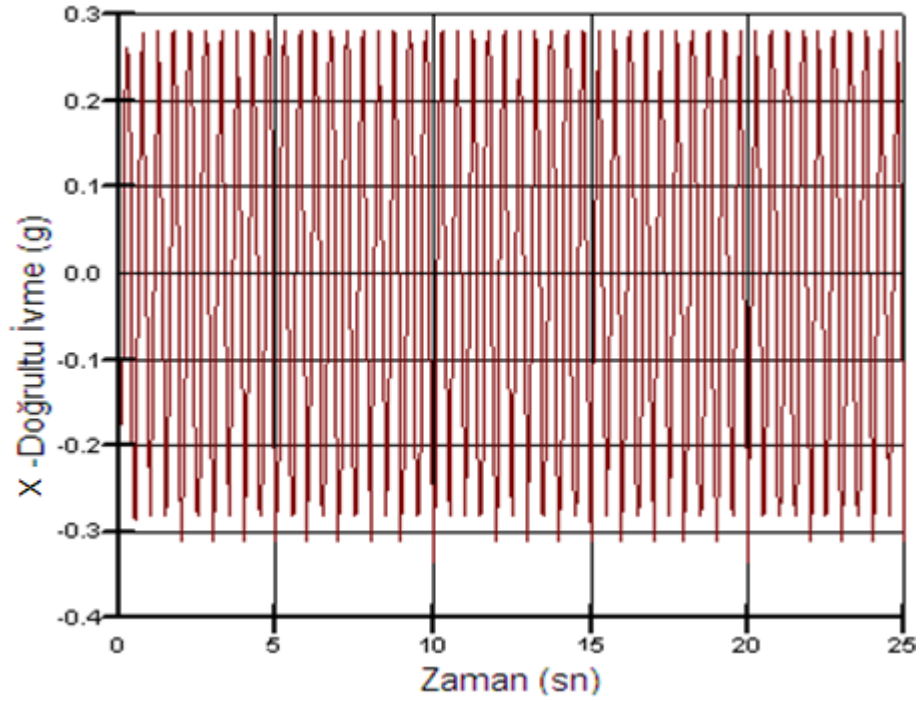
**Şekil 6.13** : 132 Numaralı düğüm noktasına ait y doğrultusunda deplasman-zaman grafiği

Analizde kullanılan modeldeki diğer düğüm noktalarına ait x ve y doğrultu deplasman zaman grafikleri ekler bölümünde gösterilmiştir. x ve y doğrultularındaki deplasmanlardan deprem etkisiyle deplasman değeri ilk 5 saniyede pik değerine ulaşmış ardından 5 ile 10 saniyeler arasında, tahmin edilen sıvılaşma kaynaklı, deplasman değerinde bir düşüş oluşmuş ve takip eden saniyelerde denge durumunda geçerek sabitlendiği görülmüştür.

Şekil 6.14 ve şekil 6.15’ de,132 numaralı düğüm noktası için analiz sonucu sırasıyla x doğrultusunda hız ve ivme, zaman grafikleri elde edilmiştir.

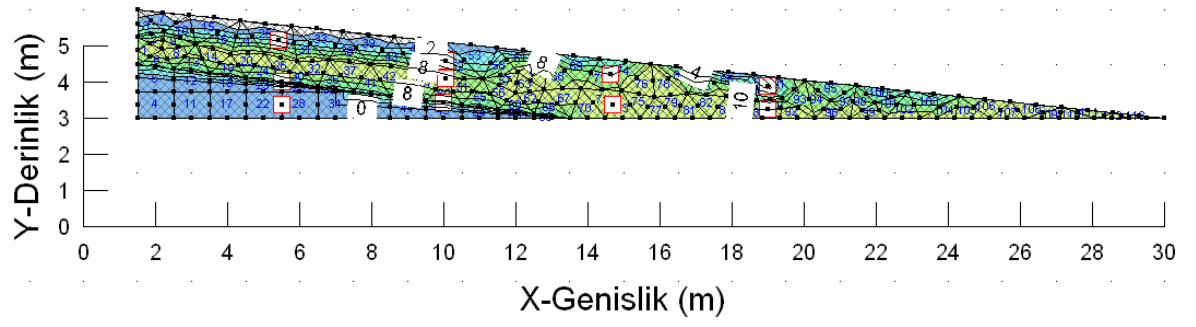


**Şekil 6.14** : 132 sayılı düğüm noktasına ait x doğrultusunda hız-zaman grafiği



**Şekil 6.15** : 132 sayılı düğüm noktasına ait x doğrultusunda ivme-zaman grafiği

Aşırı boşluk suyu basıncının  $\text{kN/m}^2$  birimi cinsinden kontur çizgilerine göre sayısal değeri Şekil 6.20 'de gösterilmiştir. Program aynı zamanda kontur çizgileri yardımıyla aşırı boşluk suyu basınç değerlerini göstermektedir.



**Şekil 6.16 :** Santrifüj modelinde ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basıncının kontur çizgilerine göre sayısal değeri

## 7. 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ'NİN ANALİZİ VE QUAKE/W PROGRAMI İLE YAPILAN SAYISAL ÇÖZÜMLER

Öncelikle bu bölümde Kocaeli depremi genel özelliklerine yer verilmiştir. Ardından program yardımı ile çizelge 7.1'den de görülebileceği üzere girdi parametreleri kullanılmış, 10°,15°,20°,25° şev açılarında değişen yer altı su seviyesi durumunda %35,%50,%85 relatif sıklık değerlerine sahip kumlu zeminde, Kocaeli 1999 deprem ivme değerleri kullanılarak uygun sınır koşullarında analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde potansiyel sıvılaşma durumu incelenmiş deplasman değerlerine ulaşılmış ve sıvılaşma durumunda hangi değişkenlerin daha baskın olarak stabiliteyi etkilediği ortaya konmuştur.

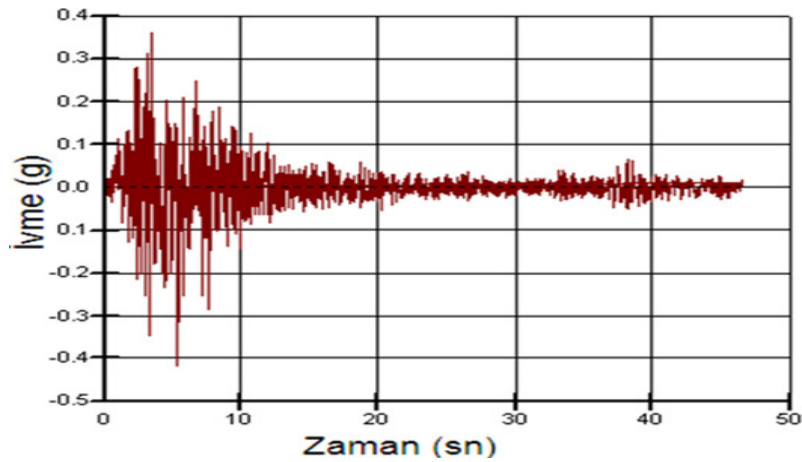
Çizelge 7.1 Analizlerde kullanılan girdi parametreleri

| Model No | Şev eğimi | Şev yüksekliği (m) | Şev Genişliği (m) | Y.A.S.S Durumu           | D <sub>r</sub> (%) | Y <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> ) | E (Mpa) |
|----------|-----------|--------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|---------|
| 1        | 10°       | 8                  | 45                | zemin üst kotu           | 35                 | 18                                  | 10      |
| 2        | 10°       | 8                  | 45                | 1/2 profil yüksekliğinde | 35                 | 18                                  | 10      |
| 3        | 10°       | 8                  | 45                | zemin üst kotu           | 50                 | 20                                  | 50      |
| 4        | 10°       | 8                  | 45                | zemin üst kotu           | 85                 | 25                                  | 90      |
| 5        | 15°       | 8                  | 30                | zemin üst kotu           | 35                 | 18                                  | 10      |
| 6        | 15°       | 8                  | 30                | 1/2 profil yüksekliğinde | 35                 | 18                                  | 10      |
| 7        | 15°       | 8                  | 30                | zemin üst kotu           | 50                 | 20                                  | 50      |
| 8        | 15°       | 8                  | 30                | zemin üst kotu           | 85                 | 25                                  | 90      |
| 9        | 20°       | 8                  | 22                | zemin üst kotu           | 35                 | 18                                  | 10      |
| 10       | 20°       | 8                  | 22                | 1/2 profil yüksekliğinde | 35                 | 18                                  | 10      |
| 11       | 20°       | 8                  | 22                | zemin üst kotu           | 50                 | 20                                  | 50      |
| 12       | 20°       | 8                  | 22                | zemin üst kotu           | 85                 | 25                                  | 90      |
| 13       | 25°       | 8                  | 17                | zemin üst kotu           | 35                 | 18                                  | 10      |
| 14       | 25°       | 8                  | 17                | 1/2 profil yüksekliğinde | 35                 | 18                                  | 10      |
| 15       | 25°       | 8                  | 17                | zemin üst kotu           | 50                 | 20                                  | 50      |
| 16       | 25°       | 8                  | 17                | zemin üst kotu           | 85                 | 25                                  | 90      |

### 7.1 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Genel Özellikleri

17 Ağustos 1999'da Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Adapazarı, Kocaeli, Gölçük bölümü üzerinde meydana gelen, 7.4 büyüklüğünde ve yaklaşık 0.42 g ivme değerinde Kocaeli Depremi, Marmara Bölgesi'nin tamamında batıda Tekirdağ'dan doğuda Düzce'ye kadar geniş bir alanda etkili olmuştur. Kocaeli Depremi ivme-zaman grafiği Sakarya istasyonu deprem kayıt verilerine göre şekil 7.1' deki gibi olup veri alınan istasyonun rijit kaya zemin üzerinde bulunması sebebi ile alınmış olan veride herhangi bir düzeltme yapılması ihtiyacı duyulmamıştır. Kocaeli Depremi, Marmara'nın batısından Erzincan'a kadar uzanan 1000 km uzunluğundaki Kuzey Anadolu Fayı'nın Gökaya-Yalova arasında kalan yaklaşık 120 km' lik kısmının yırtılması sonucunda meydana gelmiştir. Fay kırılması, tek parça değil üç parça şeklinde meydana geldiğinden sarsıntının şiddeti beklenenden az ancak süresi uzun olmuştur (Sucuoğlu, 2000).

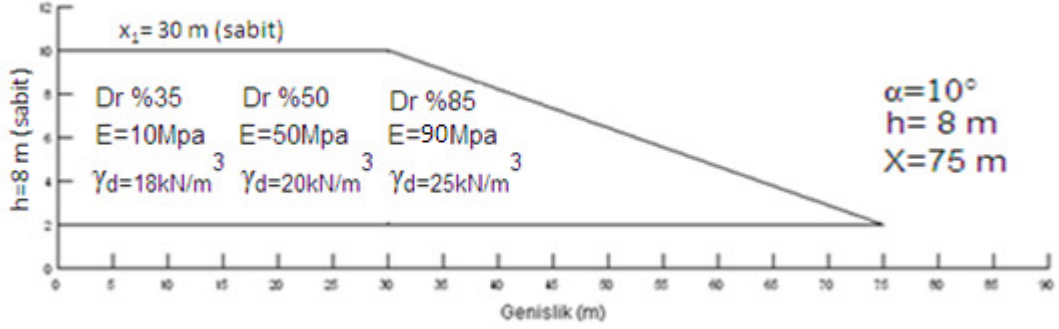
Deprem sırasında Marmara Bölgesi'nin çeşitli yerlerinde bulunan yer hareketi kayıt istasyonlarında ölçülen yer ivmelerinin maksimum değerleri, yerçekimi ivmesinin %40'ını aşmamakta ve birinci derece deprem bölgeleri için 1998 Deprem Yönetmeliği'nde öngörülen değerlerin altında kalmaktadır (Sucuoğlu, 2000). Yer ivmeleri yumuşak alüvyon zeminlerin olduğu bölgelerde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu bölgeler İzmit-Yalova sahil şeridi, aynı bölgedeki dere yatakları, Düzce Ovası, Sakarya nehrinin alüvyonu üzerine kurulmuş Adapazarı kenti ve İstanbul'un Avcılar bölgesidir. Bu depremden en çok etkilenen bölgelerden Gölçük ve Değirmendere'de kıyılar üzerindeki yapılarla birlikte su altında kalmış, Adapazarı'nda sıvılaşma sonucunda birçok binanın temeli zeminin içine gömülmüş veya aşırı dönerek binaların devrilmesine sebep olmuştur.



**Şekil 7.1** : Sakarya istasyonu deprem kayıt verilerine göre 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ivme-zaman grafiği

## 7.2 Eğimi 10° olan Şevde Sıvılaşma Analizi

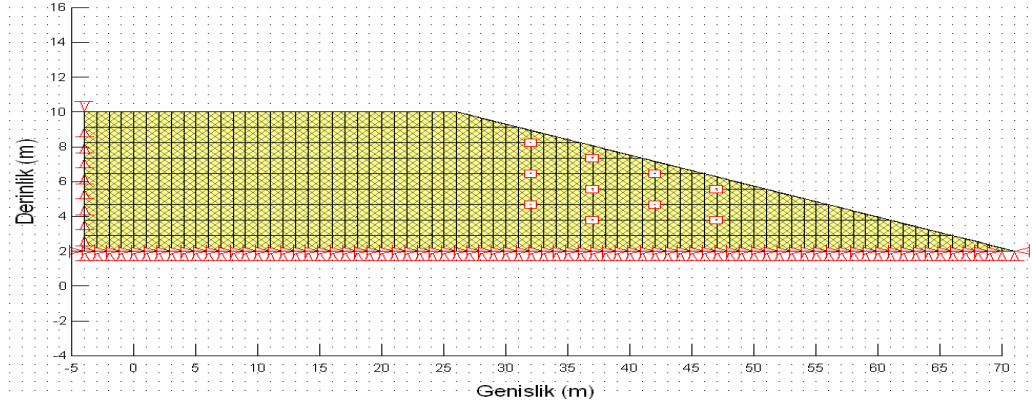
Bölüm 6'da modelleme için belirtilen kriterler, eğimi 10° olan şevler için uyarlanmış olup şekil 7.2' de tek tabaka kumlu şeve değişen relatif sıkılık değerine karşılık gelen malzeme özellikleri verilmiş ve analizlerde bu değişkenler kullanılmıştır. Bununla birlikte 17 Ağustos 1999 deprem verileri ve uygun sınır koşulları programa entegre edilmiş olup bu bölümde elde edilen sonuçlar anlatılacaktır.



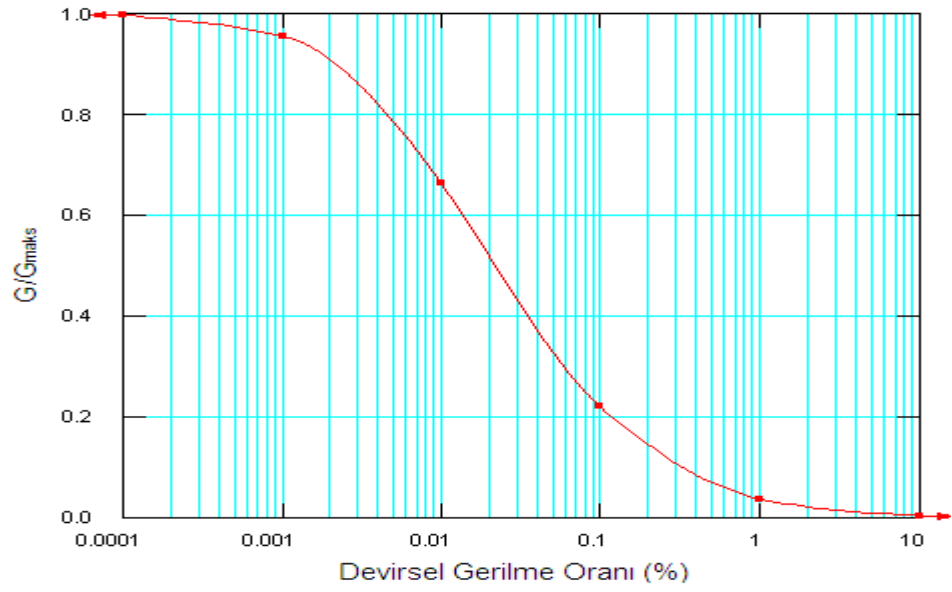
Şekil 7.2 : 10° eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri

### 7.2.1 Relatif sıkılığı (Dr: %35)'lik ve YASS: 0 m olan Zeminde Sıvılaşma Analizi

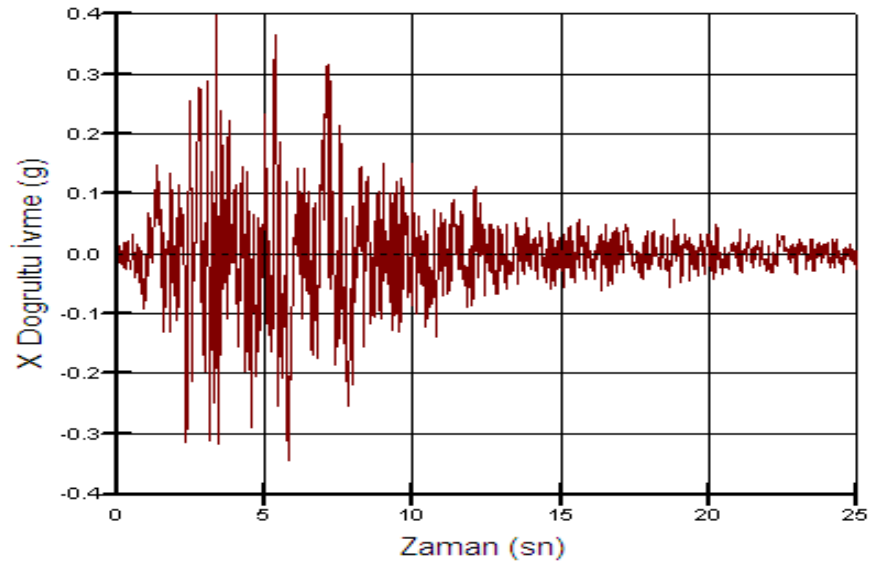
Şekil 7.3'te şev geometrisinde görüldüğü gibi, x-yönünde 5 m y-yönünde 2 m aralıklarla toplam 10 adet tarihsel düğüm noktaları tayin edilmiştir ve bu noktalardaki potansiyel sıvılaşma durumu Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi incelenmiştir. Şekil 7.4'te görülen %35 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilmiş ve de uygulanmıştır. Belirlenen noktalardan birinde deprem süresince Şekil 7.5'te ivme-zaman ve şekil 7.6'te hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şevin deprem sonrası yüzeysel ve derinsel olmak üzere maksimum deplasman değerleri şekil 7.7 ve şekil 7.8 ile sırasıyla verilmiştir.



Şekil 7.3 : 10° eğimde yass:0 m olan şev



Şekil 7.4 : 10° eğimli şevde y.a.s.s:0 durumunda  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı

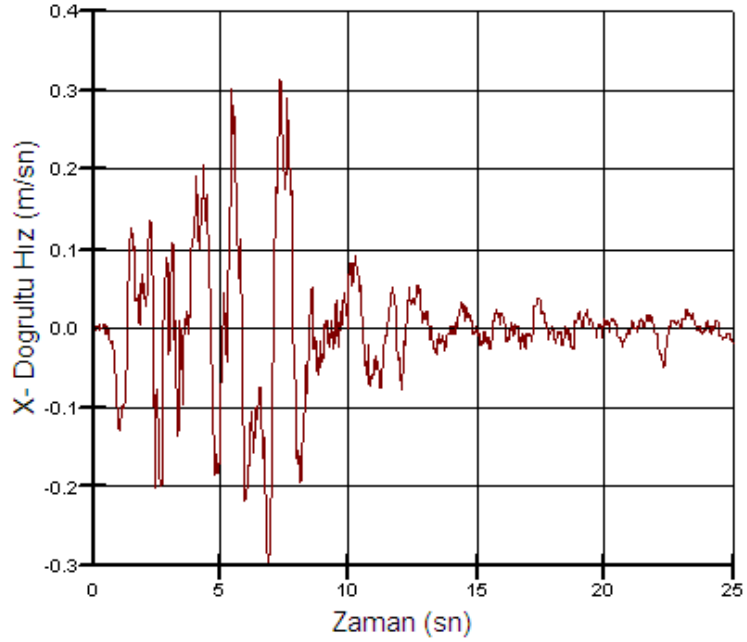


Şekil 7.5 : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği

**Çizelge 7.1** :10° Eğimde oluşturulan şevde tayin edilen düğüm noktaları

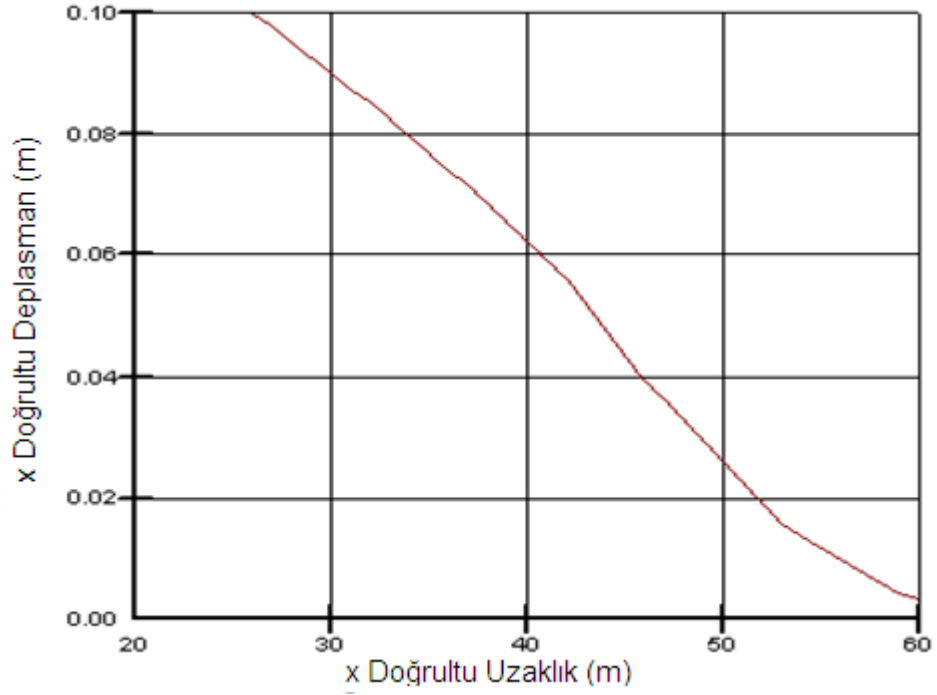
| <b>367, 365, 363, 410,408, 406, 448, 446, 481, 479 Sayılı Düğüm Noktalarında Tahmin Edilen Sıvılaşma Durumu</b> |                 |                 |                                 |                                     |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------|
| D.Noktası                                                                                                       | #X Kordinat (m) | #Y Kordinat (m) | $\Delta u$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Efektif Gerilme(kN/m <sup>2</sup> ) | $r_u$ |
| 367                                                                                                             | 32              | 8.22            | 10.13                           | 6.32                                | >1    |
| 365                                                                                                             | 32              | 6.44            | 10.84                           | 20.61                               | 0.53  |
| 363                                                                                                             | 32              | 4.67            | 16.87                           | 35.19                               | 0.48  |
| 410                                                                                                             | 37              | 7.33            | 10.13                           | 6.31                                | >1    |
| 408                                                                                                             | 37              | 5.56            | 11.16                           | 20.61                               | 0.54  |
| 406                                                                                                             | 37              | 3.78            | 17.41                           | 35.26                               | 0.49  |
| 448                                                                                                             | 42              | 6.44            | 10.13                           | 6.34                                | >1    |
| 446                                                                                                             | 42              | 4.67            | 11.24                           | 20.68                               | 0.54  |
| 481                                                                                                             | 47              | 5.56            | 10.13                           | 6.36                                | >1    |
| 479                                                                                                             | 47              | 3.78            | 11.18                           | 20.73                               | 0.54  |

\* Aşırı boşluk suyu basınç oranı  $r_u \geq 1$  olduğu durumda potansiyel sıvılaşma beklenmektedir.



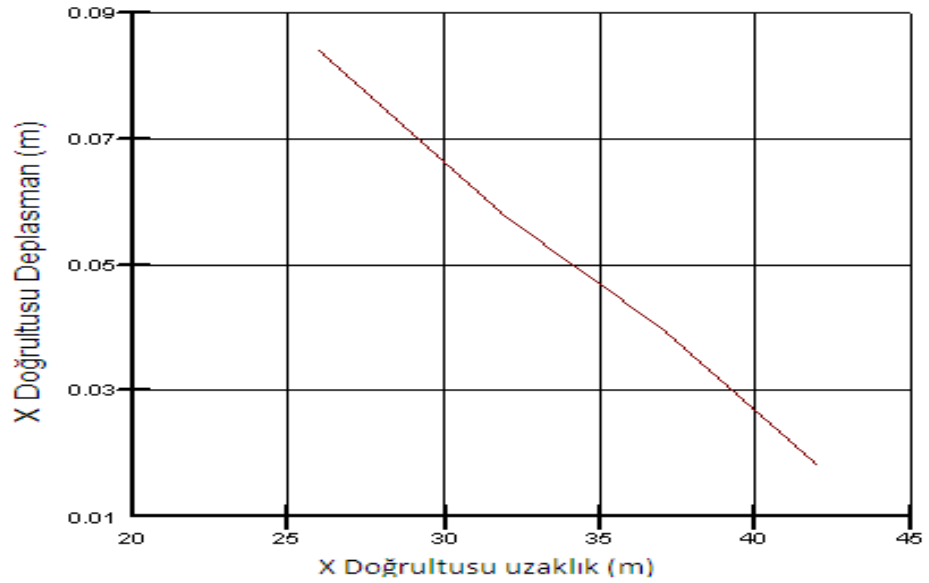
**Şekil 7.6** : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği

Şekil 7.7'te yaklaşık yüzeyden 1m derindeki meydana gelen maksimum deplasman değeri gösterilmektedir.



Şekil 7.7 : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği

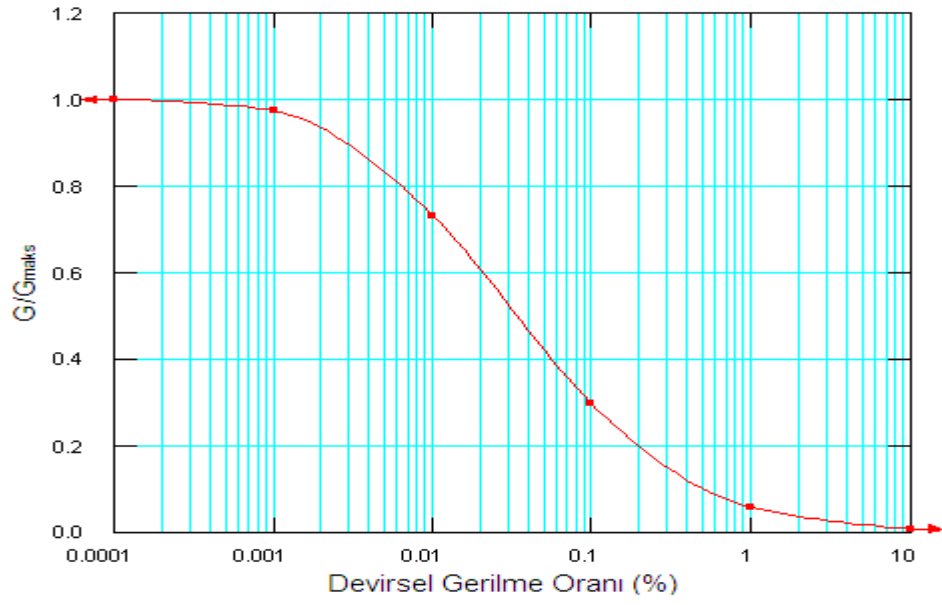
Şekil 7.8'da yaklaşık yüzeyden 4m derindeki meydana gelen maksimum deplasman değeri gösterilmektedir.



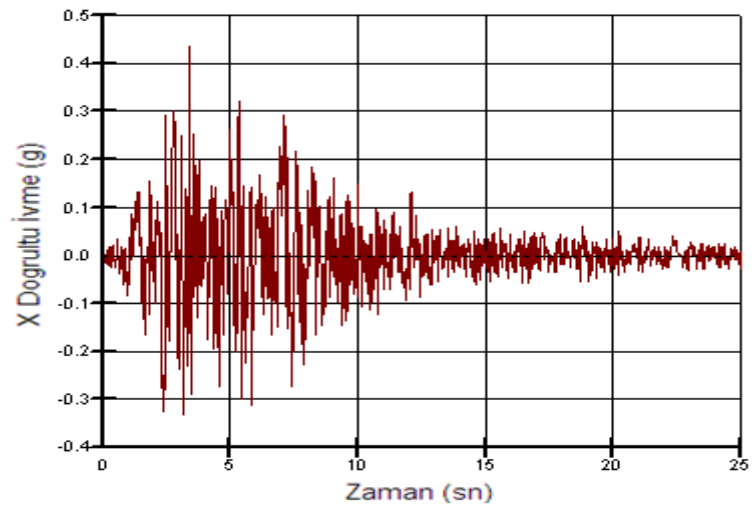
Şekil 7.8 : Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği

### 7.2.2 Relatif sıklığı (Dr: %35)'lik ve YASS: ½ Profil yüksekliğinde olan Zeminde Sıvılaşma Analizi

80



**Şekil 7.10 :** 10° eğimli %35 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s:1/2 profil yüksekliği durumunda G/Gmaks'a karşılık gelen Devirsel GerilmeOranı

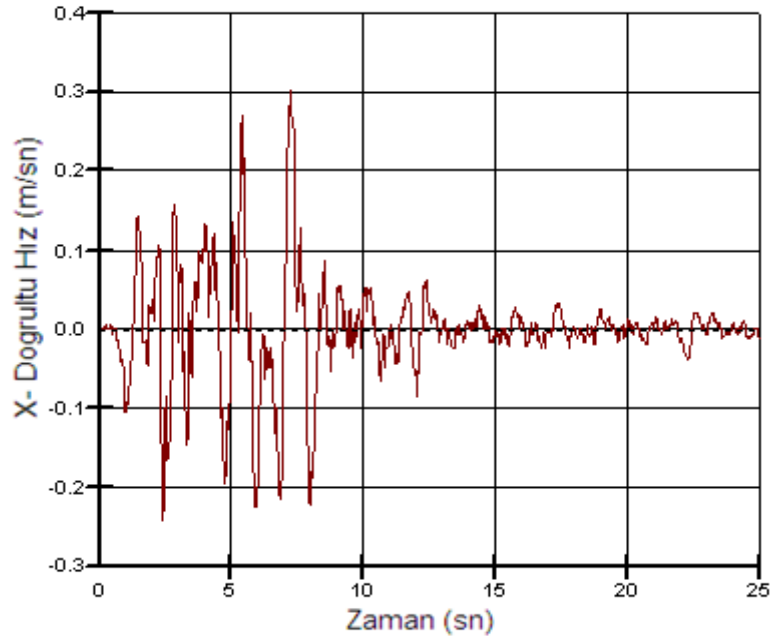


**Şekil 7.11 :** 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği

**Çizelge 7.2** :10° Eğimde yass:1/2 profil yüksekliğinde olan şevde tayin edilen düğüm noktaları

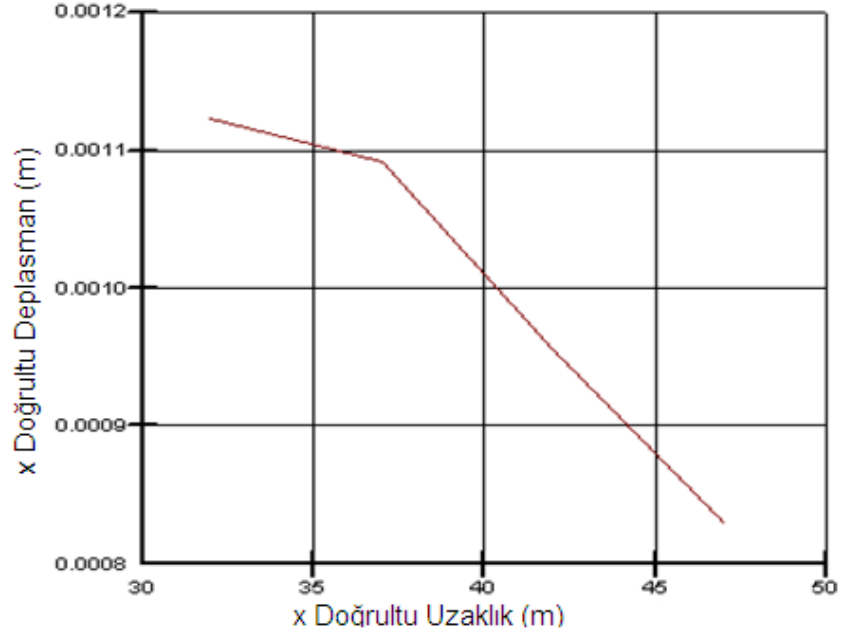
| <b>367, 365, 363, 410, 408, 406, 448, 446, 481, 479 Sayılı Düğüm Noktalarında Tahmin Edilen Sıvılaşma Durumu</b> |                 |                 |                                 |                                     |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------|
| D.Noktası                                                                                                        | #X Kordinat (m) | #Y Kordinat (m) | $\Delta u$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Efektif Gerilme(kN/m <sup>2</sup> ) | $r_u$ |
| 367                                                                                                              | 32              | 8.22            | 0                               | 13.87                               | 0     |
| 365                                                                                                              | 32              | 6.44            | 11.6                            | 44.84                               | 0.26  |
| 363                                                                                                              | 32              | 4.67            | 30.41                           | 64.25                               | 0.47  |
| 410                                                                                                              | 37              | 7.33            | 0                               | 13.86                               | 0     |
| 408                                                                                                              | 37              | 5.56            | 20.6                            | 40.46                               | 0.51  |
| 406                                                                                                              | 37              | 3.78            | 27.04                           | 55.69                               | 0.49  |
| 448                                                                                                              | 42              | 6.44            | 5.99                            | 13.46                               | 0.45  |
| 446                                                                                                              | 42              | 4.67            | 16.77                           | 32.31                               | 0.52  |
| 481                                                                                                              | 47              | 5.56            | 10.13                           | 9.43                                | >1    |
| 479                                                                                                              | 47              | 3.78            | 12.71                           | 24.31                               | 0.52  |

\* Aşırı boşluk suyu basınç oranı  $r_u \geq 1$  olduğu durumda potansiyel sıvılaşma beklenmektedir.

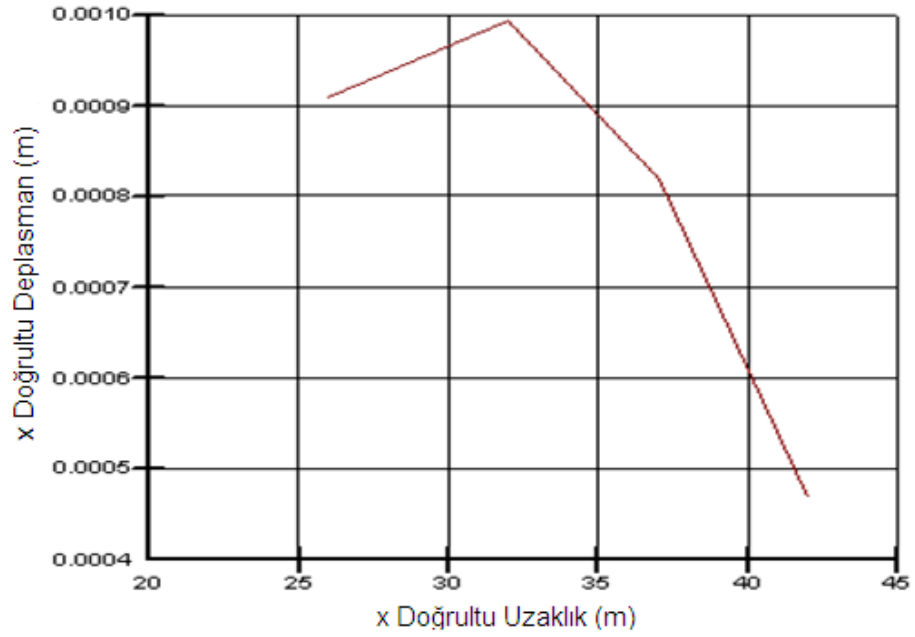


**Şekil 7.12** : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği

Görüldüğü üzere yer altı su seviyesi zemin sıvılaşma potansiyeli ile yakından alakalı olup yer altı su seviyesinin artışı zeminin sıvılaşma olasılığını tetiklemektedir.



**Şekil 7.13 :** Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği



**Şekil 7.14 :** Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği

Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $10^\circ$  eğimde yer altı su seviyesi profilin yarı yüksekliğinde olan şevin toplam deplasman değeri 0.14 m olup Şekil 7.2'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı profil genişliğine oranı % 0.31'dir.

### 7.2.3 Relatif sıkılığı (Dr: %50'lık) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

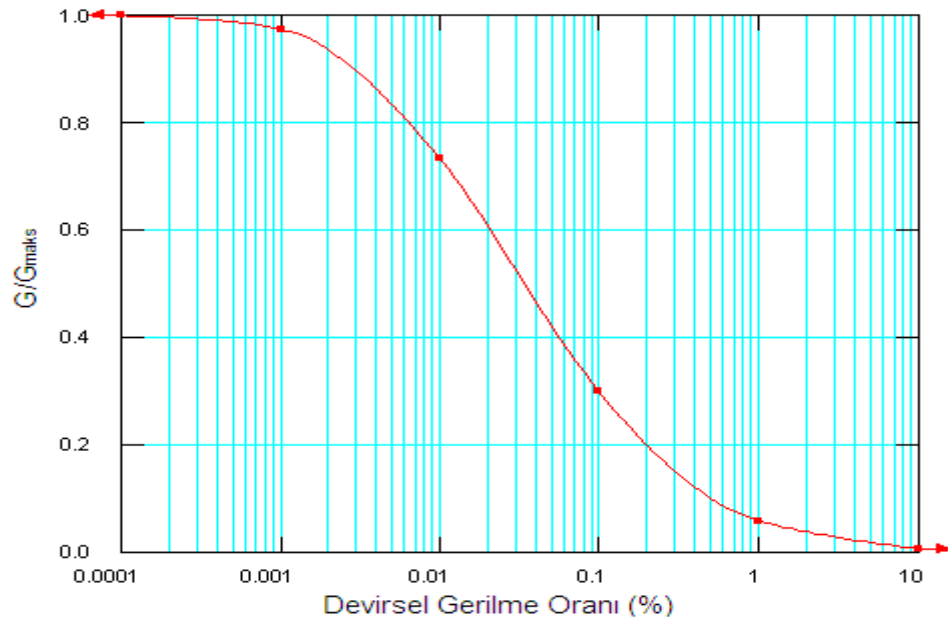
Şekil 7.3'te şev geometrisinde görüldüğü gibi, x-yönünde 5 m y-yönünde 2 m aralıklarla toplam 10 adet düğüm noktaları tayin edilmiş ve bu noktalardaki potansiyel sıvılaşma durumu Çizelge 7.3'te görüldüğü gibi incelenmiştir. Ayrıca Şekil 7.15'te %50 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış. Bu düğüm noktalarından birinde deprem süresince şekil 7.16'te ivme-zaman ve şekil 7.17'da hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şevin deprem sonrası yüzeysel ve derinsel olmak üzere maksimum deplasman değerleri şekil 7.18 ve şekil 7.19' de gösterilmiştir.

**Çizelge 7.3 :**10° Eğimde yass: 0 m'de relatif sıkılık değeri %50, malzeme özelliğine sahip şevde belirlenen düğüm noktalarında sıvılaşma durumu

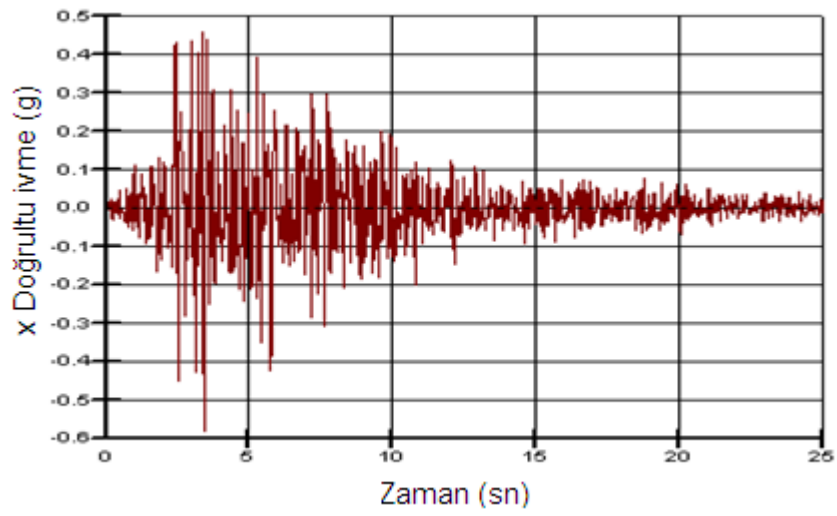
| <b>367, 365, 363, 410,408, 406, 448, 446, 481, 479 Sayılı Düğüm Noktalarında Tahmin Edilen Sıvılaşma Durumu</b> |                 |                 |                                 |                                     |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------|
| D.Noktası                                                                                                       | #X Kordinat (m) | #Y Kordinat (m) | $\Delta u$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Efektif Gerilme(kN/m <sup>2</sup> ) | $r_u$ |
| 367                                                                                                             | 32              | 8.22            | 10.13                           | 7.85                                | >1    |
| 365                                                                                                             | 32              | 6.44            | 12.31                           | 25.65                               | 0.48  |
| 363                                                                                                             | 32              | 4.67            | 20.98                           | 43.79                               | 0.48  |
| 410                                                                                                             | 37              | 7.33            | 5.24                            | 7.8                                 | 0.67  |
| 408                                                                                                             | 37              | 5.56            | 13.02                           | 25.65                               | 0.51  |
| 406                                                                                                             | 37              | 3.78            | 21.66                           | 43.87                               | 0.49  |
| 448                                                                                                             | 42              | 6.44            | 5.59                            | 7.86                                | 0.71  |
| 446                                                                                                             | 42              | 4.67            | 13.25                           | 25.71                               | 0.52  |
| 481                                                                                                             | 47              | 5.56            | 5.03                            | 7.8                                 | 0.65  |
| 479                                                                                                             | 47              | 3.78            | 13.16                           | 25.78                               | 0.51  |

\* Aşırı boşluk suyu basınç oranı  $r_u \geq 1$  olduğu durumda potansiyel sıvılaşma beklenmektedir.

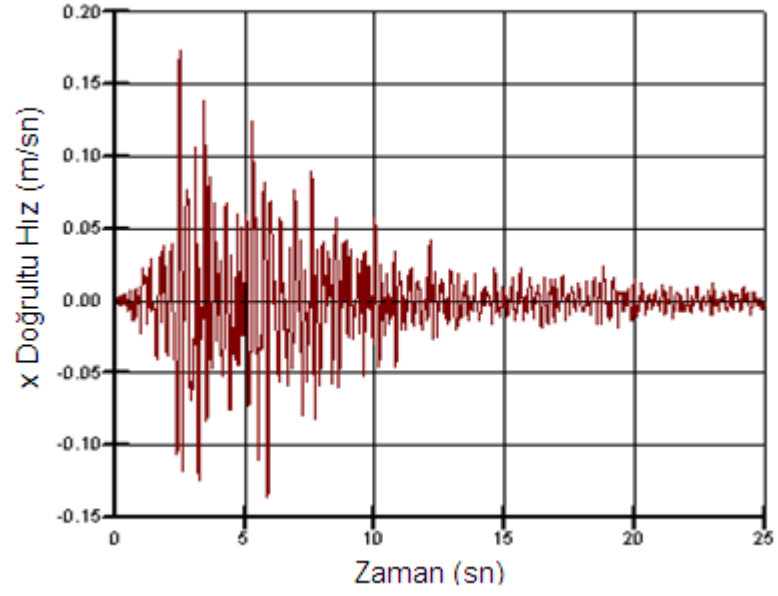
Görüldüğü üzere yer altı su seviyesinin yanı sıra zeminin sıkılık oranındaki artış da sıvılaşma potansiyelini etkilemektedir. Zeminin sıkılık oranındaki artış yer altı su seviyesindekinin aksine zemin sıvılaşma potansiyelini düşürür.



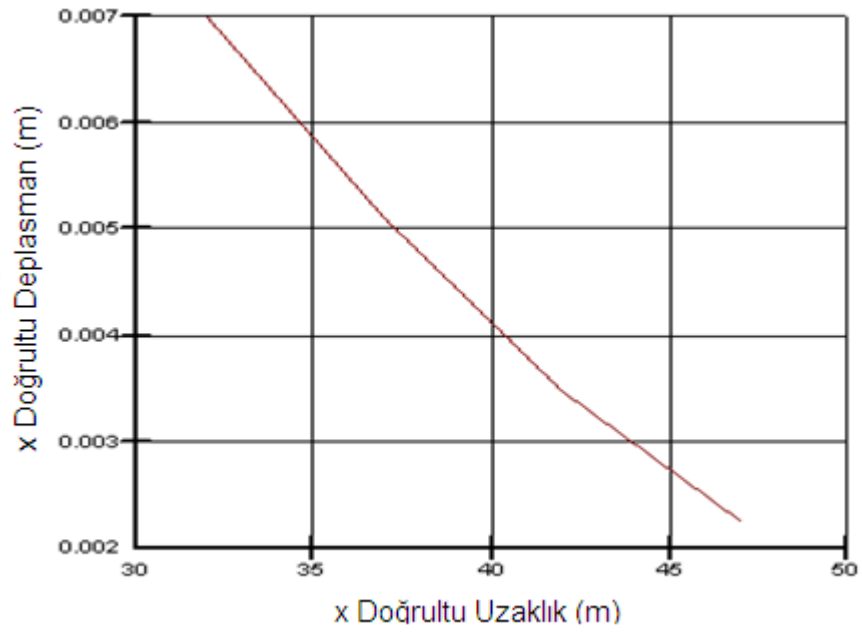
**Şekil 7.15 :** 10° eğimli %50 relatif sıklığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre G/Gmaks'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



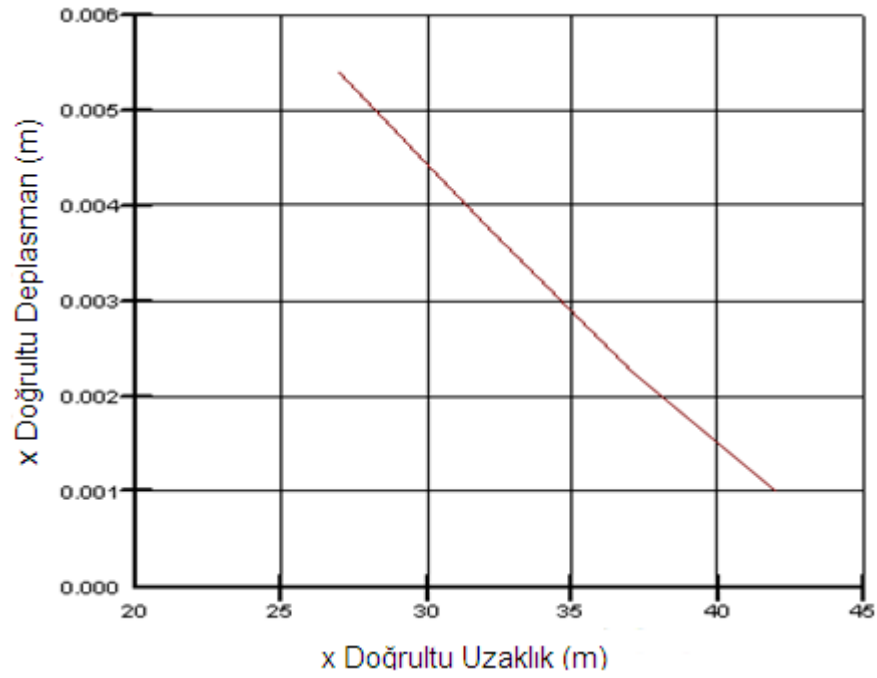
**Şekil 7.16 :** 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.17** : 408 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği



**Şekil 7.18** : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği



**Şekil 7.19 :** Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği

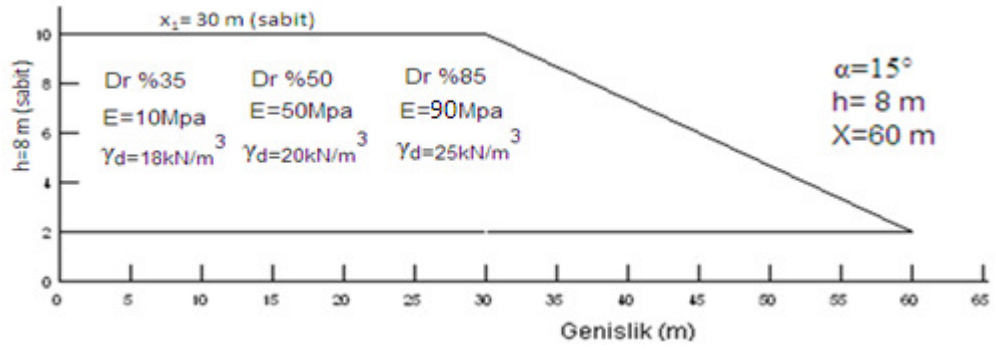
Analiz sonucunda %50 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $10^\circ$  eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.022 m olup şekil 7.2'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.05' tir.

#### **7.2.4 Relatif sıklığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi**

Şekil 7.20'de % 85 zemin sıklık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış ve şekil 7.21'de görülebileceği üzere  $10^\circ$  eğimdeki şevde tek tabaka ve %85 relatif sıklık değerine sahip kumlu zemininin etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli elde edilmiştir.



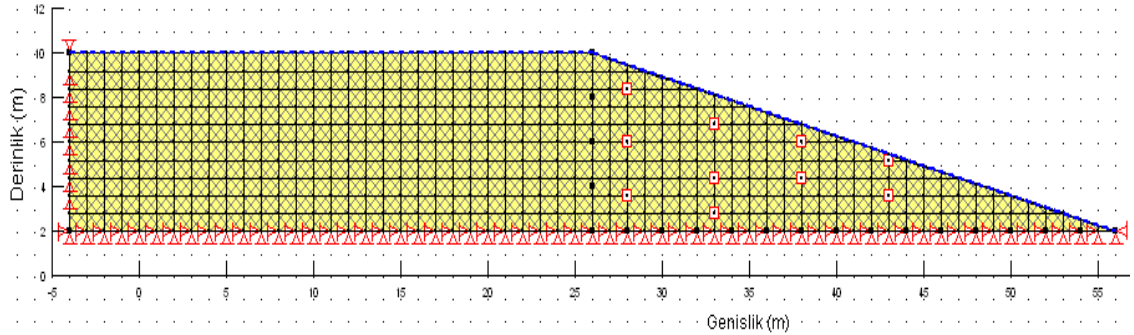
entegre edilmiş olup bu bölümde elde edilen sonuçlar anlatılacaktır.



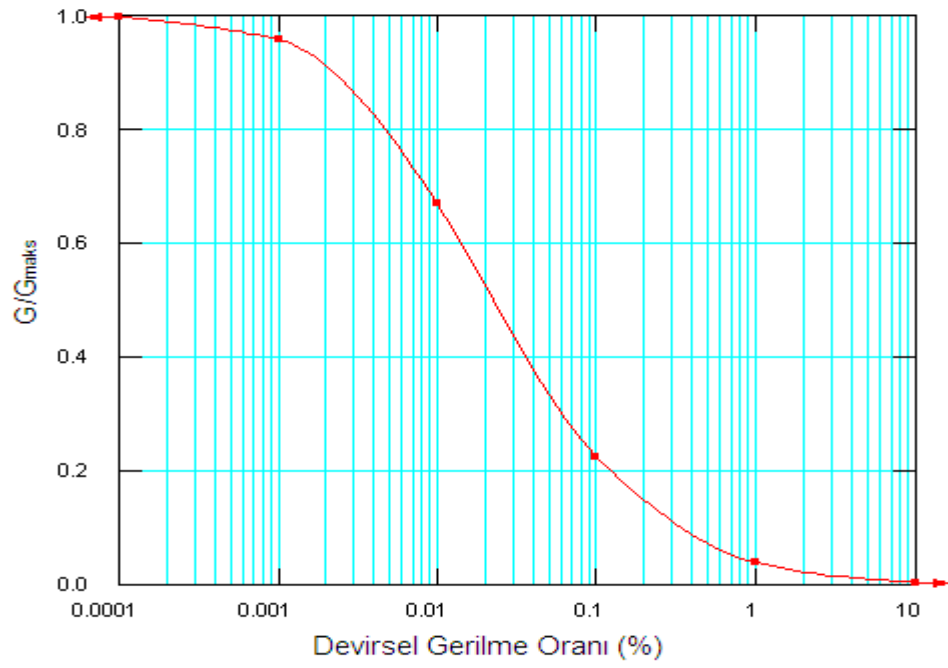
**Şekil 7.22** : 15° eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri

### 7.3.1 Relatif sıkılığı (Dr: %35'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

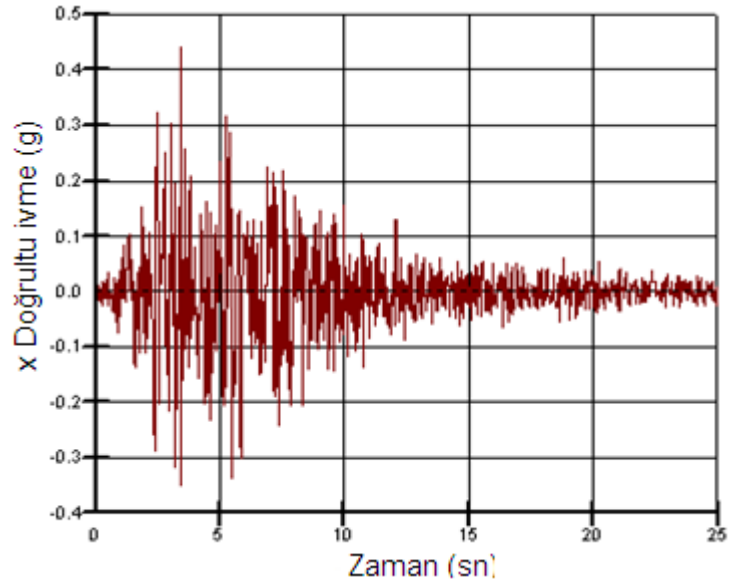
Şekil 7.23'te şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuş. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.24'te %35 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış. Düğüm noktalarından birinde (406 sayılı düğüm noktası x:33m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.25'te ivme-zaman ve şekil 7.26'da hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şevin deprem sonrası yüzeysel ve derinsel olmak üzere maksimum deplasman değerleri şekil 7.27 ve şekil 7.28' de gösterilmiştir.



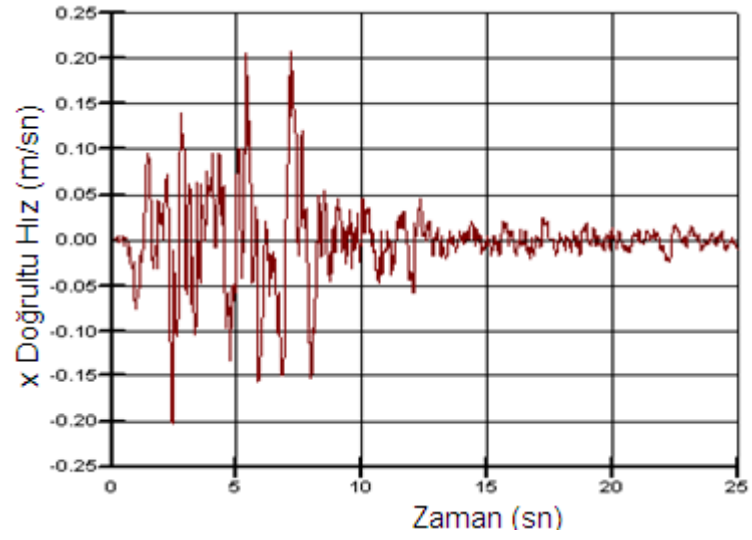
**Şekil 7.23** : 15° eğimde yass:0 m' de olan şev



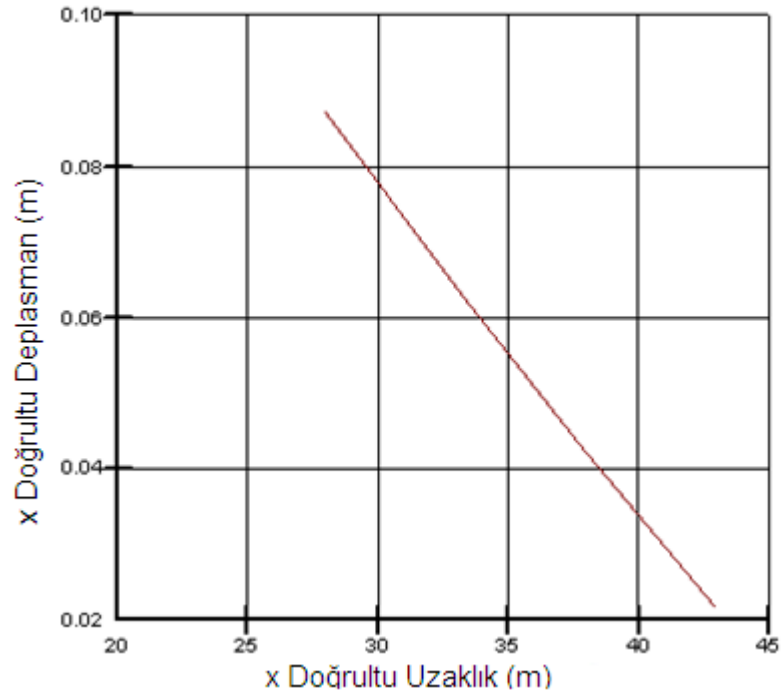
**Şekil 7.24** : 15° eğimli %35 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



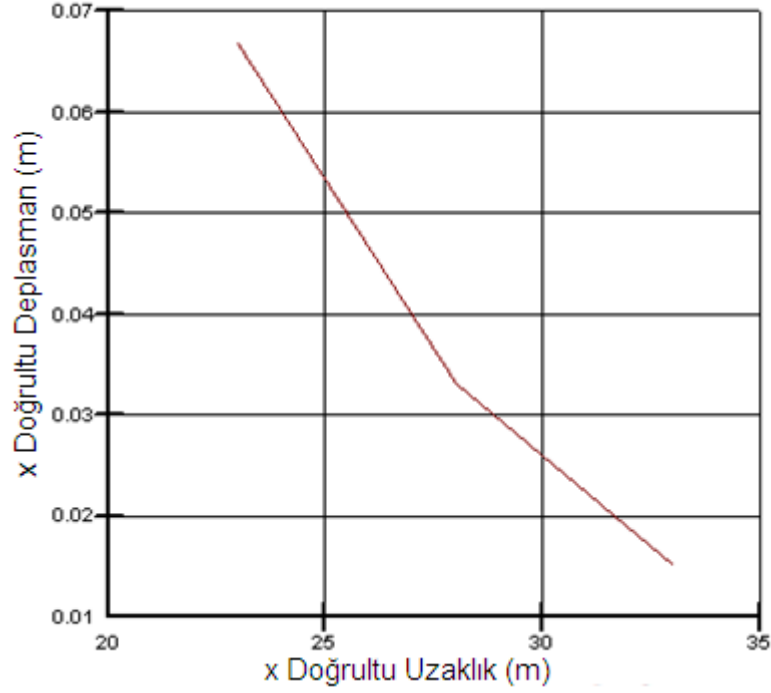
**Şekil 7.25** : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



Şekil 7.26 : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği



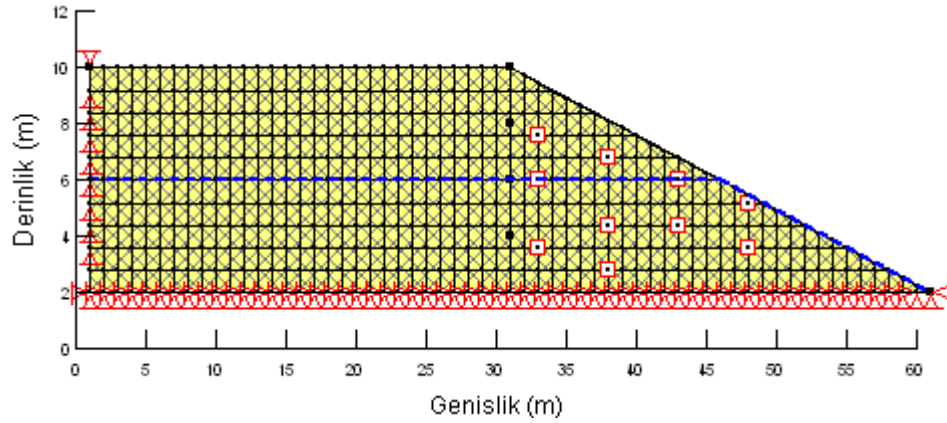
Şekil 7.27 : Yüzeyden yaklaşık 1 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği



**Şekil 7.28 :** Yüzeyden yaklaşık 4 m derinde oluşan maksimum deplasman grafiği

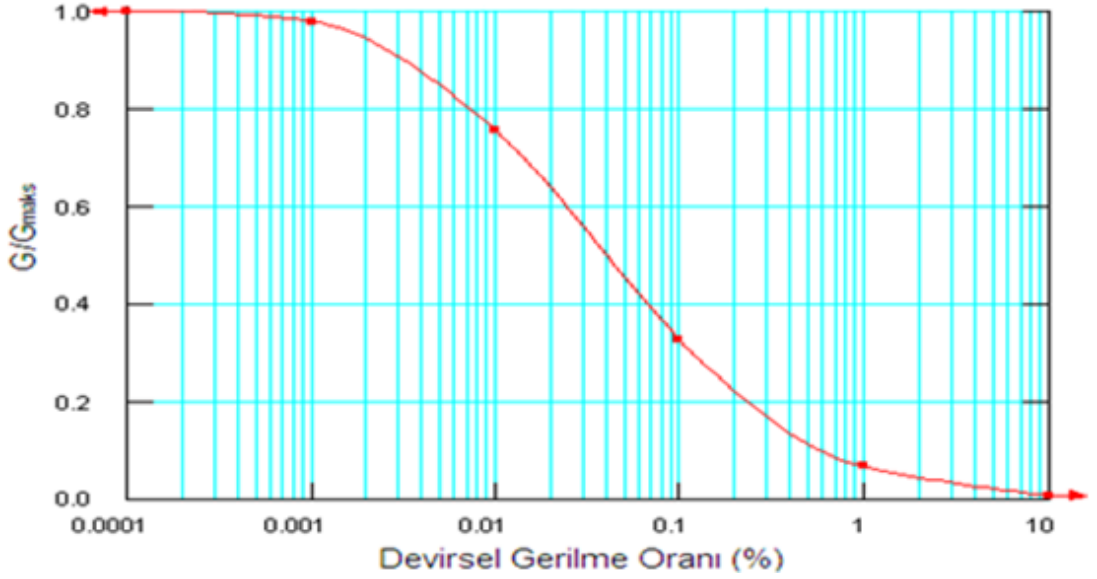
Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $15^\circ$  eğimde yass: 0' m olan şevin toplam deplasman değeri 0.15 m olup elde edilen toplam deplasman değerlerinin şekil 7.22'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.50' dir.

### 7.3.2 Relatif sıklığı (Dr: %35'lik) ve YASS: $\frac{1}{2}$ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi

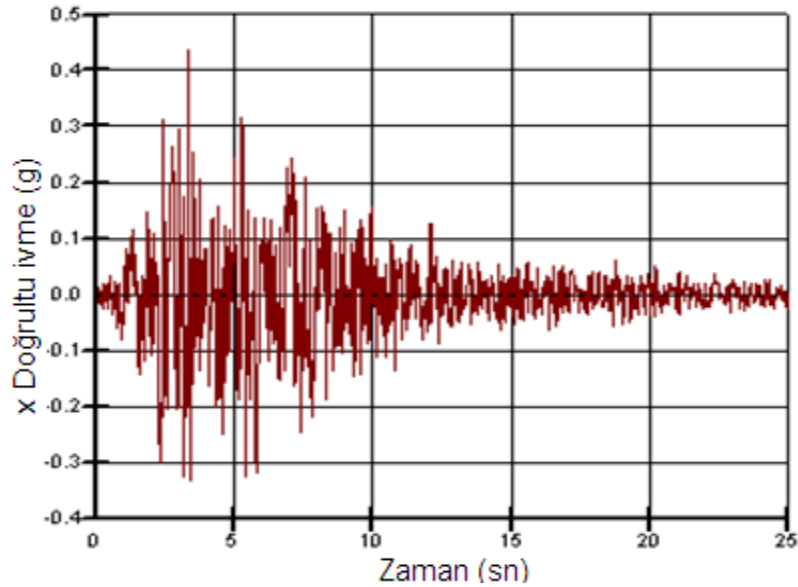


**Şekil 7.29 :**  $15^\circ$  eğimde yass:1/2 profil yüksekliğinde olan şev

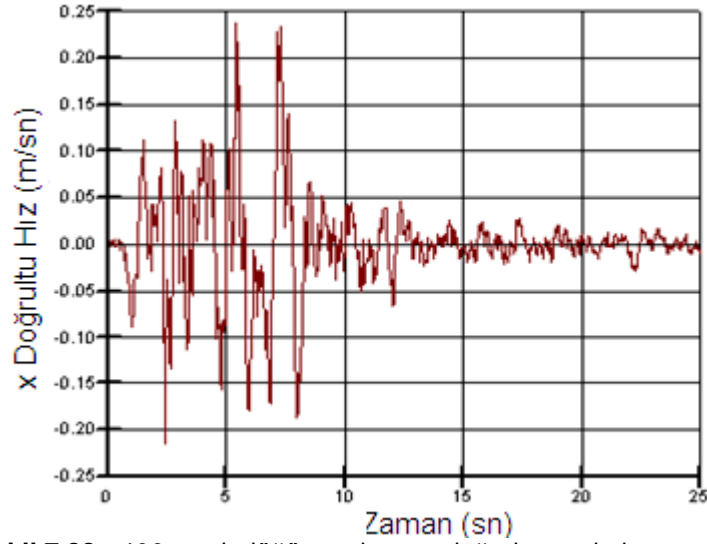
Şekil 7.29'da şev geometrisinde görüldüğü gibi şev geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca Şekil 7.30'da %35 zemin sıklık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış. Belirlenen düğüm noktalarından birinde deprem süresince Şekil 7.31'de ivme-zaman ve Şekil 7.32'de hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman, Şekil 7.33'te deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



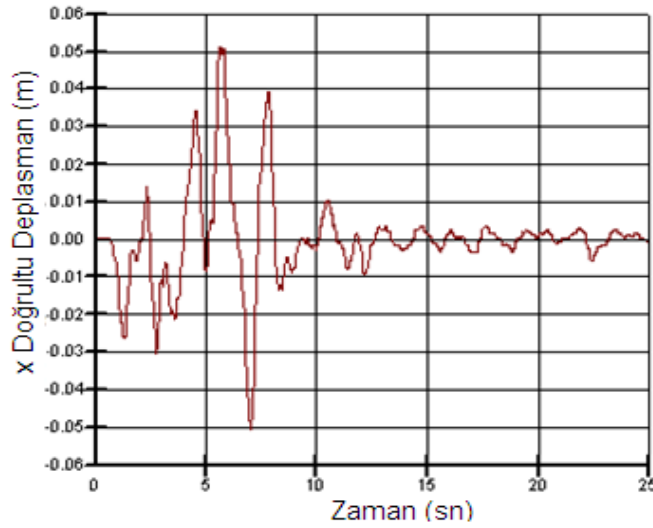
**Şekil 7.30 :** 15° eğimli %35 relatif sıklığa sahip şevde y.a.s.s  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.31 :** 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.32** : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız-zaman grafiği



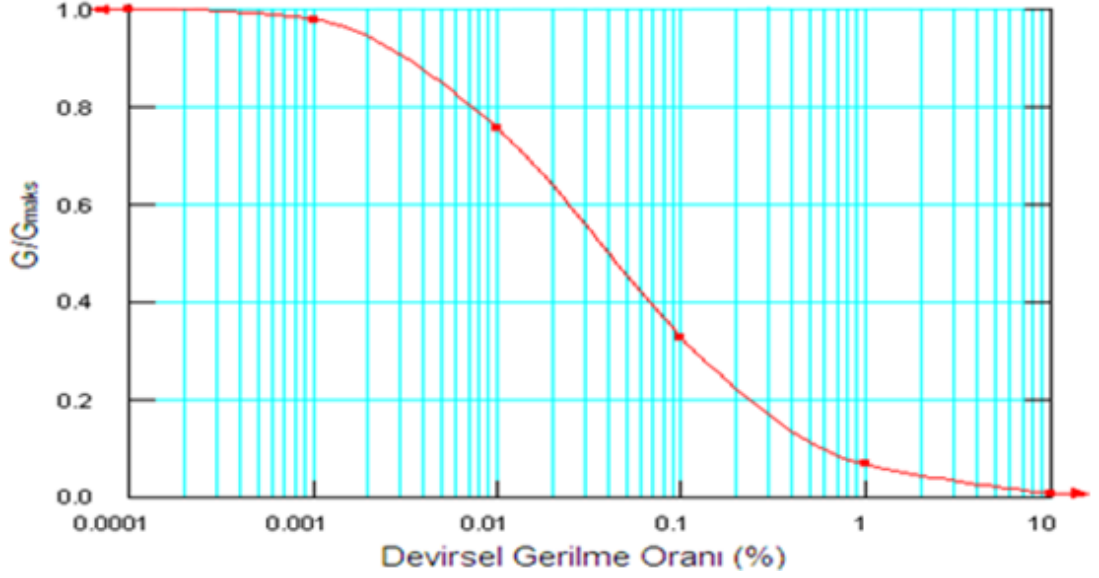
**Şekil 7.33** : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman-zaman grafiği

Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $15^\circ$  eğimde yass:  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olan şevin toplam deplasman değeri 0.13 m olup elde edilen toplam deplasman değerlerinin şekil 7.22'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.43'tür.

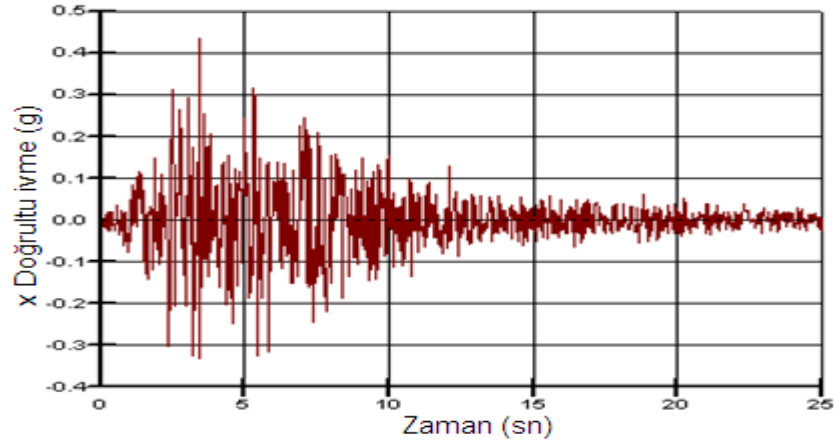
### 7.3.3 Relatif sıklığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.23'te şev geometrisinde görüldüğü gibi geometri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.34'te %50 zemin sıklık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre

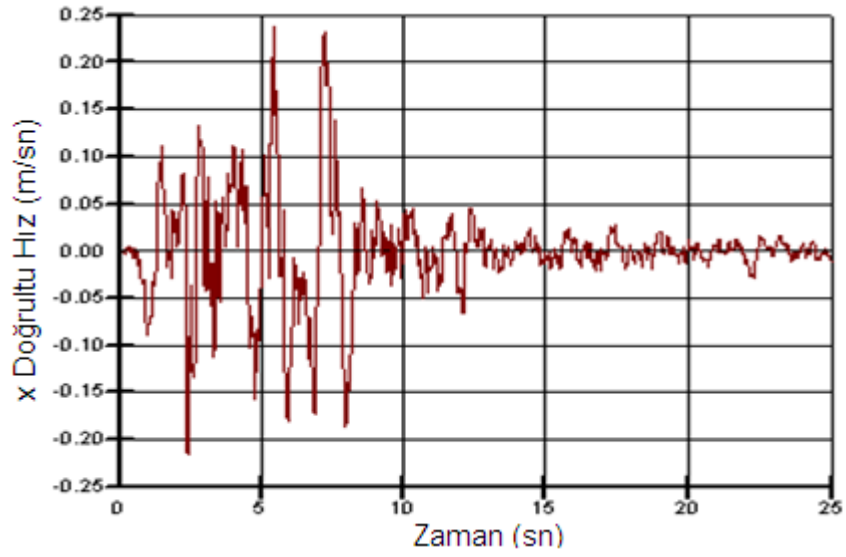
kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış. Belirlenen düğüm noktalarından birinde deprem süresince Şekil 7.35'te ivme-zaman ve şekil 7.36'da hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman,şekil 7.37 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



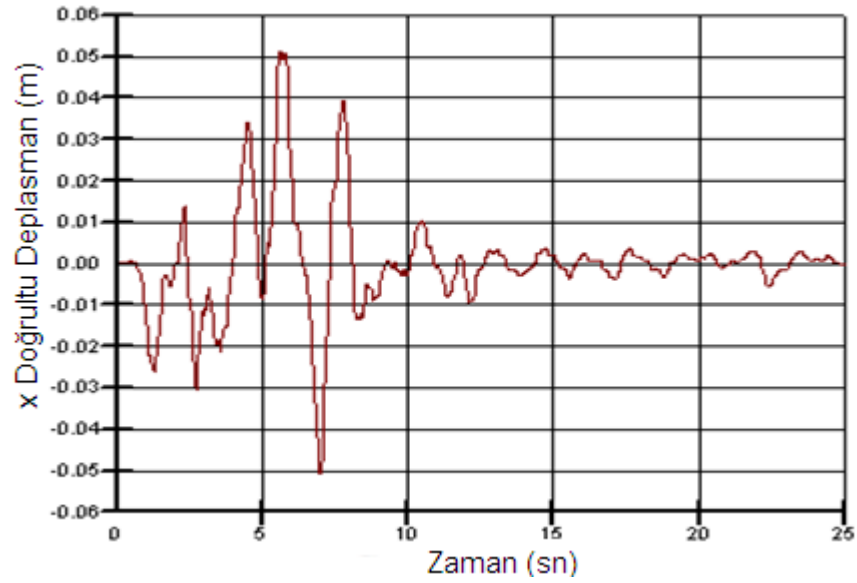
**Şekil 7.34 :** 15° eğimli %50 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.35 :** 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.36** : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği

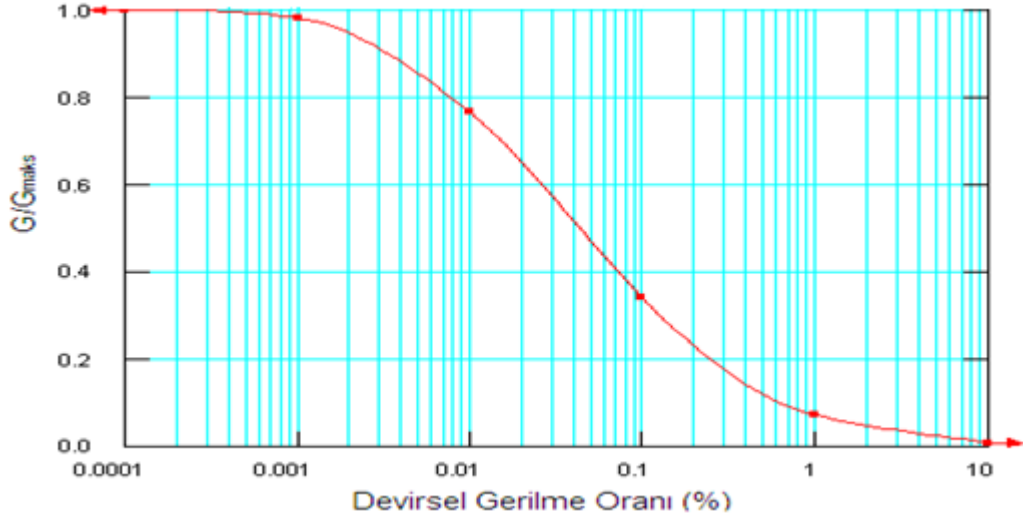


**Şekil 7.37** : 406 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman- zaman grafiği

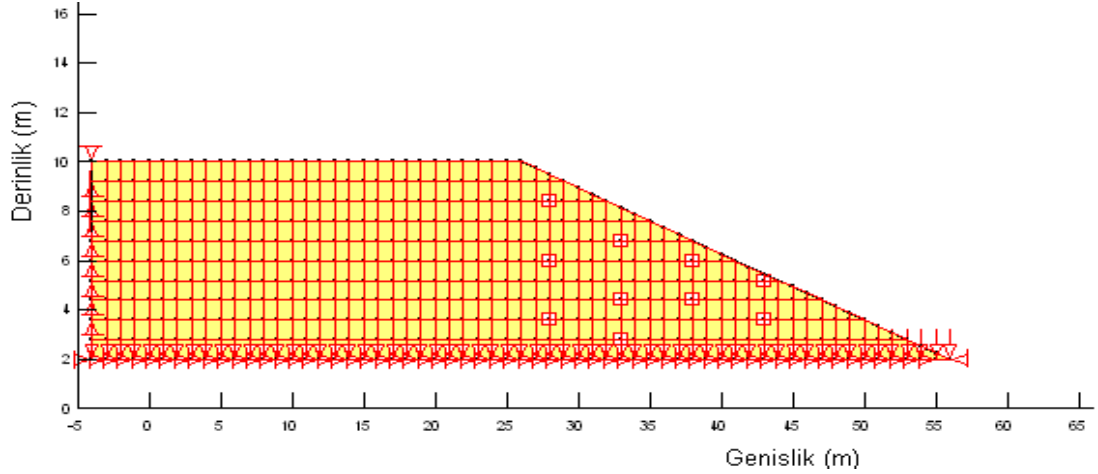
Analiz sonucunda %50 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $15^\circ$  eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.020 m olup elde edilen toplam deplasman değerlerinin Şekil 7.22'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine % 0.07'dir.

#### 7.3.4 Relatif sıkılığı ( $D_r$ : %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.38'de % 85 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış ve şekil 7.39'da görülebileceği üzere  $15^\circ$  eğimdeki şevde tek tabaka ve %85 relatif sıkılık değerine sahip kumlu zeminin etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli elde edilmiştir.



**Şekil 7.38** :  $15^\circ$  eğimli %85 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı

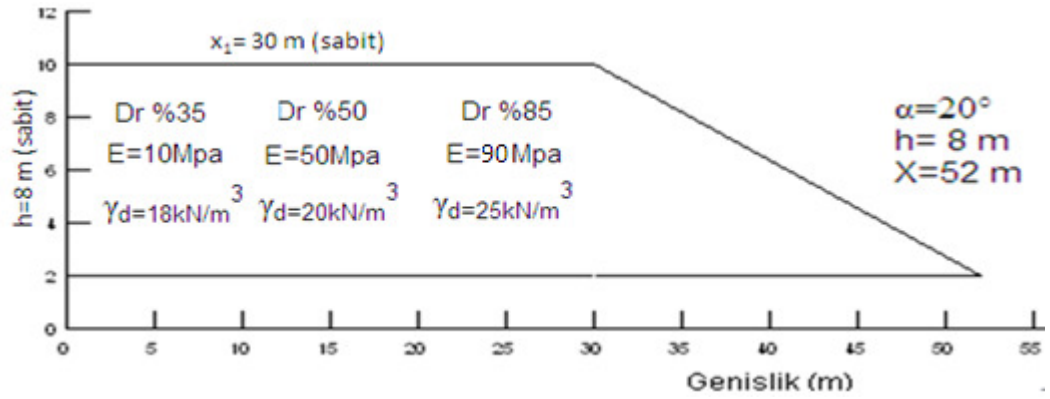


**Şekil 7.39** : Relatif sıkılık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli

Analiz sonucunda %85 sıkılık değerinde malzeme özelliğine sahip  $15^\circ$  eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.011 m olup şekil 7.22'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.04' tür.

#### 7.4 Eğimi 20° olan Şevde Sıvılaşma Analizi

Bölüm 6'da modelleme için belirtilen kriterler, eğimi 20° olan şevler için uyarlanmış olup şekil 7.40' da tek tabaka kumlu şeve değişen relatif sıkılık değerine karşılık gelen malzeme özellikleri verilmiş ve analizlerde bu değişkenler kullanılmıştır. Bununla birlikte 17 Ağustos 1999 deprem verileri ve uygun sınır koşulları programa entegre edilmiş olup bu bölümde elde edilen sonuçlar anlatılacaktır.

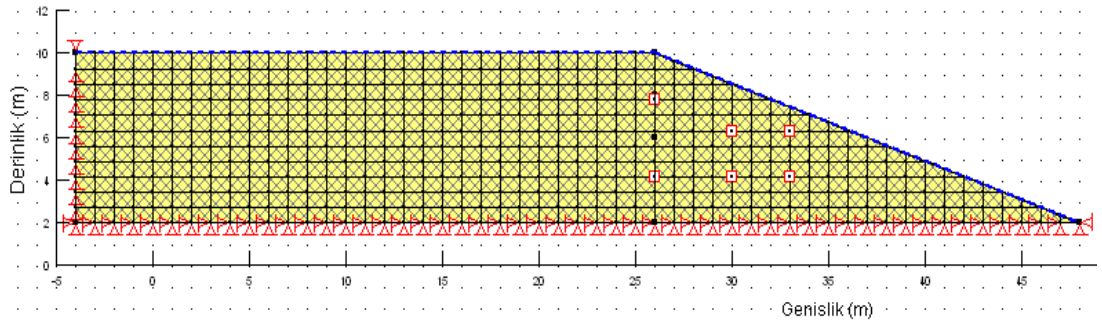


Şekil 7.40 : 20° eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri

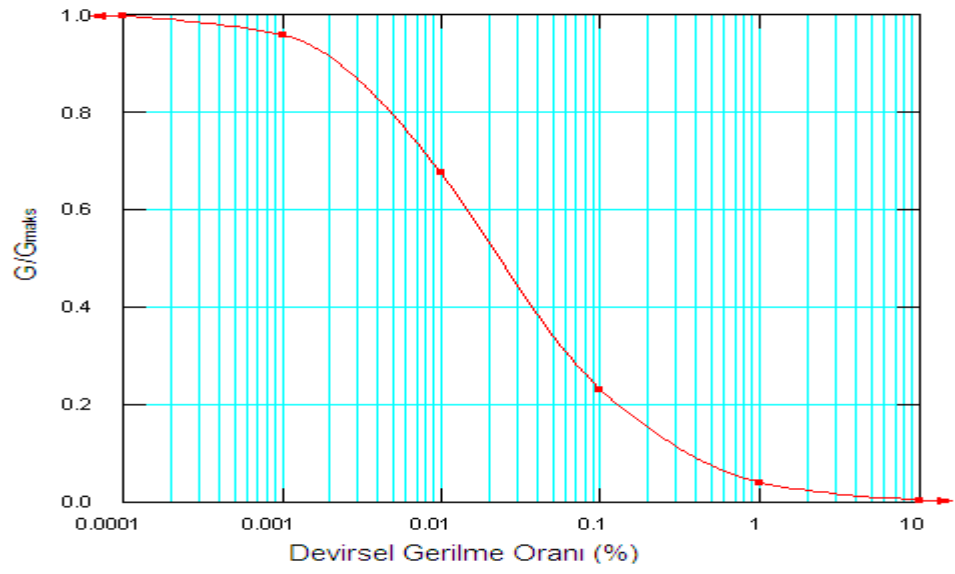
##### 7.4.1 Relatif sıkılığı (Dr: %35'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.41'de şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.42'de %35 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış.

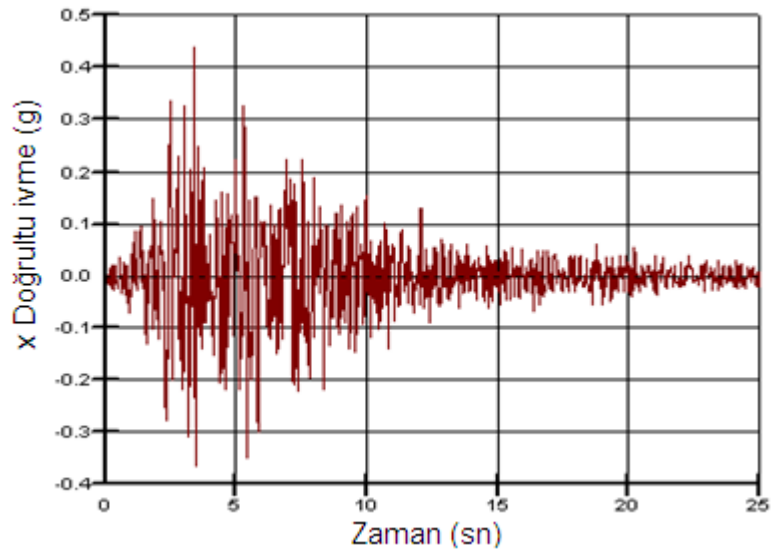
Belirlenen düğüm noktalarından birinde (439 sayılı düğüm noktası x:33 m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.43'te ivme-zaman ve şekil 7.44'te hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman,şekil 7.45 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



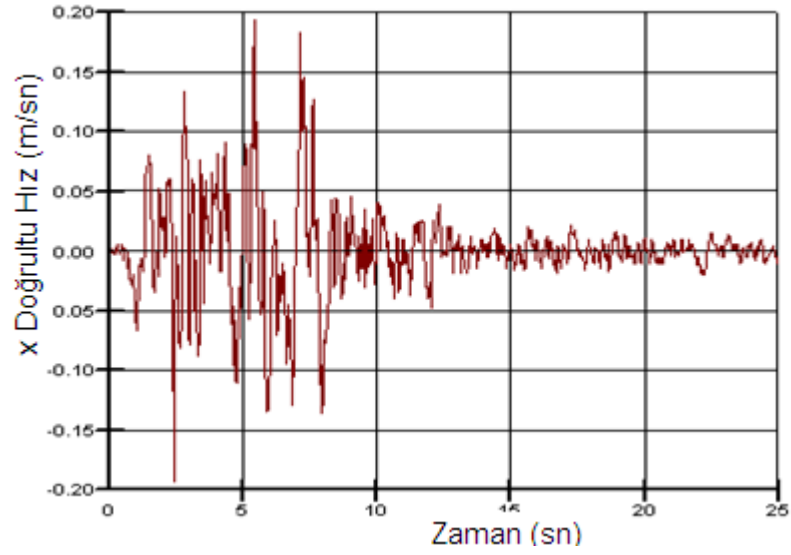
Şekil 7.41 : 20° eğimde yass:0 m olan şev



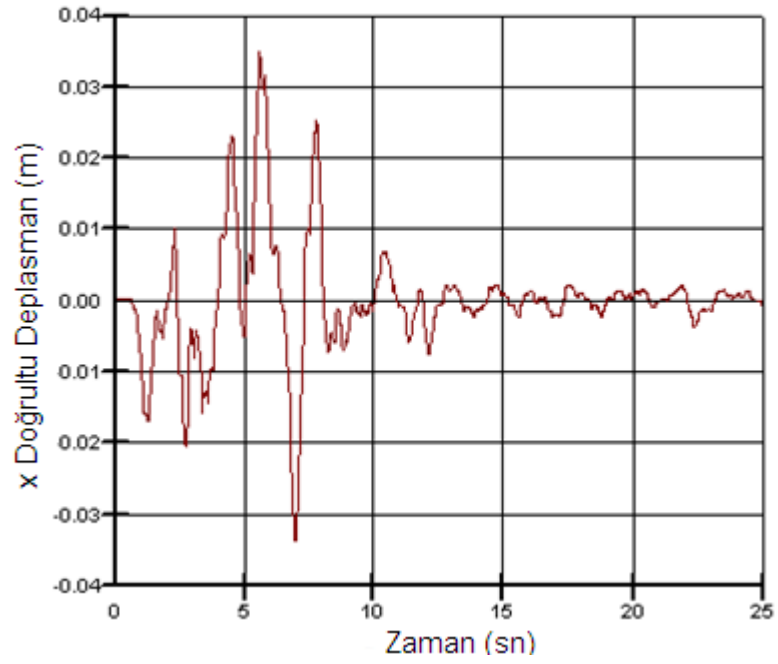
**Şekil 7.42 :** 20° eğimli %35 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.43 :** 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.44** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği



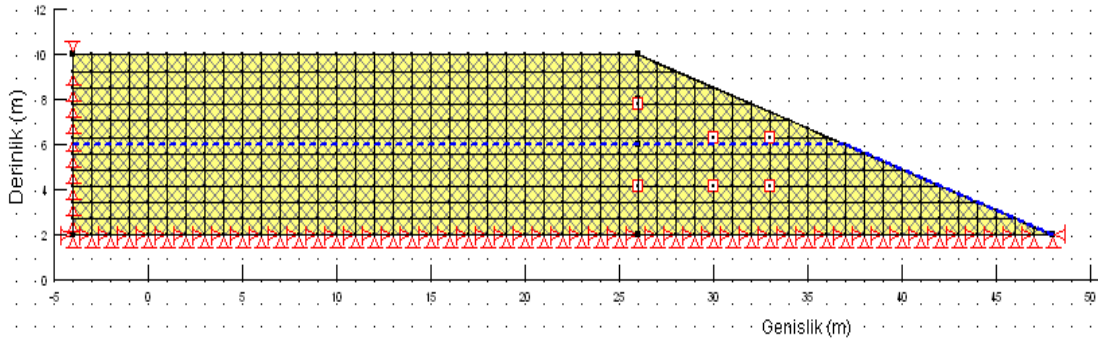
**Şekil 7.45** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman- zaman grafiği

Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $20^\circ$  eğimde yer altı su seviyesi 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.14 m olup şekil 7.40'dan da görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.64'tür.

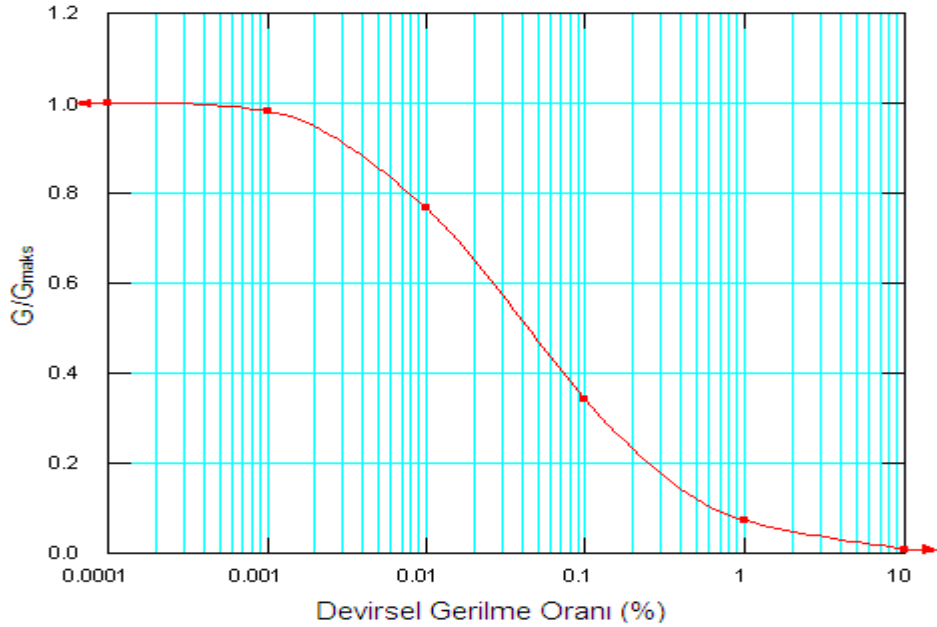
#### 7.4.2 Relatif sıkılığı ( $D_r$ : %35'lik) ve YASS: $\frac{1}{2}$ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.46'da şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuştur ve bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.47'de %35 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmıştır.

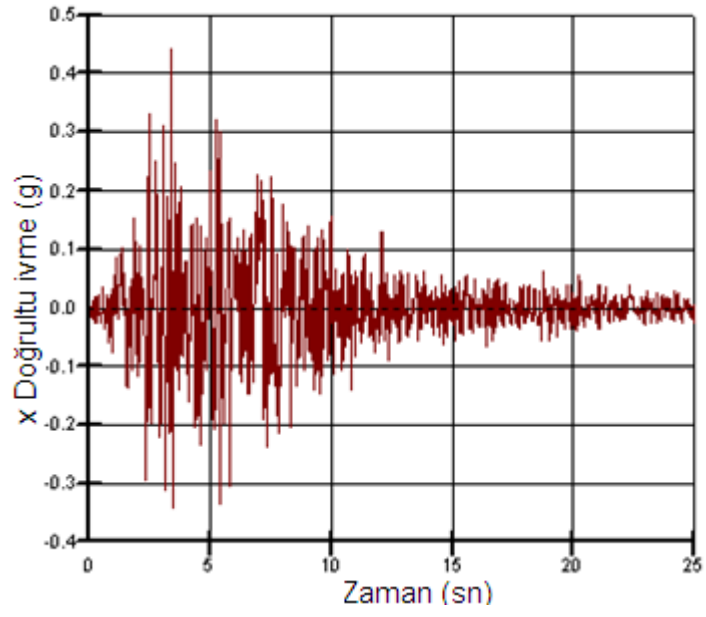
Tayin edilen düğüm noktalarından birinde (439 sayılı düğüm noktası x:33 m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.48'de ivme-zaman ve şekil 7.49'da hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman, şekil 7.49 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



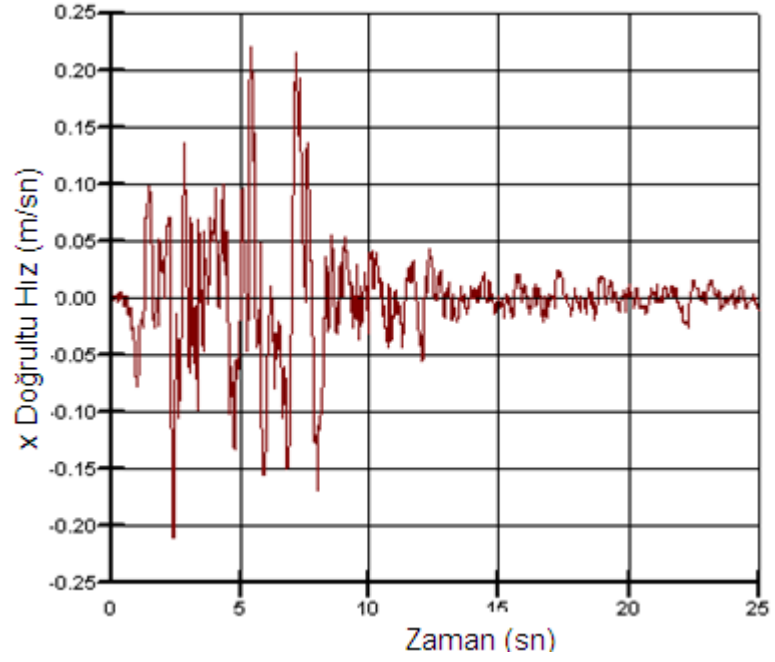
Şekil 7.46 : 20° eğimde yass:  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olan şev



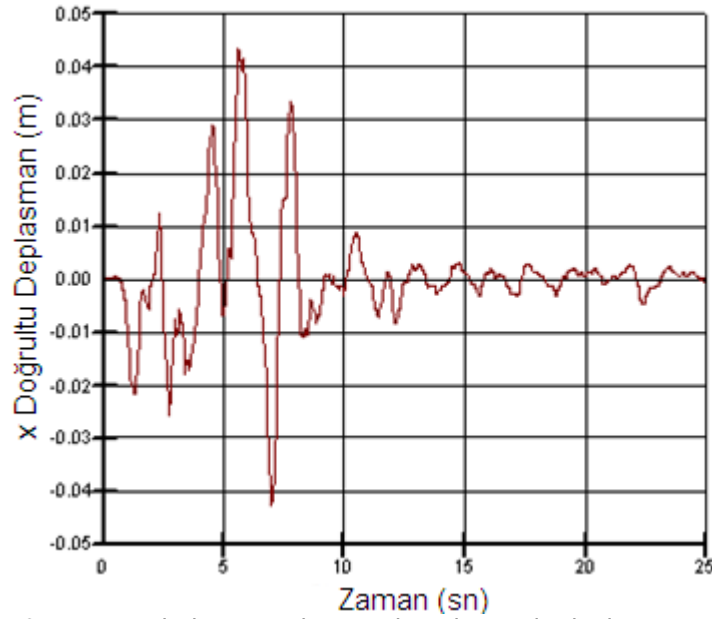
Şekil 7.47 : 20° eğimli %35 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.48 :** 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.49 :** 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği



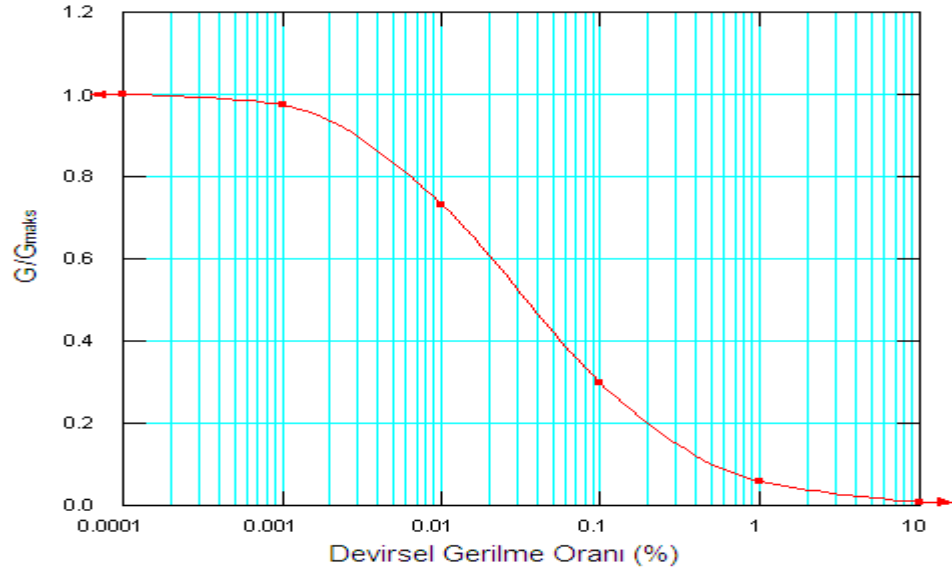
**Şekil 7.50 :** 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda deplasman- zaman grafiği

Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $20^\circ$  eğimde yass:  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olan şevin toplam deplasman değeri 0.13 m olup şekil 7.40'dan da görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.59'dur.

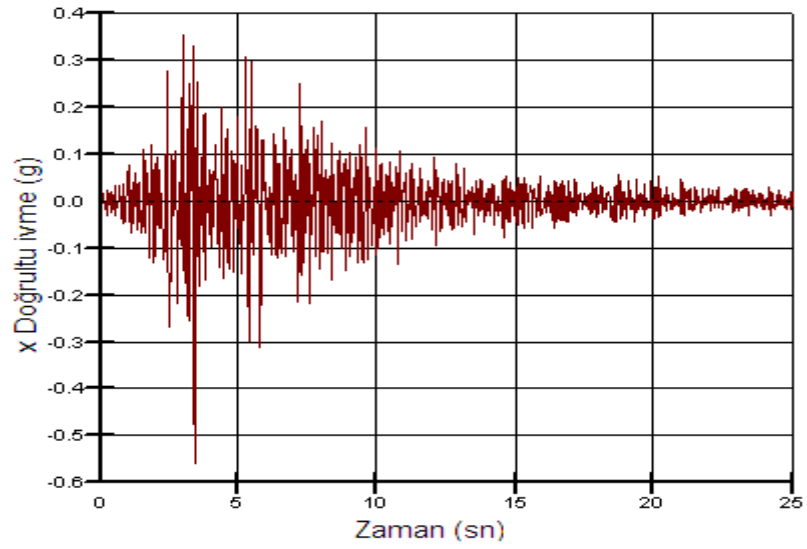
#### **7.4.3 Relatif sıklığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi**

Şekil 7.41'de şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuş. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.51'de %50 zemin sıklık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmıştır.

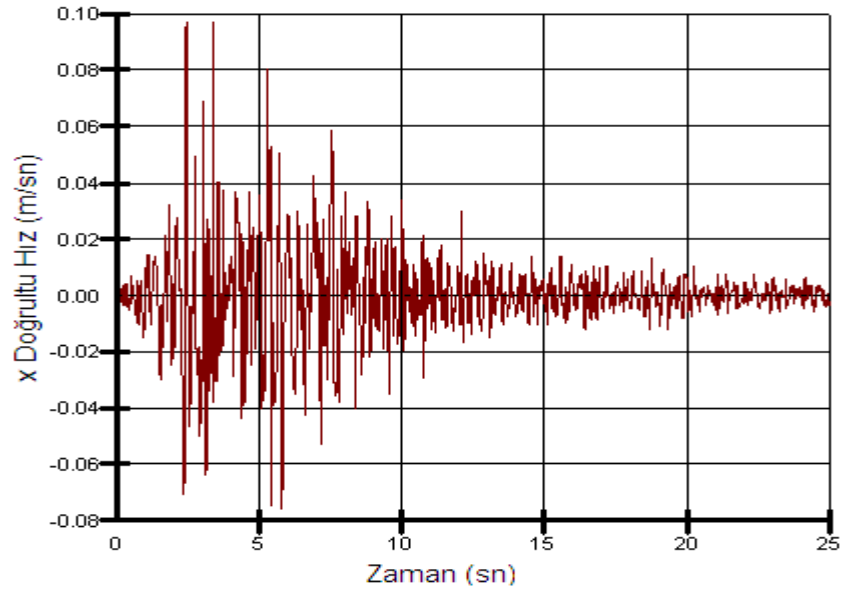
Belirlenen düğüm noktalarından birinde (439 sayılı düğüm noktası x:33 m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.52'de ivme-zaman ve şekil 7.53'te hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman, şekil 7.54 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



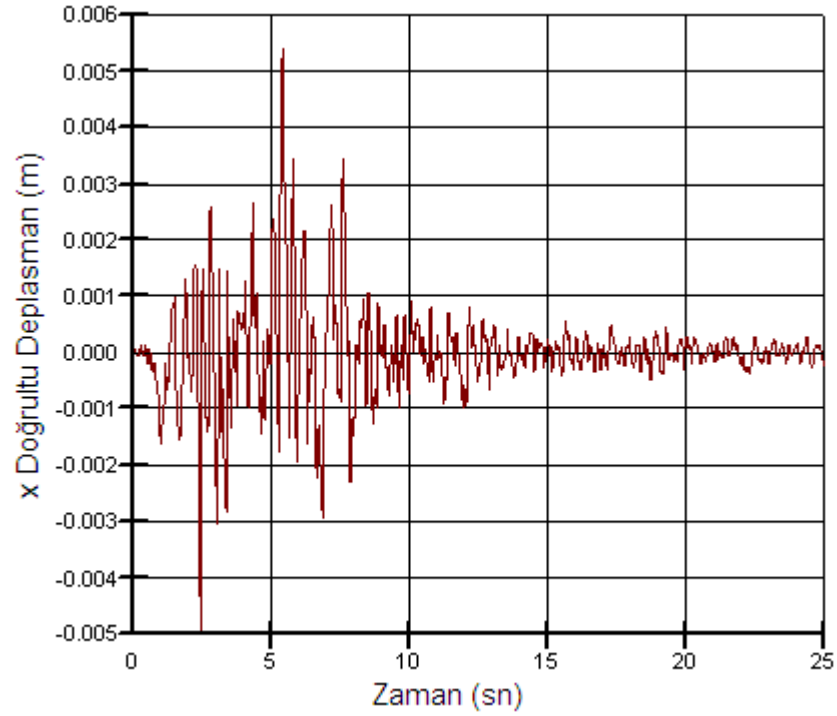
**Şekil 7.51** : 20° eğimli %50 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.52** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.53** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusunda hız- zaman grafiği

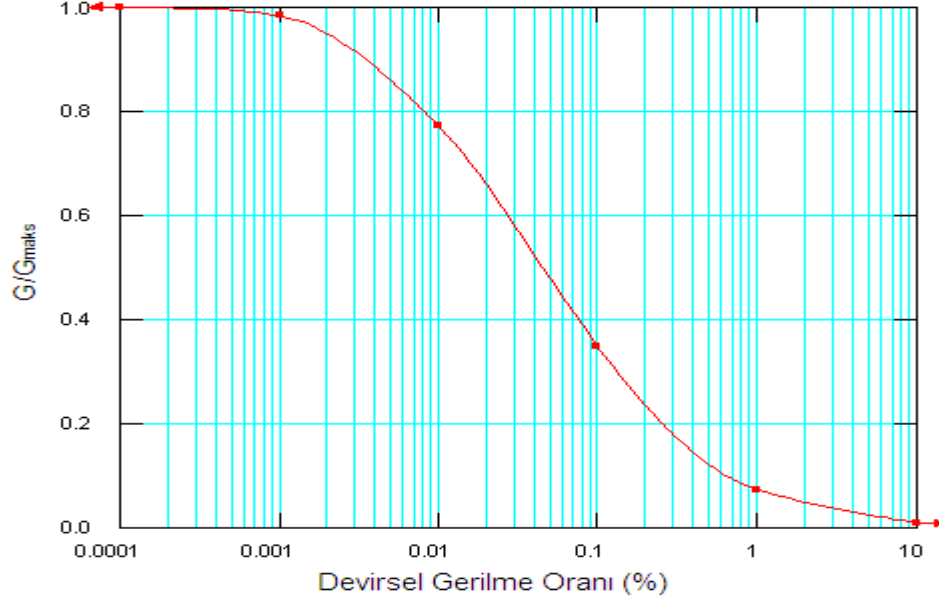


**Şekil 7.54** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği

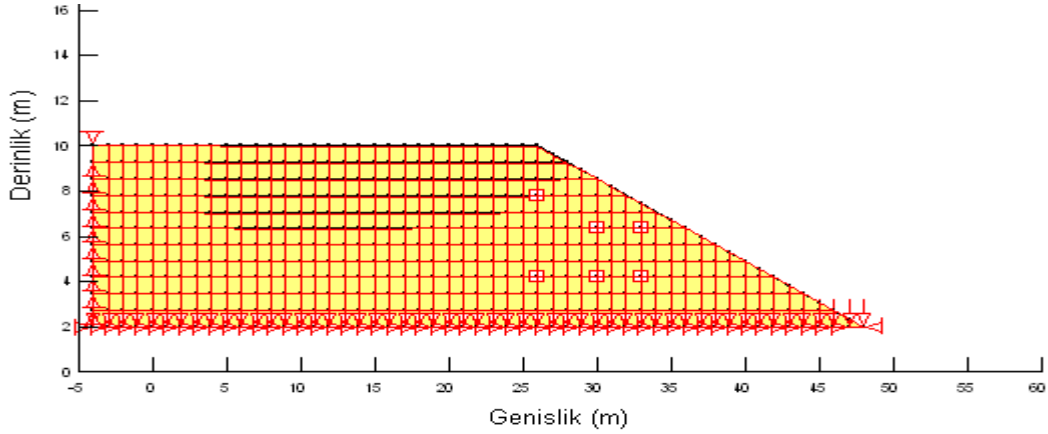
Analiz sonucunda %50 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $20^\circ$  eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.020 m olup şekil 7.40'dan da görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.1'dir.

#### 7.4.4 Relatif sıkılığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.55'te % 85 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış ve şekil 7.56'da görülebileceği üzere 20° eğimdeki şevde tek tabaka ve %85 relatif sıkılık değerine sahip kumlu zemininin etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli elde edilmiştir.



**Şekil 7.55 :** 20° eğimli %85 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre G/Gmaks'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



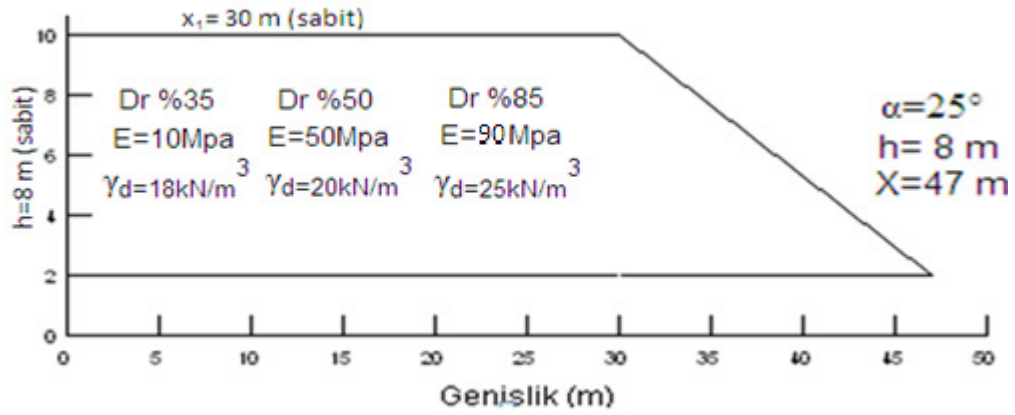
**Şekil 7.56 :** Relatif sıkılık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli

Analiz sonucunda %85 sıkılık değerinde malzeme özelliğine sahip 20° eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.011 m olup şekil 7.40'dan da görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler

haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.05' tir.

### 7.5 Eğimi 25° olan Şevde Sıvılaşma Analizi

Bölüm 6'da modelleme için belirtilen kriterler, eğimi 25° olan şevler için uyarlanmış olup şekil 7.57' de tek tabaka kumlu şeve değişen relatif sıkılık değerine karşılık gelen malzeme özellikleri verilmiş ve analizlerde bu değişkenler kullanılmıştır. Bununla birlikte 17 Ağustos 1999 deprem verileri ve uygun sınır koşulları programa entegre edilmiş olup bu bölümde elde edilen sonuçlar anlatılacaktır.

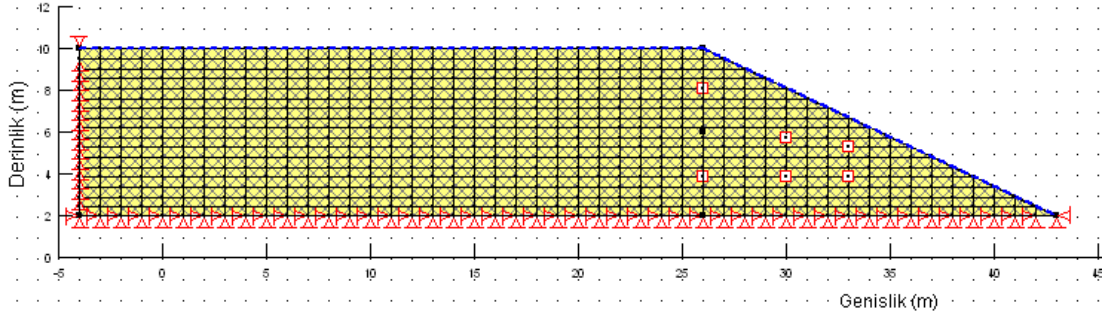


Şekil 7.57 : 25° eğimli tek tabaka kumlu şev geometrisi ve malzeme özellikleri

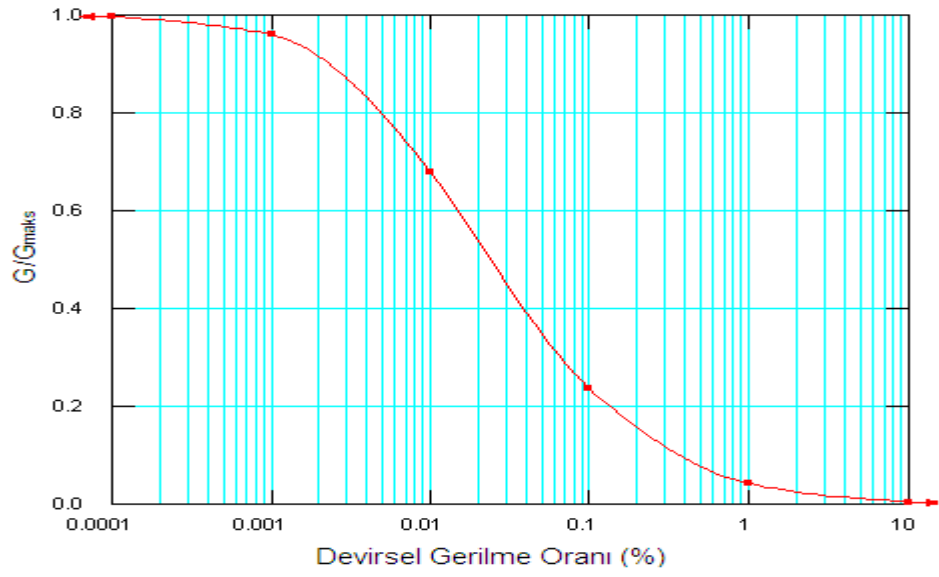
#### 7.5.1 Relatif sıkılığı (Dr: %35'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.58'de şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuş. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.59'de %35 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmıştır.

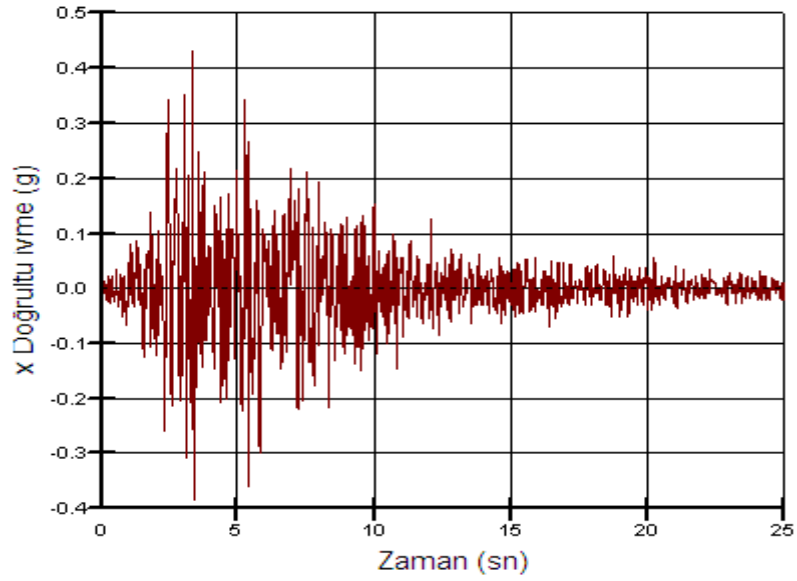
Belirlenen düğüm noktalarından birinde (650 sayılı düğüm noktası x:33 m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.60' da ivme-zaman ve şekil 7.61'de hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman, şekil 7.62 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



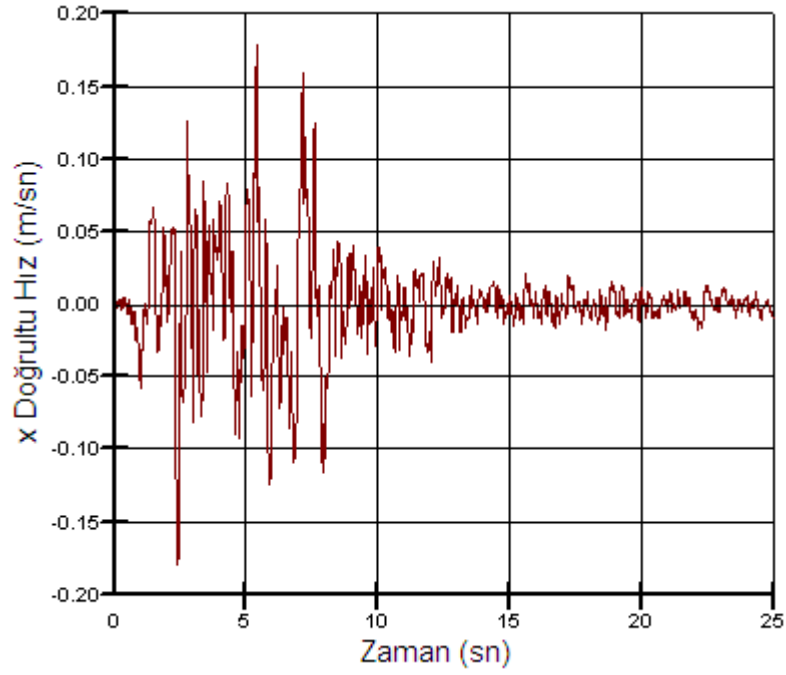
**Şekil 7.58** : 25° eğimde yass:0 m olan şev



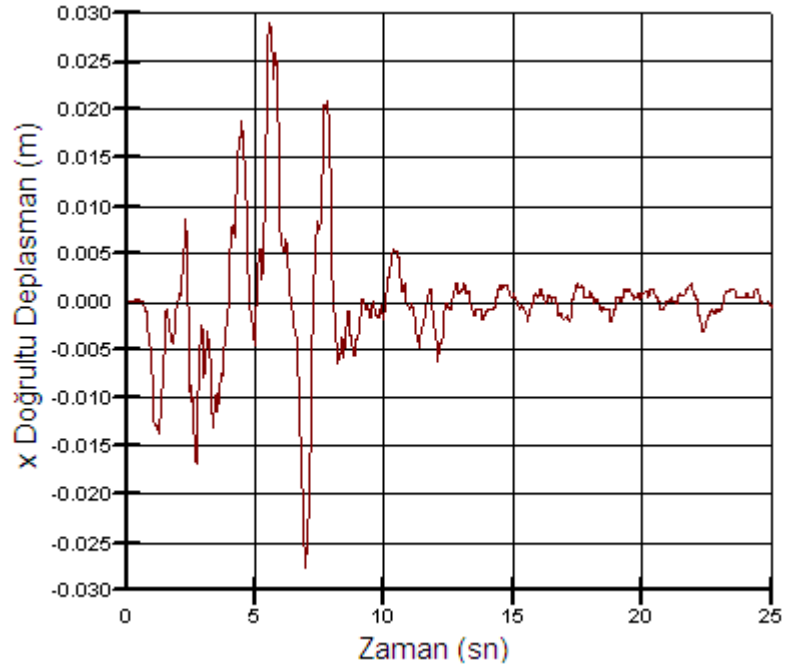
**Şekil 7.59** : 25° eğimli %35 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.60** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.61** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu hız- zaman grafiği



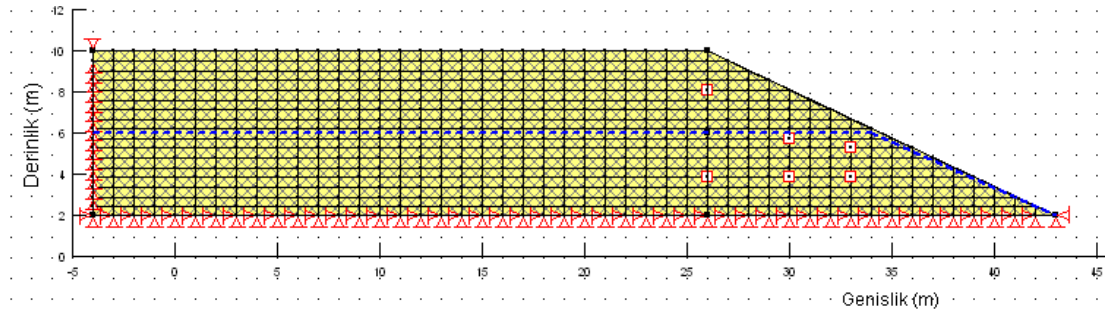
**Şekil 7.62** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği

Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $25^\circ$  eğimde yer altı su seviyesi 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.136 m olup şekil 7.57'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.8'dir.

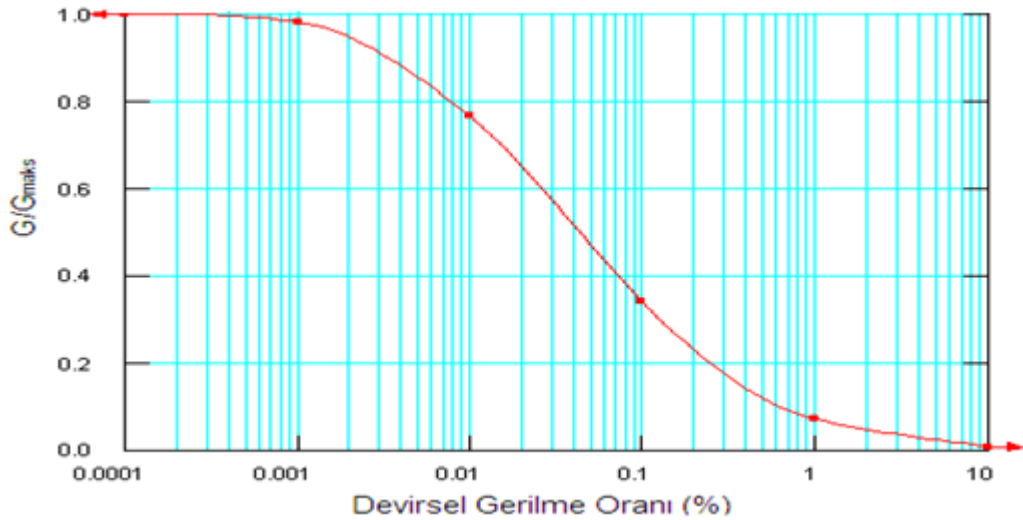
### 7.5.2 Relatif sıkılığı (Dr: %35'lik) ve YASS: ½ profil yüksekliğinde olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.63'te şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuş. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.64'te %35 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin ½ profil yüksekliğinde olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmıştır.

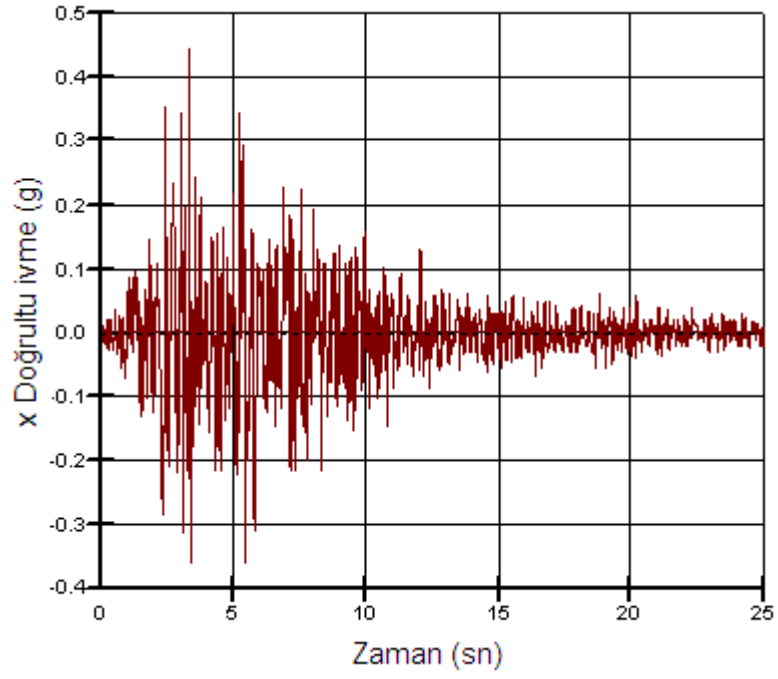
Bu düğüm noktalarından birinde (439 sayılı düğüm noktası x:33 m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.65'te ivme-zaman ve şekil 7.66'da hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman, şekil 7.67 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



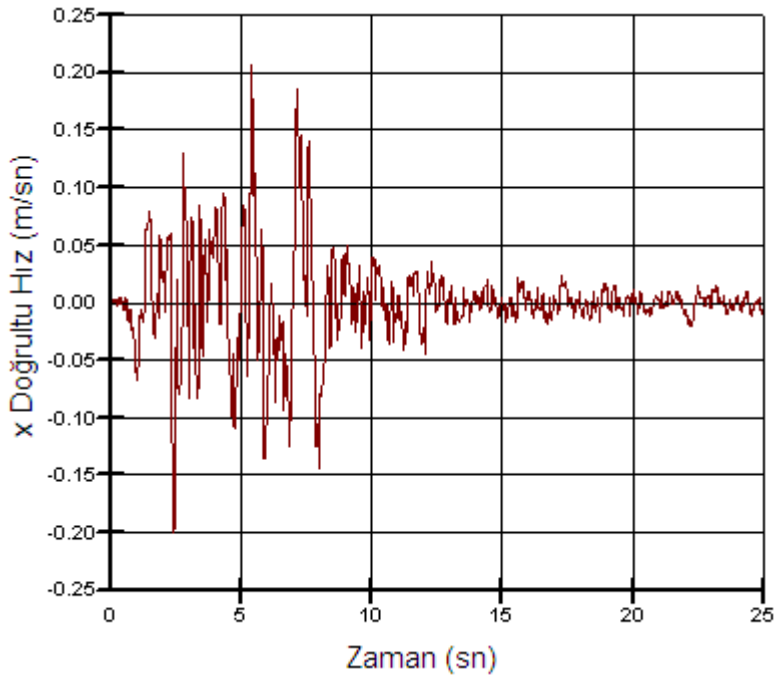
Şekil 7.63 : 25° eğimde yass: ½ profil yüksekliğinde olan şev



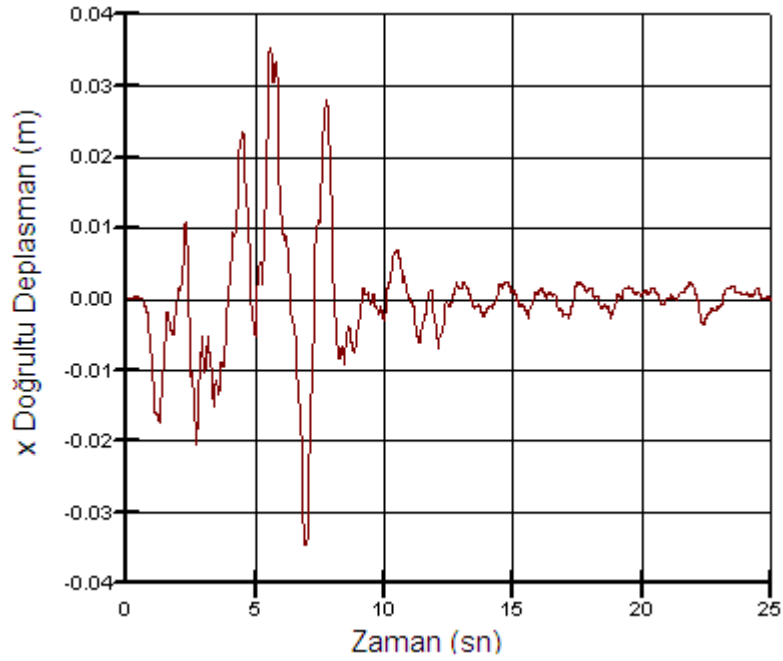
Şekil 7.64 : 25° eğimli %35 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin ½ profil yüksekliğinde olduğu duruma göre G/Gmaks'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.65** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.66** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu hız- zaman grafiği



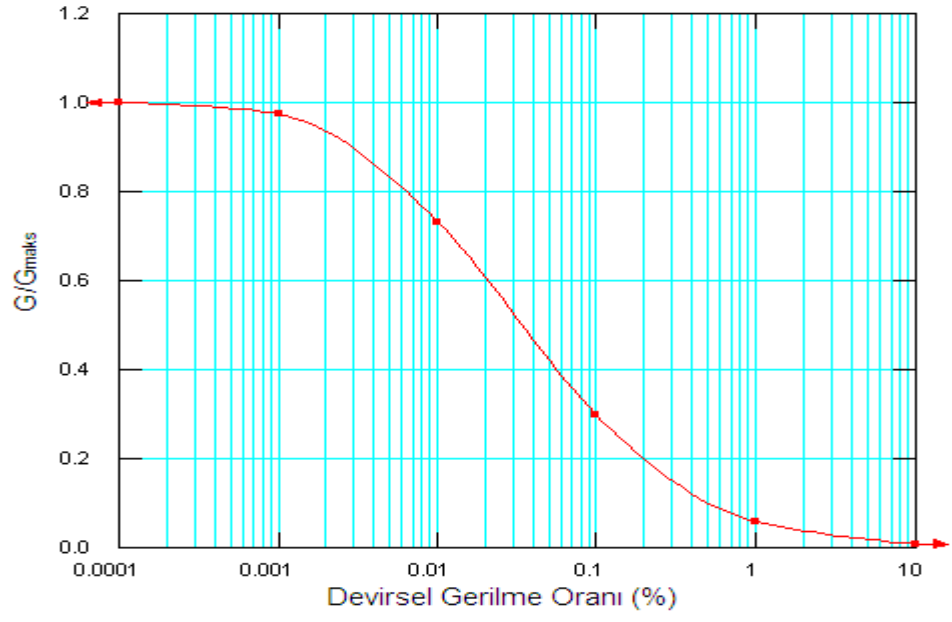
**Şekil 7.67 :** 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği

Analiz sonucunda %35 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip  $25^\circ$  eğimde yass:  $\frac{1}{2}$  profil yüksekliğinde olan şevin toplam deplasman değeri 0.127 m olup şekil 7.57'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.75'tir. Yer altı su seviyesi yüzeyde olduğu durumdakinden daha az bir deformasyon elde edilmiştir.

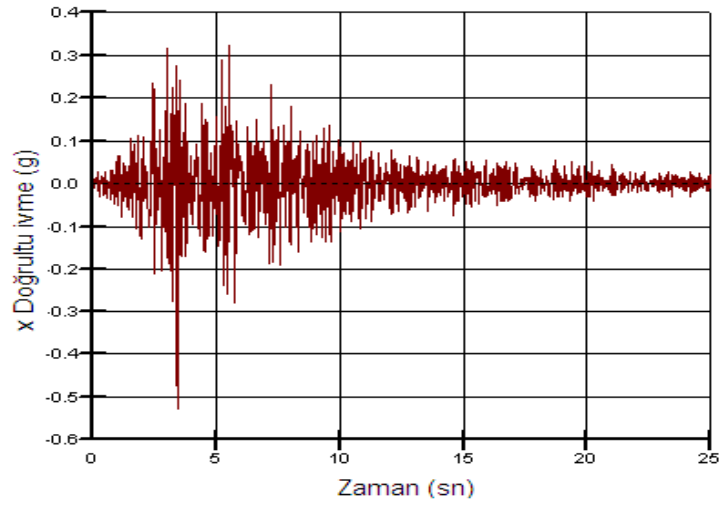
### 7.5.3 Relatif sıklığı (Dr: %50'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.58'de şev geometrisinde görüldüğü gibi, şev geometrisi oluşturulmuş. Oluşturulan bu modele düğüm noktaları atanmıştır. Ayrıca şekil 7.68'de %50 zemin sıklık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmıştır.

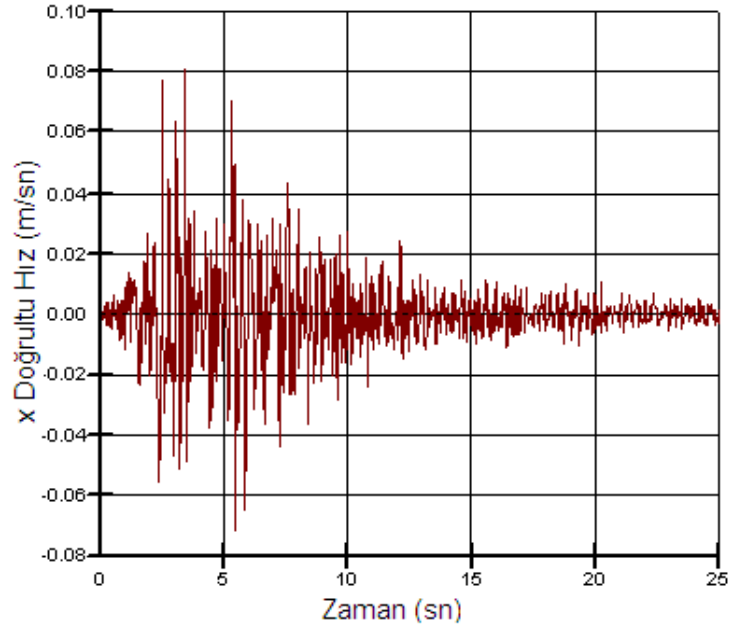
Belirlenen düğüm noktalarından birinde (439 sayılı düğüm noktası x:33 m, y:4 m) deprem süresince Şekil 7.69'da ivme-zaman ve şekil 7.70'te hız-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şeve ait deprem sırasında meydana gelen deplasman, şekil 7.71 deplasman-zaman grafiği ile gösterilmiştir.



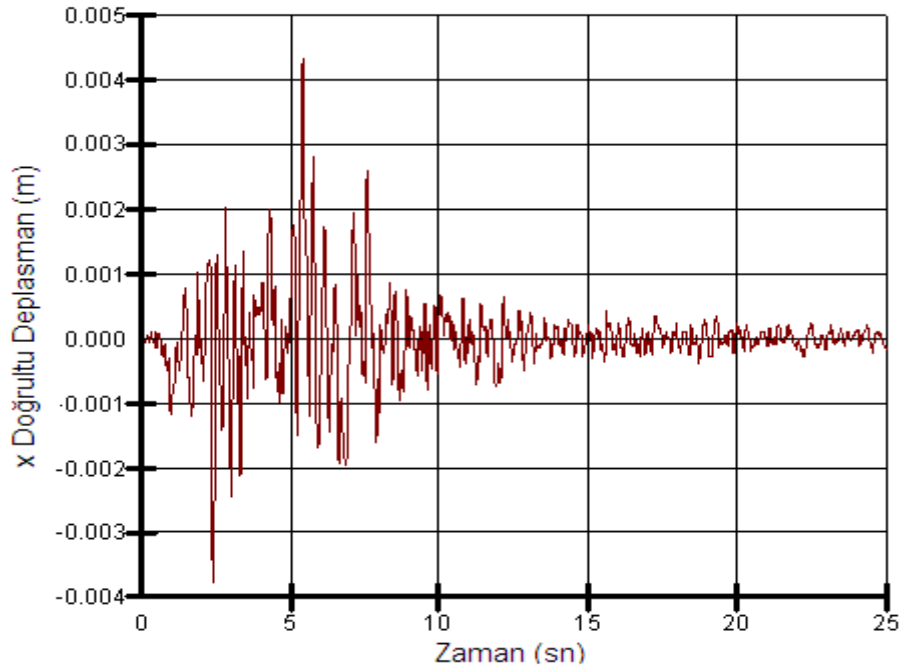
**Şekil 7.68 :** 25° eğimli %50 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre  $G/G_{maks}$ 'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.69 :** 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu ivme- zaman grafiği



**Şekil 7.70** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu hız- zaman grafiği

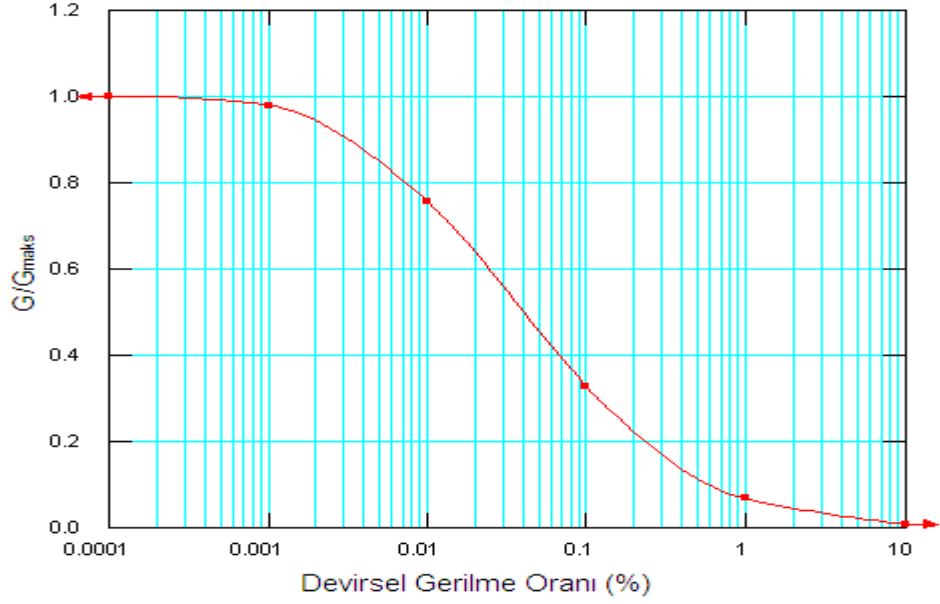


**Şekil 7.71** : 439 sayılı düğüm noktası x doğrultusu deplasman- zaman grafiği

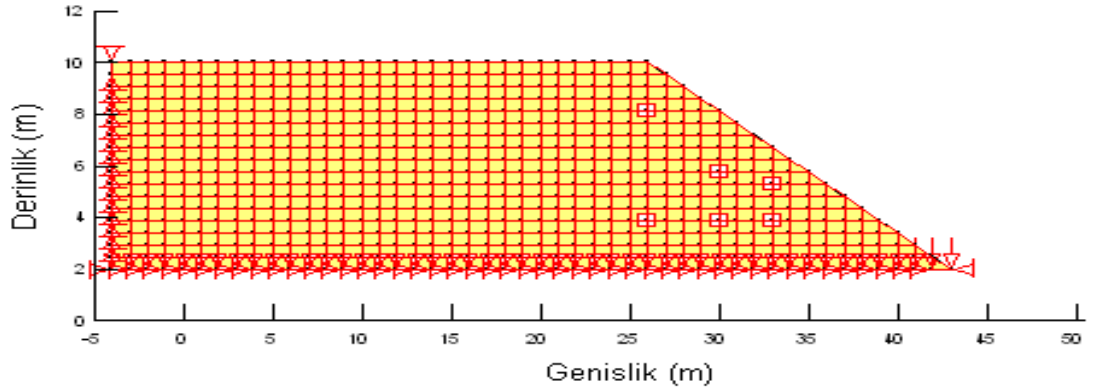
Analiz sonucunda %50 sıklık değerinde malzeme özelliğine sahip 25° eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.019 m olup şekil 7.57'den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı toplam deplasman değerinin profil genişliğine oranı % 0.11'dir.

#### 7.5.4 Relatif sıkılığı (Dr: %85'lik) ve YASS: 0 m' de olan zeminde sıvılaşma analizi

Şekil 7.72'de % 85 zemin sıkılık değerlerinde ve yer altı su seviyesinin zemin üst kotunda olduğu duruma göre kayma modülü grafiği elde edilerek analizlere yansıtılmış ve şekil 7.73' te görülebileceği üzere 25° eğimdeki şevde tek tabaka ve %85 relatif sıkılık değerine sahip kumlu zemininin etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli elde edilmiştir.



**Şekil 7.72 :** 25° eğimli %85 relatif sıkılığa sahip şevde y.a.s.s zemin üst kotunda olduğu duruma göre G/Gmaks'a karşılık gelen Devirsel Gerilme Oranı



**Şekil 7.73 :** Relatif sıkılık değeri %85 olan şevde etkiyen deprem sonrası deformasyon şekli

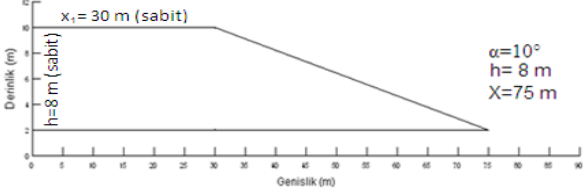
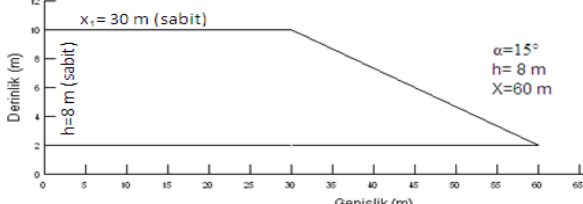
Analiz sonucunda %85 sıkılık değerinde malzeme özelliğine sahip 25° eğimde yass: 0 m olan şevin toplam deplasman değeri 0.011 m olup şekil 7.57' den de görülebileceği üzere şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı % 0.06' dır.

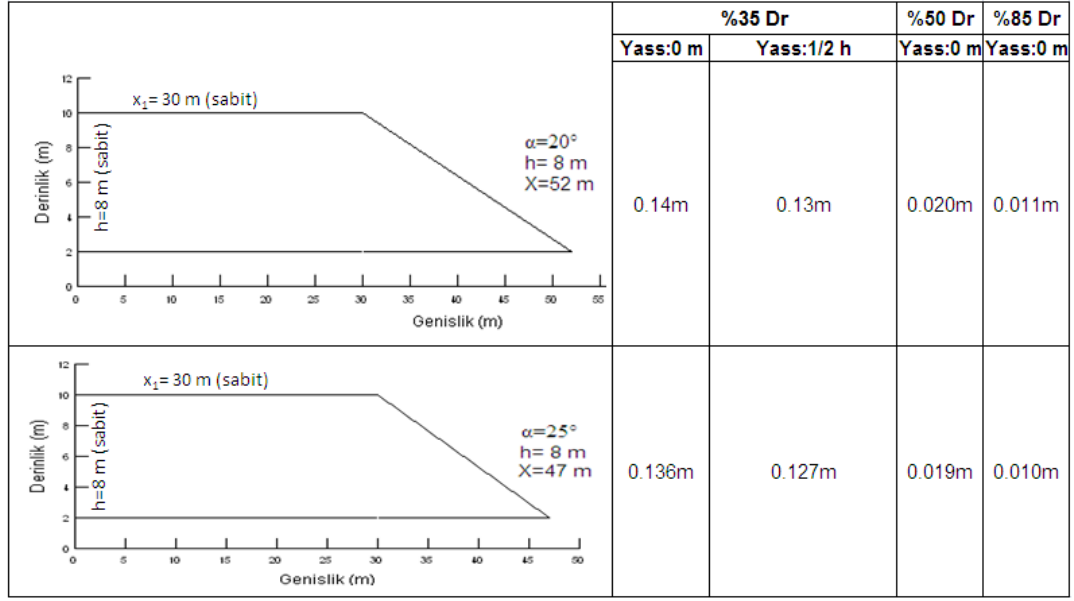
## 8. SONUÇLAR

Quake/W programı analizlerde sonlu elemanlar metodunu kullanmaktadır. Bu çalışma kapsamında quake/w programı ile yükseklikleri sabit tutulan, farklı şev açıları, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinde ve profilin yarı yüksekliğinde olmak üzere farklılık gösteren, ayrıca %35, %50 ve %85 relatif sıklıkta malzeme özelliklerine sahip olan şevlerin eşdeğer lineer model kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 8.1’de programda yapılan analizlerin sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 8.1 ‘den de görülebileceği üzere yapılan analizlerden deplasman sonuçları elde edilmiştir. Ancak sonuçların şev eğiminin artmasına karşılık deplasman değerlerinin giderek azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi Quake/w programı Newmark metodu ile hesap yapmaktadır. Şevi bir kütle olarak almakta ve hesaplarını bu şekilde yapmaktadır. Ayrıca artan şev eğimine karşılık, x sabit tutulduğu için şev eleman sayısındaki ve dolayısıyla kütledeki azalmadan dolayı bu sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen deplasman değerlerinin şev geometrisinde derinlik ve genişlikteki sabit değerler haricindeki değişen şev genişliğine oranı olarak çizelge 8.2’de de görüldüğü gibi % deplasman değerlerine ulaşılmıştır.

**Çizelge 8.1 : Program analiz sonuçları**

| ANALİZ SONUCU ELDE EDİLEN DEPLASMAN DEĞERLERİ                                       |          |            |          |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|----------|----------|
|                                                                                     | %35 Dr   |            | %50 Dr   | %85 Dr   |
|                                                                                     | Yass:0 m | Yass:1/2 h | Yass:0 m | Yass:0 m |
|  | 0.16m    | 0.14m      | 0.022m   | 0.012m   |
|  | 0.15m    | 0.13m      | 0.020m   | 0.011m   |

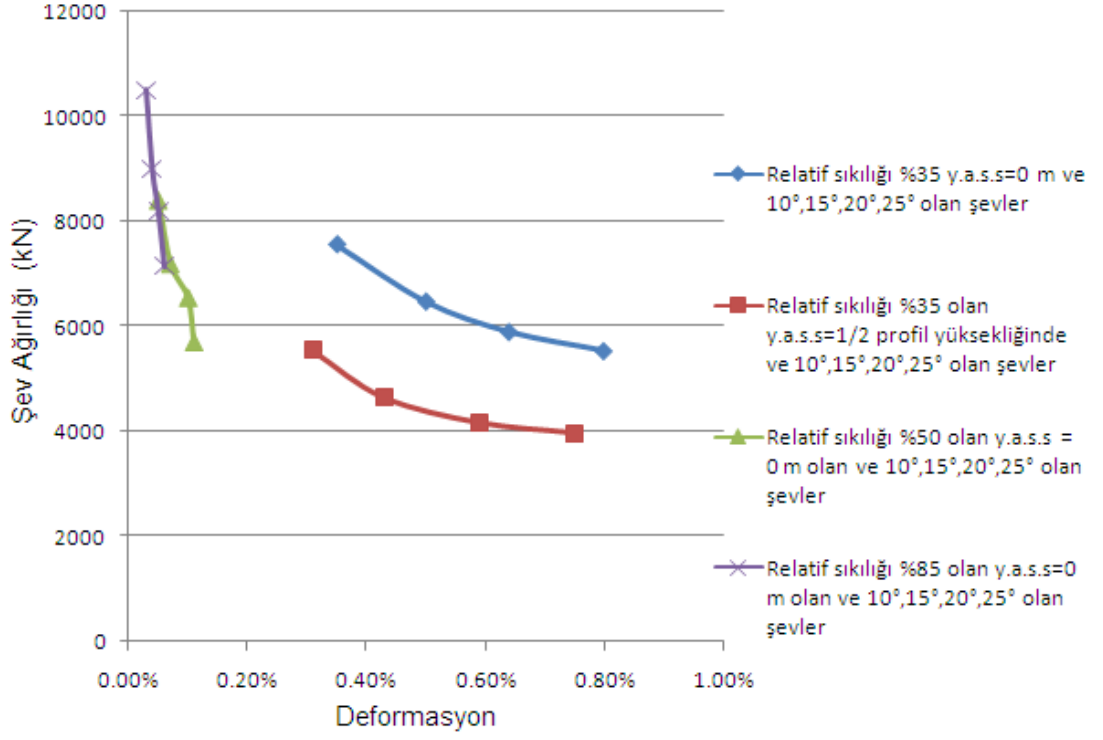


Analizlerden de görülebileceği gibi şevlerde deprem yükleri altında meydana gelen deplasmanın nedenleri şev ağırlığı, şev eğimi, yer altı su seviyesi durumu ve zemin sıkılığıdır. Bununla beraber analiz sonuçlarından zemin sıkılığının değişmesi yer altı su seviyesinin değişikliğinden daha fazla şev stabilitesini etkilediği görülmüştür. Şekil 8.1' ve şekil 8.2'de sırasıyla deformasyon yüzdesi, şev ağırlığı ve şev eğimi arasındaki bağıntı gösterilmektedir.

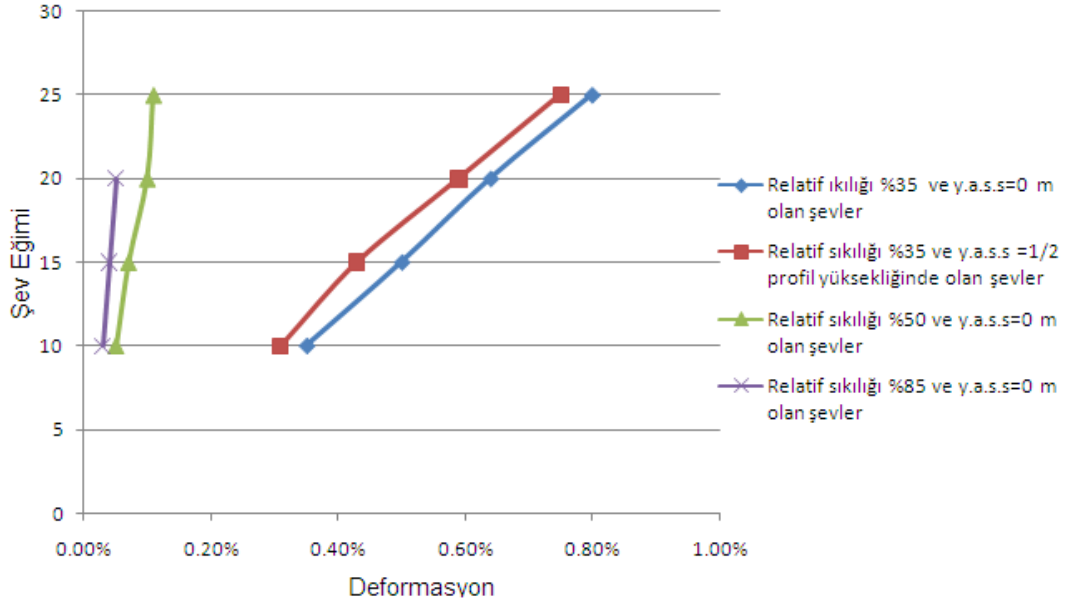
**Çizelge 8.2 : Program % deplasman analiz sonuçları**

|           | Dr %35      |                                   | Dr %50       |                              | Dr %85       |                              |
|-----------|-------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------------------|
|           | E= 10 Mpa   | $\gamma_d= 18\text{ kN/m}^3$      | E= 50 Mpa    | $\gamma_d= 20\text{ kN/m}^3$ | E= 90 Mpa    | $\gamma_d= 25\text{ kN/m}^3$ |
| Şev Eğimi | Y.A.S.S 0 m | Y.A.S.S= 1/2 Profil Yüksekliğinde | Y.A.S.S= 0 m |                              | Y.A.S.S= 0 m |                              |
| 10°       | 0.35%       | 0.31%                             | 0.05%        |                              | 0.03%        |                              |
| 15°       | 0.50%       | 0.43%                             | 0.07%        |                              | 0.04%        |                              |
| 20°       | 0.64%       | 0.59%                             | 0.10%        |                              | 0.05%        |                              |
| 25°       | 0.80%       | 0.75%                             | 0.11%        |                              | 0.06%        |                              |
| 30°       | 0.97%       | 0.91%                             | 0.15%        |                              | 0.07%        |                              |

Şev eğimi arttıkça relatif sıkılık artsa bile deformasyonlar artmaktadır. Yass ½ profil yüksekliğinde deformasyonlar yass 0 m iken daha az olduğu görülmüştür. Buradan su etkisinin deformasyon üzerine etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir.



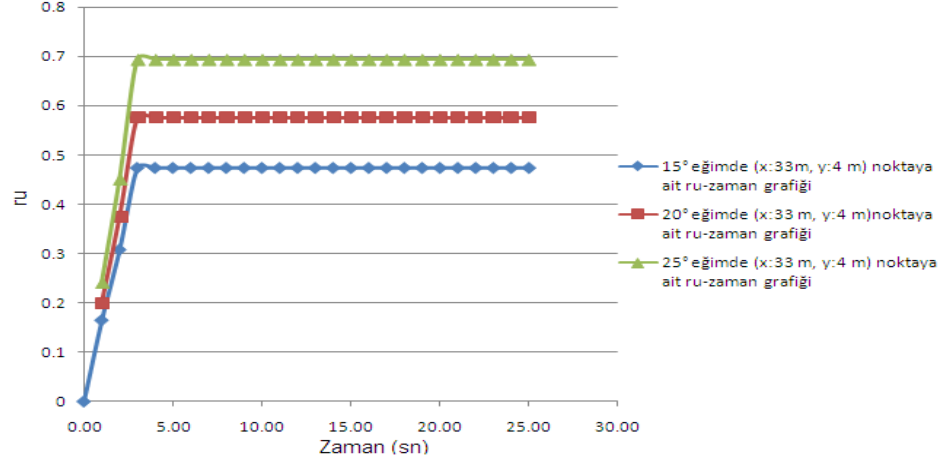
**Şekil 8.1 :** Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan şev ağırlığı, % deplasman ilişkisi



**Şekil 8.2 :** Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan şev eğimi, % deplasman ilişkisi

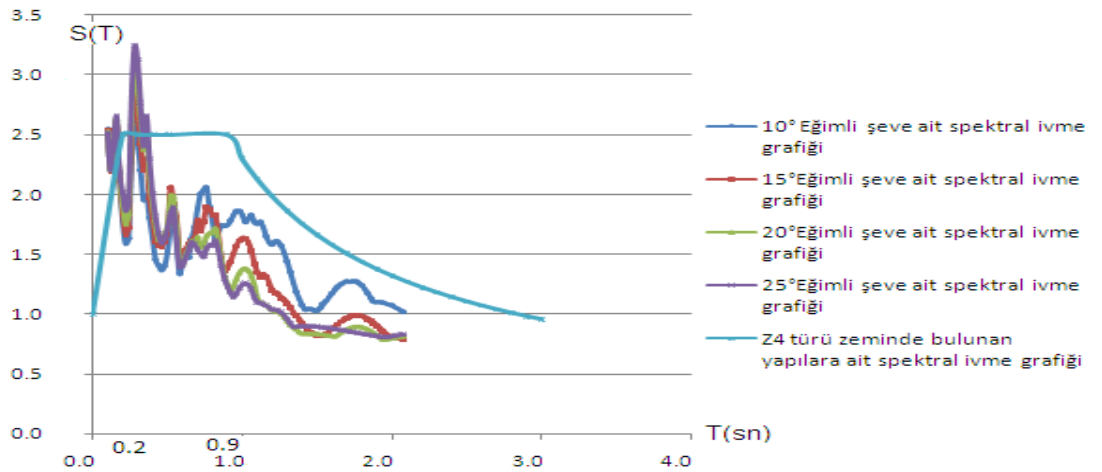
Şekillerden de görüldüğü gibi şev ağırlığı azaldıkça deformasyon değerleri artmakta olup şev eğimi arttıkça daha büyük deplasmanlar oluşmaktadır. %50 ve özellikle %85 sıklıklarda olan granüler zeminlerde şev ağırlığı ve şev eğimi değişse bile meydana gelen deformasyon değerleri stabiliteyi bozacak mertebelere ulaşmamaktadır.

Şekil 8.3'te yapılan analizler sonucu belirlenen yüzeysel bir noktadaki 10°,15°,20° ve 25° eğimli  $D_r$  %35 ve yass zemin üst kotu durumunda olan şevlerde, etkiyen deprem sonrası deplasman zaman grafiği görülmektedir.



**Şekil 8.3 :** Yapılan analizler sonucu belirlenen yüzeysel bir noktadaki 10°,15°,20° ve 25° eğimli  $D_r$  %35 ve yass zemin üst kotu durumunda olan şevlerde, etkiyen deprem sonrası boşluk suyu zaman grafiği

Yapılan analizler şev eğiminin artışı, etkiyen depremle birlikte stabiliteyi olumsuz etkilediği gibi sıvılaşma riskini de artırdığı şekil 8.3'ten de görülebilmektedir. Ayrıca şev analizleri sonucunda zemin spektral ivme değerleri elde edilmiş bu veriler Kocaeli 1999 deprem ivmesi ile normalize edilmiş ve şekil 8.3'te 2007 deprem yönetmeliğinde de belirtilen Z4 türü zeminlerde yapılan yapılara ait spektral ivme grafiği ile karşılaştırılarak verilmiştir.



**Şekil 8.4 :** Analizler sonucu  $D_r$  %35 zemin sıkılığındaki şevlere ait spektral ivme değerleri ve Z4 türü zeminlerde bulunan yapılara ait %5 sönüm değerinde spektral ivme grafiği

Şekil 8.4 'te de görülebileceği üzere  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  ve  $25^{\circ}$  eğimli şevlerde relatif sıkılığı ( $D_r$  %35), 2007 yılında çıkan Türk deprem yönetmeliğinde belirtilen Z4 türü zemin özelliğinde periyodun 0.3-0.5 sn arasında Z4 türü zeminlerde bulunan yapılara ait spektrum limit ivme değerinin aşıldığı, şev eğiminin artışı ile ivme davranışlarının zeminin Z4 spektral ivme grafiği eğrilik yayına paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abramson, L. W.** 1996. Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons, Inc., New.
- Andersen, K.H.**, 1976. Behavior Of Clay Subjected to Undrained Cyclic Loading, NGI Publication, No.114, 33-44.
- Annaki, M., Lee K.** 1977. "Equivalent Uniform Cycle Concept For Soil Dynamics", ASCE, Jour.of Geotech. Engng.Div., Vol.103,No.GT6,pp.549-564.
- Ansal, A.M.**, 1981, Zeminlerin Dinamik Kayma Gerilmeleri Altında Davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü Maçka Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 143
- Ansal, A.M., Erken, A.** 1982. Rate Dependent Behavior Of a Normally Consolidated Clay, Proc.of 7<sup>th</sup> European Conf.on Earthquake Engineering.,Athens,Vol.2, 239-336.
- Ansal, A.M., Erken, A.** 1989. "Undrained Behavior Of a Clay Under Cyclic Shear Stresses", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.115, No.7, 968-983.
- Bolton, M.D. ve J.M.R. Wilson.**, 1990. Soil Stiffness and Damping. Proc. Eurodyn '90, Bochum, FR Germany, 209-216.
- Bowles, J.E.**, 1974. Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering. McGraw-Hill, New York.
- Bromhead, E.N.**, 1986. The Stability of Slopes. Surrey University Press, A.B.D..
- Cai, F. ve Ugai, K.**, 2000. Numerical Analysis of the Stability of a Slopes Reinforced with Piles, Soils and Foundations, 40, 73-84.
- Castro, G., Christian, A.**, 1976. "Shear Strenght Of Soils and Cyclic Loading", Journ. Of the Geotechnical Engineering Division., ASCE, Vol.102, No.GT9, 887-894.
- Day, R.W.**, 2002. Geotechnical Earthquake Engineering. McGraw-Hill, New York.
- Das, B.M.**, 1998. Principles of Geotechnical Engineering. PWS, Boston.
- De Alba, P ve Seed, H.B.**, 1976 Journal of Geotechnical Engineering Division, **102**, 909-927
- Geostudio.**, 2005. Quake/w Manuals.
- Haigh, S.K. ve Madabhushi S.P.G.**, 2001. Newmarkian analysis of liquefied flow in centrifuge model earthquakes.
- Idriss, I. M.**, 1990 Response of soft soil sites during earthquakes, 273-290.
- Ishihara, K.**, 1993 Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes London, England, 321-376.
- Iwasaki, T.**, 1981 Soil liquefaction potential evaluation with use of the simplified procedure, 209-214.

- Konuk, Ç.,** 2005. Şev Stabilitesi analizi ve Şevlerde Deprem Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köleoğlu, E.,** 2002. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri ve Sıvılaşma Analizi Kriterlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kramer, S.L.,** 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- Newmark, N.M.,** 1965. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments.
- Okur V.,** 2002. Farklı Dinamik Gerilme Genlikleri Altında İnce Daneli Zeminlerin Gerilme Şekil Değiştirme ve Mukavemet Davranışları, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önalp, A. ve Arel, E.,** 2004. Geoteknik Bilgisi II, Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği, Birsan Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul.
- Özaydın, K.,** 1996. Yer Hareketleri Üzerine Zemin Koşullarının Etkisi ve Zemin Büyütmesi, Türkiye Deprem Vakfı Yayınları., İstanbul.
- Özmen, C.,** 2005. Zeminlerin Sıvılaşabilirliğine İnce Dane Oranı ve Plastisitenin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Poulos, S.J., Castro G., and France, J.W.,** 1985. "Liquefaction Evaluation Procedure," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.111, No.6, 772-792.
- Siyahi, B.G.,** 1994. Deprem Etkisinde şevlerde stabilitenin incelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Seed, H.B., Idriss, I.M.,** 1971. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 107, SM9, 1249-1274.
- Seed, H.B., Idriss, I.M.,** 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 134.
- Seed, H.B.,** 1979. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes, Journal of The Geotechnical Earthquake Engineering Division, ASCE Vol.106, No GT6, 724.
- Seed, H.B.,** 1983. Earthquake-Resistant Design of Earth Dams. Proceedings Symposium on Seismic Design of Earth Dams, ASCE, Newyork, 41-64.
- Tokimatsu, K., and Seed, H.B.,** 1987. Evaluation And Settlement in Sand Due to Earthquake Shaking. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.113, No.8 861-878.
- Türk Deprem Yönetmeliği.,** 2007. Elastik Deprem Yüklerinin Tanımlanması ve zemin sınıfına göre spektrum karakteristik periyotlar.
- Wartman J.,** 2006. Numerical Analysis of Laterally-Spreading Slopes.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. ve Hasaka, Y.,** 1989. Soils and Foundations. PWS, Boston.

## **ÖZGEÇMİŞ**



**Ad Soyad: Osman Turan YAKAR**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Kayseri - 1981**

**Adres: Fulya Mahallesi, Mehmetçik Caddesi, Kozacık Sokak No:13/2  
Şişli/İstanbul**

**Lisans Üniversite: İ.T.Ü - İnşaat Mühendisliği Bölümü**