

**ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

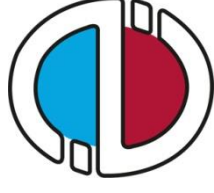
**KİL ZEMİNLERDE DİNAMİK DAVRANIŞIN  
BELİRLENMESİ**

**Burak GÖRGÜN  
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Nazile URAL**

**Bilecik, 2018**

**Ref.No: 10223668**



**ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ**

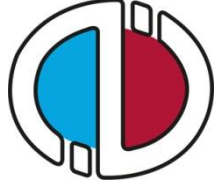
**Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**KİL ZEMİNLERDE DİNAMİK DAVRANIŞIN  
BELİRLENMESİ**

**Burak GÖRGÜN  
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Nazile URAL**

**Bilecik, 2018**



**ANADOLU UNIVERSITY**



**BİLECİK SEYH EDEBALI  
UNIVERSITY**

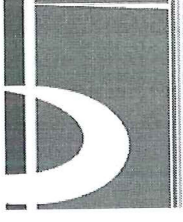
**Graduate School of Science  
Department of Civil Engineering**

**DETERMINATION DYNAMIC BEHAVIOR  
OF CLAYS**

**Burak GÖRGÜN  
Doctoral Thesis**

**Thesis Advisor  
Doç. Dr. Nazile URAL**

**Bilecik, 2018**



# BİLECİK ŞEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 31.10.2018 tarih ve 65 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15.11.2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Burak GÖRGÜN'ün, "Kil Zeminlerde Dinamik Davranışın Belirlenmesi" başlıklı tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

#### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI): Doç. Dr. Nazile URAL

ÜYE: Prof. Dr. Ayfer ERKEN

ÜYE: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

ÜYE: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

ÜYE: Doç. Dr. Derviş Volkan OKUR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANI: Doç. Dr. Nazile URAL

#### ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun  
.../.../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

## TEŞEKKÜR

Kendisi ile çalışma firsatı sağlayarak, bilgi birikimini benimle paylaŐan, manevi desteğini hiç esirgemeyen, çalıŐmalarımın yürütölmesi ve yönlendirilmesi aşamasında değerli zamanını bana ayıran, her zaman ilgisini ve desteğini gördüğüm değerli hocam *Doç. Dr. Nazile URAL'a*,

Tez izleme sürecim boyunca, yorum ve destekleri ile tezimde katkı sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyeleri Sayın *Prof. Dr. Mustafa TUNCAN* ve Sayın *Doç. Dr. Derviş Volkan OKUR'a*,

Akademik hayatıma baŐladığım ilk günden beri yanımda olan, bilgisi ve çalışmaları ile beni her zaman doğru yönlendiren değerli hocam sayın *Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a*,

Tezimin her aşamasında dostluğu ile beni yönlendiren, çalıŐmalarım konusunda inanılmaz teşvik eden ve yardımlarını hiç göstermeyen değerli arkadaşım *ArŐ. Gör. Çisem ERCÖMERT'e*,

Tüm hayatım boyunca aldığım kararlarda yanımda olan, babam *Halit GÖRGÜN* ve annem *İnci GÖRGÜN'e*, içtenlikle teşekkür ederim.

Burak GÖRGÜN

15 Kasım 2018

## ÖZET

Yapılacak yapının güvenliği için üzerine oturduğu zeminin özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerin dinamik yükler altında gösterdikleri davranışın doğru modellenebilmesi için zemine ait gerilme-deformasyon özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bulunan bu parametreler, depreme dayanıklı yapı tasarımlarının modellenmesi açısından çok önemlidir.

Bu çalışmada, dinamik yükler altında kil zeminlerde meydana gelen davranış değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla farklı silt yüzdelere sahip kil zemin numuneleri üzerinde rezonant kolon (RK) ve burulmalı kesme (BK) deneyi yapılmıştır. Aşırı konsolidasyon oranı (AKO) 1 ve 2 olan karışımlar üzerinde %1 kayma deformasyonuna kadar rezonant kolon deneyine ve sonrasında  $\pm 2.5$  kayma deformasyonuna kadar burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuştur.

Sonuçta, çevre basıncının artmasıyla kil zeminin kayma modülünün arttığı ve sönüm oranının azaldığı görülmüştür. Kil zemin içerisindeki silt oranının azalmasıyla kayma modülünde ve sönüm oranında azalış meydana gelmiştir. Normalize kayma modülü eğrisinde ise artış meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, kil zemin içerisinde silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarında azalış meydana geldiği görülmüştür. AKO 1 ve 2 olan numunelerde AKO'nun artmasıyla kayma modülünde artış, sönüm oranında azalma gözlemlenirken, boşluk suyu basınçlarının AKO'nun artmasıyla azaldığı görülmüştür. 3 tekrarlı RK deneyi yapılan numunelerde tekrar sayısının artmasıyla kayma modülünde azalma, sönüm oranında artış görülmüştür. Kayma modülünde en fazla azalma, silt yüzdesi yüksek olan karışımlarda gözlenmiştir. 3 tekrarlı RK deneylerine maruz kalan numunelerde 1 tekrarlı RK deneylerine maruz numunelere kıyasla daha yüksek boşluk suyu basınçları gözlemlenmiştir. BK deneyinde 0.5 ve 1Hz frekanslar kullanılarak yapılan incelemelerde frekansın artmasıyla kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrilerinde çok fazla değişiklik görülmemiş, sönüm oranlarında ise frekansın artmasıyla bir miktar artış olduğu görülmüştür. BK deneyinde frekansın artmasıyla boşluk suyu basınçlarında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rezonant Kolon Deneyi; Burulmalı Kesme Deneyi; Boşluk Suyu Basıncı; Kil; Silt

## ABSTRACT

For the safety of the structure to be built on the soil, properties of the soil should be well known. It is necessary to know the stress-deformation properties of the ground in order to model the soil of the soils under dynamic loads. These parameters are very important in terms of modeling of earthquake resistant structure designs.

In this study, behavioral changes in clay soils under dynamic loads were investigated. For this purpose, resonant column (RC) and torsional shear (TS) tests were performed on clay soil samples with different silt percentages. Samples which's over-consolidation ratio (OCR) 1 and 2, were subjected to resonant column test up to 1% shear deformation and then torsional shear test up to 2.5% shear deformation.

As a result, it was observed that with the increase of the confining pressure, the shear modulus of the clay soil increased and the damping rate decreased. The decrease of silt ratio in the clay soil resulted a decrease on the shear modulus and damping ratio. Also an increase was observed in the normalized shear modulus curve. In addition, with the decrease of the silt ratio in the clay soil, a decrease was observed at the water pore pressure. In OCR 1 and 2 samples, with the increase of OCR, shear modulus increased and damping ratio decreased and pore water pressures decreased with increase of OCR. In the samples which subjected to 3 cyclic RC test, shear modulus decreased and damping ratio increased with the increase of cyclic number. The highest reduction of shear modulus was observed in the most silty samples. Higher pore water pressures were observed in the samples subjected to 3 RC test compared to the 1 RC test. In experiments conducted using 0.5Hz and 1Hz frequencies in TS, no significant changes were observed in the shear modulus and normalized shear modulus curves with the increase of frequency. However, the damping ratio increased slightly with the increase of frequency. In the TS test, it was observed that there was a decrease in the pore water pressures with the increase of the frequency.

**Keyword:** Resonant Column Test; Torsional Shear Test; Pore Water Pressure; Clay; Silt

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>.....</b>
<b>ÖZET.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>viii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Genel .....	1
1.2. Tezin Amacı .....	1
1.3. Tezin Kapsamı.....	3
<b>2. ZEMİNLERE ETKİYEN DİNAMİK YÜKLER .....</b>	<b>5</b>
2.1. Depremeler ve Deprem Hareketleri .....	6
2.1.1. Önemli depremler .....	8
2.1.1.1. İtalya (Pompei, MS79) .....	9
2.1.1.2. Çin (Shaanaxi, 1556).....	9
2.1.1.3. Portekiz (Lizbon, 1755).....	9
2.1.1.4. ABD (San Francisco, 1906).....	9
2.1.1.5. Japonya (Kanto, 1923).....	9
2.1.1.6. ABD (Santa Barbara, 1925).....	10
2.1.1.7. ABD (Long Beach, 1933).....	10
2.1.1.8. ABD (Imperial Valley).....	10
2.1.1.9. ABD (Yellowstone, 1959).....	10
2.1.1.10.Şili (Valdivia, 1960) .....	11
2.1.1.11.Alaska (Porage, 1964) .....	11
2.1.1.12.Japonya (Niigata, 1964).....	11
2.1.1.13.Meksika (Mexico City, 1985).....	11
2.1.1.14.ABD (Northridge, 1994).....	12
2.1.1.15.Japonya (Kobe, 1995).....	12
2.1.1.16.Türkiye (İzmit, 1999) .....	12

	<b>Sayfa No</b>
2.1.1.17.Tayvan (Chi-Chi, 1999).....	12
2.1.1.18.ABD (Parkfield, 2004) .....	13
2.1.1.19.Endonezya (Sumatra, 2004) .....	13
2.1.1.20.Haiti (Port-au-Prince, 2010) .....	13
2.1.1.21.Yeni Zellanda (Chirstchurch, 2010-2011).....	13
2.1.1.22.Japonya (Tohoku, 2011) .....	14
2.2. Zeminlerde Dalga Yayılması.....	14
2.2.1. Elastik bir çubukta dalga yayılması.....	15
2.2.2. Elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılması .....	17
2.2.2.1. P-dalgası .....	21
2.2.2.1. S-Dalgası.....	22
2.2.3. Elastik yarı sonsuz ortamda dalga yayılması.....	25
2.2.3.1. Rayleigh dalgası.....	25
2.2.3.2. Love dalgası.....	26
<b>3. DİNAMİK ETKİLERE MARUZ KALAN KİL ZEMİNLERİN DAVRANIŞI .27</b>	
3.1. Gerilme-Deformasyon Davranışı .....	28
3.1.1. Dinamik kayma modülü .....	30
3.1.2. Normalize dinamik kayma modülü .....	39
3.1.3. Sönüm oranı.....	41
3.2. Mukavemet Özellikleri.....	44
<b>4. DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ .....51</b>	
4.1. Laboratuvar Yöntemleri .....	51
4.1.1. Ultrasonik darbe deneyi.....	51
4.1.2. Rezonant kolon deneyi .....	53
4.1.3. Dinamik basit kesme deneyi.....	54
4.1.4. Dinamik üç eksenli deneyi .....	55
4.1.5. Burulmalı kesme deneyi .....	57
4.2. Arazi Deneyleri .....	59
4.2.1. Sismik kırılma ve yansıma deneyleri .....	60
4.2.2. Karşıt kuyu deneyi.....	60
4.2.3. Alt kuyu deneyi .....	61

**Sayfa No**

4.2.3. Yüzey dalgası yayılımı deneyi .....	62
<b>5. TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA KİL ZEMİNLERİN DAVRANIŞI ....</b>	<b>64</b>
<b>6. DENEY MALZEMELERİ VE PROSEDÜRLERİ .....</b>	<b>101</b>
6.1. Deneylerde Kullanılacak Malzeme .....	101
6.2. Islak Toklamlama Yöntemiyle Numune Hazırlanması .....	102
6.3. Dekantasyon Yöntemiyle Numunenın Oluşturulması.....	107
6.4. Fiziksel Deneylerin ve Standartların Tanıtılması.....	111
6.5. Dinamik Deneylerin ve Standartların Tanıtılması.....	114
6.5.1. Rezonant kolon ve burulmalı kesme deney sistemi .....	114
6.5.2. Deney aşamaları .....	118
6.5.2.1. Doyurma .....	118
6.5.2.2. Konsolidasyon .....	119
6.5.2.3. Rezonant kolon .....	120
6.5.2.4. Burulmalı kesme deneyi .....	122
<b>7. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN BULGULARI .....</b>	<b>124</b>
7.1. Fiziksel Deneyler.....	124
7.1.1. Elek analizi .....	125
7.1.2. Hidrometre deneyi .....	125
7.1.3. Atterberg kıvam limitleri.....	126
7.1.4. Özgül ağırlık.....	128
7.2. Dinamik Deneyler .....	129
7.2.1. Çevre basıncı deneyi.....	131
7.2.2. 1 çevrimli rezonant kolon ve 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyi ...	133
7.2.2.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar .....	133
7.2.2.1. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar .....	138
7.2.3. 1 çevrimli rezonant kolon ve 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyi .....	143
7.2.3.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar .....	144
7.2.3.2. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar .....	149
7.2.4. 3 çevrimli rezonant kolon ve 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyi ...	154
7.2.4.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar .....	155
7.2.4.2. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar .....	158

	<b>Sayfa No</b>
7.2.5. 3 çevrimli rezonant kolon ve 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyi .....	162
7.2.5.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar .....	163
7.2.5.2. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar .....	167
<b>8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>173</b>
8.1. Çevre Basıncının Etkisi .....	173
8.1.1. Kayma modülüne etkisi .....	173
8.1.2. Sönüm oranına etkisi .....	176
8.2. Silt Oranının Etkisi .....	178
8.2.1. Dinamik kayma modülüne etkisi .....	178
8.2.2. Sönüm oranına etkisi .....	183
8.2.3. Boşluk suyu basıncına etkisi .....	185
8.3. Aşırı Konsolidasyon Oranının Etkisi .....	188
8.3.1. Dinamik kayma modülüne etkisi .....	190
8.3.2. Sönüm oranına Etkisi .....	197
8.3.3. Boşluk suyu basıncına etkisi .....	200
8.4. Tekrarlı Rezonant Kolon Deneyinin Etkisi .....	201
8.4.1. Dinamik kayma modülüne etkisi .....	201
8.4.2. Sönüm oranına etkisi .....	207
8.4.3. Boşluk suyu basıncına etkisi .....	209
8.5. Yükleme Frekansının Etkisi .....	210
8.5.1. Dinamik kayma modülüne etkisi .....	211
8.5.2. Sönüm oranına etkisi .....	213
8.5.3. Boşluk suyu basıncına etkisi .....	214
<b>9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>216</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>223</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>237</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
<b>Çizelge 2.1.:</b> Dinamik yüklerin oluşturduğu kayma deformasyonları (Kramer, 1996).....	5
<b>Çizelge 2.2.:</b> Zeminlere göre P-dalga hızları (Das ve Ramana, 2010) .....	22
<b>Çizelge 2.3.:</b> Zeminlere göre S-dalga hızları (Das ve Ramana, 2010) .....	24
<b>Çizelge 2.4.:</b> R-Dalgası değerleri (Das ve Ramana, 2010).....	26
<b>Çizelge 3.1.:</b> $G_{max}$ 'ın tespitinde kullanılan ampirik formüller (Kallioglou vd., 2008) ....	39
<b>Çizelge 4.1.:</b> Laboratuvar deney sistemlerinin deformasyon genliği aralıkları.....	59
<b>Çizelge 4.2.:</b> Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemleri .....	59
<b>Çizelge 4.3.:</b> SPT ve CPT deneyleri ile $V_s$ 'nin korelasyonu (Ahmad, 2015) .....	63
<b>Çizelge 5.1.:</b> Wang ve Kuwano'nun (1999) çalışmasında kullanılan parametreler .....	78
<b>Çizelge 5.2.:</b> Markowska-Lech'in (2008) çalışmasında kullanılan zemin özellikleri .....	87
<b>Çizelge 5.3.:</b> Sas vd.'nin (2017) çalışmasında kullanılan zeminlerin özellikleri .....	97
<b>Çizelge 5.4.:</b> Sato vd.'nin (2018) çalışmasında kullanılan zemin parametreleri .....	99
<b>Çizelge 7.1.:</b> Kil zeminin özellikleri.....	127
<b>Çizelge 7.2.:</b> Karışımlara ait parametreler .....	127
<b>Çizelge 7.3.:</b> Kullanılan karışımların özgül ağırlıkları .....	128
<b>Çizelge 7.4.:</b> Dinamik deneylerde kullanılan numunelerin boşluk oranları .....	131
<b>Çizelge 7.5.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si .....	136
<b>Çizelge 7.6.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si .....	141
<b>Çizelge 7.7.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si .....	147
<b>Çizelge 7.8.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si .....	151
<b>Çizelge 7.9.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si .....	157
<b>Çizelge 7.10.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si .....	161
<b>Çizelge 7.11.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si .....	166
<b>Çizelge 7.12.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si .....	170
<b>Çizelge 7.13.:</b> 3RK deneyi sonucunda kuru birim hacim değişiklikleri.....	172

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 2.1.:Yeryüzü tabakası (Encyclopedia Britannica, 2018).....	7
Şekil 2.2.:Yer kabuğu dalga yayılımı (Pearson Prentice Hall Inc., 2005).....	7
Şekil 2.3.:Elastik çubukta normal gerilme (Das ve Ramana, 2010).....	15
Şekil 2.4.:Elastik çubukta burulma momenti (Das ve Ramana, 2010).....	17
Şekil 2.5.:Elastik dikdörtgen prizması (Das ve Ramana, 2010).....	18
Şekil 2.6.:Basınç dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018).....	21
Şekil 2.7.:Kayma dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018).....	23
Şekil 2.8.:P ve S dalgaları arasındaki ilişki (Das ve Ramana, 2010).....	24
Şekil 2.9.:Rayleigh dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018).....	25
Şekil 2.10.:Rayleigh dalgası hareketi (Özkan, 2018).....	26
Şekil 2.11.:Love dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018).....	26
Şekil 3.1.:Histerisis ilmiği (Jia, 2018).....	29
Şekil 3.2.:Tekrarlı yükleme sonucu gerilme-deformasyon ilişkisi (Ishihara, 1996). ....	29
Şekil 3.3.: Kayma modülü (Jia, 2018).....	30
Şekil 3.4.:Boşluk oranı $G_{max}$ ilişkisi (Bui vd., 2010).....	32
Şekil 3.5.:Boşluk oranı normalize $G_{max}$ ilişkisi (Kokusho vd., 1982).....	32
Şekil 3.6.:Boşluk oranı ile $G_{max}$ değişimi (Okur, 2002).....	33
Şekil 3.7.:Çevre basıncı ile $G_{max}$ değişimi (Darendeli, 2001).....	34
Şekil 3.8.:Efektif gerilme ile $G_{max}$ değişimi (Kallioglou vd., 2008).....	34
Şekil 3.9.:Efektif çevre gerilmesi ile $G_{max}$ değişimi (Onur, 2015).....	35
Şekil 3.10.:Efektif gerilme ile normalize $G_{max}$ değişimi (Kallioglou vd., 2008).....	36
Şekil 3.11.:İnce içeriği ile kayma modülü değişimi (Yamada vd., 2008).....	36
Şekil 3.12.:RA ile kayma modülü değişimi (Carlton ve Pestana, 2012).....	37
Şekil 3.13.:AKO ile G değişimi (Weiler, 1988).....	37
Şekil 3.14.:Kil zeminde AKO ile G değişimi (Darendeli, 2002).....	38
Şekil 3.15.:G/ $G_{max}$ eğrisinin PI ile değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991).....	40
Şekil 3.16.:PI'ya bağlı olarak G/ $G_{max}$ eğrisinin değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991).....	40
Şekil 3.17.:PI ile G/ $G_{max}$ değişimi (Darendeli, 2001).....	41
Şekil 3.18.:AKO ile G/ $G_{max}$ değişimi (Darendeli, 2001).....	41
Şekil 3.19.:Çevre basıncına bağlı olarak D değişimi (Darendeli, 2001).....	42

**Sayfa No**

<b>Şekil 3.20.:</b> Efektif çevre basıncı ile $D_{min}$ değişimi (Kallioglou vd., 2008) .....	42
<b>Şekil 3.21.:</b> $G/G_{max}$ ile $D$ oranının incelenmesi (Ishibashi ve Zhang, 1993) .....	43
<b>Şekil 3.22.:</b> PI ile $D$ 'nin değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991) .....	44
<b>Şekil 3.23.:</b> Zeminlerin şekil değiştirme davranışı (Jia, 2018).....	46
<b>Şekil 3.24.:</b> 1964 Niigata derpremi, sıvılaşma problemi (Ishihara ve Koga, 1981) .....	47
<b>Şekil 3.25.:</b> 1906 San Francisco depremi, CI zeminde oturmalar (Lawson vd., 1908)...	48
<b>Şekil 3.26.:</b> 1989 Loma Prieta depremi, CI zeminde oturmalar (USGS, 2018) .....	49
<b>Şekil 4.1.:</b> Ultrasonik darbe deneyi (Whitman, 1970) .....	52
<b>Şekil 4.2.:</b> Ultrasonik darbe deneyinde burulma momenti (Özkan, 2018) .....	53
<b>Şekil 4.3.:</b> Rezonant kolon deneyi (Özkan, 2018) .....	54
<b>Şekil 4.4.:</b> Dinamik basit kesme deneyi (Özkan, 2018) .....	55
<b>Şekil 4.5.:</b> Dinamik üç eksenli deneyi (Ishihara, 1996).....	56
<b>Şekil 4.6.:</b> Dinamik üç eksenli deneyinde uygulanan yükler (Das ve Ramana, 2010)....	57
<b>Şekil 4.7.:</b> Dinamik burulmalı kesme deneyi (Ishihara, 1996). .....	58
<b>Şekil 4.8.:</b> Sismik kırılma ve yansıma yöntemi (Özkan, 2018) .....	60
<b>Şekil 4.9.:</b> Karşıt kuyu yöntemi (Özkan, 2018) .....	61
<b>Şekil 4.10.:</b> Alt kuyu yöntemi (Özkan, 2018).....	61
<b>Şekil 4.11.:</b> Yüzey dalgası yayılımı yöntemi (Özkan, 2018).....	62
<b>Şekil 6.1.:</b> Kilin dane çapı dağılımı .....	101
<b>Şekil 6.2.:</b> Kil zeminin XRD deney sonucu.....	102
<b>Şekil 6.3.:</b> Tokmıklama kılıfının modeli.....	105
<b>Şekil 6.4.:</b> Islak tokmıklama aleti.....	106
<b>Şekil 6.5.:</b> Ödometre deneyi .....	107
<b>Şekil 6.6.:</b> Ödometre deneyi sonucunda önkonsolidasyon basıncının bulunuşu .....	107
<b>Şekil 6.7.:</b> Santrifüj deneyi (Poppe vd., 2001).....	108
<b>Şekil 6.8.:</b> Dekantasyon işlemi (Poppe vd., 2001).....	109
<b>Şekil 6.9.:</b> Kil zeminin büyük havuzda ayrılma işlemi.....	110
<b>Şekil 6.10.:</b> Numune ayırma tekniği .....	110
<b>Şekil 6.11.:</b> Çeneli kırıcı .....	111
<b>Şekil 6.12.:</b> Ayrılan kil ve silt malzeme .....	111
<b>Şekil 6.13.:</b> Hidrometre deneyi.....	112

**Sayfa No**

<b>Şekil 6.14.:</b> Silt hidrometre .....	112
<b>Şekil 6.15.:</b> Kil hidrometre .....	113
<b>Şekil 6.16.:</b> Kıvam limitleri deneyi.....	113
<b>Şekil 6.17.:</b> Özgül ağırlık deneyi .....	114
<b>Şekil 6.18.:</b> Rezonant kolon cihazı .....	115
<b>Şekil 6.19.:</b> Rezonant kolon ve burulmalı kesme cihazı.....	117
<b>Şekil 6.20.:</b> Doyurma işlemi .....	118
<b>Şekil 6.21.:</b> 25kPa altında konsolide olan numuneler .....	119
<b>Şekil 6.22.:</b> 50kPa altında konsolide olan numuneler .....	120
<b>Şekil 6.23.:</b> Rezonant kolon deneyinde frekans değerleri .....	121
<b>Şekil 6.24.:</b> Rezonant kolon deneyinde kayma genlikleri (Lanzo ve Vucetic, 1999) ...	122
<b>Şekil 6.25.:</b> Burulmalı kesme deneyinde sinüzoidal yükleme .....	122
<b>Şekil 6.26.:</b> Program çıktısı .....	123
<b>Şekil 7.1.:</b> Kil zemin hidrometre deneyi .....	125
<b>Şekil 7.2.:</b> % 100kile ait hidrometre deneyi .....	126
<b>Şekil 7.3.:</b> % 100silte ait hidrometre deneyi.....	126
<b>Şekil 7.4.:</b> Kil yüzdesi ile plastisite indisi değişimi.....	128
<b>Şekil 7.5.:</b> Çevre basıncı ile $G_{max}$ 'ın değişimi .....	132
<b>Şekil 7.6.:</b> Çevre basıncı ile D'nin değişimi .....	132
<b>Şekil 7.7.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi.....	133
<b>Şekil 7.8.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si.....	134
<b>Şekil 7.9.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si ..	134
<b>Şekil 7.10.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si	135
<b>Şekil 7.11.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si	135
<b>Şekil 7.12.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si	135
<b>Şekil 7.13.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si	136
<b>Şekil 7.14.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $G_{max}$ değişimi....	137
<b>Şekil 7.15.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların D değişimi .....	137
<b>Şekil 7.16.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların u değişimi .....	138
<b>Şekil 7.17.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	138
<b>Şekil 7.18.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si.....	139

**Sayfa No**

<b>Şekil 7.19.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si	139
<b>Şekil 7.20.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si	140
<b>Şekil 7.21.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si	140
<b>Şekil 7.22.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si	140
<b>Şekil 7.23.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si	141
<b>Şekil 7.24.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $G_{max}$ değişimi....	142
<b>Şekil 7.25.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların D değişimi .....	142
<b>Şekil 7.26.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların u değişimi .....	143
<b>Şekil 7.27.:</b> 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	143
<b>Şekil 7.28.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi.....	144
<b>Şekil 7.29.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si .....	145
<b>Şekil 7.30.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si ...	145
<b>Şekil 7.31.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si ...	145
<b>Şekil 7.32.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si ...	146
<b>Şekil 7.33.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si ...	146
<b>Şekil 7.34.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si ...	146
<b>Şekil 7.35.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $G_{max}$ değişimi.....	147
<b>Şekil 7.36.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların D değişimi .....	148
<b>Şekil 7.37.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların u değişimi .....	148
<b>Şekil 7.38.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	149
<b>Şekil 7.39.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si .....	149
<b>Şekil 7.40.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si ...	150
<b>Şekil 7.41.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si ...	150
<b>Şekil 7.42.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si ...	150
<b>Şekil 7.43.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si ...	151
<b>Şekil 7.44.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si ...	151
<b>Şekil 7.45.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $G_{max}$ değişimi.....	152
<b>Şekil 7.46.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $G_{max}$ değişimi.....	152
<b>Şekil 7.47.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların u değişimi .....	153
<b>Şekil 7.48.:</b> 1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	153
<b>Şekil 7.49.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi.....	154

**Sayfa No**

<b>Şekil 7.50.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si.....	155
<b>Şekil 7.51.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si	155
<b>Şekil 7.52.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si	156
<b>Şekil 7.53.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si	156
<b>Şekil 7.54.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si	156
<b>Şekil 7.55.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si	157
<b>Şekil 7.56.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $u$ değişimi .....	158
<b>Şekil 7.57.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $r_u$ değişimi.....	158
<b>Şekil 7.58.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si.....	159
<b>Şekil 7.59.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si	159
<b>Şekil 7.60.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si	160
<b>Şekil 7.61.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si	160
<b>Şekil 7.62.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si	160
<b>Şekil 7.63.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si	161
<b>Şekil 7.64.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $u$ değişimi .....	162
<b>Şekil 7.65.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	162
<b>Şekil 7.66.:</b> 3RK ve 0.5Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi.....	163
<b>Şekil 7.67.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si.....	164
<b>Şekil 7.68.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si ...	164
<b>Şekil 7.69.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si ...	165
<b>Şekil 7.70.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si ...	165
<b>Şekil 7.71.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si ...	165
<b>Şekil 7.72.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si ...	166
<b>Şekil 7.73.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $r_u$ değişimi.....	167
<b>Şekil 7.74.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	167
<b>Şekil 7.75.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si.....	168
<b>Şekil 7.76.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si ...	168
<b>Şekil 7.77.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si ...	169
<b>Şekil 7.78.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si ...	169
<b>Şekil 7.79.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si ...	169
<b>Şekil 7.80.:</b> 3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si ...	170

## Sayfa No

Şekil 7.81.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $u$ değişimi .....	171
Şekil 7.82.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların $r_u$ değişimi .....	171
Şekil 8.1.:Efektif çevre basıncının $G_{max}$ 'a etkisi .....	174
Şekil 8.2.:Efektif çevre basıncı ile $G_{max}$ değişiminin incelenmesi .....	175
Şekil 8.3.:Efektif çevre basıncının $G/G_{max}$ 'a etkisi .....	175
Şekil 8.4.:Efektif çevre basıncının $G$ 'ye etkisi .....	176
Şekil 8.5.:Efektif çevre basıncı ile $G/G_{max}$ değişiminin incelenmesi .....	176
Şekil 8.6.:Efektif çevre basıncının $D$ 'ye etkisi .....	177
Şekil 8.7.:Efektif çevre basıncı ile $D$ değişiminin incelenmesi .....	177
Şekil 8.8.:Kil yüzdesi ile $G_{max}$ değişiminin incelenmesi .....	179
Şekil 8.9.:AKO'su 1 olan karışımlarda kil yüzdesi ile $G_{max}$ değişimi.....	180
Şekil 8.10.:AKO'su 2 olan karışımlarda kil yüzdesi ile $G_{max}$ değişimi.....	180
Şekil 8.11.:AKO'su 1 olan karışımlarda kil yüzdesi ile $G/G_{max}$ değişimi.....	181
Şekil 8.12.:AKO'su 2 olan karışımlarda kil yüzdesi ile $G/G_{max}$ değişimi.....	182
Şekil 8.13.:AKO'su 1 olan karışımlarda PI ile $G/G_{max}$ değişiminin incelenmesi .....	183
Şekil 8.14.:AKO'su 2 olan karışımlarda PI ile $G/G_{max}$ değişiminin incelenmesi .....	183
Şekil 8.15.:AKO'su 1 olan karışımlarda kil yüzdesine göre $D$ değişimi.....	184
Şekil 8.16.:AKO'su 2 olan karışımlarda kil yüzdesine göre $D$ değişimi.....	184
Şekil 8.17.:AKO'su 1 olan karışımlarda PI ile $D$ değişiminin incelenmesi .....	185
Şekil 8.18.:AKO'su 2 olan karışımlarda PI ile $D$ değişiminin incelenmesi .....	185
Şekil 8.19.:Kil yüzdesi ile $u$ değişimi.....	187
Şekil 8.20.:Kil yüzdesi ile $r_u$ değişimi .....	187
Şekil 8.21.:PI ile $r_u$ değişiminin incelenmesi.....	188
Şekil 8.22.:%100kilde $G$ 'nin AKO ile değişimi.....	191
Şekil 8.23.:%90kil+%10siltte $G$ 'nin AKO ile değişimi .....	191
Şekil 8.24.:%80kil+%20siltte $G$ 'nin AKO ile değişimi .....	191
Şekil 8.25.:%70kil+%30siltte $G$ 'nin AKO ile değişimi .....	192
Şekil 8.26.:%60kil+%40siltte $G$ 'nin AKO ile değişimi .....	192
Şekil 8.27.:%50kil+%50siltte $G$ 'nin AKO ile değişimi .....	192
Şekil 8.28.:AKO'nun $G_{max}$ 'a etkisinin incelenmesi .....	193
Şekil 8.29.:Kil yüzdesinin $G_{max}$ 'a etkisi .....	194

## Sayfa No

Şekil 8.30.:%100kilde AKO'nun $G/G_{max}$ 'a etkisi .....	194
Şekil 8.31.:%90kil+%10siltte AKO'nun $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	195
Şekil 8.32.:%80kil+%20siltte AKO'nun $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	195
Şekil 8.33.:%70kil+%30siltte AKO'nun $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	195
Şekil 8.34.:%60kil+%40siltte AKO'nun $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	196
Şekil 8.35.:%50kil+%50siltte AKO'nun $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	196
Şekil 8.36.:%100kilde AKO'nun D'ye etkisi .....	198
Şekil 8.37.:%90kil+%10siltte AKO'nun D'ye etkisi .....	198
Şekil 8.38.:%80kil+%20siltte AKO'nun D'ye etkisi .....	198
Şekil 8.39.:%70kil+%30siltte AKO'nun D'ye etkisi .....	199
Şekil 8.40.:%60kil+%40siltte AKO'nun D'ye etkisi .....	199
Şekil 8.41.:%50kil+%50siltte AKO'nun D'ye etkisi .....	199
Şekil 8.42.:AKO ile u değişiminin incelenmesi .....	200
Şekil 8.43.:AKO ile $r_u$ değişiminin incelenmesi.....	201
Şekil 8.44.:%100kile ait deformasyon davranışı .....	202
Şekil 8.45.:%50kil+%50silte ait deformasyon davranışı.....	202
Şekil 8.46.:%100kilde 3RK deneyi ile bulunan dinamik parametreler .....	203
Şekil 8.47.:%50kil+%50siltte 3RK deneyi ile bulunan dinamik parametreler.....	203
Şekil 8.48.:%100kilde 3RK deneyi sonucunda $G/G_{max}$ eğrisi.....	205
Şekil 8.49.:%90kil+%10siltte 3RK deneyi sonucunda $G/G_{max}$ eğrisi .....	205
Şekil 8.50.:%80kil+%20siltte 3RK deneyi sonucunda $G/G_{max}$ eğrisi .....	205
Şekil 8.51.:%70kil+%30siltte 3RK deneyi sonucunda $G/G_{max}$ eğrisi .....	206
Şekil 8.52.:%60kil+%40siltte 3RK deneyi sonucunda $G/G_{max}$ eğrisi .....	206
Şekil 8.53.:%50kil+%50siltte 3RK deneyi sonucunda $G/G_{max}$ eğrisi .....	206
Şekil 8.54.:%100kilde 3RK deneyi sonucunda D eğrisi.....	207
Şekil 8.55.:%90kil+%10siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi .....	208
Şekil 8.56.:%80kil+%20siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi.....	208
Şekil 8.57.:%70kil+%30siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi .....	208
Şekil 8.58.:%60kil+%40siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi .....	209
Şekil 8.59.:%50kil+%50siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi .....	209
Şekil 8.60.:Tekrarlı RK deneyinin boşluk suyu basıncına etkisi.....	210

**Sayfa No**

<b>Şekil 8.61.:</b> Tekrarlı RK deneyinin normalize boşluk suyu basıncına etkisi.....	210
<b>Şekil 8.62.:</b> %100kilde frekansın $G/G_{max}$ 'a etkisi .....	211
<b>Şekil 8.63.:</b> %90kil+%10siltte frekansın $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	212
<b>Şekil 8.64.:</b> %80kil+%20siltte frekansın $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	212
<b>Şekil 8.65.:</b> %70kil+%30siltte frekansın $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	212
<b>Şekil 8.66.:</b> %60kil+%40siltte frekansın $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	213
<b>Şekil 8.67.:</b> %50kil+%50siltte frekansın $G/G_{max}$ 'a etkisi.....	213
<b>Şekil 8.68.:</b> Karışımlarda frekansın sönüm oranına etkisi.....	214
<b>Şekil 8.69.:</b> Karışımlarda frekansın boşluk suyu basıncına.....	215
<b>Şekil 8.70.:</b> Karışımlarda frekansın normalize boşluk suyu basıncına etkisi .....	215

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$\mu$	: Poisson oranı
$\lambda$	:Lame sabiti
$\sigma_0'$	:Efektif gerilme
$\rho_{max}$	:Maksimum birim hacim ağırlık
$\rho_{min}$	:Maksimum birim hacim ağırlık
$\gamma$	:Dinamik birim kayma genliği
D	:Sönüm oranı
$D_{max}$	:Maksimum sönüm oranı
$D_{min}$	:Minimum sönüm oranı
e	:Boşluk oranı
E	:Elastisite modülü
f	:Frekans
$G_0$	:Başlangıç kayma modülü
$G/G_{max}$	:Normalize kayma modülü
$G_{max}$	:Maksimum kayma modülü
$G_{sek}$	:Sekant kayma modülü
$G_s$	:Özgül ağırlık
$r_u$	:Normalize boşluk suyu basıncı
u	:Boşluk suyu basıncı
$V_p$	:Basınç dalgası hızı
$V_s$	:Kayma dalgası hızı
w	:Su muhtevası
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
AK	:Aşırı konsolide
AKO	:Aşırı konsolidasyon oranı
BK	:Burulmalı kesme deneyi
cm	:santimetre
Hz	:Hertz
kg	:Kilogram

kN	:Kilonewton
LL	:Likit limit
PL	:Plastik limit
PI	:Plastisite indisi
NK	:Normal konsolide
RK	:Rezonant kolon deneyi
sn	:Saniye

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, kurucusu Karl Terzaghi'nin İstanbul Teknik Üniversitesi ve Robert Kolej'de 1920'li yıllarda yaptığı çalışmalarla bilimsel bir disiplin olarak ortaya çıkmıştır. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği yirminci yüzyılda hızla gelişmiş ve bu bilim dalı hakkında çok miktarda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Zemin mekaniği ve Geoteknik Mühendisliğinin ne kadar önemli olduğu, üzerine veya içine inşa edilecek herhangi bir yapının güvenliğini ne derecede etkilediği ortaya konulmuştur. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, zeminin ve inşa edilecek yapının genel olarak statik durumdaki halleri üzerine çalışma yapan bir bilim dalıdır. Ancak bilindiği üzere zemini ve yapıyı en çok etkileyen unsur dinamik etkilerdir. Bu yüzden yirminci yüzyılın sonlarına doğru Zemin Dinamiği ve Geoteknik Deprem Mühendisliği bilimleri ortaya çıkmıştır. Bu bilim dalları zeminin dinamik durumdaki parametrelerini incelemektedir. Her ne kadar bu bilim dallarında da oldukça fazla araştırma ve çalışma yapılsa da henüz çok miktarda bilinmeyen olduğu bir gerçektir. Dinamik etkilerin zeminlerde meydana getirebileceği deformasyon vb. problemlere karşı önlem alınabilmesi için hem dinamik etkilerin ve zeminin özelliklerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

## 1.2. Tezin Amacı

İnşaat mühendisliğinde, yapıların inşası için hem yüksek bütçelere hem de uzun sürelerle ihtiyaç duyulmaktadır. Taşıma kapasitesi ve izin verilebilir oturma miktarı güvenli bir yapı için gerekli olan parametrelerdir. Yapıda oturmaların olduğu durumlarda farklı yükleme koşulları meydana gelmektedir. Bu yüzden yapının oturmasından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Kum zeminlerde oturma elastik oturma şeklinde gerçekleşmektedir. Kil zeminlerde ise oturma zamana bağlı bir fonksiyon olarak gerçekleşmektedir ve buna konsolidasyon oturması denmektedir. İlk kez Terzaghi (1925b) klasik konsolidasyonun içeriğini geliştirmiştir. Teoride her boşluk oranında maksimum bir efektif gerilme olduğu ve bunun zemin daneleri ile desteklendiği varsayılmıştır. Zemin danelerine belirli bir boşluk oranında taşıyabileceklerinden fazla bir yük verildiğinde bu yükü zeminin içinde bulunan suyun taşıyacağı ve bu durumun boşluk suyu basıncını arttıracığı ileri sürülmüştür. Boşluklarda bulunan su partikülleri

Darcy (1856) yasalarına uygun olarak dışarı çıkacak ve bu durum zemindeki boşluk oranının azalmasını sağlayacaktır. Bunun sayesinde zemin daneleri gelen yükü taşıyacak hale gelebilecektir. Bu süreç tüm boşluk suları çıkıncaya ve zemin daneleri uygulanan tüm yükü taşıyana kadar devam edecektir. Klasik konsolidasyonun çalışma prensibi boşluk suyu basıncının dağılması ve bu sayede su muhtevasının azalması ve hacimin küçülmesi şeklindedir.

Tekrarlı yüklemeler esnasında zemin tabakalarının göstereceği davranışın önceden bilinmesi, gerekli önlemlerin alınmasını ve bu tabakalar üzerindeki yapılarda oluşabilecek hasarların azaltılabilesini sağlar. Ülkemizin aktif bir deprem kuşağında bulunması bu konuda yapılacak çalışmaların önemini daha da arttırmaktadır. Deprem zeminlerde oluşturacağı hasar incelenirken yapılan çalışmalar genellikle kum zeminlerde sıvılaşma problemine odaklanmıştır. Deprem sırasında kil, kum ile karşılaştırıldığında istikrarlı olarak kabul edilmiştir (Lee ve Fitton, 1969). Buna rağmen yapılan incelemelerde kalın kil tabakalarında ciddi yapı hasarları meydana geldiği görülmüştür (Seed, 1987; Mendoza ve Auvinet, 1988). Deprem sırasında sismik hareket büyümesi nedeniyle oluşan büyük deformasyonların kil zeminin bir özelliği olduğu farkedilmiştir. Deprem dalgalarının genliğinde yüzeye yakın yumuşak zemin tabakalarından geçerken meydana gelen artış, yapısal hasar üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Ayrıca 1964 yılında Niigata depremi ve 1978 yılında Miyagiken-oki depremi sırasında, Japonya'da birçok bölgede zeminde çökme meydana geldiği görülmüştür (Brady, 1980). Bu tarz durumlar killerin gerçekten de kumlardan daha istikrarlı olup olmadığı sorusunu akıllara getirmektedir. Her ne kadar deprem gibi kısa yükleme döneminde bu durum kısmen doğru olsa da uzun dönemde çevrimsel bir yüklemeye maruz kalan kilde durum farklı hale gelmektedir (Yasuhara vd., 1992). Ayrıca yatay katmanlı kil zeminlerde deprem sırasında oluşacak çevrimsel kayma dayanımı ciddi bir stabilite sorununa yol açmazken bu durum boşluk suyu basıncının yükselmesini tetikleyerek oturmalara sebep olabilir. Killerde, tekrarlı gerilmeler sonucunda oluşan oturmalar depremden hemen sonra oluşabileceği gibi zemin profilinin özelliğine bağlı olarak depremden uzun bir süre sonra da görülebilmektedir (Kramer, 1996). Bu oturma genellikle konsolidasyon oturması olarak gerçekleşir ve deprem sırasında tekrarlı yükler altında oluşan boşluk suyu basıncının sönmüldüğü durumda ortaya çıkmaktadır. (Ansal ve Tuncan, 1989). Çevrimsel yüklemelerden sonra killerin davranışı araştırılmıştır. Bu çalışmaların birçoğu

çevrimsel yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve kesme dayanımının belirlenmesi üzerinedir (Ansal ve Tuncan, 1989). Çevrimsel yükleme tipi deprem gibi yüksek genlik ve kısa süreli ya da dalga, trafik yükü yada makine temel titreşimi gibi kısa genlik ve uzun süreli olabilir. Çevrimsel yükler altında kil zeminlerin davranışı karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Çevrimsel yük etkisi altında zemin taşıma kapasitesi ya da deformasyonların hesaplanmasına yönelik temel bir yöntem geliştirilebilmiş değildir (Okur ve Ansal, 2009). Bunun nedeni ise zamana bağlı oluşan sönümlenme, önkonsolidasyon dönemi, tekrarlı yük özellikleri, zemine ait parametreler, yer altı suyu gibi birçok faktörün dinamik davranışa etki ediyor olmasıdır.

Bu çalışmada, çevrimsel yükler altında kil zeminlerin konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

### 1.3. Tezin Kapsamı

Bu tezin organizasyonu aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

Bölüm 1’de zemin dinamiğinin öneminden ve bu tezin yapılış amacından bahsedilmiştir. Bölüm 2’de zeminlere etki eden dinamik yükler incelenmiştir. Dünyada en çok karşılaşılan doğal afetlerden birisi depremdir. Yıllar boyunca meydana gelen depremler yüzünden çok sayıda can ve mal kayıpları oluşturmuştur. Bu nedenle Bölüm 2’de öncelikli olarak depremlerin tarihsel süreçleri incelenmiştir. Daha sonra deprem gibi dinamik yüklerin zeminlerde oluşturduğu dalga tipleri ve bu dalgaların zeminlere etkisi ile zeminlerde meydana getirdiği deformasyonlar ve bu deformasyonların tespitinde kullanılacak formülasyonlardan bahsedilmiştir. Bölüm 3’te dinamik yüklemelere maruz kalan zeminlerin göstereceği davranış incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar incelenerek zeminin dinamik davranışlarını etkileyen parametreler araştırılmıştır. Buradan elde edilen verilerle bu tez çalışması kapsamında deneylerde incelenecek farklı parametreler oluşturulmuştur. Ayrıca dinamik etkiler altında zeminde meydana gelen deformasyonlar ve mukavemet kayıpları literatürdeki örnekler üzerinden incelenmiştir. Bölüm 4 dinamik etkiler altında zeminlerin göstereceği davranışın tespiti için kullanılan arazi ve laboratuvar deneylerini içermektedir. Bu bölümde arazide ve laboratuvarda en çok kullanılan deney sistemleri ile bu sistemlerin avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Bölüm 5 çevrimsel etkilere maruz kalan killi zemin numunelerinin, farklı yükleme koşullarında davranışlarının ne şekilde etkilendiği ile ilgili geniş bir literatür araştırması sunmaktadır. Yapılan farklı çalışmalar ile elde edilen

sonuçlar geniş bir tarih aralığında incelenmiştir. Bu sayede literatürdeki boşluklar ile yapılan çalışmalardan elde edilen farklı bulgular tespit edilmiştir. Bölüm 6’da bu çalışma kapsamında kullanılacak olan deney malzemeleri ve sistemleri incelenmiştir. Deneylerde kullanılacak olan malzemenin özellikleri ile kil zeminlerin çevrimsel gerilemeler altındaki davranışlarını etkileyen en önemli parametrelerden biri olan numune hazırlama yöntemleri incelenmiştir. Farklı numune hazırlama sistemleri ile doğal durumun en doğru biçimde laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmesi olanaklı hale gelmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında kullanılan numune hazırlama sisteminin hangi amaçla seçildiği belirtilmiştir. Yine bu bölümde deneyde kullanılan karışımlar ile standartlar tanıtılmıştır. Ayrıca bu bölüm rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyinin geçmişten günümüze gelene kadar göstermiş olduğu gelişmeleri içermektedir. Rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyi ile hangi durumların incelendiği ve bu deneyler ile yapılan araştırmalar yine bu bölümün konusunu oluşturmaktadır. Son olarak Bölüm 6’da yapılan dinamik deneylerin aşamaları ve bu aşamalarda yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Bölüm 7 yapılan fiziksel ve dinamik deneyler sonucunda elde edilen sonuçların sunulmasını içermektedir. Bu bölümde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen tüm bulgular sunulmuştur. Bölüm 8’de bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular literatürle karşılaştırılarak tartışılmıştır. Bu sayede bulguların benzer ve farklı yönleri ortaya konulmuştur. Bölüm 9’da ise yapılan çalışmaların sonucu sunulmuş ve yapılan çalışmaların geliştirilmesi için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. ZEMİNLERE ETKİYEN DİNAMİK YÜKLER

Dr. Karl Terzaghi tarafından 1925 yılında yayınlanmış Erdbaumechanik kitabı ile mühendislik dalı yeni bir bilim olan zemin mekaniği ile tanışmıştır (Terzaghi, 1925a). Bu süreçten sonra zeminlere yapılacak tasarımlar ve zeminlerin statik yüklemeler altındaki davranışı araştırmacılar tarafından araştırılmış ve zeminlerin özellikleri incelenmiştir. Bu incelemeler genel itibariyle statik etkiler üzerine yoğunlaşmıştır. 1923 Kanto depreminden sonra ise deprem mühendisliğinin temeli atılmıştır. Bu depremden sonra araştırmacılar zeminlere etki eden statik yükler dışında dinamik yüklerin de önemini fark etmişlerdir. 1964 Niigata depreminden sonra ise zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışını daha iyi anlamak için çalışmalar bu alana yönelmiştir. Zeminlere etkiyen dinamik yükler harmonik hareketler, periyodik hareketler, gelişigüzel titreşimler, geçici titreşimler olmak üzere dört ana başlık altında toparlanabilir (Özaydın, 1982). Makine temellerinin titreşimleri zeminde harmonik ve periyodik olarak düzenli bir titreşim meydana getirmektedir. Depremler, dalgalar, rüzgârlar gibi doğa olayları ise zeminlerde gelişigüzel titreşimler oluşmasına yol açmaktadır. Bombaların patlaması, ağırlık düşüren makinalar, darbe oluşturan makinalar ise zeminlerde geçici titreşimler oluşturmaktadır. Zeminde oluşan bu dinamik yükler farklı kayma deformasyonları oluşmasına sebep olmaktadır (Çizelge 2.1).

**Çizelge 2.1.:**Dinamik yüklerin oluşturduğu kayma deformasyonları (Kramer, 1996)

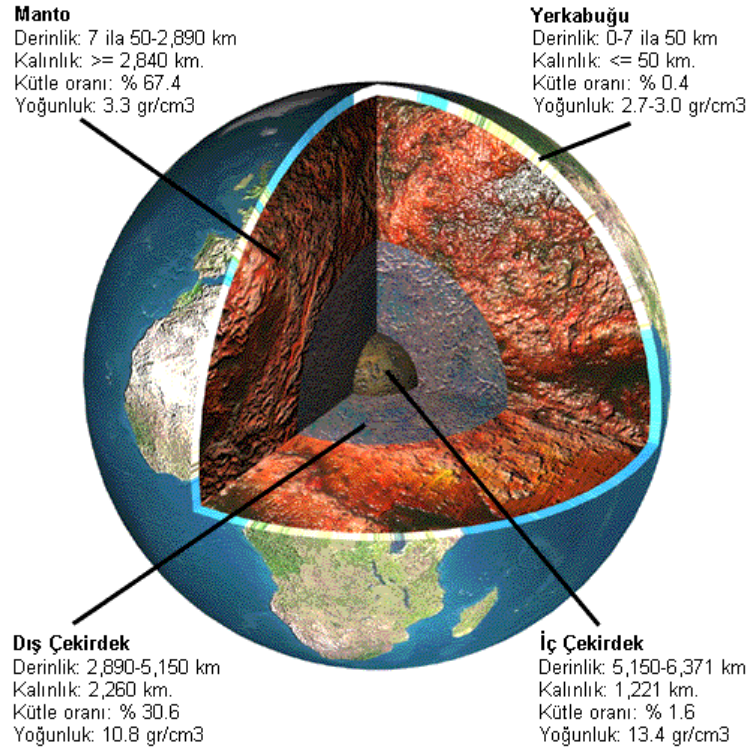
Kayma gerilmesi, $\gamma$ (%)	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$
Olay	Dalgalar, Makine titreşimleri		Depremler, Oturmalar		Heyelanlar, Sıvılaşma		Nükleer patlamalar	
Zeminin dinamik özelliği	Elastik		Elasto-plastik		Plastik		Göçme	
Kayma gerilmesi cinsi	Çok küçük gerilmeler		Küçük gerilmeler		Büyük gerilmeler		Çok büyük gerilmeler	

Zemin dinamiği; zemin tabakalarında dalga yayılımı ve depremler, zemine ait gerilme-deformasyon özellikleri, dinamik etkiler altında yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi ve modellenmesi, sıvılaşma, titreşimli makinaların altına inşa edilecek

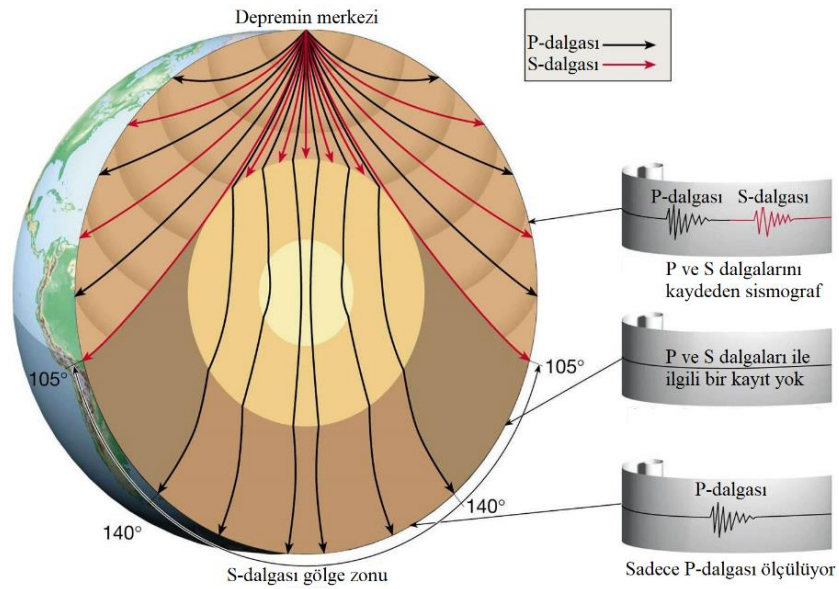
temeller, kazık temeller, barajlar ve toprak dolgulu yapıların tasarımı, dinamik etkiler altında şev stabilitesi, dinamik etkiler altında dayanma yapılarına gelen kuvvetler gibi konuları içermektedir (Das ve Ramana, 2011). İçten yanmalı motorlar, buhar makinaları, pistonlu pompalar, kompresörler ve krank mekanizmasına sahip makinalar vb. zemine titreşim uygularlar. Bu makinaların kullanımı sırasında mutlaka çevrimsel gerilmeleri göz önüne alınmalıdır. Bunun dışında zemine etkileyen dinamik yükler arasında en önemli yükleme depremin oluşturduğu tekrarlı gerilmedir. Deprem sırasında meydana gelen tekrarlı gerilmeler heyelanlara, sıvılaşmaya ve büyük oturmalara yol açabilir (Day, 2002).

### **2.1. Depremeler ve Deprem Hareketleri**

Depremler sırasında oluşan dalgalar; cisim dalgaları ve yüzey dalgaları şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Cisim dalgalarından biri olan P dalgası geçtiği ortamda basınç hareketleri oluşturmakta ve bu sayede hacimsel değişikliklere sebep olmaktadır. Cisim dalgalarından bir diğeri ise S dalgalarıdır ve geçtikleri ortamı kaydırmaya çalışırlar bu sebeple de kayma deformasyonları oluşturmaktadırlar. Yüzey dalgaları ise Love ve Rayleigh dalgalarıdır ve geçtikleri yüzeylerde yuvarlanma etkisi oluşturmaktadırlar. Love ve Rayleigh dalgaları yeryüzüne yakın olarak yayılmaktadırlar. Dünyanın 4 ana tabakadan oluştuğu söylenmektedir. Bunlar kabuk tabakası, manto, dış çekirdek ve iç çekirdekten oluşmaktadır (Şekil 2.1). Kabuk tabakası tek bir plakadan değil, okyanuslardan, sıra dağlardan, kıta bloklarından oluşmaktadır. Manto ise alt ve üst manto olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Manto tabakasının üst kısmı silikat, sülfat ve oksitler gibi malzemeleri içeren ve bu malzemelerin ergimesini önleyecek kadar basınç altında bulunan kayalardan oluşmaktadır. Mantonun alt kısmı ise silikaların ve metallerin bir araya gelmesiyle oluşan pallasitten oluşmaktadır. Yapılan incelemelere göre yerkürenin 2260km olan dış çekirdeğinin sıvı özelliği taşıdığı söylenmektedir. Bu sebeple sıvı ortamlarda hareket edemeyen S-dalgaları çekirdekten geçemez (Şekil 2.2). Katı ortamlarda daha hızlı, sıvı ortamlarda ise yavaş hareket eden P-dalgaları çekirdeğe geldiği zaman kırılır ve yavaşlar, çekirdeğin dışına çıktığı zaman ise tekrar hızlanmaktadır (Özkan, 2017).



Şekil 2.1.:Yeryüzü tabakası (Encyclopedia Britannica, 2018)



Şekil 2.2.:Yer kabuğu dalga yayılımı (Pearson Prentice Hall Inc., 2005)

Depremler oluşma nedenlerine bağlı olarak genelde üç ana grupta toplanır. Bunlar tektonik yer sarsıntıları, volkanik patlamaların yol açtığı sarsıntılar ile heyelanlar, çığ hareketleri, meteor düşmeleri sonucu olan hareketlerdir. Bu hareketler içerisinde en

önemlisi dünyada ve ülkemizde en çok meydana gelen tektonik hareketlerdir. Yeryüzünün çekirdeğinin sıvı yapılı olmasından kaynaklı çekirdek içindeki sıvının hareketi çekirdeğin üzerinde yer alan ve bir kısmı sıvı bir kısmı katı özellik gösteren mantonun da hareketine sebep olmaktadır. Manto ise bu hareketle yer kabuğunu zorlayarak, yanal, düşey veya eğimli olarak birbirinin üstüne binen tabakaların iki yanını da zorlayarak kırılmasını sağlamaktadır. Bu süreçte yer kabuğunda bulunan litosferin içerisindeki kayalar yırtılarak biriken enerjilerini boşalttıktan sonra eski konumlarına dönmektedirler. Derin depremler ise litosferde bulunan kayaların mantonun çatlaklarından içeri sızarken eriyerek sıvı hale geçmesinden kaynaklanmaktadır (Allen, 1996). Depremlerin neden olduğu dalgaların kaynağı olarak kabul edilen noktaya odak noktası denmektedir. Odak noktasına en yakın olan yer üzerindeki nokta ise dış merkez, depremin en kuvvetli hissedildiği bölge ise merkez üstü olarak tanımlanmaktadır. Depremde enerjinin açığa çıktığı noktanın yeryüzünden en kısa uzaklığına depremin odak derinliği denilmektedir. Odak derinliğine göre depremler, yüzeysel, orta derinlikte veya derin depremler olarak adlandırılmaktadır. Odak derinliği 60km'den az olan depremlere yüzeysel depremler denilmektedir. Orta derinlikteki depremlerin odak derinliği ise 70-100km'dir ve odak derinliği 300km-700km arasında değişen depremlere de derin depremler denilmektedir. Depremlerin odak derinliği, odak noktası ve büyüklüğünü ölçmek için birden fazla deprem kayıt istasyonunda sismograf yardımıyla kayıtlar yapılmaktadır. Bu kayıtlar bir araya getirilip geometrik olarak hesaplandığında depremin odak noktası ve derinliği tespit edilmektedir. Ayrıca bu istasyonlar buldukları noktaya etki eden depremin büyüklüğünün de ölçülmesini sağlamaktadırlar. Herhangi bir derinlikte olan depremin, yeryüzünde hissedildiği bir noktadaki yapılar, doğa ve insanlar üzerindeki etkilerinin bir ölçüsü depremin şiddeti, deprem sırasında açığa çıkan enerjinin bir ölçüsü onun büyüklüğü olarak belirlenmektedir.

### **2.1.1. Önemli depremler**

Dünya var olduğu günden beri sürekli yıkıcı depremlerle karşılaşmaktadır. Geçmişte yaşanan depremler bugünkü bilgi birikimimizin oluşmasında en büyük etkenlerdendir. Geçmişteki depremlerin anlaşılması gelecekte yaşanılacak depremlere ışık tutarak yaşanacak felaketlerin önüne geçmemizi sağlayacaktır. Bu sebeple geçmişteki depremlerin bize kattığı bilgi birikiminin neler olduğunun iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde tarihte oluşan önemli depremler incelenmiştir:

#### **2.1.1.1. İtalya (Pompei, MS79)**

MS 79'da yaşanan depremin büyüklüğü ile can ve mal kayıpları bilinmemekle birlikte depremler ile volkanların bağlantılı olduğunu gösteren ilk kaydedilmiş kayıtlar bu depremde bulunmaktadır. Yaşanan deprem sonucunda İtalya'da bulunan Napoli şehrindeki 1281 metre yüksekliğindeki Vezüv yanardağı harekete geçmiştir. Tarihte Vezüv Yanardağı Felaketi olarak bilinmektedir.

#### **2.1.1.2. Çin (Shaanaxi, 1556)**

1556 yılında Çin'de yer alan Shaanaxi bölgesinde gerçekleşen depremin büyüklüğünün 7.9'un üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Yaklaşık olarak 800000 üzerinde insan öldüğü tahmin edilen deprem dünya tarihinde bugüne kadar yaşanmış en ölümcül depremdir.

#### **2.1.1.3. Portekiz (Lizbon, 1755)**

Portekiz'in Lizbon şehrinde 1755 yılında gerçekleşen depremin 8.5-9 büyüklüğünde olduğu tahmin edilmektedir. 60000 kişinin canını yitirdiği depremden sonra Portekiz başbakanı tarafından ilk kez depremlerin ve sonrasında yaşanacak risklerin araştırılması için bilimsel inceleme ekibi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ekip tarihte bilinen ilk deprem araştırmacılarıdır.

#### **2.1.1.4. ABD (San Francisco, 1906)**

1906 yılında gerçekleşen depremin büyüklüğünün 7.7 ile 8.2 arasında olduğu tahmin edilmektedir. Yaşanan bu depremde 3000 kişi hayatını kaybederken 400 milyon \$ değerinde hasar oluşmuştur. Deprem sonrası Kaliforniya'nın kültür merkezi San Francisco'dan Los Angeles'e taşınmıştır. Böylece depremin sadece can ve mal kaybına sebep olmadığı aynı zamanda sosyal yaşamı da bütünüyle etkilediği ve değiştirdiği görülmüştür.

#### **2.1.1.5. Japonya (Kanto, 1923)**

1923 yılında Japonya'nın Kanto bölgesinde meydana gelen depremin büyüklüğü 7.9'dur. 105385 kişi depremde hayatını kaybetmiştir. İlk kez bir depremin büyüklüğü kaydedilmiş ve bu durum modern deprem mühendisliğinin başlangıcını oluşturmuştur. Can kaybının yüksek olmasına deprem sırasında meydana gelen tsunami sebep olmuştur. Ayrıca bu deprem sonrasında çok acı olaylar da yaşanmıştır. Japon halkı meydana gelen

depremden Koreliler ile Çinlileri sorumlu tutmuşlardır. Ülkede bulunan Koreli ve Çinli halklara Japon halkı soykırım uygulamışlardır. Çin devleti ile Japonya devleti arasında sürececek ve yıllarca sürececek anlaşmazlığın fitilini ateşleyen durumlardan biri de bu olay olmuştur.

#### **2.1.1.6. ABD (Santa Barbara, 1925)**

1925 yılında meydana gelen depremin büyüklüğü 6.8 olarak kaydedilmiştir. Bu depremde 13 kişi hayatını kaybederken 6 milyon \$ hasar meydana gelmiştir. Deprem sırasında sıvılaşma meydana gelmiştir. Bu depremden sonra mühendisler tarafından yapılan incelemelerde ahşap ve betonarme yapıların yığma yapılarak kıyasla çok daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Bulunan bu sonuçlarla Amerika Birleşik Devletleri'nde yığma yapılarla ilgili standartlar oluşturulmuştur. Bu dünyada inşaatla alakalı devlet tarafından oluşturulan ve tüm yapılarda uygulanması zorunlu olan ilk standarttır.

#### **2.1.1.7. ABD (Long Beach, 1933)**

1933 yılında gerçekleşen depremde 120 kişi hayatını kaybetmiştir. Depremin büyüklüğü 6.4 olarak kayıtlara geçmiştir. Can kaybının yanında 50 milyon \$ hasar oluşmuştur. Depremde yıkılan yapıların çoğunluğunu okullar ve ölenlerin çoğunluğunu ise çocuklar oluşturmaktadır. Bu yüzden ilk kez bina önem katsayısı kavramı ortaya çıkmış ve standartlara eklenmiştir.

#### **2.1.1.8. ABD (Imperial Valley)**

Amerika Birleşik Devletleri'nde 1940 yılında gerçekleşen bu depremin büyüklüğü 7.1 olarak ölçülmüştür. 9 kişinin yaşamını yitirdiği ve 50 milyon \$ hasar oluşan depremde dünya tarihinde ilk kez yüksek kalite ivme kaydı elde edilmiştir. Bu kayıt hala Birleşik Devletler Jeoloji Araştırmaları kurumunda saklanmaktadır. Elde edilen bu kayıt sayesinde zaman-tanım analizlerinin kullanılmasının yolu açılmıştır.

#### **2.1.1.9. ABD (Yellowstone, 1959)**

36 kişinin hayatını kaybettiği ve 11 milyon \$ hasar oluşan bu deprem 1959 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Yellowstone bölgesinde meydana gelmiştir. Depremin büyüklüğü 7.3 olarak kayıtlara geçmiştir. Deprem sırasında Hebgen gölünde seyçeler oluşmuştur. Seyçel tsunaminin göllerde oluşan şekline verilmiş isimdir. Bu deprem ile ilk

kez depremlerden kaynaklanan dev dalgaların sadece denizlerde oluşmadığı aynı zamanda göllerde de oluşabileceği görüşülmüştür.

#### **2.1.1.10. Şili (Valdivia, 1960)**

6000 kişinin yaşamını yitirdiği bu depremde 11 milyon \$ hasar oluşmuştur. 1960 yılında gerçekleşen depremin büyüklüğü 9.5 olup ve bugüne kadar kaydedilen en büyük ve en güçlü depremdir. Depremden sonra dev bir tsunami oluşmuştur. Cordon Caulle volkanı depremden 38 saat sonra harekete geçmiştir. Bilim insanları İtalya Pompei’de deprem sonrasında oluşan volkan patlamasıyla burada gerçekleşen volkan hareketini birleştirerek depremler ile volkanlar arasındaki bağlantıyı kesin olarak saptamışlardır.

#### **2.1.1.11. Alaska (Porage, 1964)**

Tarihte kaydedilmiş en büyük ikinci deprem olan bu depremin büyüklüğü 9.2 olarak kayıtlara geçmiştir. 131 kişinin yaşamını yitirdiği ve 311 milyon \$ hasar oluşan deprem sırasında çok sayıda sıvılaşma meydana gelmiştir. 1964 yılındaki bu deprem bilim insanlarının dikkatini zemin olaylarına çekmiştir.

#### **2.1.1.12. Japonya (Niigata, 1964)**

1964 yılında Japonya’nın Niigata bölgesinde gerçekleşen deprem Alaska Porage’de gerçekleşen depremle aynı yılda hemen onun ardından gerçekleşmiştir. 7.5 büyüklüğünde gerçekleşen bu depremde 36 can kaybı yaşanmıştır. Ayrıca 11000nin üzerindeki yapıda hasar meydana gelmiştir. Bilim insanları bu deprem ile sıvılaşma olayını fark etmişlerdir. Depremden sonra sıvılaşmayla ilgili geniş çapta araştırmalar başlamıştır. Aynı zamanda bu depremde büyük çökmeler oluşmuş ve bilim insanları çoğunluğu kil zeminlerde oluşan bu çökmeleri de incelemeye başlamışlardır.

#### **2.1.1.13. Meksika (Mexico City, 1985)**

1985 yılında gerçekleşen depremin büyüklüğü 8.1 olarak ölçülmüş ve 10000 kişinin üzerinde can kaybı ile 3.5 milyar \$ hasara sebep olmuştur. Depremin merkez üssünden 350 km uzaktan olmasına rağmen Mexico City’de çok ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Özellikle 6-15 kat arası yapılarda ağır hasarlar oluşmuştur. Merkez üssünden bu kadar uzak olmasına rağmen oluşturduğu hasar sebebiyle depremde zemin etkisi bilim insanlarının dikkatini çekmiştir.

#### **2.1.1.14. ABD (Northridge, 1994)**

61 kişinin öldüğü ve 17 milyar \$ hasara sebep olan deprem 1994 yılında gerçekleşmiştir. Deprem büyüklüğü 6.7 olarak ölçülmüştür. Deprem sırasında 1.0g'yi aşan yatay pik ivmeler kaydedilmiştir. Yapılarda yumuşak kat düzensizliğinden ortaya çıkan hasarlar yüksek maddi kayıplara sebebiyet vermiştir. Ahşap ve çelik yapıları da kapsayan inşaat standartlarında önemli değişiklikler yapılmıştır.

#### **2.1.1.15. Japonya (Kobe, 1995)**

1995 yılında gerçekleşmiş depremin büyüklüğü 6.9 olarak ölçülmüştür. Deprem sırasında 5502 kişi hayatını kaybetmiştir. Depremde 102 milyar \$ maddi kayıp oluşmuştur. Deprem büyüklüğü fazla olmamasına rağmen ortaya çıkan hasar sonucunda Japonya ekonomisine çok ciddi zarar vermiştir. Japonya'nın deniz ticaretinin en önemli limanlarından biri olan Kobe limanı tamamen deprem sonrasında tamamen hizmet dışı kalmıştır. Bu durum Japon ekonomisinin durgunluğa girmesine neden olmuştur. Kobe limanının işlevini yitirmesiyle Uzakdoğu ticareti yapan gemiler yeni liman olarak kendilerine Güney Kore'ye ait limanları seçmişlerdir ve bu durum depremde oluşan ekonomik hasarın ötesinde de Japonya ekonomisine zarar vermiştir.

#### **2.1.1.16. Türkiye (İzmit, 1999)**

17 Ağustos 1999 Kocaeli'nde gerçekleşen depremin büyüklüğü 7.6 ve can kaybı 25000 kişidir. Depremde oluşan maddi kayıp 5 milyar \$'dır. Bilim insanları ilk kez bu depremde bir depremin yaklaşık zamanını tahmin etmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde 2026'dan önce bölgede deprem olacağını bilim insanları tarafından söylenmiştir. Ayrıca her zaman yeni binaların en güvenli bina olmadığını göstermiştir. Tarihi yapıların bir kısmı ayakta kalırken hemen yanındaki yeni binalarda göçme meydana gelmiştir. Ayrıca bu depremde ile sivilaşma konusunda önemli birkaç noktayı aydınlatılmıştır. Türkiye ve dünya literatürüne problemlerle ilgili birçok yayın dahil olmuştur.

#### **2.1.1.17. Tayvan (Chi-Chi, 1999)**

1999 yılında Tayvan'da yaşanan deprem, 2011 öncesinde yaşanan Yeni Zellanda depremine kadar en geniş alana etki eden deprem olarak kayıtlara geçmiştir. 7.6 büyüklüğe sahip depremde 2415 can kaybı yaşanırken 5 milyar \$ da maddi kayıp

yaşanmıştır. Deprem sırasında zeminlerde kum-silt karışımı zeminlerde ciddi sıvılaşma gözlenirken kil-silt karışımı zeminlerde ise büyük deformasyonlar meydana gelmiştir.

#### **2.1.1.18. ABD (Parkfield, 2004)**

2004 yılında gerçekleşen depremin büyüklüğü 6 olarak kaydedilmiş ve herhangi bir mal ile can kaybı yaşanmamıştır. Bu depremin önemi ise bilim insanlarının depremden önce bu bölgede her 22 yılda bir büyük deprem olduğunu gözlemlemesi ve bir sonraki depremin 1993 yılında gerçekleşebileceğini söylemiş olmalıdır. Her ne kadar bir miktar yanılma olsa da bu depremlerle birlikte gerçekten bilim insanlarının tahminin doğru olduğu depremlerin belirli periyotlarda gerçekleştiği kesin olarak kanıtlanmıştır.

#### **2.1.1.19. Endonezya (Sumatra, 2004)**

2004 yılında gerçekleşen bu depremin büyüklüğü 9.1-9.3 olarak ölçülmüştür. 230000 kişinin hayatını yitirdiği bu depremde 15 milyar \$ maddi hasar oluşmuştur. Tarihte bilinen ve ölçülen en büyük tsunami bu depremde gerçekleşmiştir. Ölüm olaylarının birçoğu tsunami kaynaklı olarak kayıtlara geçmiştir.

#### **2.1.1.20. Haiti (Port-au-Prince, 2010)**

7.0 büyüklüğündeki deprem 2010 yılında Haiti’de gerçekleşmiştir. Deprem sırasında 50000 kişi yaşamını kaybetmiştir. Çok sayıda bina mühendisler tarafından yapılmadığı için yıkılmıştır ve dünyaya bir kez daha mühendisliğin önemini göstermiştir. Deprem sırasında 15 milyar \$ maddi hasar meydana gelmiştir. Haiti hükümeti ölü sayısını 350000 kişi gibi göstermeye çalışarak yardım kuruluşlarından daha fazla ödenek almaya çalışmıştır. Deprem sonrasında ülkede baş gösteren tedavi eksikliği, açlık gibi sorunlardan dolayı kolera salgını meydana gelmiştir. Günümüzde hala Haiti’de kolera salgını tamamen sona ermiş değildir.

#### **2.1.1.21. Yeni Zelanda (Chirstchurch, 2010-2011)**

2010-2011 yılları arasında 4 adet deprem meydana gelmiştir. Burada gerçekleşen deprem tarihte bilindiği kadarıyla en geniş alana yayılmış olan deprem serisidir. Dört depremin büyüklüğü 5.9 ile 7.2 arasında değişmektedir. 182 kişi hayatını kaybetmiş ve 27 milyar \$ hasar meydana gelmiştir. Yaşanan depremlerden en büyüğü ilk deprem olmasına rağmen en çok hasar ikinci depremden sonra oluşmuştur.

### **2.1.1.22. Japonya (Tohoku, 2011)**

2011 yılında Japonya’da gerçekleşmiş ve büyüklüğü 9.0 olarak kaydedilmiştir. 20000 kişinin hayatını kaybettiği depremde bugüne kadar tarihteki en büyük maddi hasar gerçekleşmiştir. Depremde ortaya çıkan maddi hasar 235 milyar \$’dır. Depremden sonra oluşan tsunami Fukushima nükleer santralinde kaza meydana gelmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte tüm dünyada nükleer santrallerin güvenliği sorgulanmaya başlanmıştır. Ölümünün birçoğu da tsunami kaynaklı gerçekleşmiştir. Her ne kadar Fukushima nükleer santrali deprem sonrasında hasar görse de mühendislerin tasarımı olan binalar depremde yüksek performans sergileyerek zemin ve yapı biliminde 100 yılda gerçekleşen devrimi gözler önüne sermiştir (Franke, 2016).

### **2.2. Zeminlerde Dalga Yayılması**

Deprem dalgaları, titreşimli makinaların temellerinde oluşan dalgalar ve trafik dalgaları zemin içerisinde yayılırlar. Dalga hareketi ortamda yayılırken gerilmeler oluşturduğu için bu dalgalara gerilme dalgaları da denmektedir. Bu gerilmelerin zemin içerisinde oluşturduğu etkilerin kuramsal ve deneysel olarak incelenmesi geoteknik deprem mühendisliği açısından son derece önemlidir. Bu sayede zeminlerin sönüm oranı, kayma modülü, elastisite modülü gibi zemin parametrelerinin tespiti mümkün hale gelir. Bulunan bu parametreler yapılan deneylerin yorumlanması, yer tepkisi ile ilgili sayısal denklemlerin bulunması ve depreme dayanıklı yapı tasarımlarının modellenmesi açısından çok önemlidir (Das ve Ramana, 2010). Doğal zemin tabakaları içerisinde yayılan titreşim dalgalarının incelenmesi oldukça karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Bu sebeple zeminlerde dalga yayılması incelenirken, genellikle daha basit bir ortamda dalga yayılması problemlerinin incelenmesi ile başlamakta ve daha sonra elde edilen hesap yöntemlerinin zeminler için geliştirilmesine çalışılmaktadır. Bu sebeple zeminlerdeki dalga yayılması oluşumunu anlamak amacıyla elastik ortamda dalganın yayılımı incelenmelidir (Özaydın, 1982). Dalga yayılması üç ana başlıkta toparlanabilir. Bunlar elastik bir çubukta dalga yayılması, elastik sonsuz bir ortamda ve elastik yarı sonsuz ortamda dalga yayılmasıdır.

### 2.2.1. Elastik bir çubukta dalga yayılması

Dalga hareketi sırasında oluşan enerji elastik bir çubuk içerisinde yayılırken sahip olduğu enerjiyi bir daneye aktarır. Bu dane de oluşan enerjinin başka daneye aktarılmasıyla elastik çubuk içerisinde dalga yayılımı gerçekleşir (Das ve Ramana, 2010).

$x$  mesafesindeki bir kesitte normal gerilme  $\sigma$  ve  $x+dx$  mesafesindeki gerilme de  $\sigma + \left(\frac{d\sigma}{dx}\right) dx$  ile gösterilirse (Şekil 2.3),  $(dx)$  uzunluğundaki küçük parçanın hareketi Newton'un ikinci yasası gereği;

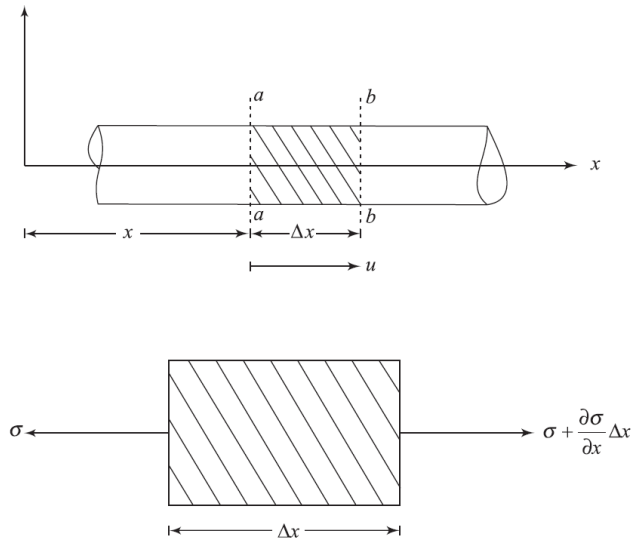
$$A\sigma + A \left(\frac{d\sigma}{dx} dx - \sigma\right) = A(dx) \rho \left(\frac{d^2u}{dt^2}\right) \quad (2.1)$$

şeklinde olur.

Burada  $A$  çubuğun kesit alanını,  $t$  zamanı,  $\rho$  çubuğun yoğunluğunu,  $u$  ise çubuğun deplasmanını göstermektedir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında formül;

$$\left(\frac{d\sigma}{dx}\right) = \rho \left(\frac{d^2u}{dt^2}\right) \quad (2.2)$$

şeklini alır.



Şekil 2.3.:Elastik çubukta normal gerilme (Das ve Ramana, 2010)

Bununla birlikte elastik bir çubuk ortamında olduğu için buradaki deformasyon modülü elastisite modülü ile gösterilerek, gerilme-deformasyon ilişkisi

$$\sigma = E \left( \frac{du}{dx} \right) \quad (2.3)$$

halini alır. Bu denklem, Eşitlik 2.2'deki yere konursa,

$$\left( \frac{d^2u}{dt^2} \right) = \frac{E}{\rho} \left( \frac{d^2u}{dx^2} \right) \quad (2.4)$$

yani,

$$\left( \frac{d^2u}{dt^2} \right) = V_r^2 \left( \frac{d^2u}{dx^2} \right) \quad (2.5)$$

oluşur. Bu ifadedeki  $V_r$  çubukta boyuna dalga yayılma hızıdır ve,

$$V_r = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

şeklinde gösterilir.

Bununla birlikte çubuğun kendi eksenini etrafında burulma hareketi yaptığı  $x$  mesafesindeki bir çubuğun  $\theta$  açısı kadar döndüğü düşünüldüğünde,  $x$  mesafesindeki burulma momenti  $T$  ve  $x+dx$  mesafesindeki burulma ise  $T+(dT/dx)dx$  olacaktır (Şekil 2.4). Bu çubuğun hareket denklemi ise,

$$\left( \frac{dT}{dx} \right) = \rho I \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \quad (2.7)$$

olacaktır. Burada  $\rho$  çubuğun yoğunluğunu,  $t$  zamanı,  $\theta$  burulmalı dönme açısını,  $I$  ise çubuk eksenini etrafında kütle atalet momentini göstermektedir. Öte yandan burulma momenti  $T$ ,

$$T = G I \left( \frac{d\theta}{dx} \right) \quad (2.8)$$

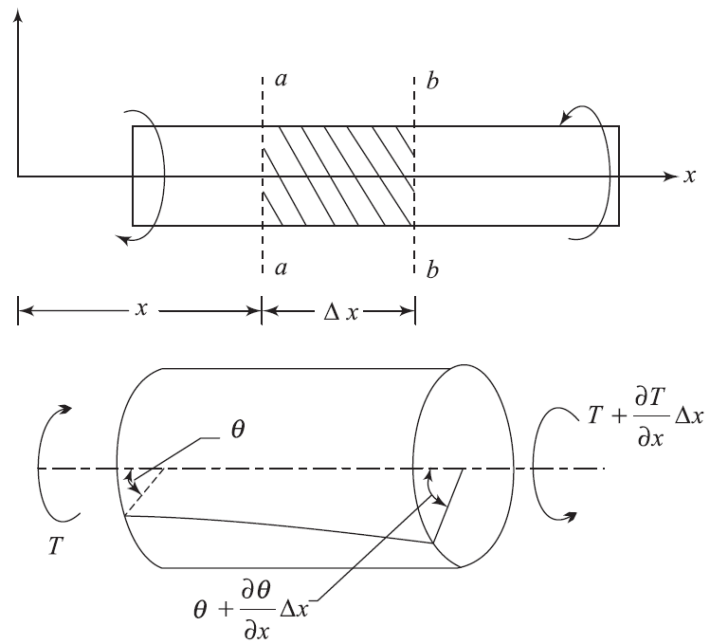
olduğu düşünüldüğünde ve bu denklem, Eşitlik 2.7'deki yerine konduğunda

$$\left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) = \frac{G}{\rho} \left( \frac{d^2\theta}{dx^2} \right) = V_s^2 \left( \frac{d^2\theta}{dx^2} \right) \quad (2.9)$$

elde edilmektedir. Burada  $G$  elastik kayma modülü,  $V_s$  kayma dalgası hızıdır ve,

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.10)$$

şeklinde gösterilir. Burada boyuna dalga hareketinden farklı olarak çubuk danelerinin titreşim hareketi dalganın yayılma doğrultusuna diktir. Yani dalga hareketi çubuk eksenine boyunca yayılırken çubuk danesi ise eksene dik bir düzlem içerisinde titreşim hareketi sergilemektedir. Bu hareket birbirine benzer modlar oluştururken, oluşan deplasmanlar ise doğrusal değil açısal olmaktadır (Özkan, 2017).



Şekil 2.4.:Elastik çubukta burulma momenti (Das ve Ramana, 2010)

### 2.2.2. Elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılması

Cisimlerden geçen dalga hızlarının ve dalgaların cisimlere etkime şekillerinden yola çıkarak ve bunların zemin parametreleri ile ilişkilendirilmesiyle içinden geçtiği zemin dinamik karakteristiği hakkında yorum yapılabilir. Bu sayede zeminlerin litolojisi, doygunluk derecesi, kayma modülü, sönüm oranı ve birim deformasyonları hakkında bilgiler edinilebilmektedir (Kramer, 1996).

Elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılması sonsuz küçüklükteki ( $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ) bir dikdörtgen prizması üzerinde tanımlanabilir (Şekil 2.5). Hareketin diferansiyel

denklemlerini elde etmek için, x, y ve z yönlerindeki kuvvetleri toplamak gerekmektedir. Burada x eksenini etrafında moment alınarak,

$$\left[ \left( \sigma_x + \frac{d\sigma_x}{dx} dx \right) - \sigma_x \right] (dy)(dz) + \left[ \left( \tau_{zx} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} dz \right) - \tau_{zx} \right] (dx)(dy) + \left[ \left( \tau_{yx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} dy \right) - \tau_{yx} \right] (dx)(dz) = \rho (dx)(dy)(dz) \frac{du}{dt^2} \quad (2.11)$$

olur. Burada x yönü boyunca, t zamanı,  $\rho$  prizmanın yoğunluğunu, u ise prizmanın deplasmanını göstermektedir. Eşitlik 2.11 sadeleştirildiğinde,

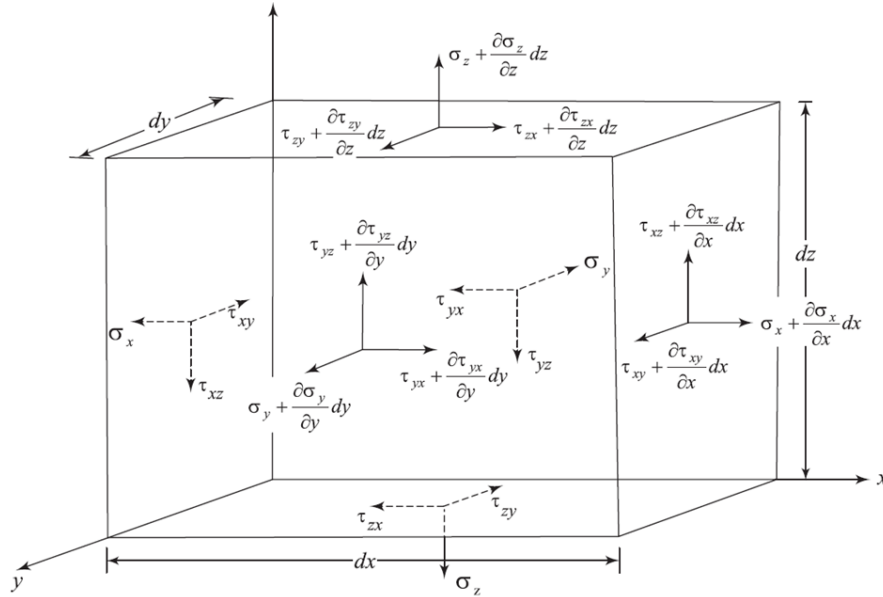
$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} = \rho \frac{du}{dt^2} \quad (2.12)$$

elde edilir. Aynı işlemler y ve z yönü boyunca da yapıldığında sırasıyla,

$$\frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dz} = \rho \frac{dv}{dt^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} = \rho \frac{dw}{dt^2} \quad (2.14)$$

elde edilir. Burada v ve w sırasıyla, y ve z yönündeki deplasmanlardır.



Şekil 2.5.:Elastik dikdörtgen prizması (Das ve Ramana, 2010)

Eşitlik 2.12, 2.13 ve 2.14 göze alındığında bu üç denklem gerilme açısından Newton'un 2.yasası gereği hareket denklemlerini vermektedir. Eşitlik 2.12 göz önüne alındığında gerilmeler simetrik olduğu için,  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$  ve  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  olduğu görülmektedir. Bu durumda dengede olan prizmaya etki eden 6 gerilme kalır. Bu gerilmelerin birbirleriyle olan ilişkisi matris denklemi ile çözümlerse,

$$[S] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

halini alır ve bu matrisin simetrik olduğu görülmektedir. Elastik bir ortamda gerilmeler ile kayma deformasyonları arasında Hooke yasasına göre,

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.18)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (2.19)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (2.20)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (2.21)$$

ilişkileri bulunmaktadır. Burada E elastisite modülü, G kayma modülü,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  ise birim deformasyonları ifade etmektedir. Birim deformasyonlar,

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (2.24)$$

şeklinde tanımlanır. Burada u, v ve w sırasıyla x, y ve z yönündeki deplasmanları ifade etmektedir. Ayrıca Eşitlik 16-24 birlikte değerlendirildiğinde  $\mu$ , E, G arasındaki ilişki görülmektedir. Burada,

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.25)$$

şeklinde hesaplanmaktadır ve  $\mu$ , E ve G elastik katsayılarıdır. Ayrıca bu katsayılar arasındaki ilişkiyi ifade eden,

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-\mu)} \quad (2.26)$$

bir kat sayı daha bulunmaktadır ve  $\lambda$  ile G Lamé sabitleri olarak adlandırılmaktadır.  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$  ve  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  olduğuna göre  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$  olmaktadır. Bu durumda  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$  kayma birim deformasyonları olmak üzere,

$$\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \quad (2.27)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \quad (2.28)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \quad (2.29)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra cismin yaptığı rijit dönme hareketlerinin bileşenleri ise,

$$2\varpi_x = \frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \quad (2.30)$$

$$2\varpi_y = \frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} \quad (2.31)$$

$$2\varpi_z = \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \quad (2.32)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik 2.16-2.32, Eşitlik 2.12-2.14'teki yerlere uygun şekilde konulduğunda,

$$\rho \frac{d^2u}{dt^2} = (\lambda + G) \frac{d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{dx} + G\nabla^2 u \quad (2.33)$$

$$\rho \frac{d^2 v}{dt^2} = (\lambda + G) \frac{d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{dx} + G \nabla^2 v \quad (2.34)$$

$$\rho \frac{d^2 w}{dt^2} = (\lambda + G) \frac{d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{dx} + G \nabla^2 w \quad (2.35)$$

ifadeleri elde edilir.  $\nabla^2$  sembolü Laplasyan Operatörüdür ve,

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \quad (2.36)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Laplasyan Operatörünü Eşitlik 2.34-2.36'da yerine yazılarak x, y ve z'ye göre türev alınıp toplama işlemi yapıldığında,

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (2.37)$$

eşitliği bulunur (Özkan, 2018).

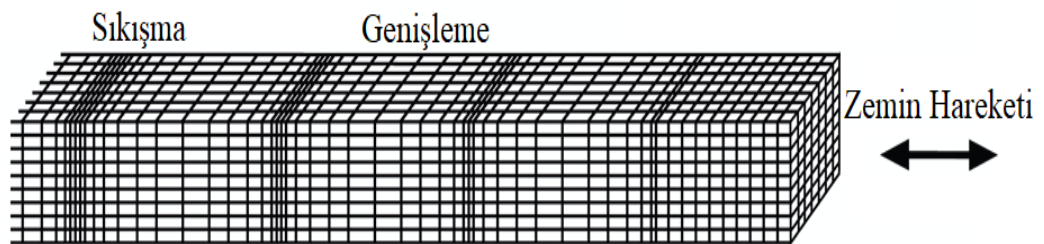
### **2.2.2.1. P-dalgası**

$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  eşitliği (Eşitlik 2.37) hacimsel birim deformasyon olarak adlandırılmaktadır. Cismin şekil değiştirmesi sonucu ortaya çıkan birim hacimdeki değişmeyi gösteren matris, gerilme matrisinin koordinat sistemine göre aynısı olduğuna göre,

$$\rho \frac{d^2 \varepsilon_v}{dt^2} = \frac{\lambda + G}{\rho} \nabla^2 \varepsilon_v = V_p^2 \nabla^2 \varepsilon_v \quad (2.38)$$

olarak bulunur. Burada  $V_p$  P-dalgı hızı olan basınç dalgı hızını ifade etmektedir (Şekil 2.6) ve Eşitlik 2.39 ile gösterilmektedir.

$$V_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2G)}{\rho}} \quad (2.39)$$



Şekil 2.6.: Basınç dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018)

Cisim dalgalarından içinden geçtiği cismin sıkışma ve genişlemesine neden olan hızı en yüksek olan P dalgası, zemine uyguladığı basınç kuvvetinden dolayı basınç dalgası, içerisinden geçtiği cismi boyuna doğru hareket ettirdiği için boyuna dalga, ve diğer dalga çeşitlerinden daha hızlı olmasından dolayı sismograflar tarafından ilk kaydedilen dalga olma özelliği taşıdığından birincil (primer) dalga şeklinde isimlendirilmektedir (Milsom ve Eriksen, 2011). Zemin içerisinden geçerek kayıt cihazlarına en hızlı ulaşan ve yıkıcı özelliği diğer dalga tiplerine göre daha az olan P dalgalarından sonra yıkıcı özelliğe sahip S dalgaları ile yüzey dalgaları yapılar ulaşmakta ve bu yapılar için tehlike oluşturmaktadırlar. Moment büyüklüğü fazla ancak şehir merkezine mesafesi uzak ve odak derinliği fazla olan depremlerde P ve S dalgalarının yapıya ulaşması arasındaki süre 60-90sn olabilmektedir. Bu durum erken uyarı sistemlerinin kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Erken uyarı sistemleri sayesinde olası bir yıkım sonucunda ortaya çıkabilecek elektrik ve doğalgaz kaçakları gibi tehlikeler elektriğin ve doğalgazın kesilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu konuda en önemli ayrıntı P-dalgalarının kamyonlar, makinalar, inşaatlar, patlamalar gibi lokal aktivitelerden ayrılabilmesi ve bu dalgaların doğru tespit edilebilmesine bağlıdır (de Grosbois, 2005). Çizelge 2.2’de bazı zeminler için P dalga hızları verilmiştir (Das ve Ramana, 2010).

**Çizelge 2.2.:**Zeminlere göre P-dalga hızları (Das ve Ramana, 2010)

Zemin cinsi	P-dalga hızı (m/s)
Sıkı kum	300
Gevşek kum	460
Çakıl	762
Islak kil	1220-1370
Granit	3960-5490
Kumtaşı	1370-3960

### **2.2.2.1. S-Dalgası**

$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  eşitliği (Eşitlik 2.37) göz önüne alınarak, Eşitlik 2.34, z eksenine ve Eşitlik 2.35, y eksenine göre türevi alınıp birbirinden çıkartıldığında,

$$\rho \frac{d}{dt^2} \left( \frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right) = G \nabla^2 \left( \frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right) \quad (2.40)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik 2.30 bu denklemde yerine yazıldığında

$$\rho \frac{d^2 \varpi_x}{dt^2} = G \nabla^2 \varpi_x \quad (2.41)$$

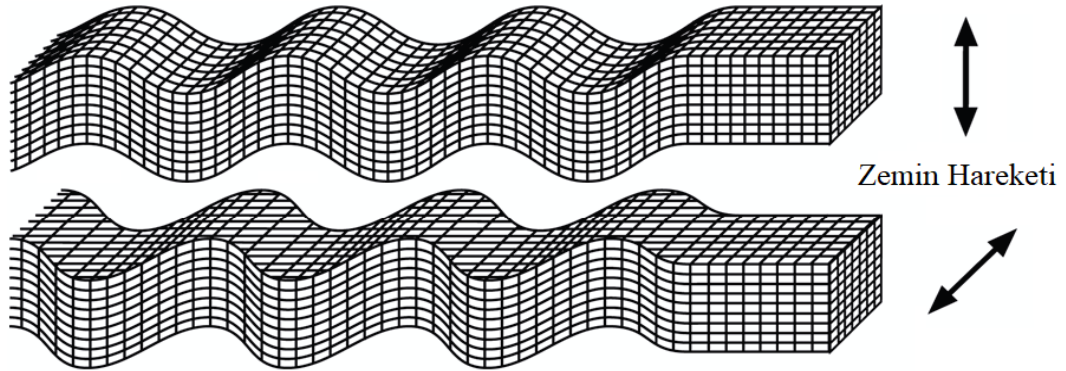
veya

$$\frac{d^2 \varpi_x}{dt^2} = \frac{G}{\rho} \nabla^2 \varpi_x = V_s^2 \nabla^2 \varpi_x \quad (2.42)$$

elde edilir. Burada  $V_s$  S-dalga hızı olan kayma dalga hızını ifade etmektedir (Şekil 2.7).

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.43)$$

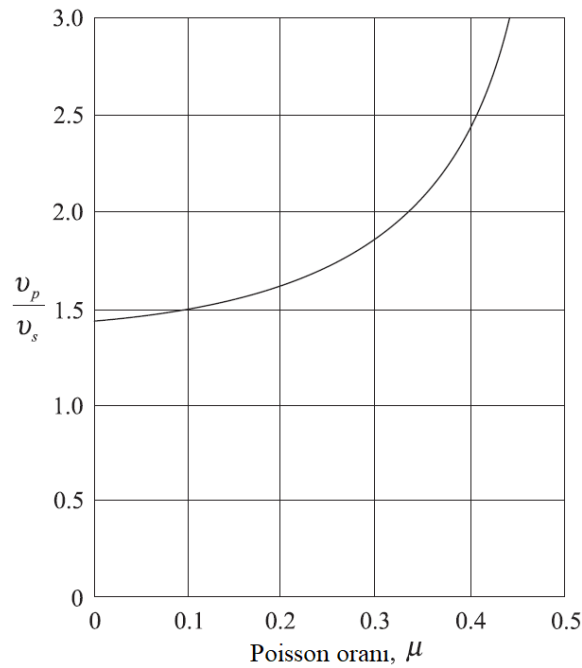
olarak elde edilmektedir (Das ve Ramana, 2010).



Şekil 2.7.:Kayma dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018)

Cisimde kayma deformasyonlarına sebep olan dalgalara sismolojide, S dalgaları, zemine uyguladığı kesme hareketinden dolayı kayma dalgaları (shear) dalgaları, içerisinde geçtiği cisim enine doğru hareket ettirdiği için enine dalga ve sismograflar tarafından P dalgalarından sonra ikinci kaydedilen dalga olma özelliği taşıdığından ikincil dalga şeklinde isimlendirilmektedir. S-dalgası da tıpkı P-dalgası gibi elastik dalga özelliği taşımaktadır (Aid ve Richards, 2002). S-dalgaları yapılarda oluşturdukları yıkıcı hasarlar nedeniyle kayma dalgası hızı ile sıvılaşma tahmini, kayma modülü ve kayma dalgası hızının ilişkisinin tespiti gibi konularda araştırma konusu olmuşlar ve arazi ve laboratuvar koşullarında yapılan çalışmalar ile zeminlere etkileyecek S-dalga hızları belirlenmeye

çalışılmıştır (Onur, 2015). Yapılan incelemeler sonucunda zeminlerin sıvılaşma direnci ile kayma dalgası hızı arasında bir bağlantı olduğu, zeminlerin su içeriğinin azalmasıyla zeminden geçen kayma dalgası hızının arttığı ve böylece zeminin mukavemetindeki bozulmanın azaldığı, zemine etki eden çevre basıncı ile zeminin su muhtevası arasında önemli bir bağlantı bulunduğu, zeminin dane dağılımı ve morfolojisinin kayma dalgası hızını etkilediği görülmüştür (Bartake ve Singh, 2007; Patel ve Bartake, 2008; Dong ve Lu, 2016). Şekil 2.8’de P ve S dalga hızları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere Poisson oranının tüm değerlerinde  $V_p/V_s$  değeri 1’den büyüktür. Bu da cisimlerde her zaman basınç dalgalarının kayma dalgalarından daha hızlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca Çizelge 2.3’de bazı zeminler için P ve S dalga hızları verilmiştir (Das ve Ramana, 2010).



Şekil 2.8.:P ve S dalgaları arasındaki ilişki (Das ve Ramana, 2010)

Çizelge 2.3.:Zeminlere göre S-dalga hızları (Das ve Ramana, 2010)

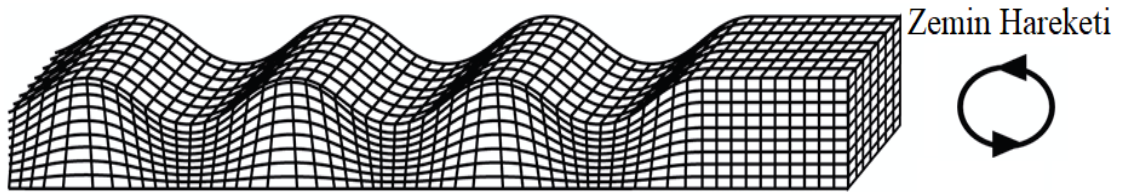
Zemin cinsi	S-dalga hızı (m/s)
Sıkı kum	90-150
Gevşek kum	230
Çakıl	180-215
Islak kil	150
Granit	2130-3350
Kumtaşı	610-2130

### 2.2.3. Elastik yarı sonsuz ortamda dalga yayılması

Sonsuz elastik homojen ortamdan geçen dalgalara Cisim Dalgaları denilmektedir ve bunlar P ile S dalgalarıdır. Bunlar dışında yarı sonsuz ortamın sınırına yakın bölgede yüzeye yakın olarak ilerleyen dalgalar da bulunmaktadır ve bunlara Yüzey Dalgaları ismi verilmektedir.

#### 2.2.3.1. Rayleigh dalgası

Yüzey dalgalarından ilki bu dalgaları 1885'te ilk defa tanımlayan bilim insanının adı ile anılarak Rayleigh ismini almıştır (Özkan, 2017). Rayleigh dalgalarının yayılması sırasında yüzeydeki daneler eliptik bir yörüngede harekete zorlanmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9.:Rayleigh dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018)

Rayleigh dalgasının yayılması okyanus dalgasına benzer şekilde gerçekleşmektedir ve etkisi derinlik ile hızla azalmaktadır. Rayleigh dalga hızı zeminin kayma hızı ve Poisson oranı kullanılarak hesaplanabilmektedir (Das ve Ramana, 2010).

Rayleigh dalgası (R-dalgası) yayılma hızı yaklaşık olarak,

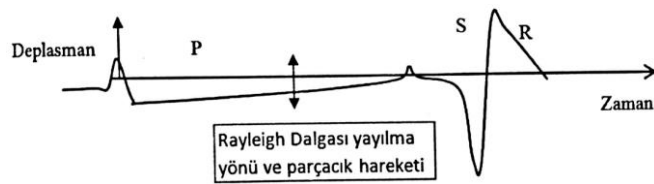
$$V_R \approx \frac{0.87+1.12\mu}{1+\mu} V_S \quad (2.44)$$

hesaplanmaktadır (Pichugin, 2008). Burada  $\mu$ =Poisson oranı ve  $V_s$ =Kayma dalgası hızı olarak verilmiştir. Çizelge 2.4'te zemine ait farklı Poisson oranlarına karşılık  $V_R/V_S$  bağıntısı sunulmuştur. Şekil 2.10'da ise bir kaynaktan dolayı yüzeyde oluşan hareketin yatay ve düşey bileşenleri gösterilmiştir. Yüzeydeki bir noktada, kaynaktan çıkan P-dalgasının varması ile göreceli olarak düşük bir burulma ve deplasman oluşmakta, sonrasında sakin geçen bir süreden sonra yüzeydeki nokta tekrar sarsılmakta ve bu sefer P-dalgasının oluşturduğu burulma ve deplasmandan daha büyük bir kuvvete maruz kalmaktadır. Bu iki dalgadan sonra ise R-dalgasının gelmesi ile çok daha şiddetli bir sarsıntı meydana gelmektedir (Özaydın, 1982). Bununla birlikte Rayleigh dalgaları

gittikçe yayılarak daha büyük bir hacmi kapsayacaklarından birim alana gelen enerji dalga yayıldıkça azalacaktır.

**Çizelge 2.4.:**R-Dalgası değerleri (Das ve Ramana, 2010)

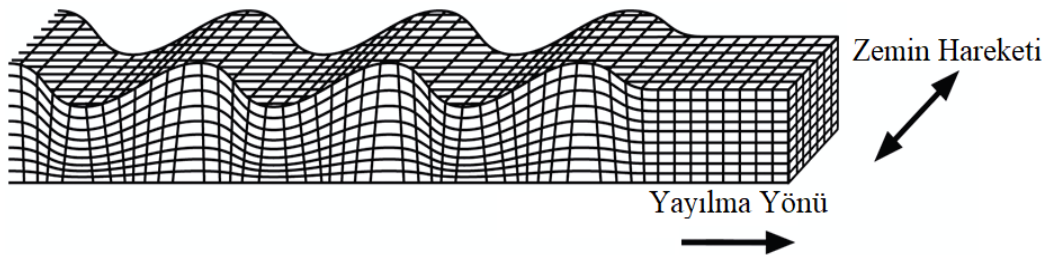
$\mu$	$V_R/V_S$
0.25	0.919
0.29	0.926
0.33	0.933
0.4	0.943
0.5	0.955



**Şekil 2.10.:**Rayleigh dalgası hareketi (Özkan, 2018)

### **2.2.3.2. Love dalgası**

Deprem sırasında oluşan bir diğer yüzey dalgası ise Love dalgalarıdır. Love dalgaları bu dalgaları 1911 yılında ilk kez keşfeden bilim insanı Augustus Edward Hough Love'dan dolayı bu ismi almışlardır. Ayrıca bu dalgalara Q dalgaları da denmektedir ve bu Almanca Quer yani yanal kelimesinden gelmektedir. Love dalgaları yayılırken zemin danelerini yatay yönde ve dalga yayılım doğrultusuna dik olarak hareket ettirirler (Şekil 2.11). Bu oluşan yüzey dalgasının yatay bileşeni bulunmamaktadır. Love dalgalarının yayılım hızı P ve S dalgalarına kıyasla daha düşüktür. Rayleigh dalgalarının yayılım hızından ise daha yüksektir (Love, 2015).



**Şekil 2.11.:**Love dalgası (Encyclopedia Britannica, 2018)

### 3. DİNAMİK ETKİLERE MARUZ KALAN KİL ZEMİNLERİN DAVRANIŞI

Zeminlerin dinamik yükler altında gösterdikleri davranışın doğru modellenebilmesi için zemine ait gerilme-deformasyon özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu sayede yapı-zemin etkileşimi problemlerinin analizi mümkün hale gelmektedir. Uygulamalarda yapı-zemin problemlerinin çözümünde dinamik kayma modülü ( $G$ ), sönüm oranı ( $D$ ), kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) ve poisson oranı ( $\mu$ ) gibi dinamik yükler altında zemin davranışını etkileyen parametreler kullanılarak analizler yapılmaktadır. Bu sebeple dinamik etkiler altında doğrusal olmayan zemin davranışını etkileyen faktörlerin doğru tespit edilmesi, dinamik zemin parametreleri kullanılarak yapılan analizlerin güvenliği açısından son derece önemli bir hâl almaktadır.

Doğrusal olmayan zemin davranışını kontrol eden parametreler ve bu parametrelerin gerilme-deformasyon davranışına etkisi daha önce birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Literatürde yapılan araştırmalar zeminlerin gerilme-deformasyon davranışında yapısı, zemin yoğunluğu, gerilme deformasyon geçmişi, boşluk oranı, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı gibi birçok etken olduğunu ortaya koymuştur.

Hardin ve Drnevich (1972a) yaptıkları çalışmada kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde hangi parametrelerin önemli olduklarını incelemişlerdir. İncelemelerinde kohezyonlu zeminlerde gerilme genliğinin, boşluk oranının, çevre basıncının ve doygunluk derecesinin zeminlerin kayma modüllerinde çok etkili olduğunu ve yine kayma modülü açısından aşırı konsolidasyon oranının az da olsa önemli olduğunu ancak yükleme frekansı, dane dağılımı, zemin yapısı gibi etkilerin çok da önemli olmadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca yine kohezyonlu zeminlerin sönüm oranlarına gerilme genliğinin, boşluk oranının, çevre basıncının çok etkili olduğunu ve aşırı konsolidasyon oranını ve yükleme frekansının az da olsa önemli olduğunu ancak dane çapı dağılımı, zemin yapısı, %0.5'in altındaki hacim değişiklikleri gibi faktörlerin önemli olmadığını ifade etmişlerdir.

Darendeli (2001) ise benzer olarak hem kayma modülü hem de sönüm oranı eğrilerinde gerilme genliği ve çevre basıncının önemli olduğunu söylemiştir. Buna ek olarak zemin tipi ile plastisite indisinin de çok önemli olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sönüm oranı eğrisinde yükleme frekansının önemli olduğunu ancak ne kayma modülü

eğrisi ne de sönüm oranı eğrisi açısından boşluk oranının, aşırı konsolidasyon oranının, doygunluk derecesinin veya zemin dane dağılımının önemli olmadığını ifade etmiştir.

Yeraltı ve yerüstü yapılarının, çeşitli yöntemlerle dinamik davranış analizleri yapılırken göz önüne alınması gereken önemli noktalardan birisi zeminin tekrarlı yükler altında gerilme-birim şekil değiştirme ve mukavemet davranışının modellenmesidir. Oluşturulacak model, zeminin tekrarlı yükler altındaki davranışını, önceden belirlenmiş birim kayma genliği aralıklarında mümkün olduğunca gerçeğe yakın tekrarlanmalıdır. Dinamik yüklerin özelliklerine ve büyüklüklerine bağlı olarak zeminde oluşacak birim deformasyonların seviyeleri de farklı olacaktır. Küçük birim deformasyonlara sebep olan makine titreşimi, trafikten doğan titreşimler ile rüzgâr titreşimleri gibi küçük genliklerde oluşan etkiler zeminin elastik davranmasına sebep olurken, depremler, nükleer patlamalar, heyelanlar gibi büyük birim deformasyonlarına sebep olacak dinamik etkilerde ise zeminde plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu nedenle zemine etki edecek doğru modelin seçilmesi ve zeminin özelliklerine etki eden faktörlerin de iyi bilinmesi gerekmektedir.

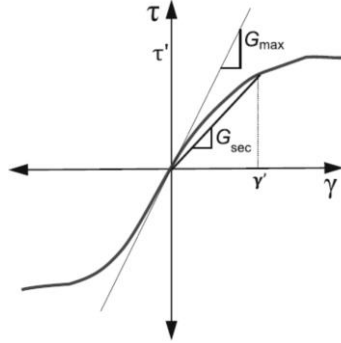
### 3.1. Gerilme-Deformasyon Davranışı

Statik veya dinamik yükler altında zeminler elastik ve plastik şekil değiştirmeler gösterdikleri bilinmektedir. Şekil değiştirmelerin bir kısmı elastik olmakla birlikte zeminlerde genellikle danelerin kırılması birbirine göre kayması ve yer değiştirmesinden dolayı plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir (Özaydın, 1982). Zeminlerin bu yükler altında gösterdikleri davranış idealize edilerek oluşturulan gerilme-deformasyon eğrisine histerisis ilmiği adı verilmektedir (Şekil 3.1) (Jia, 2018). Şekil 3.2’de görülen gerilme-birim şekil değiştirme davranışı ise simetrik yüklenmiş bir zemine aittir. Bu histerisis ilmiği, (ABCD eği) belirli tekrarlı birim kayma,  $\gamma_a$  değeri ve tekrarlı kayma gerilmesi,  $\tau_a$  değeri için çizilmiştir. A ve C ilmiğin uç noktalarıdır. Uç noktalar arasındaki iz (EAOCF eği), omurga eği olarak tanımlanmaktadır (Okur, 2002). Bir hiperbol olarak basitleştirilen eğin denklemleri,

$$\tau = \frac{\gamma_a}{\frac{1}{G} + \frac{\gamma_a}{\tau}} = f(\gamma) \quad (3.1)$$

olarak gösterilmektedir. Burada  $\tau$  zeminin kayma direncini,  $\gamma$  kayma birim deformasyonu ve  $G$  ise birim kayma deformasyonlarına tekabül eden kayma modülünü

simgelemektedir. Omurga eğrisine orijinden teğet geçen doğrunun eğimi maksimum dinamik kayma modülü,  $G_{max}$  olarak gösterilmektedir (Şekil 3.3).

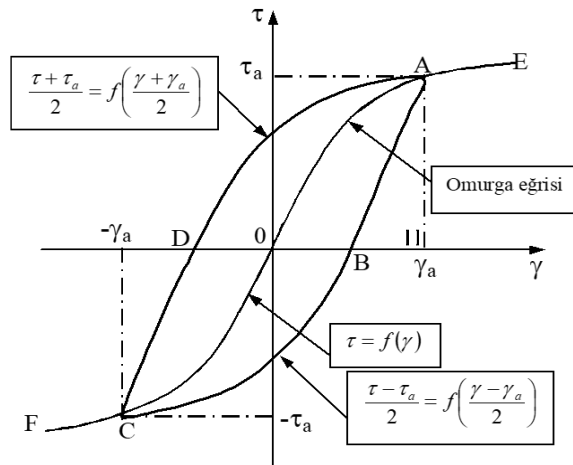


Şekil 3.1.:Histerisis ilmiği (Jia, 2018)

Histerisis ilmiğinin alanı ise bir çevrim içindeki enerji kaybı yani zeminin sönüm kapasitesi ile ilgili olup buradan sönüm oranı,

$$D = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{(ABCD) \text{Histerisis ilmiği}}{(AHO) \text{ Üçgen alanı}} \right] \quad (3.2)$$

olarak gösterilmektedir. Tekrarlı yükler altında birim kayma deformasyonu büyüdükçe kayma modülü azalırken sönüm oranı ise artmaktadır.



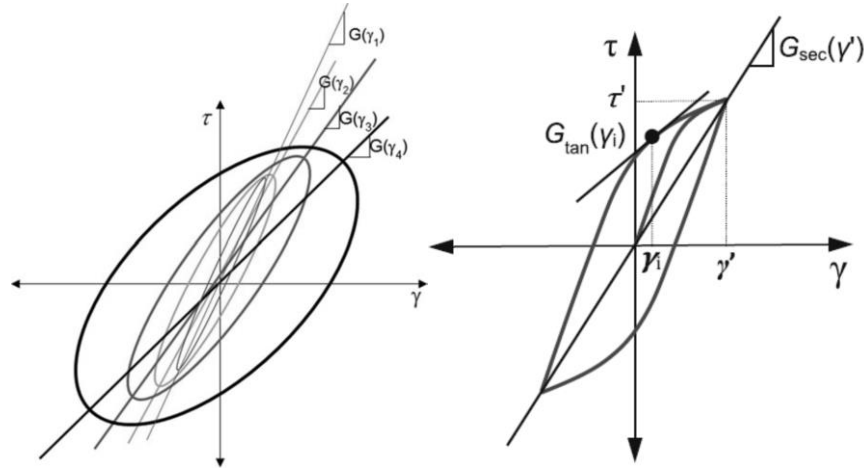
Şekil 3.2.:Tekrarlı yükleme sonucu gerilme-deformasyon ilişkisi (Ishihara, 1996).

Şekil 3.3'te kayma deformasyonu arttıkça bu artışa karşılık gelen kayma modülleri görülmektedir ve her bir deformasyona karşılık gelen kayma modülünün

tespiti şekile gösterildiği gibi yapılmaktadır. Burada eğim, zeminin rijitliğine bağlı bir büyüklük olup herhangi bir noktadaki tanjant dinamik kayma modülü,  $G_{\tan}$  olarak tanımlanmaktadır. Ancak, bir çevrim boyunca bu değer sürekli değişeceğinden ortalama bir değer olarak sekant dinamik kayma modülü,

$$G_{\text{sec}} = \frac{\tau'}{\gamma'} \quad (3.3)$$

işlemiyle bulunur. Burada  $\tau'$  tekrarlı kayma gerilmesi,  $\gamma'$  tekrarlı birim kayma genliğidir.  $G_{\text{sec}}$  histerisis ilmiğinin ortalama eğimidir ve dinamik kayma modülü olarak adlandırılır. Bu da zeminin dinamik etkiler altında daha doğru modellenmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.3.: Kayma modülü (Jia, 2018)

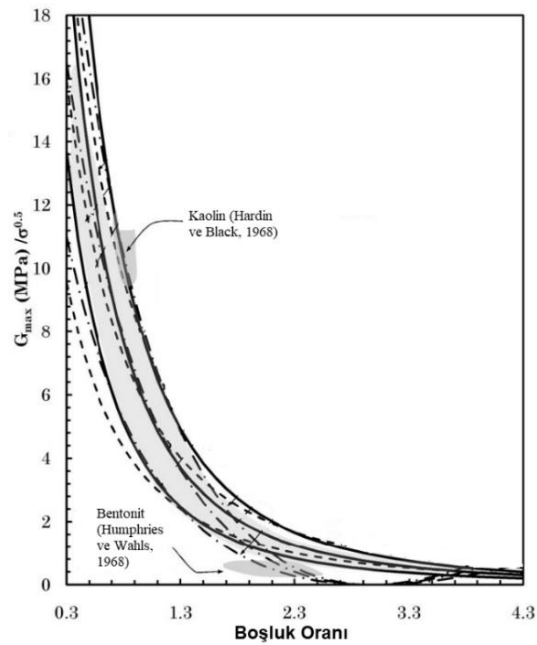
Kil zeminlerin uygulamalarda yapı-zemin problemlerinin çözümünde kullanılan dinamik kayma modülü ( $G$ ), sönüm oranı ( $D$ ), kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) ve poisson oranı ( $\mu$ ) gibi dinamik parametrelerin belirlenmesi zeminlerin gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerine bağlıdır. Bu sebeple zeminlere ait maksimum dinamik kayma modülünün ( $G_{\max}$ ), dinamik kayma modülü oranı ( $G_{\text{sec}}/G_{\max}$ ) ile sönüm oranının ( $D$ ) ve bunlarla tekrarlı birim kayma genliği ( $\gamma_a$ ) arasındaki ilişkinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

### 3.1.1. Dinamik kayma modülü

Birçok araştırmacı zemin kayma modülüne etki eden parametrelerin en önemlilerinin çevre basıncı ve boşluk oranı olarak ortaya koymuştur (Kim ve Novak,

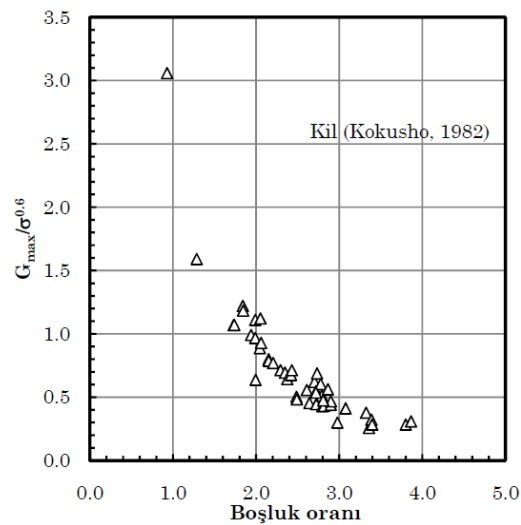
1981; Jamiolkowski vd., 1991; Vucetic ve Dobry, 1991; Kagawa, 1992; Darendeli, 2001; Teachavorasinskun vd., 2002; Kallioglou vd., 2008; Lanzo vd., 2009). Zeminin jeolojik yaşının yani maruz kaldığı çevre basıncı süresinin ise dinamik kayma modülüne etki eden diğer en önemli parametre olduğu düşünülmektedir (Afifi ve Richart, 1973; Anderson ve Stokoe, 1978; Kim ve Novak, 1981; Kokusho vd., 1982; Kagawa, 1992; Darendeli, 2001; Kallioglou vd., 2008). Maksimum dinamik kayma modülü ( $G_{max}$ ) birçok parametreden etkilenmekle birlikte Hardin ve Drenvich (1972a) bu etkinin kumlarda en fazla boşluk oranı ve çevre basıncında görüldüğünü ifade etmiştir. Darendeli (2001) ise normalleştirilmiş kayma eğrisinde ( $G/G_{max}$ ) veya sönüm oranında kil zeminlerde boşluk oranının çok etkin olmadığını ifade etmiştir. Yapılan araştırmalar  $G/G_{max}$  eğrisinde boşluk oranı değişiminin bir etkisi olmasa da  $G_{max}$  üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir (Hardin ve Richart, 1963; Hardin ve Drnevich, 1972a; Lo Presti vd., 1993; Robertson vd., 1995; Lo Presti vd., 1997) kumlar üzerinde dinamik deneyler gerçekleştirerek boşluk oranı arttıkça maksimum dinamik kayma modülünde bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Normal konsolide killerde boşluk oranının dinamik kayma modülüne etkisinin incelenmesi amacıyla Humphries ve Wahls (1968) rezonant kolon deneyi kullanarak gerçekleştirdikleri deneylerde farklı çevre basınçlarında ve farklı boşluk oranlarını kullanmışlardır. Yapmış oldukları deneyler sonucunda boşluk oranı artışının dinamik kayma modülünde bir azalışa sebep olduğu görülmüştür (Şekil 3.4). Normal konsolide kilde  $G_{max}$ 'a boşluk oranının etkisinin incelenmesiyle Hardin ve Black (1968) rezonant kolon deneyi ile farklı çevre basınçlarında ve boşluk oranlarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde Humphries ve Wahls'in (1968) deneylerine benzer şekilde boşluk oranının artmasıyla belirli bir korelasyona bağlı olarak  $G_{max}$ 'ta azalma meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4.:Boşluk oranı  $G_{max}$  ilişkisi (Bui vd., 2010)

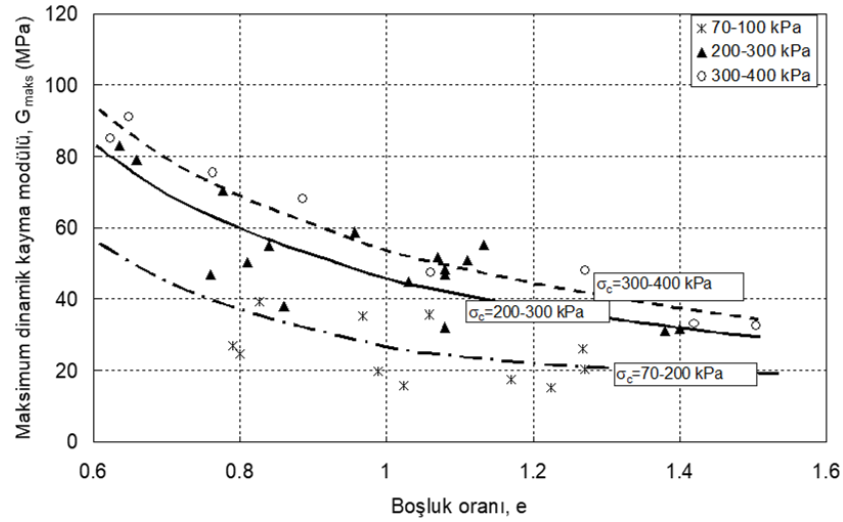
Kokusho vd. (1982) normal konsolide örselenmemiş killerin dinamik kayma modülüne boşluk oranının etkisini incelemişlerdir. Farklı boşluk oranlarında hazırladıkları numunelerini dinamik üç eksenli deneye tabi tutarak gerçekleştirdikleri deneylerde  $G_{max}$  boşluk oranının artmasıyla azalmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5.:Boşluk oranı normalize  $G_{max}$  ilişkisi (Kokusho vd., 1982)

Okur (2002) yapmış olduğu çalışmada örselenmemiş kil zeminlerden alınan numunelerde dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirerek zeminlerin dinamik

davranışlarına etki eden parametreleri incelemişlerdir. İncelenen parametrelerden bir tanesi de boşluk oranının maksimum dinamik kayma modülüne etkisidir. Araştırmacı farklı boşluk oranlarında ve farklı çevre basınçlarında gerçekleştirdiği deneylerde boşluk oranının artmasıyla maksimum dinamik kayma modülünde bir azalma meydana geldiğini ve bu azalmanın bir korelasyona bağlı olarak gerçekleştiğini söylemiştir (Şekil 3.6).

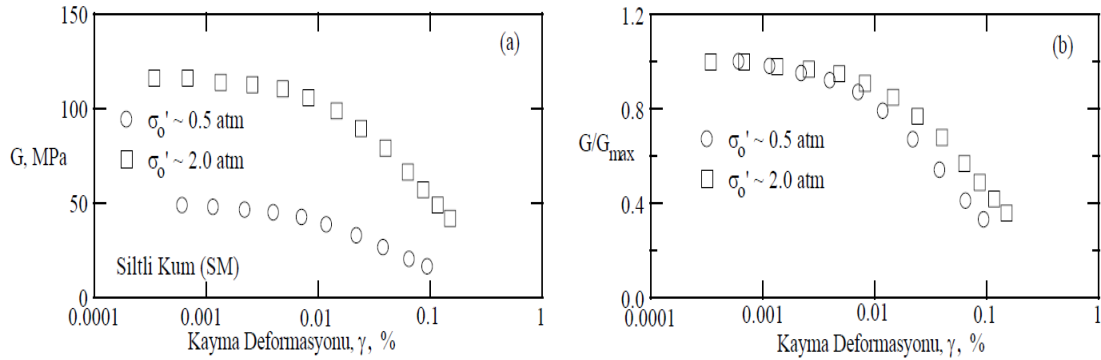


Şekil 3.6.:Boşluk oranı ile  $G_{max}$  değişimi (Okur, 2002)

Yapılan araştırmalar sonucunda kum, kil ve silt zeminlerde boşluk oranının artması  $G/G_{max}$  eğrisine ve  $D'$ 'ye etki etmese de  $G_{max}$ 'a etkisi önemlidir. Yapılan birçok araştırma efektif gerilme artışının  $G_{max}$  üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Literatürde yapılmış olan birçok çalışma incelendiğinde efektif gerilmenin artışıyla dinamik kayma modülünde de artış meydana geldiği görülmüştür (Hardin ve Drenvich, 1972a; Iwasaki vd., 1978; Kokusho, 1980; Ishibashi ve Zhang, 1993; Darendeli, 2001; Okur, 2002; Onur vd., 2012). Bu çalışmalarda çok çeşitli zeminler ve deney yöntemleri kullanılmıştır. Ancak elde edilen eğrilerde her ne kadar efektif gerilme artışıyla dinamik kayma modülünde artış olsa da eğriler kullanılan zemin özelliklerine göre farklılık göstermektedir.

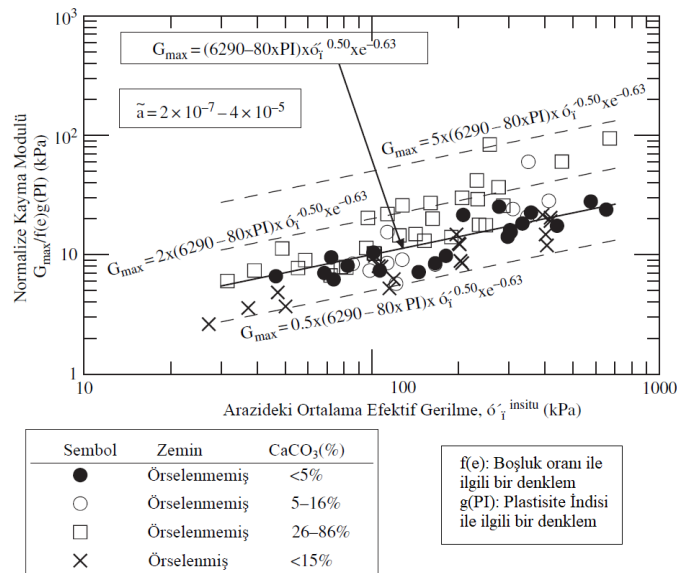
Darendeli (2001), siltli kum numunelerini kullanarak 50kPa'lık ve 200kPa'lık çevre basıncında rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirdiği deneylerde araştırmacı arazi koşullarının gerçekliğini modelleyebilmek amacıyla 50kPa'lık ve 200kPa'lık çevre basıncının kullanıldığını belirtmiştir. 50kPa'lık çevre basıncında rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyi ile kayma modülü eğrisi

çizilen numune bir kez de 200kPa'lık çevre basıncında dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Daha sonra numunenin normalize kayma modülü eğrisi çizilmiştir (Şekil 3.7). Çevre basıncının artmasıyla  $G_{max}$ 'ta artış meydana gelmiştir.  $G/G_{max}$  eğrisinde de çevre basıncının artması normalize kayma modülü eğrisinde artış meydana gelmesine sebep olmuştur (Şekil 3.7).



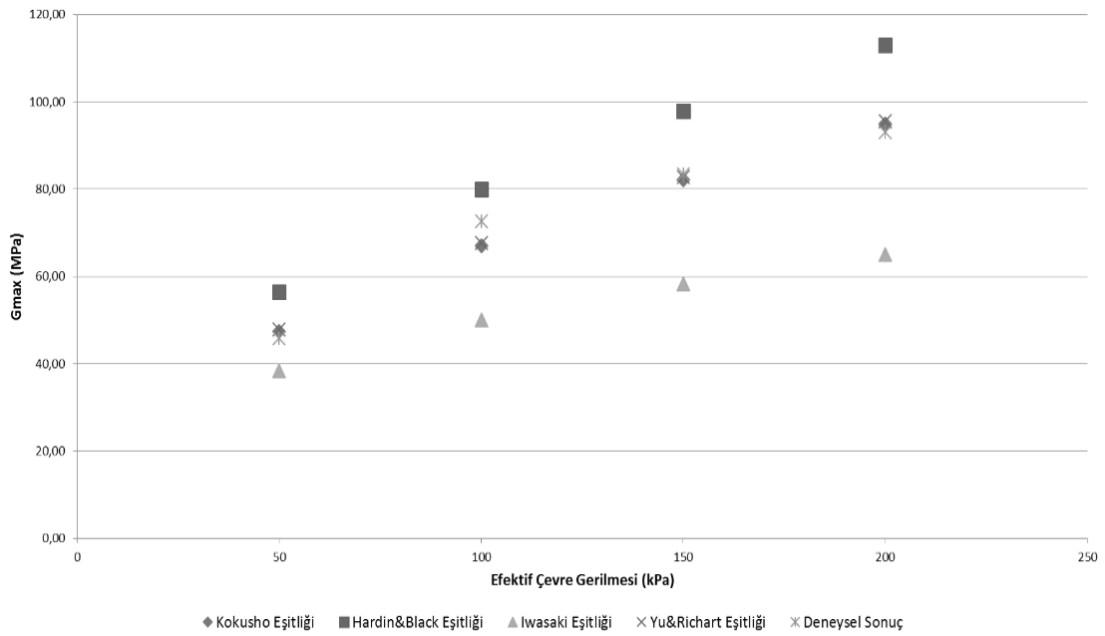
Şekil 3.7.:Çevre basıncı ile  $G_{max}$  değişimi (Darendeli, 2001)

Kallioglou ve diğ. (2008) farklı plastisite oranlarında ve farklı kalsiyum karbonat ( $CaCO_3$ ) içeren kil zeminlerde çevre basıncının dinamik kayma modülü üzerindeki etkisini incelemiştir. Farklı durumlar için kullanılacak bir takım eğri denklemleri sunmuşlardır (Şekil 3.8) Çalışma sonucunda çevre basıncının artışı maksimum  $G_{max}$ 'da da artışa sebep olmuştur.



Şekil 3.8.:Efektif gerilme ile  $G_{max}$  değişimi (Kallioglou vd., 2008)

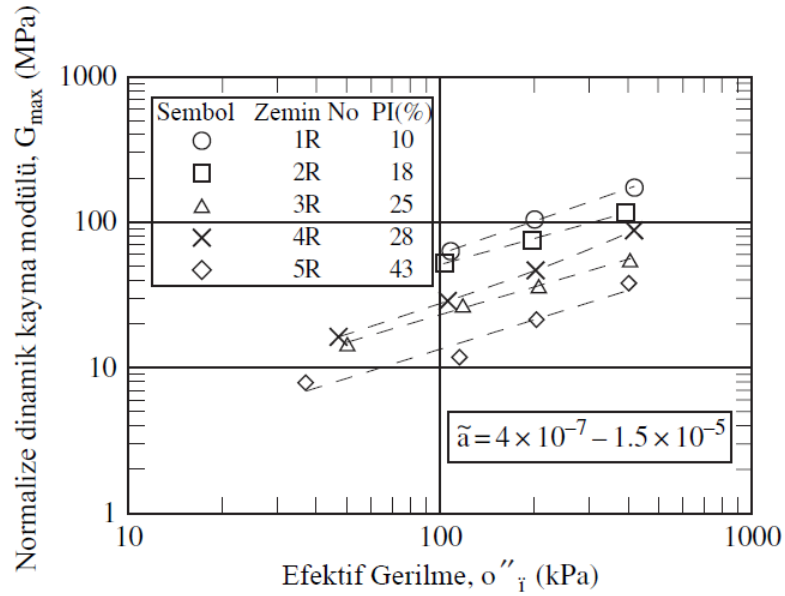
Onur (2015), çalışmasında Toyoura kumu kullanarak rezonant kolon deneyi ile çevre basıncındaki artışın  $G_{max}$ 'a etkisini araştırmıştır. Yapmış olduğu çalışmada 50, 100, 150 ve 200kPa'lık çevre basınçlarında rezonant kolon deneyi ile kullanmış olduğu zeminin maksimum dinamik kayma modülünü tespit etmiş ve daha sonra bunu literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırmıştır (Şekil 3.9). Çalışmasının sonucunda çevre basıncının artmasıyla  $G_{max}$ 'da da artış gözlenmiştir.



Şekil 3.9.:Efektif çevre gerilmesi ile  $G_{max}$  değişimi (Onur, 2015)

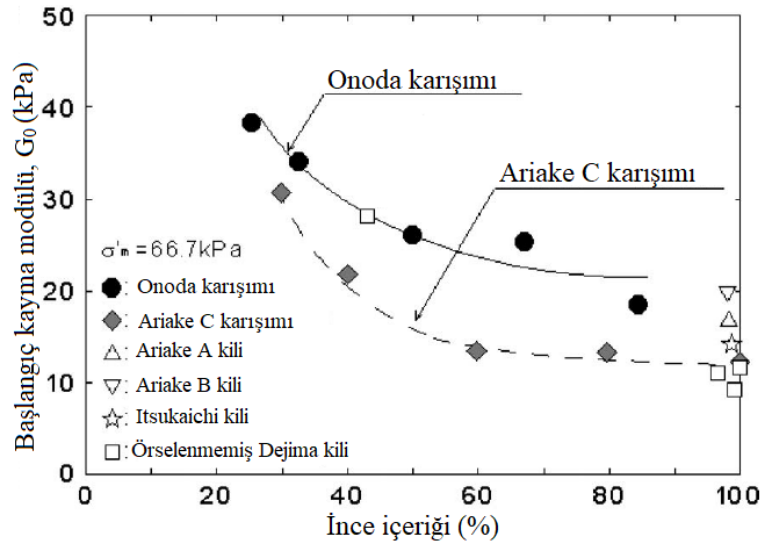
Geçmişte yapılan bir takım çalışmalar, maksimum aşırı konsolidasyon oranına bağlı bir fonksiyonla plastisite indisi arttıkça dinamik kayma modülünün arttığını ortaya koymuştur (Hardin and Drnevich 1972a; Kim ve Novak 1981; Vucetic ve Dobry 1991). Bazı araştırmacılar ise maksimum dinamik kayma modülü üzerinde plastisite indisinin önemli bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir (Okur ve Ansal 2007). Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar plastisite indisinin artışı ile  $G_{max}$ 'da bir azalma olduğunu göstermektedir. (Kagawa 1992; Yamada vd., 2008; Kallioglou vd., 2008).

Kallioglou vd., (2008) farklı plastisite oranlarında CL ve CH kil zeminleri kullanarak rezonant kolon deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada plastisite indisi oranı azaldıkça zeminlere ait maksimum dinamik kayma modülünün azaldığı görülmüştür (Şekil 3.10)



Şekil 3.10.:Efektif gerilme ile normalize  $G_{max}$  değişimi (Kallioglou vd., 2008)

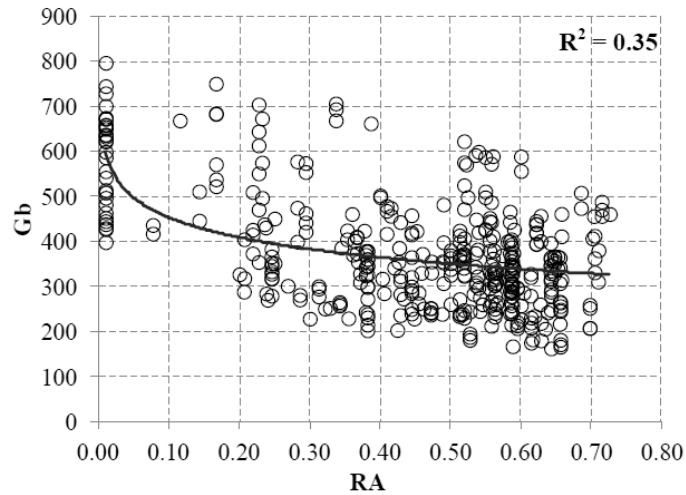
Yamada vd., (2008) dinamik basit kesme deneyi kullanarak kil zemine farklı oranlarda kum katarak dinamik kayma modülünün değişimini incelemişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları deney sonucunda zemindeki kil içeriği arttıkça dinamik kayma modülünde azalma meydana geldiğini görmüşlerdir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11.:İnce içeriği ile kayma modülü değişimi (Yamada vd., 2008)

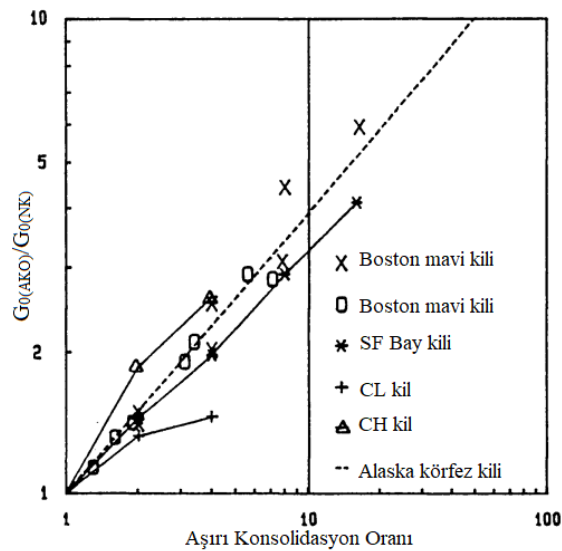
Carlton ve Pestana (2012) yaptıkları çalışmada likit limit ve plastisite indisine bağlı olmak üzere relatif aktiflik ( $RA=PI/LL$ ) katsayısı ve  $G_b$ ,  $G_{max}$ 'a bağlı bir fonksiyon

olmak üzere bir grafik sunmuşlardır. Sunmuş oldukları bu grafikte literatürde yapılan çalışmalardaki verileri kullanarak sabit boşluk oranı ve çevre basıncında likit limit ve plastisite indisinin maksimum dinamik kayma modülüne etkisini sunmuşlardır (Şekil 3.12).



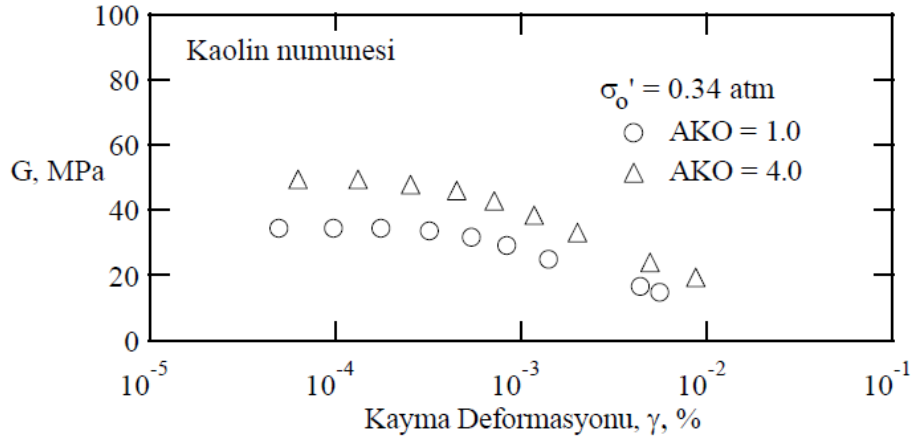
Şekil 3.12.:RA ile kayma modülü değişimi (Carlton ve Pestana, 2012)

Weiler (1988) çalışmasında killerde aşırı konsolidasyon oranının (AKO) kayma modülüne (G) etkisini araştırmıştır. 6 farklı kil kullanarak yaptığı incelemelerde aşırı konsolide killerin kayma modüllerinin normal konsolide killerin kayma modüllerine oranı aşırı konsolidasyon arttıkça artmaktadır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13.:AKO ile G değişimi (Weiler, 1988)

Darendeli (2002) çalışmasında kaolin kili kullanarak kayma modülünün aşırı konsolide oranı değişimini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada aşırı konsolidasyon oranı arttıkça zeminin kayma modülünde artış gözlenmiştir (Şekil 3.14). Aynı şekilde Dobry ve Vucetic (1988) çalışmalarında aşırı konsolidasyon oranı artışı ile maksimum dinamik kayma modülünün de arttığını ifade etmişlerdir.



Şekil 3.14.:Kil zeminde AKO ile G değişimi (Darendeli, 2002)

Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda araştırmacılar kohezyonlu zeminleri etkileyen parametreleri kullanarak  $G_{max}$ 'ın tespit edilmesi için birçok formül önermişlerdir. Çizelge 3.1'de bu formüller özet olarak sunulmuştur. Burada  $A_{ij}$  boyutsuz rijitlik katsayısını,  $f(e)$  boşluk oranı fonksiyonunu,  $\sigma_{ij}$  efektif gerilmeyi,  $n_{ij}$  ise efektif gerilme katsayısını simgelemektedir. Kullanılan genel formül,

$$G_{max(ij)} = A_{ij}f(e)\sigma_i^{n_i}\sigma_j^{n_j} \quad (3.4)$$

şeklinde sunulmuştur (Kallioglou vd., 2008).

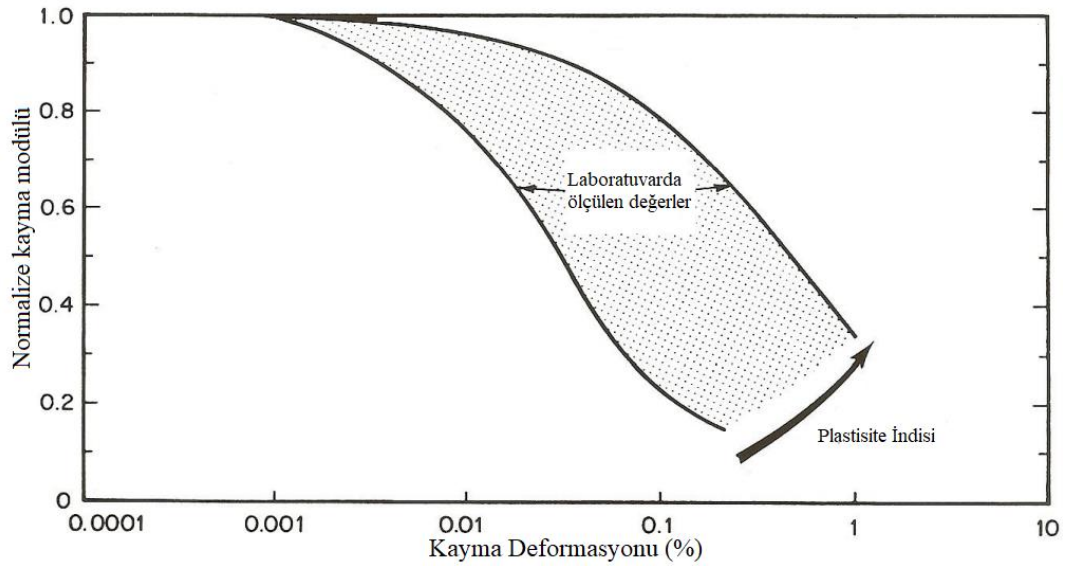
**Çizelge 3.1.:**  $G_{max}$  'in tespitinde kullanılan ampirik formüller (Kallioglou vd., 2008)

Yazar	A	F(e)	n	Zemin cinsi	Deney sistemi
Hardin ve Black (1968)	3300	$(2,97-e)^2/(1+e)$	0.5	Kaolin	Rezonant kolon
Marcuson ve Wahls (1972)	4500	$(2,97-e)^2/(1+e)$	0.5	Kaolin (PI=35)	Rezonant kolon
	450	$(4.4-e)^2/(1+e)$	0.5	Bentonit (PI=60)	
Zen ve Umerhara (1978)	2000~4000	$(2.97-e)^2/(1+e)$	0.5	Yoğrulmuş kil (PI=0-50)	Rezonant kolon
Kokusho vd., (1982)	141	$(7.32-e)^2/(1+e)$	0.6	Örselenmemiş kil (PI:40-85)	Dinamik üç eksenli
Vrettos ve Savidis (1999)	9600	$1/(1 + 1.2e^2)$	0.5	Killer (PI = 9-27) e = 0.583-1.068)	Rezonant kolon

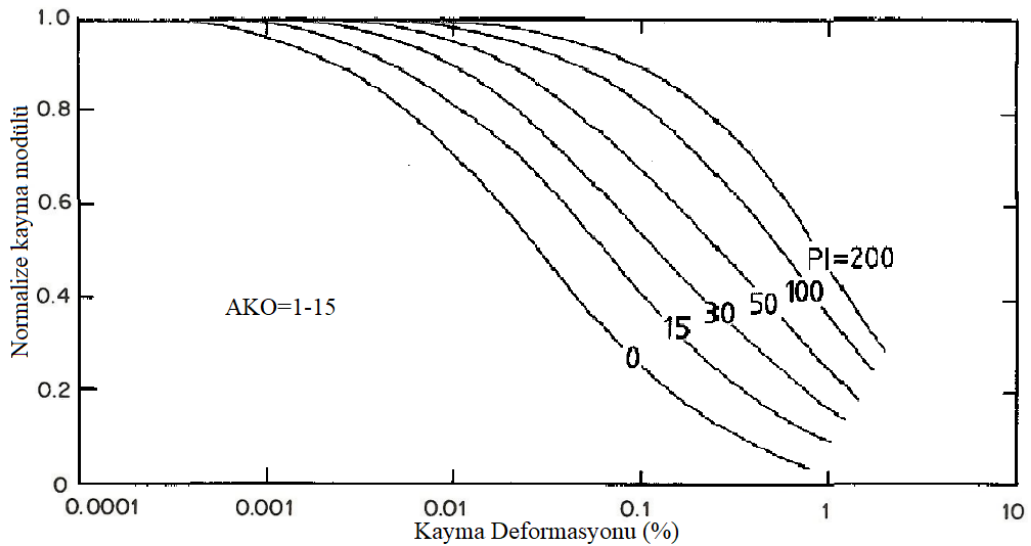
### 3.1.2. Normalize dinamik kayma modülü

Plastisite indisinin ve zemin tipinin normalize dinamik kayma modülü eğrisinde oldukça önemli olduğunu ve plastisite indisinin artmasıyla  $G/G_{max}$  değerlerinin arttığı birçok araştırmacı tarafından söylemiştir (Kokusho vd., 1980; Sun vd., 1988; Dobry ve Vucetic, 1987; Vucetic ve Dobry, 1991; Darendeli, 2001; Okur, 2002; Okur ve Ansal, 2007; Kallioglou vd., 2008; Das ve Ramana, 2010; Vardanega ve Bolton, 2013).

Dobry ve Vucetic (1987) plastisite indisi (PI) ve AKO'nun zeminlerin dinamik karakterini belirlemek için çok önemli iki parametre olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar o güne kadar yapılmış ve ulaşabildikleri tüm literatürdeki sonuçları inceleyerek plastisite indisi artışıyla normalize dinamik kayma modülünün artışı gösteren bir çalışma ortaya sunmuşlardır (Şekil 3.15). Bu çalışmadan yola çıkarak Vucetic ve Dobry (1991) yaptıkları çalışmada farklı plastisite oranları için normalize kayma modülü eğrileri sunmuşlardır (Şekil 3.16).



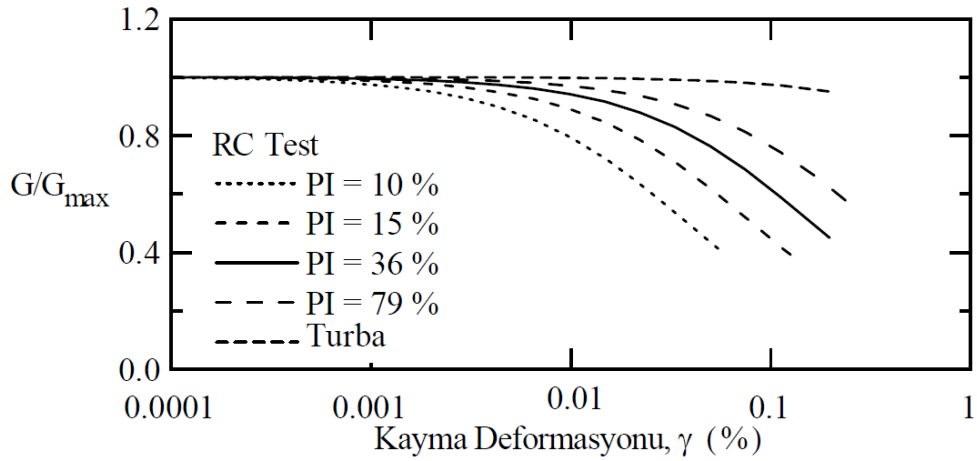
Şekil 3.15.:  $G/G_{max}$  eğrisinin PI ile değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991)



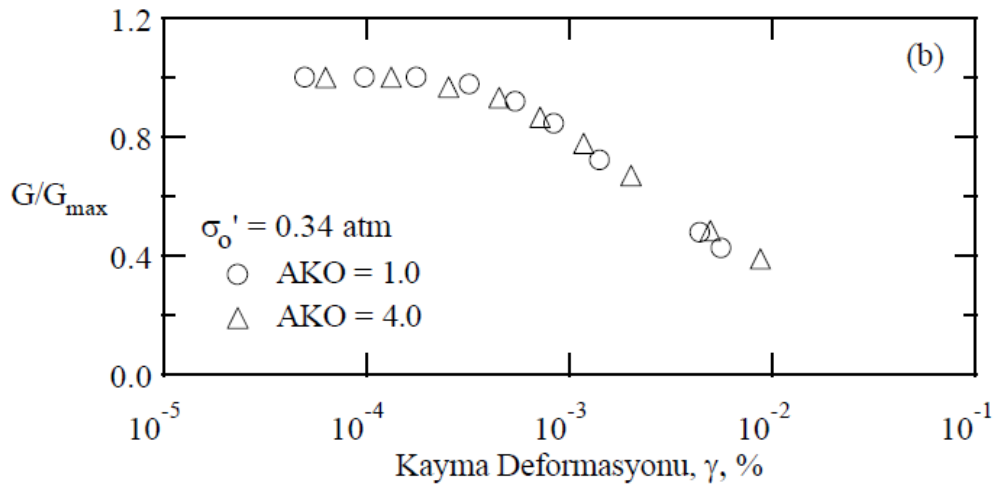
Şekil 3.16.: PI'ya bağlı olarak  $G/G_{max}$  eğrisinin değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991)

Darendeli (2001) rezonant kolon deneyi kullanarak yaptığı çalışmada plasitite indisinin normalize dinamik kayma modülüne etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada 5 farklı plasitite indisine sahip zemin için normalize dinamik kayma modülü eğrisi vermiştir (Şekil 3.17). Araştırmacı plasitite indisi arttıkça normalize dinamik kayma modülü eğrisinin de yükseldiğini bunun literatürdeki tüm çalışmalarda ve formüllerde aynı olduğunu söylemiştir. Aynı zamanda araştırmacı yapmış olduğu çalışmada elde ettiği sonuçlara göre normalize kayma modülü eğrisinde aşırı konsolide oranının çok da önemli olmadığını ifade etmiştir (Şekil 3.18). Bununla birlikte, aşırı

konsolidasyon oranının doğrusal olmayan zemin davranışları üzerinde bir etkisi olması gerektiği ve bir sonraki normalleştirilmiş modül azaltma ve malzeme sönümleme eğrilerinin geliştirilmesinde mutlaka dikkate alınması gerektiğini söylemiştir.



Şekil 3.17.:PI ile G/Gmax değişimi (Darendeli, 2001)

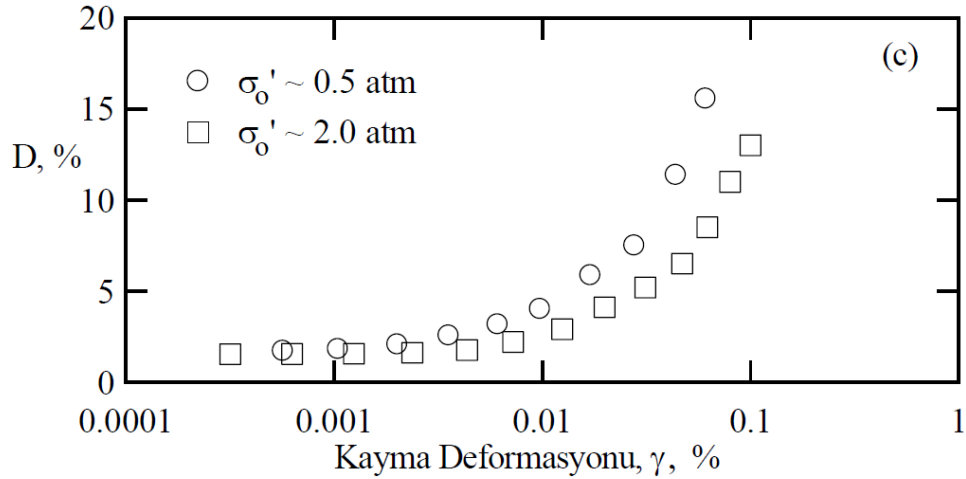


Şekil 3.18.:AKO ile G/Gmax değişimi (Darendeli, 2001)

### 3.1.3. Sönüm oranı

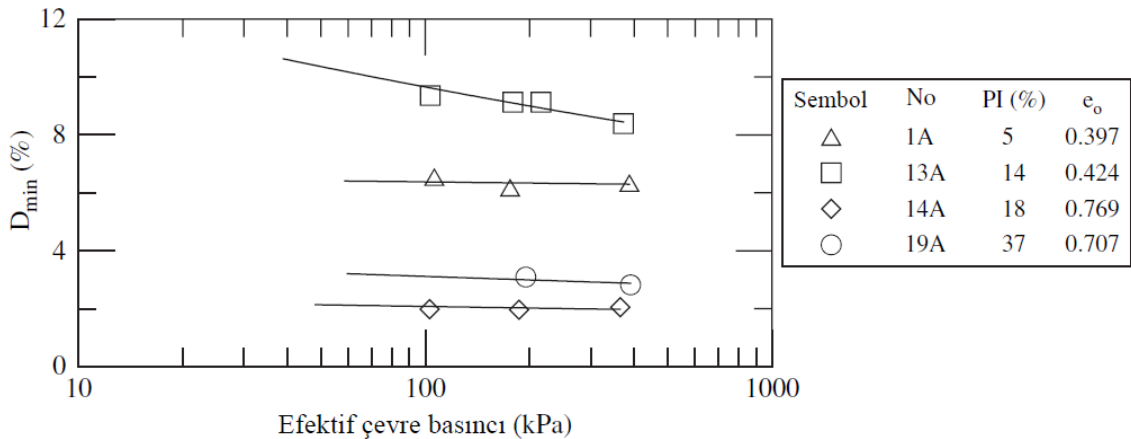
Hardin ve Drenvich (1972a) ve Darendeli (2001) sönüm oranı eğrilerinde çevre basıncının etkisinin kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde çok önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan birçok araştırma zeminlerde çevre basıncının artmasıyla sönüm oranının azaldığını göstermiştir (Kim ve Novak, 1981; Okur ve Ansal, 2007; Kallioglou vd., 2008; Zhu vd., 2014).

Darendeli (2001), siltli kum zeminde 50kPa'lık ve 200kPa'lık çevre basınçlarında rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Artan çevre basıncında sönüm oranı eğrisini incelemiştir. Yapılan çalışmada çevre basıncının artmasıyla sönüm oranı eğrisinde bir azalma meydana geldiği görülmüştür (Şekil 3.19).



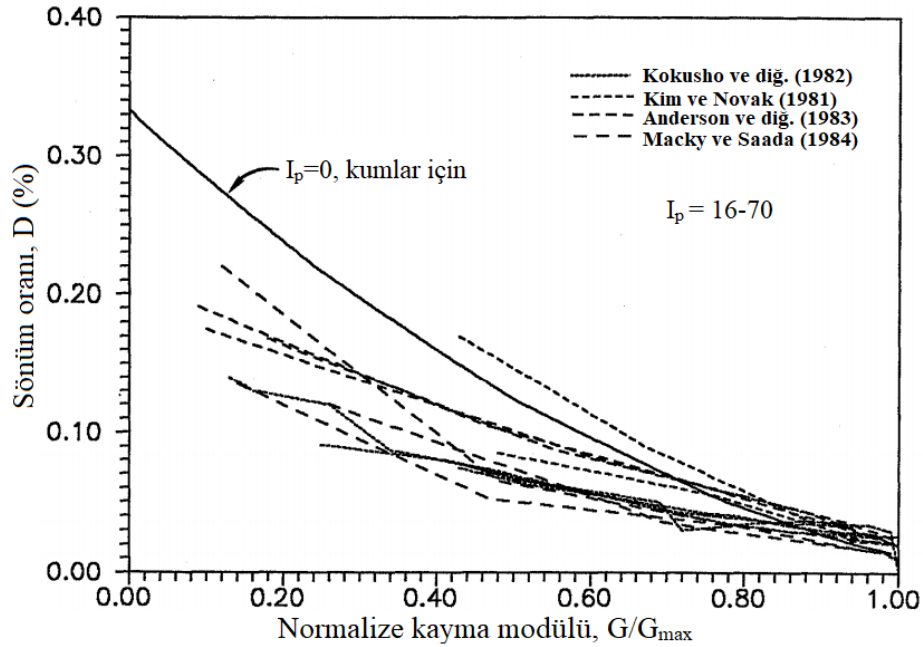
Şekil 3.19.:Çevre basıncına bağlı olarak D değişimi (Darendeli, 2001)

Kallioglou vd. (2008) rezonant kolon deney cihazı kullanılarak örselenmiş ve örselenmemiş kohezyonlu zeminlerin dinamik parametrelerini incelemiştir. Bu amaçla farklı özelliklere sahip kil zeminleri kullanarak çevre basıncının sönüm oranı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmalarında minimum sönüm oranı ( $D_{min}$ ) efektif çevre basıncının artmasıyla azalmıştır. Bu durumun tüm numuneler için aynı olduğu görülmüştür (Şekil 3.20).



Şekil 3.20.:Efektif çevre basıncı ile  $D_{min}$  değişimi (Kallioglou vd., 2008)

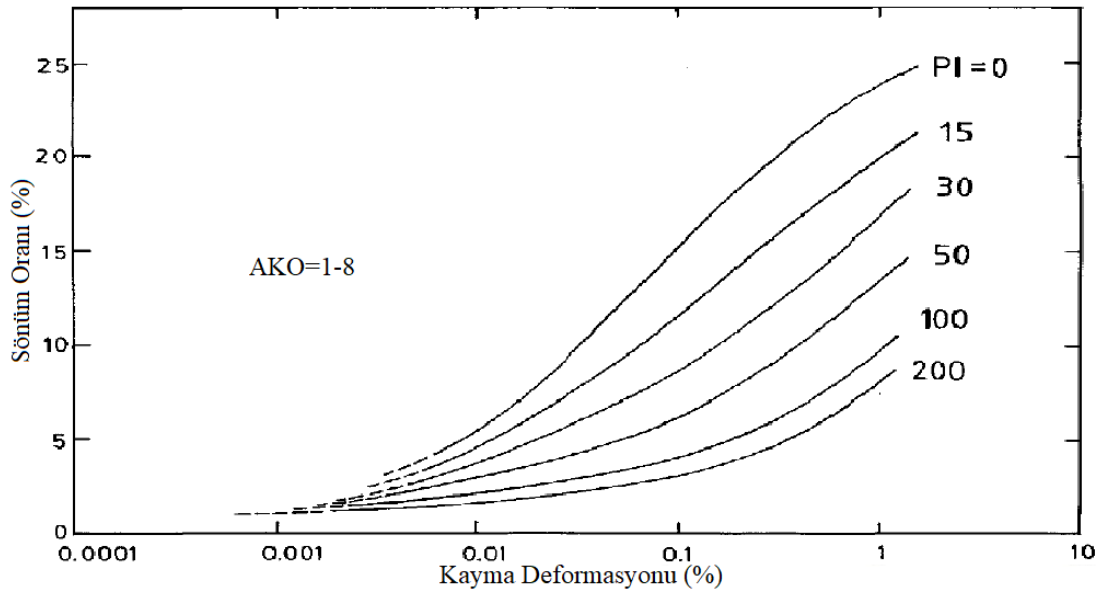
Ishibashi ve Zhang (1993), yaptıkları çalışmada normalize kayma modülü ve sönüm arasındaki benzer davranışı incelemişlerdir. Plastisite indisi 16 ile 70 arasında değişen literatürdeki çalışmaların sönüm oranları ve normalize kayma modüllerini kullanarak eğriler çizmişlerdir. Çalışmalarında  $G/G_{max}$  artışına karşılık  $D$ 'nin azaldığını görmüşlerdir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21.:  $G/G_{max}$  ile  $D$  oranının incelenmesi (Ishibashi ve Zhang, 1993)

Hardin ve Drnevich (1972a) ve Darendeli (2001) yaptıkları çalışmalarda sönüm oranı eğrisine plastisite indisi ve zemin türünün çok etkili olduğunu belirtmişlerdir. Normalize dinamik kayma modülü eğrisine benzer şekilde literatürde karşılaşılan bütün çalışmalarda plastisite indisinin artmasının sönüm oranı eğrisinde azalış meydana getirdiği görülmektedir (Kokusho vd., 1982; Sun vd., 1988; Dobry ve Vucetic, 1987; Vucetic ve Dobry, 1991; Darendeli, 2001; Lanzo ve Vucetic, 1999; Okur, 2002; Okur ve Ansal 2007; Kallioglou vd., 2008; Yamada vd., 2008; Sun vd., 2012).

Vucetic ve Dobry (1991) tarafından yapılan çalışmada literatürdeki sonuçlar karşılaştırılarak plastisite indisi artışıyla sönüm oranı değişimi incelenmiştir (Şekil 3.22). Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma sonucunda zemindeki plastisite oranının artışıyla sönüm oranında azalma meydana geldiğini görmüşlerdir.



Şekil 3.22.:PI ile D'nin değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991)

Hardin ve Drnevich (1972a) yaptıkları çalışmada kohezyonlu zeminlerin sönüm oranı eğrilerinde konsolidasyon oranının az önemli olduğunu, Dobry ve Vucetic (1987) aşırı konsolidasyon oranının sönüm oranında bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Darendeli (2002) ise sönüm oranı eğrisinde konsolidasyon oranının çok önemli olmadığını belirtmiştir. Ancak Darendeli (2002) normalize kayma modülü için söylemiş olduğu aşırı konsolidasyon oranının zemine ait doğrusal olmayan davranışları etkilemesi gerektiği ile ilgili sözünü sönüm oranı için de kullanmıştır. Okur (2002) dinamik üç eksenli deneyi kullanarak kohezyonlu zeminlerde yaptığı analizlerde zeminin plastisite indisine bağlı olarak belirli bir birim kayma deformasyonu için Eşitlik 3.5'i önermiştir.

$$D=21.05 \times 0.99^{PI} \times [1.17 - \exp(-12.75 \times 0.99^{PI} \cdot \gamma_a)] \quad (3.5)$$

Zeminde sönüm oranı bulunurken en önemli etkenlerden biri de minimum sönüm oranının bulunmasıdır (Darendeli, 2001). Ancak  $D_{min}$  tek başına sönüm davranışının belirlenmesi için yeterli değildir bu sebeple  $D_{max}$ 'ın da bulunması gerekmektedir (Drenvich, 2017).

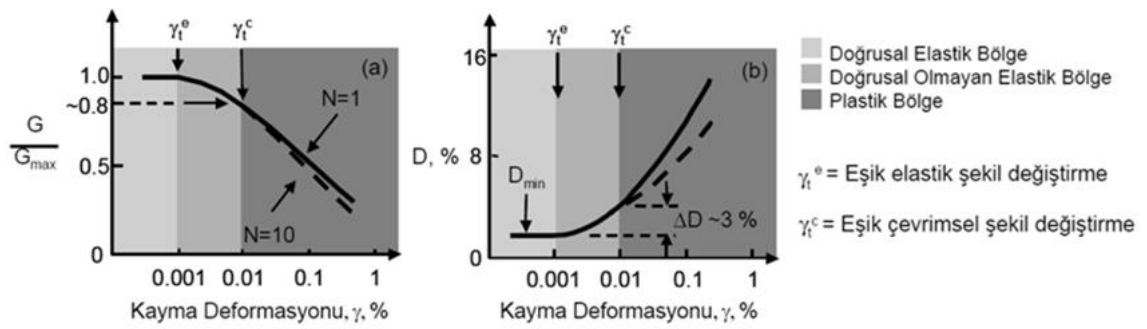
### 3.2. Mukavemet Özellikleri

Tekrarlı gerilmeler zeminlerde efektif gerilmenin azalmasına dolayısıyla drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğin azalmasına sebep olmaktadır. Suya doymuş zeminler, drenajsız koşullar altında tekrarlı gerilmelere maruz kaldıklarında zeminler içerisinde

boşluk suyu basınçları oluşmaya başlamaktadır. Oluşan boşluk suyu basınçları belirli bir sınırı geçtiğinde zemin yapısı ve özelliklerinde değişiklikler meydana gelmekte ve bu değişiklikler sonucunda, artan çevrim sayısı ile beraber zemin yumuşamaya başlamaktadır. Yumuşamaya başlayan zemin ise bir süre sonra mukavemetini kaybetmektedir. Bunun yanında kısmen drenajlı koşullar altında tekrarlı gerilmeye maruz kalan normal konsolide zeminlerde her çevrimde giderek boşluk suyu basıncının azaldığı görülmektedir. Drenaja izin verilen sürede ise boşluk suyu basıncı dağılımından dolayı boşluk oranlarında azalma meydana gelmektedir. Buna karşı aşırı konsolide zeminlerde ise her çevrimde boşluk suyu basıncının giderek arttığı ve boşluk suyu basıncının dağılımı esnasında boşluk oranlarında artış meydana geldiği görülmektedir (Nieto Leal ve Kaliakin, 2016). Drenajlı koşullar altında ise tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminlerde eşik birim deformasyon değeri aşıldığında zemin yapısının bozulması sonucunda hacim değişiklikleri oluşmakta ve tekrarlı gerilmenin devamında zeminde kalıcı deformasyonlar ve en sonunda yenilme görülmektedir (Jia, 2018). Zemin davranışında tekrarlı gerilmeler sonucunda meydana gelen bu değişiklikler lineer elastik, elasto-plastik ve plastik olmak üzere üç farklı bölümde incelenmektedir. Lineer elastik bölgede zemin lineer elastik gerilme-şekil değiştirme davranışı göstermektedir. Bu aralıkta hesaplanan maksimum Young modülü  $E_{max}$  ve maksimum dinamik kayma modülü  $G_{max}$ , gerilme şekil değiştirme eğrilerinde başlangıç değerleri olarak alınabilir (Okur, 2002). Her iki modül değeri de, boşluk oranı ve efektif gerilmelere göre normalize edildiğinde, dinamik yükleme sonucu elde edilen değerlerle, düşük hızlarda yapılan monotonik deneyler sonucu elde edilen değerlerin aynı olduğu görülmektedir (Georgiannou vd., 1991). Benzer biçimde modüller yükleme cinsinden, tekrarlı kayma gerilmesi genliğinden ve çevrim sayısından da bağımsız olmaktadır. Bu bölgede meydana gelen sönümler esas olarak zemin daneleri arasındaki sürtünme kayıplarından meydana gelmekte olup, yükleme hızına ve frekansına bağlı olarak gerçekleşmektedir (Shibuya vd., 1995). Yapılan çalışmalar sonucunda lineer eşik olarak da tanımlanan bu sınırın, derecelenmeye ve dane yapısına bağlı olarak tekrarlı birim kayma deformasyonunun % 0.0001–0.01 aralığında değiştiğini göstermektedir (Vucetic 1994, Mancuso vd., 2002). Jeolojik yaş, çimentolanma ve benzeri faktörler lineer eşik yerini %10 oranında değiştirebilmektedir (Tatsuoka vd., 1994).

Lineer elastik bölge geçildikten sonra zemin non-lineer davranmaya başlamaktadır. Bu bölgeye elasto-plastik bölge ismi verilmektedir. Dinamik kayma

modülü, tekrarlı birim kayma genliği arttıkça düşmeye başlamakta ve bu noktadan itibaren zeminin Young modülü  $E$ , dinamik kayma modülü  $G$  ve sönüm oranı  $D$ , artık zemin üzerine uygulanan gerilme genliği ve tekrarlı birim kayma genliğinden etkilenmektedir (Okur, 2002). Ancak bu bölgede plastik şekil değiştirmeler ihmal edilebilmektedir. Bu bölgede zemin nonlinear visko elastik davranış göstermektedir. Plastik bölgede ise artan deformasyonlar sonucunda zeminin mikro yapısında oluşan plastik şekil değiştirmeler meydana gelmekte ve çevrim sayısındaki artış sonucu zeminin gerilme birim şekil değiştirme davranışı değişmektedir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23.: Zeminlerin şekil değiştirme davranışı (Jia, 2018)

Drenajsız koşullarda boşluk suyu basınçlarındaki artışın sonucunda drenajlı koşullarda ise hacimsel şekil değiştirme sonucunda zeminde yenilme meydana gelmektedir. Tekrarlı gerilmeler esnasında silt ve kum zeminlerde bu durum sıvılaşmaya sebep olurken kil zeminlerde drenajsız kayma mukavemetinin azalmasına ve büyük deformasyonlara sebep olmaktadır.

Sıvılaşma, tekrarlı gerilmeler altında boşluk suyu basıncının sürekli olarak artması sonucu çevre basıncına çok yakın hale gelmesiyle efektif gerilmenin çok küçük bir değere düşmesi nedeniyle zeminin kayma mukavemetinin kaybolması ve çok büyük şekil değiştirmeler ile akmaların oluştuğu durumdur (Seed vd., 1975). Zemin tabakalarına deprem veya bir başka sismik kuvvet geldiğinde kum daneleri arasındaki denge bozulmakta ve ince daneler su ile birlikte yukarıya hareket ederek zemin yüzeyine çıkmaktadır. Bu tür bir etki geldiğinde doymuş ve gevşek zemin daneleri daha sıkı duruma geçme eğilimine girerler. Drenajsız koşulda gerçekleşecek bu hacimsel azalmaya daneler arasındaki su engel olmaya çalışmakta, ancak suyun sıkışabilirliği düşük olduğundan boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Boşluk suyu basıncının artmasıyla daneler

birbirinden ayrılma eğilimine girmekte, daneler su içinde askıda kaldığından ortam sıvı gibi davranmaya başlamaktadır (Ural, 2008). Sıvılaşmanın oluşumunda birçok geoteknik faktör etkili olsa da genel olarak zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirleyen etkenler zeminin özellikleri, jeolojik şartlar ve en önemlisi ise yer hareketleridir. Kuvvetli yer hareketleri esnasında kum zeminlerde sıvılaşma problemi yıllarca gözlenmesine rağmen ilk kez Hazen 1920'li yıllarda deprem sırasında Calavera barajında meydana gelen yenilmeyi sıvılaşma olarak tanımlamıştır (Wang, 1972). Yine aynı yıllarda kaynaklanan önemli temel hasarlarının ise 1959 Meksika (Marsal, 1961) ve 1964 Japonya Niigata (Seed ve Idriss, 1967) depremlerinde görüldüğü rapor edilmiştir (Şekil 3.24).



**Şekil 3.24.:**1964 Niigata derpremi, sıvılaşma problemi (Ishihara ve Koga, 1981)

Silt ve kum zeminlerde tekrarlı yüklemeler sebebiyle boşluk suyu basıncının artışıyla meydana gelen sıvılaşma problemi çok önemli olsa da boşluk suyu basıncı artışı sadece bu zeminlerde sıvılaşma problemine neden olmaz (Gratchev, 2006). Do vd. (2017) farklı kum ve çakıl yüzdelerini karıştırarak yapmış oldukları deneylerde moment büyüklüğü 7'nin üzerinde ve pik zemin ivmesi 0.2g'nin üzerinde olan yer hareketlerinde ( $M_w > 7$  ve  $PGA > 0.2$  g) zemin türü ne olursa olsun sıvılaşma olabileceğini söylemişlerdir.

Tekrarlı gerilmelerin zeminlerde oluşturacağı hasar incelenirken yapılan çalışmalar genellikle kum ve silt zeminlerde sıvılaşma problemine odaklanmıştır. Deprem sırasında kil, kum ile karşılaştırıldığında istikrarlı olarak kabul edilmiştir (Lee ve Fitton, 1969). Buna rağmen yapılan incelemelerde kalın kil tabakalarında ciddi yapı hasarları

meydana geldiği görülmüştür (Seed, 1987; Mendoza ve Auvinet, 1988). Deprem sırasında sismik hareket büyümesi nedeniyle oluşan büyük deformasyonların kil zeminin bir özelliği olduğu farkedilmiştir. Deprem dalgalarının genliğinde yüzeye yakın yumuşak zemin tabakalarından geçerken meydana gelen artış, yapısal hasar üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Ayrıca 1964 yılında Niigata depremi ve 1978 yılında Miyagiken-oki depremi sırasında, Japonya’da birçok bölgede zeminde çökme meydana geldiği görülmüştür (Brady, 1980). Yatay katmanlı kil zeminlerde deprem sırasında oluşacak çevrimsel kayma dayanımı ciddi bir stabilite sorununa yol açmazken bu durum boşluk suyu basıncının yükselmesini tetikleyerek oturmalara sebep olmaktadır (Şekil 3.25).



**Şekil 3.25.:**1906 San Francisco depremi, CI zeminde oturmalar (Lawson vd., 1908)

Killerde, tekrarlı gerilmeler sonucunda oluşan oturmalar depremden hemen sonra oluşabileceği gibi (Şekil 3.26) zemin profilinin özelliğine bağlı olarak depremden uzun bir süre sonra da görülebilmektedir (Kramer, 1996). Bu oturma genellikle konsolidasyon oturması olarak gerçekleşir ve deprem sırasında tekrarlı yükler altında oluşan boşluk suyu basıncının sönmüldüğü durumda ortaya çıkmaktadır (Ansal ve Tuncan).



**Şekil 3.26.:**1989 Loma Prieta depremi, CI zeminde oturmalar (USGS, 2018)

Matsui vd., (1980) normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde frekansın drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncı üzerine etkisini incelemişlerdir. Belirli bir sayıda çevrim için, daha düşük frekanslarda daha yüksek aşırı boşluk basınçları ve eksenel deformasyonlar oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Yasuhara vd., (1982) yoğrulmuş kil numuneler üzerinde gerilme kontrollü üç eksenli deneyler yapmışlardır. Dinamik mukavemet ve gerilme şekil değiştirme davranışı efektif ve toplam gerilmeler cinsinden incelenmiştir. Efektif gerilmeler göz önüne alındığında, drenajsız dinamik mukavemetin yüklemenin frekans ve statik mukavemetinden bağımsız olduğu, örselenmeden dolayı dinamik mukavemette hafif bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Oluşan boşluk suyu basınçları birim şekil değiştirmeye bağlı olarak,

$$\Delta u = \frac{\varepsilon}{a+b\varepsilon} \quad (3.6)$$

şeklinde hiperbolik bir fonksiyonla ifade edilmiştir. a ve b sabitler,  $\varepsilon$  birim şekil değiştirme genliğidir. Toplam gerilmeler cinsinden de incelendiğinde, dinamik mukavemete frekansın ve çevrim sayısının etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

Ansal ve Erken (1989), normal konsolide killer üzerinde farklı gerilme genliği ve frekanslarda yaptıkları dinamik basit kesme deneylerinde, laboratuvar ortamında oluşturulmuş kaolin kilini, tek boyutlu izotropik şartlarda konsolide etmişler ve daha

sonra tekrarlı kayma gerilmeleri uygulamışlardır. Tekrarlı yüklemenin frekansı arttırıldıkça boşluk suyu basınçları ve birim kayma genliklerinin azalmaktadır.

Zhou ve Gong (2001) çalışmalarında, kil zeminlerde frekansın yumuşama parametresine etkisini incelemişlerdir. Yükleme frekansı azaldıkça killerdeki yumuşama etkisinin arttığını gözlemlemişlerdir.

## 4. DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ

Zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenebilmesi için çeşitli arazi ve laboratuvar yöntemleri mevcuttur. Zemine etki edecek dinamik yüklerin iyi analiz edilmesi ve buna uygun olarak deney sisteminin seçilmesi gerekmektedir. Zeminlere etki eden dinamik yükler küçük birim deformasyonlar ile büyük birim deformasyonlar oluşturabilir. Seçilecek yöntemin zemine etki edecek yükleme koşullarını mümkün olduğunca doğru yansıtması gerekmektedir. Zeminlere etki eden tekrarlı yüklerin analizinde dinamik kayma modülü ( $G$ ), sönüm oranı ( $D$ ), kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) ve poisson oranı ( $\mu$ ) gibi dinamik yükler altında zemin davranışını etkileyen parametreler kullanılmaktadır. Sönüm oranı ve kayma modülü diğer parametrelere kıyasla zeminin modellenmesi açısından daha büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan laboratuvar ve arazi deneylerinden en çok tercih edilenlerden bazıları avantajları ve dezavantajları ile incelenmiştir.

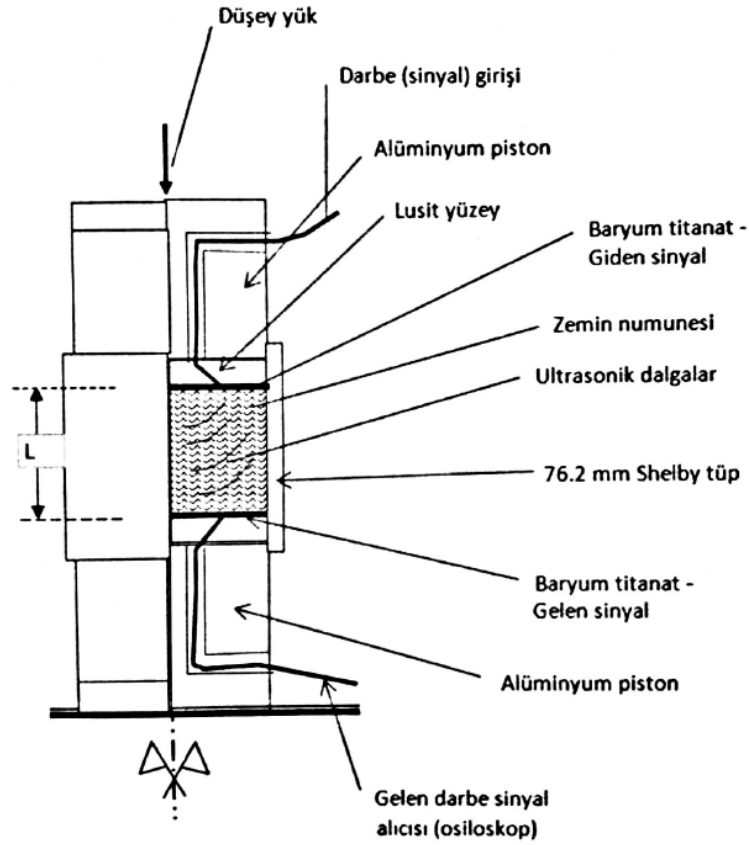
### 4.1. Laboratuvar Yöntemleri

Laboratuvarda dinamik parametrelerin belirlenmesi için en çok kullanılan deney sistemleri, dinamik basit kesme deneyi, dinamik üç eksenli deneyi, rezonant kolon deneyi, burulmalı kesme deneyi ve ultrasonik darbe deneyidir. Bu deneylerden ultrasonik darbe deneyi ve rezonant kolon deneyi küçük birim deformasyonlarda zeminin dinamik parametrelerini ölçmede kullanılmaktadır. Dinamik basit kesme deneyi, dinamik üç eksenli deneyi ve burulmalı kesme deneyi ise büyük birim deformasyonlarında zemine ait dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

#### 4.1.1. Ultrasonik darbe deneyi

Bu deneyde numunenin iki ucuna piezoelektrik kristalden yapılmış alıcı ve vericiler yerleştirilir (Şekil 4.1). Vericiye yüksek frekansta elektrik akımı yollanarak kristalin kalınlığı anından değişir ve bu sayede mekanik bir darbe oluşur. Oluşan dalga numunenin içinde ilerledikten sonra alıcı tarafından algılanarak bu kristalde değişikliğe sebep olmakta ve kristal tarafından yeni bir elektrik sinyali oluşturulmaktadır. Burada zemin numunesinin bir ucundan uygulanan darbenin diğer uca erişmesi için geçen süre ve numune boyu ölçülerek zemine ait Young modülü ve kayma modülü bulunur (Das ve Ramana, 2010). Ultrasonik darbe deneyi, deniz çökelleri gibi çok yumuşak zeminlerde

ve gevşek kum ve silt zeminlerde, zemin, sondaj tüpünden çıkarılmadan deney yapılabildiğinden oldukça kullanışlıdır (Koester, 1994).



Şekil 4.1.:Ultrasonik darbe deneyi (Whitman, 1970)

Silindirik numunenin eksenine dik uygulanan darbe ile Bölüm 2.2.1’de anlatılan elastik bir çubukta dalga yayılması işlemleri ile basınç dalgası hızı

$$V_r = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.1)$$

bulunmaktadır. Ultrasonik darbe deneyinde L boyunda bir çubuktan  $t_r$  sürede geçen dalga yayılımı hızı

$$V_r = \frac{L}{t_r} \quad (4.2)$$

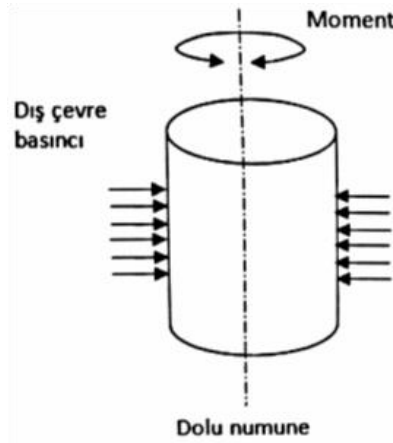
şeklinde bulunur. Bu durumda

$$E = \rho V_r^2 = \rho \frac{L^2}{t_r^2} \quad (4.3)$$

olarak E Young modülü olmak üzere bulunur. Eğer zemin numunesi Şekil 4.2'deki gibi yanal çevre basıncı ile sınırlanmışsa bu durumda zeminde oluşacak moment ve buna karşı gelen elastik kayma modülü,

$$G = \rho V_s^2 = \rho \frac{L^2}{t_r^2} \quad (4.4)$$

olarak bulunur. Burada  $V_s$  kayma dalgası hızıdır (Das ve Ramana).



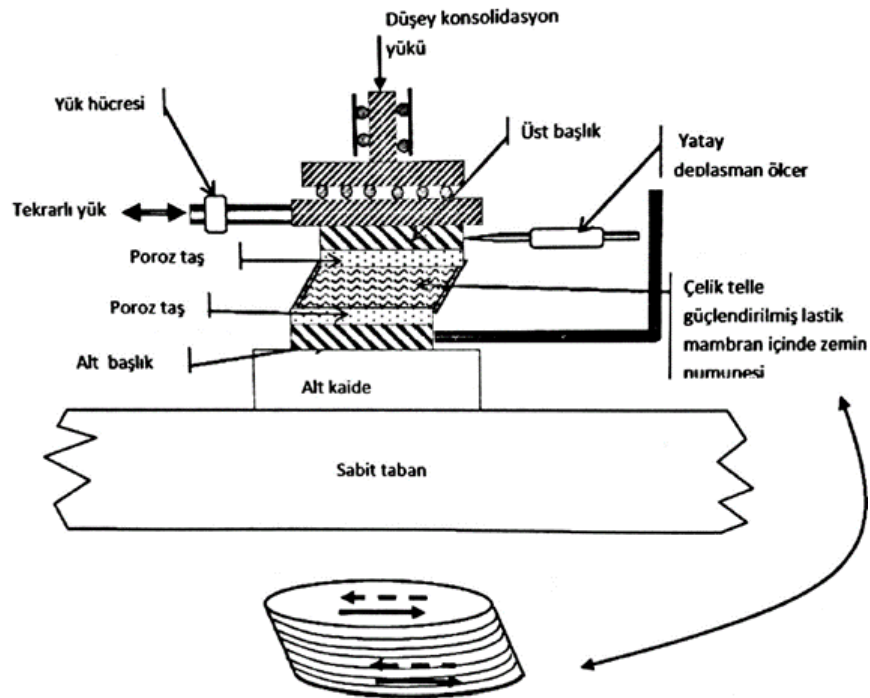
Şekil 4.2.:Ultrasonik darbe deneyinde burulma momenti (Özkan, 2018)

#### 4.1.2. Rezonant kolon deneyi

Rezonant kolon deneyi düşük deformasyon genliklerinde zeminin kayma parametrelerinin belirlenmesi için 1930'ların sonlarından beri kullanılmaktadır (Iida 1938, 1940). Günümüzde rezonant kolon deneyi ile düşük birim deformasyonlardan ( $10^{-5}$ ) yüksek birim deformasyonlara kadar (%1) dinamik deneyler yapılabilmektedir. Şekil 4.3'te gösterilen rezonant kolon deney sisteminin aktif ucunda zemin numunesine titreşim uygulayacak cihaz bulunmaktadır. Zemin numunesinin diğer ucunda ise pasif uç plakası bulunmaktadır. Titreşim numune eksenine doğrultusunda basınç dalgası yaratacak şekilde veya kayma dalgası yaratacak şekilde burulma momenti ile uygulanabilir. Günümüzde bu ikisinin birleşimi olan sistemler kullanılmaktadır. Boyutları bilinen numunenin rezonansa geçtiği frekanstan dalga hızı tespit edilebilir. Sistemin rezonansı



bulunur. Dinamik basit kesme deneyleri genellikle, drenaja izin verilmeden gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılır. Ancak deney sırasında numuneye yatay yönden etkiyen gerilme üst ve alt başlıklar tarafından sönümlenmektedir. Bu da numunede oluşan şekil değiştirme davranışının uniform olmamasına yol açmaktadır. Uniform gerilmeye ve şekil değiştirmeye uğramayan numunede mukavemet kaybı daha çabuk gerçekleşerek numunenin yenilmesine neden olur. Bu nedenden ötürü dinamik basit kesme deneyi ile bulunan dinamik parametreler arazi koşullarını tam olarak yansıtmamaktadır. Bununla birlikte dinamik basit kesme deneyinde (%10<sup>-2</sup>-%5) rezonant kolon deneyinden (%10<sup>-3</sup>-1) daha geniş bir aralıkta çalışılabilmektedir. Ayrıca rezonant kolon deneyinde titreşim esnasında zeminlerde boşluk suyu basınçları ölçülmezken dinamik basit kesme deneyinde numunenin sınır koşullarında boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir (Das ve Ramana, 2010).

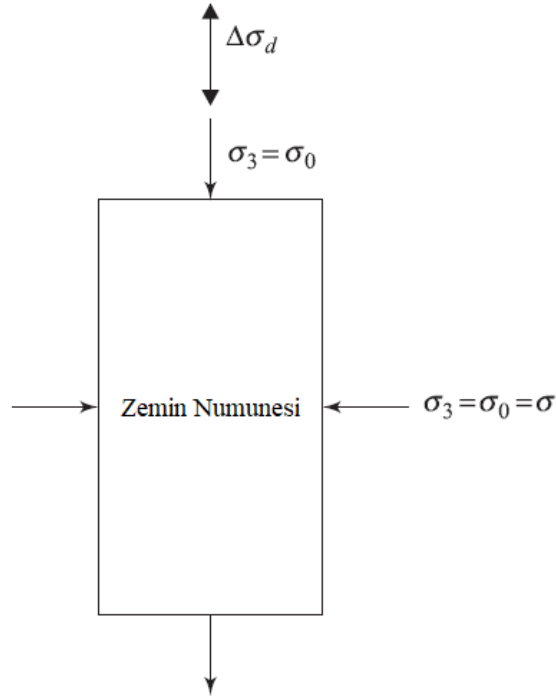


Şekil 4.4.:Dinamik basit kesme deneyi (Özkan, 2018)

#### 4.1.4. Dinamik üç eksenli deneyi

Dinamik üç eksenli deneyi statik üç eksenli deneyine benzetmekle birlikte hücreye yerleştirilen numuneye belli frekanslarda tekrarlı gerilmeler uygulanarak deformasyon ve boşluk suyu basıncı değişimleri kaydedilir (Şekil 4.5).



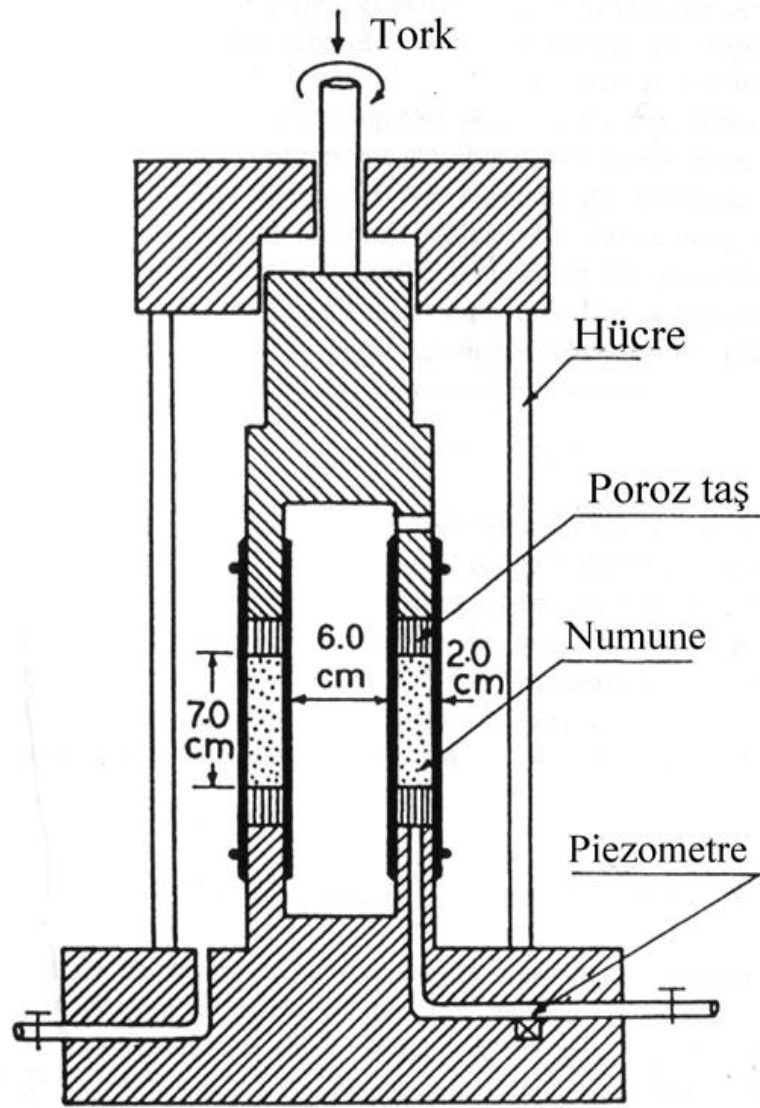


**Şekil 4.6.:**Dinamik üç eksenli deneyinde uygulanan yükler (Das ve Ramana, 2010)

Yüksek birim deformasyonlarında ve 10Hz'ye kadar çıkan frekanslarda zemin davranışının incelenmesi için kullanılan dinamik üç eksenli deneyi elverişli bir deney sistemidir. Ancak dinamik üç eksenli deneyinde dinamik yükleme sırasında, üst ve alt başlıklarda gerilme yığılmaları meydana gelmekte bununla birlikte numuneye uygulanan gerilmeler uniform olarak kabul edilmektedir.

#### 4.1.5. Burulmalı kesme deneyi

Dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemlerinin birleştirilmesiyle oluşan burulmalı kesme deneyinde hücre içerisine yerleştirilen silindirik bir numuneye belirli frekanslarda üst başlıktan tork uygulanmaktadır. Uygulanan burulma etkisiyle numunede kayma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.7). Burulmalı kesme deneyinde drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneylerde boşluk suyu basınçları ve dinamik parametreler hesaplanmaktadır. 0.125Hz ve 5Hz arasında çalışma frekansına sahiptir. Burulmalı kesme deneyinde diğer yüksek birim deformasyonlarda analizler yapan dinamik üç eksenli yada dinamik basit kesme deneylerine kıyasla numuneye uygulanan gerilmeler daha uniformdur. Dinamik burulmalı kesme deneyi zeminlerin dinamik özelliklerini bulmak için kullanışlı bir deney sistemidir (Ishihara, 1996).



Şekil 4.7.:Dinamik burulmalı kesme deneyi (Ishihara, 1996).

Çizelge 4.1’de dinamik etkileri meydana getiren olayların deformasyon genlikleri ile laboratuvarında bu genliklerin analizi için gerekli olan deney sistemleri gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de ise dinamik parametrelerin bulunmasında kullanılan deney sistemleri karşılaştırılmıştır (Das ve Ramana, 2010).

**Çizelge 4.1.:**Laboratuvar deney sistemlerinin deformasyon genliği aralıkları

Ultrasonik darbe deneyi		Dinamik basit kesme deneyi				DENEYLER
Rezonant kolon deneyi			Burulmalı kesme deneyi			
			Dinamik üç eksenli deneyi			
Makina Temelleri	Açık Deniz Ağırlık Yapıları	Kuvvetli Yer Hareketi (Depremler, Heyelanlar)			Nükleer Patlamalar	OLAYLAR
$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	Birim kayma deformasyonu, $\gamma$ (%)

**Çizelge 4.2.:**Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemleri

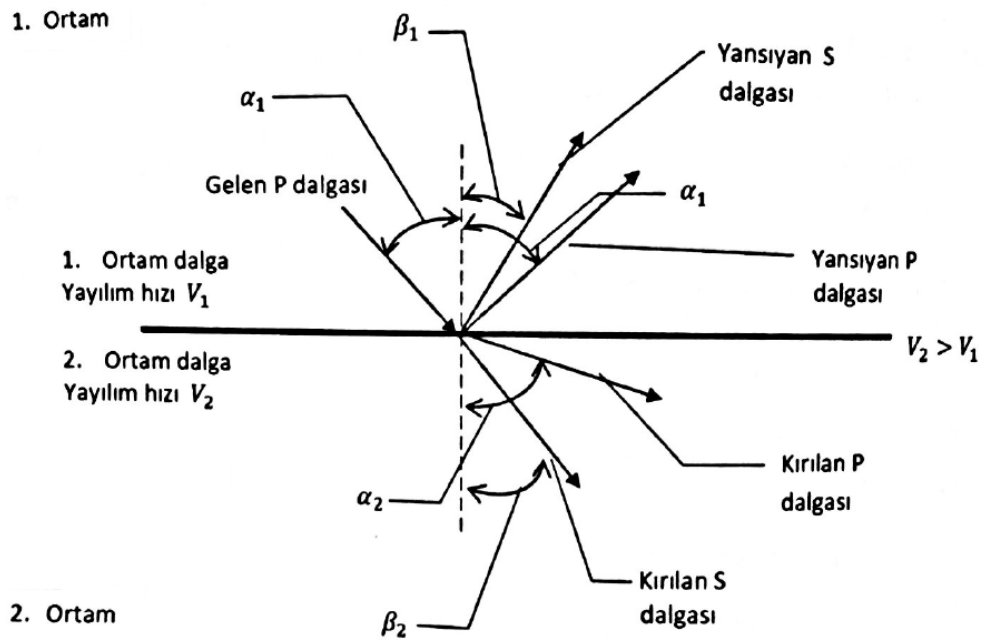
Deney Sistemi	Kayma Modülü	Young Modülü	Malzeme Sönümü	Çevrim Sayısı Etkisi
Rezonant Kolon Deneyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Ultrasonik Darbe Deneyi	Orta	Orta	-	-
Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	-	İyi	İyi	İyi
Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi
Çevrimsel Burulmalı Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi

#### 4.2. Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri küçük birim deformasyonlarda zeminlerin dinamik parametrelerini belirlemek için kullanılan jeofizik yöntemlerdir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları sismik kırılma ve yansıma metodu, karşıt kuyu metodu, alt kuyu metodu ve yüzey dalgası yayılım metodudur.

#### 4.2.1. Sismik kırılma ve yansıma deneyleri

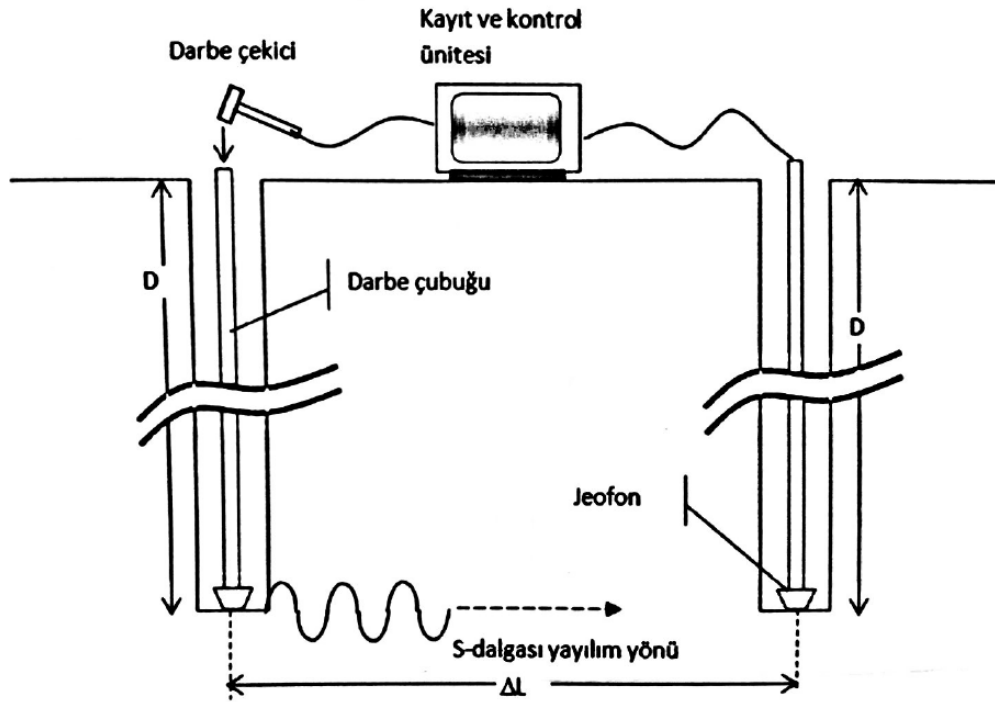
Sismik kırılma metodunda dalga hızlarının derinlere doğru yer alan tabakalar boyunca arttığı durumlarda tabaka kalınlıkları ve dalga hızları bulunabilmektedir. Deneylerde zemin yüzeyinden meydana getirilen cisim dalgaları bir başka tabaka ile karşılaştığında kırılarak yüzeye yansımaktadır (Şekil 4.8). Sensörler yardımıyla kaydedilen zamana bağlı olarak tabaka kalınlığı ve dalganın hızı tespit edilmektedir.



Şekil 4.8.:Sismik kırılma ve yansıma yöntemi (Özkan, 2018)

#### 4.2.2. Karşıt kuyu deneyi

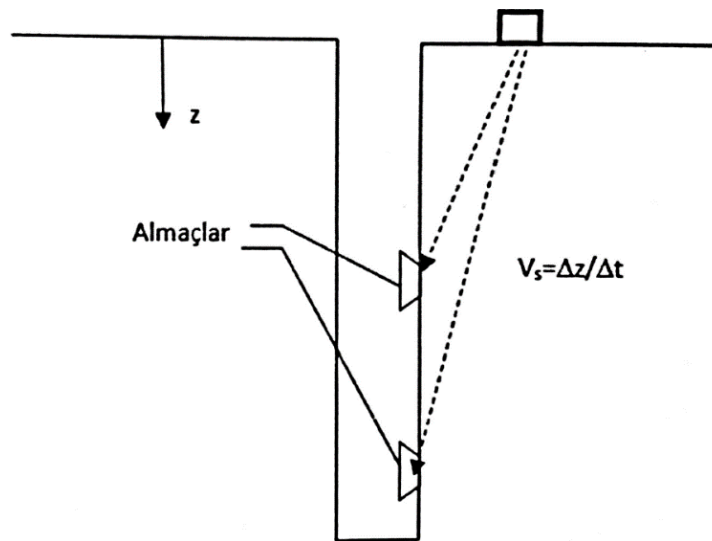
Bu yöntemde S-dalga hızının derinlikle değişimi tespit edilmektedir. Belirli bir  $\Delta L$  mesafesinde açılan ve derinliği  $D$  olan iki kuyudan birinde darbe çekici vasıtasıyla S dalgası oluşturulur (Şekil 4.9). Diğer kuyudaki sensörler ile bu dalganın varış zamanı kaydedilerek dalga hızı tespit edilir.



Şekil 4.9.:Karşit kuyu yöntemi (Özkan, 2018)

#### 4.2.3. Alt kuyu deneyi

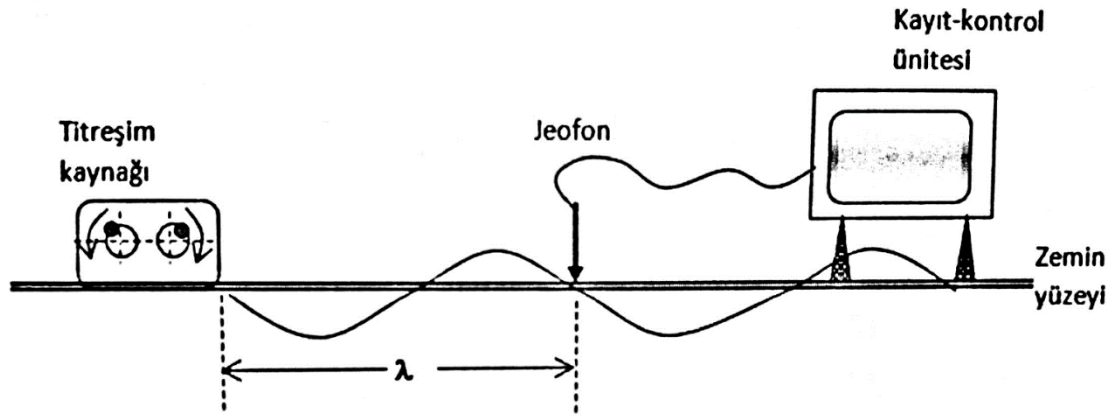
Bu deneyde açılan deney kuyusunun içine sensörler (almaçlar) yerleştirilir. Zemin yüzeyinden bulunan bir kaynağın meydana getirdiği kayma ve basınç dalgalarının sensörlere geldiği zaman ölçülerek aradaki mesafe ile dalga hızları bulunur (Şekil 4.10).



Şekil 4.10.:Alt kuyu yöntemi (Özkan, 2018)

### 4.2.3. Yüzey dalgası yayılımı deneyi

Bu yöntemde zemin yüzeyine yerleştirilen bir kaynak harmonik titreşimler oluşturarak zeminde Rayleigh dalgaları meydana getirmektedir. Rayleigh dalga hızı küçük birim deformasyonlarda kayma dalgası hızına çok yakındır. Zeminde meydana gelen Rayleigh dalga hızları Jeofon yardımıyla ölçülerek bu hız kayma dalgası hızına eşitlenir ve bu sayede zemine ait kayma modülü hesaplanır (Şekil 4.11) (Özkan, 2018).



Şekil 4.11.:Yüzey dalgası yayılımı yöntemi (Özkan, 2018)

Buradaki deneylere ek olarak elastik dalga hızlarının ampirik fomüllerle bulunmasında kullanılan standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon (CPT) deneyleri bulunmaktadır.

SPT deneyinde 63.5kg kütledeki bir ağırlık 760mm yükseklikten düşürülerek 450mm uzunluğundaki bir tüpün zemine girmesi için gerekli olan vuruş sayısı bulunur. İlk 150mm'lik kısım harici olan ikinci ve üçüncü 150mm'lik kısmın zemin içerisine girmesini sağlayan vuruş sayısı kaydedilerek buna SPT-N denilmekte ve ampirik formüllerle N sayısına karşılık gelen kayma dalgası hızları tespit edilmektedir.

CPT deneyinde ise bir konik uç zemine genellikle 60 derece açıyla saniyede 2cm hızla ittirilerek zeminin gösterdiği direnç tespit edilir. Koni ucu direnci ve koninin bağlı olduğu sondanın zeminle olan sürtünmesi ölçülerek ampirik formüller yardımıyla kayma dalgası hızları tespit edilmektedir. Çizelge 4.3'te SPT ve CPT deneyleri ile kayma dalgası hesabı ile ilgili kullanılan ampirik formüller verilmiştir. Burada N değeri SPT-N'i,  $q_c$  koni ucu direncini,  $f_s$  ve  $f_c$  ise sondanın zeminle olan sürtünme kuvvetini, D ise çalışma yapılan derinliği göstermektedir (Ahmad, 2015).

**Çizelge 4.3.:**SPT ve CPT deneyleri ile Vs'nin korelasyonu (Ahmad, 2015)

No	Araştırmacılar	Kullanılan Eşitlik	Zemin Cinsi
SPT-Vs Korelasyonları			
1	Imai (1977)	$V_s=102N^{0.242}$	Kohezyonlu zeminler
2	Seed vd. (1983)	$V_s=56.4N^{0.5}$	Kohezyonsuz zeminler
3	Kalteziotis vd. (1992)	$V_s=76.6N^{0.45}$	Kohezyonlu zeminler
4	Raptakis vd. (1995)	$V_s=184.2N^{0.17}$	Kohezyonlu zeminler
5	Jafari vd. (2002)	$V_s=27N^{0.73}$	Kohezyonlu zeminler
6	Dikmen, (2009)	$V_s=44N^{0.48}$	Kohezyonlu zeminler
7	Anbazhagan vd. (2012)	$V_s=106.63N^{0.39}$	Kohezyonlu zeminler
CPT-Vs Korelasyonları			
1	Piratheepan (2002)	$V_s=32.2qc^{0.089} + fs^{0.121}D^{0.215}$	Kil
2	Piratheepan (2002)	$V_s=11.9qc^{0.269} + fs^{0.108}D^{0.127}$	Tüm zeminler
3	Mayne (2006)	$V_s=118.8\log(fs)+18.5$	Tüm zeminler

## 5. TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA KİL ZEMİNLERİN DAVRANIŞI

Seed ve Chan (1966) sürekli ve titreşimli gerilmelerin, killerin mukavemetlerine ve deformasyon özelliklerine etkilerini belirlemek amacıyla çeşitli deney kombinasyonlarıyla çalışmalar yürütmüşlerdir. Deprem yüklemesi koşullarında, başlangıç gerilmesine sahip bir zemin numunesi bir dizi titreşim gerilmesine maruz bırakılmıştır. Çalışmalarında PL = %43 ve PI = %45 değerlerinde San Francisco Bay kili, PL = %23 ve PI = %14 değerlerinde Vicksburg, siltli kili ve PL = %19 ve PI = %16 değerlerinde Pittsburg, kumlu kili kullanmışlardır. Deneylerinde numunelerini kompaksiyon ile hazırlamışlardır. Saniyede iki titreşim frekansı olan tek yönlü ve iki yönlü yükleme koşulları kullanmışlardır. Farklı büyüklüklere sahip sürekli ve titreşen gerilmeler ile çok çeşitli titreşim dalgaları ve gerilmelerini içeren bir deneysel program yürütülerek zeminin drenajsız kayma mukavemeti belirlenmiştir. Daha sonra numuneler drenajsız kayma mukavemetinin belirli bir oranında olacak şekilde yüklenerek dengeye gelmesine izin verilmiştir. Örneğin bir zemin numunesi drenajsız kayma mukavemetinin yarısı kadar sürekli gerilme yüklenmiş (%50'si kadar) ve bu gerilme altında dengeye gelmesi beklenmiştir. Bu aşamada, numuneye 100 adet geçici titreşimli gerilme darbesi uygulanmış ve titreşimli darbelerden sonra oluşan deformasyonlar durana kadar numune üzerindeki sürekli gerilme bir süre daha numunede bırakılmıştır. Numune daha sonra yenilene kadar normal bir şekilde yüklenmiştir. Diğer test serilerinde, bazı numuneler sadece titreşimli gerilmelere maruz bırakılmışlar ve farklı zaman dilimlerinde de olsa her numune en sonunda yenilmiştir. Ancak yenilmeye sebep olan titreşim sayısı numunelerin çoğunda farklı olduğu görülmüştür. Numunelerin çeşitli sabit sürekli gerilmelere maruz bırakıldığı bir dizi test serisi de gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar tek yönlü yükleme ile karşılaştırıldığında iki yönlü yükleme ile elde edilen veriler arasında belirgin bir fark olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı sayıda titreşimli darbe içeren koşullarda, iki yönlü darbelerde yenilme tek yönlü darbelerdeki yenilmelere kıyasla daha düşük olduğunu ve kil zeminin davranışının yükleme koşullarına (tek veya iki yönlü), zeminin tipine, titreşimli darbelerin sayısına ve frekansına bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Humphries ve Wahls (1968) çalışmalarında kaolin ve bentonit kilini kullanarak ıslak tokmaktama yöntemiyle numune hazırlamışlardır. Numuneleri 69kPa'dan 690 kPa'ya kadar izotropik konsolidasyon yükü vererek aşırı konsolidasyon oranı 1'den 10'a kadar değişen numuneler elde etmişler ve numunelere burulma titreşimi uygulamışlardır.

Burulma kayma gerilmesini büyüklüğü sırasıyla 0.00015, 0.0003 ve 0.0006 radyan olarak uygulamışlardır. Burulmalı kayma gerilmesi, alt kısmı sabit olan numunelerin üst kısmına uygulanmıştır. Numunelere ait dinamik kayma modülünü rezonant kolonu ile tespit etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda uygulanan gerilme genliği arttırıldığında kayma modülünün %5'ten daha az bir azalmaya uğradığı belirtilmiştir. Her iki kilde de efektif gerilmenin daha etkili bir parameter olduğu ve boşluk oranının azalması ve efektif gerilmenin yükselmesiyle kayma modülünün yükseldiği tespit edilmiştir. Sonuçta, normal konsolide killerde hem kaolin hem de bentonit kilinde bu artışın efektif gerilme artışının 1/2 ile 2/3 katı arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Aşırı konsolida killerde ise boşluk oranı ile efektif gerilme arasındaki bir regrasyona bağlı olarak kayma modülünün etkilendiğini belirtmişlerdir.

Thiers ve Seed (1968) çalışmalarında duraylılığı yüksek killerde çevrimsel yükleme esnasında kayma modülündeki azalmaya karşılık akma birim deformasyonundaki artışı basit kesme cihazı ile incelemişlerdir. Deneylerde LL=% 88, PL =% 43 ve PI = %45 değerine sahip olan normal konsolide San Fransisco Körfezi siltli kilini kullanmışlar ve şekil değiştirme oranı sabit olacak şekilde her bir saniyede tam bir çevrim olması için yükleme ve tersine yükleme uygulamışlardır. Her numune üzerinde 200 adet çevrimsel şekil değiştirme yüklemesi gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde kayda değer azalma ilk 50 çevrim sırasında meydana gelmiş ve 50 çevrimden sonra kayma modülü nerdeyse sabit kalmıştır. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlara göre ilk 50 çevrimde numune pik şekil değiştirmeye ulaştığında kayma modülü %30 kadar azalmıştır. 200 çevrimden sonra şekil değiştirme %2'lere ulaştığında drenajsız kayma modülü çevrimsel yükleme öncesine göre %10 kadar azalmıştır ve bu oran kayma modülünde %40-%50 olmaktadır. Şekil değiştirme oranı %1'in altında olduğu durumlarda sadece kayma modülünde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca çevrimsel yükleme başta normal konsolide olan killerde, belirgin bir aşırı konsolidasyon durumuna sebep olmuştur.

Taylor ve Bacchus (1969) yapay olarak hazırlanmış  $G_s = 2.60$ ,  $PL = \%36$  ve  $PI = \%26$  değerlerine sahip Halloysite kili üzerinde dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deneylerini 100 sabit çevrim ve 0.2 Hz'de yapmışlardır. Dinamik yüklemeye maruz kalan numuneler üç eksenli basınç deneyine tabi tutularak yenilene kadar deney devam ettirilmiştir. Normal konsolide killerde, çevrimsel yükleme, şekil

değiştirme büyüklüğüne bağlı olarak kil zeminlerin ortalama efektif asal gerilmesinin azalmasına sebep olmuştur. Buna karşılık aşırı konsolide kil zeminlerde efektif asal gerilme ilk döngüde artmış ve daha sonra azalmıştır. Bu durum da aşırı konsolide kil zeminlerin ortalama efektif asal gerilmesinde çevrimsel yükleme sebebiyle herhangi bir değişiklik olmamasını sağlamıştır. Ayrıca çevrimsel yükleme başta normal konsolide olan killerde, belirgin bir aşırı konsolidasyon durumuna sebep olmuştur. Buna ek olarak çevrimsel yükleme sonrasında yapılan üç eksenli basınç deneyinde drenajsız kayma mukavemetinde çevrimsel yükleme öncesine göre azalma meydana gelmiştir. Araştırmacılar “zemin hasarı” şeklinde yorumlamışlardır. Buna göre; bir zemin belirli bir süre boyunca çevrimsel olarak yüklendiğinde gerilme-şekil değiştirme davranışı, kayma mukavemetinde bir azalmaya sebep olacağını ve bunun şekil değiştirme genliğinin bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir.

Elgohary (1973) Terzaghi'nin tek-eksenli konsolidasyon teorisinin çevrimsel yükleri kapsamadığını belirtmiş ve çoğu uygulamada bu teoriye ait denklemin kullanıldığını ifade etmiştir. Araştırmacı çalışmasında  $G_s = 2.60$ ,  $LL = \% 71$ ,  $PL = \% 40$  ve  $PI = \% 31$  değerlerine sahip kaolin kili kullanarak numuneleri bulamaç çamuru yöntemi ile hazırlamıştır. Numuneler üzerinde üç eksenli konsolidasyon ile çevrimsel yükleme altındaki konsolidasyonu karşılaştırmıştır. Bir zemin tabakası çevrimsel yüklemeye tabi tutulduğunda, zemine yükleme yapılırken pozitif boşluk suyu basıncının arttığını ve yükleme boşaltılırken negatif boşluk suyu basıncının arttığını belirtmiştir. Çevrimsel olarak yükleme ve boşaltma durumları devam ettikçe pozitif boşluk suyunun azalacağını, negatif boşluk suyunun artacağını ve en sonunda pozitif ve negatif boşluk suyu basıncının nihai denge değerine sahip olduğu kararlı bir durum oluşacağını söylemiştir. Kararlı durum koşullarında denge konsolidasyon oranının çevrimsel yükleme modelinin bir fonksiyonu olacağını ifade etmiştir. Bunun anlamının, bu noktada uygulanan basıncın bir kısmının zemin danelerine aktarıldığını geri kalan kısmın ise boşluk suyu basıncına etki ettiğini ve bu durumda zeminin tamamen elastik davrandığını ve şekil değiştirmesinin maksimum değerlere ulaştığını söylemiştir. Çalışması sonucunda sürekli yük sonucunda oluşan konsolidasyonun çevrimsel yüklemeye kıyasla daha hızlı ilerlediğini belirtmiştir. Bunun sebebi olarak ise sürekli yüklemeye konsolidasyon ilerlemeye devam ederken çevrimsel yüklemeye konsolidasyonun sadece yükleme sırasında gerçekleştiğini ve yük kaldırıldığında şişmenin konsolidasyonu yavaşlattığını söylemiştir.

Brown vd. (1975)  $G_s = 2.74$ ,  $PL = \% 18$  ve  $PI = \% 14$  değerlerine sahip siltli kil zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde numunelerini 150 kPa basınç altında bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlamışlardır. Aşırı konsolidasyon oranı 1, 2, 4, 10 ve 20 olacak şekilde hazırlamış oldukları numunelerine 10 Hz frekansında çevrimsel yükleme uygulamışlardır. Tüm deneyler drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiş ve başlığın alt kısmından boşluk suyu basıncı ölçülmüştür. Ayrıca numunelerdeki mukavemet kayıplarını ölçmek için çevrimsel yüklemelerden sonra üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Hazırladıkları numunelere  $10^6$  çevrimsel yükleme uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda şekil değiştirmelerin  $10^6$  çevrimden sonra hala devam ettiğini belirtmişlerdir. Aşırı konsolide numunelerde en yüksek çevrimlerde yenilme koşulları ortaya çıktığını elde etmişlerdir. Ayrıca  $10^6$  çevrimden sonra tüm numunelerde drenajsız kayma mukavemeti azalmıştır ve bu azalma aşırı konsolidasyon oranı arttıkça daha da artmıştır.

France ve Sangrey (1977) yaptıkları çalışmada suya doymun killi zeminlerde çevrimsel yükler altında bir efektif gerilme modeli tanımlamışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında  $LL = \%57$ ,  $PL = \%26$ ,  $w = \%39.5$  ve  $G_s = 2.78$  değerlerine sahip ıslak tokmaktama metodu ile hazırladıkları illit kili üzerinde gerilme kontrollü üç eksenli basınç deneyi yapmışlardır. Normal ve aşırı konsolide olarak hazırlanan numunelerini çevrimsel gerilmeye tabi tutulmuşlardır. Her bir döngüde yükün sönümlenmesi esnasında numunelerde drenaja izin verilmiştir ve çevrimsel yükleme numuneler yenilmeye uğruyana kadar veya bir denge oluşana kadar devam edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda normal konsolide killerde suyun drenajı hacimlerinin azalmasına ve drenajsız kayma mukavemetinde belirgin bir artışa sebep olmuştur. Ancak aşırı konsolide killerde ise ilk çevrimden sonra daneler arasında drene olamayan sular kalmıştır. Bu durum negatif boşluk suyu basıncına sebep olmuş ve negatif boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için daneler arasındaki sular numunenin içine dağılmıştır. Sonuçta numunenin hacmi ve su muhvetasında artış olmuş ve bu yüzden numunede belirgin bir mukavemet kaybı gözlenmiştir.

Andersen vd. (1980) Kuzey Denizi'nde oluşturulacak bir petrol platformu için Shell ve Norveç Geoteknik Enstitüsü'yle birlikte plastik limiti yüksek Drammen kilinin çevrimsel davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar örselenmemiş numuneler üzerinde statik üç eksenli, dinamik üç eksenli, direkt kesme ve dinamik basit kesme deneyleri

yapmışlardır. Kullandıkları kilin su muhtevası (w) %52, özgül ağırlığı (Gs) 2.76, likit limiti (LL) %55 ve plastik limiti (PL) %28'dir. Numuneler 400 kPa önkonsolidasyon basıncı altında konsolide edildikten sonra istenilen aşırı konsolidasyon oranlarına ulaşabilmesi için çeşitli gerilmeler altında şişmeye bırakılmıştır. Böylelikle aşırı konsolidasyon oranı 1, 4, 10, 25, 50 olan numuneler elde etmişlerdir. Numunelere önce çevrimsel gerilmeler uygulanmış daha sonra ise numuneler statik deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre çevrimsel gerilmeler esnasında yenilen zeminlerde, aşırı konsolide kil zeminler normal konsolide kil zeminlere göre daha az çevrimsel yüklemeye yenilmişlerdir. Çevrim sayısı arttıkça numunelerde kayma modülü azalmıştır. Ayrıca çevrimsel yükleme esnasında efektif gerilmenin azalmasıyla normal konsolide killerde belirgin bir aşırı konsolidasyon durumu oluşmuştur. Çevrimsel gerilmelere maruz kalan numunelerde drejansız kayma modülü öncesine kıyasla belirgin şekilde azalmıştır.

Meimon vd. (1980) çalışmalarında kaolin ve bentonit killerini kullanarak drenajsız dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları kaolin kili LL = %70, PL = %40 ve bentonit kili ise LL = %105, PL = %51 değerlerine sahiptir. Numunelerin aşırı konsolidasyon oranı 1 ve 4'tür. Deneylerinde frekans değeri 0.1 Hz olan tek yönlü sinüzoidal yük uygulanarak, istenen deviatör gerilmede çevrimsel gerilme altında drenajlı ve drenajsız deneyler yapılmıştır. Drenejiz izin verildiği durumda boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için 24 ile 48 saat arası beklenmiştir. Drenejiz izin verilmediği durumda ise numune 1 saat dinlenmeye bırakılmıştır. Deney 2000 çevrim sonrasında durdurulmuştur. Yapılan deneylerde çevrimsel yüklemeye sonra drenajsız kayma mukavemetindeki azalmanın konsolidasyon oranına bağlı olmadığı gözlenmiştir. Normal konsolide killerde çevrimsel yükleme sonucunda oluşan efektif gerilme izi aşırı konsolide killerdeki gerilme izine karşılık gelirken, aşırı konsolide killerde ise efektif gerilme izi değişmemiştir. Drejansız deneylerde dinlenme işleminin kilin başlangıç yapısını bozduğu, drenajlı deneylerde ise hacimsel şekil değiştirmeden dolayı numune daha mukavemetli hale geldiği söylenmiştir.

Procter ve Khaffaf (1984) gerilme kontrollü dinamik üç eksenli cihazı ile PI = %26 olan killer üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde çevrimsel kayma gerilmesi olarak numunenin drenajsız kayma gerilmesinin belli bir oranında yük uygulanmıştır. Numuneleri, ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlayan araştırmacılar

eksenel şekil değiştirme oranını %1'den %5'e kadar değiştirecek olan deviatör gerilmelerini ölçmüşlerdir. Frekans değerleri olarak 0.008, 0.05, 0.2 ve 1Hz kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda aynı çevrim sayısı için yüksek frekansta deneye tabi tutulan numuneler daha yüksek mukavemet sergilerken, daha düşük frekanslarda ise zeminde yumuşama meydana gelerek zeminin mukavemetinde azalma meydana geldiğini söylemişlerdir.

Hyde ve Ward (1986)  $G_s = 2.80$ ,  $LL = \%36$  ve  $PL = \%19$  değerlerine sahip siltli kil üzerinde drenajsız dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullanılan numuneler kompaksiyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Numunelerin aşırı konsolidasyon oranları 1, 4, 10, ve 20'dir ve numunelere 0.1 Hz frekansta 10000 sinüzoidal çevrimsel gerilme uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada drenajsız çevrimsel gerilme sonucunda normal konsolide ve hafif derecede aşırı konsolide olan numuneler yüksek derecede aşırı konsolide davranışı sergilediğini söylemişlerdir. Çevrimsel yüklemenden sonra mukavemetteki azalma normal konsolide ve hafif derecede aşırı konsolide olan numunelerde ağır derecede aşırı konsolide olan numunelere kıyasla daha fazladır. Ağır derecede aşırı konsolide olan numunelerde çevrimsel gerilmeler sonucunda büyük boşluk suyu basınçları meydana gelmemiştir. Bu durum ise bu numunelerin mukavemetinde büyük değişimler olmamasını sağlamıştır.

Lefebvre ve LeBoeuf (1987) çalışmalarında  $LL = \%32-38$  ve  $PL = \%22-24$  değerlerine sahip örselenmemiş killi numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Gerilme ve şekil değiştirme kontrollü yapılan deneylerde 0.1 Hz frekans kullanılmıştır. Aşırı konsolide numunelerde çevrimsel yüklemenden yenilmeye ulaşmaya kadar çok az miktarda boşluk suyu basıncı gözlenmiştir. Ancak normal konsolide killerde çevrimsel yükleme sırasında büyük miktarda boşluk suyu basıncı ortaya çıkarak gerilme izi statik durumdaki maksimum deviatör zarfına ulaşmıştır. Araştırmacılar üç eksenli ve dinamik üç eksenli deneylerindeki drenajsız kayma mukavemetini karşılaştırırken şekil değiştirme hızının göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Ohara ve Matsuda (1988) dinamik basit kesme cihazı kullanarak aşırı konsolidasyon oranı 1, 2, 4 ve 6 olan kaolin killerinde drenajsız deneyler yapmışlardır. Kullanılan kaolin kili,  $G_s = 2.7$ ,  $LL = \%53.8$  ve  $PL = \%28.5$  değerine sahiptir. 0.5 Hz frekansta deformasyon kontrollü iki yönlü sinüzoidal çevrimsel yük kullanmışlardır.

Çevrimsel yüklemmeden sonra oluşan hacim değişiminin gözlenmesi için oluşan boşluk suyu basıncının numune içerisinde dağılmasına izin vermişlerdir. Normal konsolide killerde çevrimsel yükleme başlar başlamaz pozitif boşluk suyu basıncı olmuş ve bu basınç çevrimsel gerilmenin artmasıyla giderek artmıştır. Aşırı konsolide numunelerde ise başlangıç çevriminde boşluk suyu basıncı negatiftir. Daha sonraki çevrimsel yüklemelerde ise boşluk suyu basıncı pozitif olmuştur. Araştırmacılar, boşluk suyu basıncındaki artışın kayma gerilmesinin büyüklüğüne, çevrimsel yükleme sayısına ve numunenin aşırı konsolidasyon oranına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuçta, numunelerdeki deformasyonun ve dolayısıyla hacim değişikliğinin çevrimsel yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basıncının büyüklüğüne bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Ansal ve Erken (1989) dinamik basit kesme cihazı ile  $G_s = 2.65$ ,  $LL = \%65$  ve  $PL = \%25$  değerlerine sahip normal konsolide kil zeminler üzerinde boşluk suyu basıncından kaynaklanan aksel ve yatay şekil değiştirmeleri incelemişlerdir. Deneylerinde kullandıkları numunelerin bir kısmını bulamaç çamuru ile diğer kısmını ise numunede homojenlik sağlamak adına ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlamışlardır. Frekans değeri olarak 1 Hz, 0.5 Hz, 0.1 Hz, 0.01 Hz kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda boşluk suyu basıncının oluşmayacağı eşik bir çevrimsel kayma gerilmesi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu kayma gerilmesinin üzerine çıkıldığında numunelerde boşluk suyu basınçları gözlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar kayma gerilmesi genliği azaldıkça ve çevrim sayısı arttıkça frekansın etkisinin azaldığını söylemişlerdir. Depremlerde olduğu gibi, çevrimsel davranışın değerlendirilmesinde nispeten az sayıda çevrim kullanılırsa, frekansın etkisi belirgin olarak gözükmemektedir. Bu durum hem bulamaç çamuru hem de ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan numunelerde görülmektedir. Islak tokmaktalama yöntemiyle hazırlanan numunelerin çevrimsel kayma gerilmesine karşı daha dayanıklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuçta, her iki numune hazırlama yöntemiyle yapılan deneylerde boşluk suyu basınçlarında artış oluşmuş ancak ıslak tokmaktama ile hazırlanan numunelerde daha yüksek boşluk suyu basıncı oluşma eğilimi gözlenmiştir.

Ansal ve Tuncan (1989) Haliç'in altında bulunan CH sınıfı killer ile Baltalimanı'nda bulunan CL-OL sınıfı siltli killeri kullanarak aşırı konsolidasyon oranı 1, 3 ve 5 olan numuneler elde etmişlerdir. Deneylerinde çevrimsel gerilmeden dolayı ortaya çıkan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi esnasında oluşan konsolidasyon olayını incelemişlerdir. Deneylerinde drenajsız dinamik üç eksenli ve dinamik basit

kesme cihazlarını kullanmışlardır. Dinamik kayma mukavemeti drenajsız kayma mukavemetinin %50'si olacak biçimde 0.1 Hz frekansta numunelere 50 çevrim uygulanmıştır. Yaptıkları deneyler sonucunda aşırı konsolide killerde çevrimsel yüklemmeden dolayı az bir miktarda boşluk suyu basıncı ortaya çıkmıştır. Ayrıca oturmalar ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak normal konsolide killerde ise yüksek miktarda boşluk suyu basıncı ortaya çıkmıştır. Bu durum önemli oranda oturma meydana getirmiştir. Ayrıca, araştırmacılar normal konsolide killerde konsolidasyon oturmasına sebep olan çevrim sayısı ve dinamik kayma gerilmesinin büyüklüğünü incelemişlerdir. Sonuçta, çevrim sayısındaki artışın numunede boşluk suyunun artmasına sebep olduğu ve aynı şekilde numuneye uygulanan dinamik kayma gerilmesinin büyüklüğü arttıkça boşluk suyu basıncında artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Azzouz vd. (1989)  $w = \%39$ ,  $LL = \%44$  ve  $PL = \%23$  değerlerine sahip kil zemin numunelerini drenajsız koşullarda çevrimsel gerilmeye tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar normal konsolide killer ile hafif derecede aşırı konsolide killer üzerinde deney yapmışlardır. 0.1 Hz frekansta dinamik basit kesme cihazı ile gerçekleştirilen deneylerin amacı çevrimsel gerilmeler altında normal ve hafif derecede aşırı konsolide zeminlerin davranışlarını tahmin etmek için bir yöntem geliştirmektir. Çevrimsel gerilmeler uygulanan zeminlere, sonrasında statik kayma gerilmeleri uygulanmıştır. Çevrimsel gerilmeler altında normal konsolide numunelerde pozitif boşluk suyu basınçları oluşmuş ve efektif gerilmelerde azalma meydana gelmiştir. Çevrimsel gerilmelerden sonra uygulanan statik kayma gerilmelerinde, belirgin aşırı konsolide davranış gözlenmiştir. Aşırı konsolide numunelerde ise başlardaki çevrimsel yüklemelerde negatif olan boşluk suyu basıncı çevrim sayısı arttıkça pozitif hale geçmiş ve numunelerde ani yenilmeler meydana gelmiştir.

Hirao ve Yasuhara (1991) ön konsolidasyon sürelerinin çevrimsel gerilme altındaki kil zeminlere etkisini araştırmışlardır.  $G_s = 2.58$ ,  $LL = \%115$ ,  $PL = \%40$  değerlerine sahip kil zemine 0.1 Hz frekansta çevrimsel gerilme uygulamışlardır. Şekil değiştirme %5'e ulaştığında zeminin yenildiğine karar verilmiştir. Çevrimsel yüklemmeden önce zemin sırasıyla 0, 0.5, 1, 4, 8 ve 24 saat ön konsolidasyona tabi tutulmuştur. Araştırmacılar, çevrimsel yüklemmeden sonra açığa çıkan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için zemine yeniden konsolidasyon uygulanmış ve çevrimsel gerilme karşısında kil zeminin göstermiş olduğu mukavemetin ön konsolidasyon aşamasında

efektif gerilmenin artmasıyla yönetildiğini söylemişlerdir. Dolayısıyla ön-konsolidasyon süresinin artması zeminin mukavemetini arttırmıştır. Sonuçta, ön-konsolidasyon süresinin artması numunenin boşluk oranını daha fazla azaltmış ve bu durum kil zeminin daha mukavemetli hale gelmesini sağlamıştır. Ayrıca 8 ve 24 saat konsolide edilen zeminler tam konsolidasyona ulaşmışken daha az süre ile konsolide edilen zeminler birincil konsolidasyonlarını tamamlayamamıştır.

O'Reilly vd. (1991) LL = %32, PL = %17 değerlerine sahip siltli kil zemin numunelerini bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlayarak 0.1 Hz frekansta dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında statik koşullar altında drene olan normal konsolide siltli kil zeminin, drenajsız çevrimsel yüklemeler altında davranışının belirlenmesini hedeflemişlerdir. Numuneler arazideki bir zemini modelleyebilmek için  $K_0$  konsolidasyonuna tabi tutulmuştur. Numunelerin drejansız kayma gerilmesinin %30, %50 ve %70'i çevrimsel deviatör gerilme olarak kullanılmıştır. Anizotropik konsolidasyondan sonra her numuneye 6 saat boyunca 5 periyot halinde 2160 drenajsız çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Her yükleme periyodunda numune %90 konsolidasyonunu tamamlayacak şekilde 18 ile 66 saat arasında drenajlı koşullarda dinlenmeye bırakılmıştır. Numunelere dört farklı deney tipi uygulanmıştır. Bunlardan ilk üçü numunelerin drejansız kayma gerilmesinin %30, %50 ve %70'i çevrimsel deviatör gerilme olarak uygulanmasıdır. Dördüncü deney tipinde ise numunelere sırayla artan ve azalan deviatör gerilme uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda anizotropik konsolide edilmiş normal konsolide siltli kil zeminler drenajsız çevrimsel gerilmeye tabi tutulduğunda boşluk suyu basıncındaki artış zeminin yenilmesine yol açmıştır. Sonuçta zeminin yenilmesi için gerekli olan çevrim sayısı çevrimsel gerilme arttıkça azalmış ve drenaj periyotları numunenin güçlenmesini sağlamıştır. Ayrıca, drenajlı dinlenme periyodundan sonra bir önceki periyotta ulaşılan boşluk suyu basıncına ulaşabilmek için daha fazla çevrimsel yükleme gerekmiştir. Zeminin çevrimsel gerilmelerden sonra konsolidasyona izin verilmesiyle dayanım artmıştır

Cao ve Law (1992) Ottawa Nehri vadisinden elde edilen örselenmemiş normal konsolide ve aşırı konsolide Champlain Sea killerini kullanarak, başlangıç kayma modülünü ölçmek amacıyla küçük gerilme genliklerinde drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli ve rezonant kolon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Dinamik üç eksenli deneyi 1Hz freansta gerçekleştirilmiş ve şekil değiştirmeler %10'a ulaştığında zeminin yenildiği

kabul edilmiştir. Dinamik yüklemeye kaynaklanan deformasyon sırasında enerji, histerik sönümlenme ve zeminin deformasyonu ile sönümlenmektedir. Plastik deformasyonla enerji sönümlenmesi, yüklemeye sırasında kalıcı deformasyon oluştuğunda meydana gelmektedir. Araştırmacılar bu enerji konseptine dayanarak, çevrimsel yük altında kil zeminin davranışını analiz etmek için yeni bir enerji kavramı ortaya koymuşlardır. Sonuç, sönümlenme enerjisi ile dinamik yük altında zeminin davranışı arasında aşırı boşluk suyu basıncı, kalıcı deformasyon, kayma modülü ve dinamik mukavemetle ifade edilen bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu amaçla dinamik yüklemeye altında oluşan boşluk suyu basıncını, artık değer ve artık değer etrafında titreşen boşluk suyu basıncının genliği olarak iki bileşenle ifade etmişlerdir. Artık değer tam bir çevrim için ortalama aşırı boşluk suyu basıncıdır.

Yasuhara vd. (1992) yaptıkları çalışmada dinamik üç eksenli deneyini kullanarak kil zeminlerin dinamik yüklemeye esnasında ve sonrasında davranışlarını incelemişlerdir. Deneylerinde  $G_s = 2.58-2.65$ ,  $LL = \%115-123$  ve  $PI = \%69-72$  değerlerine sahip yüksek plastisiteli kil kullanmışlardır. İzotropik konsolidasyona tabi tutulan numunelerde gerilme kontrollü 0.1, 1.0 ve 3.0 Hz frekanslarda çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Tek yönlü ve iki yönlü yüklemeye modelleri kullanılmıştır. Çevrimsel gerilmeden sonra bazı numunelerde dreneja izin verilmiştir ve son olarak tüm numuneler yenilene kadar üç eksenli deneyine tabii tutulmuşlardır. Deney sonucunda iki yönlü yüklemeye modelinde tek yönlü yüklemeye modeline göre boşluk suyu basıncı ve kalıntı kesme deformasyonu daha hızlı yükselmiştir. Dolayısıyla iki yönlü yüklemeye modelindeki kilin çevrimsel mukavemeti tek yönlü yüklemeye modelindeki çevrimsel mukavemete göre biraz daha düşük olduğu bulunmuştur. Numunelere ait kayma mukavemeti numunelerde çevrimsel gerilmenin büyüklüğü ile oluşan boşluk suyu basıncı arttıkça azalmıştır. Bu durum hem drenajlı hem de drenajsız durumlar için gözlenmiştir. Ancak dreneja izin verilen numunelerde azalma oransal olarak daha azdır. Sonuçta çevrimsel yüklemeye sonrasında yapılan üç eksenli deneyinden elde edilen sonuçlara göre, çevrimsel gerilmeden kaynaklanan kil zemin numunelerinde gerilme izi açık bir şekilde aşırı konsolidasyon davranışı göstermektedir ve bu aşırı konsolide kil zeminde yükün boşaltılması işlemine benzerdir.

Matsui vd. (1992) çevrimsel gerilmeden sonra zemindeki deformasyonu incelemişlerdir. Örselenmemiş Osaka kili ve örselenmiş Crown kilini ( $w = \%60$ ,  $LL = \%99$ ,  $PL = \%43$ ) kullanarak eksen çevresinde simetrik drenajsız üç eksenli deneyi

yapmışlardır. Deneylerinde aşırı konsolidasyon oranı 1, 1.3 ve 4 olarak numuneler kullanmış ve 0.5 Hz frekansta sinüzoidal dalga ile şekil değiştirme kontrollü olarak deneye tabi tutulmuşlardır. Öncelikle numunelere 100 çevrim uygulanmıştır. Daha sonra numune içindeki boşluk suyu basıncının dengeye gelmesine izin verilmiş ve sonunda numune statik yük altında yenilmeye uğruyana kadar yüklenmiştir. Çevrimsel yükleme sırasında normal konsolide oluşan aşırı boşluk suyu basıncı belirgin bir aşırı konsolidasyon durumuna sebep olmuştur. Bu yüzden çevrimsel gerilmeden sonra normal konsolide killerde uygulanan statik yüklemeye efektif gerilme izi aşırı konsolide killerdeki gerilme izine karşılık gelmiştir. Bu durum aşırı konsolide killerde görülmemektedir çünkü aşırı konsolide killerde çevrimsel gerilme altında başlangıçta ilk olarak negatif boşluk suyu basıncı artışı oluşmuş, daha sonra çevrimsel gerilmenin seviyesine bağlı olarak pozitif aşırı boşluk suyu basıncı görülmüştür. Sonuç olarak aşırı konsolide numunelerde çevrimsel gerilme öncesi ve sonrasında aşırı boşluk suyu basıncında fazla bir fark meydana gelmemiştir. Hem normal hem de aşırı konsolide kil numunelerde çevrimsel eksenel gerilme arttıkça drenajsız kayma mukavemeti azalmıştır ve gerilmenin sekant ve tanjant deformasyon modüllünün azalmasında önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Yazarlar tarafından kayma mukavemetinin bozulması sonucunda yenilme esnasındaki şekil değiştirmenin çevrimsel gerilme etkisinden dolayı artabileceği söylenmiştir. Çevrimsel gerilme çok küçük olduğunda mukavemet bozulmasında herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu durumda kayma mukavemetindeki azalma belirgin olmayıp, deformasyon modülünde azalma ve yenilme esnasındaki şekil değiştirmede artış meydana gelmiştir.

Ishibashi ve Zhang (1993) kil ve kumların dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının belirlenmesinde her iki zemin tipi içinde kullanılabilecek bir eşitlik önermiştir. Bu amaçla literatürdeki kum ve killer için verilen deney sonuçları kullanılarak analizler yapılmıştır. Literatürde kumların kayma modülü ölçülmesi için genellikle boşluk oranı ve efektif gerilmeye bağlı olarak verilen eşitlikler ile killerin kayma modülünün belirlenmesi için plastisite indeksine bağlı olarak verilen eşitlikler incelenmiş, deney dataları aynı grafikler üzerinde işaretlenerek bir bağıntı oluşturulmuştur. Analizler sonucunda kayma modülü ölçümü için rezonant kolon deneyi yaparak elde edilen verilerin arazi deneyleri ile elde edilen veriler ile daha fazla benzerlik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada önerilen bağıntı çakıllı ve aşırı konsolide zeminler göz ardı

edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca kumlar ve normal konsolide zeminler için pratik amaçlarla kullanılabilmesi söylenmiştir.

Konrad ve Wagg (1993) kaolin kili ve silika silt karışımlarını kullanarak dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmişlerdir. Numune hazırlama yöntemi olarak bulamaç çamuru yöntemini kullanmışlardır. Deneylerde %100 silt, %90 silt %10 kil, , %80 silt %20 kil, %70 silt %30 kil ve %60 silt %40 kil karışımları kullanmışlardır. Numunelere anizotropik konsolidasyon uygulanmış ve daha sonra numuneler 0.5Hz frekansta dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuşlardır. Önkonsolidasyon basıncı olarak numuneler 60 kPa altında hazırlanmışlardır. Deney esnasında çevrimsel gerilme, devitör gerilmenin ön konsolidasyon basıncına oranı 0.38, 0.29 ve 0.19 olacak şekilde kullanılmıştır. Ayrıca dinamik üç eksenli deneyinde kullanılan frekansın kil karışımları üzerindeki etkisinin incelenmesi için iki numune 0.2 ve 0.05 Hz frekansta deneye tabi tutulmuştur. Birkaç çevrimsel gerilme yüklemesinden sonra numuneler sabit bir deformasyon oranına ulaşmıştır. Deneylerden elde edilen verilere göre çevrimsel yükleme esnasındaki deformasyon oranının numunedeki düzensiz boşluk suyu basıncının dağılımını etkileyerek dinamik kırılma zarfının yerini etkileyebileceğini söylemişlerdir. Ayrıca, kil silt karışımlarında silt oranının dinamik üç eksenli deneyinde önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Sabit çevrimsel gerilme oranında, ortalama deformasyon oranı kil içeriği arttıkça artmıştır. Ayrıca çevrimsel yükleme esnasında ortalama şekil değiştirme oranına 0.05 ve 0.5 Hz arasındaki frekansların etkisinin olmadığını söylemişlerdir.

Lefebvre ve Pfindler (1996) yaptıkları çalışmada  $w = \%55$ - $\%57$ ,  $LL = \%41$  ve  $PL = \%21$  değerlerine sahip örselenmemiş hassas kil numuneleri kullanarak dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Numuneler alındıktan sonra aşırı konsolide oranı 2.2 olacak şekilde ön konsolidasyon basıncı uygulanmıştır. Deneylerinde 0.1 Hz frekansta çevrimsel gerilme kontrollü iki yönlü sinüzoidal çevrimsel yük kullanmışlardır. Çevrimsel gerilmeden önce numunelere başlangıç olarak statik kesme gerilmesi uygulanmıştır. Başlangıç statik kesme deneyi sabit hacimde drenajsız koşullarda uygulanmıştır. Başlangıçta uygulanan bu gerilme çevrimsel gerilme altında numunelerin direncini azaltmasına karşın toplam drenajsız kayma gerilmesi direncini arttırmıştır. Bu durum elastik şekil değiştirmenin kısmen veya tamamen kaybolmasından kaynaklanmaktadır. Sonuçta, çevrimsel yüklemeye önce başlangıç statik kesme gerilmesi numunenin mukavemetini çevrim sayısındaki artışla birlikte önemli derecede

azaltır. Bu çalışma daha öncesinde başlangıçta üç eksenli deneyi kullanan çalışmalarda görülen drenajsız kayma mukavemetindeki belirgin artışı doğrulamıştır.

Yasuhara ve Toyota (1997) siltli kil zeminlerde uygulanan başlangıç deviatör gerilmesinin çevrimsel gerilme esnasında zeminin mukavemetini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Çalışmada  $LL = \%40.2$ ,  $PI = \%23$  ve  $G_s = 2.69$  olan siltli kil zeminleri bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlanmıştır. Deneylerde, ortalama efektif gerilme 198 kPa olacak şekilde sabit tutmuşlardır. Başlangıç deviatör gerilme olarak ortalama efektif gerilmenin 0, 0.3, 0.6 ve 0.75 katı numunelere etki ettirilerek dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirilmiştir. Dinamik üç eksenli deneyinde 0.1 Hz frekans kullanılarak numuneler belirlenen boşluk suyu basıncına ulaşana kadar gözlenmiştir. Daha sonra numunelere statik drenajsız kesme deneyi uygulanmıştır. Deneylerde, başlangıç sürekli kayma gerilmesi olsun veya olmasın çevrimsel gerilme aşırı boşluk suyu basıncının artmasına sebep olmuştur. Numunelerin efektif gerilme izi drenajsız kesme deneyinde aşırı konsolide kile benzer hale gelmiştir. Yani normal konsolide olan killerde çevrimsel yükleme sebebiyle aşırı boşluk suyu basınçları artmıştır. Numuneler daha sonra statik drenajsız kesme deneyi ile kesildiğinde aşırı konsolide numunelerle benzer sonuçlar göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda araştırmacılar başlangıç sürekli kayma gerilmesinin bulunmadığı durumlarda çevrimsel yüklemekten kaynaklanan kayma modülündeki azalma drenajsız mukavemetteki azalmaya göre daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerdeki mukavemet ve rijitlik azalması başlangıç sürekli kayma gerilmesinden bağımsız davranış sergilediğini ve numunelerdeki rijitlik bozulmasının mukavemet bozulmasına göre daha belirgin olduğunu söylemişlerdir.

Vucetic vd. (1998) drenajsız dinamik kesme deneyini kullanarak sönüm oranını bulmak amacıyla iki farklı kum ve üç farklı kil numunesi üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları killeri sırasıyla %52, %66, %125 likit limite, %30, %28, %50 plastik limite ve 0.82, 0.80, 0.17 sıvılık indisine sahiptir. Kumlar ise %0 ve %8 oranında silt bulundurmaktadır. Deneyler, düşük birim deformasyon genliklerinde ve değişken efektif gerilmelerde uygulanmış ve sonuçta hem kum hem kil numuneler için sönüm oranının efektif gerilme ve aşırı konsolidasyon oranı ile azaldığı ancak plastisite indisi ve efektif gerilme artışı ile bu etkinin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarında, dinamik yükleme frekansının etkisi tam olarak görülemediği. Kayma birim deformasyon genliklerinin % 0.01'den büyük olduğu

durumlarda kumların sönüm oranının killerekinden yüksek olduğu, temiz kumun sönüm oranının siltli kumdan yüksek olduğu, killerde ise plastisite indeksindeki artış ile azaldığı belirlenmiştir. Kayma birim deformasyonunun % 0.005'in altında ise killerin sönüm oranının kumlarınkinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. İlave olarak siltli kum ile temiz kumun sönüm oranlarının yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek efektif basınçlarda konsolide edilen veya aşırı konsolidasyon oranına ve yüksek plastisite indeksine sahip killerde yüksek sönüm oranları elde edilmiştir. Çalışma sonucunda yüksek kayma birim deformasyonlarda kumların, düşük kayma birim deformasyonlarda ise killerin daha büyük sönüm oranlarına sahip olduğu gözlenmiş ve bu durum kumların killere göre daha fazla non-lineer olması ve killerin daha fazla viskoz olması şeklinde açıklanmıştır.

Hyodo vd. (1999) yapmış oldukları çalışmada kil zeminlerde başlangıç deviatör gerilmesinin ve plastisite indisinin drenajsız çevrimsel gerilmeye etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Japonya'da bulunan değişik fiziksel özelliklerdeki 8 çeşit kil kullanmışlardır. Örselenmemiş ve yaşlandırma etkisi ile hazırlanan numunelerde 0.02 Hz frekansta dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çevrimsel gerilme öncesi numuneler 3 farklı gerilme altında konsolide edilmişlerdir. İlk başta arazideki mevcut efektif gerilmeden daha az gerilme altında konsolide edilen numuneler aşırı konsolide durumundadır. İkinci konsolidasyon tipinde arazideki gerilmeye eşit büyüklükteki gerilme altında numuneler konsolide edilmiştir. En sonunda ise arazidekinden daha büyük gerilme ile numuneler konsolide edilmiştir. Konsolidasyonu tamamlanan numuneler 20 çevrim olacak şekilde dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Araştırmacılar çalışmalarının sonunda plastisite indisinin artmasıyla çevrimsel mukavemetin arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca başlangıçta drenajlı kayma gerilmesi uygulanan numuneler eksenel şekil değiştirmenin artmasıyla yenilmişlerdir. Düşük plastisiteli killerde başlangıç drenajlı kayma mukavemetinin artması çevrimsel mukavemette hafif bir artış meydana getirmiştir. Buna karşılık, yüksek plastisiteli killerde başlangıç drenajlı kayma mukavemetinin artması çevrimsel mukavemette belirgin azalmaya sebep olmuştur. Araştırmacılar düşük plastisiteli killerin dinamik üç eksenli altındaki tepkilerinin kumlarla benzerlik gösterdiğini söylemişlerdir. Sonuçta konsolidasyonun etkisinin görülmesi amacıyla yapılan deneylerde aşırı konsolidasyon oranının artması çevrimsel mukavemeti arttırmıştır.

Wang ve Kuwano (1999) killi kumlar üzerinde dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirerek kayma modülünün ve sönüm oranının deformasyona etkisini incelemişlerdir. Kawasaki kili ve Toyoura kumu ağırlıkça karıştırılarak hazırlanmış üç tip numune ile yalnızca kilden hazırlanan bir numune olmak üzere toplam dört farklı tip deney numuneleri farklı efektif çevre gerilmelerinde ve yükleme çevrimlerinde drenajsız olarak dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Bulamaç çamuru yöntemi ile hazırladıkları numunelerin fiziksel özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1.:** Wang ve Kuwano’nun (1999) çalışmasında kullanılan parametreler

Zemin tipi	M2	M5	M10	M30
Özgül Ağırlık	2.65	2.65	2.66	2.69
Likit limit (%)	19.2	20.5	27.4	54.5
Plastik limit (%)	-	-	17.5	25.0
Plastisite oranı	2	5	9.9	29.5
İnce dane oranı (%)	17	25	35	73
Kumun karıştırma oranı	0.78	0.69	0.54	0

Ayrıca deneyler sırasında boşluk suyu basıncı gelişimi de incelenmiştir. Çevrim sayısına bağlı olarak aşırı boşluk suyu basıncı artışı gözlemlenmiştir. Sonuçta, kayma modülü değeri aşırı boşluk suyu basıncı oluşması nedeni ile yüksek deformasyon aralıklarında çevrimsel yükleme ile azalmaktadır. Sönüm oranı çevre basıncından çok fazla etkilenmemektedir. Kayma modülü üzerinde yükleme düzensizliklerinin etkisi, aşırı boşluk suyu basıncı ve kalıcı birim deformasyon oluşumunda en yüksek değere ulaştığı gözlenmiştir.

Ansal vd. (2001) Haliç’in altında bulunan CH-OH sınıfı normal konsolide killeri kullanarak drejansız koşullarda gerilme kontrollü burulmalı üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, gerilme-şekil değiştirme ve kesme mukavemeti karakteristiğindeki değişimleri eşik çevrimsel kayma gerilmesi ve çevrimsel akma gerilmesi açısından değerlendirmek için burulmalı üç eksenli deneyi yapmışlardır. Farklı plastisite indisine sahip zeminlerde eşik çevrimsel kayma gerilmesinin değerlendirilebilmesi üzere her bir numune için maksimum kayma modülleri ve modül

azalma eğrileri belirlenmiştir. Ayrıca, numuneler farklı kayma gerilmesi büyüklüklerinde bir dizi çevrimsel basit kesme deneyine tabi tutulmuştur. Buna ilave olarak numuneler dreneja izin verilmeden  $K_0$  gerilme koşullarında 1 saat tutularak boşluk suyu basınçlarının dağılarak dengeye gelmesi beklenmiştir. Bundan sonra numuneler drejansız koşullarda şekil değiştirme kontrollü olarak kesilmiştir. Başka bir grup deneyde ise çevrimsel kayma gerilmeleri esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesine izin verilerek çevrimsel gerilme sonrasında konsolidasyon oturması incelenmiştir. Araştırmacılar, çevrimsel gerilmeye maruz kalan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarında birbirini izleyen üç aşama olduğunu belirtmişlerdir. İlk aşamada numune kayma mukavemeti ve gerilme-şekil değiştirmesi etkilenmeden herhangi bir belirgin bozulma olmaksızın elastik tepki göstermektedir. Zemine uygulanan çevrimsel gerilme küçüktür bu yüzden herhangi bir şekil değiştirme olmamıştır. Elastik eşik aşıldığında ise zemin elasto-plastik davranış sergileyecektir. Bu ikinci aşamadır. Bu aşamada çevrimsel kayma gerilmesinde oluşan şekil değiştirmeler dane yapısının bozulmasına, boşluk suyu basıncı oluşmasına ve plastik eşığe kadar kayma mukavemeti ile gerilme-şekil değiştirme davranışlarında hızlı bir bozulmaya neden olmuştur. Plastik eşığın aşılmasından sonra numunede dinamik kayma modülündeki önemli azalma sebebiyle büyük şekil değiştirmeler oluşmuştur. Bu zeminlerdeki üçüncü evre olan plastik evredir. Kil zeminler genel itibariyle yüksek elastik özellik gösteren zeminlerdir ancak bu zeminlerde çevrimsel gerilmelerden kaynaklı oluşan şekil değiştirmeler kritik seviyeyi aşar ve plastik evreye ulaşırsa dane yapısının bozulmasının yanı sıra, aşırı boşluk suyu basınçları önemli derecede artarak kayma mukavemetinde şiddetli azalmaya sebep olmaktadır.

Zhou ve Gong (2001) örselenmemiş normal konsolide killeri kullanarak dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları kilin fiziksel özellikleri  $w = \%32.1$ ,  $G_s = 2.71$ ,  $LL = \%33.76$  ve  $PL = \%19.33$  değerlerine sahiptir. Gerilme kontrollü deneylerinde 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 Hz frekansta farklı çevrim sayılarında analizler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullanılan numunelere aşırı konsolidasyon oranı 1.2, 1.4, 2, 4, 8 olacak şekilde konsolidasyon sırasında basınç uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre düşük çevrimsel gerilme oranlarında şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı çevrim sayısının artmasıyla yavaş bir şekilde artış göstermiştir. Ancak kayma gerilmesi oranı yüksekken boşluk suyu basıncı birikimi ve büyük şekil değiştirmeler deneyin başlaması ile birlikte ortaya çıkmıştır. Aynı sayıda çevrimsel

gerilmeye maruz kalan numunelerde çevrimsel kayma gerilmesi oranı arttıkça bozulma indeksi azalmıştır. Bu durum çevrimsel kayma gerilmesinin zemindeki bozulmayı arttırdığını göstermiştir. Ayrıca normal konsolide killerin bozulma indeksinin aşırı konsolide killere oranla daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu normal konsolide killerin rijitliğinin aşırı konsolide killere kıyasla daha hızlı ve daha fazla bozulacağını göstermiştir. Bu çalışma ile araştırmacılar aşırı konsolidasyon oranının killerin bozulmasında önemli bir faktör olduğunu söylemiştir. Killer üzerinde frekansın etkisi kayma gerilmesinin azalması ve çevrim sayısının artmasıyla azalmıştır. Frekansın azalması killerdeki bozulmanın artmasına sebep olmuştur. Yüksek frekans değerlerinde yüksek bozulma indeksi tespit edilmiştir. Yükleme sıklığı 0.1 Hz'den düşük olduğu durumlarda az sayıdaki çevrimde dahi numuneler hızlı bir şekilde bozulmuştur.

Teachavorasinskun vd. (2002) yaptıkları çalışmada örselenmemiş Bangkok kilini kullanarak bu zemine ait kayma modülü ve sönüm oranını dinamik üç eksenli deneyi ile incelemişlerdir. Bu amaçla 3 farklı alandan kil numuneleri alınmıştır. Alınan numunelerin likit limitleri %59 ile %85 arasında değişmektedir. Tam doymun hale gelen numuneler 15 çevrimlik drenajsız koşullarda çevrimsel yüklemeye maruz bırakılarak kayma modülü ve sönüm oranı belirlenmiştir. Ölçülen kayma modülü değerlerinin daha önceki çalışmalarda bulunan benzer plastisiteye sahip killer ile aynı aralık değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Sönüm oranları ise %0.01 gibi küçük birim deformasyonlarda %5, %0 gibi büyük birim deformasyonlarda %30 farklılıklar göstermiştir. Çalışma sırasında yükleme frekansının ve dinamik gerilme geçmişinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisine bakıldığında; 0,1 Hz'den 1 Hz'e olan frekans artışı kayma modülü üzerinde herhangi bir etkiye sebep olmamasına rağmen sönümlenme değerinde küçük bir azalma yaratmıştır. Dinamik yükleme geçmişinin ise deneye tabi tutulan boşluk oranı aralığında kayda değer bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Yasuhara vd. (2003) gerilme kontrollü drenajsız dinamik üç eksenli deneyi kullanarak siltli killerin mukavemet ve rijitliklerinin bozulma özelliklerini incelemişlerdir. Dinamik üç eksenli deneyleri sonrasında aynı numunelere deformasyon kontrollü statik üç eksenli deneyi uygulamışlardır.  $G_s = 2.787$ ,  $LL = \%38.6$  ve  $PI = \%19.7$  indeks özelliklerine sahip zemin numuneleri bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlanmıştır. Numuneler, aşırı konsolidasyon oranı 1, 2, 4 ve 10 olacak şekilde farklı konsolidasyon oranlarında izotropik konsolidasyona tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelere drenajlı

koşullarda başlangıç deviatör gerilmesi uygulanarak numuneler anizotropik konsolidasyona tabi tutulmuştur. Bundan sonra numunelere 0.1 Hz frekansta gerilme kontrollü çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Çevrimsel gerilme sonucunda normal konsolide olan numuneler aşırı konsolide davranışı göstermişlerdir. Bu durum çevrimsel gerilme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının artmasıyla daha belirgin hale gelmektedir. Buna ek olarak, çevrimsel gerilme sonrasında drenajsız kayma mukavemeti çevrimsel gerilme öncesindeki drenajsız kayma mukavemetinin %20'sinden daha fazla azalmamıştır. Buna bağlı olarak araştırmacılar deprem sırasında ince daneli plastik zeminlerde meydana gelen stabilite kaybı ve aşırı yanal deformasyonun drenajsız mukavemetten ziyade zeminin yumuşamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri verilere göre numunelerde rijitlik azalması drenajsız mukavemetteki azalmaya göre daha belirgindir. Sonuçta hem drenajsız mukavemetteki hem de numunelerin rijitliğindeki azalma boşluk suyu basıncının artmasıyla artış göstermiştir. Bu azalmanın aşırı konsolide numunelerde daha belirgin olduğunu söylemişlerdir.

Yılmaz vd. (2004) 2 ile 4.5 m arası derinlikten örselenmemiş numune olarak Adapazarı'ndaki kil ve silt karışımı zeminlerin drenajsız kayma mukavemetlerini ve deformasyon davranışlarını incelemişlerdir. Deneyde kullanılan zeminler birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre CL ve ML zeminler olup plastisite indisleri 7 ile 25 arasında değişmektedir. Numuneler üzerinde standart ve hızlı yükleme koşullarında statik ve dinamik üçeksenli deneyler uygulanmıştır. Gerilme kontrollü uyguladıkları dinamik üçeksenli deneylerinde numunelere frekans değeri 0.5 ve 1 Hz olan sinüzoidal çevrimsel eksenel yükler uygulayarak zeminlerin viskoz davranışının düzgün şekilde yantıtılmasını sağlamayı amaçlamışlardır. Her bir çevrimsel deneyin sonucunda numuneler anizotropik gerilme koşullarına tekrar getirilerek drenajsız koşullarda 5 dakika bekletilmiştir. Bu sayede numunelerde yenilme olup olmadığı ile çevrimsel yüklemeye muhtemel kuvvet kaybı nedeniyle herhangi bir deformasyon meydana gelip gelmediği gözlenmiştir. Son olarak, numuneler 10 ila 160 kPa/s arasında hızlı statik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında çevrimsel gerilme altında şekil değiştirmenin önemli ölçüde pik çevrimsel gerilme ile statik kayma gerilmesi arasındaki ilişkiye bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Numunelere uygulanan statik kuvvetin aşılması durumunda plastik şekil değiştirmeler sabit oranlarla hızla oluşurken birkaç çevrimden sonra plastik şekil

değiştirme oranının neredeyse sifira indiğini belirtmişlerdir. Artan oranlardaki yükler altında belirgin olan viskoz yapıyı yansıtan zeminlerde çevrimsel yüklemekten sonra hızlı yükleme deneyleri sırasında görünür mukavemette önemli artışlar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, kohezyonlu zeminlerde drenajsız koşullarda gerilme-şekil değiştirme tepkisinin yükleme geçmişi üzerine bağımlılığını ve yükleme hızının artmasıyla ortaya çıkan belirgin viskoz tepkiyi ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, artan yükleme hızlarında kohezyonlu zeminlerde viskoz davranışın, mukavemet ve plastik deformasyon birikimi tepkisine hakim olduğunu göstermektedir.

Erken ve Ülker (2007) kuru yağmurlama yöntemi ile hazırladıkları örselenmiş numuneler ve İzmir Çiğli bölgesinden almış oldukları örselenmemiş numuneler ile burulmalı kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan örselenmiş numuneler deprem sırasında sıvılaştıran ve taşıma gücü kaybına uğrayan bölgelerden elde edilen yumuşak siltli ve killi zeminlerdir. Çalışmalarında kullandıkları örselenmiş numunelerin bir kısmını Gümüşdere bölgesinden temin etmişlerdir. Bunlar plastisite indisi değeri 18'e eşit siltli kil zeminlerdir. Örselenmiş numunelerin bir kısmını da Adapazarı'ndan temin etmişlerdir. Bu zeminlerin plastisite indisi değeri ise 2 ile 33 arasında değişmektedir. Örselenmemiş numunelerin alındığı İzmir Çiğli de ise zeminlerin plastisite indisi 5 ile 9 arasında değişmektedir. Çalışmalarında uyguladıkları ilk deney serisinde silt zeminlerin dinamik mukavemetleri, farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan burulmalı kesme deneyi ile belirlenmiştir. İzotropik olarak 100 kPa basınçta konsolide edilen numunelere 0.1 Hz frekansında farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri uygulanmıştır. Deneylerinden elde ettikleri sonuçlara göre plastisite arttıkça silt zeminlerde dinamik mukavemet artmaktadır fakat bu artış %10 plastisite indisi değerinden sonra gerçekleşmiştir. Plastisite indisi % 2 olan siltli numunenin dinamik mukavemeti, % 11 plastisiteli siltli numunedan az bir miktarla da olsa daha fazlayken, % 18 plastisiteli siltli kil zemine yakın elde edilmiştir. Laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan bir başka deney serisinde ise numunelere göçme oluşuncaya kadar önce çevrimsel gerilme uygulanmış daha sonra 0.50 mm/dk deformasyon hızında %10 birim kayma oluşuncaya kadar statik kesme deneyi yapılmıştır. Sonuçlardan, dinamik deneylerde göçme seviyesine ulaşan zeminlerin statik mukavemetlerinin % 50'den fazla azaldığını göstermiştir. Ayrıca, plastisite indisi yüksek olan zeminde bu azalma bir miktar daha düşük olurken, genel olarak fazla bir fark olmaksızın tekrarlı yükleme sonrası statik

mukavemetlerin önemli ölçüde düştüğü belirlenmiştir. Örselenmemiş deneylerde dinamik mukavemetler, laboratuvar numunelerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Bunun yanında boşluk suyu basıncı artımlarında birim kaymalar hızla artarak zemin numunelerinde taşıma gücü kayıplarının oluşmasına neden olmuştur. Araştırmacılar deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametrelerin, çevrimsel gerilmenin sayısı, çevrimsel gerilmenin genliği, kritik birim akma deformasyonu, plastisite indisi, ince dane miktarı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı, ve numune hazırlama yöntemi ile numunenin yapısı olduğunu belirtmişlerdir. Düşük plastisiteli siltli ve killi zeminlerde yapılan dinamik deneylerde boşluk suyu basınçları sınırlı kalmakta, bunun yanında birim kayma deformasyonları hızla artmaktadır. Bundan dolayı zeminde çevrim sayılarıyla birlikte yumuşama meydana gelmekte, zemin numunesi kalıcı deformasyonlar sonucu taşıma gücünü kaybetmektedir.

Lee ve Sheo (2007)  $w = \%41$ ,  $LL = \%38$  ve  $PI = \%21$  olan siltli kil zeminlerde çevrimsel yükleme esnasında sekant modülünde meydana gelen bozunmanın miktarını belirlemek amacıyla bir rijitlik bozunma modeli oluşturmuşlardır. Rijitlik bozunmasının ve sönüm oranındaki gelişimin bulunması amacıyla Ramberg-Osgood denklemini kullanmışlardır. Şekil değiştirme kontrollü drenajsız dinamik üçeksenli deneyini kullanarak numunelere 0.1 Hz frekansta sinüzoidal yükleme yapmışlardır. Bu sayede siltli kil zeminin nonlineer davranışını araştırmışlardır. İlk deney serisi toplam 6 şekil değiştirme kontrollü dinamik üç eksenli deneyinden oluşmaktadır ve her deney aşamasının ardından birbirini takip eden çeşitli çevrimsel yüklemeler bulunmaktadır. Çevrimsel şekil değiştirmenin büyüklüğünü her aşamada sabit tutan araştırmacılar yükleme aşamalarında farklı şekil değiştirme büyüklükleri uygulamışlardır. 100 çevrimden oluşan aşamalarda iki aşama arasında yada iki çevrim arasında numunenin yenilmesine izin verilmemiştir. İkinci seride ise araştırmacılar her çevrimde farklı şekil değiştirme büyüklükleri kullanmışlardır. Bu serinin sonuçları ile uniform olmayan çevrimsel şekil değiştirmenin kil zemindeki yumuşama ve rijit hale gelme davranışına etkilerini araştırmak için kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre Young modülü çevrim sayısındaki artışla bozulmuştur. Ayrıca eksenel şekil değiştirme genliği ne kadar yüksek olursa modülün bozulması o kadar yüksek olmaktadır. Büyük bir çevrimsel şekil değiştirme genliğini küçük bir genlik izlediğinde numunelerde rijitlik meydana gelmiştir.

Buna karşılık küçük bir çevrimsel şekil değiştirme genliğini büyük bir genlik izlediğinde numunelerde yumuşama meydana gelmiştir.

Okur ve Ansal (2007) normal konsolide ve hafif aşırı konsolide zeminler üzerinde gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney programının ilk kısmında farklı gerilme genliklerinde gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilerek kayma modülündeki azalmayı ve doğrusal olmayan elastik, elasto-plastik ve viskoplastik davranış arasındaki eşikleri tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Deney programının ikinci kısmı düzensiz çevrimsel yüklemelere tabi tutulan ince daneli zeminlerde gerilme-şekil değiştirme davranışının incelenmesinden oluşmaktadır. Bu çalışmada 1999 Kocaeli depreminden sonra Türkiye'de çeşitli yerlerden alınan zemin numuneleri kullanılmıştır. Bu zemin numunelerinin su muhtevası değerleri  $w = \%25$ - $\%52$ ,  $LL = \%38$ - $\%70$ ,  $PI = \%9$ - $\%40$  arasında değişmektedir. İzotropik olarak konsolide edilen numuneler 0.5 Hz frekansta drenajsız koşullarda iki yönlü eksenel çevrimsel gerilmeye tabi tutulmuştur. Çalışmada numuneler, sabit sıkıştırma basıncı altında  $10^{-3}$  -  $\% 10^{-1}$ 'lik geniş bir şekil değiştirme aralığında aşamalı olarak artan gerilme genlikleri ile yüklenmiştir. Numunelerdeki yenilme çift-şekil değiştirme genliğinin  $\%10$ 'u olarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, plastisite indisi dinamik kayma modülünün bozulmasındaki başlıca etkenlerden biri olduğunu göstermiştir. Yapılan deneyler neticesinde dinamik kayma modülü oranının ( $G/G_{max}$ ) ve sönüm oranının ( $\%D$ ) deformasyona bağlı değişiminin plastisite indisi ile kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, çevrimsel gerilmeden kaynaklı bozulmanın bir alt limite sahip olduğu ve bu limitin altındaki bozulmaların ihmal edilebileceği gözlenmiştir. Bu düşük limit değeri boşluk suyu basıncının oluşumuna bağlıdır. Bu eşik değer  $PI$  değerinin artmasıyla genelde artış göstermektedir. Kayma modülündeki bozulma artan çevrimsel gerilmeler etkisiyle deformasyondaki hızlı artıştan kaynaklanmaktadır. Deformasyondaki bu hızlı artış dane yapısının bozulmasına ve zeminde yumuşamaya sebep olmaktadır. Elastik eşik altında zemine ait mühendislik özellikleri etkilenmemektedir. Bu elastik eşik aşıldığı zaman rijitlikteki azalma önem kazanmaya başlamaktadır. Araştırmacılar, zemin numunesinin kararlı durum koşullarına ulaştığı ve viskoplastik malzeme gibi davranmaya başladığı yerde, akış eşiği olarak tanımlanan ikinci bir kritik gerilme seviyesini tanımlamanın mümkün olduğunu söylemişlerdir.

Yıldırım ve Ersan (2007) basit kesme deneyi ile çevrimsel gerilmeden kaynaklı yumuşak kil zeminlerdeki konsolidasyon oturmalarını incelemişlerdir. Farklı gerilme genlikleri ve farklı çevrim sayısı kullanarak yaptıkları araştırmalarında  $LL = \%73$ ,  $PL = \%25$ ,  $PI = \%48$  ve  $G_s = 2.69$  olan yüksek plastisiteli kil zemin kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan oldukları kil İstanbul Zeytinburnu bölgesinden temin edilen zeminin içerisinde  $\%48.5$  kil bulunmakta olup deneylerde bulamaç çamuru yöntemini kullanılmıştır. Çalışmada normal konsolide kil numuneler üzerinde her bir seri 50 çevrim olacak şekilde ardışık çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Her seri arasında numuneye 60 dakika drenaj izni verilmiştir. Deneyde drenajsız koşullarda 0.1 Hz frekansta gerilme kontrollü iki yönlü sinüzoidal çevrimsel yük kullanılmıştır ve numunelere farklı gerilme genlikleri ile farklı çevrim sayısında yükleme yapılmıştır. Deneylerde ilk yükleme aşamasında drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncının arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, her çevrimsel yükleme serisinden sonra izin verilen drenajla birlikte boşluk oranındaki azalma nedeniyle, ardışık yükleme aşamalarında ortaya çıkan boşluk suyu basıncı aşamalı olarak azalmıştır. Ayrıca, çevrimsel gerilme genliğinin artırılması, boşluk suyu basıncındaki artışa ve dolayısıyla çevrimsel gerilme sonrasında numunenin daha fazla oturmasına neden olmuştur. Çevrimsel gerilme oranı ve çevrim sayısı zeminde meydana gelen şekil değiştirmeleri etkilemiştir. Gerilme oranı ve çevrim sayısı arttıkça buna bağlı olarak deformasyonda artış gözlenmiştir. Sonuçta, her bir çevrimsel seri arasındaki hacimsel şekil değişme seri sayısı arttıkça azalmış ve başlangıçta gerilme oranı  $\%7$  olduğu durumda hacimsel şekil değişme oranı 100 çevrim sonucunda  $\%2$  iken, 5 seri sonunda bu oran  $\%0.4$ 'e kadar düşmüştür.

Hanna ve Javed (2008) drenajlı ve drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli deneyi ile Kanada'nın Quebec bölgesinden elde ettikleri normal konsolide duyarlı killer üzerinde çalışmışlardır. Kullandıkları kil zemin CH sınıfına ait olup,  $LL = \%69$ ,  $PL = \%25$ ,  $PI = 44$  ve  $G_s = 2.74$ 'tür. Çevrimsel gerilme uygulanmadan önce numuneler 207kPa'lık ön konsolidasyon basıncına eşdeğer bir basınç altında konsolide edilmiştir. Statik üç eksenli deneyi sonrasında elde edilen yenilme gerilmesinin  $\%33$ ,  $\%35$  ve  $\%67$ 'sine eşdeğer olacak şekilde numunelere çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Çevrimsel deviator gerilme saatte 4 çevrim olacak şekilde 0.001 Hz frekansta uygulanmıştır. Bu frekans yüksek yapılarak gelen rüzgar dalgalarını modellemek amacıyla kullanılmıştır. Drenajlı koşullarda test edilen numunelerin drenajsız koşullardaki numunelere kıyasla yenilmesi

için, daha fazla çevrim sayısı ve daha yüksek çevrimsel gerilmeler gerekmiştir. Hem drenajlı koşullardaki hem de drenajsız koşullardaki numunelerin yenilmesi için çevrimsel deviatör gerilme genliği arttıkça daha az çevrim sayısı gerekmiştir. Düşük gerilme genliklerinde kil zemin yenilmeye uğramadan yarı esnek bir hale gelmiştir. Drenajsız koşullarda drenajlı koşullara kıyasla boşluk suyu basıncı daha hızlı artmış ve daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Drenajlı koşullarda ise boşluk suyu basıncı ancak 10. çevrimden sonra ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda, hassas killerde çevrimsel gerilme sonucunda ortaya çıkan bu boşluk suyu basıncının danelerin yapısını bozarak kayma mukavemetinde ciddi azalmalar olacağını belirtmişlerdir. Bu durumda zeminlerde büyük çökmeler meydana geleceğini, zeminin taşıma kapasitesinin tümüyle kaybolacağını ve felaket niteliğinde yenilmeler meydana geleceğini söylemişlerdir.

Kallioglou vd. (2008) tarafından rezonant kolon deney cihazı kullanılarak örselenmiş ve örselenmemiş kohezyonlu zeminlerin dinamik karakteristiklerini ortaya koymuştur. Çalışmada çevre basıncı, aşırı konsolidasyon oranı, boşluk oranı ve plastisite indisinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kıbrıs ve Yunanistan'da çeşitli bölgelerden örselenmemiş olarak alınan ve laboratuvarında kaolin katılarak kompaksiyon ile hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Doyurma sırasında ters basınç ile hücre basıncı arasında 30kPa'lık bir fark olacak şekilde işlem yapılmıştır. Çalışma sonucunda plastisite, boşluk oranı, gerilme geçmişi, efektif gerilme ve zemin yapısının kayma modülü üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sönüm oranında ise en önemli parametrenin zemin yapısı olduğu belirtilmiş ve burada boşluk oranı için kritik eşik değerin 0.5 olduğu ifade edilmiştir. Boşluk oranı bu değerden küçük olduğunda çok yüksek sönüm oranı değerleri elde edildiği belirtilmiştir. Özellikle kohezyonlu zeminler için plastisite indeksinin kayma modülü ve sönüm oranında meydana gelen değişikliklerde en etkin parametre olduğu ve çalışmada verilen eşitliklerin pratik amaçlar için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Markowska-Lech (2008) suya doymuş kohezyonlu zeminlerin kayma modülünü belirlemek amacıyla 10 adet örselenmemiş numune üzerinde bender eleman içeren üç eksenli deney ile çalışmalar gerçekleştirmiştir. Varşova bölgesinden temin edilen kil zeminin kayma dalgası hızları ölçülmüştür. Kullanılan zemine ait indeks özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

**Çizelge 5.2.:**Markowska-Lech'in (2008) çalışmasında kullanılan zemin özellikleri

Numune	w	LL	PL	PI	LI	p'	$\Delta e$
	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[kPa]	[-]
P1	21.5	45.7	19.1	26.6	0.09	400	0.644-0.613
P2	17.4	42.8	17.7	25.1	-0.01	450	0.620-0.530
P3	17.4	42.8	17.7	25.1	-0.01	350	0.630-0.550
P4	22.1	36.9	18.6	18.3	0.20	500	0.697-0.439
P5	22.5	36.9	18.6	18.3	0.21	330	0.650-0.610
P6	12.1	26.5	9.9	16.6	0.13	350	0.370-0.340
P7	10.7	26.5	11.7	14.8	-0.07	400	0.360-0.320
P8	12.4	26.5	11.7	14.8	0.05	300	0.390-0.350
P9	10.6	26.5	11.7	14.8	-0.08	250	0.340-0.320
P10	10.7	26.5	11.7	14.8	-0.07	250	0.350-0.320

Deformasyon kontrollü yapılan deneylerde deformasyon artışı dakikada 0.005 mm olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda efektif gerilme artışı sırasında numunede boşluk oranı azaldığından kayma dalgası hızı artışı gözlemlenmiştir. Efektif gerilmenin ve boşluk oranının zeminlerin kayma dalgası üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Araştırmacı 100 kPa ve altındaki efektif gerilmelerde ve yüksek frekanslı sinyallerde kayma dalgası hızlarının belirlenmesinde yakın alan etkisi yüzünden problem oluşacağını belirtmiştir. Analizler kullanılarak kayma hızının belirlenmesinde araştırmacı tarafından bir formül önerilmiştir.

Meidani vd. (2008) çalışmalarında dinamik ve monotnik üç eksenli deneyleri gerçekleştirerek çakıl kil karışımlarının dinamik davranışını incelemiştirlerdir. Bu amaçla Kuzey Tahran bölgesinden elde edilen düşük plastisiteli kil malzemesi ile Hazar denizi kıyılarından elde edilen kötü derecelendirilmiş çakıl özelliği gösteren iki farklı şekil yapısına sahip numuneler kullanmışlardır. Kullanılan kil malzemenin sınıfı CH,  $G_s = 2.72$ ,  $LL = \%27.4$ 'tür. Yuvarlak şekilli çakıl zeminin  $G_s = 2.69$ , köşeli çakıl zeminin  $G_s = 2.63$ 'tür ve her iki zemin de GP zemin sınıfındadır. Çalışmada kil ve çakıl numuneleri 5 farklı yüzde de karıştırılarak farklı çevre basınçlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilere göre %44'ün altında çakıl içeren karışımlarda genel davranışın kil parçacıkları etkisinde olduğu, bunda çakıl parçacıkları arasındaki etkileşimin yetersizliği nedeni ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir. %54 ve üzerindeki çakıl içeriğinde ise davranışın çakıl daneleri tarafından kontrol edildiği tespit edilmiştir. Çakıl içeriği arttıkça numunenin kayma modülü ve sönüm oranı değerleri üzerinde çakıl danelerinin etkisi artmakta ve bu danelerin şekillerinin etkisi de

belirginleşmektedir. Yuvarlak dane yapısına sahip karışımlarda daha yüksek kayma modülü değeri gözlemlenmiş ve bu fark yüksek çevre basınçları altında daha belirgin hale gelmiştir. Sönüm oranlarına bakıldığında ise çakıl oranı arttıkça sönüm oranı düşmekte ve yuvarlak dane yapısına sahip çakılların bulunduğu karışımlarda daha yüksek sönüm oranları gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar ışığında yuvarlak dane yapısına sahip çakıl karışımlarının yüksek kayma modülü ve sönüm oranları nedeni ile düşük oturma istenilen zemin çalışmalarında kullanılmasının uygun olacağı önerilmiştir.

Beroya vd. (2009) plastik olmayan silika siltleri ile kaolinit, illit ve montmorillonit killerini çeşitli oranlarda karıştırarak farklı plastisite indisine sahip karışımlar elde etmişlerdir. Eşit yoğunlukta ve homojen numuneler elde edebilmek için numune hazırlama yöntemi olarak ıslak tokmaktama yöntemini seçmişlerdir. Numuneler daha sonra bir elektromekanik bir yük yükleyici ile 1Hz frekansta harmonik olarak değişen çevrimsel yüke tabi tutulmuştur. Numuneler, çeşitli çevrim sayılarında ve çevrimsel gerilme oranlarında, numunede yenilme gerçekleşene kadar yüklenmiştir. Çalışmada çevrimsel mukavemet, 20 çevrim sonrasında numunede yenilme meydana getirecek olan çevrimsel gerilme oranı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar siltli kil karışımlarının çevrimsel davranışının zeminde baskın kil minerali tarafından büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Aynı miktarda kil ve PI değeri ile oluşturulan numunelerde, çevrimsel mukavemet en yüksek montmorillonit numunelerinde, ardından illit numunelerinde ve daha sonra kaolinit numunelerinde görülmüştür. Ayrıca kil oranının ve plastisite indisinin artmasıyla meydana gelen çevrimsel mukavemet artışında yine en yüksek artış montmorillonitte en düşük artış ise kaolinitte oluşmuştur. Araştırmacılar numunelerdeki kil zemin oranı, plastisite indisi ve kil minerali yüzdesi arasındaki ilişkinin doğrusal ve tek yönlü olmadığını, bu yüzden de zeminde kullanılan kilin türüne bakılmaksızın bu verilerin çevrimsel gerilme altında yenilmeye karşı duyarlılığın güvenilir bir göstergesi olarak kullanılmasının mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ince daneli zeminlerde çevrimsel gerilme altındaki davranışın ve sıvılaşma duyarlılığının belirlenmesinde kil yüzdesinin ve plastisite indisinin bir kriter olarak kullanılmasının tekrar gözden geçirilmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Okur ve Ansal (2009) su muhtevası,  $w = \% 25\text{-}\%30$ ,  $LL = \%40\text{-}\%55$ ,  $PI = \%10\text{-}\%30$  ve  $e_0 = 0.72\text{-}1.2$  arasında değişen örselenmemiş normal konsolide kil numuneler üzerinde 0.1Hz frekanslarda gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyleri

gerçekleştirmişlerdir. Deneplerinde kullandıkları kil zemin yüksek plastisiteli (CH) kil olup İstanbul Avcılar bölgesinden temin edilmiştir. Kil zeminin lineer olmayan elastik davranışlarını belirlemek amacıyla numunelere birim kayma genliğinin  $10^{-4}$ 'nü geçmeyecek şekilde sinüzoidal çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Denepler sonucunda maksimum kayma modülü değeri çevre basıncı arttıkça artmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler elastik eşik değeri aşılmadıkça plastisite indisinin maksimum kayma modülüne bir etkisi olmadığını, elastik limit değerden sonra ise plastisite indisinin kayma modülündeki başlıca etkenlerden biri olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar kayma modülü tahmini için pratikte kullanılabilir bir bağıntı önermiş ve arazi denepleri ile karşılaştırıldığında laboratuvar ortamında elde edilen dinamik kayma modülü değerinin 2,5 kat daha az olduğu ve bununda denepler sırasında meydana gelen örselenme ve diğer laboratuvar koşulları sebebiyle oluşabileceğini belirtmişlerdir.

Papadopoulou vd. (2010) tarafından kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerini ve siltli kumların sıvılaşma dirençlerini belirlemek amacıyla denepler gerçekleştirilmiştir. 1999 yılında  $M_w = 7.4$  ve  $M_w = 7.2$  büyüklüğünde iki büyük depremden etkilenen Düzce ili sınırları içinde 6 farklı bölgeden zemin numuneleri alınmıştır. SM sınıfında bulunan siltli kum zeminler ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanıp drenajsız koşullarda deformasyon kontrollü dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Örselenmeden kullanılan killi numunelere ise rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. Rezonant kolon deneyinde kil zeminler, önce tam olarak doymuş hale getirilmiş daha sonra izotropik olarak 24 saat konsolide edildikten sonra çevrimsel gerilmeye maruz bırakılmıştır. Çalışmalarında kullandıkları 7 farklı killin  $LL = \%37-\%50$  ve  $PI = \%15-\%30$  arasında değişmektedir. Kil zeminlerin 5 tanesi CL sınıfında 2 tanesi ise CH sınıfında yer almaktadır. Denepler sonucunda ise siltli kum numunelerde sıvılaşma direnci için laboratuvar ortamında belirlenen parametreler ile zeminin doğal ortamındaki parametreler arasında bazı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Sonuçta, deneplerde kullanılan kil numunesinin kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin diğer kohezyonlu zeminlerle benzer sonuçlar gösterdiği ve plastisitenin sonuçları etkilediği söylenilmiştir.

Li ve diğ. (2011) örselenmemiş normal konsolide yumuşak kil zeminler üzerinde dinamik üç eksenli denepleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları kil zemin,  $w = \%67.5$ ,  $LL = \%63.4$ ,  $PI = \%35.8$ ,  $e_0 = 1.896$  ve  $G_s = 2.75$  değerlerine sahiptir. Numuneler  $K_0$  ortalama değeri 0.55 olacak şekilde  $K_0$  koşulları altında konsolide

edilmiştir. Hücresinin basıncı sabit tutulurken tek düşey yönde, tek yönlü çevrimsel bir sinüzoidal yükleme yapılmıştır. Çalışmada frekansın çevrimsel gerilme altındaki davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla 1.0, 0.10 ve 0.01Hz frekanslar kullanılmıştır.  $K_0$  konsolidasyonundan sonra numuneler iki farklı çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. İlk seride numuneler yenilmeye uğrayana kadar farklı 1.0, 0.10 ve 0.01Hz frekanslarda gerilme kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmıştır. İkinci seride numuneler üzerinde 0.1 ve 0.01Hz frekanslarda deformasyon kontrolü drenajsız dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel yüklemelerden sonra drenaja izin verilmeyen numunelerde kayma deformasyon oranı %16'ya ulaşıncaya kadar statik sıkıştırma deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda belirli bir çevrim için daha düşük frekanslarda daha büyük kayma deformasyonları ve boşluk suyu basınçları görülmüştür. Frekans düştüğünde zeminin yenilmesi için gereken çevrim sayısında önemli ölçüde azalma gözlenmiştir. Pik mukavemetteki azalmanın çevrimsel gerilmeden kaynaklı oluşan kümülatif davranışa bağlı olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, çevrimsel gerilme ile oluşturulan kümülatif kayma deformasyonu ve boşluk suyu basıncı ne kadar büyük olursa mukavemetteki bozulmanın da o kadar büyük olacağını ifade etmişlerdir.

Tang vd. (2011) çevrimsel gerilmeden kaynaklı zeminlerdeki sünme ve boşluk suyu basıncı değişimini analiz etmek için çevrimsel gerilme oranı ve çevrim sayısını arttırarak dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları kil zeminin indeks özellikleri,  $w = \%50.2$ ,  $PL = \%23.2$  ve  $PI = \%20.2$  şeklindedir.  $K_0$  ortalama değeri 0.70 olacak şekilde numuneler anizotropik konsolide edilmiştir. Numunelere 0.5 ve 2.5Hz frekanslarda eksenel sinüzoidal çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Başlangıç çevrimsel gerilme genliği 10 kPa olan dinamik üç eksenli deneyinde numune, periyodik genlik artışı 5 kPa olacak şekilde 2000 çevrim boyunca sürekli çevrimsel gerilmeye tabi tutulmuştur. Araştırmacılar çalışmalarında iki çevrimsel gerilme oranı eşliği bulunduğunu belirtmişlerdir. Bunlardan biri stabilite çevrimsel gerilme oranı diğeri ise yenilme çevrimsel gerilme oranıdır. Bu eşikler zeminlerdeki sünme olayını üç aşamaya bölmüştür. Bunlardan ilki gerilme seviyesi stabilite çevrimsel gerilme oranının altında olduğu durumdur ve burada numune denge safhasındadır. Bir diğeri gerilme seviyesi, stabilite çevrimsel gerilme oranı değeri ile yenilme çevrimsel gerilme oranı arasında olduğu durumdur. Burası sünmenin hızlı büyüme olduğu safhadır. En sonuncusu ise gerilme seviyesinin yenilme çevrimsel gerilme oranının üzerinde olduğu

durumdur. Bu safhada ani yenilme oluşmaktadır. Aynı çevrimsel gerilme seviyesinde düşük frekansta tekrarlı yüklemeye tabi tutulan numunelerde daha fazla birikimli plastik deformasyon, daha fazla geri alınabilir elastik şekil değiştirme ve daha fazla boşluk suyu basıncı oluşumu olduğu gözlenmiştir. Araştırmacılar frekansın yenilme çevrimsel gerilme oranı üzerinde etkili olduğunu ancak stablitede çevrimsel gerilme oranı üzerinde etkili olmadığını belirtmişlerdir. Bu durumda yenilme çevrimsel gerilme oranının altında bir deney yapıldığında frekansın ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu söylemişlerdir.

Wang vd. (2013) trafik altyapısında alt temel malzemesi olarak kullanılan zeminlerin, kayma gerilmesinin altında uzun süreli çevrimsel yüklemeye maruz kaldığını belirterek, yumuşak kil zeminlerin bu uzun süreli yükleme altındaki deformasyonunu incelemek adına statik ve dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları yumuşak kili Çin'in Wenzhou bölgesinden temin etmişlerdir ve zeminin indeks özellikleri,  $w = \%56\text{-}\%59$ ,  $LL = \%64$ ,  $PI = \%36$ ,  $e_0 = 1.55\text{-}1.59$  ve  $G_s = 2.75$  özgül ağırlık şeklindedir. Kil zeminin içerisinde  $\%55$  kil ve  $\%41$  silt bulunmaktadır. Araziden bir tüp ile yerinden temin edilen numunelere öncelikle sırasıyla 20kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa, 250kPa ve 300kPa çevre basınçlarında drenajsız koşullarda statik üç eksenli deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra numuneler farklı çevrimsel gerilme oranlarında 1Hz frekansta ve drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli deneye tabi tutulmuştur. Uzun süreli yükleme koşullarının yansıtılması amacıyla numunelere 50000 çevrim uygulanmıştır. Dinamik üçeksenli deney deformasyon kontrollü yapılmış olup maksimum eksenel deformasyon  $\%10$  ile sınırlandırılmıştır. Sonuçta, numunelerdeki kalıcı deformasyon, numunelere ait esneklik modülü ve gerilme şekil değiştirme eğrisi, çevre basıncı ile çevrimsel gerilme oranına bağlıdır. Çevrimsel gerilme oranının ve çevre basıncının artmasına karşı esneklik modülündeki azalma çok daha fazladır. Ayrıca çevrim sayısının artmasına karşın bir yerden sonra esneklik modülü ve gerilme şekil değiştirme eğrisinin aynı kaldığı görülmüştür.

Sun vd. (2013) farklı konsolidasyon oranlarındaki zeminler üzerinde dinamik kayma modülünün değişimini incelemek rezonant kolon deneyi uygulamışlardır. Çalışmalarında örselenmemiş 3 adet silt ve 14 adet siltli kil zemin numunelerini kullanmışlardır. Numuneler tek bir çevre basıncında ve sırasıyla 1.0, 1.2, 1.5, 1.7 ve 2.0 olmak üzere 5 farklı konsolidasyon oranında rezonant kolon deneyine tabii tutulmuştur. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlardan, anizotropik ve izotropik konsolidasyonlardan

kaynaklanan maksimum dinamik kayma modülünün oranı ile konsolidasyon oranının artışı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için uygun bir formül olduğu görülmüştür. Ayrıca araştırmacılar tek boyutlu eşdeğer doğrusallaştırma metodu kullanılarak,  $0.98\text{m/s}^2$ ,  $1.96\text{m/s}^2$  ve  $3.92\text{m/s}^2$  ivme büyüklüğündeki deprem dalgasına maruz kalan zeminler için deprem etki faktörü ve yüzey ivmesinin karakteristik periyodunu hesaplamışlardır. Hesaplanan sonuçlar, farklı konsolidasyon oranlarından kaynaklanan nonlineer özelliklerdeki farkın genel olarak dikkate değer olmadığını, ancak yüzey ivme spektrumundaki etki derecesinin güçlü depremlerin meydana gelmesi açısından dikkat çekici olduğunu göstermektedir. İzotropik konsolidasyona kıyasla, anizotropik konsolidasyonun dikkate alınması, karakteristik periyodun azalmasına ve deprem etki faktörünün artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar kuvvetli yer hareketi oluşumunda zeminde oluşan etkiyi doğru analiz edebilmek adına anizotropik konsolidasyonun etkisinin göz önüne alınması gerektiğini söylemişlerdir.

Subramaniam ve Banerjee (2013) killerin kayma modülünü incelemişlerdir. Araştırmacılar çevrimsel gerilme altında yumuşak killerin kayma modülünde kademeli olarak bozulma meydana geldiğini bu bozulmanın çevrim sayısı arttıkça arttığını ifade etmişlerdir. Bu bozulmaya bozulma indeksi adı verildiğini ve çevrimsel kayma deformasyonu ve çevrimsel yükün bir fonksiyonu olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında literatürde yapılan araştırmaları inceleyerek çevrimsel yük, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı, yükleme frekansı ve çevrimsel gerilme genliğini göz önüne alarak bir formülasyon ortaya koymuşlardır. Bu formülasyon ile hem sönüm oranının hem de bozulma indeksinin doğru şekilde hesaplanabileceğini söylemişlerdir.

Abbaspout vd. (2015) bulamaç çamuru ile hazırladıkları numunelerinde konsolidasyonu ve boşluk suyu basıncındaki artışı incelemişlerdir. Çevrimsel gerilmeyi oluşturmak adına numunelerini bir su tankının içine yerleştirmişlerdir. Yerleştirmiş oldukları numunenin üst ve alt yüzey arasındaki su seviyesindeki değişim ile farklı kaldırma kuvvetleri sayesinde çevrimsel yüklemeyi oluşturmuşlardır. Çalışmalarında CL sınıfında, likit limiti 28, plastik limiti 20 ve özgül ağırlığı 2.57 olan İran'ın Meybod bölgesinden temin etmiş oldukları zemin numunesini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlardan faydalanarak konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Daha sonra bunu logaritma zaman yöntemi ve karekök zaman yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Sundukları yöntem bu iki yöntemle yaklaşık olarak eşit sonuçlar

vermektedir. Araştırmacılar logaritma zaman yönteminde ve karekök zaman yönteminde grafik kullanılmasının hatalı sonuçlara neden olabileceğini ancak kendi sundukları yöntem ile bu hatanın ortadan kaldırılabileceğini söylemişlerdir. Ayrıca elde ettikleri sonuçlara göre teorik yöntem ile deney sonuçlarında belirgin farklılıklar meydana gelmiştir. Bu durumun çevrimsel yükleme başlangıcında numunede boşluk suyu basıncı sönümlenmesinin daha hızlı olmasından kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir.

Gabrys vd. (2015) Varşova'nın merkezi Śródmieście'den elde ettikleri kil zeminleri kullanarak uygulanan basıncın ve kayma deformasyon genliğinin, zeminin rijitliği ve sönümlenme özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla bir dizi rezonant kolon deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde alüminyum tüp ile aldıkları örselenmemiş kil numuneleri kullanmışlardır. Kullanmış oldukları kil zemine ait özellikler,  $w = \%20.68$ ,  $G_s = 2.67$ ,  $e_0 = 0.57$  ve  $PI = \%12$  şeklindedir. Düşük kayma deformasyonlarında ( $< \%10^{-3}$ ) rezonant kolon frekansı farklı sınır seviyelerinde ölçülmüştür. Her bir sınırlama seviyesindeki deneyler, ardışık iki ölçümde rezonant frekansında herhangi bir değişiklik olmayıncaya kadar tekrarlanmıştır. Sönüm oranı da burulmalı kesme frekansı ile incelenmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre rezonant frekansı ortalama efektif gerilme artışı ile birlikte artmış ve düşük gerilmelede bu artış oranının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Çevre basıncı ve ortalama efektif gerilme artışı, zeminin rijitliğinde artışa neden olmuştur. Deformasyon  $\%4.0 \times 10^{-4}$ 'ü aştığında kayma modülü değerlerinde hızlı bir düşüş meydana gelmiş ve kayma deformasyonu arttıkça sönüm oranı da buna bağlı olarak artmıştır. Sönüm oranı, çevre basınç artışı ile birlikte hafifçe azalmış ve bu etkinin daha yüksek deformasyonlar için daha belirgin olduğu söylenmiştir.

Sun vd. (2015) dinamik üç eksenli deneyi kullanarak kısmi drenaj koşulları altında çevrimsel deviatör gerilme ile çevre basıncının yumuşak kilin deformasyon davranışına etkilerini incelemek amacıyla, üzerinde hücre basıncı olan ve olmayan numunelerde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında Çin'in Wenzhou bölgesinden temin ettikleri örselenmemiş yumuşak kil zeminleri kullanmışlardır. Kullanmış oldukları kil zemin,  $LL = \%67.7$ ,  $PL = \%20$ ,  $PI = \%37.2$ ,  $G_s = 2.72$ ,  $w = \%65.3-67.5$ ,  $e_0 = 1.55-1.59$  değerlerine sahiptir ve kil zemin içerisinde  $\%63.8$  kil bulunmaktadır. Çalışma kapsamında 10000 çevrimde farklı çevre basınçları ve farklı deviatör gerilmeler ile 18 adet deney gerçekleştiren araştırmacılar başlangıçta boşluk suyu basıncının yükseldiğini

ancak 50 çevrim sonrasında bunun giderek azaldığını ve bu durumun kısmi drenajdan kaynaklandığını belirtmişlerdir. 1000 çevrim sonra ise boşluk suyu basıncının tamamen sönümlendiği gözlenmiştir. Hücre basıncının artmasıyla boşluk suyu basıncında artış gözlenmiş ve ortalama asal gerilmenin deviatör gerilmeye oranı yükseldikçe kalıcı hacimsel deformasyonda artış olduğu görülmüştür.

Kim vd. (2016) çeşitli oranlarda kum ve kil karışımları ile drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Karışımlarında numune hazırlamak için ıslak tokmaklama ve bulamaç çamuru yöntemini kullanmışlardır. Islak tokmaklamada numunelerini 5 farklı sıkıştırma enerjisinde hazırlamışlardır ( $E_c = 22, 51, 113, 324$  ve  $504 \text{ kJ/m}^3$ ). Bulamaç çamuru yönteminde ise numunelerin likit limitinin 2 katı olacak şekilde su kullanmışlardır. Çalışmalarında kuru ağırlıkça 100:0, 90:10, 85:15, 83:17, 80:20, 70:30, 50:50 ve 0:100 oranlarında silika kumu ve Iwakuni kilinin karışımı ile hazırlanan numuneler hücre basıncı 100 kPa ve yükleme frekansı 0.02 Hz olan drenajsız dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Araştırmacılar deneyler sonucunda içerisinde %20'den daha az kile sahip kum-kil karışımı için relatif sıkılığın çevrimsel kayma mukavemetinde belirleyici etken olduğunu ifade etmişlerdir. Düşük sıkışma enerjisinde hazırlanan gevşek numunelerde ince içeriği arttıkça kayma mukavemetinin hafif derecede arttığını ancak yüksek sıkışma enerjisinde hazırlanan sıkı numunelerde ise ince içeriği arttıkça kayma mukavemetinin azaldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte içerisinde %20'den daha fazla kile sahip kum-kil karışımı için çevrimsel kayma mukavemeti ile numunenin boşluk oranı arasında bir ilişki olduğunu söylemişlerdir.

Sas vd. (2016) çalışmalarında siltli kil numunelerin küçük deformasyonlarda doğrusal olmayan dinamik özellikleri, çeşitli ortalama efektif gerilmelerde düşük ve yüksek genlikli rezonant kolon deneyleri vasıtasıyla incelenmiştir. Deneylerde Varşova'nın merkezi Śródmieście'den elde edilen iki farklı numune kullanılmıştır. İlk numunelerinin,  $w = \%17.52$ ,  $LL = \%33.00$ ,  $PL = \%17.14$  ve  $PI = \%15.86$ 'dır. İkinci numunelerinin ise,  $w = \%16.55$ ,  $LL = \%44.30$ ,  $PL = \%19.49$  ve  $PI = \%24.81$ 'dir. Deneylerde başlangıçta küçük gerilme genliklerinde (kayma deformasyonu %0.001 altında) analizler gerçekleştirilmiştir. Ardından kayma deformasyonunun %0.001 üstünde olduğu büyük gerilme genliklerinde nonlinear deneyler yapılmıştır. Küçük gerilme genliklerinde yapılan analizler numunenin küçük deformasyonlarda dinamik özelliklerinin incelenmesi için büyük gerilme genliklerinde yapılan analizler ise

numunelerin nonlineer davranışlarını incelemek için yapılmıştır. Küçük gerilme genliklerinde analizi yapılan numune hemen arkasından büyük gerilme genliklerinde deneye tabi tutulmuş ve bu sayede zaman etkisi ortadan kaldırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda elde edilen sonuçlara göre, her iki numunede de küçük kayma deformasyonlarında efektif gerilmenin artmasıyla kayma modülü artarken sönüm oranı azalmıştır. Kayma modülünün artışı yaklaşık olarak eşitken sönüm oranındaki azalmanın ikinci numunede daha fazla olduğu görülmüştür. Her iki numune için de kayma deformasyonunun artışı sönüm oranının artmasına neden olmuştur. Bu artış ortalama efektif gerilmenin artmasıyla azalır. Ayrıca daha düşük ortalama efektif gerilmelerde ve daha yüksek sönüm oranlarında kayma deformasyon genliği aynı kalmıştır.

Ajmera ve Tiwari (2017) son yıllarda oluşan depremler esnasında kil zeminlerde göçmeler meydana geldiğini ve bu yüzden de çevrimsel gerilmeler altında kil zeminin davranışını anlamının çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, kaolinit ve montmorillonit ile kuvarzı karıştırarak 17 adet numune elde etmişlerdir. Bu numuneler üzerinde dinamik basit kesme cihazını kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. 17 karışım, 3 tanesi CL-ML sınıfında, 1 tanesi CL sınıfında, 5 tanesi CH sınıfında, 4 tanesi ML, 3 tanesi MH ve bir tanesi SP sınıfında olacak şekilde hazırlanmıştır. Farklı indeks özelliklerine sahip karışımlarda çevrimsel mukavemet eğrileri için, % 2.5, % 5 ve % 10 çift genlikli kayma deformasyonları kullanılmıştır. Bu eğriler karışımların çevrimsel mukavemetinde, mineralojik bileşimin, plastisite özelliklerinin ve kayma deformasyonunun etkisini incelemek için kullanılmıştır. İstenilen oranlarda karıştırılan numunelere likidite indisine ulaşmaya kadar havası alınmış su eklenmiş ve 24 saat bekletilen numuneler sisteme yerleştirilmiştir.  $K_0$  koşullarında konsolide edilen numunelerde başlangıç gerilmesi 25 kPa'dır. Birincil konsolidasyonunu tamamlayan numuneler 50 kPa altında tekrar konsolide edilmiştir. Yine birincil konsolidasyonunu tamamlayan numunelere aynı işlem 100 kPa'lık basınç altında da uygulanmıştır. Numunelere çevrimsel gerilme 0.5 Hz frekansta uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda belirli bir çevrimsel gerilme oranında, kil minerali olarak montmorillonit içeren karışımlara kıyasla, kil minerali olarak kaolinit içeren karışımlarda maksimum ve minimum deformasyon seviyelerini elde etmek için gereken çevrim sayısındaki farklılıklar daha az olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar karışımların mineralojisinin killerin çevrimsel gerilme altındaki davranışını etkilediğini bu yüzden plastisite indisinin tek başına bu davranışın

tanımlamak için kullanılamayacağını belirtmişlerdir. Çevrimsel gerilme altındaki direncin plastisite indisinin 60'ın altında olduğu durumlarda, plastisite indisi arttıkça arttığı görülmüştür. Plastisite indisinin 60'ın üzerinde olduğu durumlarda ise plastisite indisi arttıkça çevrimsel mukavemet azalmıştır. Ancak kil minerali olarak montmorillonit içeren zeminlerde ölçülen çevrimsel mukavemetin kil minerali olarak kaolin içeren zeminlere kıyasla daima daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Dutta vd. (2017) kompaksiyonla hazırlanmış kil numunelerde doygunluk derecesinin dinamik parametrelere etkisini incelemek için rezonant kolon deneyi gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla iki seri oluşturmuşlardır. İlk seride optimum su muhtevasında hazırlanmış oldukları kil numuneleri ikinci seride ise tam doygun kil numuneleri kullanmışlardır. Bu sayede emmenin dinamik kayma modülü, sönüm oranı ve poisson oranındaki etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında içerisinde %40 kil %30silt olan, LL = %58, PL = %20, PI = %38 ve  $G_s = 2.8$  olan CH zemini kullanmışlardır. Birinci test serisinde optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler 30 dk boyunca izotropik çevre basıncına tabi tutulduktan sonra drenajsız koşullarda numunelere rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. Bu döngü farklı çevre basınçlarında (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa) tekrarlanmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numunenin doygunluk derecesi özgül ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri kullanılarak %92 bulunmuştur. İkinci test serisinde ise ters basınç ve hücre basıncı ile numune %100 doyurulmuştur. Daha sonra numuneler ilk serideki basınç ve işlemler altında drenajsız rezonant deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre kayma deformasyonunun artması kayma modülünü düşürürken sönüm oranını arttırmıştır. Çevre basıncının yükselmesiyle kayma modülü artarken sönüm oranı ise azalmıştır. Küçük deformasyonlardaki kayma modülü, kısmen doygun zeminlerde tamamen doygun zeminlere kıyasla daha yüksektir. Bu büyüklük farkı düşük çevre basınçlarında daha belirgindir. Küçük deformasyonlardaki sönüm oranı ise kısmen doygun zeminlerde tamamen doygun zeminlere oranla daha düşüktür. Bu oran yine düşük çevre basınçlarda daha belirgindir. Tamamen doygun zeminlerde çevre basıncının artmasıyla Poisson oranı düşmüş ancak kısmen doygun zeminlerde çevre basıncının Poisson oranı üzerinde herhangi bir etkisi görülmemiştir. Araştırmacılar kayma deformasyonunun artmasıyla birlikte doygunluk derecesinin, sönüm oranını ve kayma modülünü etkilemediğini belirtmişlerdir. Deformasyonun  $10^{-2}$ 'den daha büyük olduğu durumlarda, hem

tamamen doymun zeminlerde hem de kısmen doymun zeminlerde sönüm oranı ile kayma modülünün neredeyse aynı değerde olduğunu ifade etmişlerdir.

Sas vd. (2017) rezonant kolon deneyi kullanarak ortalama efektif gerilme ( $\rho'$ ), boşluk oranı ( $e$ ) ve plastisite indisinin (PI) düşük genlikli kayma modülüne ( $G_0$ ) etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla Polonya'nın Varşova bölgesinden elde ettikleri iki farklı örselenmemiş Quaternary killeri kullanmışlardır. Kullandıkları zeminlerin aşırı konsolide oranı 1 ve 1.2'dir. Farklı derinliklerden aldıkları zeminlerin indeks özellikleri Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

**Çizelge 5.3.:**Sas vd. 'nin (2017) çalışmasında kullanılan zeminlerin özellikleri

Derinlik (m)	w (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\rho'$ (kPa)	$e_0$
0.5	14.0	33.5	14.5	19.0	10-30	0.60
0.5	12.0	37.6	13.9	23.7	10-30	0.46
2.0	10.2	30.8	11.9	18.9	45-180	0.34
2.0	12.8	31.2	12.6	18.6	45-315	0.37
2.0	12.2	31.0	12.0	19.1	45-225	0.38
2.0	13.3	31.5	12.7	18.8	45-315	0.45
2.0	12.2	37.0	11.5	25.6	45-315	0.40
2.0	15.6	41.7	14.3	27.5	45-315	0.45
2.0	14.4	36.8	12.7	18.8	45-315	0.46
2.0	14.2	35.2	11.4	23.8	45-315	0.43
2.5	13.6	27.8	12.8	15.2	55-165	0.40
2.5	12.7	27.1	12.3	14.8	55-165	0.40
2.5	12.2	37.0	11.5	25.6	55-165	0.42

Çalışmalarında rezonant frekansı ilk mod bulununcaya kadar elektromanyetik sistem tarafından yavaşça arttırılmıştır. Bu frekanslardan elde edilen kayma deformasyonuna göre bulunan kayma modülü ile analizler yapılmıştır. Elde edilen verilere göre efektif gerilme zeminin mukaveti üzerinde görünür bir etkiye sahip olmuştur. Kayma modülüne plastisite indisinin ve boşluk oranının ise herhangi bir etki yapmadığı görülmüştür. Araştırmacılar düşük genliklerde kayma modülünün hesaplanması için literatürde birçok formül bulunduğunu ancak bunların  $G_0$ 'ın

bulunmasında yüksek hata değerleri içerdiğini belirterek bir formül önermişlerdir. Ancak bu formülün de başka killerle yapılan dinamik deneyler ile desteklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Thian ve Lee (2017) yumuşak kilin çevrimsel gerilme altında kademeli olarak bozulduğunu ve bunun ciddi sonuçlar doğurduğunu söylemişlerdir. Malezya'nın Terengganu bölgesindeki deniz kenarından elde edilen kil kullanarak dinamik direkt basit kesme cihazı ile bu bozulmayı incelemişlerdir. Analizler drenajsız koşullarda gerilme kontrollü 100 çevrim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Örselenmiş numuneler kullanılan çalışmada %43 oranında kil bulunan zeminde  $LL = \%54$ ,  $PL = \%27$  ve  $G_s = 2.58$ 'dir. Farklı çevrimsel kayma oranlarında iki yönlü ve tek yönlü yükleme koşullarında yapılan deneylerde 1, 4 ve 10 aşırı konsolide oranına sahip numuneler kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre hem tek yönlü hem de iki yönlü gerilme kontrollü çevrimsel gerilmeler altında normol koslide kil zeminlerin aşırı konsolide kil zeminlere kıyasla daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Çevrimsel kayma oranının artması numunelerin yenilmesi için gerekli olan çevrim sayısını azaltmıştır. Yüksek çevrimsel kayma oranlarındaki kil zeminlerde kayma deformasyonunun artmasıyla boşluk suyu birikiminde artış meydana geldiği ve kildeki efektif gerilmenin azaldığı görülmüştür. Aşırı konsolide olan kil zeminlerde çevrimsel gerilmeler altında başlangıçta şişme sebebiyle negatif boşluk suyu basınçları oluşmuştur. Ardından evrim sayısının artmasıyla pozitif boşluk suyu basınçları meydana geldiği görülmüştür. Sonuçta, tüm kayma gerilmesi oranlarında, zeminin yenilmesine sebep olan deformasyonu oluşturan çevrim sayısının, aşırı konsolide zeminlerde normal zeminlere kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.

Leng vd. (2018) örselenmemiş ve örselenmiş numuneler kil kullanarak dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmişlerdir. alışmalarında örselenmemiş ve örselenmiş kil zeminlerle yapılan deneylerde numunenin yapısının çevrimsel gerilme altındaki etkisini incelemeyi hedeflemişlerdir. şangay'ın Songjiang bölgesinden elde ettikleri kil zemin,  $w = \%48$ ,  $LL = \%50$ ,  $PL = \%22$ ,  $C_c = 0.44$  (şıkışma indisi),  $e_0 = 1.30$ ,  $\rho = 1.74 \text{ g/cm}^3$  (doğal biri hacim ağırlığı) ve  $G_s = 2.70$  değerlerine sahiptir. Örselenmemiş numuneleri 11 ile 13 metre arasında elde etmişlerdir. Örselenmiş numuneleri ise bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlamışlardır. Bulamaç amuru yöntemiyle 100 kPa'lık yük uygulandığı için dinamik üç eksenli deneyinde de tüm numunelere 100 kPa altında izotropik konsolidasyon uygulanmıştır. Sinüzoidal uygulanan çevrimsel gerilme 0.02 Hz frekansta uygulanmış

olup deney esnasında kullanılan çevrimsel gerilme oranı olarak 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 kullanılmıştır. Deneyler esnasında maksimum aksenal deformasyon %10 seçilmiştir. Sonuçta, deformasyon eğrilerinin hem örselenmemiş hem de örselenmiş numuneler için bir bükülme noktasına sahip olduğu ve bu noktadan sonra zeminin mukavemetinin hızla bozulduğu ve zeminin yenildiği görülmüştür. Efektif gerilme izi örselenmemiş numunelerin örselenmiş numunelere kıyasla bir miktar daha sünek olduğunu göstermiştir. Ayrıca örselenmiş numunelerde mukavemet kaybı sebebiyle boşluk suyu basınçları ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Sato vd. (2018) deformasyon kontrollü dinamik basit kesme cihazı kullanarak Atterberg limitlerinin, kil zeminlerde çevrimsel gerilmeler altında oluşan boşluk suyu basınçlarına ve deformasyonlara etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında 3 farklı kil zemin kullanmışlardır. Bu kiler kaolin kili, Tokyo kili ve Kitakyushu kilidir. Kullandıkları kil zeminlere ait parametreler Çizelge 5.4'te verilmiştir.

**Çizelge 5.4.:**Sato vd.'nin (2018) çalışmasında kullanılan zemin parametreleri

Fiziksel Özellikler	Kaolin Kili	Tokyo Kili	Kitakyushu Kili
Dane özgül ağırlığı, G <sub>s</sub>	2.71	2.77	2.63
Likit Limit, LL (%)	47.8	66.9	98.0
Plastik Limit, (PL) (%)	22.3	25.0	34.2
Plastisite İndisi, I <sub>p</sub>	25.5	41.6	63.8
Sıkışma İndisi, C <sub>c</sub>	0.31	0.46	0.60
Başlangıç boşluk oranı (e <sub>o</sub> )	1.11–1.19	1.20–1.37	1.61–1.8

Bulamaç çamuru ile hazırlanan numuneler drenajsız koşullarda kayma deformasyon oranı %0.1, %0.4, %1.0 ve %2.0 olacak şekilde tek yönlü ve çok yönlü olacak şekilde 10 adet çevrimsel kesmeye tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgulara göre araştırmacılar, düşük sayıda çevrim uygulanan ( $n \leq 10$ ) çok yönlü çevrimsel kesmeye tabi tutulduğunda kohezyonlu zeminlerde oluşan boşluk suyu basıncındaki artışın ve çevrimsel gerilme sonrası oluşan deformasyonun, çevrimsel kesme deformasyon genliğinden ve kilin plastisitesinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca deprem sırasında gerçekleşen düzensiz çevrimsel kesme deformasyonlarının, eşdeğer sayıda çevrim ve eşdeğer büyüklükte kesme deformasyonu kullanılarak uniform olarak

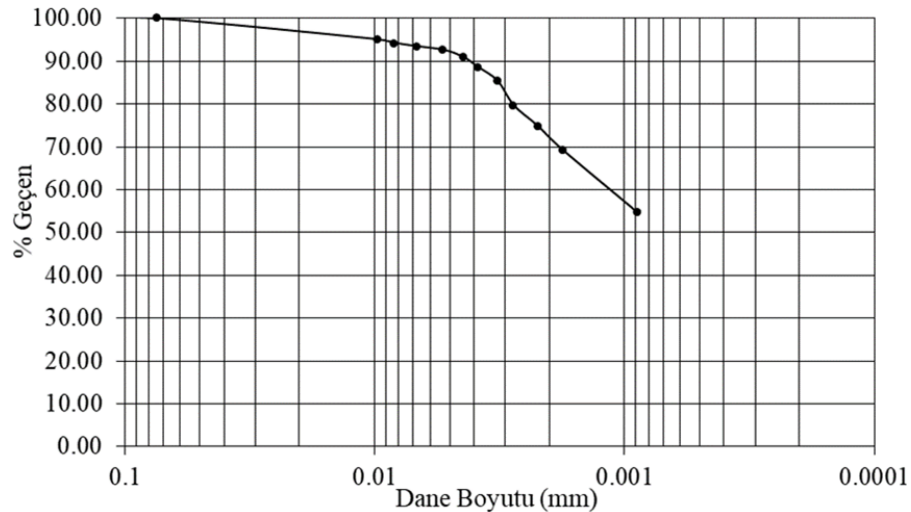
modellenebileceğini söylemişlerdir. Araştırmacılar bu modeli kullanarak çevrimsel kesme deformasyonu uygulanan killerde ortaya çıkacak boşluk suyu basıncı ve deformasyonları hesaplamışlardır. Çalışmada Attarberg limitleri yüksek olan kil zeminlerde çevrimsel gerilmeler altında daha düşük deformasyonlar olduğu görülmüştür.

## 6. DENEY MALZEMELERİ VE PROSEDÜRLERİ

Çalışmanın bu kısmı 4 bölümden oluşmaktadır. 1. bölümde öncelikli olarak farklı numune hazırlama yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler içerisinde bu çalışma kapsamında kullanılan ıslak tokmaklama metodunun seçilmesinin amacı belirtilmiştir. 2. bölümde kullanılan zeminin özellikleri ve dekantasyon yöntemiyle kil zeminde kil ve siltin ayrıştırılması anlatılmıştır. 3. bölümde yapılan fiziksel deneyler ve kullanılan standartlar tanıtılarak son bölümde ise dinamik deneylerde kullanılan rezonant kolon ve burulmalı kesme deney sisteminin çalışması ve bu deney sistemine ait standartlar incelenmiştir.

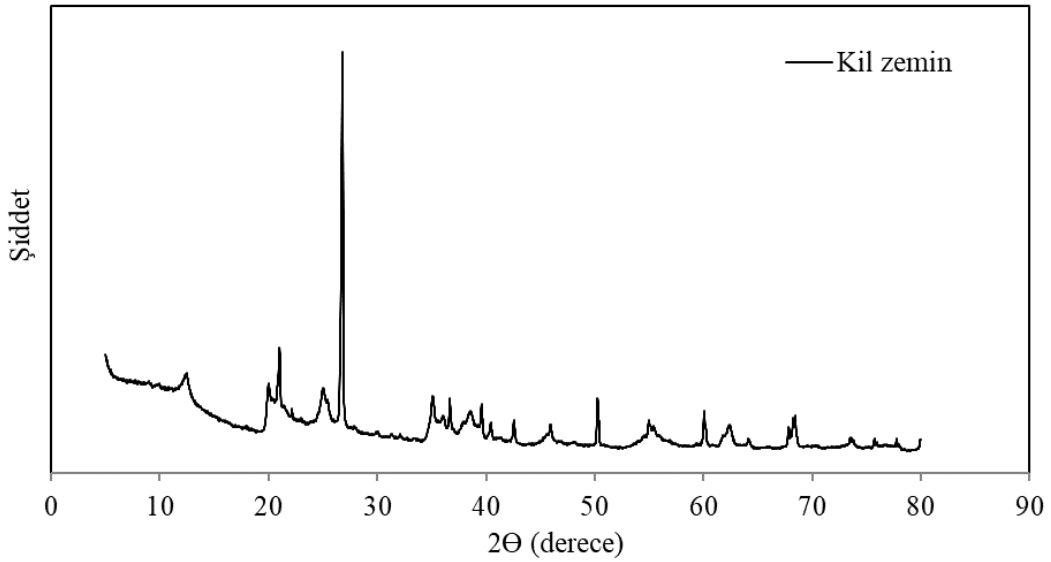
### 6.1. Deneylerde Kullanılacak Malzeme

Bu çalışmada dinamik yükler altında kil zeminin davranışı incelenmiştir. Bilecik ilinin Söğüt ilçesinden temin edilen kil zemin çalışma kapsamında kullanılacak malzemedir. Deneylerde kullanılacak olan zeminin dane dağılımını ve zemin sınıfının belirlenmesi amacıyla elek analizi, hidrometre, piknometre ve kıvam limitleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elek analizinde ASTM C136/C136M-14 standardı, hidrometre deneyinde ASTM D7928-17 standardı, kıvam limitlerinin tespitinde ASTM D4318-17 standardı, piknometre deneyi ile özgül ağırlıklarının bulunmasında ASTM D854-14 standardı ve zeminlerin sınıflandırmasında ASTM D2487-17 ve TS 1500/2000 standartları kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zeminin kil zemin olduğu ve içerisinde %78 kil ile %22 silt olduğu görülmüştür (Şekil 6.1).



Şekil 6.1.:Kilin dane çapı dağılımı

Kil zeminin minerolojik yapısının tespiti için X-ışını difraksiyonu (XRD) deneyi yapılmıştır. XRD deneyi ile belirli bir formda katı ve toz parçacıklarının mineral içeriği hakkında bilgi sağlanabilmektedir. Analiz sonucunda zemindeki etken mineral fazları gözlemlenerek zeminin içyapısı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir (Ural ve Görgün, 2018). Yapılan XRD deneyi sonucunda kil zeminin minerolojik yapısının kaolinite olduğu görülmüştür (Şekil 6.2).



Şekil 6.2.:Kil zeminin XRD deney sonucu

## 6.2. Islak Toklamlama Yöntemiyle Numune Hazırlanması

Zeminlerde yapılan laboratuvar deneyleri hem araştırma hem de tasarım amaçları için geoteknik mühendisliğin önemli bir parçasıdır. Numune hazırlama yöntemi yapılacak olan deneylerin doğru modellenebilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Birçok çalışma zemin davranışının laboratuvar numunesi hazırlama tekniklerine bağlı olduğunu göstermiştir (Mulilis vd., 1977; Miura ve Toki, 1982).

Literatürde çeşitli numune hazırlama yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan yöntemler kuru yağmurlama, ıslak tokmamlama, suda çöktürme, bulamaç çökeli ve kuru çöktürmedir. Kohezyonulu zemin numunelerinin laboratuvarda hazırlanması için en çok kullanılan yöntemler ise bulamaç çamuru ve sıkıştırma ile numune hazırlanmasıdır (Lade, 2016).

Kuerbis ve Vaid (1988) ile Carraro ve Prezzi (2007) bulamaç çamuru yönteminin hidrolik dolguların yapısını daha iyi modellediğini ve ıslak tokmaktama ile karşılaştırıldığında daha homojen numuneler üretebileceğini söylemişlerdir. Ancak Naeini ve Baziar (2000) yaptıkları çalışmada suda çöktürme ve bulamaç çökeliyle yapılan numune hazırlama sistemlerinde kum danelerinin kil danelerinden daha hızlı çökeleceğini ve bu yüzden bu yöntemler yerine daha uniform bir yapı oluşturmak için ıslak tokmaktama yönteminin kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Kim vd. (2016) çalışmalarında plastik olmayan bir numunenin ıslak tokmaktama yöntemi ile hazırlanabileceğini, çünkü kum-kil karışımları için kuru yağmurlama yönteminin kum ve killer arasında ayırışmaya sebep olacağını ifade etmişlerdir.

Bulamaç çökeli ile numune hazırlama, ince içeriği %20 den fazla olan zemin numunelerinin deneylerde uygulanabilir duruma gelmesi için kullanılmaktadır (Kuebris ve Vaid, 1988). Bu yöntemde zemin numunesi ve damıtık su genellikle numunenin likit limitinin 1.5 veya 2 oranlarda karıştırılarak kalıp içine dökülmesiyle oluşturulmaktadır. Hazırlanan karışım istenen önkonsolidasyon basıncı ile yüklenmektedir. Numunenin altından ve üstünden su çıkışı sağlanarak homojen bir yapı elde edilmektedir. Uygulanan yükün altında konsolidasyonunu tamamlayan numune deney için hazır hale getirilmiştir. Bulamaç çökeliyle hazırlama yönteminin avantajı, numunenin doygun olması, kısa sürede hazırlanması, su miktarına göre dane ayırımının kontrol edilmesi, gevşek numune hazırlanabilmekte, ince içeriğine ve derecelenmeye bakmaksızın homojen boşluk oranı sağlanabilmesidir (Ural, 2008).

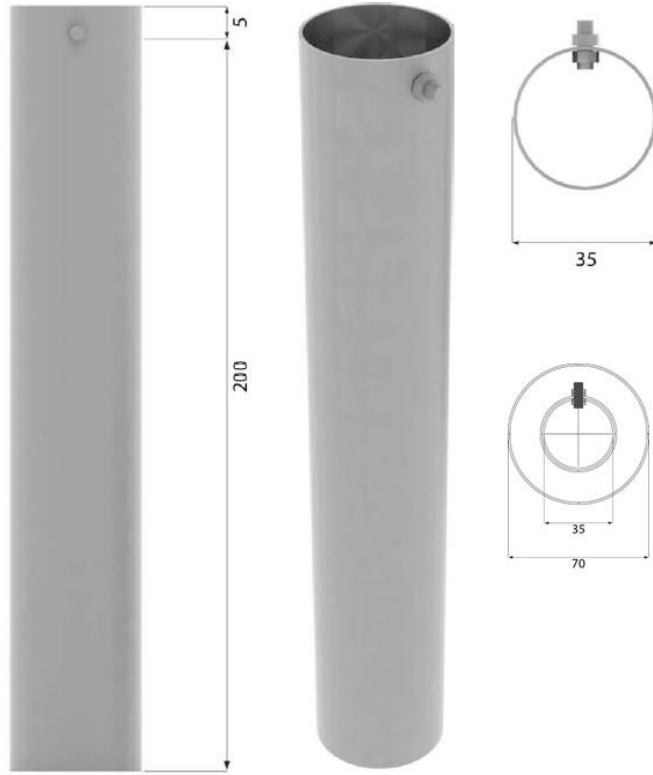
Islak tokmaktama yönteminin ilk uygulamalarında, numunenin her tabakasının aynı yoğunlukta sıkıştırılması, eşit kuru ağırlık ve hacimde bir dizi tabakayı kullanarak hazırlanmasını içermektedir. Bunun sonucunda, numunenin alt kısmının arzulanan numune yoğunluğundan daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi birbirini takip eden veya üst üste gelen katmanın sıkıştırılması da önceki veya alttaki katların daha yoğun olmasına neden olmuştur (Mulilus vd., 1975, 1977; Gilbert 1984 ). Ladd (1978) ıslak tokmaktama yönteminin geliştirilmesi için kademeli sıkıştırmayı önermiştir. Bu teknikte, alt katmanlar başlangıçta önceden belirlenmiş miktarlarla nihai istenen yoğunluğa göre daha gevşek sıkıştırılmaktadır. Böylece her tabakanın nihai yoğunluğu, üst üste gelen tabakaların sıkıştırılmasının etkileri bile olsa, hedef yoğunluğa eşit

olmaktadır. Frost ve Park (2003) ıslak tokmaktama yöntemi kullanarak eşit yoğunlukta ve homojen numuneler üretilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada farklı %100 kile ağırlıkça farklı yüzdelerde silt katılarak çeşitli dinamik koşullarda deneyler gerçekleştirilecektir. Daha önceki yapılan araştırmalardan ve dinamik deneylerin yapılması için oluşturulan standartların kullanılacak olmasından dolayı çalışma kapsamında numune hazırlama için ıslak tokmaktama yöntemi kullanılmıştır. Islak tokmaktama yöntemiyle numuneler 50 kPa enerji altında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Dinamik deneyler, “Sabit Tabanlı Rezonant Kolon Cihazları ile Zeminlerin Modül ve Sönümlenmesi için Standart Test Yöntemleri” olan ASTM D4015-15e1 standartında belirtilen rezonant kolon cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM D4015-15e1 standartında numune hazırlanması için ASTM D2166/D2166M, D2850 ve D4767 standartlarının ilgili kısımlarında belirtilen numune hazırlama yönergelerinin kullanılabileceği belirtilmiştir. “Kohezyonlu Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımı için Standart Test Yöntemi” olan ASTM D2166/D2166M-16 standardında numunelerin çapının minimum 30mm olması ve boy/çap oranının ise en az 2 olması istenmektedir. “Kohezyonlu Zeminlerin Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Basınç Dayanımı için Standart Test Yöntemi” olan ASTM D2850-15 standardında ise numunelerin çapının minimum 33mm olması ve boy/çap oranının ise en az 2 olması istenmektedir. Standartlar ve literatür incelendikten sonra hazırlanan numuneler 70 mm çapta ve 140 mm boyunda olacak şekilde kullanılmıştır.

“Kohezyonlu Zeminlerin Konsolidasyonlu Drenajsız Üç Eksenli Basınç Dayanımı için Standart Test Yöntemi” olan ASTM D 4767-11 standardında numunenin 6 katmanda sıkıştırılmasının uygun olacağı söylenmektedir. Aynı standartta, numune hazırlanmasında sıkıştırmak için kullanılacak tokmağın kalıbın çapının yarısına eşit olması gerektiği söylenmektedir.

Bu çalışmada her 20 mm’de numune eşit sayıda vuruşlar ile 7 katmanda sıkıştırılacaktır. Her bir tabakadaki vuruş sayısı uniformluğun sağlanması adına 5 vuruş olarak belirlenmiştir. 35 mm çapında bir tokmak kullanılmıştır. Tokmak 215 mm yüksekliğinde bir kılıf içerisinden düşürülecek şekilde modellenmiştir. Tokmağın et kalınlığı 15mm olacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu durumda düşme yüksekliği 200mm olmuştur (Şekil 6.3).



**Şekil 6.3.:**Tokmamlama kılıfının modeli

Bu çalışmada numunenin 50kPa'lık önkonsolidasyon basıncına sahip olması istenmektedir. Bu yüzden numune hazırlanırken kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Sıkıştırma enerjisi, döngü sayısı ve çelik tokmağın düşen yüksekliği ile ayarlanabilmektedir (Kim vd., 2006, 2016; Adachi vd., 2000). Uygulanacak enerji,

$$E_c (\text{kJ/m}^3) = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (6.1)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.  $W_R$  tokmağın ağırlığını,  $H$  düşme yüksekliğini,  $N_L$  katman sayısını,  $N_B$  her bir tabakadaki kompaksiyon sayısını ve  $V$  ise numunenin başlangıç hacmini ifade etmektedir. Bu çalışmada enerji hesabı 50kPa için,

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H = \pi \cdot 0.035^2 \cdot 0.14 = 5.388 \times 10^{-4} \text{m}^3 \quad (6.2)$$

$$H = 0.2 \text{m}$$

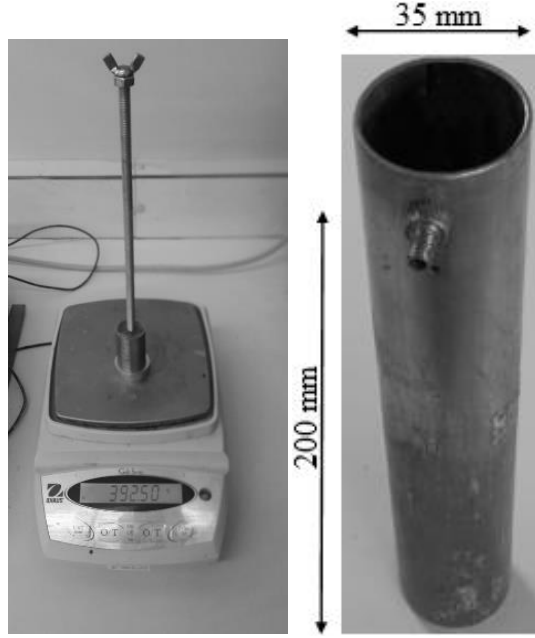
$$N_L = 7$$

$$N_B = 5$$

$$E_c = 50 \text{ kJ/m}^3 = 50 \text{ kPa} \text{ olmak üzere,}$$

$$50 = \frac{W_R \cdot 0.2 \cdot 7 \cdot 5}{5.388 \times 10^{-4}} \rightarrow W_R = 3.84845 \text{ N} = 392.5 \text{ g} \quad (6.3)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu durumda  $W_R$  tokmak ağırlığı 392.5g olarak tespit edilerek numune hazırlamak için gerekli aparat oluşturulmuştur (Şekil 6.4).

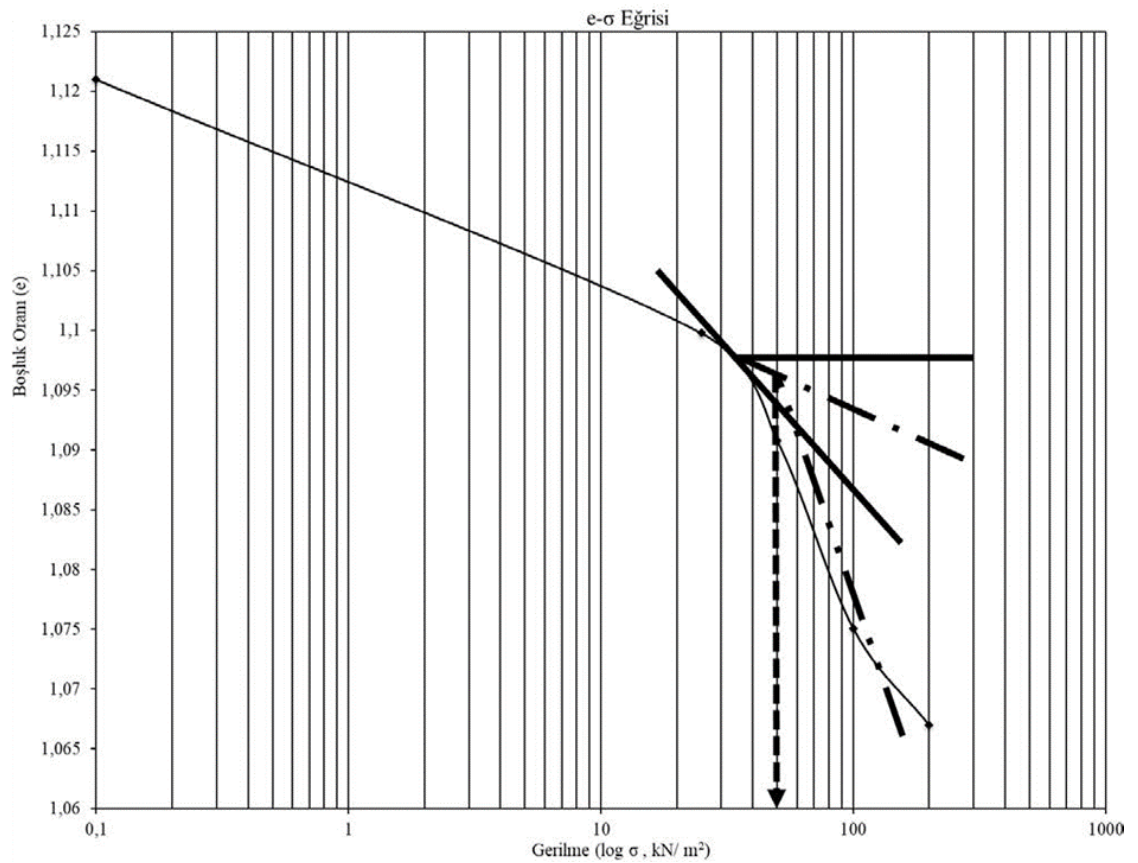


**Şekil 6.4.:**Islak tokmaktama aleti

Bu çalışmada numune hazırlama sistemi olarak ıslak tokmaktama yöntemi seçilmiş ve yöntemde kullanılacak olan sıkıştırma aleti oluşturulmuştur. Deneylede kullanılacak zeminler 50kPa'lık yük altında ıslak tokmaktama yöntemi ile hazırlanmıştır. Numuneler su muhtevası (w) %25 olacak şekilde hazırlanmış ve numunelerin içerisindeki nemin tüm danelerde eşit olarak dağılması için 24 saat hava almayacak bir kapta bekletilmiştir. 50kPa'lık enerjiye tekabül edecek şekilde, 7 tabaka halinde sıkıştırılan zeminin önkonsolidasyon basıncı, ASTM D2435/D2435M-11 standardı ile Casagrande yöntemi kullanılarak tek-boyutlu konsolidasyon deneyi sonucunda (Şekil 6.5) 50kPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.6).



Şekil 6.5.:Ödometre deneyi



Şekil 6.6.:Ödometre deneyi sonucunda önkonsolidasyon basıncının bulunuşu

### 6.3. Dekantasyon Yöntemiyle Numunenin Oluşturulması

Bu çalışmada farklı yüzdelerde kil ve silt birbirine ağırlıkça karıştırılarak elde edilen numunelerin dinamik özellikleri çeşitli durumlar için dinamik deneylerle

incelenmiştir. Bu sayede farklı koşulların ve kil zemindeki silt oranının, kil zeminin dinamik parametrelerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Kil zeminin içerisindeki kilin ve siltin ayrılması için kullanılan yöntemlerden bir tanesi santrifüj tekniğidir. Santrifüj, ağırlıkları farklı maddelerin Stoke yasası gereğince merkezkaç kuvveti sayesinde farklı yerçekimine maruz bırakılmasını sağlayan bir tekniktir (Şekil 6.7).



Şekil 6.7.:Santrifüj deneyi (Poppe vd., 2001)

1864 yılında, Antonin Prandtl süt endüstrisinde süt ve kaymağı ayırmak için santrifüj tipi makineyi icat etmiştir. Prandtl'ın ardından, İsviçreli doktor ve biyolog olan Friedrich Miescher 1869 yılında, beyaz kan hücrelerinin çekirdeklerinden nükleik asitleri ayırmak için laboratuvarında kullanılmak üzere santrifüj cihazını geliştirmiştir. Santrifüj işlemi ile farklı sıcaklık, özgül ağırlık, viskozite ve yoğunluğa sahip süspansiyon haldeki maddeler hızla döndürülerek ayrıştırılır (Poppe vd., 2001). Bu teknik ile uygulanan kuvvetin büyüklüğüne ve ortamın yoğunluğuna bağlı olarak malzemeler farklı sürelerde çökme gösterirler. Santrifüj tekniğinde içerisine ayrıştırıcı bir madde eklenen zemin numunesi bir tüpe konarak içerisine havası alınmış su eklenir. Bu şekilde süspansiyon haline getirilen numune santrifüj cihazında hızla döndürülerek merkezkaç kuvveti ile yerçekiminden daha büyük bir kuvvetin etkisiyle ayrıştırılır. Asit veya oksitleyici maddeler ile ayrılma işleminden sonra numune kil ve silt olarak birbirinden ayrılır.

Ancak bu teknik için kullanılacak cihaz hem az miktarda malzemenin ayrılması için kullanılmaktadır hem de oldukça maliyetli bir deney işlemidir. Bu sebeple çok

miktarda malzemenin birbirinden ayrılabilmesi için hidrometre deneyine benzer bir şekilde çöktürme tekniği kullanılarak silt ve kil birbirinden ayrılmıştır. Birleşik Devletler Jeoloji Araştırma Kurumu (USGS) 2001 yılında yayınladığı “U. S. Geological Survey Open-File Report 01-041” isimli raporunda Dekantasyon adını verdiği yöntemle kil ve silt numunelerinin birbirinden ayrılabilceğini söylemiştir (Şekil 6.8). Dekantasyon, bir karışımdaki zemin danelerinin yerçekimi sebebiyle çökmesidir. Suda farklı ağırlıktaki zemin türlerinin farklı zamanlarda çökmesiyle zeminlerin ayrılması sağlanmaktadır. Santrifüj işleminden daha fazla zaman almasına rağmen, kil ve silt boyutundaki zeminlerin ayrılması için kullanılabilir bir tekniktir. Ural (2008) ve Tapan (2011) çalışmalarında bu yöntemi kullanarak kil ve silt numunesini ayırmışlardır.

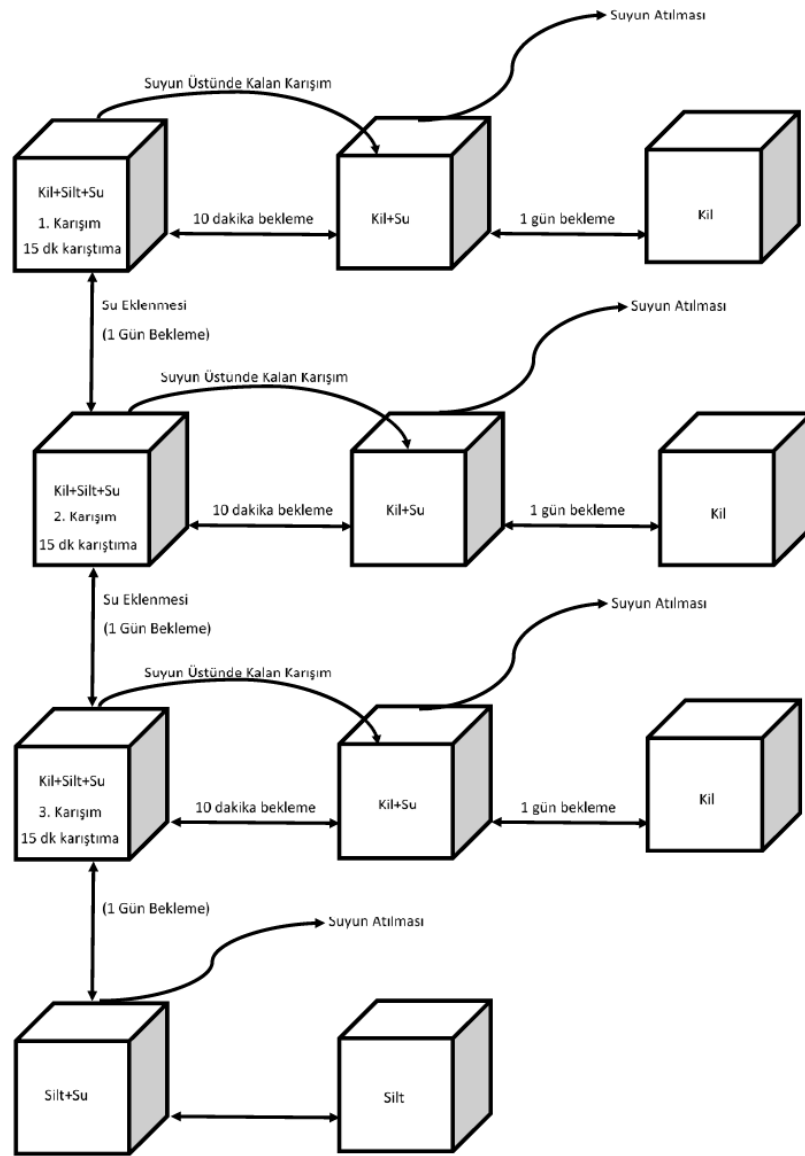


**Şekil 6.8.:**Dekantasyon işlemi (Poppe vd., 2001)

Bu çalışmada dekantasyon yöntemi ile kil ve silt birbirinden ayrılmıştır. Büyük bir havuza 90 kilogram kil zemin dökülmüştür. Havuz su ile doldurularak bütün danelerin suya doymun hale gelmesi için 1 gün beklenmiştir (Şekil 6.9). 1 günün sonunda havuz karıştırılarak 10dk bekleme işleminden sonra suyun üstünde kalan su ve kil karışımı küçük bir havuza aktarılmıştır. Büyük havuz tekrar su ile doldurularak 1 gün beklenmiş ve tekrar karıştırılarak 10dk sonra suyun üstünde kalan karışım küçük havuza aktarılmıştır. Bu işlem 10dk sonra su tamamen berrak olana kadar devam etmiştir. Küçük havuza aktarılan kilin sudan mümkün olduğu kadar ayrışması için 1 gün beklenmiştir. 1 günün sonunda küçük havuzun üzerinde kalan su dışarı atılmış ve küçük havuzun dibinde suya doymun kil kalmıştır (Şekil 6.10).



Şekil 6.9.:Kil zeminin büyük havuzda ayrılma işlemi



Şekil 6.10.:Numune ayırma tekniği

Daha sonra kil numunesi etüvde 105 °C'de bekletilerek içerisindeki suyun buharlaşması sağlanmıştır. Bu işlem 6 ay kadar sürmüştür ve en sonunda kil zeminin içerisinde bulunan tüm kil ve silt birbirinden ayrılmıştır ve ayrılan numuneler çeneli kırıcı ile kırılarak (Şekil 6.11) 200 nolu elekten elenmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.11.:Çeneli kırıcı

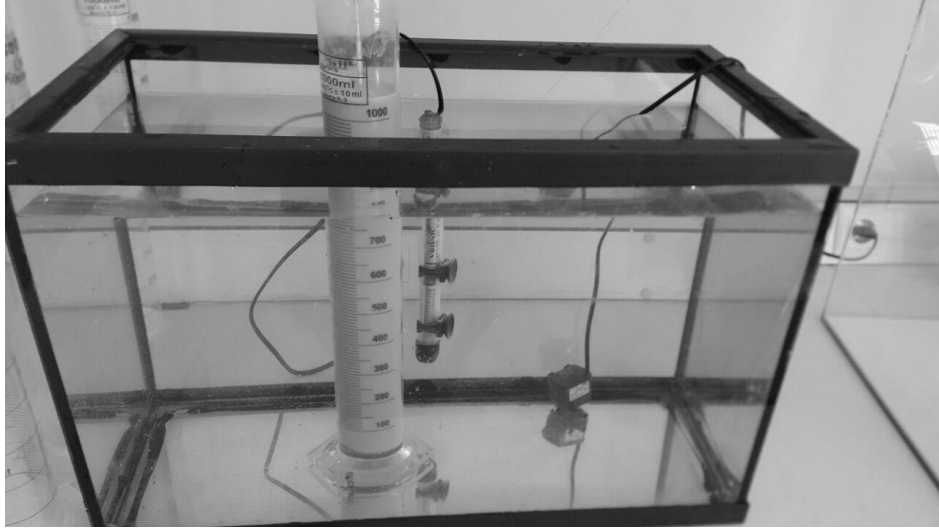


Şekil 6.12.:Ayrılan kil ve silt malzeme

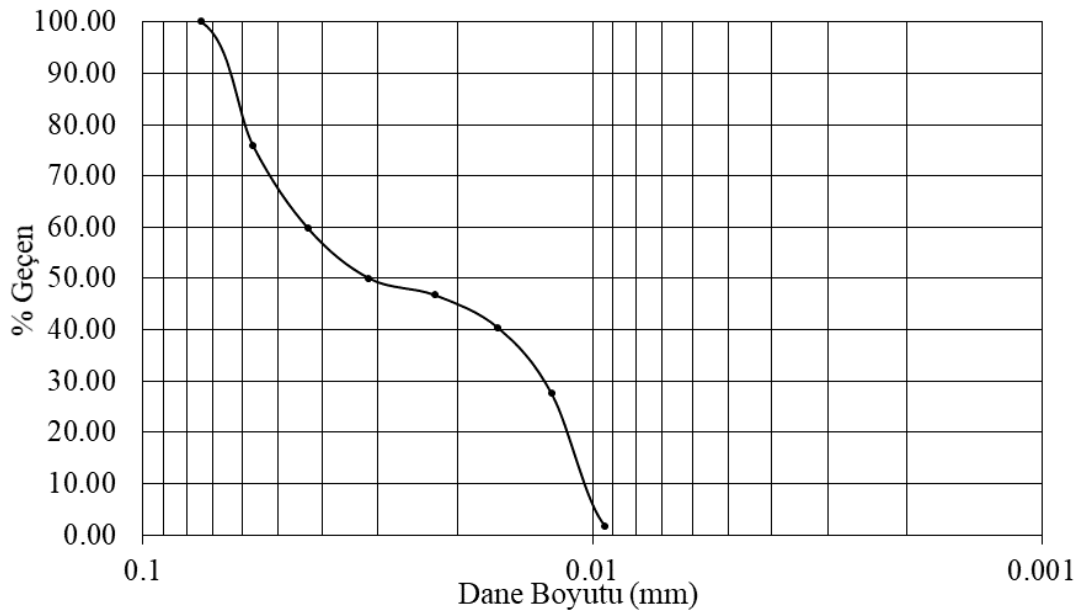
#### 6.4. Fiziksel Deneylerin ve Standartların Tanıtılması

Kullanılacak olan kil ve silt, kil zeminden dekantasyon yöntemiyle birbirinden ayrılarak ağırlıkça %100 kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt,

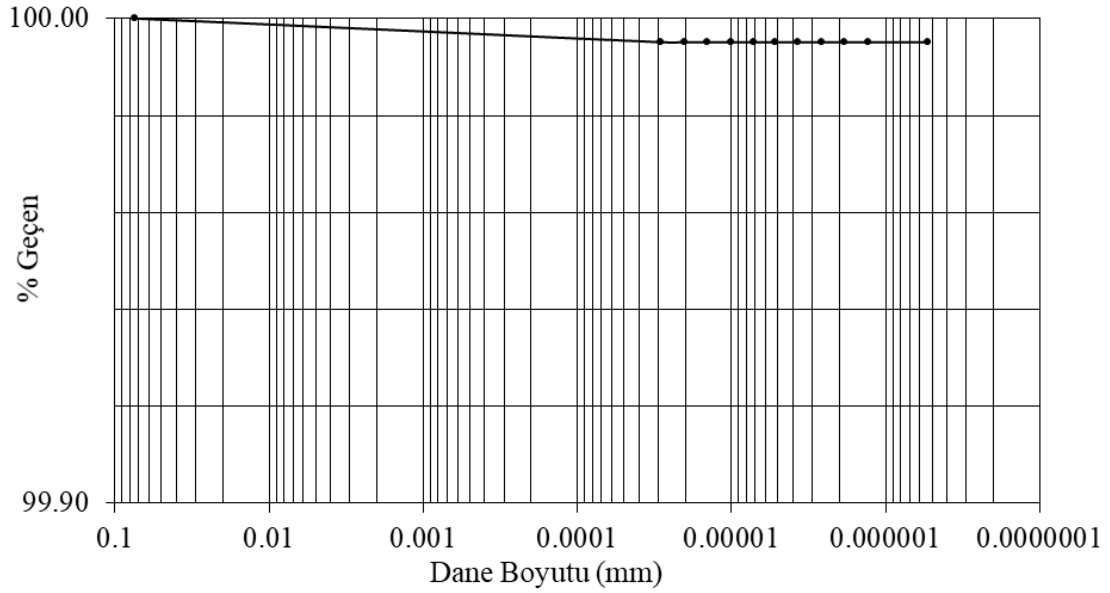
%60kil+%40silt ve %50kil+%50silt olacak şekilde karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. %100kil ve %100silt zeminde hidrometre deneyleri yapılmıştır (Şekil 6.13). Ayrılan zeminlerin %100 kil (Şekil 6.14) ve %100 silt (Şekil 6.15) olduğu görülmüştür. Hidrometre deneyinde ASTM D7928-17 standardı kullanılmıştır.



Şekil 6.13.:Hidrometre deneyi

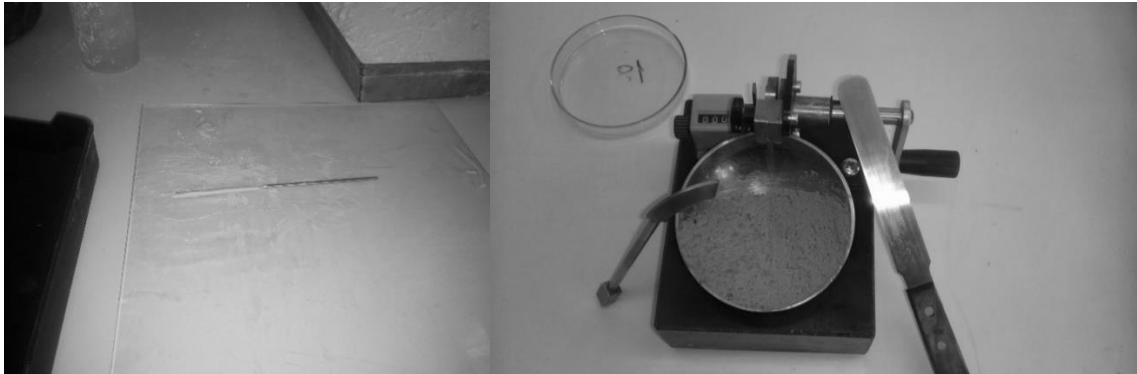


Şekil 6.14.:Silt hidrometre



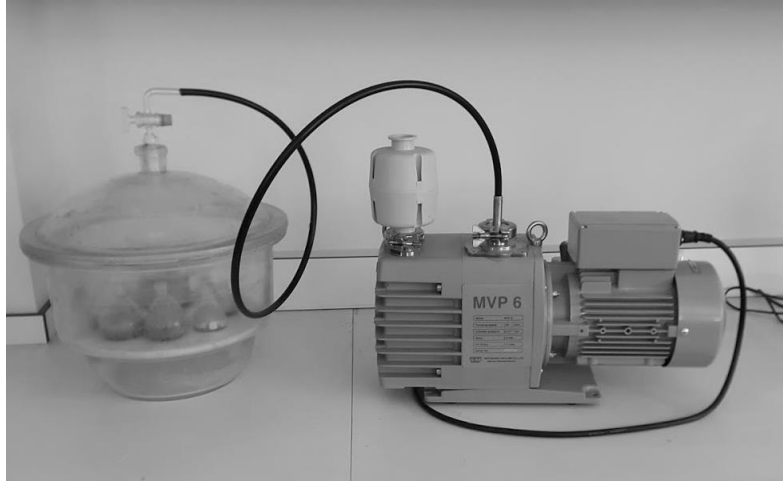
**Şekil 6.15.:**Kil hidrometre

Kil ve siltin zemin sınıflarının belirlenmesi amacıyla likit limit ve plastik limit deneyleri yapılarak numunelerin kıvam limitleri belirlenmiştir (Şekil 6.16).



**Şekil 6.16.:**Kıvam limitleri deneyi

Ayrıca piknometre deneyleri de gerçekleştirilerek karışımlara ait dane özgül ağırlıkları belirlenmiştir (Şekil 6.17). Belirlenen fiziksel özelliklere göre karışımların zemin sınıfları bulunmuştur. Zeminlerin kıvam limitlerinin tespitinde ASTM D4318-17e1 standardı, piknometre deneyi ile özgül ağırlıklarının bulunmasında ASTM D854-14 standardı ve zeminlerin sınıflandırmasında ASTM D2487-17 ve TS 1500/2000 standartları kullanılmıştır.



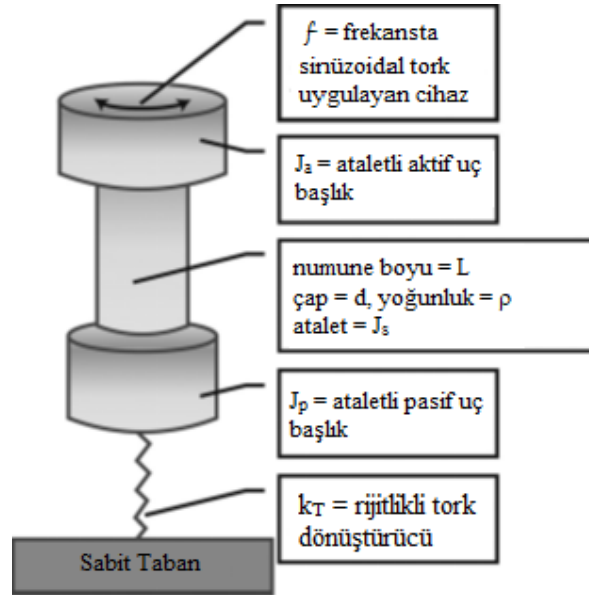
Şekil 6.17.:Özgül ağırlık deneyi

## 6.5. Dinamik Deneylerin ve Standartların Tanıtılması

### 6.5.1. Rezonant kolon ve burulmalı kesme deney sistemi

Zeminlerin dinamik yükler altında göstereceği davranışını belirlemek için o zemine ait dinamik kayma modülü (G) ve sönüm oranını (D) bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerin dinamik parametrelerini belirlemek için farklı deney sistemleri bulunmaktadır. 4. bölümde bu sistemler ayrıntılı bir şekilde avantajları ve dezavantajlarıyla verilmiştir. Bu sistemler içinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi rezonant kolon deneyidir. Rezonant kolon deneyi düşük deformasyon genliklerinde zeminin kayma parametrelerinin belirlenmesi için 1930'ların sonlarında kullanılmaya başlanmıştır (Ida 1938, 1940). Günümüzde rezonant kolon deneyi ile  $10^{-5}$  ile %1 arasındaki deformasyon genliklerinde kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanabilmektedir. Hardin ve Drnevich (1972a) konsolidasyonun olmadığı durumlarda rezonant kolon deneyinin zemindeki çevrimsel kayma davranışının belirlenmesi için çok uygun bir deney yöntemi olduğunu belirtmişlerdir. Rezonant kolon deneyi deprem etkileri, trafik titreşimleri, makine temelleri ve konsolidasyonun gerçekleşmediği statik yükleme durumlarıyla ilgili analiz ve tasarımlarda kullanılmaktadır (Hardin ve Drnevich, 1972b). Rezonant kolon deneyi ilk kez 1981 yılında Drnevich vd. (1978) büyük ölçüde çalışmalarına dayanarak ASTM tarafından standartlaştırılmıştır (ASTM D4015). 1980'li yıllardan itibaren birçok araştırmacı rezonant kolon deneyinin geliştirilmesinde katkı sağlamıştır (Drnevich, 1985; Ashmawy ve Drnevich, 1994; Frost ve Drnevich, 1994; Cascante vd., 1998).

Werden vd. (2013) tarafından, rezonant kolon deneyi için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımda yarı-sabit taban ve serbest başlığa sahip yeni bir burulmalı kayma ve rezonant kolon cihazı tanıtılmıştır. Bu cihazda nispeten rijit olan bir tork gücü aktarıcı başlık alt taban ile sabit hazne tabanı arasına yerleştirilmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18.:Rezonant kolon cihazı

Deney sırasında, büyük kapasiteli bir tork motoru tarafından üst baskı levhası hareket ettirilerek, üst levhanın dönüşü, numune tabanındaki tork ve uyarma frekansının değerleri ölçülmektedir. Burada yapılan ölçümler ile alt baskı levhası için bir denge denklemi oluşturulmuştur. Eşdeğer doğrusal viskoelastik teori kullanılarak, numunenin her iki ucundaki tork ve dönme oranları kullanılarak, numune özellikleriyle ilişkilendiren bir rijitlik matrisi oluşturulmuştur. Yapılan bu iki ölçüm ile her frekans için numunedeki kayma modülü ve sönüm oranını belirlemek için gereken veriler elde edilmektedir. Araştırmacılar bu yaklaşım ile tork motorlarında oluşan sönümlenme, dönme sırasında oluşan sürtünme ve zıt elektromotor kuvveti gibi problemlerin ortadan kalkacağını ve bu sayede daha geniş bir kayma deformasyon genliği ve frekans aralığında, kayma modülü ve sönüm oranının daha hassas ve tekrarlanabilir bir şekilde belirlenmesinin sağlandığını söylemişlerdir. Drnevich vd. (2014) çalışmalarında Werden vd. (2013) tanıtılan cihazın getirdiği güncellemelere genel bir bakış sunmuşlardır. Yeni yaklaşıma sahip rezonant kolon deneyi ile elde edilen verilerinden kayma modülünü, sönümlenmeyi ve kayma

deformasyonunu belirlemek için yeni çözümler ve bu çözümlerin cihaz kalibrasyonuna nasıl yardımcı olabileceğini anlatmışlardır. Ayrıca Sabit Tabanlı Rezonant Kolon Cihazı ile Zeminin Modül ve Sönümünde Standart Test Yöntemleri'nde (ASTM D4015) yer alan bu yeni tip cihazın özellikleri incelenmiştir. Çalışmalarında eskiden kullanılan rezonant kolon deneylerinde kullanılan sabit tabanlı ve üzeri yaylı serbest başlığa sahip cihazlar ile tabanda tork transdüserü monte edilmiş yeni tip rezonant kolon cihazı, transfer fonksiyonları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Geleneksel rezonant kolon deneylerinde üst tarafta bulunan uç başlığa bağlı olan yaylar sonucu bu başlıkta burulma direnci oluştuğu ve bunun sönüm oranlarını değiştirdiği ifade edilmiştir. Bu sönümlemenin, uç başlığa bağlı yaylı olmasa dahi eski tip rezonant kolon deneylerinin tümünde cihazın sönümlenmesi olduğu ifade edilmiştir. Araştırmacılar yaylı olmayan modellerde sönümlenmenin nedeninin hareketli üst levhaya bağlı kablo ve boru bağlantıları ile tork uygulamak için kullanılan elektromanyetik sistemdeki emf ile dönme hızıyla orantılı olan endüksiyon akımlarındaki dirençten kaynaklandığını söylemişlerdir. Yeni rezonant kolon sisteminde ise kayma modülü ve sönüm oranını belirlemek için numunenin uç başlığındaki dönüş ile numune tabanından ölçülen tork kullanılmaktadır. Araştırmacılar bunun avantajının ölçülen torkun sadece numune tarafından iletilmesi olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca bu cihazda uç başlık ataleti, rijitlik, sönüm ve tork girişi kalibrasyonlarına gerek olmadığını sadece uç başlıktaki dönüşün kalibrasyonu ile oldukça stabil bir test cihazı olduğunu belirtmişlerdir. Drenvich ve Ashlock (2017) tanıtilen yeni rezonant kolon sistemi ile 2015 yılında değişen ASTM D4015 standardını ve bu değişimi incelemişlerdir. Araştırmacılar 1981'den beri kayma modülünün ve sönüm oranının ölçümlerinin yalnızca sönümlenmemiş doğal frekansta yapıldığını yani ölçülen açılal yer değiştirmenin uygulanan torku 90 derece geciktirdiği noktada yapılabildiğini söylemişlerdir. Yani kayma modülü ve sönüm oranının tespiti için faz gecikmesinin tam olarak 90 derece olduğu frekansı elde etmenin gerekli olduğunu ve bu frekansta dönüş uç başlıktaki dönme büyüklüğünün uygulanan tork ve sistem sönümünün bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Sadece bu titreşimde yani kayma modülü ve sistem sönümünün sabit olduğu ve uygulanan torka bağlı olduğu noktada sistemin belki bir lineer viskoelastik sistem olarak modellenebileceğini ifade etmişlerdir. 2015 yılında yayınlanan ASTM D4015 standardı ile üst başlık sistemine uygulanan torkun ölçülmesi zorunluluğu getirilmiştir. Werden vd. (2013) tarafından tanıtilen yeni tip rezonant kolon cihazda faz

gecikmesinin tam olarak 90 derece olduğunu, frekansı elde etmenin gerekli olmadığını çünkü geleneksel rezonant kolon cihazlarında kullanılan elektromanyetik osilatörün yerine bir tork motoru kullanıldığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar tipik olarak torku, torkun manyetik alan kuvvetiyle orantılı olduğu ve osilatör bobinden geçen akımın elektromanyetik osilatör tarafından uygulandığı bir sistem olarak tanıtmışlardır. Eski tip rezonant kolon cihazlarında kullanılan bu şekildeki bir sistemde, kalıcı mıknatıslardan gelen manyetik alan kuvveti sınırlı bir miktarda tork üretebildiğini ve belirli bir akım seviyesinin üzerinde osilatörü doymuş hale geleceğini ancak yeni tanıtilen sistemde elektromanyetik osilatörün yerine bir tork motoru kullanıldığı için bu şekilde bir problem olmayacağını ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada kil zeminlerin dinamik davranışının incelenmesinde Werden vd. (2013) tanıtilen rezonant kolon ve burulmalı kayma cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.19).

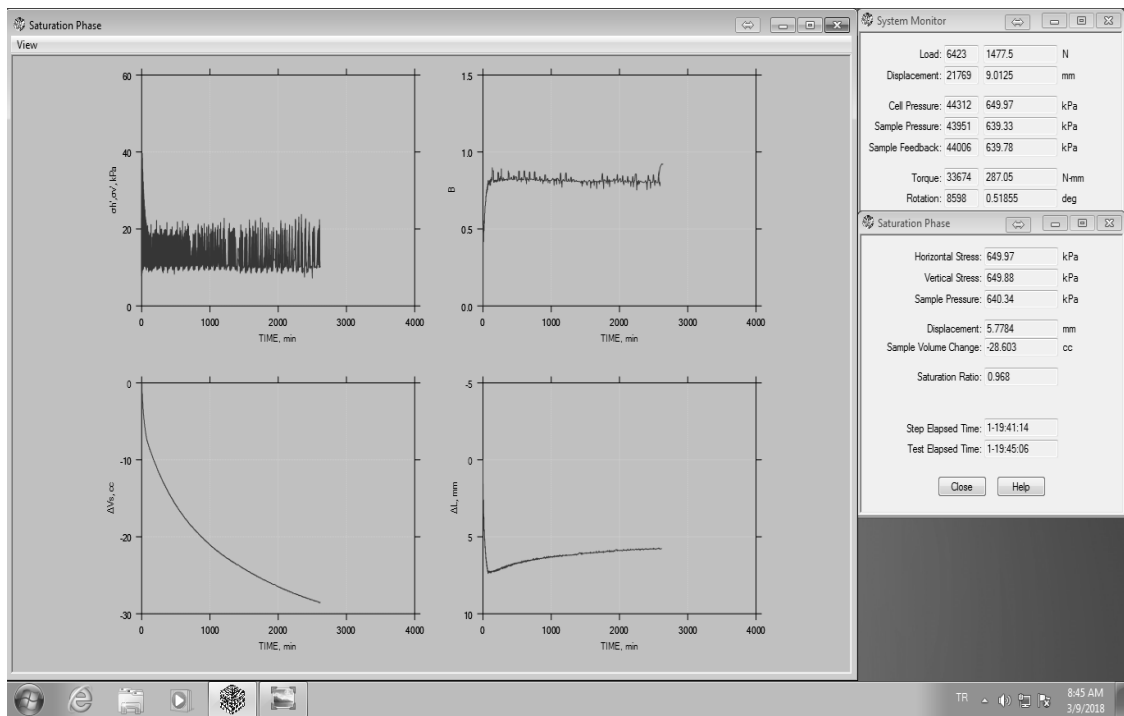


**Şekil 6.19.:**Rezonant kolon ve burulmalı kesme cihazı

## 6.5.2. Deney aşamaları

### 6.5.2.1. Doyurma

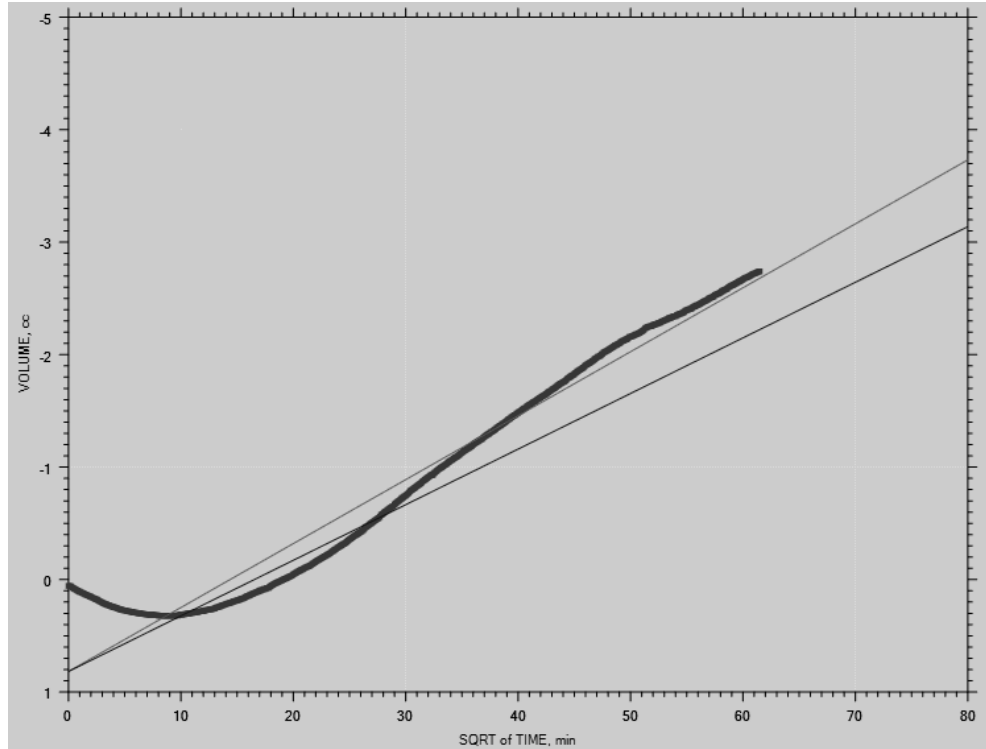
İnşaat mühendisliğinde üzerine yapılacak yapının zemini her zaman suya tamamen doygun değildir. Ancak doygun zeminle çalışmak zeminin ön kötü durumunu modellemek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada kullanılan zeminlerin tamamı suya doygun hale getirildikten sonra konsolidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Numunenin doygunluğu Bishop'un B parametresi ile kontrol edilmiş olup,  $B > 0.95$  olduğu durumlarda doygun olarak kabul edilmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalardaki araştırmacılar da B değerinin 0.95'in üzerinde olduğu durumlarda doygun olarak kabul edilebileceğini belirtmişlerdir (ASTM D4767). Ancak bu çalışmada kullanılan tüm zemin numunelerinde B değeri 1.0 olduktan sonra diğer aşamaya geçilmiştir (Şekil 6.20). Zeminin doyurulması işleminde gerek hava basıncı gerek de suyun içindeki hava boşlukları zeminin doyurulması süresinde oldukça önemlidir. Bu çalışmada havası tamamen alınmış su kullanılmış ve ayrıca cihazda kullanılan boruların içindeki hava da tamamen boşaltılarak doyurma işlemi süresi düşürülmüştür. Doyurma işleminde en uzun süre %100kil zeminde en kısa süre ise %50kil+%50silt olan zeminde görülmüştür.



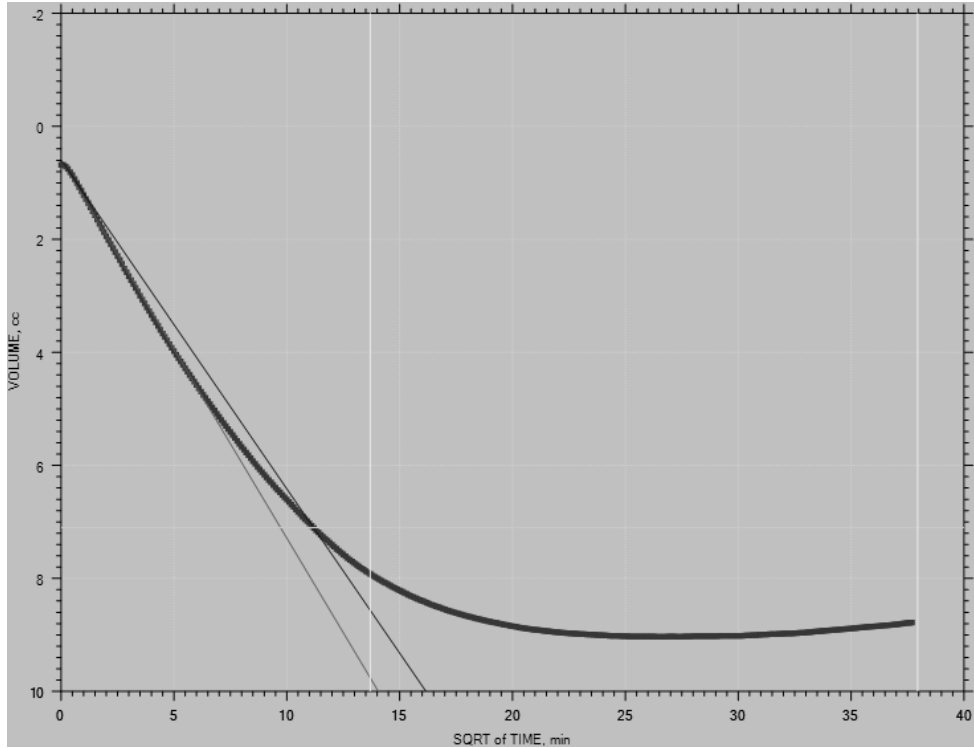
Şekil 6.20.:Doyurma işlemi

### **6.5.2.2. Konsolidasyon**

50kPa'lık enerji altında ıslak tokmaktama yöntemi ile hazırlanan numuneler doygun hale geldikten sonra 50kPa ve 25kPa basınçlar altında konsolide edilmiştir. Bu sayede aşırı konsolidasyon oranı 1 ve 2 olan % 100 kil, %90kil+% 10silt, %80kil+% 20silt, % 70kil+% 30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt numuneleri elde edilmiştir. 25kPa basınç altında konsolide edilen numuneler 50 kPa altında hazırlandığı için şişme etkisi göstermişlerdir (Şekil 6.21). 50 kPa basınç altında hazırlanıp aynı basınçta konsolide edilen zeminlerde ise konsolidasyon oturması gerçekleşmiştir (Şekil 6.22). 50kPa altında konsolide olan aşırı konsolidasyon oranı 1 olan zeminlerde konsolidasyon işlemi her zemin için yaklaşık olarak 24 saatte tamamlanmıştır. Tüm zeminlerde T100 değeri bulunduğunda yani teorik olarak birinci konsolidasyon %100 tamamlandığında diğer aşamaya geçilmiştir. Ancak şişme gösteren aşırı konsolidasyon oranı 2 olan zeminlerde ise konsolidasyon işlemi daha uzun sürmüştür. Tüm konsolidasyon deneyleri izotropik koşullar altında yapılmıştır.



**Şekil 6.21.:25kPa altında konsolide olan numuneler**

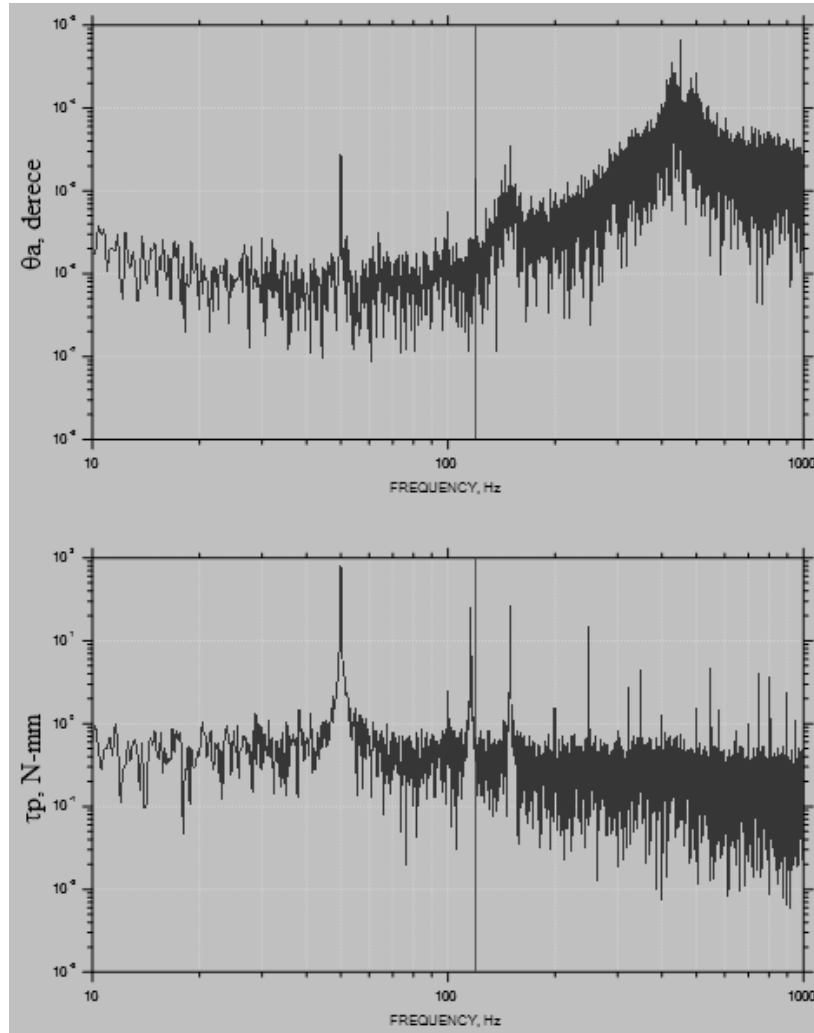


Şekil 6.22.:50kPa altında konsolide olan numuneler

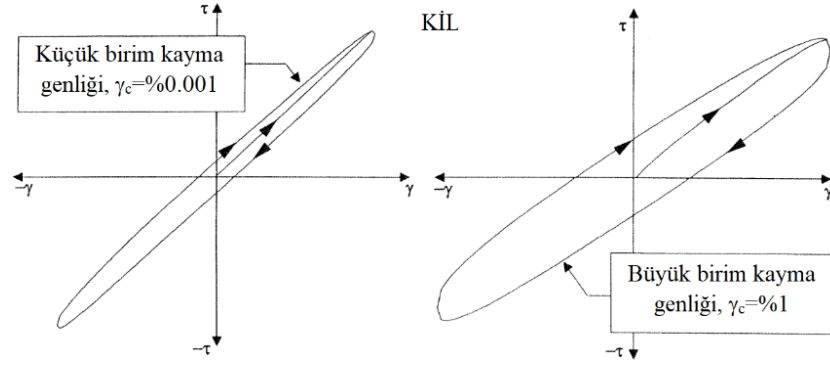
### **6.5.2.3. Rezonant kolon deneyi**

Çalışmada kullanılan rezonant kolon sisteminde üç farklı tipte deney ile analizler yapılabilmektedir. Bunlardan ilki olan ve “rezonans” adı verilen deney tipinde belirlenen minimum ve maksimum uyarımlar arasında bir dizi uyarım seviyesi için rezonans frekansında numunenin kayma modülü ve sönüm oranları ölçülmektedir. Deneyden önce sistem, belirlenen başlangıç frekansı seviyesinden başlayarak zeminde frekans taraması yapmak suretiyle zemine ait rezonans frekanslarını tespit eder. Daha sonra sistem, kullanıcı tarafından belirlenen ve başlangıçta tespit edilen minimum uyarım seviyesini oluşturacak frekansı ayrıntılı inceleme yaparak tespit eder ve bu noktada kayma modülü ve sönüm oranını belirler. Bu işlemi uyarım seviyesini arttırarak devam ettirir. Kullanıcı tarafından belirlenen maksimum kayma deformasyonuna karşılık gelen rezonans frekansında kayma modülü ve sönüm oranı tespit edildikten sonra ise bir sonraki deney aşamasına geçilir. Bir diğer deney tipi olan “rezonans tarama” ile belirlenen minimum ve maksimum frekans aralığında rezonans frekansı değiştirilerek zeminin kayma modülü ve sönüm oranı belirlenmektedir. Bu deney tipinin ilk deney tipinden farkı sabit bir uyarım seviyesinde rezonant kolon deneyi işlemini gerçekleştirmesidir. Son deney tipi olan “genlik taraması” belirlenen sabit frekansta minimum ve maksimum uyarımlar arasında

uyarım seviyesini değiştirerek kayma modülü ve sönüm oranı tespiti yapmaktadır. Bu çalışmada tüm numunelerde %1 şekil değiştirmeye kadar “rezonans” deney tipi ile rezonant kolon deneyi uygulanarak maksimum kayma modülünü ve %1 şekil değiştirmeyi meydana getiren frekanslar belirlenmiştir (Şekil 6.23). Ayrıca elde edilen şekil değiştirmelere karşılık dinamik kayma modülü bulunarak kayma modülü eğrisi ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Bu elde edilen sonuçlar ayrıntılı şekilde Bölüm 7’de tartışılmıştır. Rezonant kolon deneyinde küçük birim deformasyonlarda büyük birim deformasyona kadar tekrarlı gerilme uygulanmıştır (Şekil 6.24).



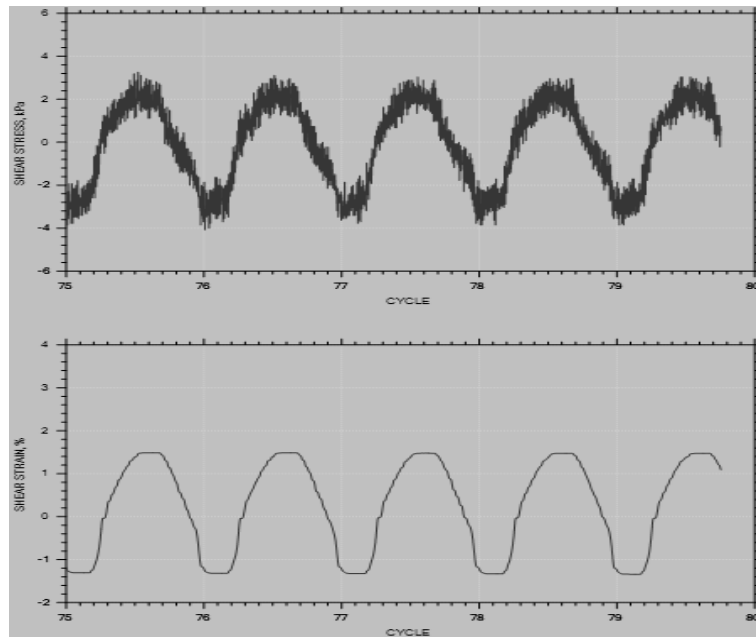
Şekil 6.23.:Rezonant kolon deneyinde frekans değerleri



Şekil 6.24.:Rezonant kolon deneyinde kayma genlikleri (Lanzo ve Vucetic, 1999)

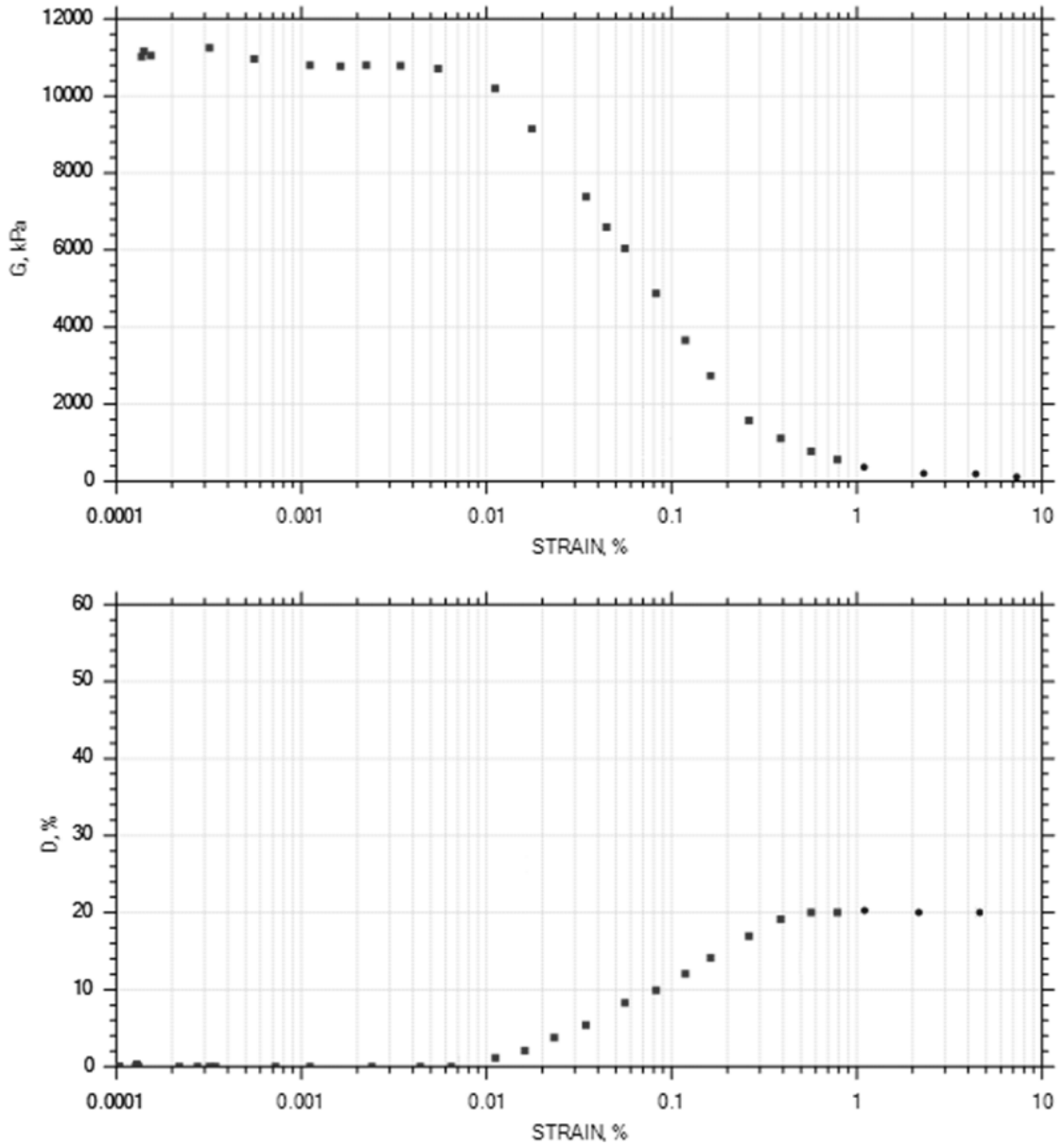
#### 6.5.2.4. Burulmalı kesme deneyi

Rezonant kolon deneyinde %1 şekil değiştirmeye maruz kalan numunelerde %5 şekil değiştirmeye kadar sinüzoidal yükleme ile burulmalı kesme deneyi uygulanmıştır (Şekil 6.25). Söz konusu deneylerde elde edilen kayma modülleri ve sönüm oranları ile kayma modülü eğrileri çizilmiştir. Ayrıca drenajsız gerçekleştirilen bu deneylerde ortaya çıkan boşluk suyu basınçları ve 0.5Hz ve 1Hz frekansta iki farklı burulmalı kesme deneyi yapılarak frekansın etkisi incelenmiştir. Zeminlere uygulanan kayma gerilmesi arttıkça zeminde kayma deformasyonu artacaktır. Burulmalı kesme deneyinde hareketli başlık orijin noktasından dönüş işlemi gerçekleştirdiği için aksenal olarak – ve + yönde kayma genlikleri oluşacaktır (Şekil 6.25).



Şekil 6.25.:Burulmalı kesme deneyinde sinüzoidal yükleme

Yapılan rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri sonucunda elde edilen program çıktısının bir örneği Şekil 6.26'da verilmiştir. Burada %1 birim kayma deformasyonuna kadar rezonant kolon deneyi ve %5 birim kayma deformasyonuna kadar burulmalı kesme deneyi yapılmıştır. "Strain" birim kayma deformasyonunu ifade etmektedir.



Şekil 6.26.:Program çıktısı

## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN BULGULARI

Zemin geniş çapta ve değişken özelliklere sahip doğal bir malzemedir. Zemin davranışının ve mukavemetinin bir zeminden diğerine önemli ölçüde değişen bir malzeme olması ve böyle bir malzeme üzerine veya içine yapı tasarlanması, geoteknik mühendisliğindeki zorluklardan birisidir. Yıllarca araştırmacılar bu farklı tipteki zeminleri sınıflandırma ve mukavemetlerini iyileştirme için çalışmışlardır. Statik koşullar altında bir zemine yapı inşa etmek birçok bilinmeyenle karşılaşmayı kaçınılmaz kılarken, dinamik etkiler altında zeminin doğrusal davranışının incelenmesi daha fazla bilinmeyen değerler ortaya çıkarmaktadır. Bir zeminin deprem sırasında göstereceği davranışın belirlenebilmesi için öncelikle o zemine ait zemin sınıfı, kıvam limitleri, dane çapı dağılımı, özgül ağırlık vb. fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, doğal durumda bulunan bir kil zemin dekantasyon yöntemiyle ayrılarak, kil ve silt ayrı ayrı elde edilmiştir. Daha sonra belirlenen yüzdelerde kile silt katılarak %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt, %50kil+%50silt karışımları elde edilmiştir. Islak tokmaktama yöntemiyle numuneler 50kPa kompaksiyon enerjisinde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımların Bölüm 6'da anlatılan deneylerle fiziksel özellikleri belirlenmiş daha sonra çeşitli dinamik deneylerle karışımların dinamik özellikleri incelenmiştir.

Karışımlarda dinamik deneyler %100 kile farklı yüzdelerde silt eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Fakat bu çalışmada elde edilen eğrilerin literatür ile karşılaştırılmasının daha anlaşılabilir olması için grafiklerin "x" eksenlerinde silt yüzdesi değişimi yerine kil yüzdesindeki değişim kullanılmıştır.

### 7.1. Fiziksel Deneyler

Zemin, üzerine yapılan bir yapı için uygun değilse bu yapının yıkılmasına, buradaki insanların can ve mal güvenliğinin tehlikeye atılmasına sebep olabilir. Güvenli bir yapı inşa ederken temel taşıma gücü ve oturma değerlerinin iyi etüt edilmesi, kullanılan yapı malzemesi ve yapının statik hesapları kadar önemlidir. Geçmiş depremlerde sonra, yapıları en çok etkileyen parametrelerden bir tanesinin üzerlerine yapılmış olan zeminin özellikleri olduğu görülmüştür. Ülkemizde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra zeminin önemi daha iyi anlaşılmiş ve zemin etüdü zorunlu hale gelmiştir. Deprem nedeniyle zeminlerde oluşan boşluk suyu basıncı artışları ve bu

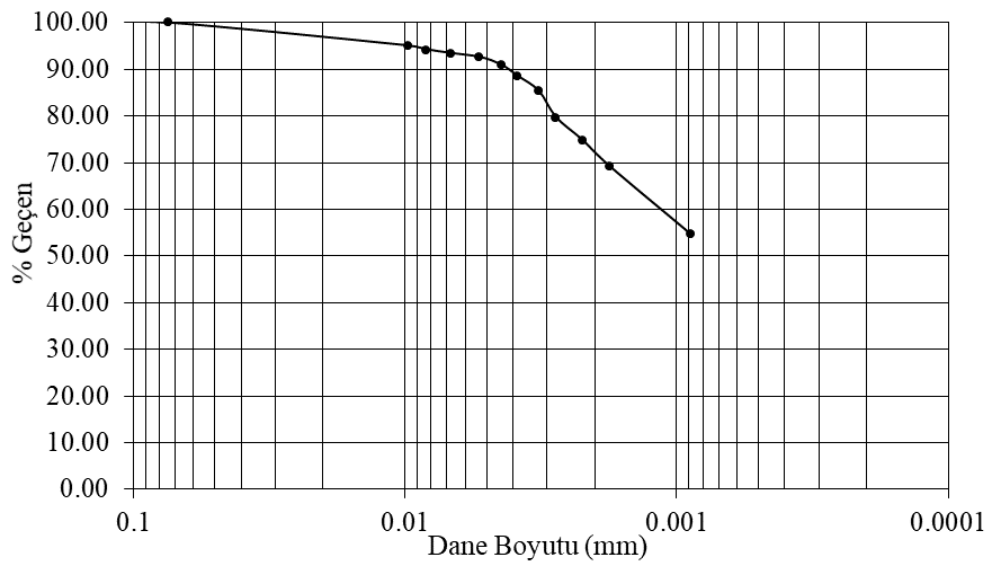
başlık suyu basınçları sonrası görülen eksenel deformasyonlar ile zeminlerde deprem sırasında meydana gelen yatay deformasyonların zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı davranışlar sergilemektedir (Ural, 2011).

### 7.1.1. Elek analizi

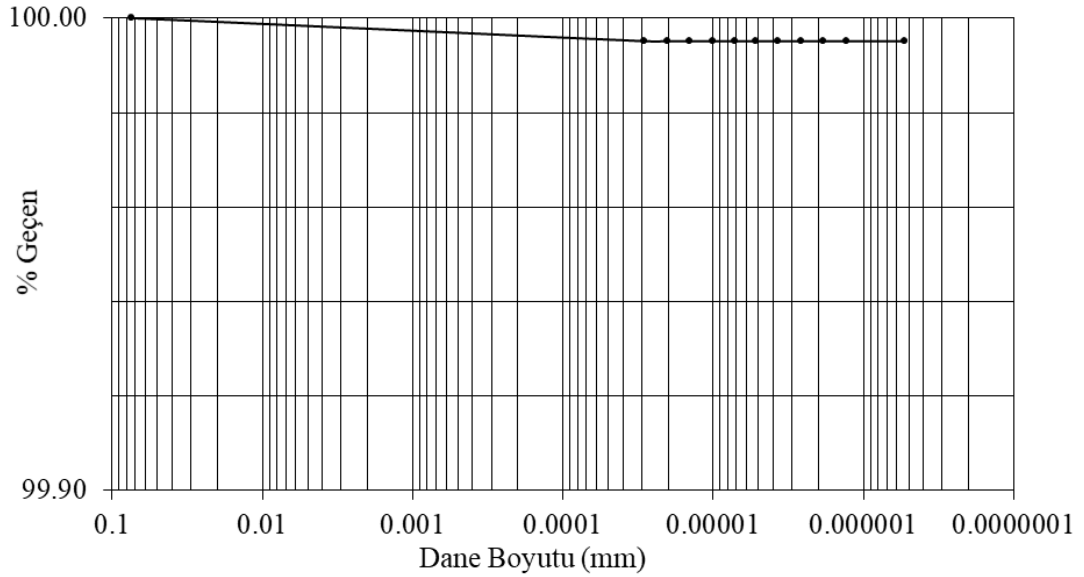
Bilecik ilinin Söğüt ilçesinden temin edilen kil zeminde 200 numaralı elek kullanılarak yıkamalı elek analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deney sonucunda zeminin tamamının 0.075mm'den küçük olduğu yani içerisinde kil ve silt olan ince daneli zemin bulundurduğu, iri daneli kum ve çakıl olmadığı tespit edilmiştir. Elek analizi sonucunda zemin cinsi belirlenen malzemenin ince daneli zemin olduğu belirlenmiştir.

### 7.1.2. Hidrometre deneyi

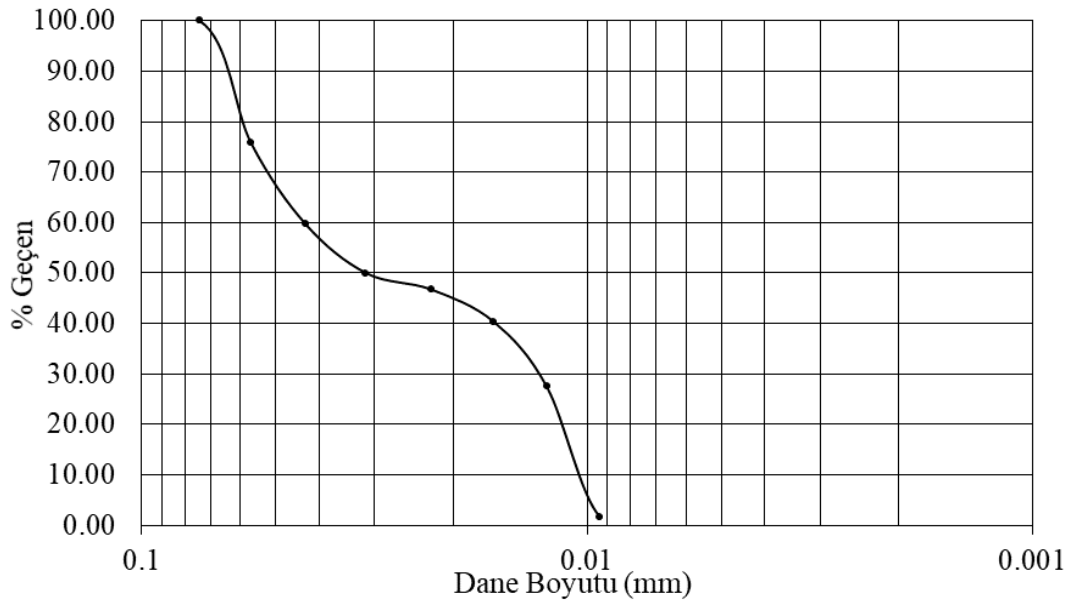
Elek analizi sonucunda ince daneli zemin olduğu tespit edilen kil zeminde, kil ve silt oranının ve dane çapı dağılımının belirlenmesi amacıyla hidrometre deneyi yapılmıştır (Şekil 7.1). Yapılan deney sonucunda kil zemin içerisinde yaklaşık %72kil ve %28 silt olduğu görülmüştür. Ancak yapılan çalışmada kil zemin içerisindeki siltin öneminin de görülmesi amacıyla Bölüm 4'te anlatılan dekantasyon işlemiyle kil ve silt birbirinden ayrılmıştır. Ayrılan kil ve siltte de hidrometre deneyleri yapılarak içerisinde kil veya silt kalıp kalmadığının tespiti yapılmıştır. Dekantasyon işleminden sonra ayrılan kil ve siltte yapılan hidrometre deneyi kil ve siltin, %100kil ve %100silt olduğunu göstermiştir (Şekil 7.2-7.3).



Şekil 7.1.:Kil zemin hidrometre deneyi



Şekil 7.2.: %100kile ait hidrometre deneyi



Şekil 7.3.: %100siltte ait hidrometre deneyi

### 7.1.3. Atterberg kıvam limitleri

Dane çapı dağılımı belirlenen zeminlerde zemin sınıfının belirlenmesi amacıyla Atterberg kıvam limitleri deneyi yapılmıştır. Likit limit deneyinde Casagrande yöntemi kullanılmıştır. Yapılan deneylerde ASTM D4318-17e1 standardı kullanılmıştır. Çizelge 7.1'de kil zeminin ilk durumdaki likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve zemin sınıfı değerleri verilmiştir. Çizelge 7.2'de ise dekantasyon yöntemiyle ayrılan ve ağırlıkça bir araya getirilen içerisinde %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt,

%60kil+%40silt, %50kil+%50silt, %40kil+%60silt, %30kil+%70silt, %20kil+%80silt, %90kil+%10silt ve %100 silt bulunduran karışımların likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve zemin sınıfı değerleri verilmiştir. Zemin sınıflandırmasında ASTM D2487-17 standardı ve TS1500/2000 standardı kullanılmıştır.

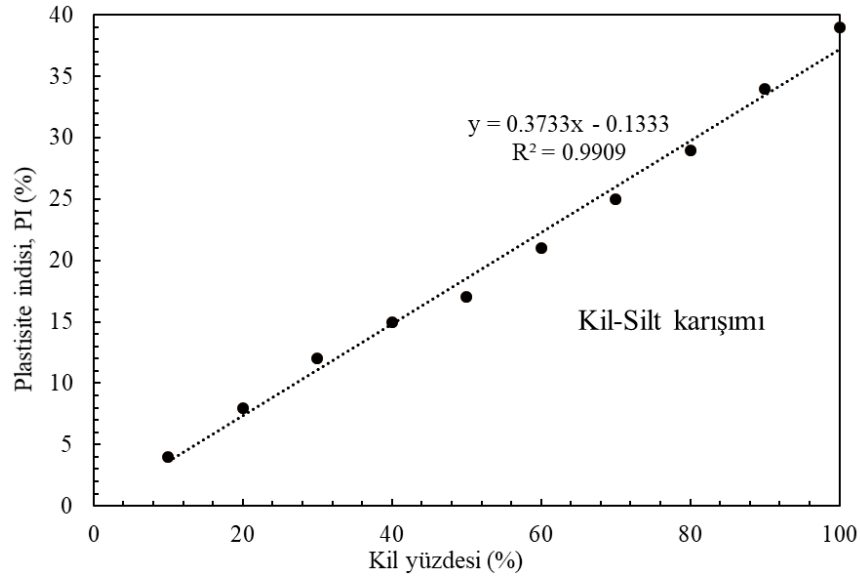
**Çizelge 7.1.:**Kil zeminin özellikleri

Malzeme	LL	PL	ASTM	TS
Kil Zemin	51	23	CH	CH

**Çizelge 7.2.:**Karışımlara ait parametreler

Kil Yüzdesi	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi	ASTM	TS
100	60	21	39	CH	CH
90	56	22	34	CH	CH
80	52	23	29	CH	CH
70	49	24	25	CL	CI
60	46	25	21	CL	CI
50	43	26	17	CL	CI
40	41	26	15	ML	MI
30	39	27	12	ML	MI
20	35	27	8	ML	MI
10	32	28	4	ML	ML
0	28	NP	NP	ML	ML

Kıvam limitleri sonucunda, karışımlardaki kil seviyesinin artmasıyla likit limitin arttığını bununla birlikte plastik limitin düştüğü görülmektedir. Bu durumda kil silte doğru ilerledikçe yüksek bir plastiklik seviyesinden plastik olmayan seviyeye ulaşmıştır. Ayrıca oldukça doğrusal bir azalma görülmektedir (Şekil 7.4). Bu plastisite indisindeki doğrusal azalma Yamada ve diğ. (2008) çalışmasında da görülmektedir. Araştırmacıları ince dane içermeyen bir kum zemin CH sınıfındaki bir kile farklı oranlarda kum ekleyerek dinamik basit kesme deneyine tabi tutmuşlar ve zeminlerdeki plastisite indisi değişiminin dinamik davranışa etkisini incelemişlerdir.



Şekil 7.4.:Kil yüzdesi ile plastisite indisi değişimi

#### 7.1.4. Özgül ağırlık

Özgül ağırlık, bir zeminin birim hacmi başına ağırlığıdır. İçerisindeki hava boşlukları alınmış zeminde, danelerin ağırlığının zemin danelerinin hacmine oranıdır. Özgül ağırlık deneyi sayesinde zeminlerin içerisindeki boşluk oranı hesaplanmaktadır. Özgül ağırlık hem statik koşullar altında hem de dinamik koşullar altında zeminin içerisindeki boşluk oranını ve dolayısıyla zeminin davranışını etkilemektedir. Bu sebeple zemine ait dane özgül ağırlığının bilinmesi zemin davranışının tespiti açısından gerekli bir parametredir. Bu çalışmada dinamik deneylerde kullanılan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt, %50kil+%50silt karışımları ile %100siltin özgül ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge 7.3)

Çizelge 7.3.:Kullanılan karışımların özgül ağırlıkları

Karışımlar	Özgül Ağırlık
%100 Kil	2.53
%90 Kil+%10 Silt	2.54
%80 Kil+%20 Silt	2.55
%70 Kil+%30 Silt	2.56
%60 Kil+%40 Silt	2.56
%50 Kil+%50 Silt	2.57
%100 Silt	2.63

## 7.2. Dinamik Deneyler

Zemine ait doğrusal olmayan dinamik özellikler çeşitli parametrelerden etkilenir. Bu parametreler iki ana grupta incelenebilir. Bunlardan ilki zemine etki eden yükleme ve diğeri ise yüklemeye maruz bırakılan malzemenin mukavemeti ve yapısı ile ilgili olan parametrelerdir. Doğrusal olmayan zemin davranışını kontrol eden parametreler ve bu parametrelerin kayma modülü ve sönümlemeye etkisi daha önce bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Hardin ve Drnevich (1972a) yaptıkları çalışmada kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde hangi parametrelerin önemli olduklarını incelemişlerdir. Araştırmacılar, kohezyonlu zeminlerde gerilme genliğinin, boşluk oranının, çevre basıncının ve doyumluk derecesinin zeminlerin kayma modüllerinde çok etkili olduğunu ve yine kayma modülü açısından aşırı konsolidasyon oranının etkilediğini olduğunu ancak yükleme frekansı, dane dağılımı, zemin yapısı gibi etkilerin çok da önemli olmadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca yine kohezyonlu zeminlerin sönüm oranlarına gerilme genliğinin, boşluk oranının, çevre basıncının çok etkili olduğunu ve aşırı konsolidasyon oranını ve yükleme frekansının az da olsa etkilediğini ancak dane dağılımı, zemin yapısı, %0.5'in altındaki hacim değişiklikleri gibi faktörlerin önemli olmadığını ifade etmişlerdir. Darendeli (2001) ise benzer olarak hem kayma modülü hem de sönüm oranı eğrilerinde gerilme genliği ve çevre basıncının ve buna ek olarak zemin tipi ile plastisite indisinin de çok önemli olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sönüm oranı eğrisinde yükleme frekansının önemli olduğunu ancak, kayma modülü eğrisi ve sönüm oranı eğrisi açısından boşluk oranının, aşırı konsolidasyon oranının, doyumluk derecesinin veya zemin dane dağılımının önemli olmadığını ifade etmiştir.

Tüm bu etkenler göz önüne alındığında, bu çalışmada öncelikle zeminde kil yüzdesinin etkisinin incelenmesi amacıyla kil zeminin içerisindeki silt dekantasyon yöntemi ile ayrılıp belirli yüzdelerde ağırlıkça eklenerek yeni karışımlar elde edilmiştir. Bu karışımlar %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt şeklinde 50kPa enerji altında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmıştır. Daha sonra bu numunelerde rezonant kolon deneyi ve burulmalı kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak %1 şekil değiştirme seviyesine kadar rezonant kolon deneyi uygulanan numunelere daha sonra %± 2.5-3.0 şekil değiştirme seviyesine kadar 0.5Hz frekansta drenajsız koşullarda burulmalı kesme deneyi uygulanmış ve numunelerin kayma modülleri ile sönüm oranı eğrileri tespit

edilmiştir. Ayrıca, rezonant kolon (RK) deneyi ile zeminlerin maksimum dinamik kayma modülü ve burulmalı kesme (BK) deneyi ile maksimum sönüm oranları ve zeminlerde drenajsız yükleme koşullarından dolayı ortaya çıkan boşluk suyu basınçları incelenmiştir.

Daha sonra yine aynı oranlarda elde edilen karışımlar çevrimsel şekil değiştirmeye maruz bırakıldığında kayma modülünün ve sönüm oranının değişiminin incelenmesi amacıyla tekrarlı rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. Doyurma ve konsolidasyon deneyleri tamamlanan numunelerde %1 şekil değiştirme seviyesine rezonant kolon deneyi uygulanmış daha sonra numuneye tekrar konsolidasyon deneyi uygulanmış ve tekrar rezonant kolon deneyi %1 şekil değiştirme seviyesine kadar uygulanmış, ardından tekrar konsolidasyon deneyi uygulanarak numuneye yine %1 şekil değiştirme seviyesine kadar rezonant kolon deneyi uygulanarak en sonunda  $\pm 2.5-3.0$  şekil değiştirme seviyesine kadar 0.5Hz frekansta drenajsız koşullarda burulmalı kesme deneyi uygulanmıştır. Yani %1 şekil değiştirmeye uğrayan numunenin şekil değiştirmesi başlangıç koşullarında kabul edilerek aynı deney iki kere daha uygulanmıştır. Bu sayede tekrarlı şekil değiştirmeye maruz kalan zeminlerdeki kayma modülü ve sönüm oranı incelenmiştir. Ayrıca tüm deneyler frekansın etkisinin gözlenmesi amacıyla burulmalı kesme deneyinde drenajsız koşullarda 1Hz frekansta tekrarlanmıştır.

Hazırlanan karışımlara ek olarak ortalama bir değer olması açısından %75kil+%25silt şeklinde hazırlanan bir karışım (%50 ile %100kil arası) 50kPa enerjide ıslak tokmaklama yöntemiyle kullanılarak çevre basıncının etkisinin ölçülmesi amacıyla 50kPa, 100kPa ve 200kPa çevre basınçlarında numunede rezonant kolon deneyi uygulanmıştır.

Maksimum dinamik kayma modülü ( $G_{max}$ ) birçok parametreden etkilenmektedir. Hardin ve Drenvich (1972) bu etkinin kumlarda, en fazla boşluk oranı ve çevre basıncında görüldüğünü ifade etmiştir. Darendeli (2001) ise normalleştirilmiş kayma eğrisinde ( $G/G_{max}$ ) veya sönüm oranında kil zeminlerde boşluk oranının çok etkin olmadığını ifade etmiştir. Yapılan araştırmalar  $G/G_{max}$  eğrisinde boşluk oranı değişiminin bir etkisi olmasa da  $G_{max}$  üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir (Hardin ve Richart, 1963; Hardin ve Drnevich, 1972a; Lo Presti vd., 1993; Robertson vd., 1995; Lo Presti vd., 1997) kumlar üzerinde dinamik deneyler gerçekleştirilerek boşluk oranı arttıkça maksimum dinamik kayma modülünde bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan araştırmalar sonucunda hem kum zeminlerde hem de kil ve silt zeminlerde boşluk oranının artması

normalize maksimum dinamik kayma modülü eğrisi ve sönüm oranına çok etki etmese de maksimum dinamik kayma modülüne etmektedir.

Bu çalışmada, ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan numunelerde aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı rezonant kolon deneyi, çevre basıncı, zemin tipi ve frekansın etkileri incelenmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere boşluk oranı maksimum dinamik kayma modülünde oldukça önemlidir. Bu sebeple 50kPa'lık kompaksiyon enerjisi altında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan karışımların boşluk oranları hesaplanmış ve boşluk oranlarının birbirine yakın olduğu görüldükten sonra deneyler yapılmıştır. Dinamik deneylerde kullanılan numunelerin boşluk oranları Çizelge 7.4'te gösterilmektedir.

**Çizelge 7.4.:**Dinamik deneylerde kullanılan numunelerin boşluk oranları

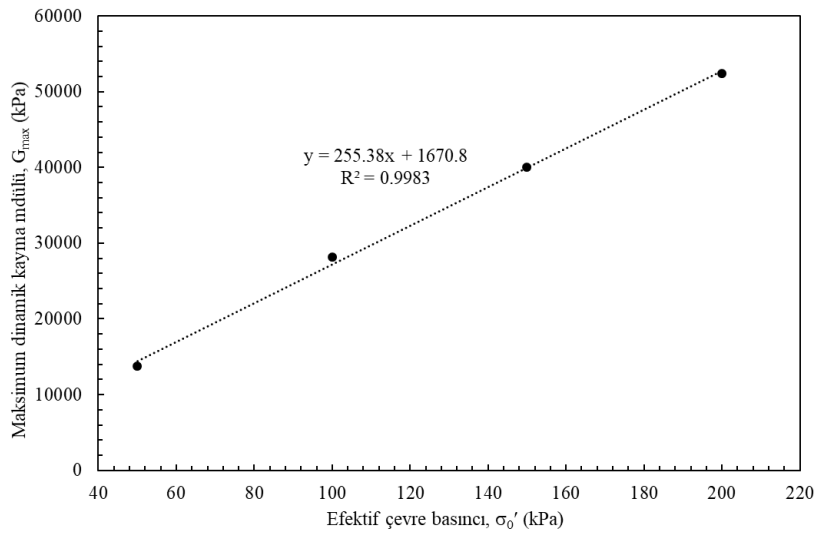
Karışım	Boşluk Oranı			
	1 Tekrarlı RK Deneyinde Kullanılan Numuneler		3 Tekrarlı RK Deneyinde Kullanılan Numuneler	
	AKO=1	AKO=2	AKO=1	AKO=3
% 50kil+% 50silt	1.08	1.09	1.13	1.10
% 60kil+% 40silt	1.10	1.07	1.08	1.09
% 70kil+% 30silt	1.09	1.08	1.11	1.12
% 80kil+% 20silt	1.15	1.09	1.08	1.10
% 90kil+% 10silt	1.13	1.10	1.09	1.15
% 100kil	1.14	1.07	1.12	1.08

### 7.2.1. Çevre basıncı deneyi

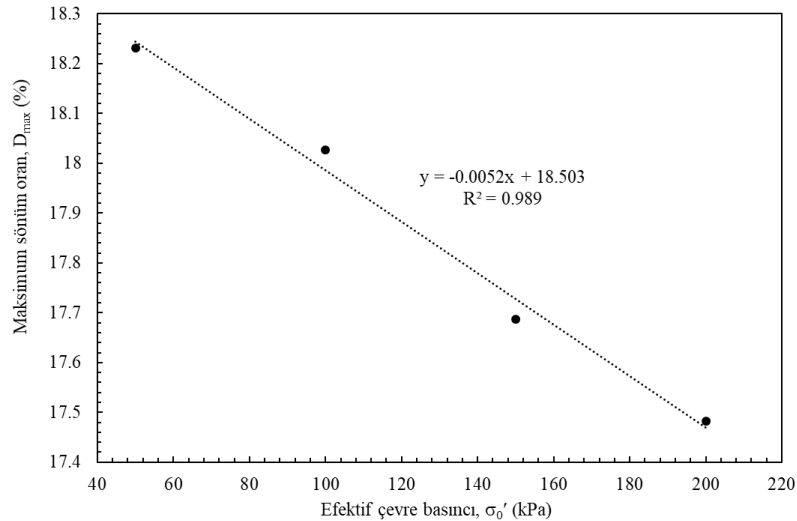
Son yıllarda dinamik zemin özelliklerini ve onları etkileyen parametreleri belirleme konusunda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmacılar deprem analizlerinde kullanılmak üzere doğrusal olmayan davranışın modellenmesi amacıyla genelleştirici eğriler önermişlerdir. Yapılan birçok çalışmada efektif gerilme artışının maksimum dinamik kayma modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Literatürde yapılmış olan birçok çalışma incelendiğinde efektif gerilmenin artışıyla dinamik kayma modülünde de artış meydana geldiği görülmüştür. (Hardin ve Drenvich, 1972a; Iwasaki vd., 1978; Kokusho, 1980; Ishibashi ve Zhang, 1993; Darendeli, 2001; Okur, 2002; Onur vd., 2012). Yapılan çalışmalarda çok çeşitli zeminler

ve deney yöntemleri kullanılmıştır. Ancak elde edilen eğrilerde her ne kadar efektif gerilme artışıyla dinamik kayma modülünde artış gözlemlense de elde edilen eğriler kullanılan zemin özelliklerine göre farklılık göstermektedir.

Bu çalışmada 50, 100, 150 ve 200kPa'lık çevre basınçlarında %75kil+%25silt karışımı kullanılarak efektif çevre basıncı değişiminin kayma modülüne ve sönüm oranı eğrisine etkisi incelenmiştir. %50kil ve %100kil arasında ortalama bir değer olması açısından bu karışım seçilmiştir. Bulunan sonuçlar çevre basıncı artışının maksimum dinamik kayma modülünde artış olduğunu buna karşı sönüm oranında ise azama meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 7.5-7.6).



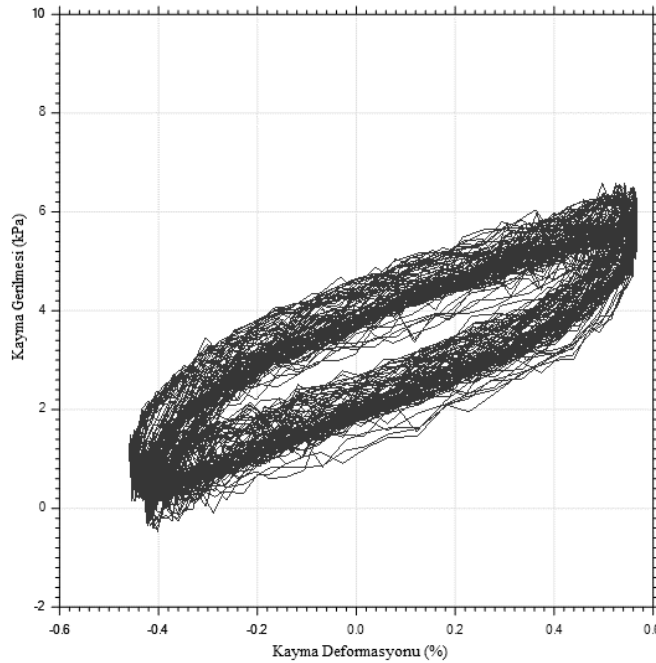
Şekil 7.5.:Çevre basıncı ile  $G_{max}$ 'ın değişimi



Şekil 7.6.:Çevre basıncı ile  $D$ 'nin değişimi

### 7.2.2. 1 çevrimli rezonant kolon ve 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyi

Bu çalışmada kullanılan karışımlar 50kPa enerjide ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmış ve bu sayede ön konsolidasyon basınçları 50kPa olmuştur. Daha sonra bu numuneler doyurma işlemine tabi tutulduktan sonra sırasıyla 50kPa ve 25kPa basınç altında konsolide edilerek normal ve aşırı konsolide hale getirilmiştir. Konsolidasyon aşamasından sonra 1 kere rezonant kolon (RK) deneyi uygulanan numuneler sonrasında 0.5Hz frekansta  $\pm 2.5$  şekil değiştirme seviyesine kadar drenajsız koşullarda burulmalı kesme deneyine tabi tutularak numunelerin kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile boşluk suyu basınçları tespit edilmiştir. Burulmalı kesme (BK) deneyinde hem aşırı hem de normal konsolide zeminlerde tüm numuneneler 23 çevrimde ve yaklaşık 6kPa kayma gerilmesinde  $\pm 2.5-3.0$  kayma deformasyonu gerçekleştirmişler. Şekil 7.7'de 22. çevrime ait histerisis ilmiği verilmiştir.

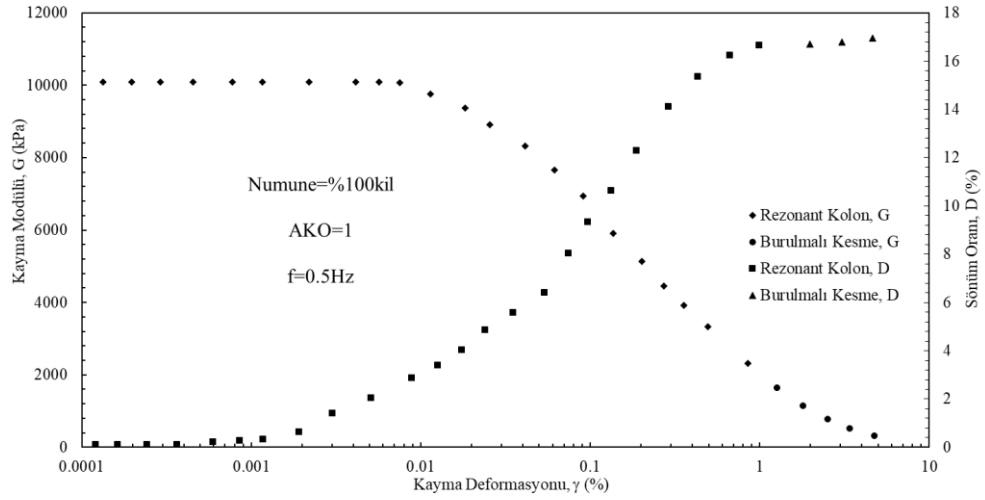


Şekil 7.7.:1RK ve 0.5Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi

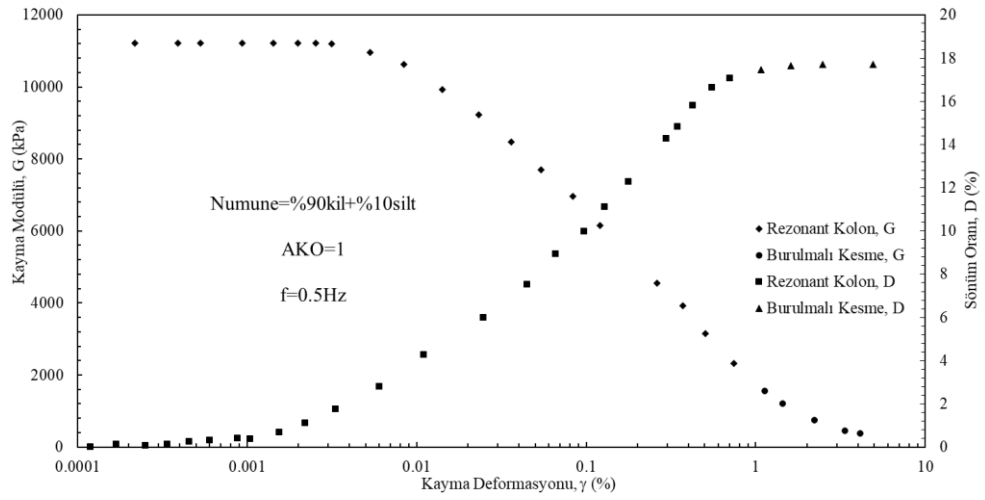
#### **7.2.2.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar**

Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiş (Şekil 7.8-7.13) daha sonra bu

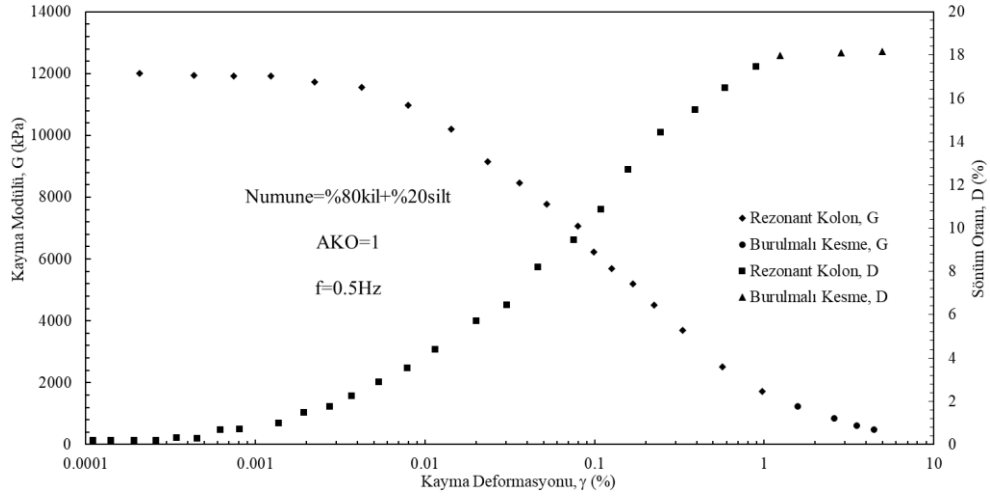
karışımların maksimum dinamik kayma modülü ve maksimum sönüm oranları Çizelge 7.5'te verilmiştir.



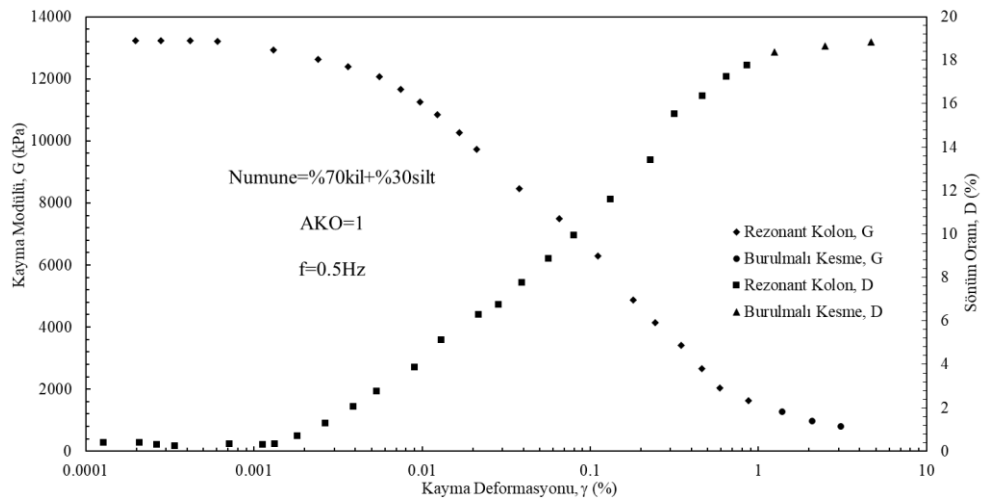
Şekil 7.8.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si



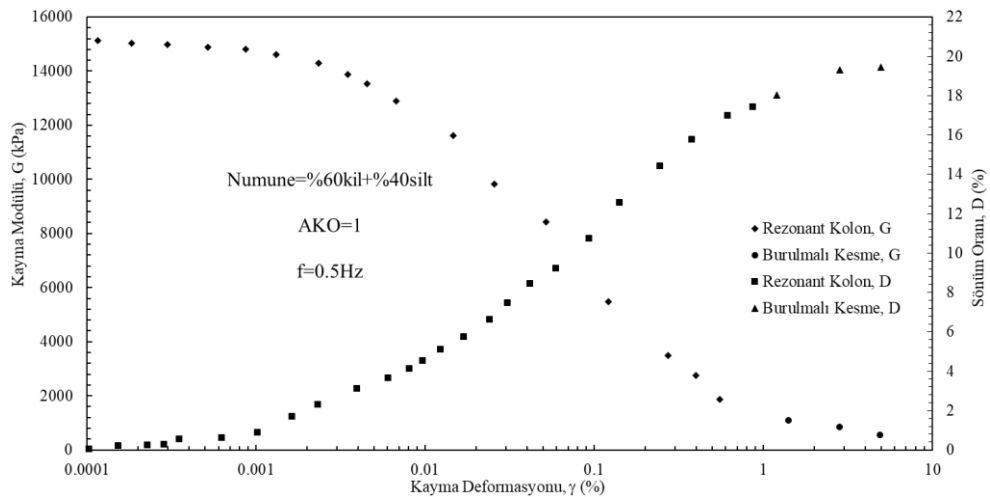
Şekil 7.9.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



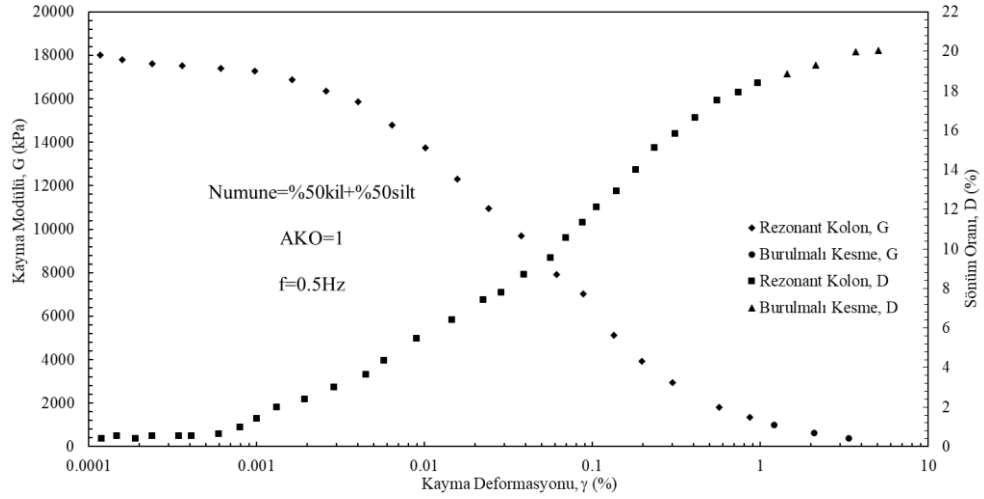
Şekil 7.10.: 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.11.: 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.12.: 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

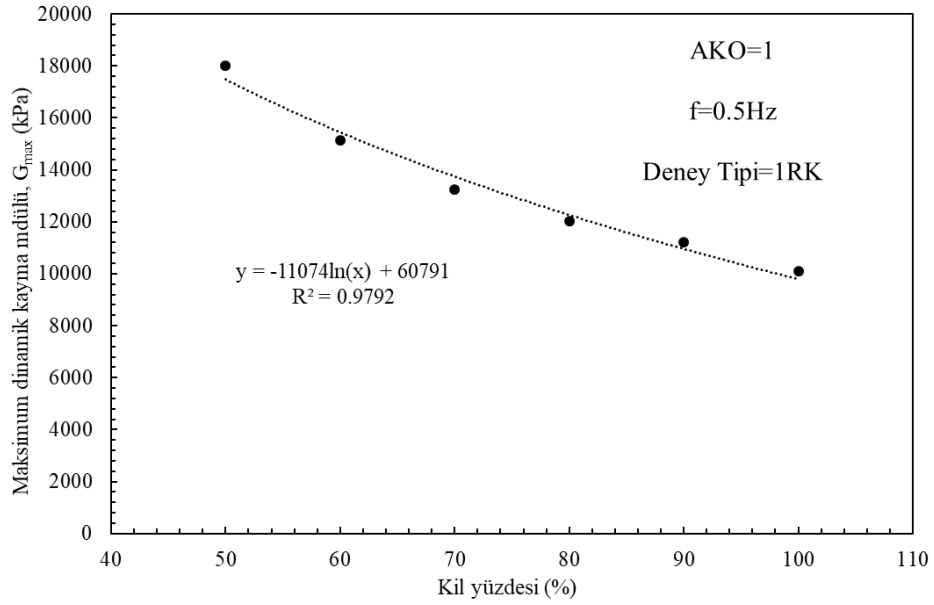


Şekil 7.13.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

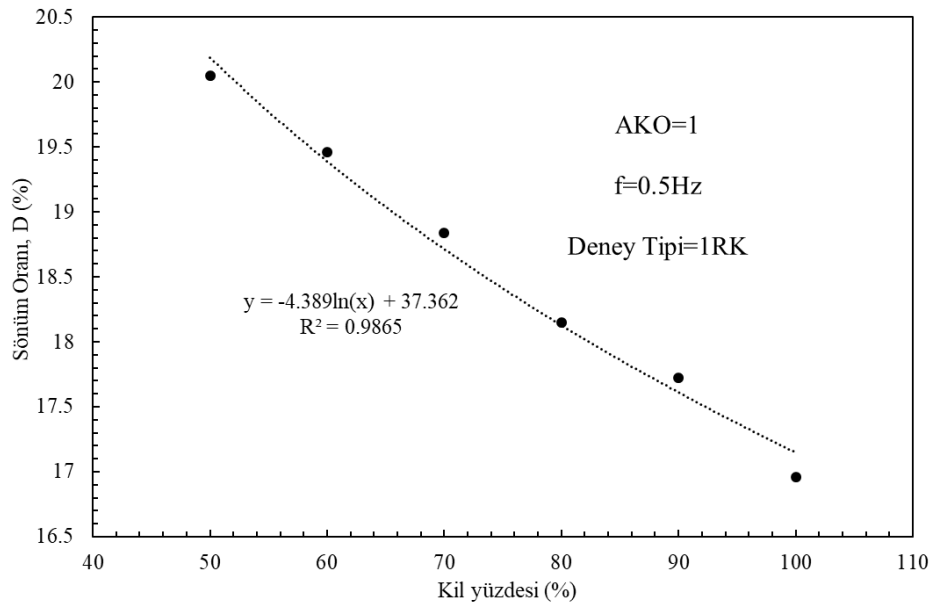
Çizelge 7.5.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si

Karışım	$G_{max}$ (MPa)	D (%)
% 100kil	10081.17	16.96
% 90kil+% 10silt	11212.01	17.72
% 80kil+% 20silt	12012.15	18.15
% 70kil+% 30silt	13231.05	18.84
% 60kil+% 40silt	15125.46	19.46
% 50kil+% 50silt	18012.25	20.05

Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlardaki silt oranının azalmasıyla maksimum kayma modülünde azalış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7.14). Sönüm oranlarında ise benzer şekilde numune içerisinde silt oranı azaldıkça daha küçük sönüm oranları elde edilmiştir (Şekil 7.15).

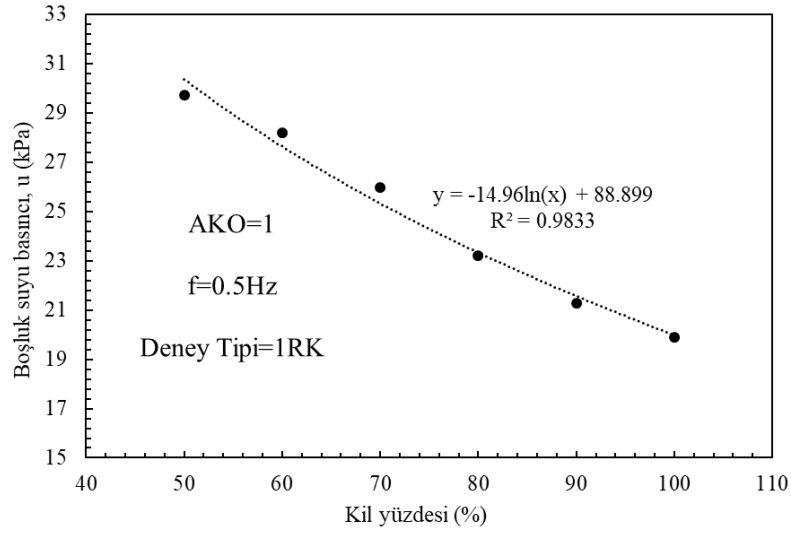


Şekil 7.14.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $G_{max}$  değişimi

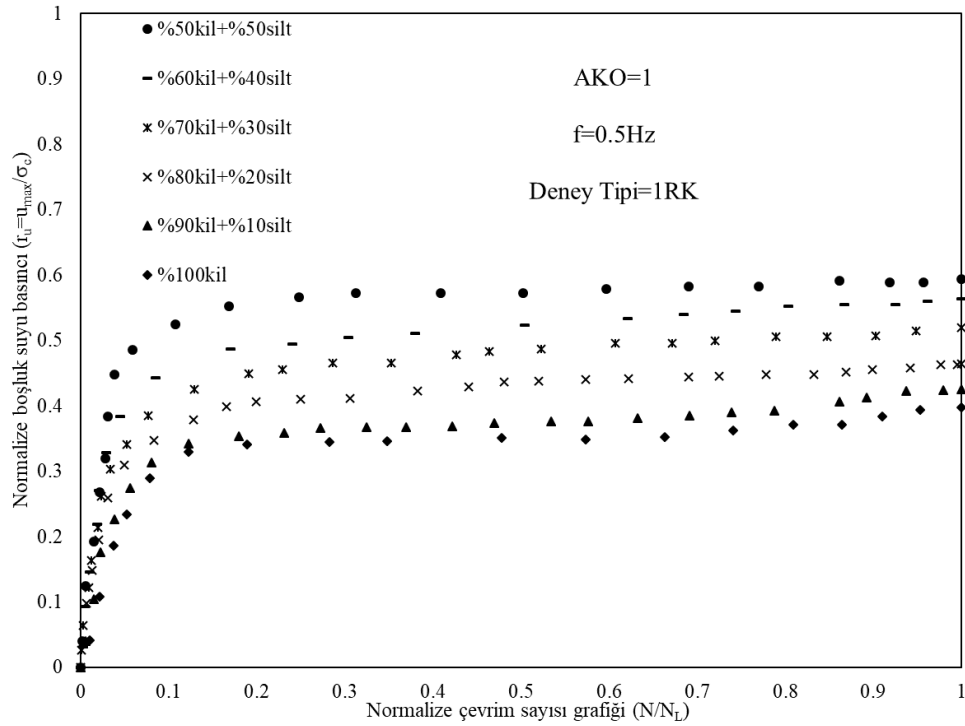


Şekil 7.15.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $D$  değişimi

Burulmalı kesme deneyi sonucunda, elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının ( $u$ ) azaldığı görülmüştür (Şekil 7.16). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk basınçları ( $r_u$ ) grafiği çizilmiştir (Şekil 7.17). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 7.16.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların u değişimi

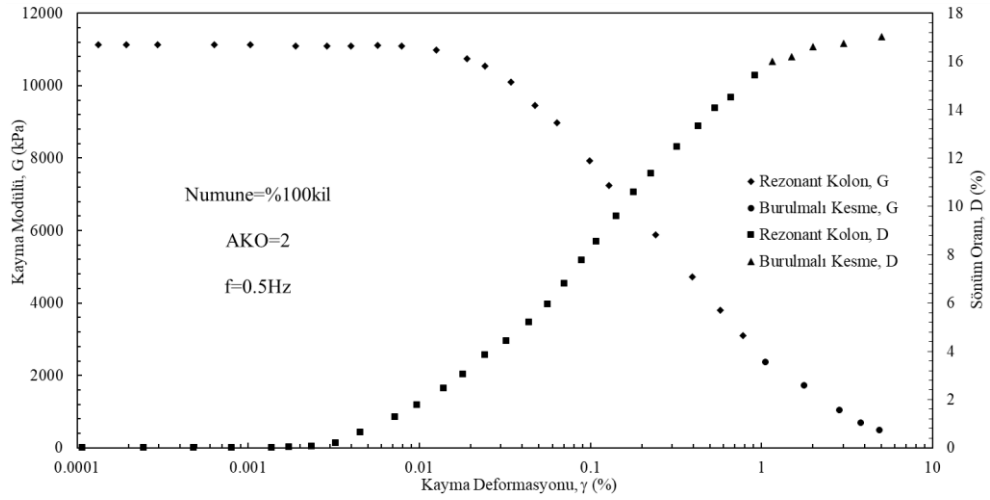


Şekil 7.17.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $r_u$  değişimi

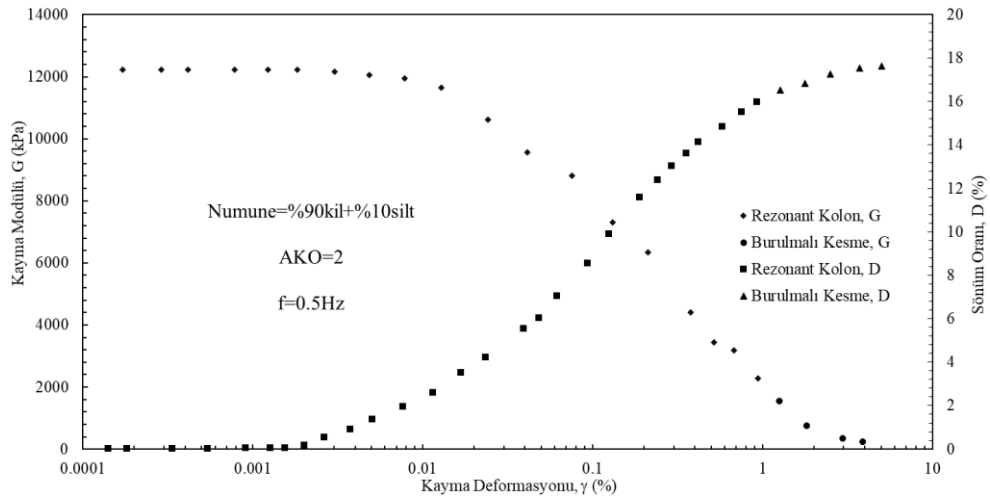
### **7.2.2.1. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar**

Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiş (Şekil 7.18-7.23) ve daha sonra bu

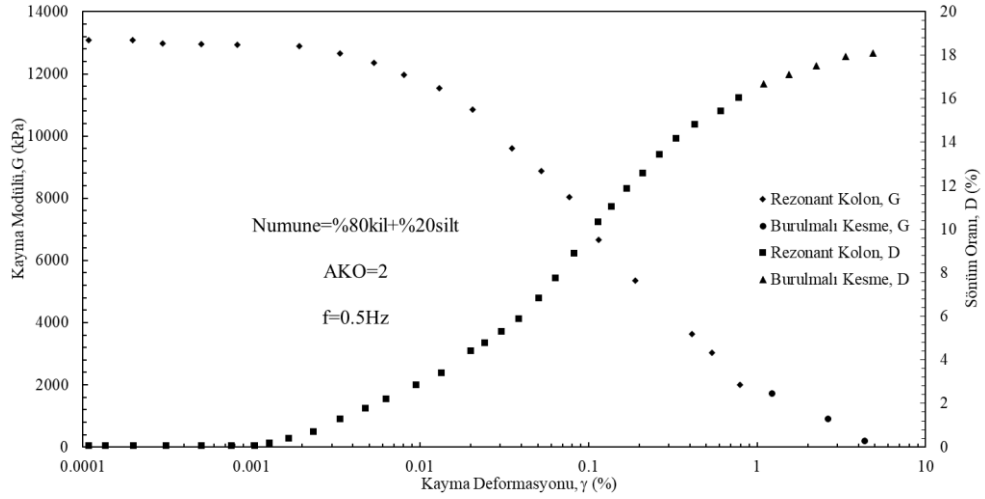
karışımların maksimum dinamik kayma modülü ile maksimum sönüm oranları Çizelge 7.6'da gösterilmiştir.



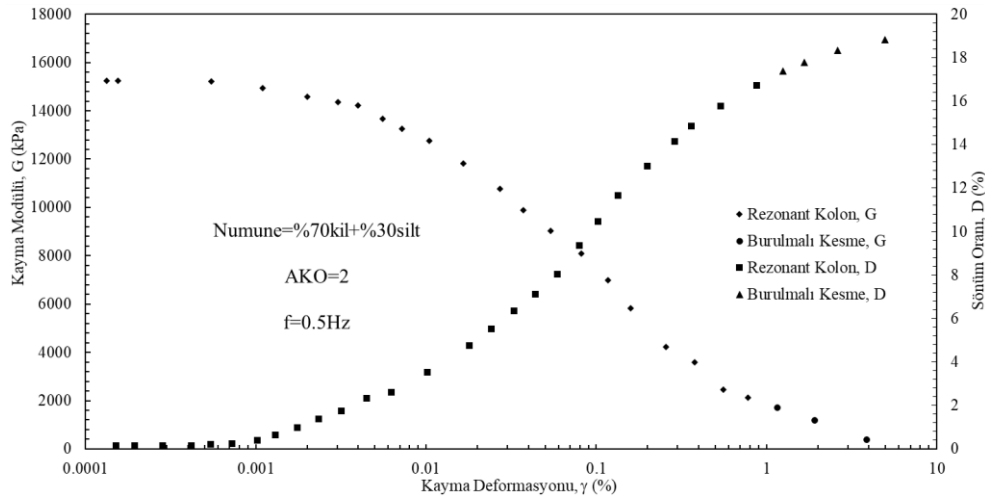
Şekil 7.18.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si



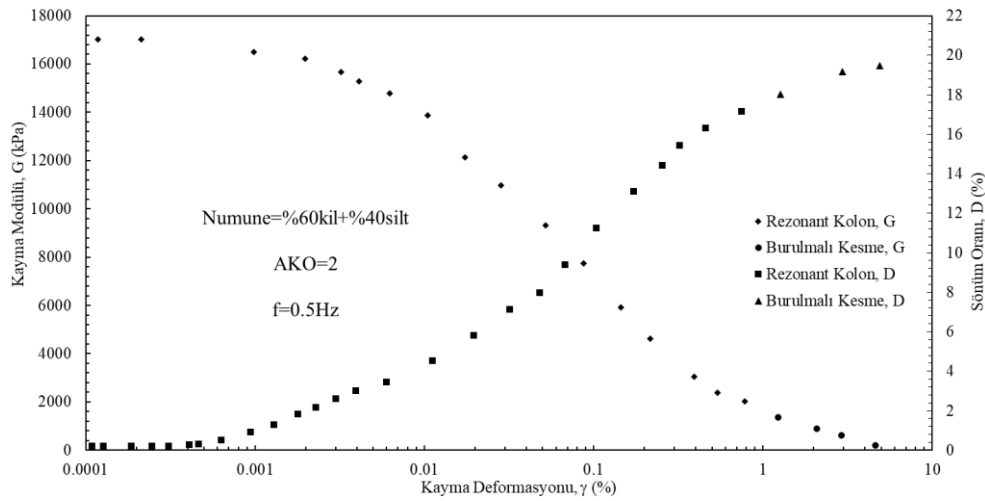
Şekil 7.19.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



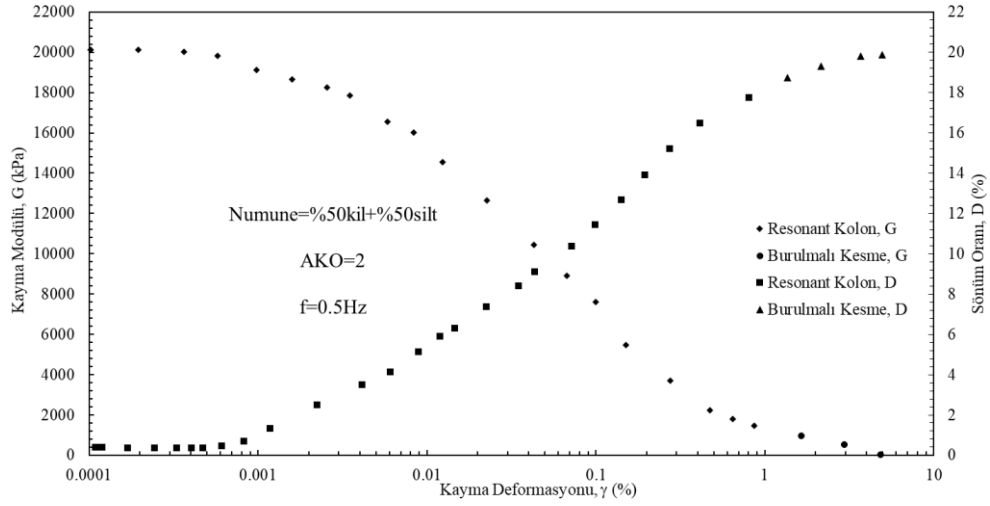
Şekil 7.20.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.21.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.22.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

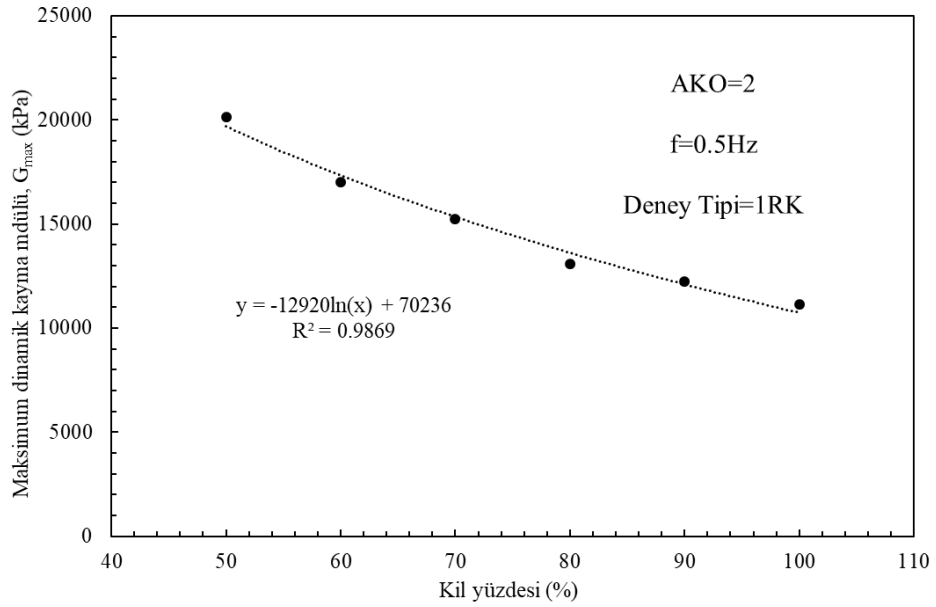


Şekil 7.23.: 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

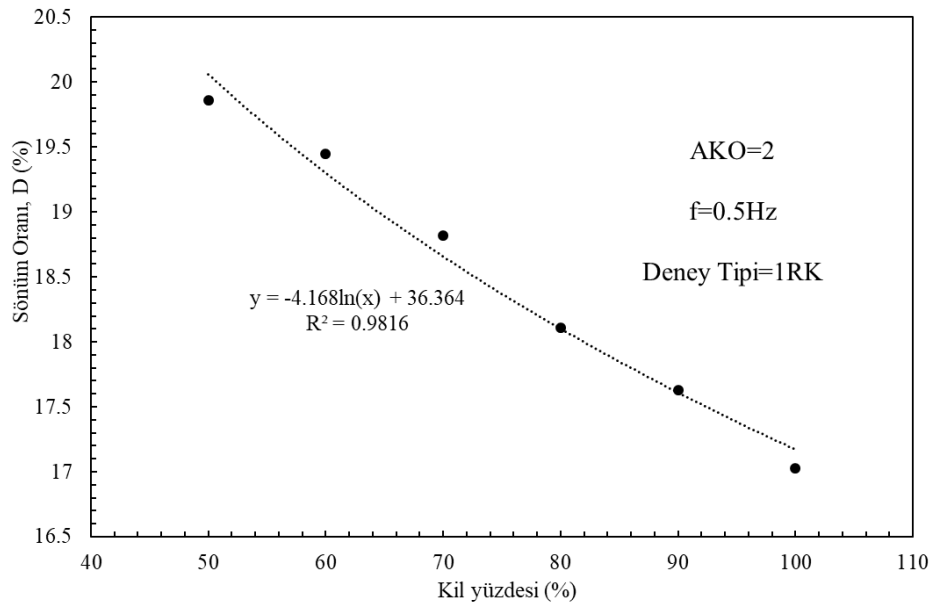
Çizelge 7.6.: 1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si

Karışım	$G_{max}$ (kPa)	D (%)
% 100kil	11120.13	17.03
% 90kil+% 10silt	12224.54	17.63
% 80kil+% 20silt	13080.22	18.11
% 70kil+% 30silt	15245.65	18.82
% 60kil+% 40silt	17028.56	19.45
% 50kil+% 50silt	20121.41	19.86

Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan deney sonuçlarında karışımlardaki silt oranının azalmasıyla maksimum kayma modülünde azalış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7.24). Sönüm oranlarında ise benzer şekilde numune içerisinde silt oranı azaldıkça daha küçük sönüm oranları elde edilmiştir (Şekil 7.25).

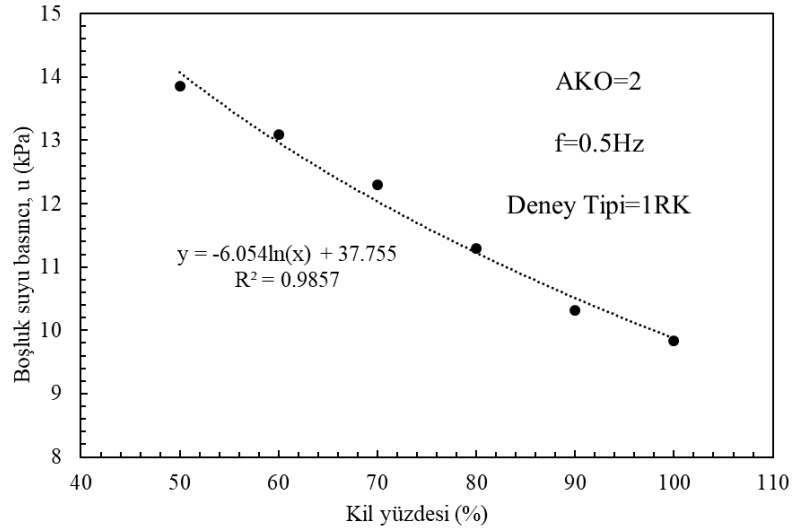


Şekil 7.24.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $G_{max}$  değişimi

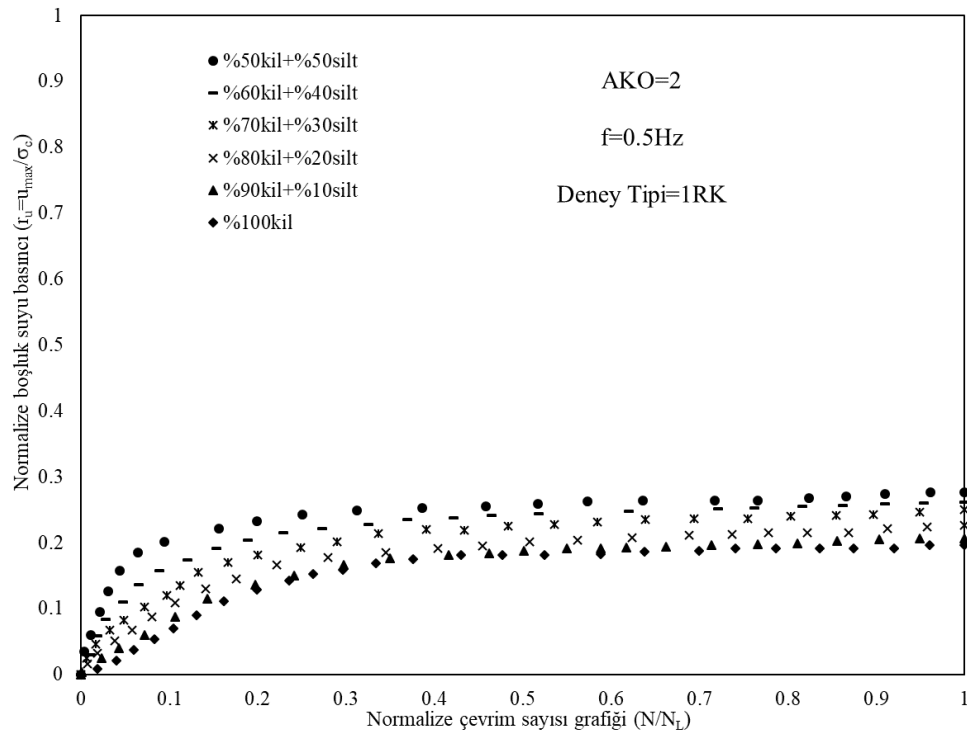


Şekil 7.25.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların D değişimi

Burulmalı kesme deneyi sonucunda elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.26). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk suyu basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.27). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 7.26.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların u değişimi

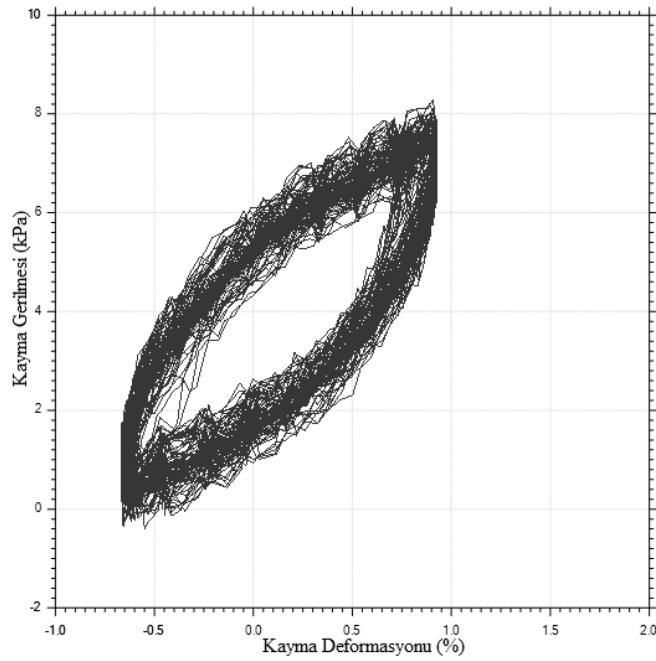


Şekil 7.27.:1RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $r_u$  değişimi

### 7.2.3. 1 çevrimli rezonant kolon ve 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyi

Bu çalışmada kullanılan karışımlar 50kPa enerjide ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmış ve bu sayede ön konsolidasyon basınçları 50kPa olmuştur. Daha sonra bu numuneler doyurma işlemine tabi tutulduktan sonra sırasıyla 50kPa ve 25kPa basınç altında konsolide edilerek normal ve aşırı konsolide hale getirilmiştir. Konsolidasyon

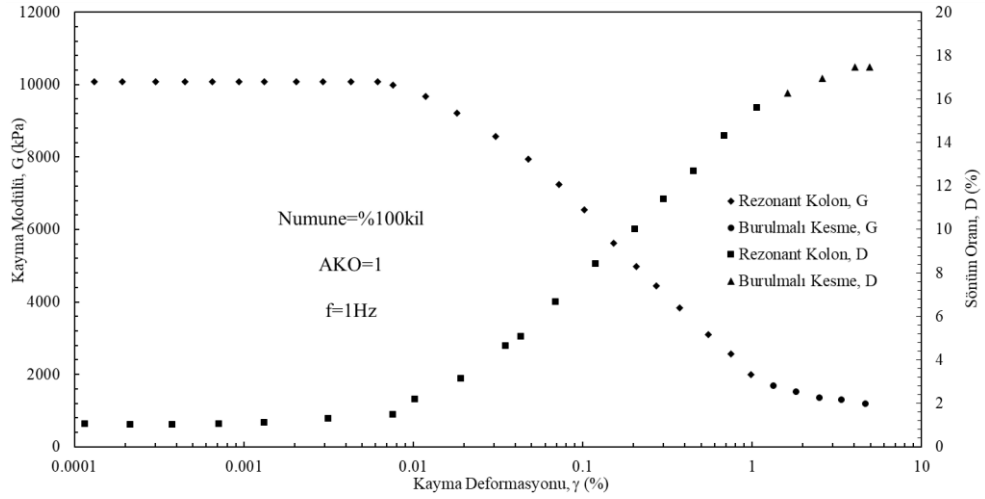
aşamasından sonra 1 kere rezonant kolon deneyi uygulanan numuneler sonrasında 1Hz frekansta  $\pm 2.5$  şekil değiştirme seviyesine kadar drenajsız koşullarda burulmalı kesme deneyine tabi tutularak numunelerin kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile boşluk suyu basınçları tespit edilmiştir. Burulmalı kesme deneyinde, aşırı ve normal konsolide zeminlerde tüm numuneler 25 çevrimde ve yaklaşık 8kPa kayma gerilmesinde  $\pm 2.5-3.0$  kayma deformasyonunda gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.28’de 24. çevrime ait histerisis ilmiği verilmiştir.



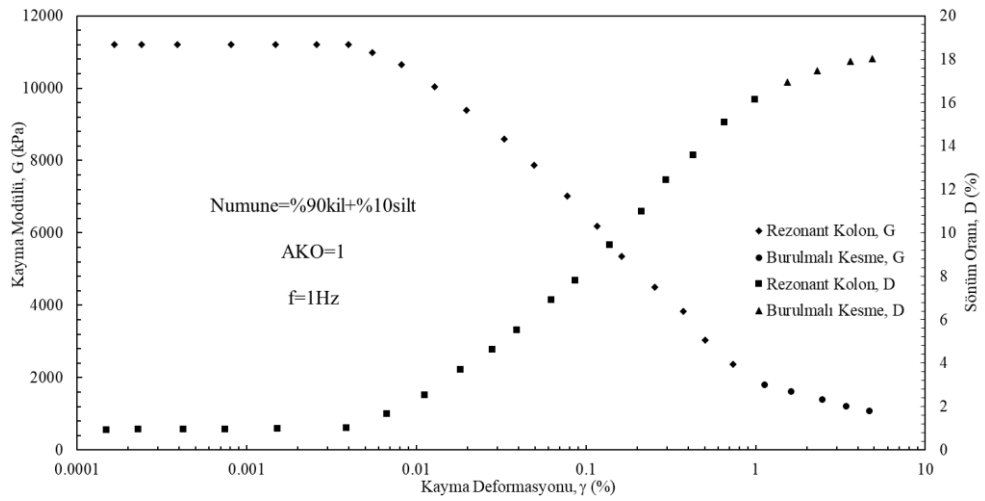
Şekil 7.28.:1RK ve 1Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi

### **7.2.3.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar**

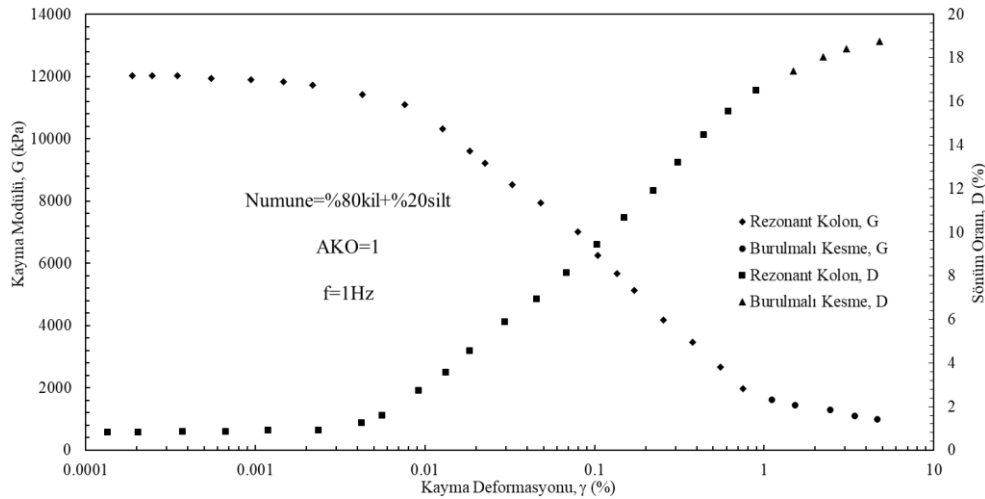
Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiş (Şekil 7.29-7.34) daha sonra bu karışımların maksimum dinamik kayma modülü ve maksimum sönüm oranları Çizelge 7.7’de sunulmuştur.



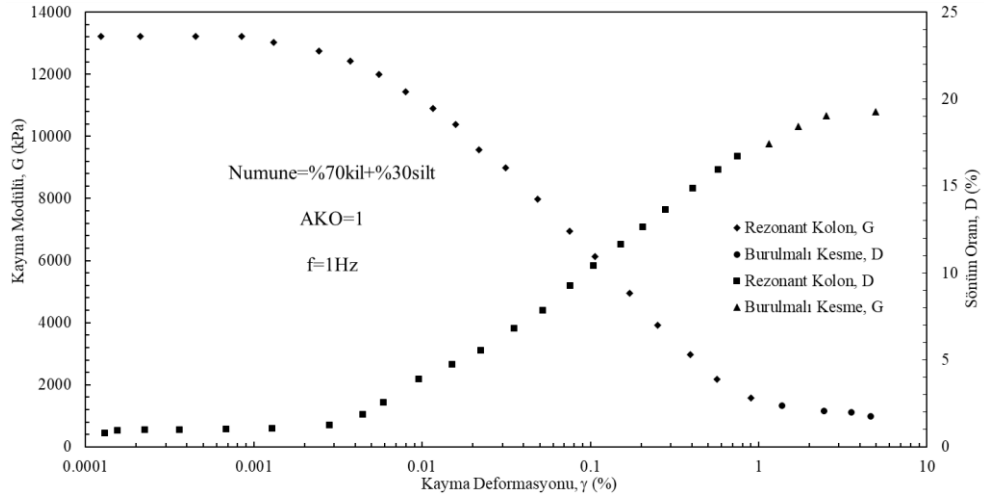
Şekil 7.29.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si



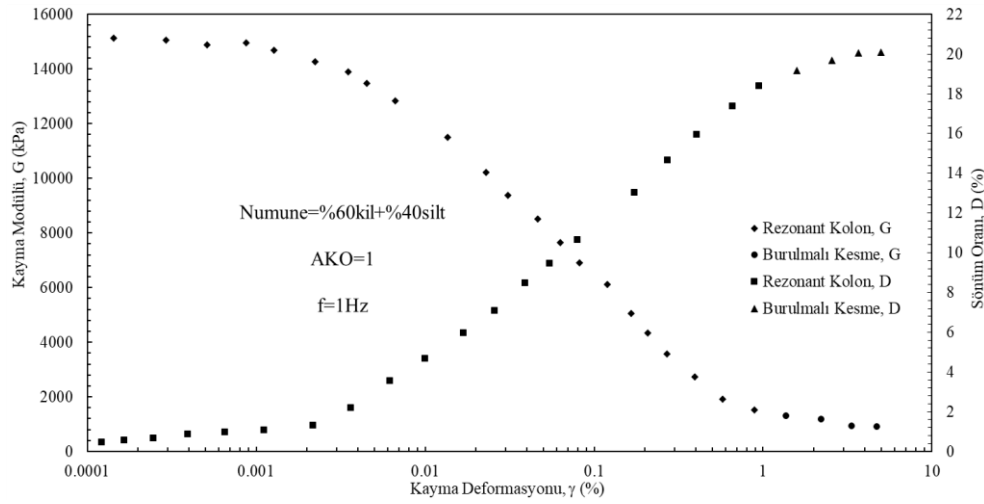
Şekil 7.30.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



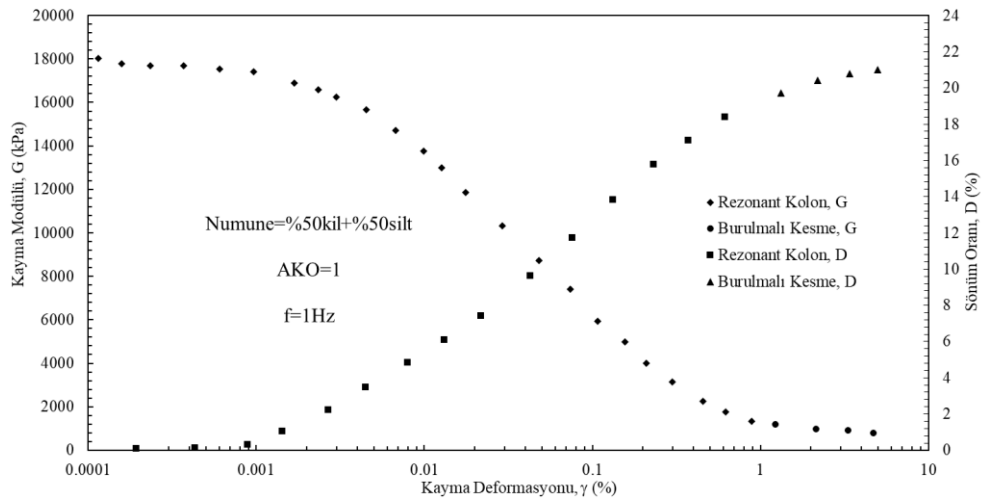
Şekil 7.31.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.32.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.33.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

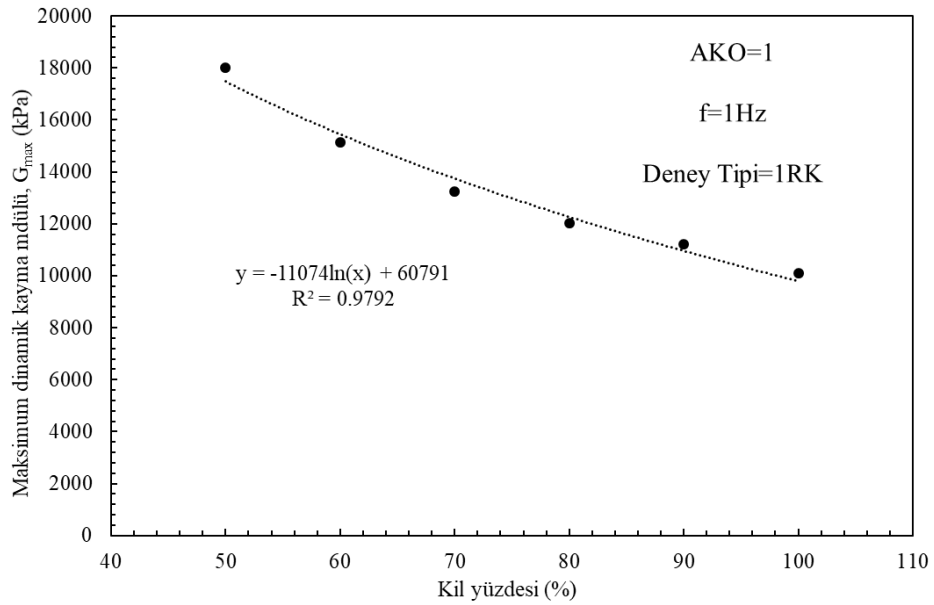


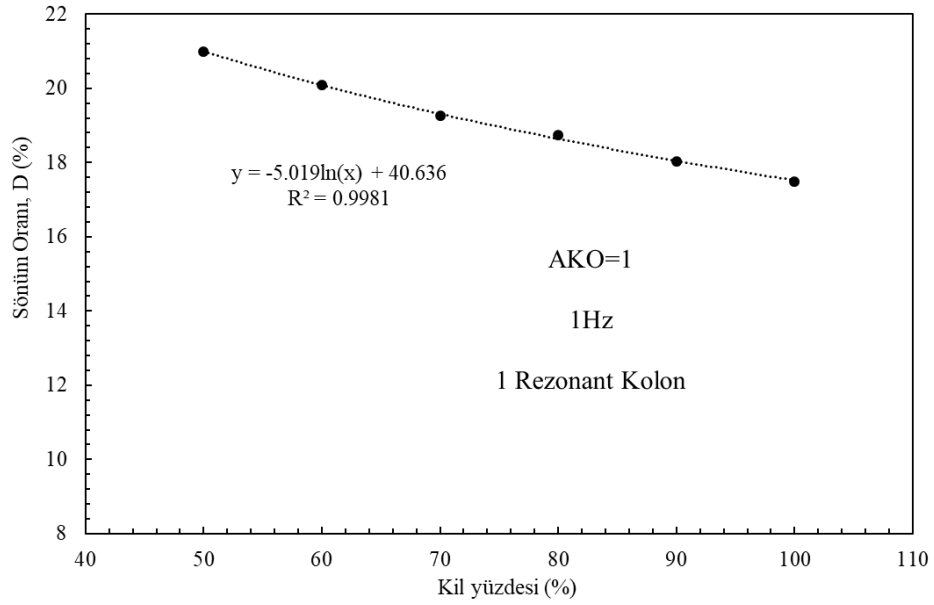
Şekil 7.34.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

**Çizelge 7.7.:**1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si

Karışım	Maksimum Dinamik Kayma Modülü, $G_{max}$ (kPa)	Sönüm Oranı, D (%)
% 100kil	10081.25	17.48
% 90kil+% 10silt	11210.98	18.04
% 80kil+% 20silt	12015.40	18.75
% 70kil+% 30silt	13228.98	19.26
% 60kil+% 40silt	15124.88	20.09
% 50kil+% 50silt	18013.01	20.99

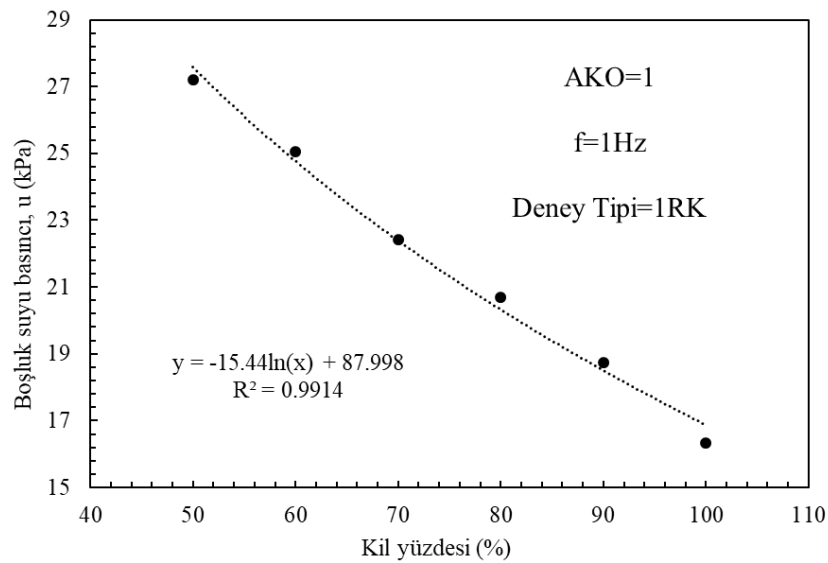
Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlardaki silt oranının azalmasıyla maksimum kayma modülünde azalış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7.35). Sönüm oranlarında ise benzer şekilde numune içerisinde silt oranı azaldıkça daha küçük sönüm oranları elde edilmiştir (Şekil 7.36).

**Şekil 7.35.:**1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $G_{max}$  değişimi

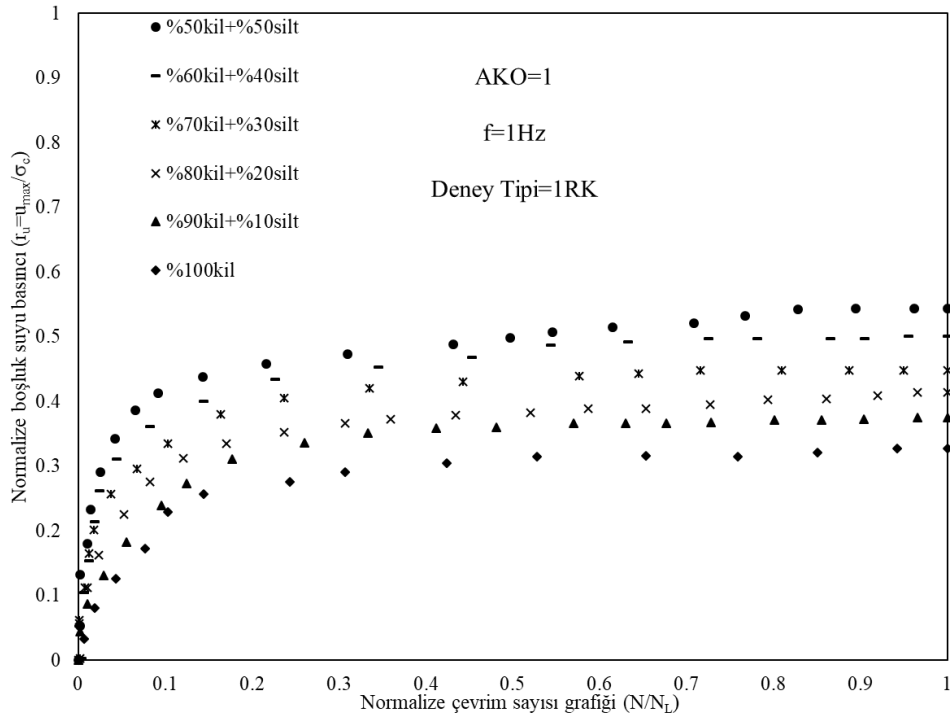


Şekil 7.36.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların D değişimi

Burulmalı kesme deneyi sonucunda, elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.37). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk suyu basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.38). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



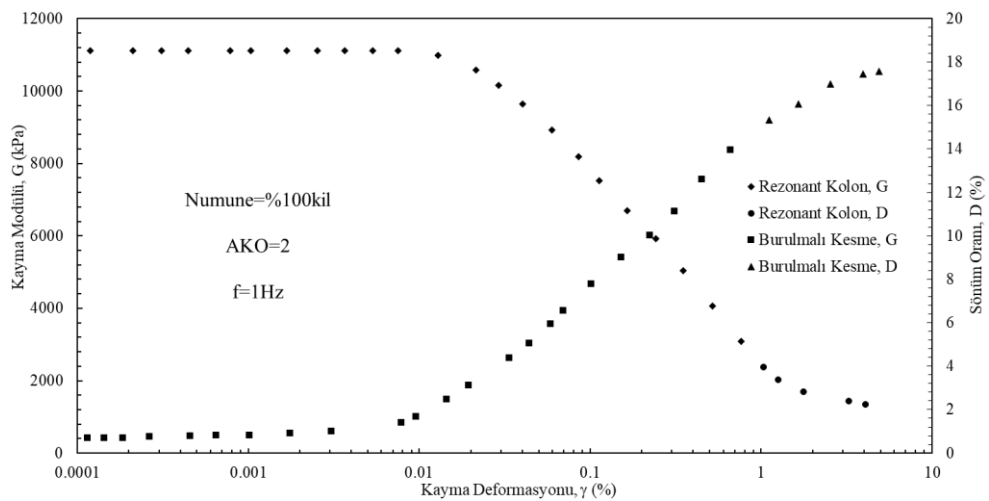
Şekil 7.37.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların u değişimi



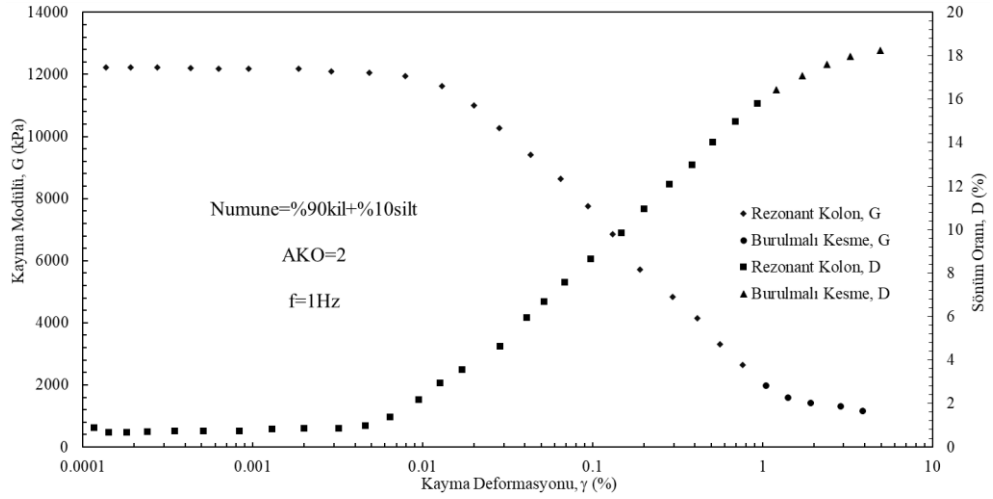
Şekil 7.38.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $r_u$  değişimi

### 7.2.3.2. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar

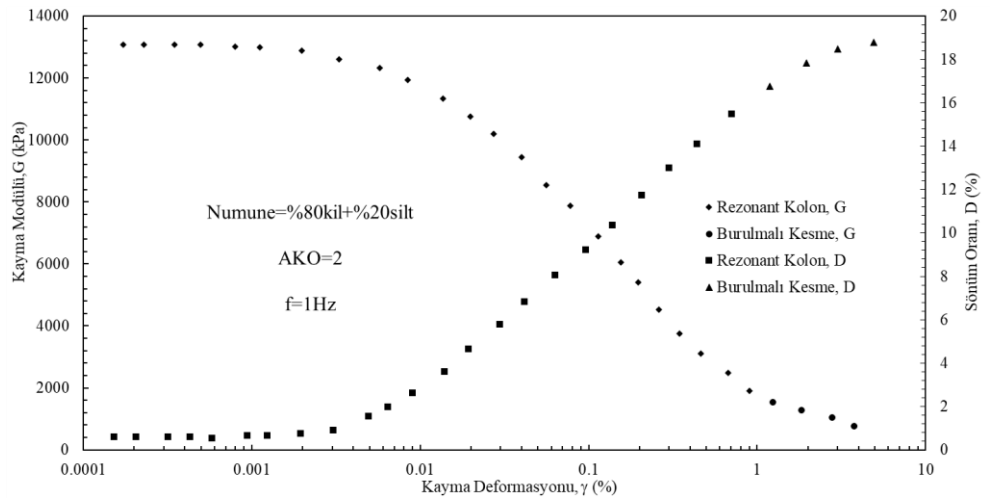
Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiş (Şekil 7.39-7.44) daha sonra bu karışımların maksimum dinamik kayma modülü ve maksimum sönüm oranları Çizelge 7.8’de gösterilmiştir.



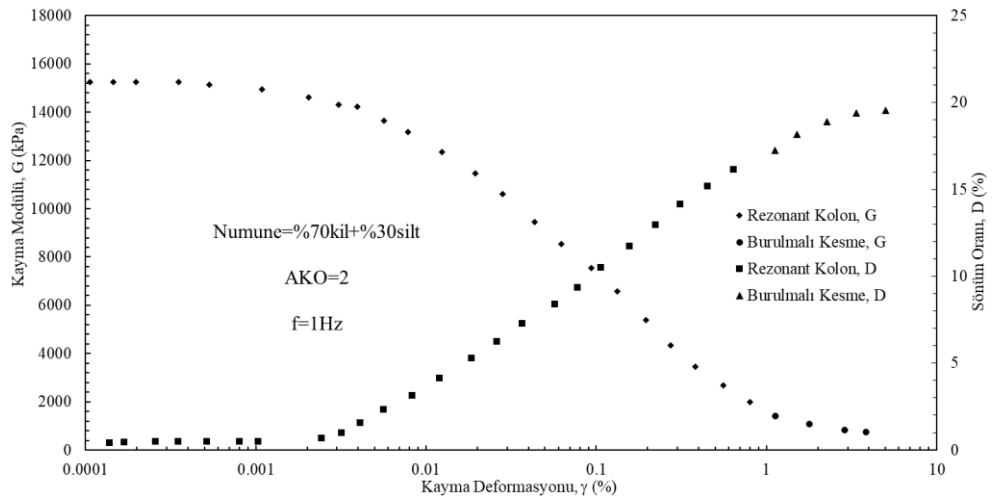
Şekil 7.39.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D’si



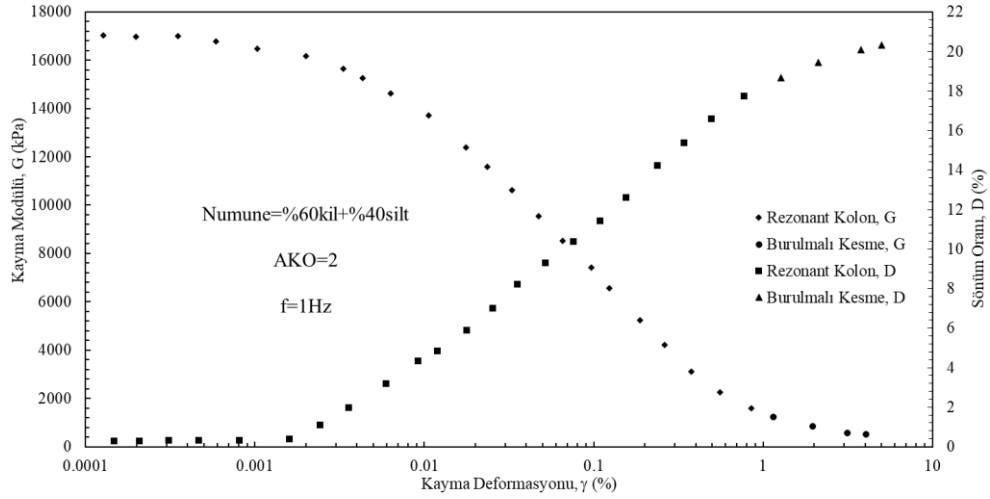
Şekil 7.40.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



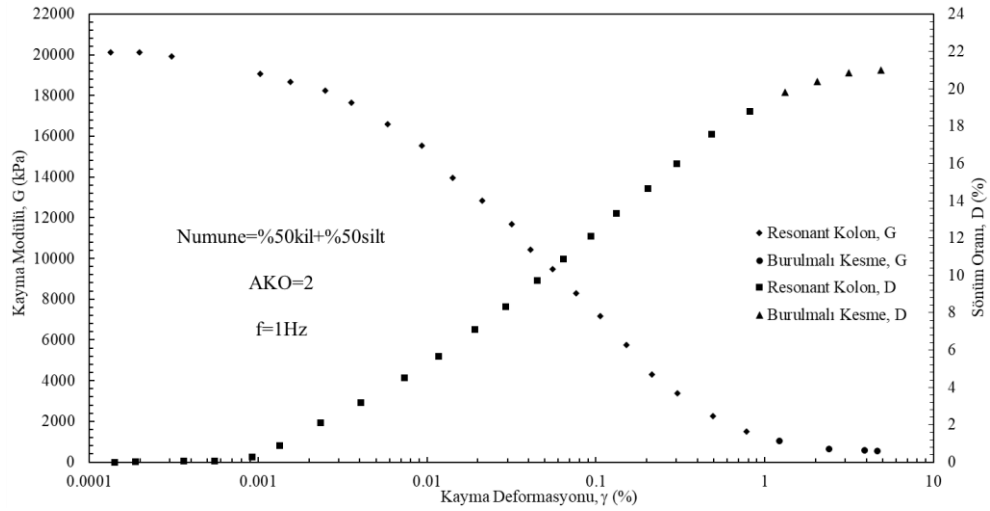
Şekil 7.41.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.42.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.43.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

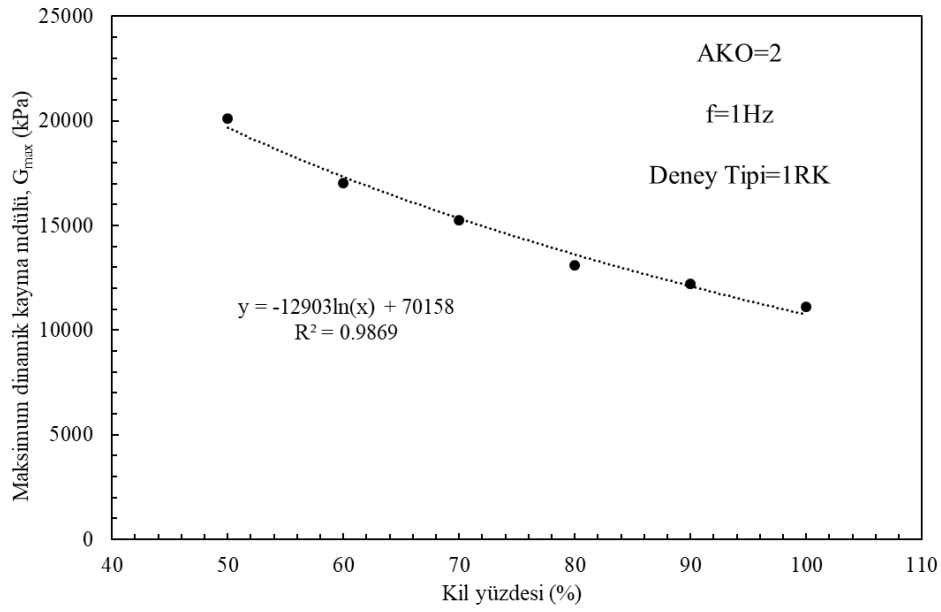


Şekil 7.44.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

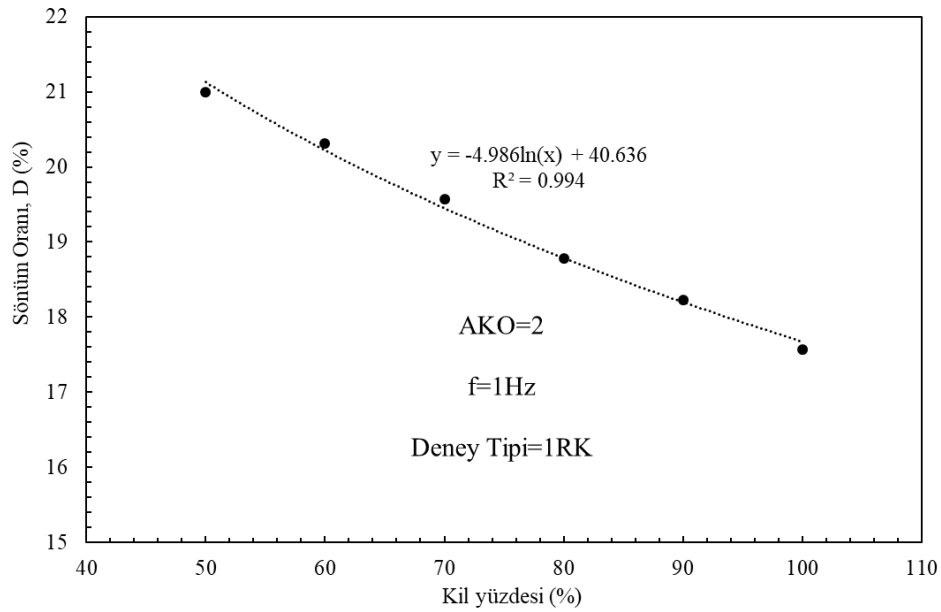
Çizelge 7.8.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si

Karışım	Maksimum Dinamik Kayma Modülü, $G_{max}$ (kPa)	Sönüm Oranı, D (%)
% 100kil	11121.47	17.57
% 90kil+% 10silt	12222.48	18.23
% 80kil+% 20silt	13080.78	18.78
% 70kil+% 30silt	15251.41	19.57
% 60kil+% 40silt	17015.99	20.31
% 50kil+% 50silt	20111.99	21.00

Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlardaki silt oranının azalmasıyla maksimum kayma modülünde azalış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7.45). Sönüm oranlarında ise benzer şekilde numune içerisinde silt oranı azaldıkça daha küçük sönüm oranları elde edilmiştir (Şekil 7.46).

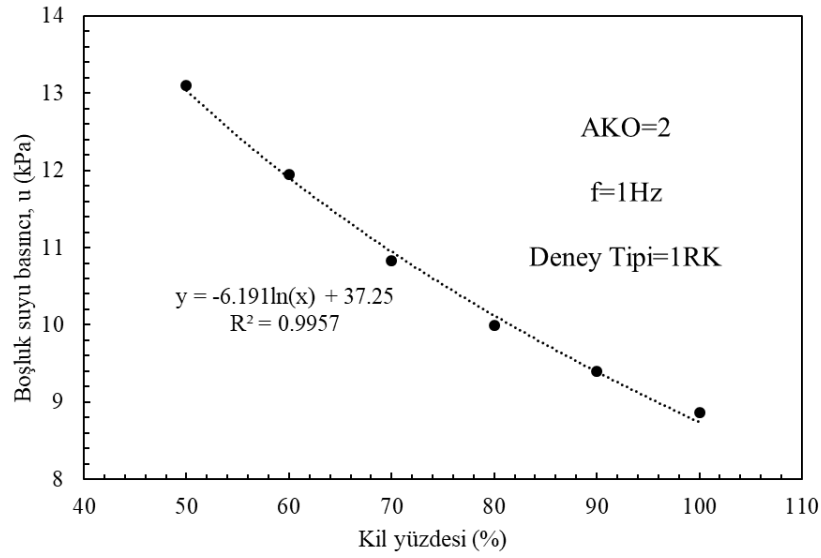


Şekil 7.45.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $G_{max}$  değişimi

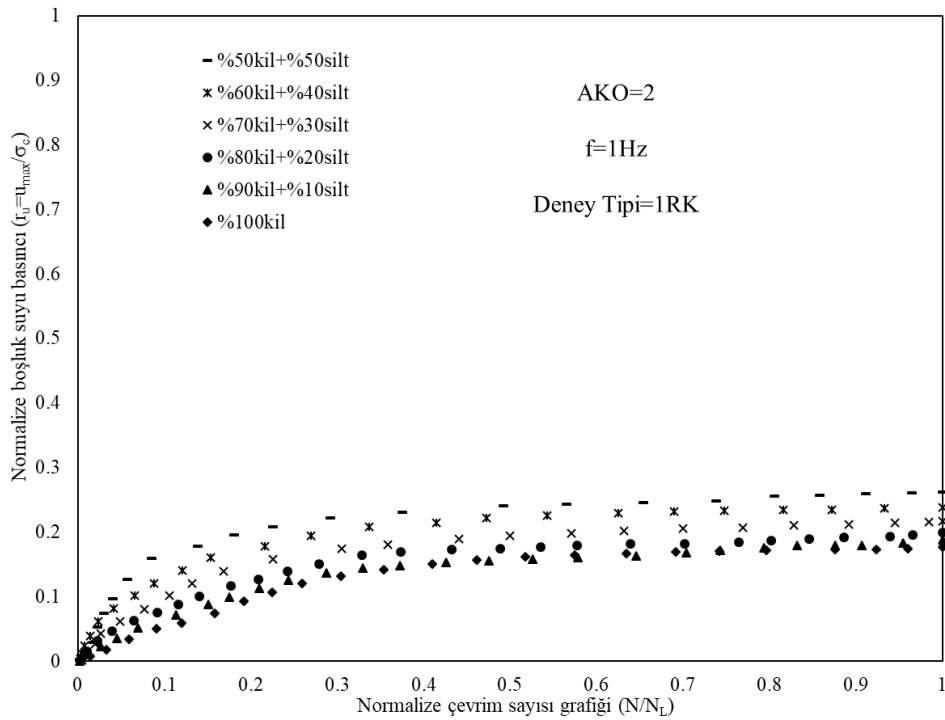


Şekil 7.46.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $G_{max}$  değişimi

Burulmalı kesme deneyi sonucunda elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.47). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk suyu basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.48). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



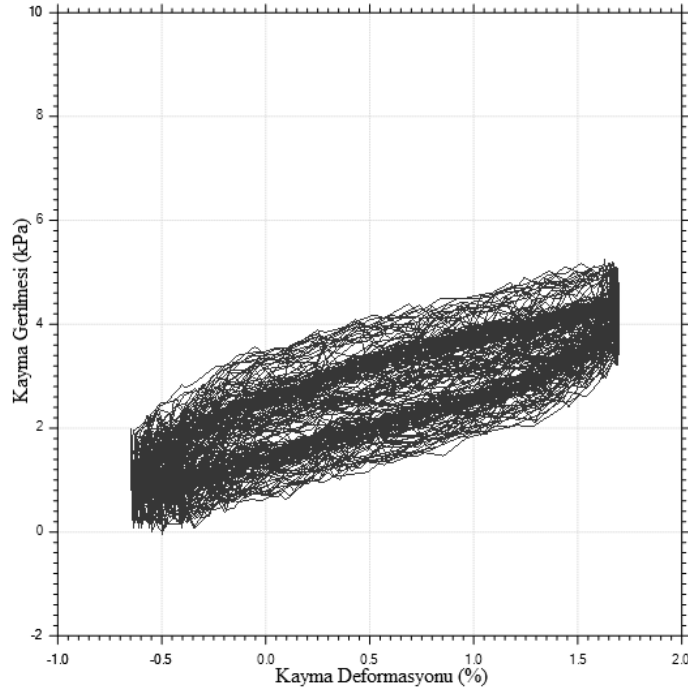
Şekil 7.47.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $u$  değişimi



Şekil 7.48.:1RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $r_u$  değişimi

### 7.2.4. 3 çevrimli rezonant kolon ve 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyi

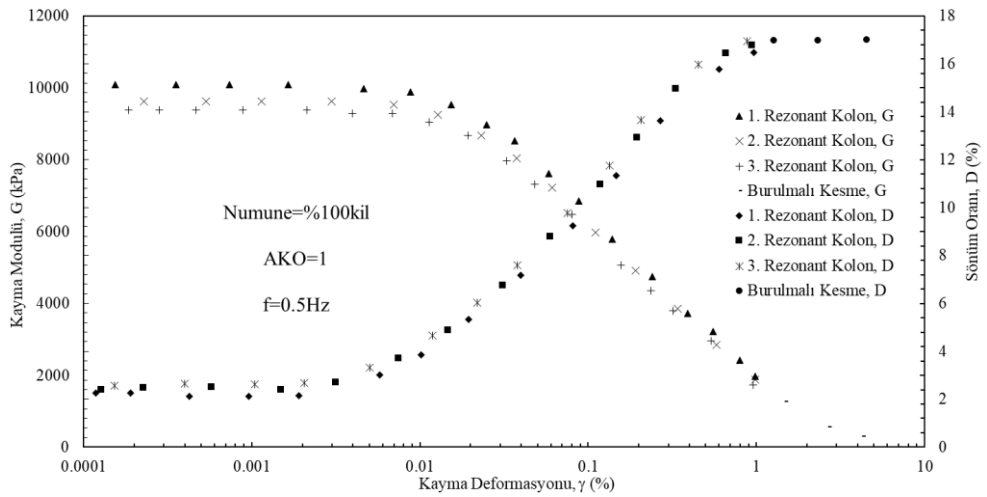
Bu çalışmada kullanılan karışımlar doyum ve konsolidasyon sonunda %1 kayma deformasyonuna ulaşıncaya kadar drejanlı koşullarda rezonant kolon deneyine tabi tutulmuştur ve rezonant kolon deneyinde drenaja izin verilmiştir. Oluşabilecek boşluk suyu basınçlarının dağılımı ve deformasyonlar sonucunda ortaya çıkabilecek ekstra basınçların sönümlenmesi için tekrar konsolidasyon deneyine tabi tutulmuş ve bir kez daha aynı numunelere Rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. En son tekrar konsolidasyon deneyi uygulanan karışımlarda bir kez daha Rezonant kolon deneyi uygulandıktan sonra numuneler  $\pm 2.5$  birim kayma deformasyonu değerine ulaşıncaya kadar drenajsız koşullarda ve 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Bu sayede dinamik koşullar altında yüklenen zeminlerde yenilme gerçekleşmediği durumlarda tekrar bir dinamik yük olması durumunda kayma modülü, sönüm oranı değişimleri incelenmiştir. Ayrıca bu duruma maruz kalan zeminlerin drenajsız ve tekrarlı gerilmelerde boşluk suyu basıncı oluşumları da araştırılmıştır. Burulmalı kesme deneyinde hem aşırı hem de normal konsolide zeminlerde tüm numuneler 23 çevrimde ve yaklaşık 5kPa kayma gerilmesinde  $\pm 2.5$  kayma deformasyonu gerçekleştirmişlerdir. Şekil 7.49'da 22. çevrime ait histerisis ilmiği verilmiştir.



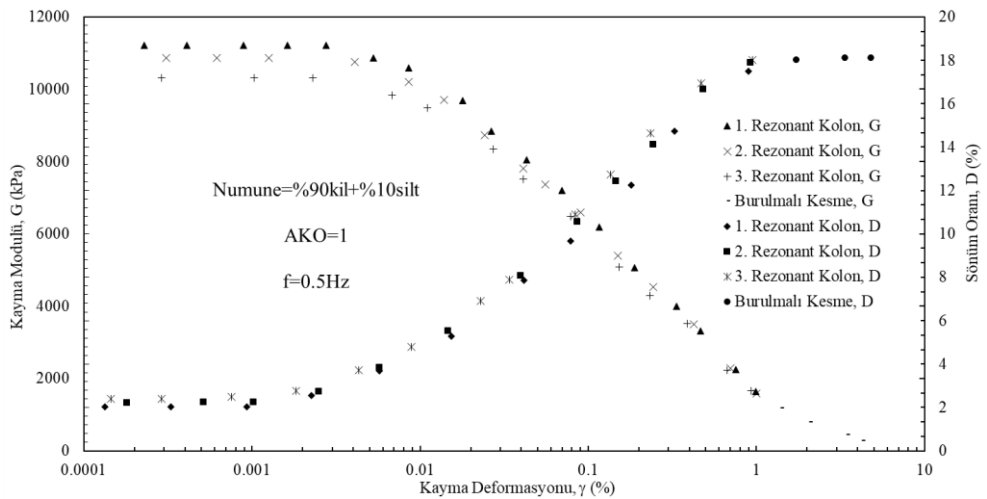
Şekil 7.49.:3RK ve 0.5Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi

### 7.2.4.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar

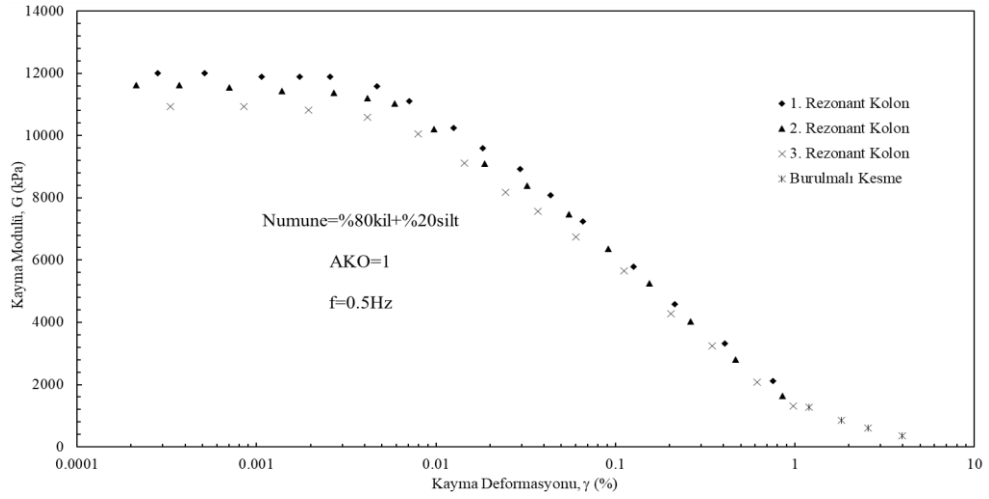
Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiştir (Şekil 7.50-7.55). Bu karışımların tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda oluşan maksimum dinamik kayma modülü ve maksimum sönüm oranları Çizelge 7.9’da sunulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda her bir rezonant kolon deneyinden sonra ölçülen en büyük dinamik kayma modülünde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma karışım içindeki silt oranı azaldıkça azalış göstermiştir. Buna karşın sönüm oranı eğrisi ise her bir rezonant kolon deneyi sonrasında daha yüksek bir duruma gelmiştir. Bu yükseliş silt oranı azaldıkça daha az belirgin hale gelmektedir.



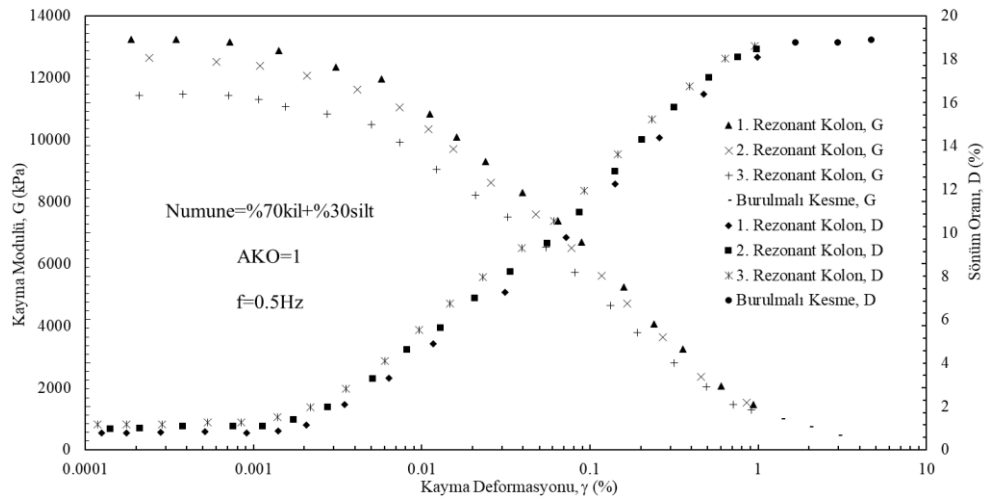
Şekil 7.50.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si



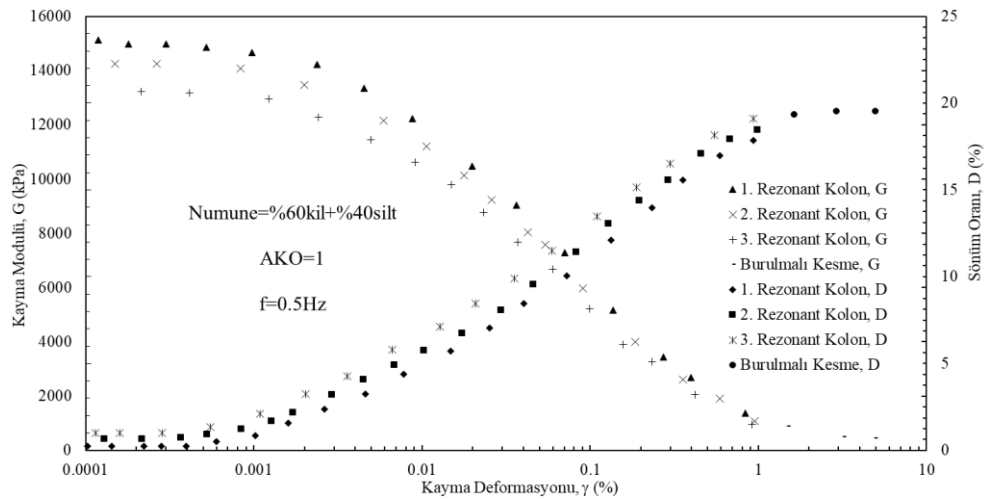
Şekil 7.51.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



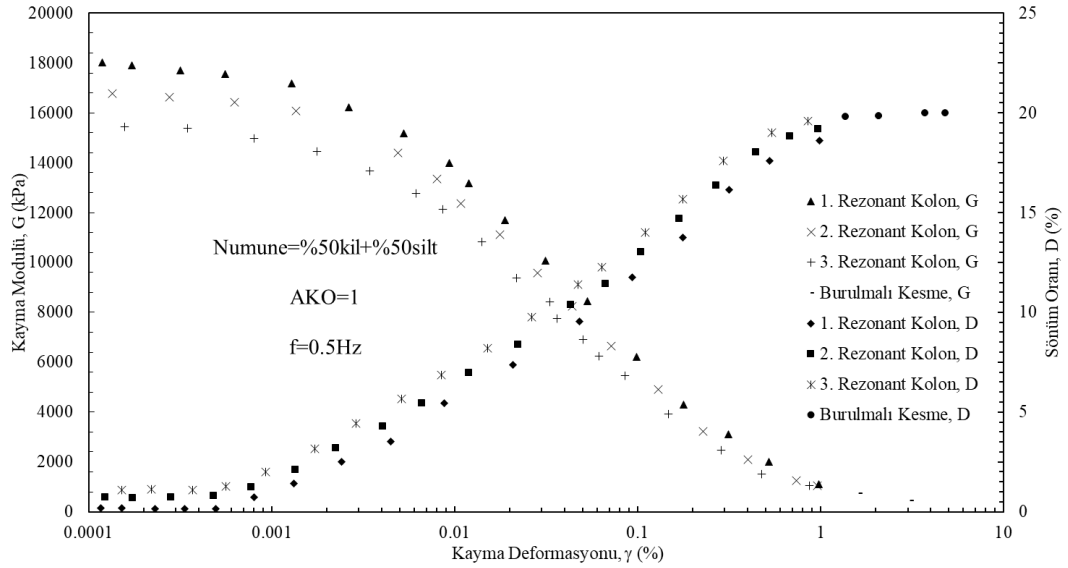
Şekil 7.52.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.53.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.54.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

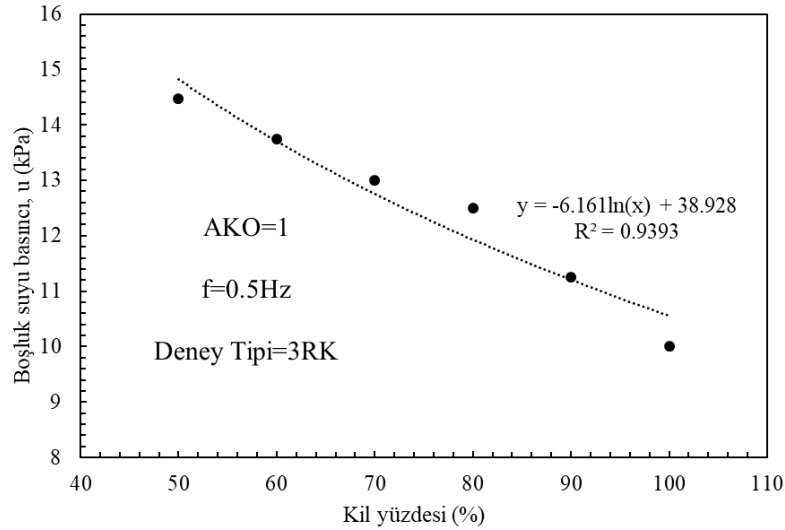


Şekil 7.55.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

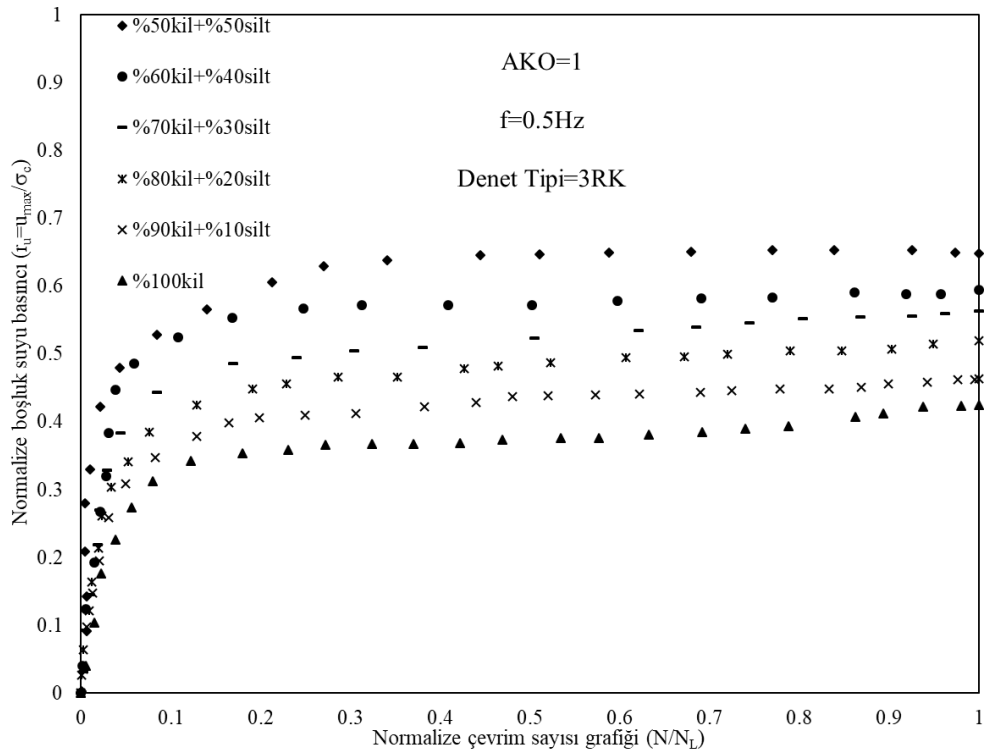
Çizelge 7.9.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si

Karışım	1. $G_{max}$ (kPa)	2. $G_{max}$ (kPa)	3. $G_{max}$ (kPa)	Sönüm Oranı, D (%)
% 100kil	10081.17	9631.02	9376.20	17.00
% 90kil+% 10silt	11211.99	10864.98	10315.24	18.12
% 80kil+% 20silt	12012.15	11612.56	10931.45	18.25
% 70kil+% 30silt	13231.05	12633.62	11424.42	18.90
% 60kil+% 40silt	15125.46	14252.94	13228.03	19.54
% 50kil+% 50silt	18012.30	16779.40	15439.87	19.99

Burulmalı kesme deneyi sonucunda, elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.56). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk suyu basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.57). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 7.56.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $u$  değişimi

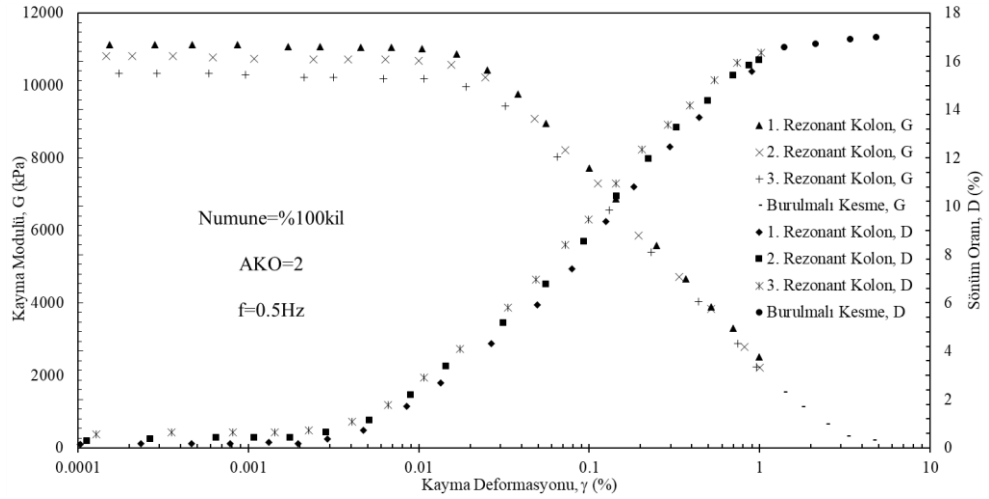


Şekil 7.57.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $r_u$  değişimi

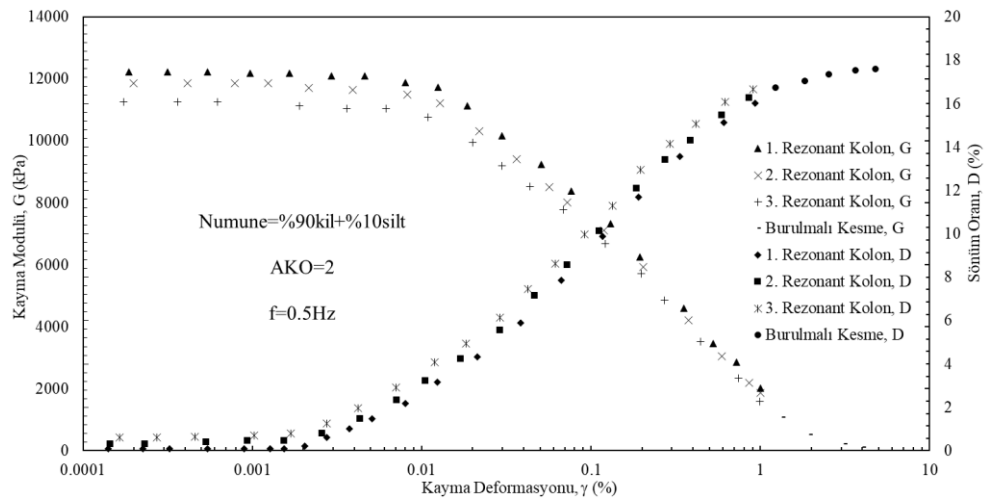
#### **7.2.4.2. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar**

Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiştir (Şekil 7.58-63). Bu karışımların tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda oluşan maksimum dinamik kayma modülü ve

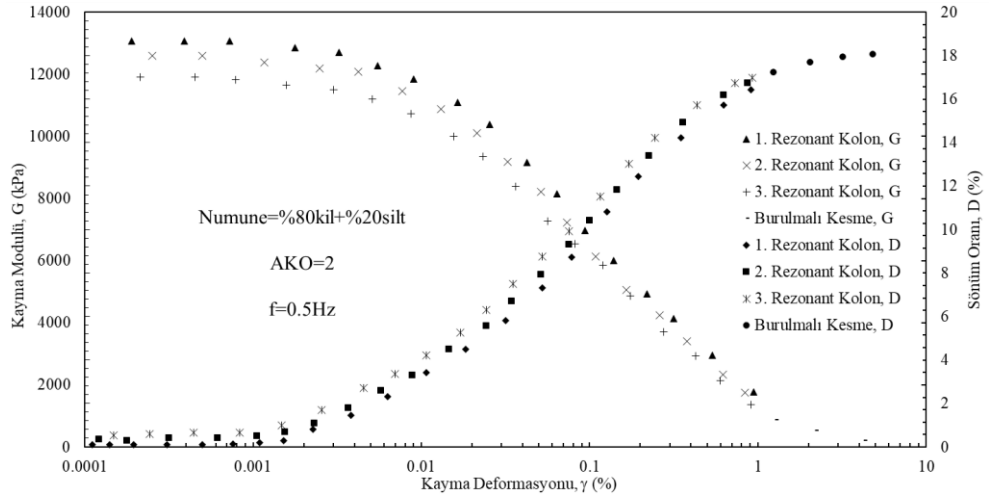
maksimum sönüm oranları Çizelge 7.10’da verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda her bir rezonant kolon deneyinden sonra ölçülen en büyük dinamik kayma modülünde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma karışım içindeki silt oranı azaldıkça, azalış göstermiştir. Buna karşın sönüm oranı eğrisi ise her bir rezonant kolon deneyi sonrasında daha yüksek bir duruma gelmiştir. Bu yükseliş silt oranı arttıkça daha az belirgin hale gelmektedir.



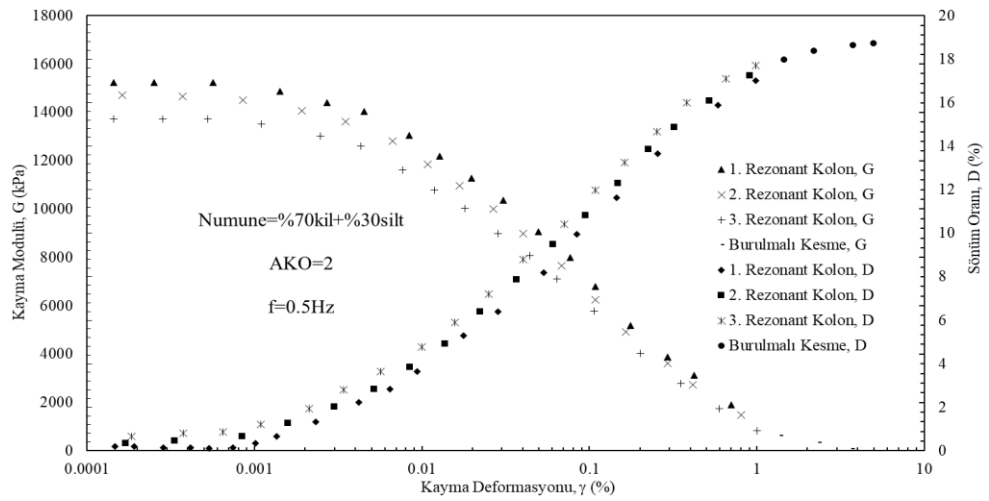
Şekil 7.58.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si



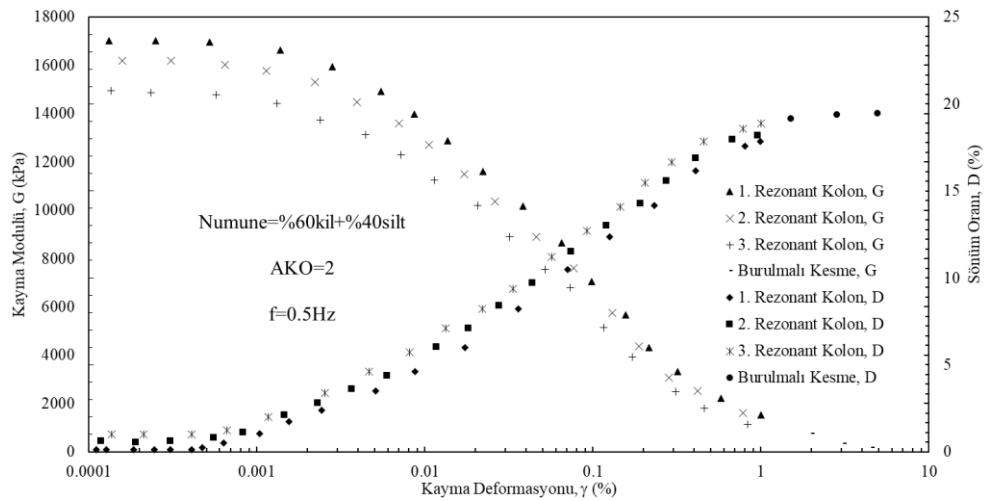
Şekil 7.59.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



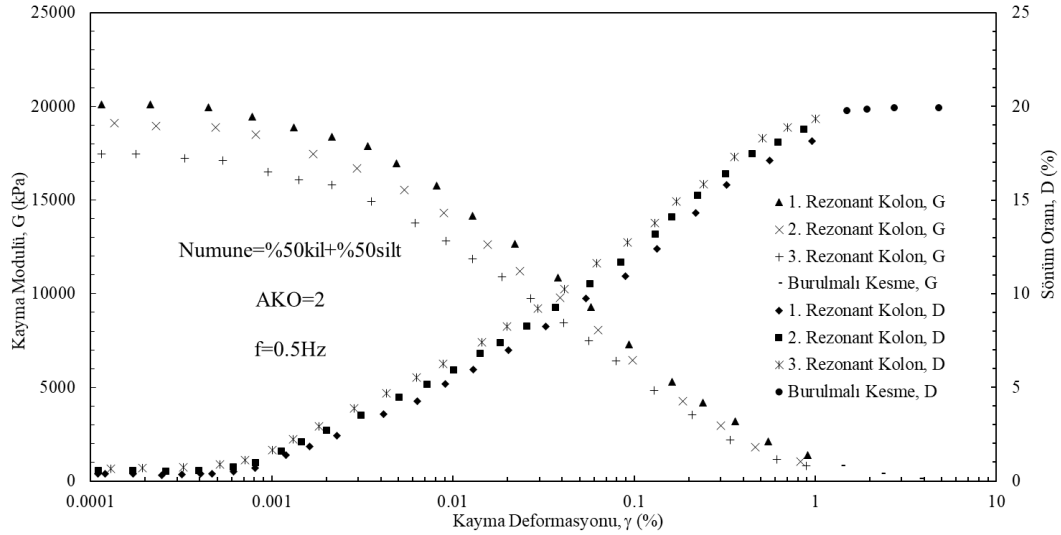
Şekil 7.60.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.61.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.62.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

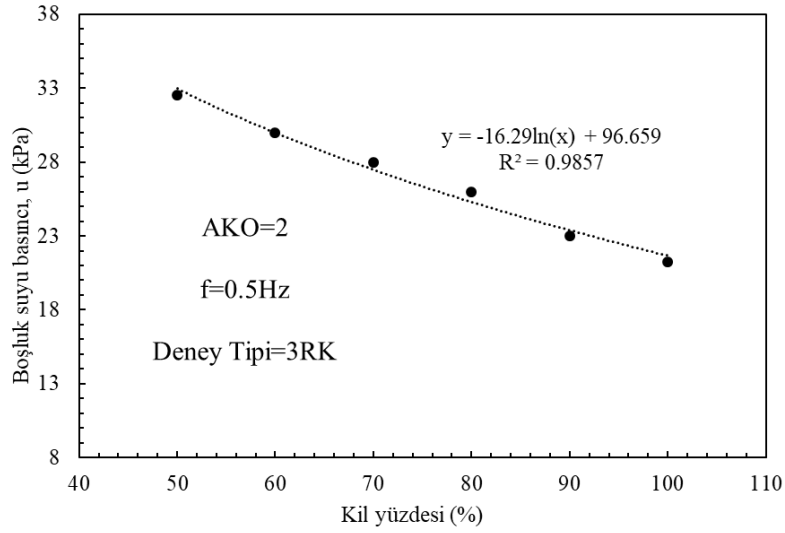


Şekil 7.63.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

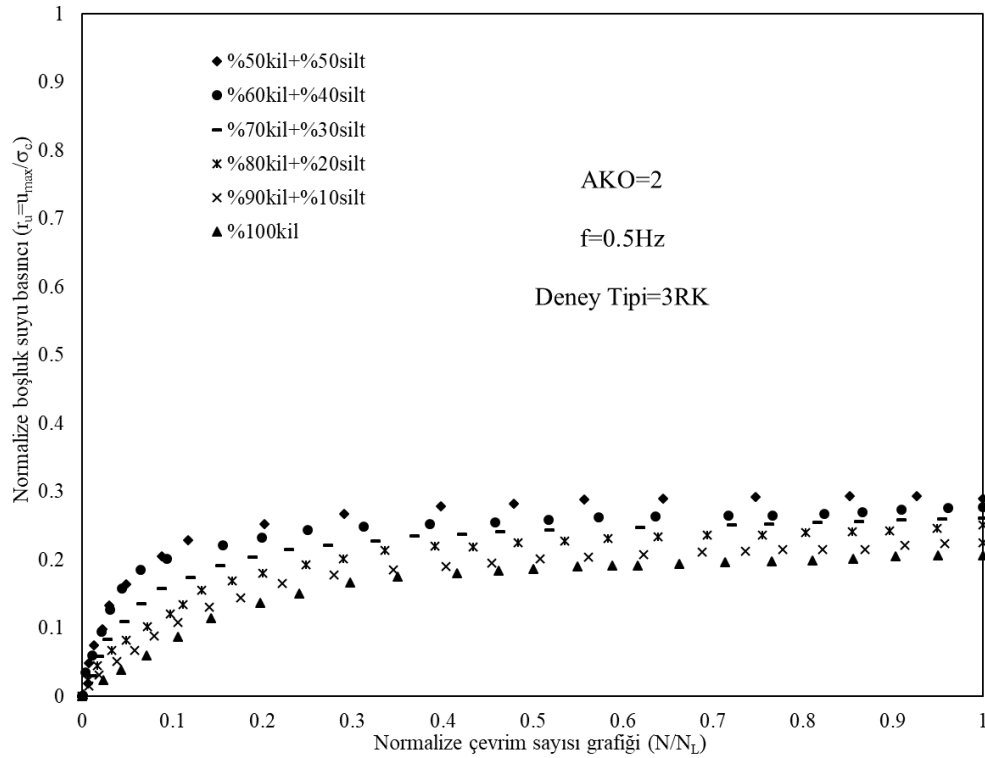
Çizelge 7.10.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si

Karışım	1. $G_{max}$ (kPa)	2. $G_{max}$ (kPa)	3. $G_{max}$ (kPa)	Sönüm Oranı, D (%)
%100kil	11120.13	10820.80	10341.72	16.99
%90kil+%10silt	12224.54	11846.48	11246.32	17.58
%80kil+%20silt	13080.22	12603.00	11902.99	18.05
%70kil+%30silt	15245.65	14706.93	13712.83	18.73
%60kil+%40silt	17028.55	16188.10	14941.74	19.45
%50kil+%50silt	20121.42	19121.55	17474.80	19.92

Burulmalı kesme deneyi sonucunda, elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.64). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk suyu basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.65). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 7.64.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların u değişimi

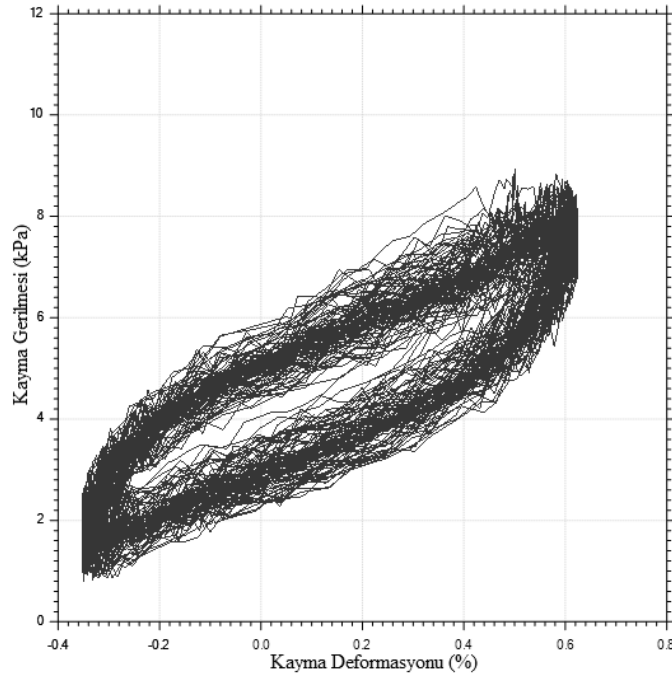


Şekil 7.65.:3RK ve 0.5Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $r_u$  değişimi

### 7.2.5. 3 çevrimli rezonant kolon ve 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyi

Bu çalışmada kullanılan karışımlar doyum ve konsolidasyon sonunda %1 kayma deformasyonu değerine kadar, drejanlı koşullarda rezonant kolon deneyine tabi tutulmuştur. Rezonant kolon deneyinde drenaja izin verilmiş ve oluşabilecek boşluk suyu basınçlarının dağılımı ve deformasyonlar sonucunda ortaya çıkabilecek ekstra basınçların

sönümlenmesi için tekrar konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Ardından bir kez daha aynı numunelere rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. En son tekrar konsolidasyon deneyi uygulanan karışımlarda bir kez daha rezonant kolon deneyi uygulandıktan sonra numuneler  $\pm 2.5$  birim kayma deformasyonu değerine ulaşmaya kadar drenajsız koşullarda ve 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Bu sayede dinamik koşullar altında yüklenen zeminlerde yenilme gerçekleşmediği durumlarda tekrar bir dinamik yük olması durumunda kayma modülü, sönüm oranı değişimleri incelenmiştir. Ayrıca bu duruma maruz kalan zeminlerin drenajsız ve tekrarlı gerilmelerde boşluk suyu basıncı oluşumları da araştırılmıştır. Burulmalı kesme deneyinde hem aşırı hem de normal konsolide zeminlerde tüm numuneler 25 çevrimde ve yaklaşık 7kPa kayma gerilmesinde  $\pm 2.5$  kayma deformasyonu gerçekleştirmişlerdir. Şekil 7.66'da 24. çevrime ait histerisis ilmiği verilmiştir.

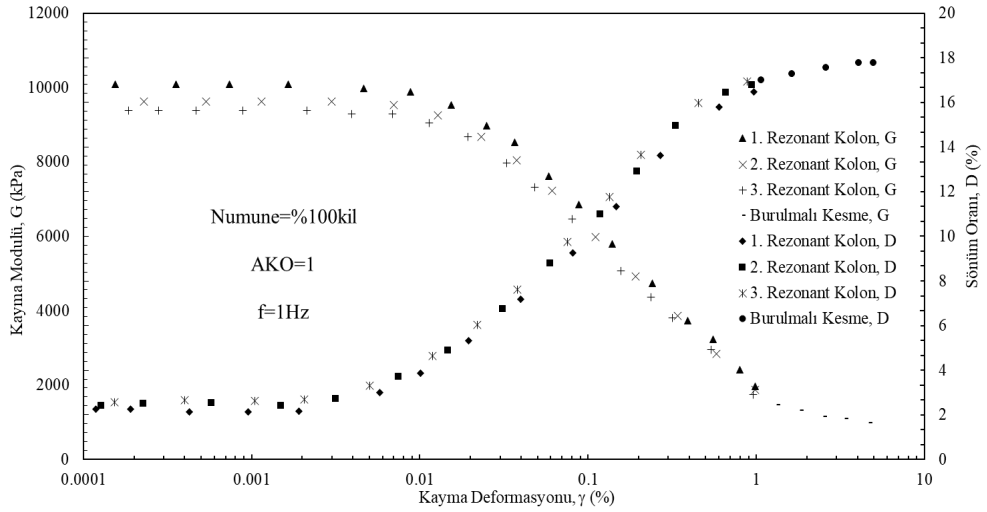


Şekil 7.66.:3RK ve 0.5Hz BK deneyi yapılan numunelerde kayma gerilmesi

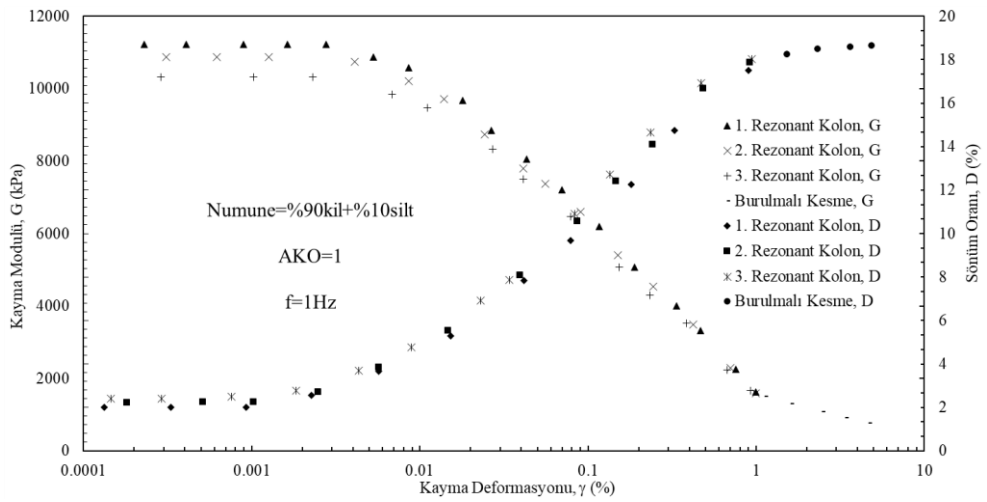
#### **7.2.5.1. Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan karışımlar**

Aşırı konsolidasyon oranı 1 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiştir (Şekil 7.67-7.72). Bu karışımların tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda oluşan maksimum dinamik kayma modülü ve

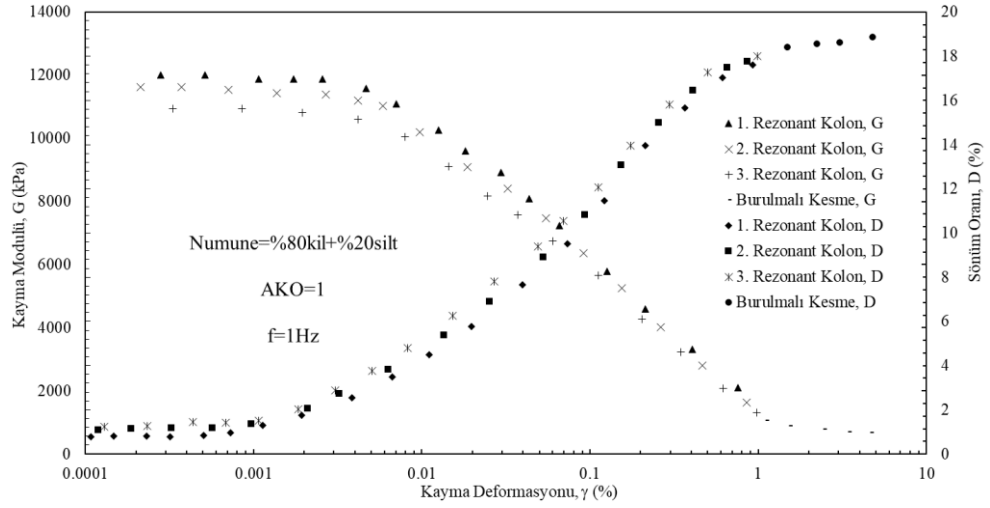
maksimum sönüm oranları Çizelge 7.11’de verilmiştir. Sonuçta, bir rezonant kolon deneyinden sonra ölçülen en büyük dinamik kayma modülünde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma karışım içindeki silt oranı azaldıkça, azalış göstermiştir. Buna karşın sönüm oranı eğrisi ise her bir rezonant kolon deneyi sonrasında daha yüksek bir duruma gelmiştir. Bu yükseliş silt oranı azaldıkça daha az belirgin olarak gözükmetedir.



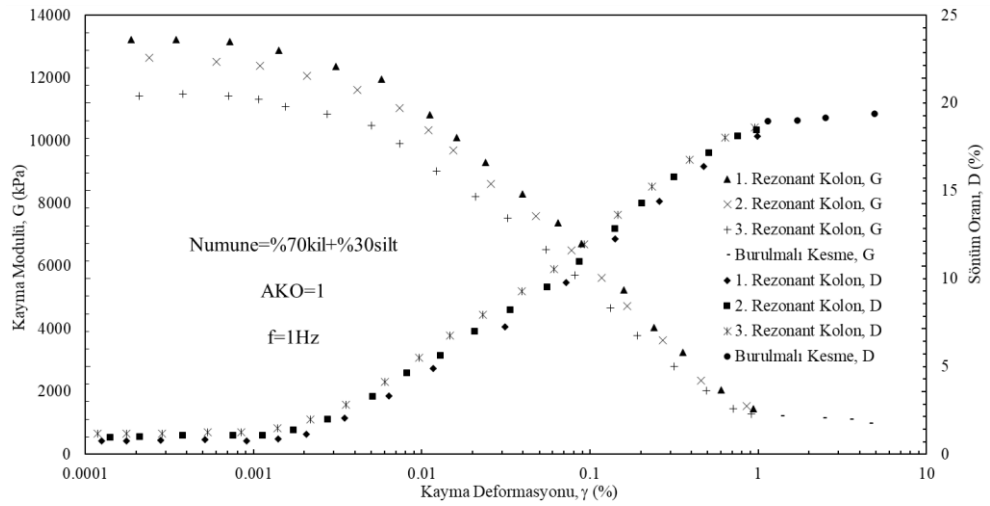
Şekil 7.67.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %100kilin G ve D'si



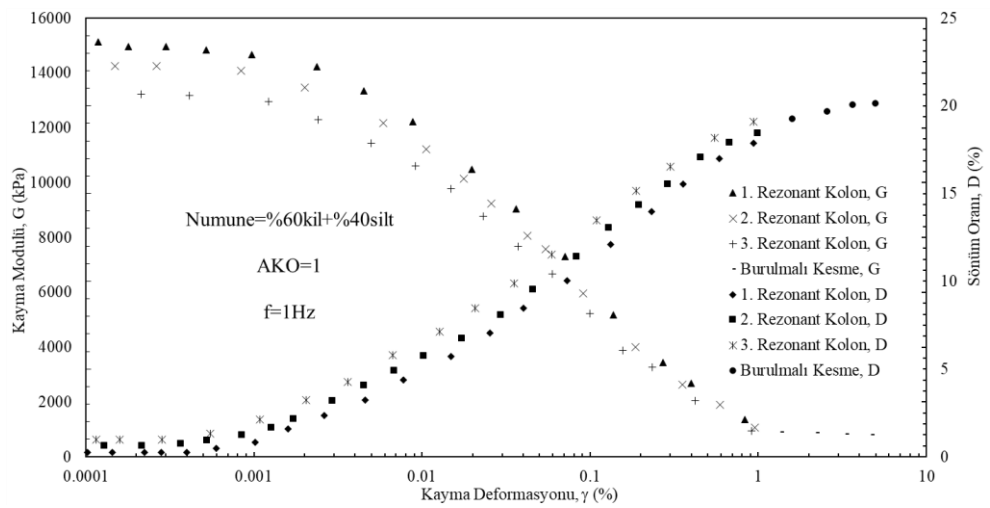
Şekil 7.68.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



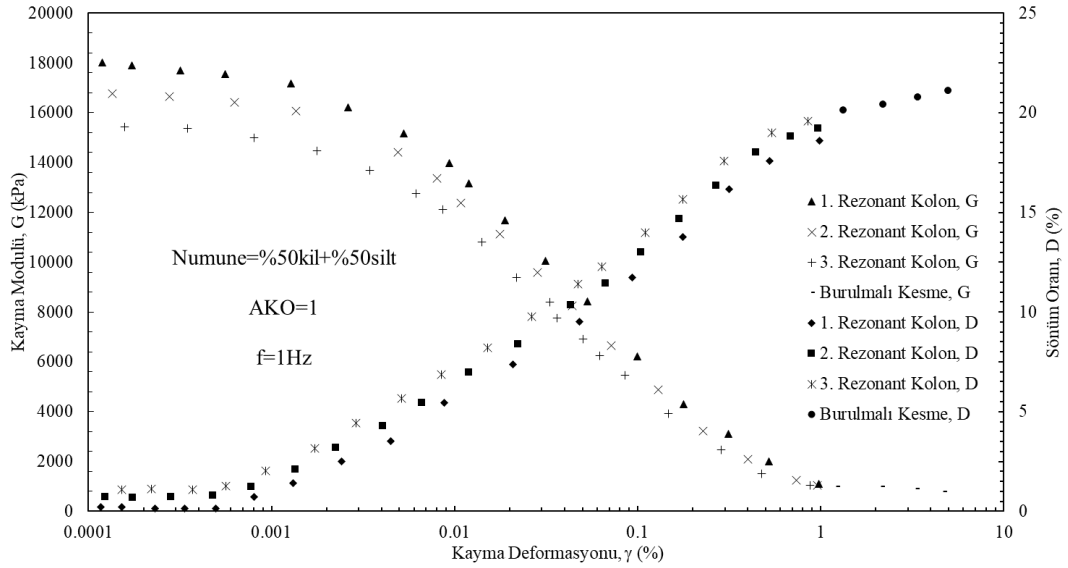
Şekil 7.69.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.70.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.71.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

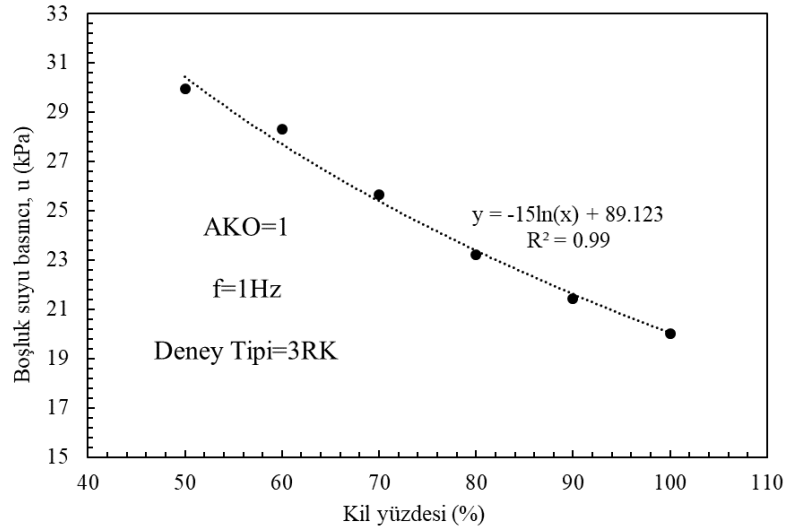


Şekil 7.72.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

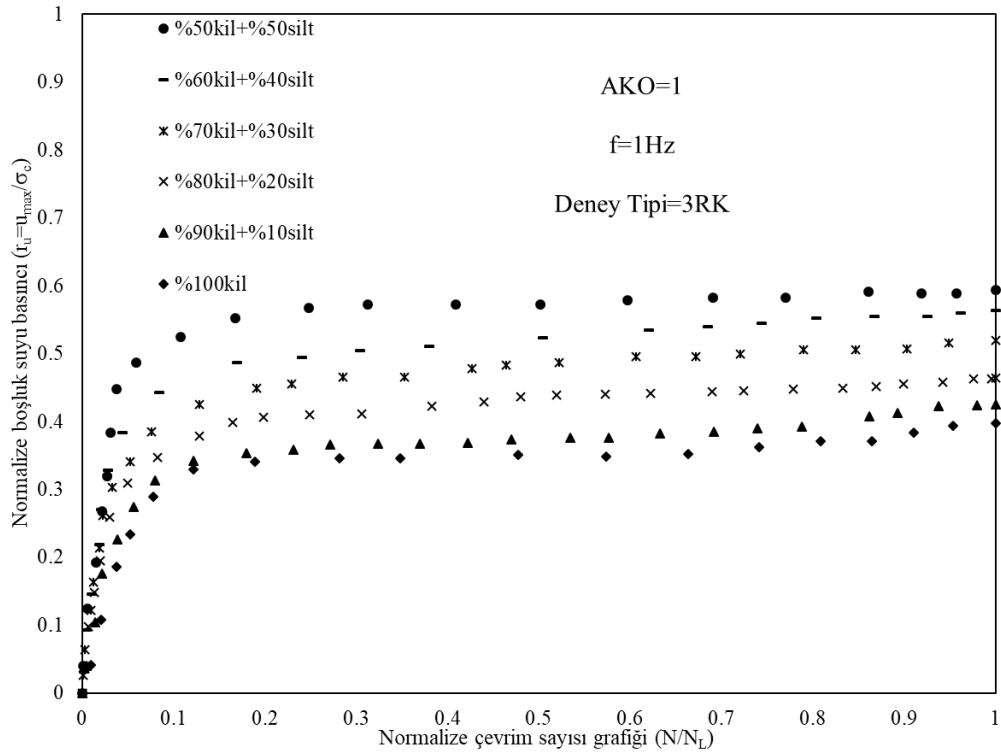
Çizelge 7.11.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımları G ve D'si

Karışım	1. $G_{max}$ (kPa)	2. $G_{max}$ (kPa)	3. $G_{max}$ (kPa)	Sönüm Oranı, D (%)
% 100kil	10080.98	9630.95	9375.82	17.80
% 90kil+% 10silt	11212.05	10864.98	10315.24	18.75
% 80kil+% 20silt	12012.11	11613.02	10930.97	18.95
% 70kil+% 30silt	13230.95	12634.03	11424.99	19.45
% 60kil+% 40silt	15124.97	14253.00	13227.96	20.23
% 50kil+% 50silt	18011.95	16780.01	15442.07	20.98

Burulmalı kesme deneyi sonucunda, elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.73). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk suyu basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.74). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 7.73.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $r_u$  değişimi

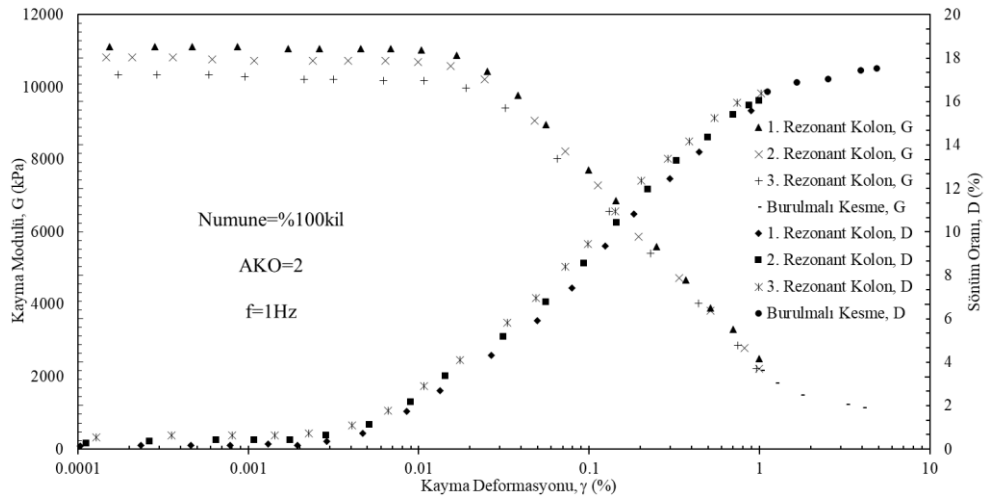


Şekil 7.74.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=1 olan karışımların  $r_u$  değişimi

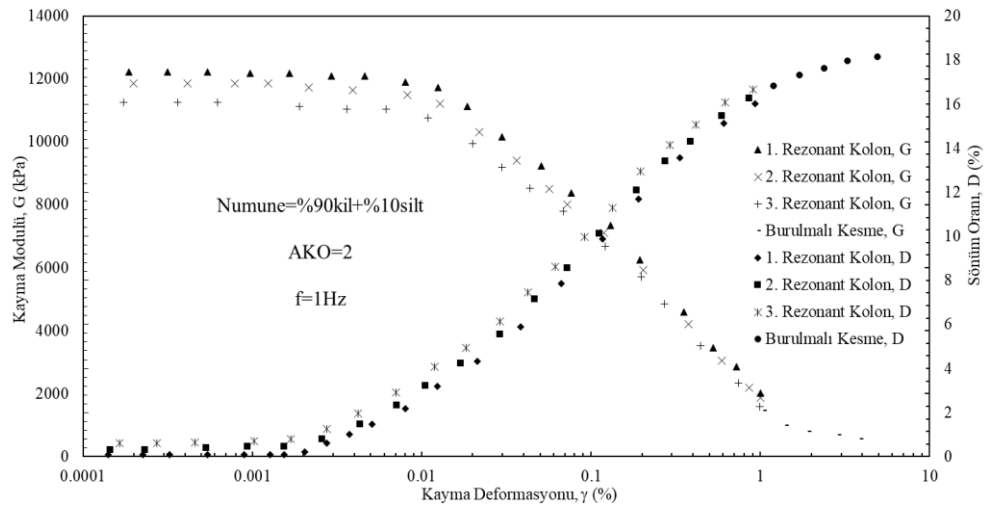
### 7.2.5.2. Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan karışımlar

Aşırı konsolidasyon oranı 2 olan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranları eğrileri sırasıyla verilmiştir (Şekil 7.75-7.80). Bu karışımların tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda oluşan maksimum dinamik kayma modülü ve

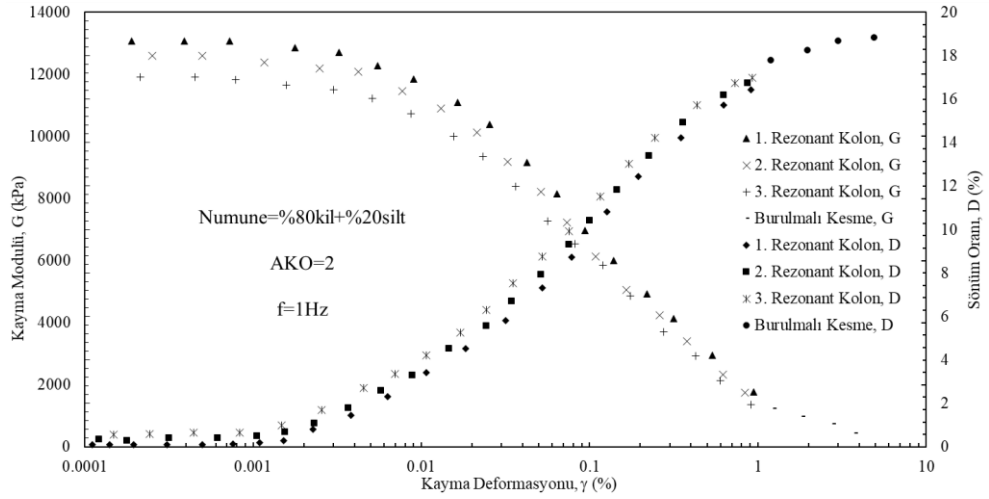
maksimum sönüm oranları Çizelge 7.12’de sunulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda her bir rezonant kolon deneyinden sonra ölçülen en büyük dinamik kayma modülünde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma karışım içindeki silt oranı azaldıkça, azalış göstermiştir. Buna karşın sönüm oranı eğrisi ise her bir rezonant kolon deneyi sonrasında daha yüksek bir duruma gelmiştir. Bu yükseliş silt oranı azaldıkça daha az belirgin olarak gözükmemektedir.



Şekil 7.75.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %100kilin G ve D'si



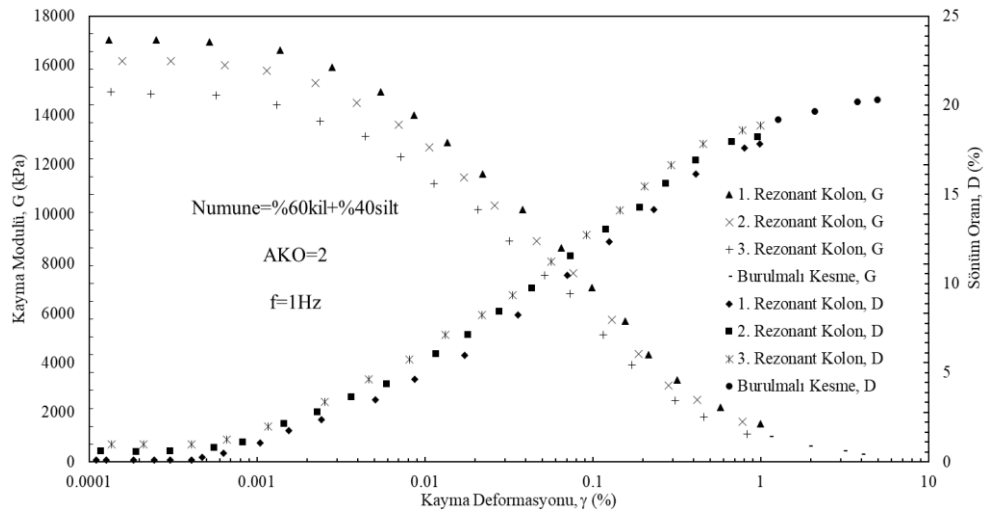
Şekil 7.76.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %90kil+%10siltin G ve D'si



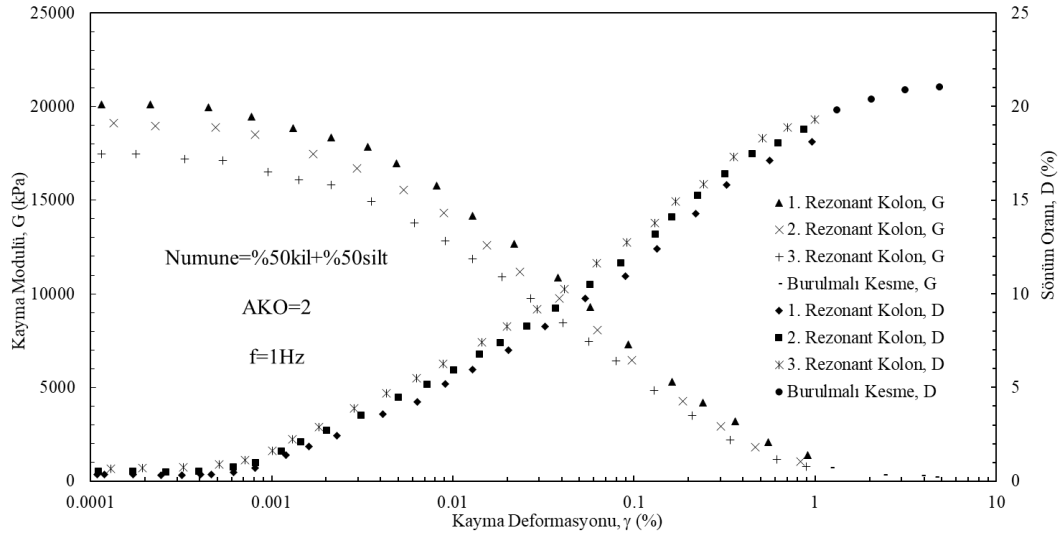
Şekil 7.77.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %80kil+%20siltin G ve D'si



Şekil 7.78.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %70kil+%30siltin G ve D'si



Şekil 7.79.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %60kil+%40siltin G ve D'si

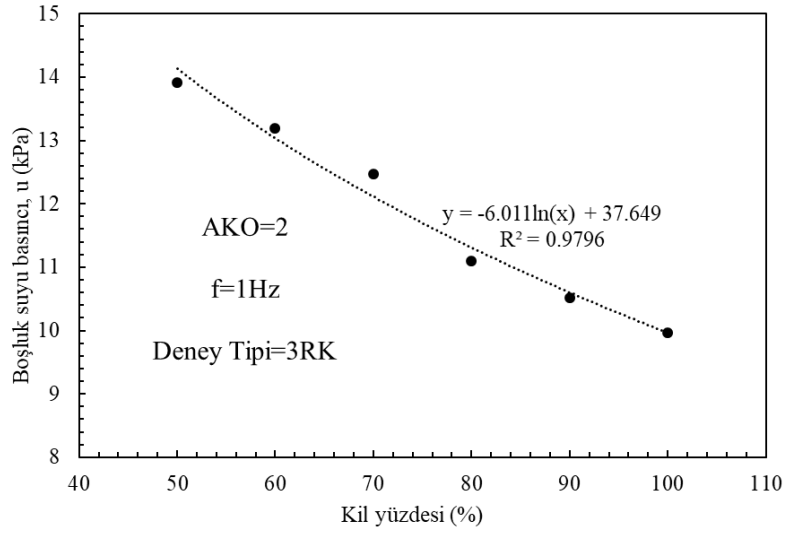


Şekil 7.80.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan %50kil+%50siltin G ve D'si

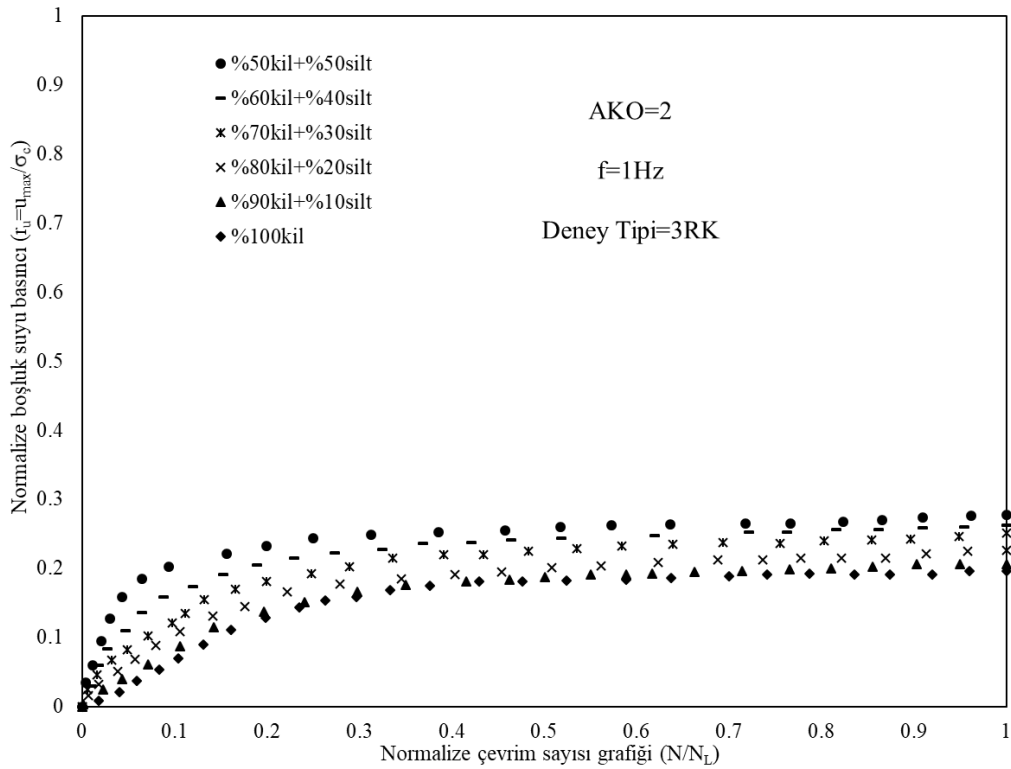
Çizelge 7.12.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımları G ve D'si

Karışım	1. $G_{max}$ (kPa)	2. $G_{max}$ (kPa)	3. $G_{max}$ (kPa)	Sönüm Oranı, D (%)
%100kil	11119.97	10821.02	10342.10	17.55
%90kil+%10silt	12225.05	11846.12	11245.82	18.13
%80kil+%20silt	13079.95	12602.95	11903.27	18.87
%70kil+%30silt	15246.01	14707.12	13713.05	19.63
%60kil+%40silt	17029.04	16188.04	14940.98	20.35
%50kil+%50silt	20120.82	19122.05	17475.01	21.02

Burulmalı kesme deneyi sonucunda, elde edilen maksimum boşluk suyu basınçlarında zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.81). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 7.82). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



Şekil 7.81.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların u değişimi



Şekil 7.82.:3RK ve 1Hz BK deneyinde AKO=2 olan karışımların  $r_u$  değişimi

Yapılan 3 tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda numunelerin kuru birim hacimlerindeki değişiklikler Çizelge 7.13'te verilmiştir. Yapılan deneylerde  $\gamma_{k0}$  başlangıç kuru birim hacim ağırlığını,  $\gamma_{k1}$  AKO=1 olan zeminlerin 3 tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucundaki kuru birim hacim ağırlığını ve  $\gamma_{k2}$  AKO=2 olan zeminlerin 3 tekrarlı

rezonant kolon deneyi sonucundaki kuru birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. AKO 1 zeminlerde 3 tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda  $\gamma$  azalırken, AKO 2 zeminlerde ise  $\gamma$  artış gösterdiği görülmüştür.

**Çizelge 7.13.:**3RK deneyi sonucunda kuru birim hacim değişiklikleri

Zemin Türü	$\gamma_{k0}$	$\gamma_{k1}$ (AKO=2)	$\gamma_{k2}$ (AKO=2)
%100kil	14.53	15.39	13.39
%90kil+%10silt	14.67	15.52	13.67
%80kil+%10silt	14.24	15.10	13.86
%70kil+%10silt	14.61	15.48	13.92
%60kil+%10silt	14.90	15.74	14.15
%50kil+%10silt	15.30	16.17	14.45

## 8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, Bölüm 7’de deney sonuçlarından elde edilen bulgular ile literatürde yapılan çalışmalar karşılaştırılmıştır. Bu sayede, yapılan çalışmaların literatürde daha önce yapılan çalışmalarla benzer ve farklı yönleri tartışılmıştır. Dinamik etkiler altında zeminin davranışına etki eden parametreler incelenirken zemine etki eden yükleme dışında, yüklemeye maruz kalan zeminin göstereceği davranış iki ana bölümde incelenmektedir. Bunlar zemine ait gerilme-şekil değiştirme davranışı ve zeminin mukavemet özellikleridir. Gerilme-şekil değiştirme davranışında, dinamik kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) ile bu değerlerin tekrarlı birim kayma genliklerine göre değişimi incelenmektedir. Mukavemet davranışında ise, zeminde göçmeye yol açan tekrarlı birim kayma deformasyonu ve bu deformasyon sonucunda ortaya çıkan boşluk suyu basıncı araştırılmaktadır. Bu sebeple, bu çalışmadan elde edilen tüm bulgular bu iki ana başlık üzerinden literatürle karşılaştırılarak incelenmiştir.

### 8.1. Çevre Basıncının Etkisi

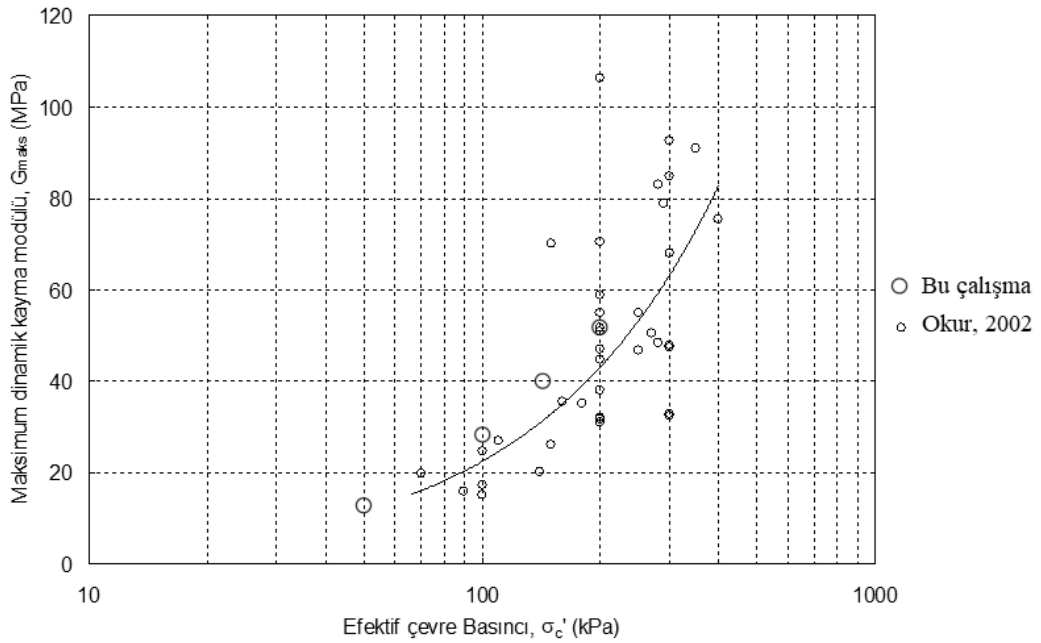
Bu çalışmada 50, 100, 150 ve 200kPa’lık çevre basınçlarında %75kil+%25silt karışımı kullanılarak efektif çevre basıncı değişiminin kayma modülüne ve sönüm oranı eğrisine etkisi incelenmiştir. %50kil ve %100kil arasında ortalama bir değer olması açısından bu karışım seçilmiştir.

#### 8.1.1. Kayma modülüne etkisi

Literatürde yapılmış olan birçok çalışma incelendiğinde efektif gerilmenin artışıyla dinamik kayma modülünde de artış meydana geldiği görülmüştür. (Hardin ve Drenvich, 1972a; Iwasaki vd., 1978; Kokusho, 1980; Ishibashi ve Zhang, 1993; Darendeli, 2001; Okur, 2002; Onur vd., 2012). Yapılan çalışmalarda çok çeşitli zeminler ve deney yöntemleri kullanılmıştır. Ancak elde edilen eğrilerde her ne kadar efektif gerilme artışıyla dinamik kayma modülünde artış gözlenirse de elde edilen eğriler kullanılan zemin özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Yapılan bu çalışma sonucunda da efektif gerilmenin artmasıyla kayma modülünde artış meydana geldiği görülmüştür.

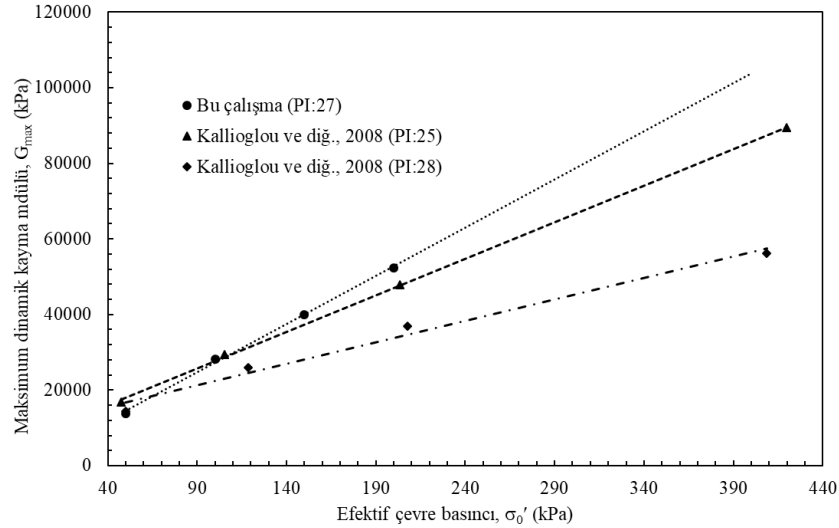
Okur (2002) normal ve hafif aşırı konsolide zeminlerden oluşan örselenmemiş kil numuneleri kullanarak çevre basıncının etkisini incelemek amacıyla rezonant kolon deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu deneylerde çevre basıncının artmasıyla

maksimum dinamik kayma modülünde de artış gözlenmiştir. Araştırmacı çevre basıncı ile numunlerin maksimum dinamik kayma modülleri arasında bir oran olduğunu ifade etmiştir. Yapılan çalışma sonucunda efektif çevre basıncının artmasıyla bulunan maksimum dinamik kayma modülleri Okur'un (2002) çalışmasıyla kıyaslanmıştır (Şekil 8.1). Sonuçta, çevre basıncındaki artış ile maksimum dinamik kayma modülünde artış olduğu görülmüştür (Şekil 8.1).



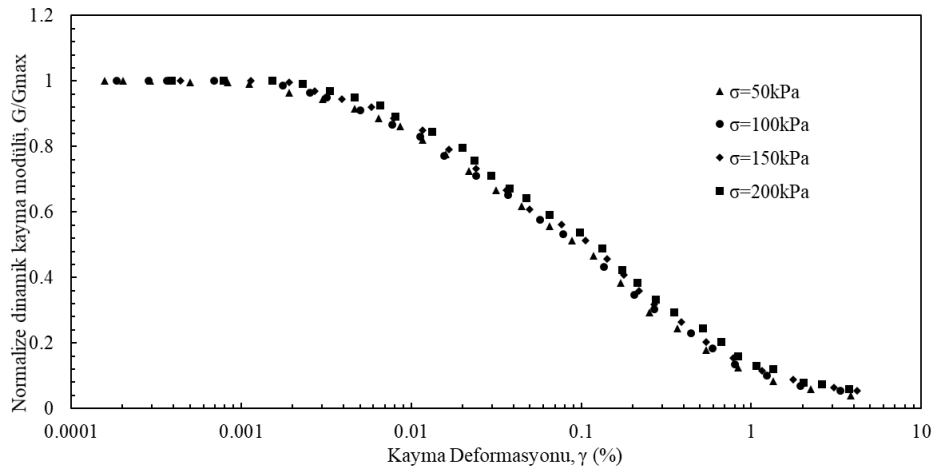
**Şekil 8.1.:** Efektif çevre basıncının  $G_{max}$ 'a etkisi

Kallioglou ve diğ. (2008) farklı plastisite oranlarında ve farklı kalsiyum karbonat ( $CaCO_3$ ) içeren kil zeminlerde çevre basıncının dinamik kayma modülü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda çevre basıncının artışı maksimum dinamik kayma modülünde de artışa sebep olmuştur. Kallioglou ve diğ. (2008) tarafından farklı plastisite indisine sahip zeminlerde bu deney tekrarlanmıştır. Bu çalışma esnasında kullanılan %75kil+%25silt karışımının plastisite indisi değeri 27 olup araştırmacılar tarafından kullanılan ve plastisite indisi 25 ile 28 olan kil zemine ait deney sonucuyla karşılaştırılmıştır (Şekil 8.2). Yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen eğrilerin birbirlerine oldukça paralel sonuçlar verdiği görülmektedir. Her iki çalışmada da efektif çevre basıncının artmasıyla dinamik kayma modülü artmıştır.

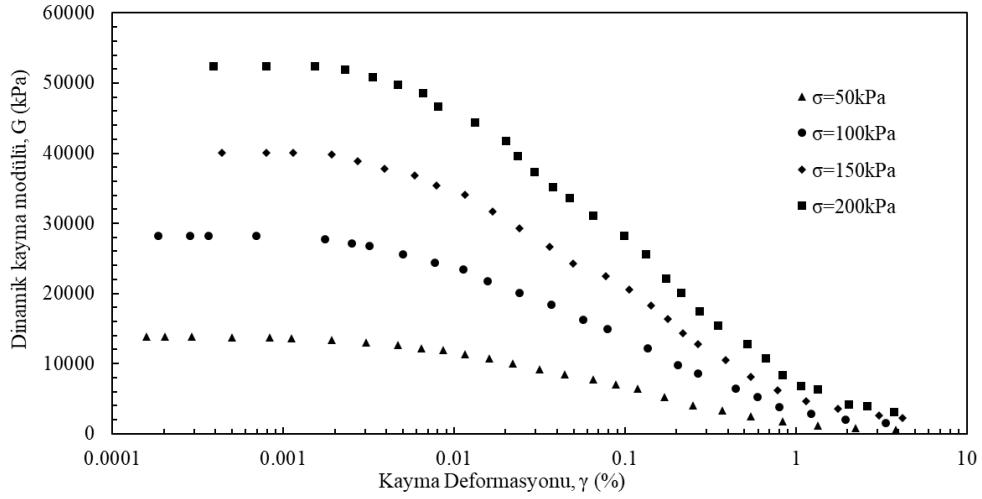


Şekil 8.2.:Efektif çevre basıncı ile  $G_{max}$  değişiminin incelenmesi

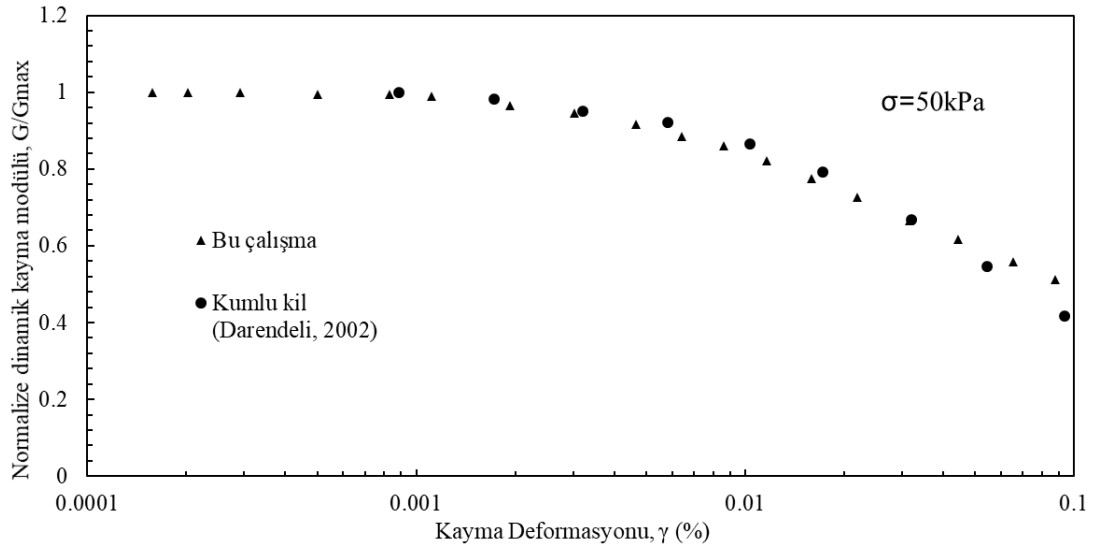
Yapılan deneyler sonucunda kil zeminde dinamik kayma modülü ve normalize dinamik kayma modülü eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 8.3). Bulunan sonuçlara göre maksimum dinamik kayma modülü ve kayma modülü eğrilerinde çevre basıncı çok önemlidir. Ancak normalize dinamik kayma modülünde birbirine çok yakın bir eğri elde edilmiştir. Bununla birlikte söz konusu eğride de çevre basıncı arttıkça normalize kayma modülünde artış trendi olduğu görülmektedir (Şekil 8.4). 50kPa çevre basıncında elde edilen kayma modülü eğrisi Darendeli (2002) tarafından yine 50kPa çevre basıncında yapılan kumlu kil ile karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçların %0.1 kayma deformasyonuna kadar birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 8.5). Araştırmacının %0.1'den sonraki kayma deformasyonları ile ilgili veri bulunmamaktadır.



Şekil 8.3.:Efektif çevre basıncının  $G/G_{max}$ 'a etkisi



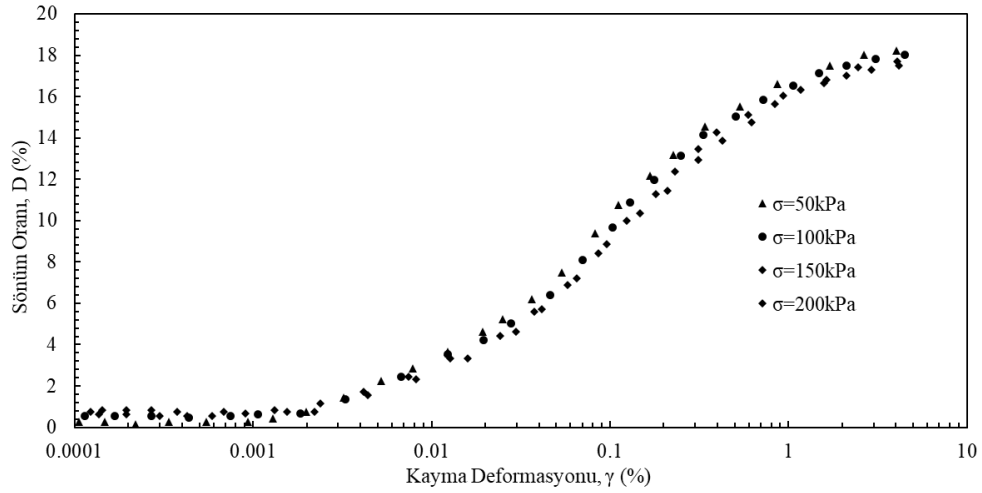
Şekil 8.4.:Efektif çevre basıncının G'ye etkisi



Şekil 8.5.:Efektif çevre basıncı ile  $G/G_{max}$  değişiminin incelenmesi

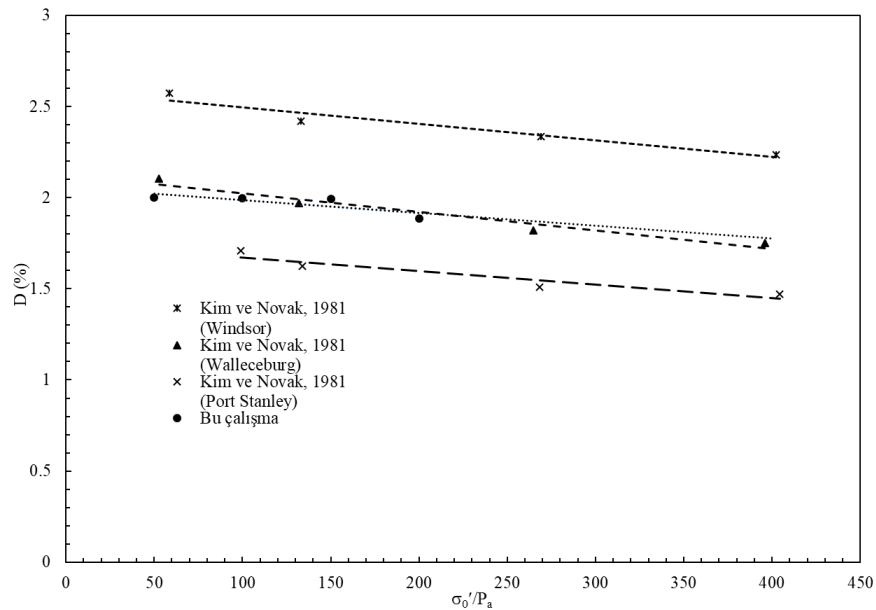
### 8.1.2. Sönüm oranına etkisi

Bu çalışmada 50, 100, 150 ve 200kPa'lık çevre basınçlarında %75kil+%25silt karışımı kullanılarak efektif çevre basıncı değişiminin sönüm oranına etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda efektif çevre basıncı arttıkça Şekil 8.3'teki normalize kayma modülüne benzer şekilde sönüm oranları birbirine yakın çıkmasına karşın sönüm oranlarında azalma görülmektedir (Şekil 8.6).



Şekil 8.6.:Efektif çevre basıncının D'ye etkisi

Kim ve Novak (1981), örselenmemiş zeminler üzerinde yaptıkları çalışmada rezonant kolon deneyi kullanarak kil zeminlere etki eden parametreleri incelemişlerdir. Farklı killer kullanarak çalışmalarını yapan araştırmacılar küçük tekrarlı birim deformasyonlarda çevre basıncı arttıkça sönüm oranlarında bir azalma meydana geldiğini görmüşlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında %0.002 birim kayma deformasyonuna karşılık gelen sönüm oranlarını kullanmışlardır. Kim ve Novak (1981) tarafından bulunan sonuçlar ile bu çalışmadaki sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmada da çevre basıncı arttıkça sönüm oranlarında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 8.7.:Efektif çevre basıncı ile D değişiminin incelenmesi

## 8.2. Silt Oranının Etkisi

Bu çalışmada dekantasyon yöntemiyle bir kil zemin içerisindeki kil ve silt birbirinden tamamen ayrılarak %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt şeklinde hazırlanan karışımlar AKO'su 1 ve 2 olacak şekilde konsolidasyon işlemine tabi tutulduktan sonra dinamik yüklemeye maruz bırakılmışlardır. AKO'nun kil zeminin dinamik parametrelerine etkisi Bölüm 8.3'te tartışılmıştır. Ancak literatürde yapılan çalışmalar ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar dinamik kayma modülüne ve boşluk suyu basıncına zeminin etkisi göz önüne alınırken aşırı konsolidasyon oranının da bir fonksiyon olarak bu parametrelere etki ettiğini göstermektedir. Bu sebeple bu bölümde 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyi ve 1 rezonant kolon deneyi uygulanan AKO'su 1 ve 2 olan karışımlar kullanılarak literatür incelemesi yapılmıştır. Tekrarlı rezonant kolon deneyinin etkisi Bölüm 8.4'te ve burulmalı kesme deneyinde yüklem frekansının etkisi Bölüm 8.5'te tartışılmıştır.

### 8.2.1. Dinamik kayma modülüne etkisi

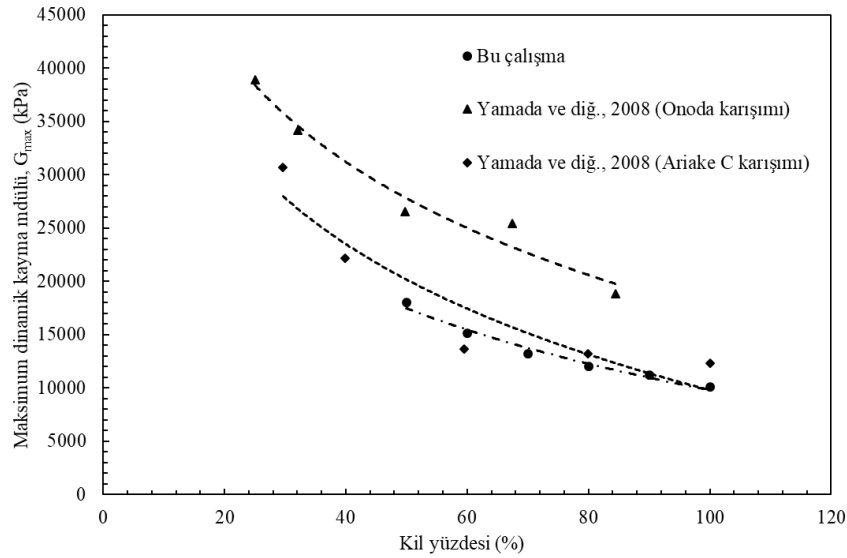
Yapılan birçok araştırma zemin kayma modülüne etki eden en önemli parametrelerin çevre basıncı ve boşluk oranı olduğunu ortaya koymuştur (Kim ve Novak, 1981; Jamiolkowski vd., 1991; Vucetic ve Dobry, 1991; Kagawa, 1992; Darendeli, 2001; Teachavorasinskun vd., 2002; Kallioglou vd., 2008; Lanzo vd., 2009). Zeminin jeolojik yaşının yani maruz kaldığı çevre basıncı süresinin ise dinamik kayma modülüne etki eden diğer en önemli parametre olduğu düşünülmektedir (Afifi ve Richart, 1973; Anderson ve Stokoe, 1978; Kim ve Novak, 1981; Kokusho vd., 1982; Kagawa, 1992; Darendeli, 2001; Kallioglou vd., 2008).

Zemin tipi ve zemine ait plastisite indisinin etkisi konusunda ise literatürde tartışmalı görüşler yer almaktadır. Geçmişte yapılan bir takım çalışmalar maksimum aşırı konsolidasyon oranına bağlı bir fonksiyonla plastisite indisi arttıkça dinamik kayma modülünün arttığını ortaya koymuştur (Hardin ve Drnevich, 1972a; Kim ve Novak, 1981; Vucetic ve Dobry, 1991). Bazı araştırmacılar ise maksimum dinamik kayma modülü üzerinde plastisite indisinin önemli bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir (Okur ve Ansal, 2007). Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, plastisite indisinin artışının maksimum dinamik kayma modülünde bir azalmaya sebep olduğunu göstermektedir (Kagawa 1992; Yamada vd., 2008; Kallioglou vd., 2008).

Carlton ve Pestana (2012) literatürdeki çalışmalardan elde edilen verileri kullanarak bir formülasyon önermişlerdir. Önerdikleri formülde kullandıkları  $G_b$ , maksimum dinamik kayma modülüne ( $G_{max}$ ) ve boşluk oranına ( $e$ ) bağlı bir parametredir. Literatürdeki çalışmalardan elde ettikleri verileri ve önerdikleri formülasyonu kullanarak oluşturdukları grafikte gerçekten de plastiste indisinin artışı maksimum dinamik kayma modülünün azalmasına sebep olmaktadır.

Kallioglu vd., (2008) farklı plastisite oranlarında CL ve CH kil zeminleri kullanarak rezonant kolon deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada plastiste indisi oranı azaldıkça zeminlere ait maksimum dinamik kayma modülünün azaldığı görülmüştür.

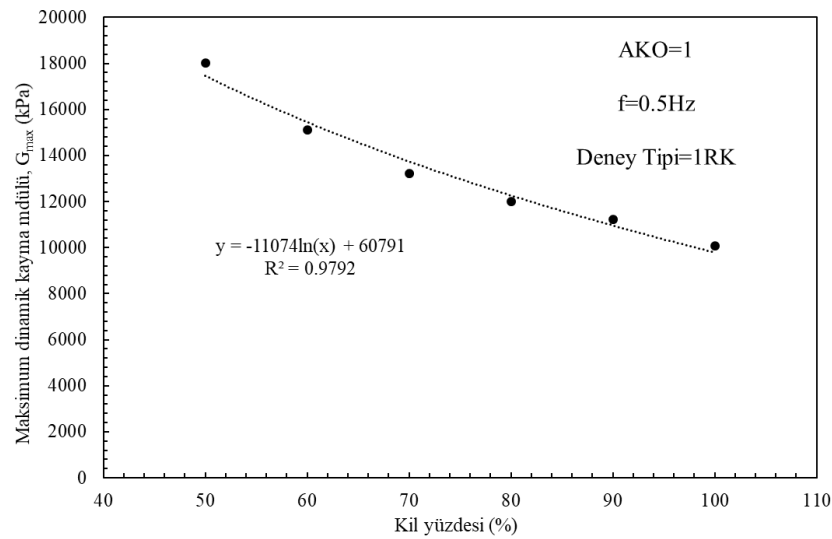
Yamada vd., (2008) dinamik basit kesme deneyi kullanarak kil zemine farklı oranlarda kum katarak dinamik kayma modülünün değişimini incelemişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları deney sonucunda zemindeki kil içeriği arttıkça dinamik kayma modülünde azalma meydana geldiğini görmüşlerdir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışma ile bu tez kapsamında normal konsolide zeminde yapılan çalışma birbirleriyle kıyaslandığında her iki çalışmada da kil yüzdesinin artmasıyla logaritmik olarak kayma modülünde azalma meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8.8).



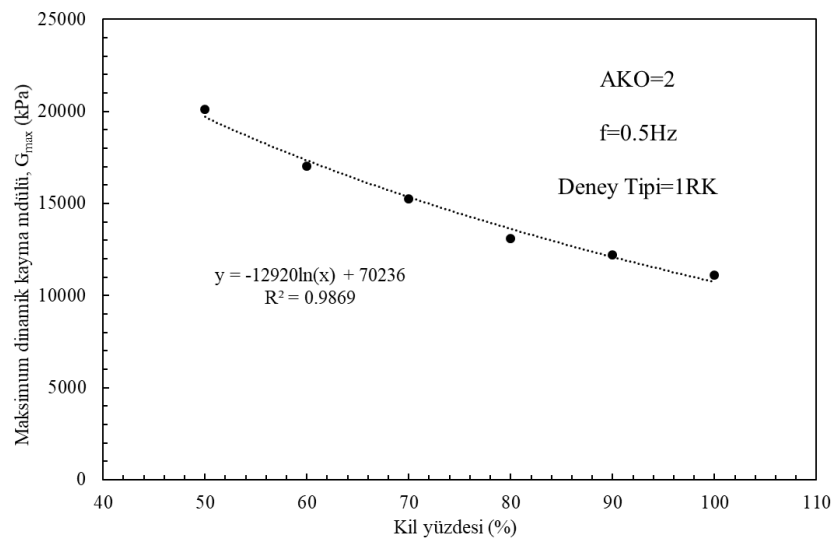
Şekil 8.8.:Kil yüzdesi ile  $G_{max}$  değişiminin incelenmesi

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde kil zeminlerde maksimum dinamik kayma modülünü, ince içeriği, plastisite indisi ve likit limit

etkilemektedir. Yani zeminin sahip olduğu dinamik parametrelerin tespiti için zemine ait fiziksel parametrelerin de bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar hem kil içeriği hem de plastisite indisi artışının kil zeminde normal ve aşırı konsolide durum için maksimum dinamik kayma modülünün azalmasına sebep olduğu görülmektedir (Şekil 8.9-8.10). Ancak literatür incelendiğinde bu çalışmadakine benzer şekilde tamamen %100 kil içeren kil zeminle ilgili bir çalışma görülmemiştir. Bu yüzden bu çalışmadan elde edilecek veriler ve sonrasında bu konudaki daha kapsamlı çalışmalar ile kil zeminin dinamik özelliklerinin tespiti için daha iyi sonuçlara ulaşılabilecektir.

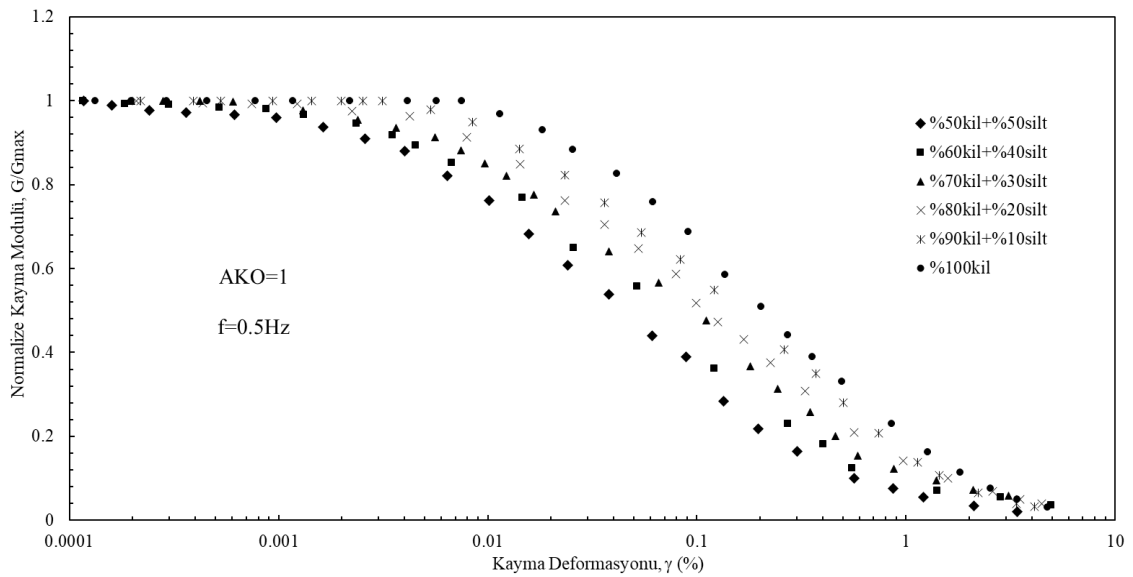


Şekil 8.9.:AKO'su 1 olan karışımlarda kil yüzdesi ile  $G_{max}$  değişimi

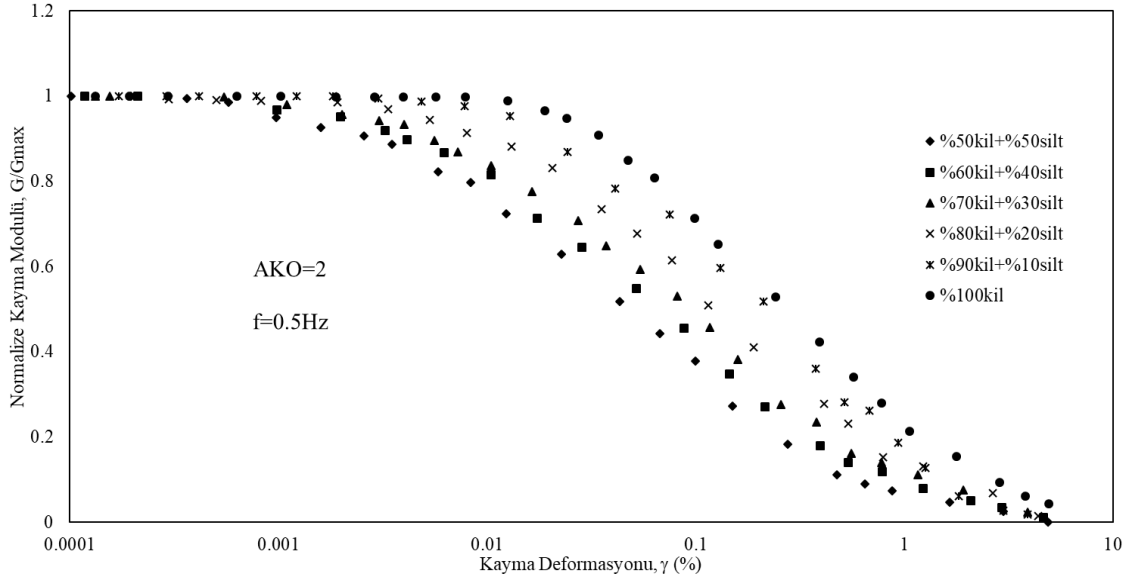


Şekil 8.10.:AKO'su 2 olan karışımlarda kil yüzdesi ile  $G_{max}$  değişimi

Birçok araştırmacı yapmış olduğu incelemeler sonucunda plastisite indisinin ve zemin tipinin normalize dinamik kayma modülü eğrisinde oldukça önemli olduğunu ve plastisite indisinin artmasıyla  $G/G_{max}$  değerlerinin arttığını söylemiştir (Kokusho vd., 1980, Sun vd., 1988; Dobry ve Vucetic, 1987; Vucetic ve Dobry, 1991; Darendeli, 2001; Okur, 2002; Okur ve Ansal, 2007; Kallioglou vd., 2008; Das ve Ramana, 2010; Vardanega vd., 2013). Bu çalışmada dekantasyon yöntemiyle ayrılan kil zeminin içerisindeki %100 kile ağırlıkça kil zeminden ayrılan silt eklenerek karışımlar elde edilmiş ve fiziksel özellikleri izelge 7.2 ve 7.3'te verilmiştir. Karışımlar kullanılarak rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri yapılmıştır. Kile silt eklenmesiyle plastisite indisi azalmış ve karışımlara ait normalize dinamik kayma modülü eğrisi literatürdekine benzer şekilde plastisite oranı arttıkça, normal konsolide ve aşırı konsolide karışımlarda artış göstermiştir (şekil 8.11-8.12).



şekil 8.11.:AKO'su 1 olan karışımlarda kil yüzdesi ile  $G/G_{max}$  değişimi

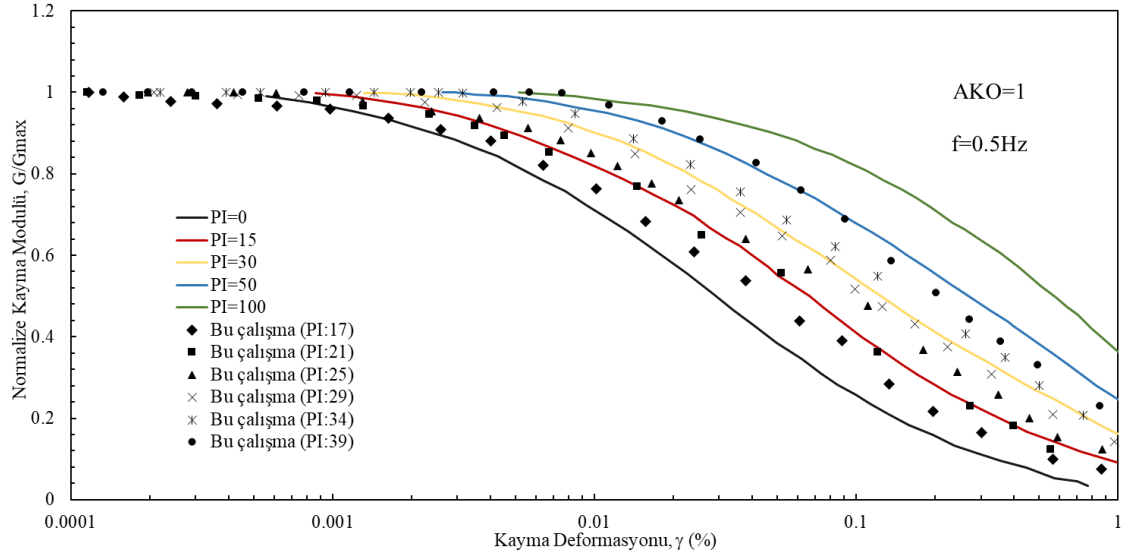


Şekil 8.12.:AKO'su 2 olan karışımlarda kil yüzdesi ile  $G/G_{max}$  değişimi

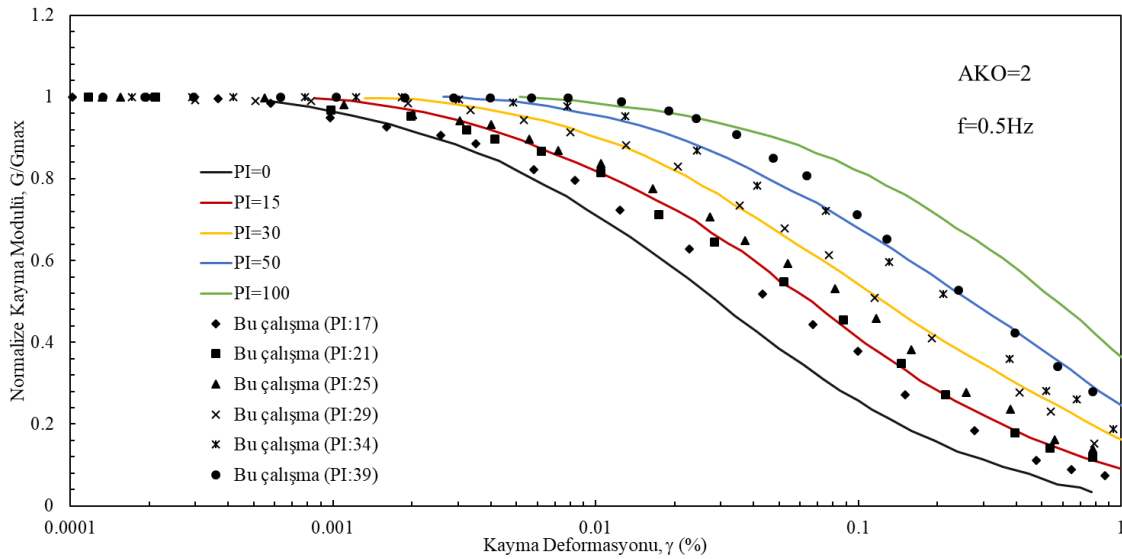
Dobry ve Vucetic (1987) plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının zeminlerin dinamik karakterini belirlemek için çok önemli iki parametre olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar o güne kadar yapılmış ve ulaşabildikleri tüm literatürdeki sonuçları inceleyerek plastisite indisi artışıyla normalize dinamik kayma modülünün artışı gösteren bir çalışma ortaya sunmuşlardır. Bu çalışmadan yola çıkarak Vucetic ve Dobry (1991) yaptıkları çalışmada farklı plastisite oranları için normalize kayma modülü eğrileri sunmuşlardır.

Darendeli (2001) rezonant kolon deneyi kullanarak yaptığı çalışmada plasitiste indisinin normalize dinamik kayma modülüne etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada 5 farklı plastisite indisine sahip zemin için normalize dinamik kayma modülü eğrisi vermiştir. Araştırmacı plasitiste indisi arttıkça normalize dinamik kayma modülü eğrisinin de yükseldiğini, bunun literatürdeki tüm çalışmalarda ve formüllerde aynı olduğunu söylemiştir.

Bu çalışmada bulunan veriler Vucetic ve Dobry'de (1991) elde edilen eğrilerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma normal konsolide karışımlar ve aşırı konsolide karışımlar için yapılmış ve sırasıyla verilmiştir (Şekil 8.13-8.14). Çalışmada kullanılan karışımlardan en düşük olan %50kil+%50silt karışımının plastisite indisi değeri 17, en yüksek olan %100kilin ise plastisite inidi değeri 39'dur. Burada, elde edilen eğriler Vucetic ve Dobry (1991) tarafından sunulan eğrilere benzer şekilde elde edilmiştir.



Şekil 8.13.:AKO'su 1 olan karışımlarda PI ile  $G/G_{max}$  değişiminin incelenmesi

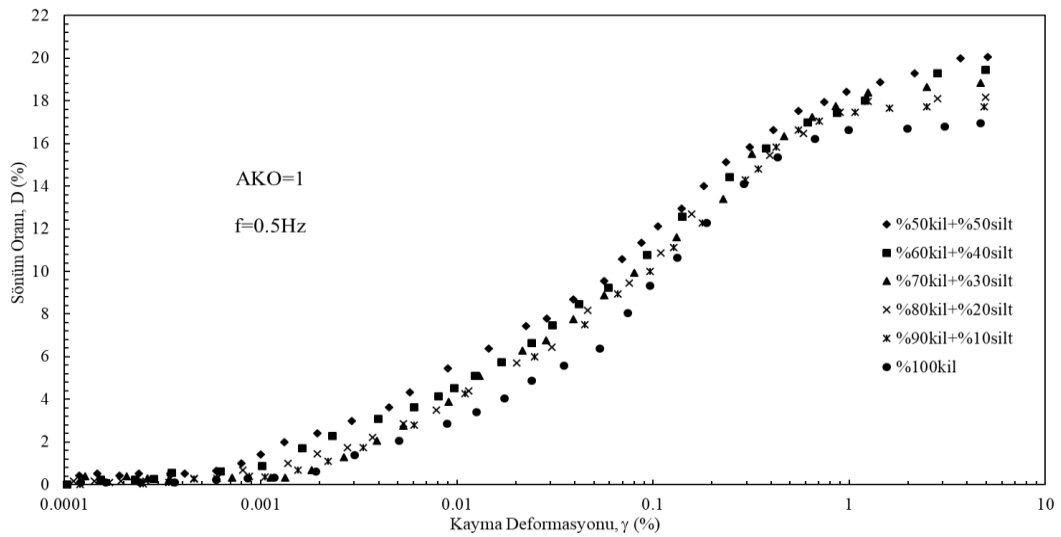


Şekil 8.14.:AKO'su 2 olan karışımlarda PI ile  $G/G_{max}$  değişiminin incelenmesi

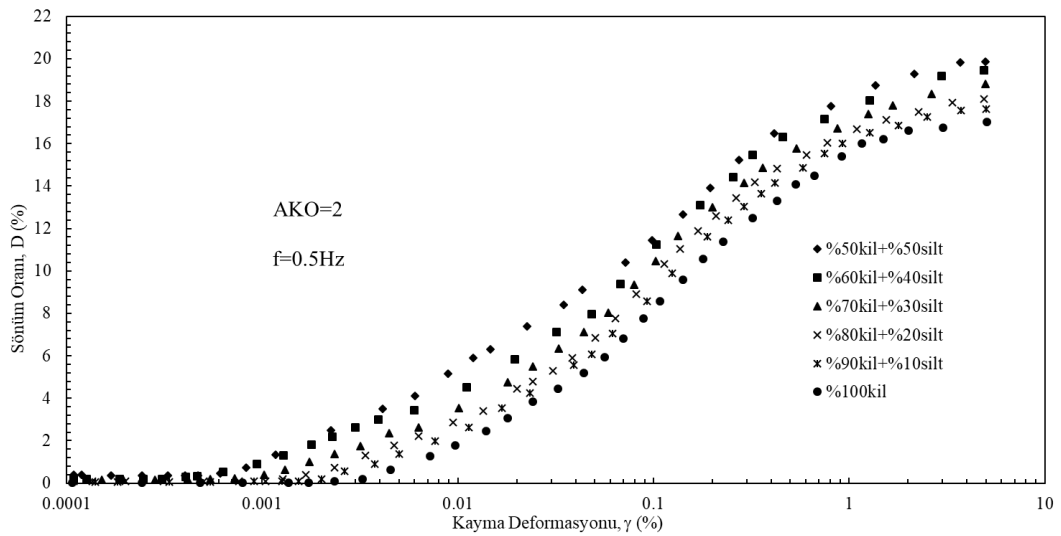
### 8.2.2. Sönüm oranına etkisi

Hardin ve Drnevich (1972a) ve Darendeli (2001) yaptıkları çalışmalarda sönüm oranı eğrisine plastisite indisi ve zemin türünün çok etkili olduğunu belirtmişlerdir. Normalize dinamik kayma modülü eğrisine benzer şekilde literatürde karşılaşılan bütün çalışmalarda plastisite indisinin artmasının sönüm oranı eğrisinde azalış meydana getirdiği görülmektedir (Kokusho vd., 1980, Sun vd., 1988; Dobry ve Vucetic, 1987; Vucetic ve Dobry, 1991; Darendeli, 2001, Lanzo ve Vucetic, 1999; Okur, 2002; Okur ve Ansal, 2007; Kallioglou vd., 2008; Yamada vd., 2008; Sun vd., 2012).

Bu çalışmada, literatürdekine benzer şekilde içerisindeki silt oranı arttıkça plastisite indisi azalan %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlar üzerinde dinamik analizler yapılmıştır. Sonuçta, plastisite indisi azaldıkça karışımların sönüm oranlarının ve sönüm oranı eğrilerinin arttığı görülmüştür. Bu durum normal konsolide ve aşırı konsolide numunelerde görülmektedir (Şekil 8.15-8.16).



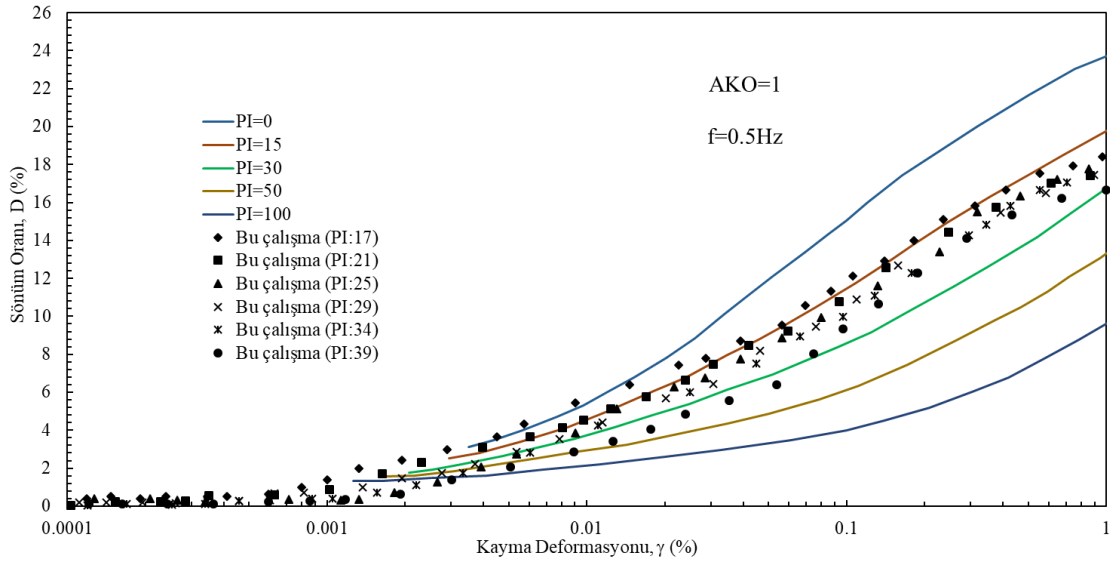
Şekil 8.15.:AKO'su 1 olan karışımlarda kil yüzdesine göre D değişimi



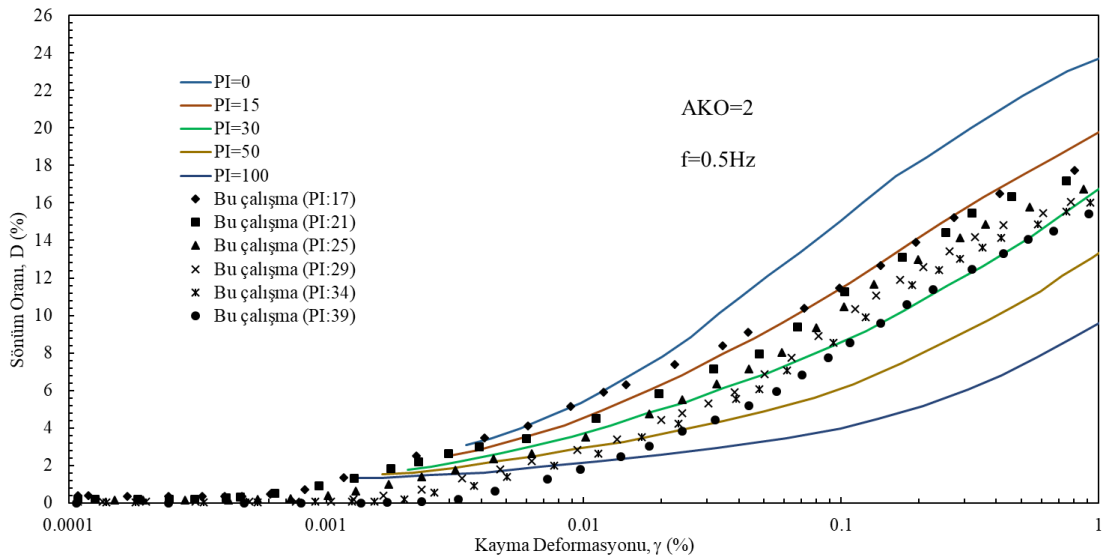
Şekil 8.16.:AKO'su 2 olan karışımlarda kil yüzdesine göre D değişimi

Bu çalışmada elde edilen veriler kullanılarak, Vucetic ve Dobry (1991) tarafından verilen eğriler normal konsolide ve aşırı konsolide karışımlarla karşılaştırılmıştır (Şekil

8.17-8.18). Normalize dinamik kayma modülüne benzer şekilde eğriler Vucetic ve Dobry (1991)'nin sunmuş olduğu eğrilere benzer olsa da farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılığın sebebi, Vucetic ve Dobry'nin (1991) çalışmasındaki eğrilerin tüm literatürdeki veriler kullanılarak oluşturulan ortalama bir eğri olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.17.:AKO'su 1 olan karışımlarda PI ile D değişiminin incelenmesi



Şekil 8.18.:AKO'su 2 olan karışımlarda PI ile D değişiminin incelenmesi

### 8.2.3. Boşluk suyu basıncına etkisi

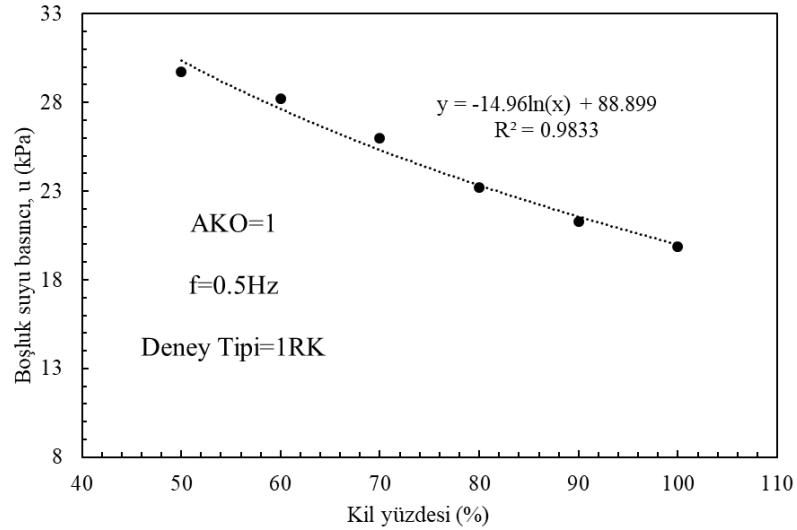
Bu çalışmada farklı oranlarda siltin ağırlıkça %100 kile katılmasıyla elde edilen kil zemin karışımlarının dinamik etkiler altında ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basınçları

incelenmiştir. Doyurma aşaması tamamlanıp, B Skempton değeri 1 olan suya doymuş numuneler 25kPa ve 50kPa altında konsolide edildikten sonra rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyi işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler Bölüm 6.4.2.3. ve 6.4.2.4.'te anlatılmıştır. Numuneler %1 büyük birim kayma genliğine ulaşınca kadar rezonant kolon deneyine tabi tutulmuş daha sonra numunelere  $\pm 2.5-3.0$  birim kayma deformasyonu değerine ulaşınca kadar drenajsız koşullarda ve 0.5Hz ve 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyi uygulanmıştır. 1Hz frekansın etkisi Bölüm 8.2.5'te tartışılmıştır. Bu bölümdeki amaç kil zemin içerisindeki kil miktarının boşluk suyu basıncına etkisinin incelenmesidir. Aynı şekilde aşırı konsolidasyon oranının etkisi Bölüm 8.2.4'te tartışılmıştır. Bu bölümde AKO'su 1 ve 2 olan numunelere ait grafikler sunulmuş olup bunlar AKO yönünden değil kil yüzdesi değişimi yönünden incelenmiştir.

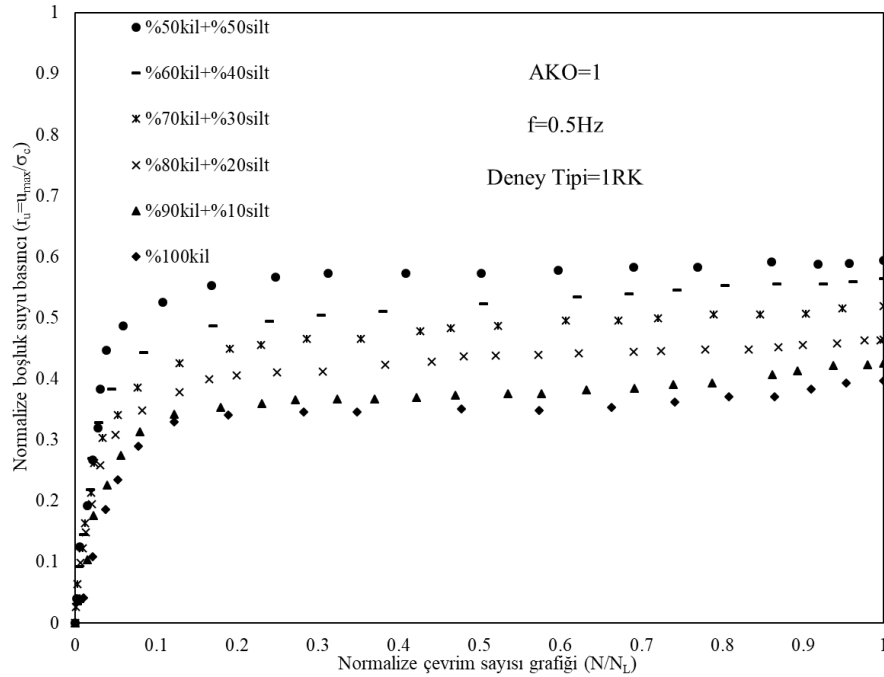
Ural (2008) yaptığı çalışmada dinamik üçeksenli deney sistemi kullanarak ince daneli zeminlerde kil oranının sıvılaşmaya etkisini incelemiştir. Bu amaçla farklı oranlarda kil içeren silt zeminlerde boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimini araştırmıştır. Yapmış olduğu çalışma sonucunda silt zemin içerisindeki kil oranının artmasıyla boşluk suyu basıncının artışı yavaşlamış ve daha yüksek çevrimlerde zeminde yenilme gerçekleşmiştir.

Kumar ve diğ. (2018) çalışmalarında Hindistan'ın kuzeyinde yer alan kil zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin araştırılması üzerine dinamik üçeksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta, zeminlerin rijitliklerinin ve mukavemetlerinin çevrimsel etkiler altında bozulmasının boşluk suyu basıncından kaynaklandığını ve boşluk suyu basıncına etki eden en önemli parametrelerin plastisite indisi ile yükleme frekansı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca suya doymuş kohezyonlu zeminlerde kohezyonsuz zeminlere kıyasla dinamik etkiler altında boşluk suyu basıncı yükselişinin daha az olduğunu söylemişlerdir. Bunun nedenin ise zemin daneleri arasındaki kohezyonun birbirini tutarak titreşimler esnasında danelerin dağılmasından ve daha yüksek mukavemet göstermesinden kaynaklandığını söylemişlerdir.

Bu çalışmada yapılan dinamik yükleme sonucunda zemin içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür (Şekil 8.19). Elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak normalize boşluk basınçları grafiği çizilmiştir (Şekil 8.20). Karışımlardaki silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.



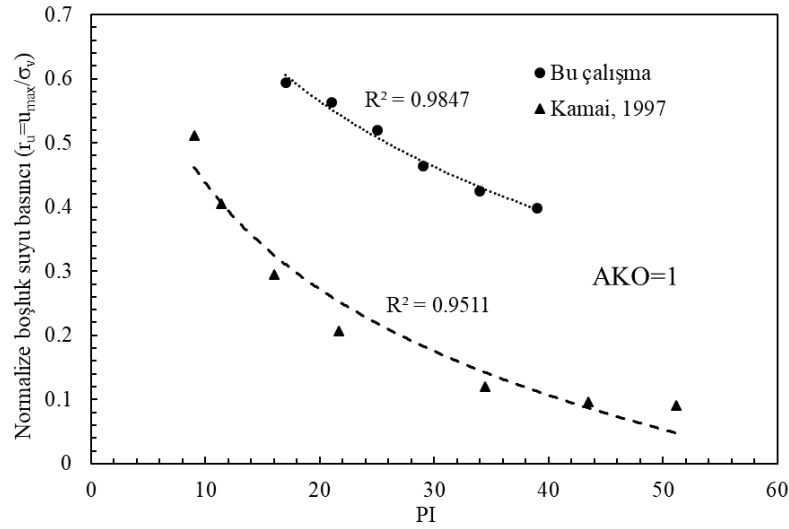
Şekil 8.19.:Kil yüzdesi ile u değişimi



Şekil 8.20.:Kil yüzdesi ile  $r_u$  değişimi

Kamei (1997) izotropik konsolide edilmiş normal konsolide killerde oluşan boşluk suyu basıncı parametrelerini incelemek için drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmiştir. Bu amaçla Japonya'nın Kawasaki bölgelerinden elde ettikleri 5 farklı özellikteki kili ve bölgedeki denizde bulunan killeri kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, izotropik koşullarda konsolide edilen normal konsolide killerde plastisite indisinin artışıyla boşluk suyu basıncında azalma meydana gelmiştir (Şekil

8.21). Araştırmacı tarafından yapılan çalışmada elde edilen veriler bu çalışmaya paralel olarak plastisite indisi artışına karşılık boşluk suyu basıncının logaritmik olarak azaldığını göstermektedir.



Şekil 8.21.:PI ile  $r_u$  değişiminin incelenmesi

Bu bölümde, kil zemin içerisinde bulunan kilin yüzdesinin dinamik kayma modülüne, sönüm oranına ve boşluk suyu basıncına etkisi incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmaların tümünde plastisite indisini arttırmak için yüksek plastisiteye sahip kil ile karışımlar yapıldığı veya bu kil zeminlerin doğrudan kullanılarak analizler yapıldığı görülmüştür. Aynı şekilde kum-kil karışımlarında, ince danelerden arınmış kum kullanırken kil zemin içerisinde siltin de bulunduğu görülmüştür. Elbette ki arazide %100 kil içeren bir zeminle karşılaşmak pek olası değildir. Ancak yapılan analizlerde kilin dane yapısının, yaşlanma etkisinin ve maruz kaldığı kimyasal etkilerin de önemli olduğu görülmektedir. Bu sebeple yapılan analizlerde dinamik kayma modülüne plastisite oranının etkisi veya kil zeminde boşluk suyu basıncı artış hızı gibi önemli özelliklerin belirlenebilmesi için aynı kil zeminin kullanılmasının oldukça önemli olduğu görülmektedir.

### 8.3. Aşırı Konsolidasyon Oranının Etkisi

Yıllarca bir çok araştırmacı aşırı konsolidasyon oranının kohezyonlu zeminlerin dinamik parametrelerine etkisini incelemiştir (Humphries ve Wahls, 1968; Brown vd., 1975; France ve Sangrey, 1977; Andersen vd., 1980; Meimon vd., 1980; Hyde ve Ward,

1986; Ohara ve Matsuda, 1988; Azzouz vd., 1989; Matsui vd., 1992; Zhou ve Gong, 2001; Okur ve Ansal, 2007; Thian ve Lee, 2017). Bununla birlikte dinamik etkiye maruz kalan kil zeminlerde aşırı konsolidasyon oranının etkilerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Maksimum dinamik kayma modülünü etkileyen parametrelerden bir tanesi de aşırı konsolidasyon oranıdır. Dobry ve Vucetic (1987) plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının zeminlerin dinamik karakterini belirlemek çok önemli iki parametre olduğunu belirtmişlerdir. Bu bölümde aşırı konsolidasyon oranı değişiminin kil zeminlerde kayma parametreleri ile boşluk suyu basıncına etkisi incelenmiştir.

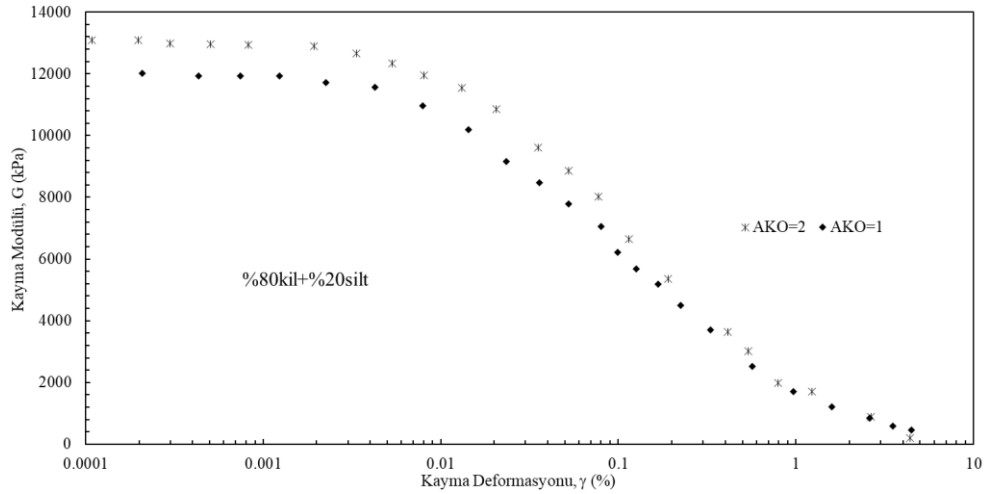
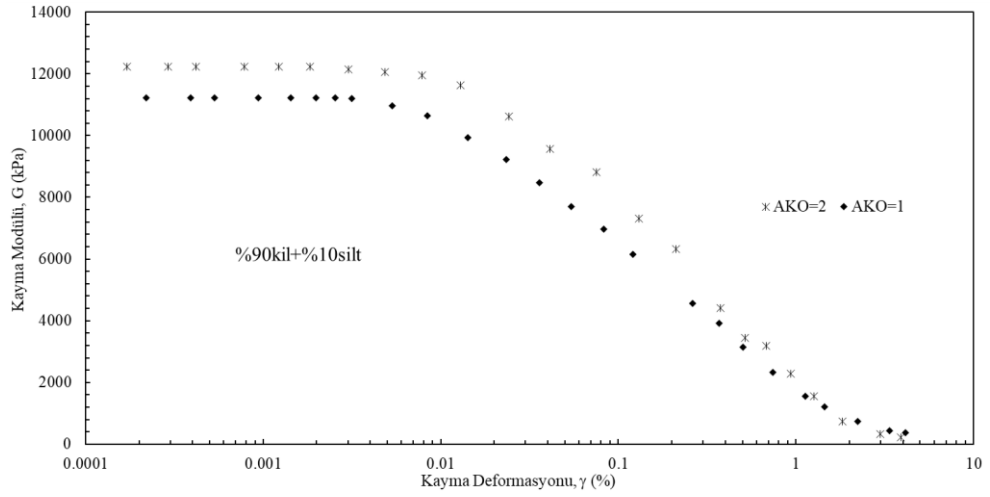
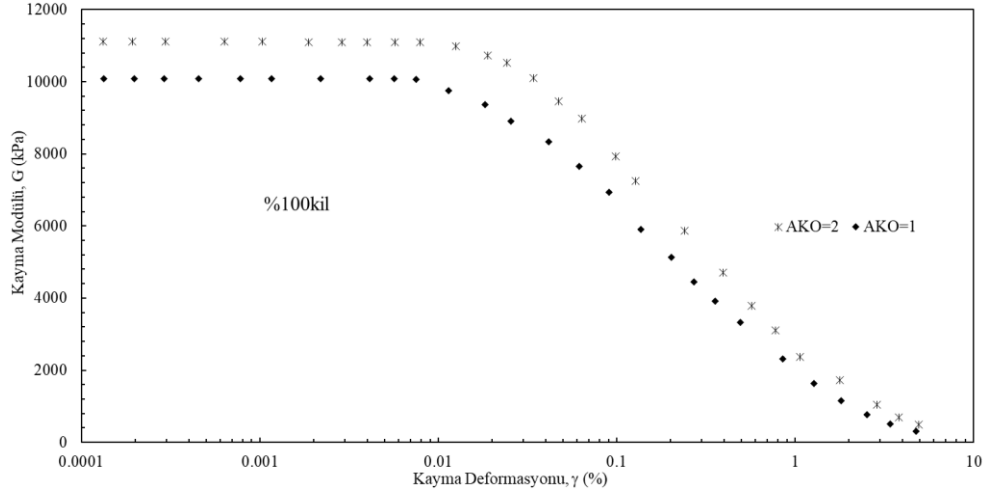
%100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt oranlarında ağırlıkça karıştırılan ve fiziksel özellikleri Çizelge 7.2’de verilen, AKO’su 1 ve 2 olan kil zeminler, %1 kayma deformasyonuna ulaşınca dek rezonant kolon deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelere  $\pm 2.5$  birim kayma deformasyonu değerine ulaşınca kadar drenajsız koşullarda ve 0.5Hz ile 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyi uygulanmıştır. 1Hz frekansın dinamik kayma modülüne, sönüm oranına ve boşluk suyu basıncına etkisi Bölüm 5.2.6’da ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Aynı karışımlar %1 kayma deformasyonuna ulaşınca kadar drejanlı koşullarda rezonant kolon deneyine tabi tutulmuş, sonrasında her ne kadar rezonant kolon deneyinde drenaja izin verilse de oluşabilecek boşluk suyu basınçlarının dağılımı ve deformasyonlar sonucunda ortaya çıkabilecek aşırı basınçların sönümlenmesi için tekrar %100konsolide oluncaya kadar konsolidasyon deneyine tabi tutulmuş ardından bir kez daha aynı numunelere rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. En son tekrar konsolidasyon deneyi uygulanan karışımlarda bir kez daha rezonant kolon deneyi uygulandıktan sonra numuneler  $\pm 2.5$  birim kayma deformasyonu değerine ulaşınca kadar drenajsız koşullarda ve 0.5Hz ile 1Hz frekansta burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Bu sayede tekrarlı dinamik etiklere maruz kalan zeminlerin kayma parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Burada, normal ve aşırı konsolide karışımlarla çalışılmıştır. Ancak tekrarlı rezonant kolon deneylerinin numunelere etkisi Bölüm 8.2.5’te ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Tekrarlı rezonant kolon deneyinin ilk kısmında bulunan kayma modülü, sönüm oranı ve normalize kayma modülü eğrisi %1’lık kayma deformasyonuna kadar tek rezonant kolon deneyi ile aynıdır. Ayrıca 0.5Hz ve 1Hz frekansta yapılan burulmalı kesme deneylerinde birim kayma deformasyonu %1 ile  $\pm 2.5$  arasında yapıldığı için normal konsolide ve aşırı konsolidasyonunun etkisi açısından tek bir rezonant kolon ve

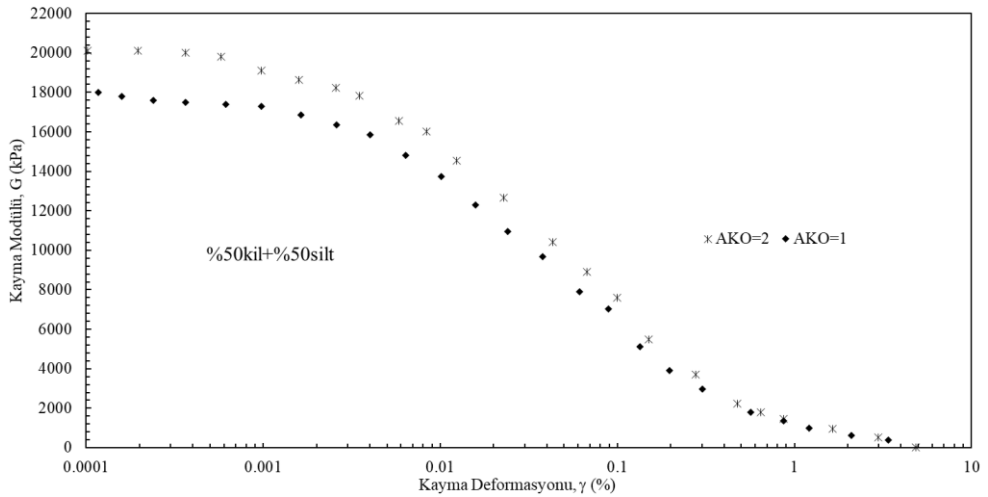
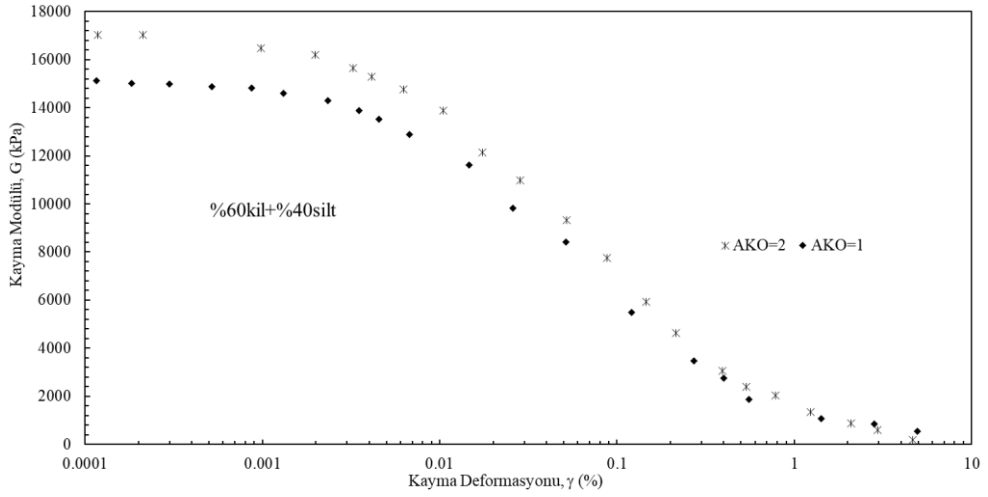
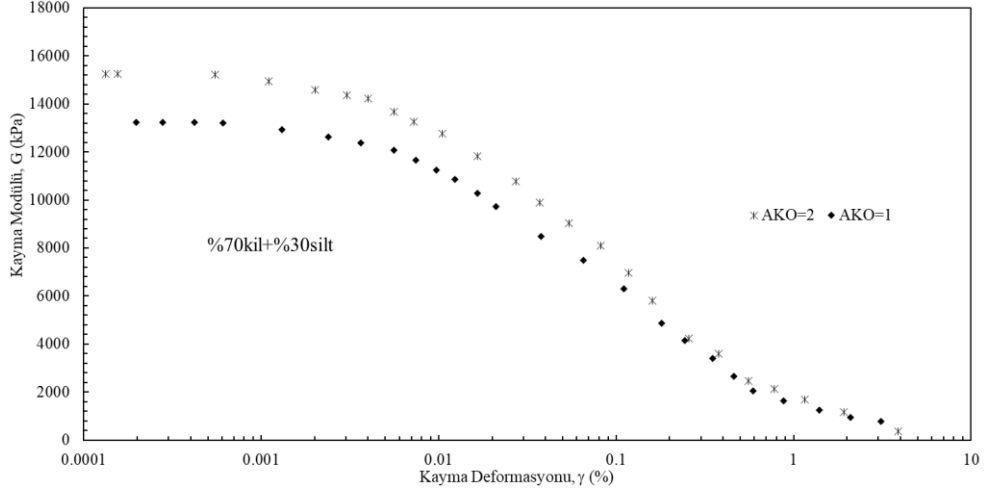
0.5Hz'de burulmalı kesme deneyi yapılan numunelerden bir farkı bulunmamaktadır. Zaten 8.2.5'te tekrarlı rezonant kolon deneyi, normal ve aşırı konsolide karışımlarda kayma modülü, sönüm oranı ve boşluk suyu basıncı açısından tek bir rezonant kolon deneyi normal ve aşırı konsolide karışımlarla kendi içlerinde incelenmiştir. Aynı şekilde 8.2.6'da frekansın etkisi sadece burulmalı kesme deneyinde görüleceği için burada da %1 ile  $\pm 2.5$  arasındaki kayma modülü değişimi ile maksimum sönüm oranındaki değişim ve boşluk suyu basıncındaki değişim incelenmiştir. Bu sebeple bu bölümde Bölüm 8.2.3'te olduğu gibi tek bir rezonant kolon deneyi ve sonrasında 0.5Hz frekansta burulmalı kesme deneyi gerçekleştirilen karışımlarda aşırı konsolidasyon basıncının etkisi incelenmiştir.

Bölüm 6.3'te anlatılan dekantasyon işlemi ile ayrılan numuneler Bölüm 6.2'de anlatılan ıslak tokmaktama yöntemiyle 50kPa sıkışma enerjisinde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 20-25kPa'lık basınç farkında doyurma işlemine tabi tutulduktan sonra 4.4.2.2'de anlatıldığı şekilde 25kPa ve 50kPa basınç altında konsolide edilmişlerdir. Bu AKO'su 1 ve 2 olan numuneler elde edilmiştir. Elde edilen bu numunelerde AKO'nun dinamik parametrelere etkisi incelenmiştir.

### **8.3.1. Dinamik kayma modülüne etkisi**

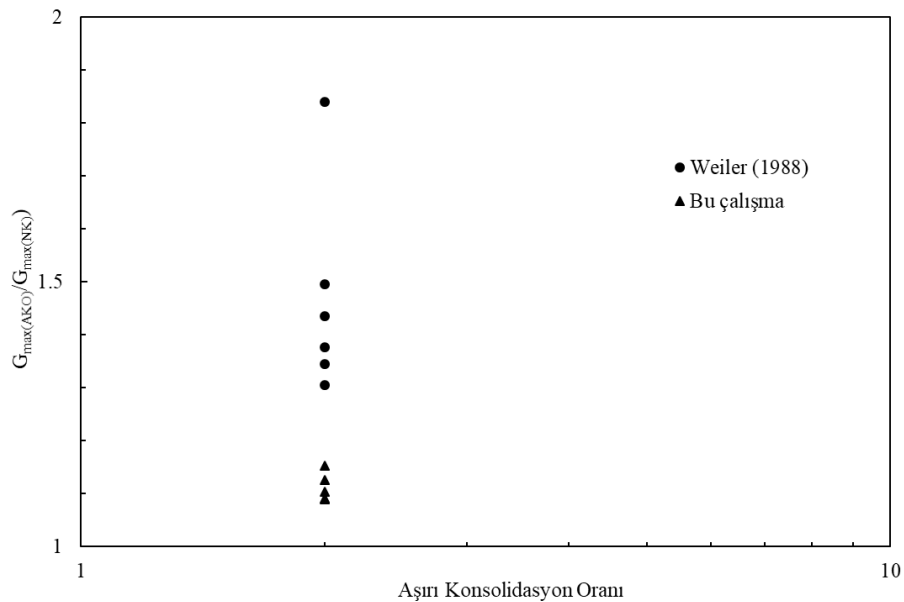
Hardin ve Drnevich (1972a) yaptıkları çalışmada kohezyonlu zeminlerin kayma modülü eğrilerinde konsolidasyon oranının az da olsa etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda elde edilen %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarına ait dinamik kayma modülleri aşırı konsolide ve normal konsolide numuneler için sırasıyla verilmiştir (Şekil 8.22-8.27).



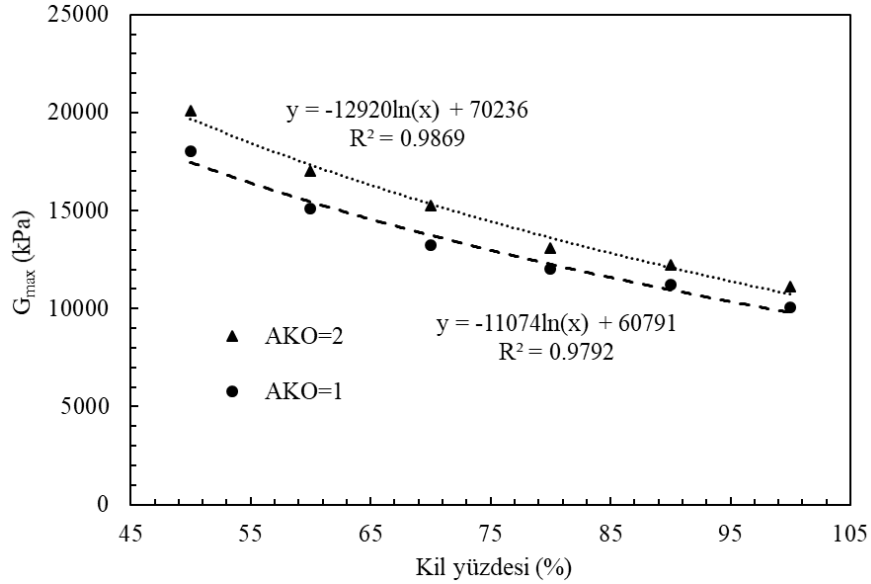


Dobry ve Vucetic (1988) çalışmalarında aşırı konsolidasyon oranı artışı ile maksimum dinamik kayma modülünün de arttığını ifade etmişlerdir. Aynı şekilde, Darendeli (2002) çalışmasında kaolin kili kullanarak kayma modülünün aşırı konsolide oranı değişimini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada aşırı konsolidasyon oranı arttıkça zeminin kayma modülünde artış gözlenmiştir.

Weiler (1988) çalışmasında killerde aşırı konsolidasyon oranının kayma modülüne etkisini araştırmıştır. 6 farklı kil kullanarak yaptığı incelemelerde aşırı konsolide durumdaki killerin kayma modüllerinin, normal konsolide killerin kayma modüllerine oranı aşırı konsolidasyon arttıkça artış göstermiştir. Araştırmacı bu 6 kil ortalama bir eğri çizerek, AKO ile kayma modülünün artışı arasında logaritmik bir ilişki olduğunu göstermiştir. Araştırmacının yapmış olduğu çalışmada kullandığı 6 kilin AKO'su 2'de iken kayma modülü oranı bu çalışma ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8.28) Her iki çalışmada da AKO 2 olduğu durumda kayma modülünde artış olduğu görülmüştür. Bu çalışmada bulunan sonuçlar aşırı konsolide zeminlerde maksimum kayma modülünün ( $G_{max}$ ) normal konsolide zeminin kayma modülüne kıyasla daha büyük olduğunu göstermiştir. Bu durum tüm karışımlar için aynı şekilde bulunmuştur (Şekil 8.29).

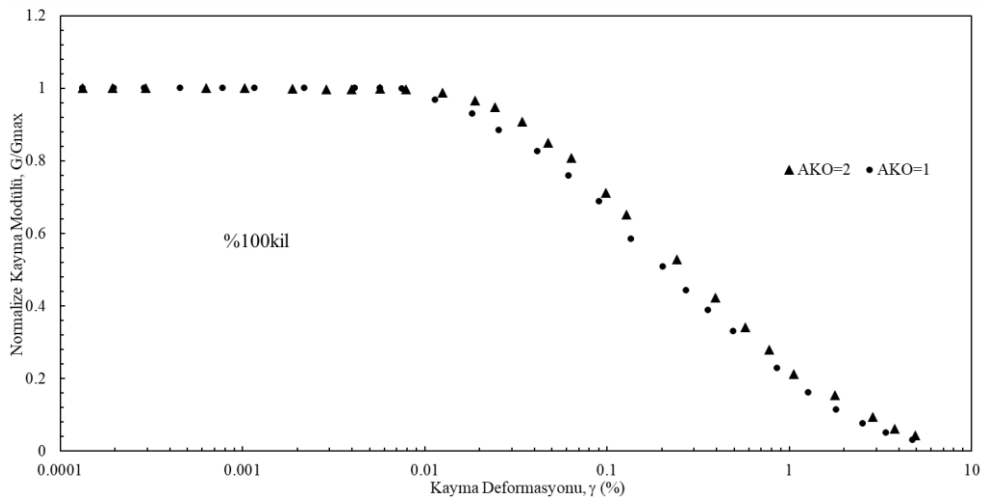


Şekil 8.28.: AKO'nun  $G_{max}$ 'a etkisinin incelenmesi

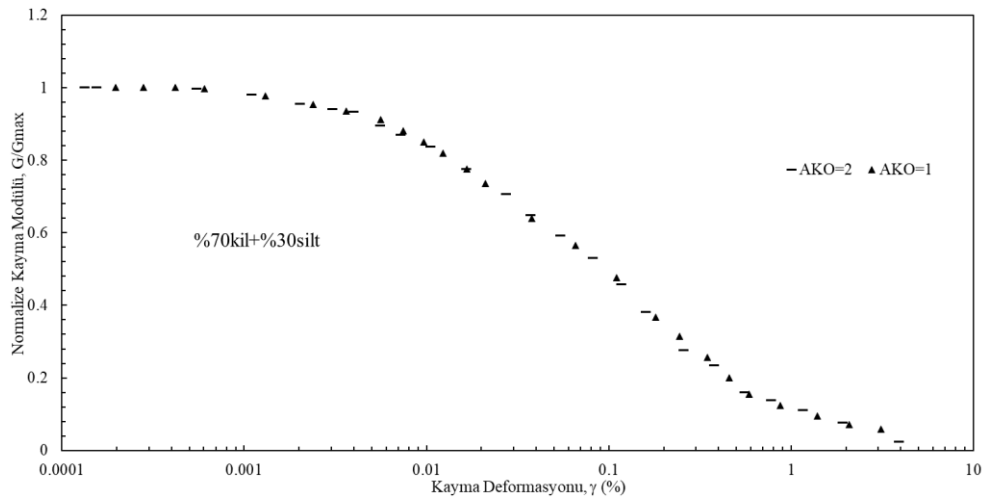
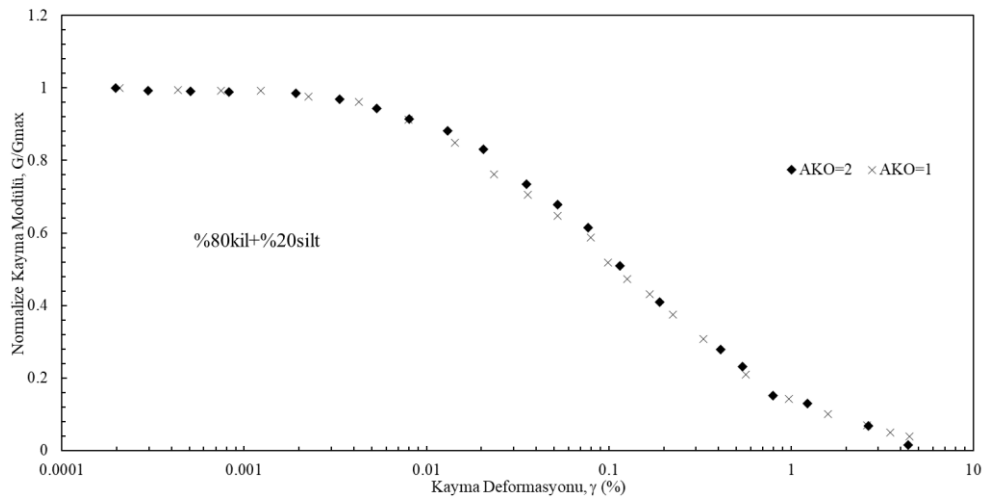
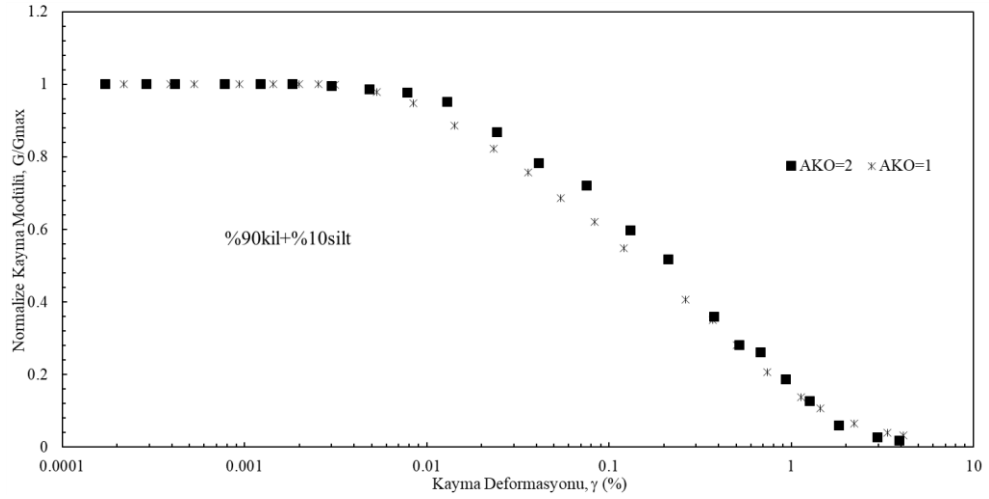


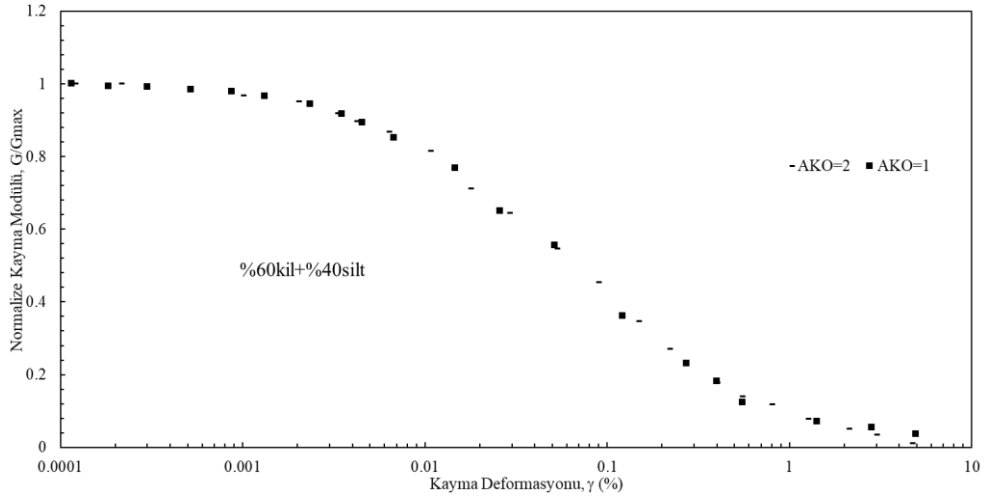
Şekil 8.29.:Kil yüzdesinin  $G_{max}$ 'a etkisi

Darendeli (2002) ise yapmış olduğu çalışmada elde ettiği sonuçlara göre normalize kayma modülü eğrisinde aşırı konsolide oranının çok da önemli olmadığını ifade etmiştir. Bununla birlikte, aşırı konsolidasyon oranının doğrusal olmayan zemin davranışları üzerinde bir etkisi olması gerektiği ve bir sonraki normalleştirilmiş modül azaltma ve malzeme sönümlenme eğrilerinin geliştirilmesinde mutlaka dikkate alınması gerektiğini söylemiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler kullanılarak %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarına ait normalize kayma modülü grafikleri verilmiştir (Şekil 8.30-8.35).

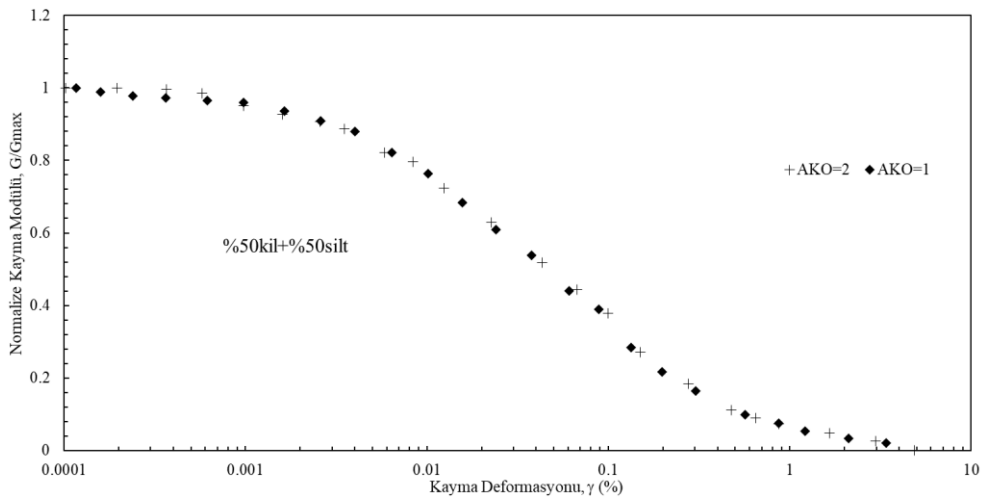


Şekil 8.30.:%100kilde AKO'nun  $G/G_{max}$ 'a etkisi





Şekil 8.34.: %60kil+%40siltte AKO'nun  $G/G_{max}$ 'a etkisi



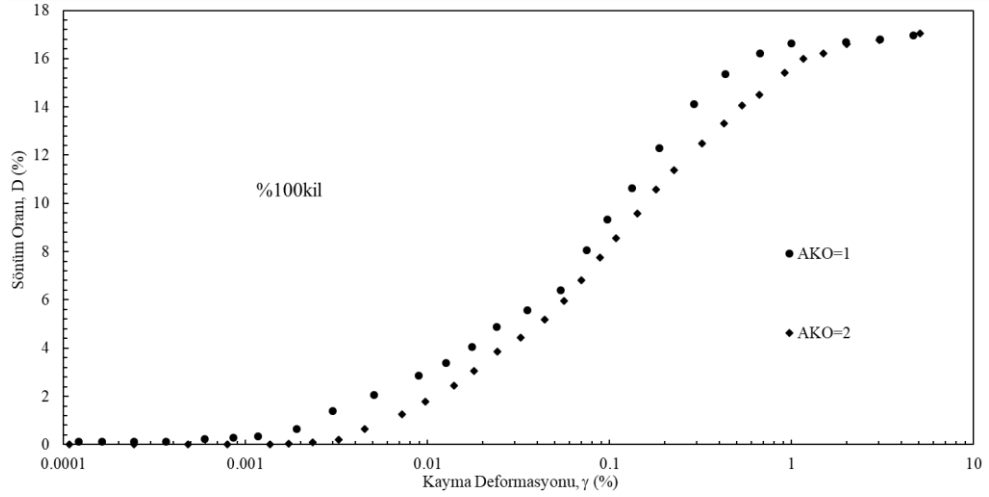
Şekil 8.35.: %50kil+%50siltte AKO'nun  $G/G_{max}$ 'a etkisi

Darendeli (2002) sonuçlarına benzer şekilde kil zemin içerisindeki silt oranı %20 oluncaya kadar yani %50kil+%50silt, %60kil+%40silt, %70kil+%30silt, %70kil+%20silt karışımları için normalize dinamik kayma modülü hem normal konsolide hem de aşırı konsolide zemin için aynı bulunmuştur. Ancak %80kil+%20silt, %90kil+%10silt ve %100kil karışımlarına ait normalize dinamik kayma modülünde ise farklılıklar görülmektedir. Literatürde daha önce dekantasyon yöntemiyle kil numunenin tamamının ayrılıp dinamik analizler yapıldığı bir çalışmayla daha önce karşılaşılmamıştır. Buradaki %90kil+%10silt ve %100kil karışımlarındaki normalize dinamik kayma modülüne aşırı konsolidasyon oranının etki etmesi zaten konsolidasyon kavramının zeminin içerisindeki kille bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Yani burada bulunan

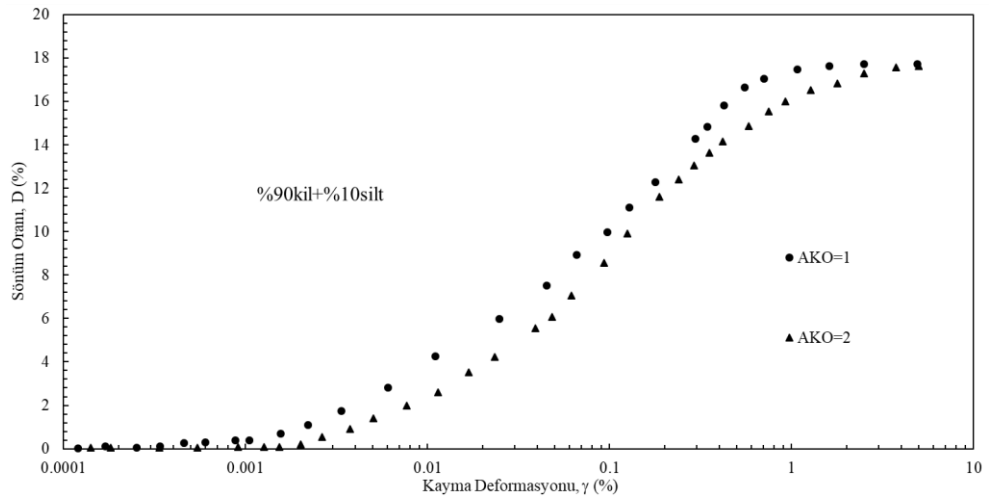
sonuca göre bir kil zeminin dinamik etkiler altında göstereceği davranış incelenirken mutlaka kil zeminin içerisindeki kilin de dikkate alınması gerekmektedir.

### 8.3.2. Sönüm oranına Etkisi

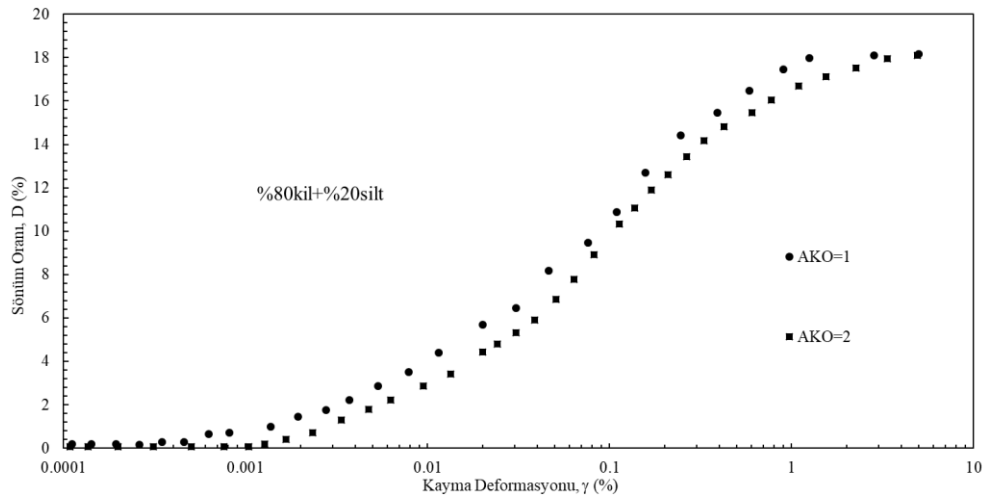
Hardin ve Drnevich (1972a) yaptıkları çalışmada kohezyonlu zeminlerin sönüm oranı eğrilerinde konsolidasyon oranının az etkisi olduğunu, Dobry ve Vucetic (1988) aşırı konsolidasyon oranının sönüm oranında bir etkisi olmadığını ve Darendeli (2002) ise sönüm oranı eğrisinde konsolidasyon oranının çok önemli olmadığını belirtmişlerdir. Ancak Darendeli (2002) normalize kayma modülü için söylemiş olduğu aşırı konsolidasyon oranının zemine ait doğrusal olmayan davranışları etkilemesi gerektiği ile ilgili sözünü sönüm oranı için de kullanmıştır. Bu çalışmada yapılan dinamik analizler sonucu elde edilen sönüm oranlarına ait eğriler %50kil+%50silt, %60kil+%40silt, %70kil+%30silt, %80kil+%20silt, %90kil+%10silt ve %100kil karışımları için sırasıyla verilmiştir (Şekil 8.36-8.41). Elde edilen sonuçlar maksimum sönüm oranında ( $D_{max}$ ) aşırı konsolidasyon oranının bir etkisi olmadığını göstermiştir. Aşırı konsolide oranı arttıkça sönüm oranı sabit kalmıştır. Bununla birlikte tıpkı normalize dinamik kayma modülü eğrilerinde olduğu gibi %50kil+%50silt, %60kil+%40silt ve %70kil+%30silt, karışımlarında sönüm oranı eğrileri hem normal hem de aşırı konsolide zeminler için aynı bulunmuştur. Ancak %80kil+%20silt, %90kil+%10silt ve %100kil ait karışımların ise sönüm oranı eğrilerinde  $D_{max}$  değişmese dahi eğrilerde farklılıklar görülmektedir. Bu karışımlarda AKO'su 1 olan killerde sönüm oranı eğrisi daha yüksek bir konumda yer almaktadır. Ancak sönüm oranı eğrilerindeki değişimin %100kil zeminde daha fazla AKO oranlarında incelenmesi bu konuda daha fazla veri ortaya koyulmasına yardımcı olacaktır.



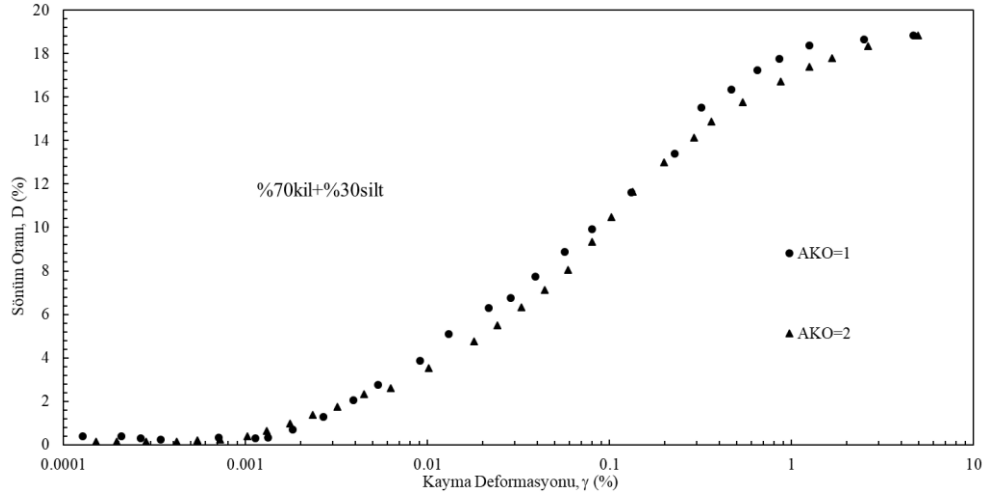
Şekil 8.36.: %100kilde AKO'nun D'ye etkisi



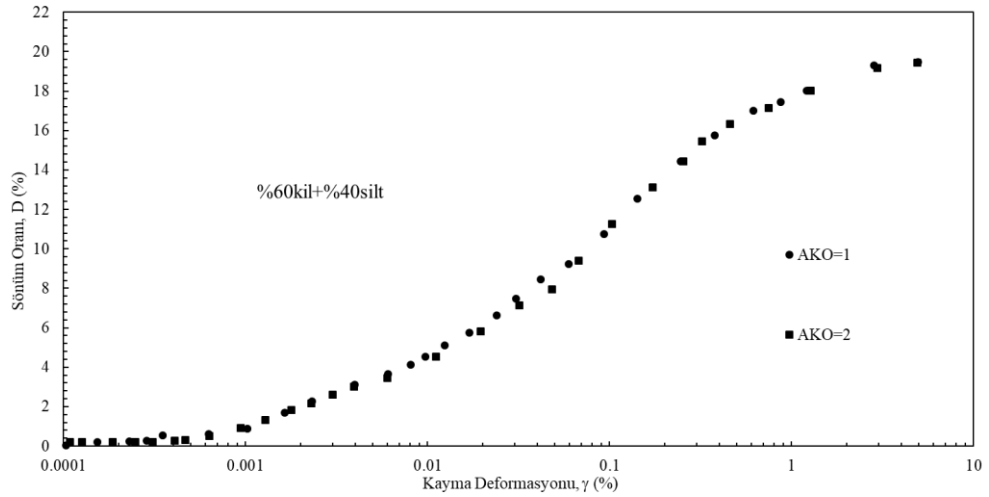
Şekil 8.37.: %90kil+%10siltte AKO'nun D'ye etkisi



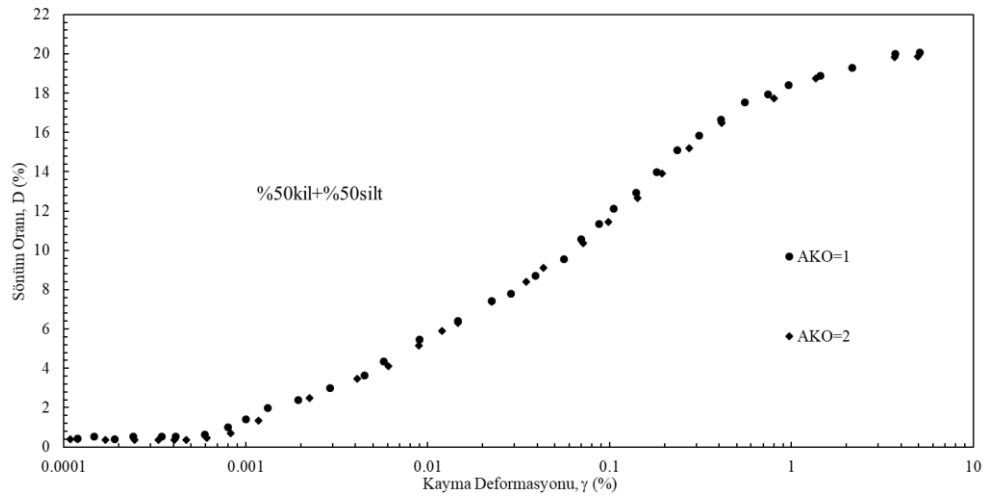
Şekil 8.38.: %80kil+%20siltte AKO'nun D'ye etkisi



Şekil 8.39.: %70kil+%30siltte AKO'nun D'ye etkisi



Şekil 8.40.: %60kil+%40siltte AKO'nun D'ye etkisi

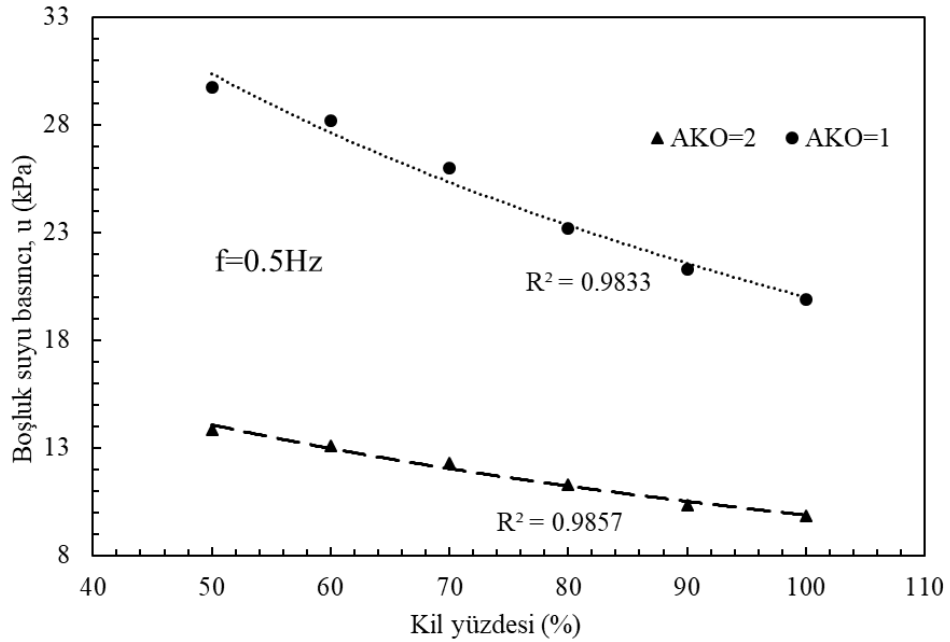


Şekil 8.41.: %50kil+%50siltte AKO'nun D'ye etkisi

### 8.3.3. Boşluk suyu basıncına etkisi

Boşluk suyu basınçları normal konsolide zeminlerde her zaman pozitif olup, bazı aşırı konsolide killerde aşırı konsolidasyon oranı arttıkça negatif olabilmektedir (Andersen vd., 1980; Matsui vd., 1980; Vucetic, 1988; Tan ve Vucetic, 1991; Matasovic ve Vucetic, 1992). Zeminlerdeki aşırı konsolidasyon oranı arttıkça drenajsız koşullarda dinamik etkilerle yüklenen zeminlerde boşluk suyu basınçları azalmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar bu konuda benzer davranışlar göstermektedir (Nieto Leal ve Kaliakin, 2013).

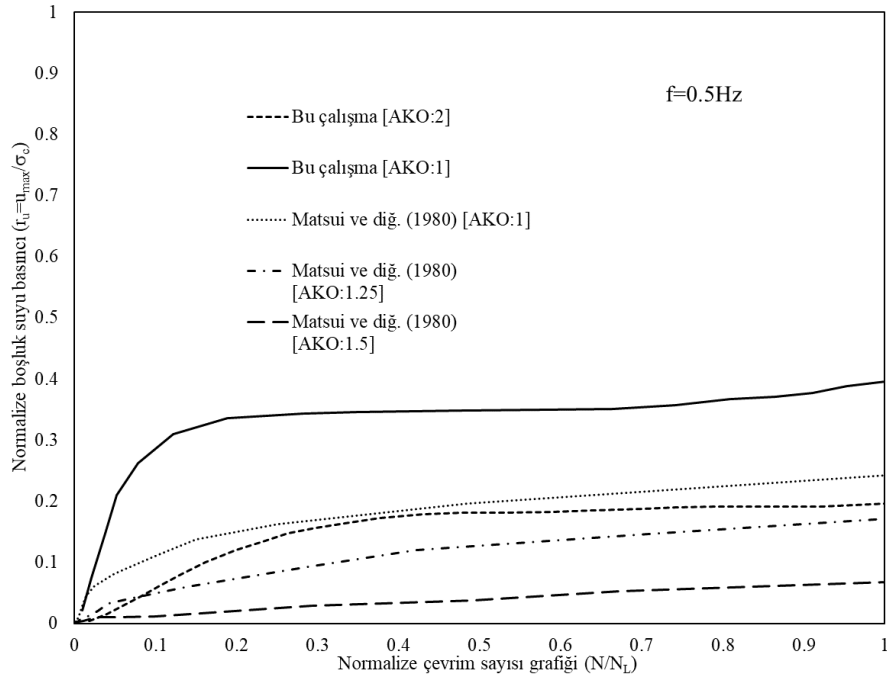
Bu çalışmada AKO'su 1 ve 2 olan zeminlerde yapılan drenajsız koşullardaki burulma kesme deneyinde aşırı konsolidasyon oranı arttıkça boşluk suyu basıncında azalma meydana gelmiştir (Şekil 8.42).



Şekil 8.42.:AKO ile u değişiminin incelenmesi

Matsui vd., (1980) plastisite indisi 55 olan kil zeminde aşırı konsolidasyon oranının boşluk suyu basıncı değişimine etkisini incelemiştir. Bu amaçlar AKO 1.5 ile 4 arasında değişen Senri kilini kullanarak drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deney sonucunda aşırı konsolidasyon oranı arttıkça dinamik yükler altında kil zeminlerde ortaya çıkan boşluk suyu basınçları azalmıştır. Araştırmacılar tarafından bulunan değerler bu çalışmada bulunan değerler ile

karşılaştırılmıştır (Şekil 8.43). Bu çalışmada bulunan normalize boşluk suyu basıncı değerleri daha büyük olsa da aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla boşluk suyu basıncındaki azalma benzer trendler göstermektedir.



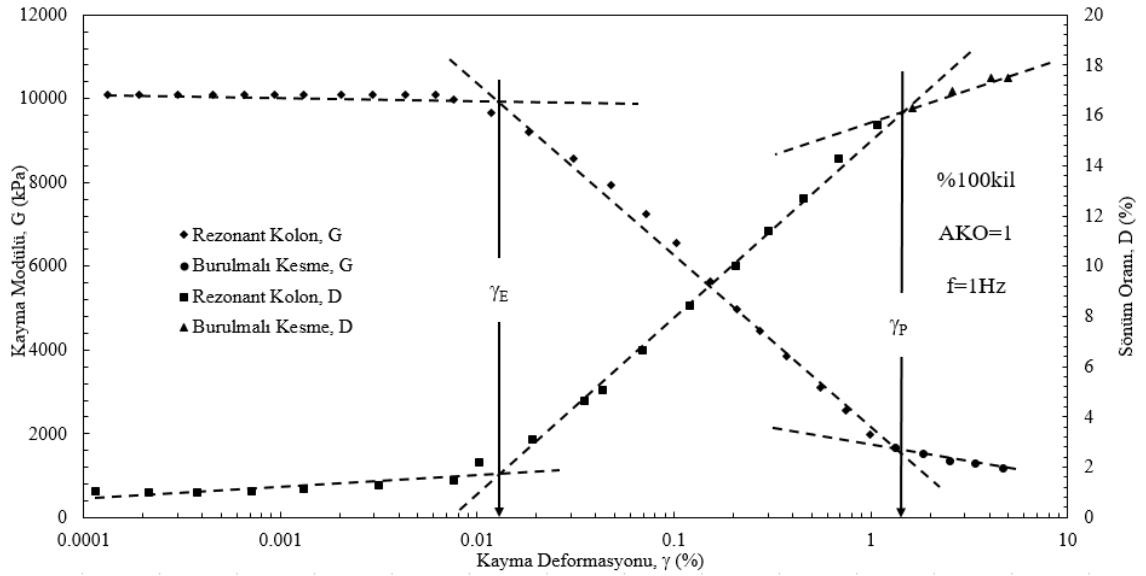
Şekil 8.43.:AKO ile  $r_u$  değişiminin incelenmesi

#### 8.4. Tekrarlı Rezonant Kolon Deneyinin Etkisi

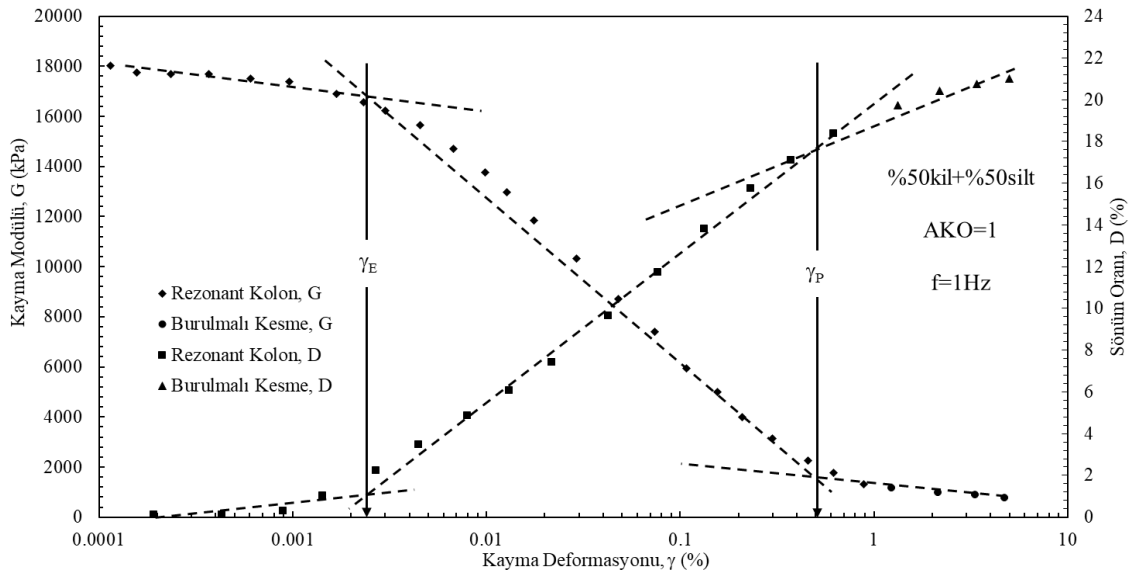
Bu çalışmada %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımları tekrarlı rezonant kolon deneyine ( $N=3$ ) tabi tutulmuştur. AKO'su 1 ve 2 olan zeminlerde 0.5Hz ile 1Hz frekanslarda deneyler tekrarlanmıştır. Burada AKO 1 olan ve 1Hz frekansta yapılan deney sonuçları literatür ile karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir.

##### 8.4.1. Dinamik kayma modülüne etkisi

Şekil 8.44 ve Şekil 8.45'te %100kil ve %50kil+%50silt karışımlarına ait kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri verilmiştir. Her iki şekil üzerinde de zeminlere ait elastik bölge ( $\gamma_E$  öncesi) elasto-plastik bölge ( $\gamma_E$  ile  $\gamma_P$  arası) ve plastik bölge ( $\gamma_P$  sonrası) gösterilmiştir. Burada elastik eşik birim deformasyonu  $\gamma_E$  ve plastik eşik birim deformasyonu  $\gamma_P$  göstermektedir.



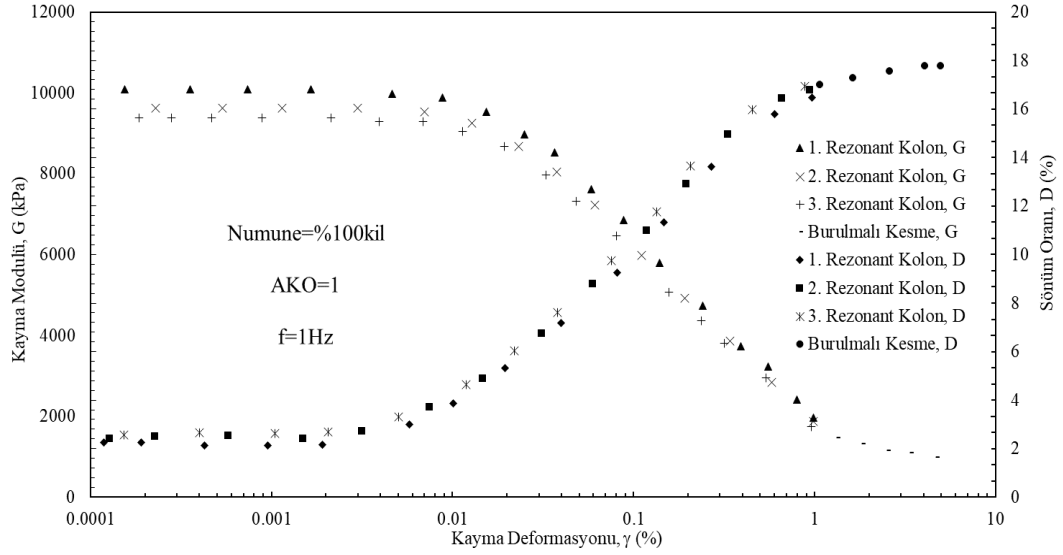
Şekil 8.44.: %100kil için deformasyon davranışı



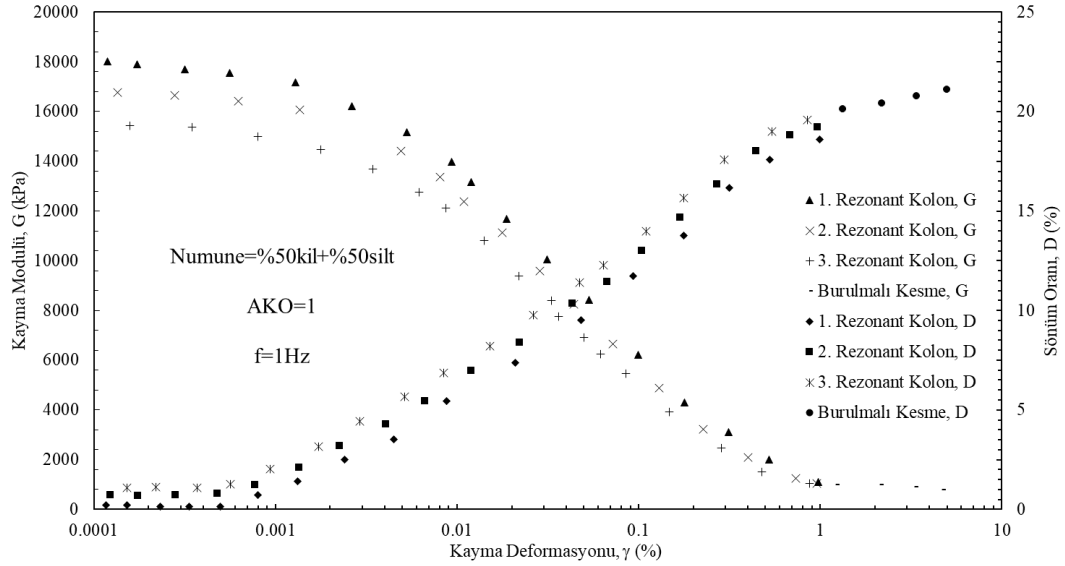
Şekil 8.45.: %50kil+%50silt için deformasyon davranışı

Eğriler incelendiğinde %100kil zemin için elasto-plastik bölgenin başlangıcının yaklaşık %0.012 olduğu ve plastik bölgenin başlangıcının ise yaklaşık %1.5 olduğu görülmektedir. %50kil+%50silt için ise elasto-plastik bölgenin başlangıcının yaklaşık %0.0025 olduğu ve plastik bölgenin başlangıcının ise yaklaşık %0.5 olduğu görülmektedir. Bu durum zemin içerisinde silt oranı azaldıkça daha yüksek çevrim sayısında ve kayma deformasyonunda kalıcı deformasyonlar oluşacağını göstermektedir. Kayma modülü eğrilerinde de bu durum görülmektedir. Zemin içerisinde silt oranı

azaldıkça, tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda kayma modülündeki azalma, %50kil+%50siltle kıyasla daha azdır (Şekil 8.46-8.47).



Şekil 8.46.:%100kilde 3RK deneyi ile bulunan dinamik parametreler



Şekil 8.47.:%50kil+%50siltte 3RK deneyi ile bulunan dinamik parametreler

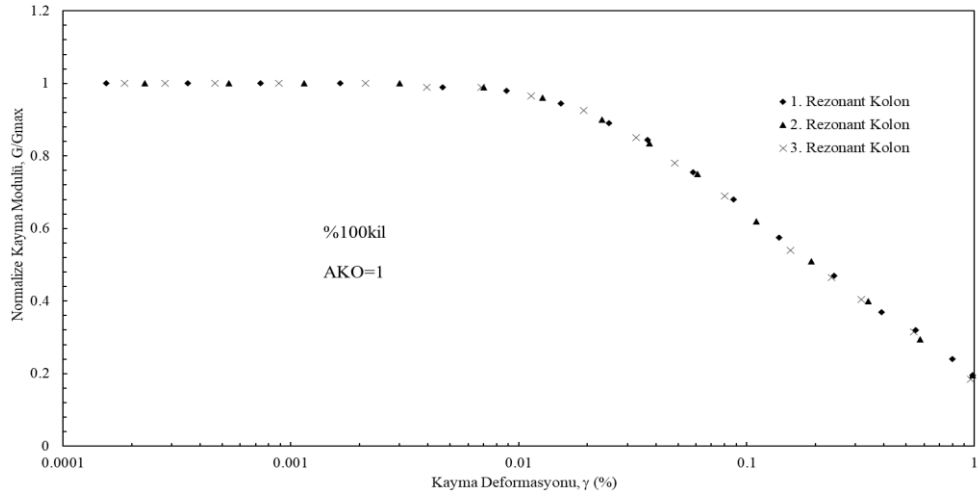
Rezonant kolon deneyinde karışımlar, plastik deformasyon oluşmasını sağlayabilecek %1 kayma deformasyonuna kadar tekrarlı gerilmeye maruz bırakılmıştır. Sonrasında gerçekleştirilen konsolidasyon dolayısıyla numunelerin kayma modüllerindeki azalma sınırlı kalmıştır. Ancak bu durum depreme maruz kalan zeminlerde yenilme gerçekleşmese de sonrasında ortaya çıkan boşluk suyu basınçları

sönümlense de zeminlerin dinamik kayma modüllerinin azaldığını ortaya koymuştur. Kısa süreli aralıklarda tekrarlı depremlere maruz kalabilecek zeminlerde yapılacak tasarımlarda bu durumun modellenmesi için son derece önemli olmaktadır. Burada her bir rezonant kolon deneyinden sonra numune yaklaşık 24 saat süren konsolidasyona bırakılmıştır. Ancak, %100kil zeminde ikinci rezonant kolon deneyinde kayma modülünde yaklaşık %4.5'lik ve üçüncü rezonant kolon deneyinde ise ilk duruma göre kayma modülünde yaklaşık %7'lik bir azalma meydana geldiği görülmektedir. %50kil+%50silt zeminde ise ikinci rezonant kolon deneyinden sonra kayma modülünde yaklaşık %7, üçüncü rezonant kolon deneyinden sonra ise kayma modülünde toplamda yaklaşık %15'lik bir azalma meydana gelmiştir.

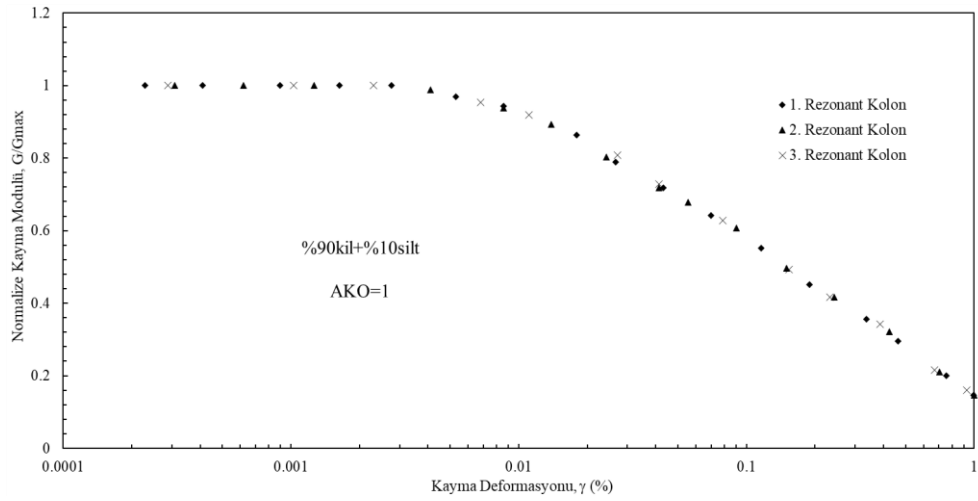
Okur (2002) yapmış olduğu çalışmada çevrim sayısının etkisini görebilmek amacıyla dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmada yaklaşık %0.7 kayma deformasyonu oluşan numunede 3. çevrimden sonra normalize dinamik kayma modülü eğrisinde az da olsa farklılıklar olduğunu belirtmiştir.

Darendeli (2001) çalışmasında siltli kum zeminlerde rezonant kolon ve burulmalı kesme cihazı kullanarak çevrim sayısının etkisini incelemiştir. %0.1 kayma deformasyonuna kadar yüklenen zeminde normalize kayma modülü eğrisine çevrim sayısının çok önemli olmadığını belirtmiştir.

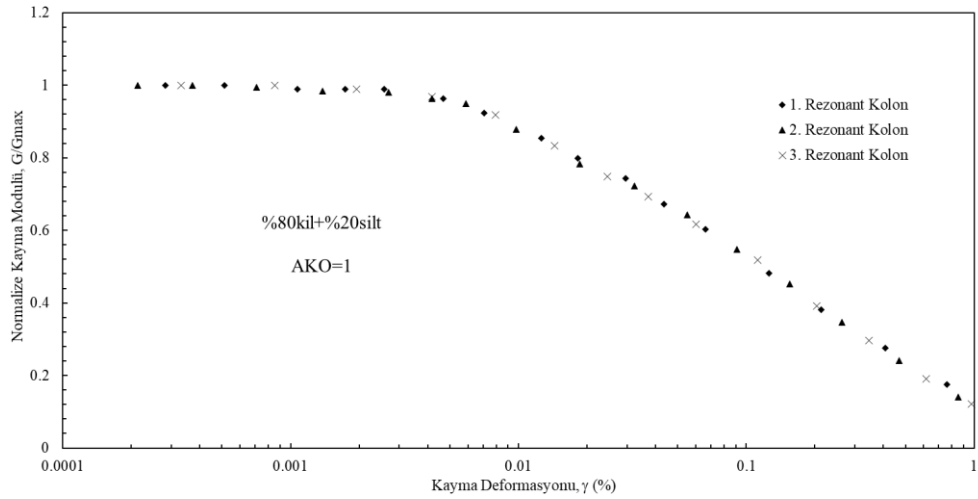
Bu çalışmada, %1 kayma deformasyonuna kadar tekrarlı rezonant kolon deneyine tabi tutulan zeminlerin normalize kayma modülü eğrileri bulunmuştur (Şekil 8.48-8.53). Yapılan analizler sonucunda kullanılarak %100kil, %90kil+%10silt ve %80kil+%20silt karışımlarında her rezonant kolon deneyi için normalize kayma modülü eğrileri aynı bulunmuştur. %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarında ise rezonant kolon deneylerinin normalize kayma modülü eğrilerinde çok az farklılıklar görülmektedir. Bunun sebebi, bu karışımları %1 kayma deformasyonunda plastik bölgede olmasından kaynaklanmaktadır.



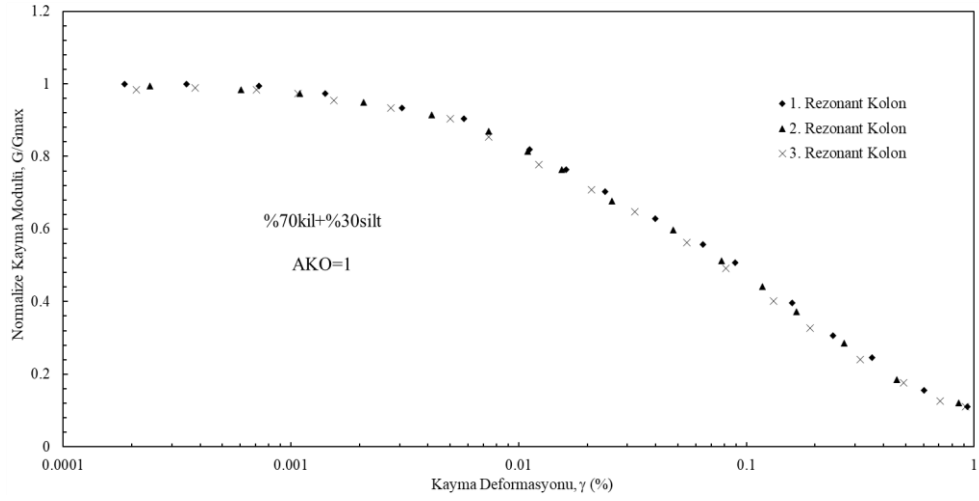
Şekil 8.48.:% 100kilde 3RK deneyi sonucunda  $G/G_{max}$  eğrisi



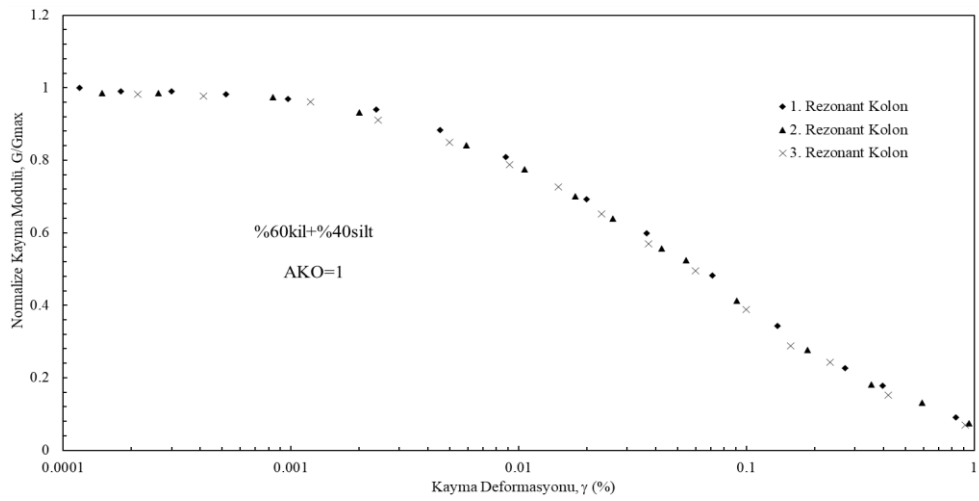
Şekil 8.49.:% 90kil+% 10siltte 3RK deneyi sonucunda  $G/G_{max}$  eğrisi



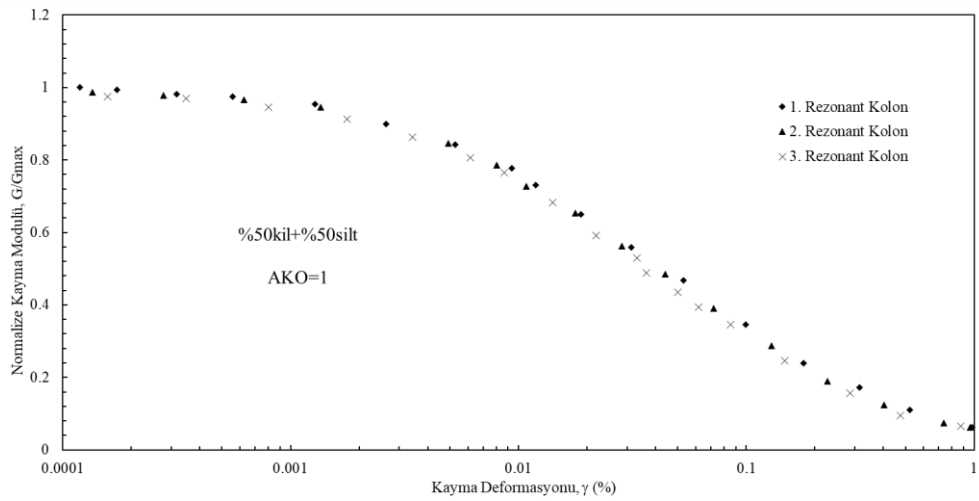
Şekil 8.50.:% 80kil+% 20siltte 3RK deneyi sonucunda  $G/G_{max}$  eğrisi



Şekil 8.51.: %70kil+%30siltte 3RK deneyi sonucunda  $G/G_{max}$  eğrisi



Şekil 8.52.: %60kil+%40siltte 3RK deneyi sonucunda  $G/G_{max}$  eğrisi



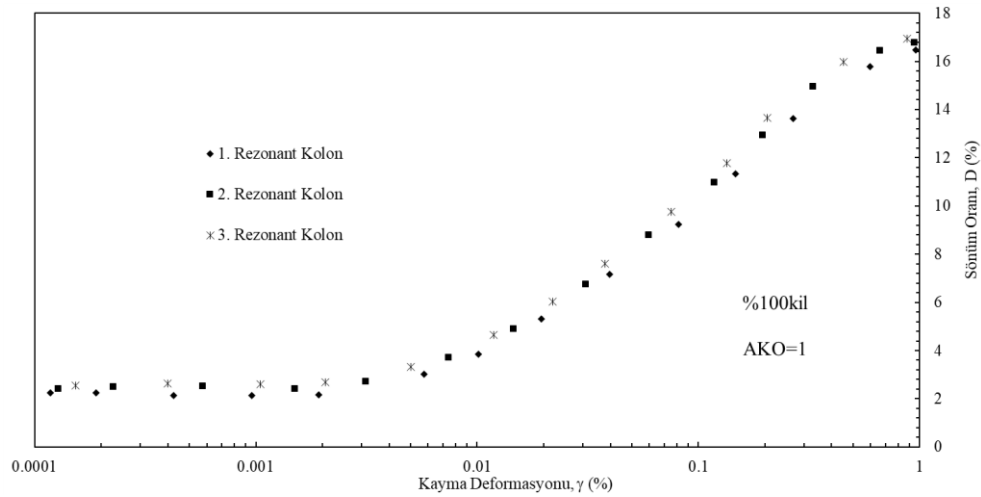
Şekil 8.53.: %50kil+%50siltte 3RK deneyi sonucunda  $G/G_{max}$  eğrisi

#### 8.4.2. Sönüm oranına etkisi

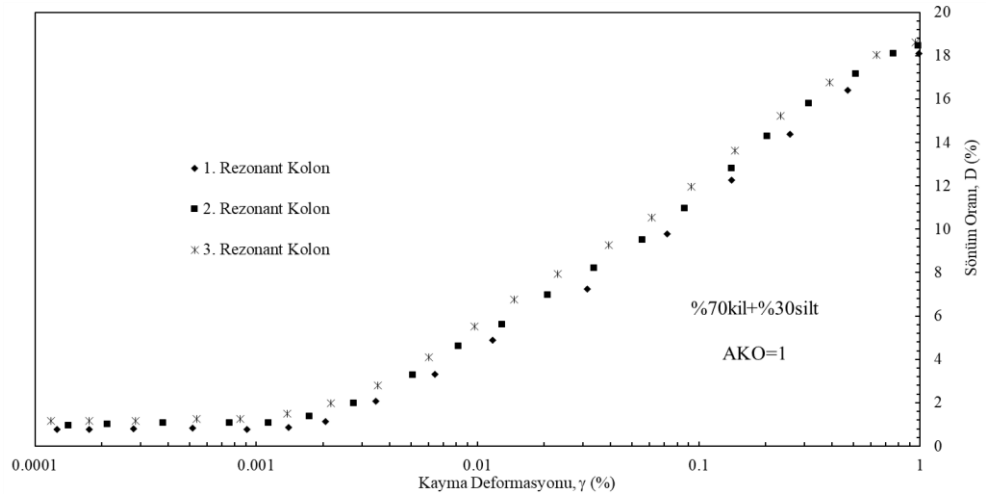
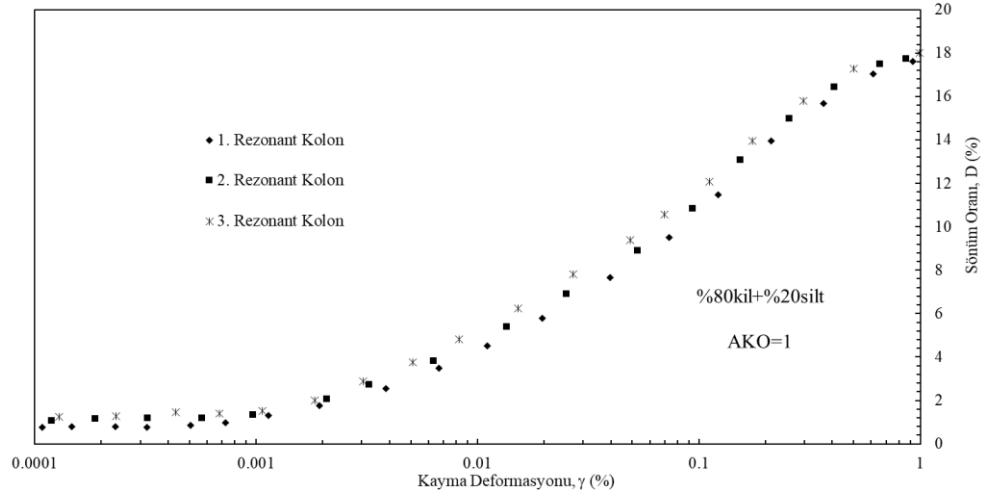
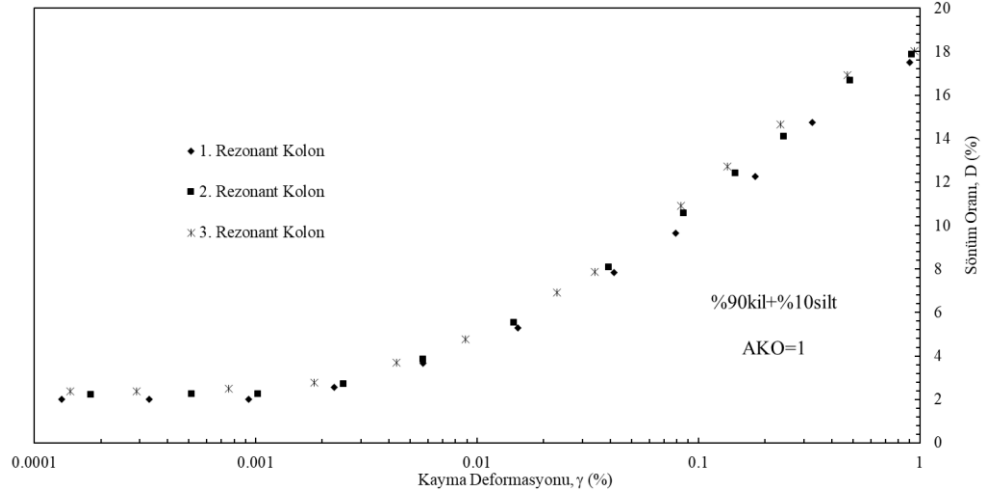
Hardin ve Drenvich (1972a), Stoke vd., (1998, 1999) ve Darandeli (2001) yaptıkları çalışmalar sonucunda hem kohezyonsuz zeminlerde hem de kohezyonlu zeminlerde çevrim sayısının sönüm oranı açısından çok önemli olduğunu belirtmişlerdir.

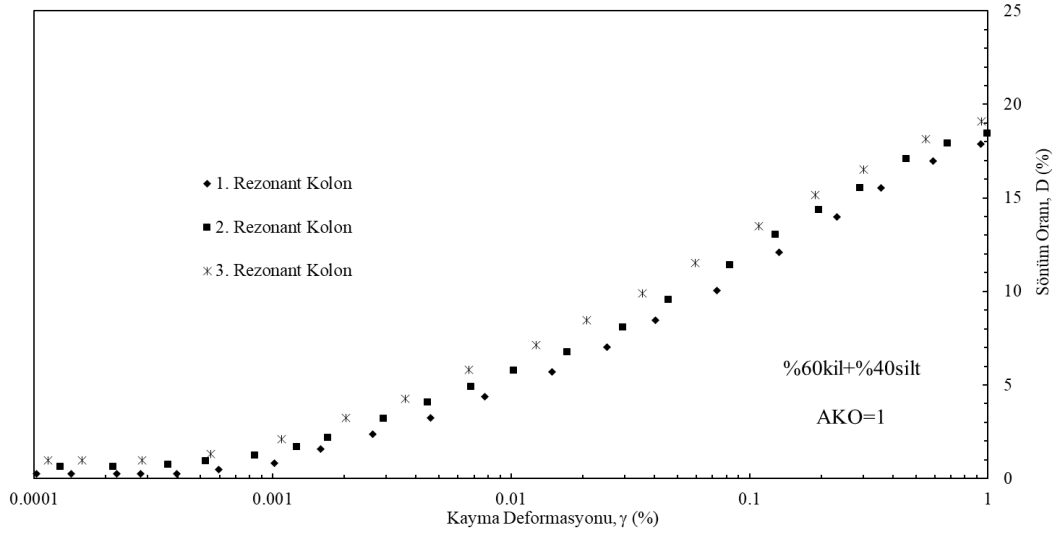
Okur (2002) yapmış olduğu çalışmada kohezyonlu zeminler kullanarak çevrim sayısının sönüm oranı eğrisine etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada çevrim sayısı arttıkça sönüm oranının arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada tüm karışımlar için rezonant kolon deneyi sayısı arttıkça sönüm oranında artış meydana gelmiştir (Şekil 8.54-8.59). Sönüm oranlarında elastik bölge, elasto-plastik bölge ve plastik bölge Şekil 8.44 ve Şekil 8.45'te görülmektedir. Yapılan tekrarlı rezonant kolon deneyi ile tekrar sayısının artmasıyla sönüm oranı eğrilerinde artış görülmüştür. Bununla birlikte normalize kayma modülü davranışına benzer şekilde %100kil, %90kil+%10silt ve %80kil+%20silt karışımlarında sönüm oranları eğrileri birbirine oldukça yakın çıkmıştır ancak yine de bir yükselme gözlenmektedir. %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarında ise tekrarlı rezonant kolon deneyinin sönüm oranına etkisi açık şekilde görülmektedir.

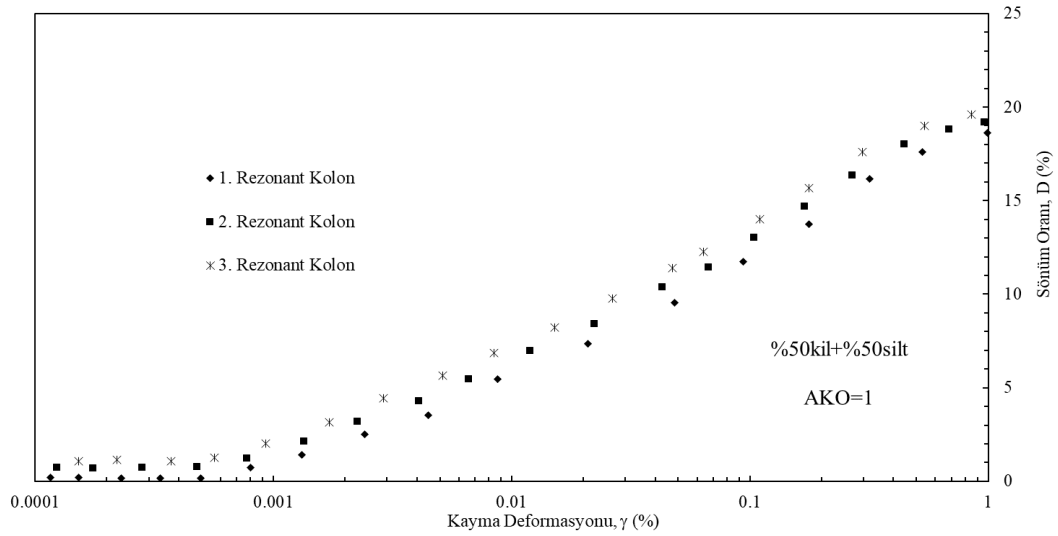


Şekil 8.54.: %100kilde 3RK deneyi sonucunda D eğrisi





Şekil 8.58.:%60kil+%40siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi

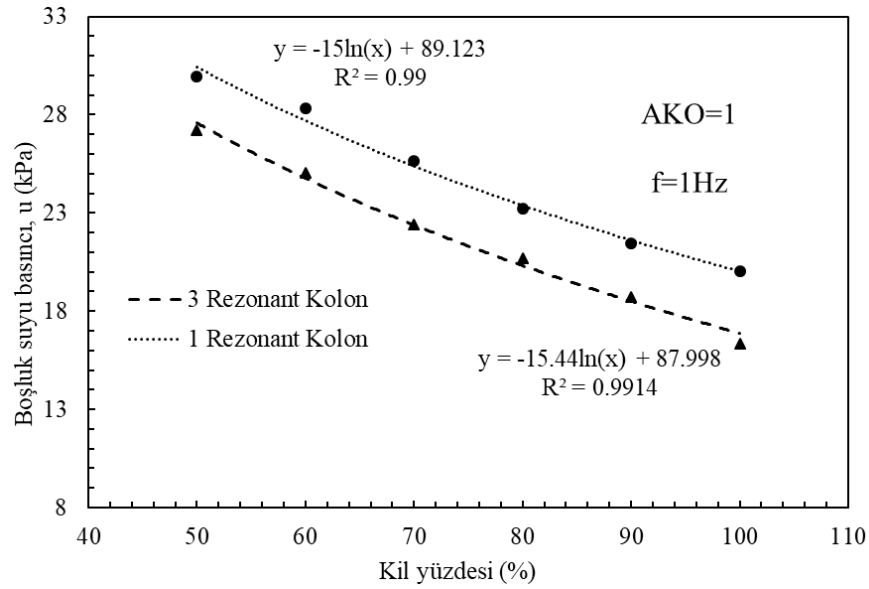


Şekil 8.59.:%50kil+%50siltte 3RK deneyi sonucunda D eğrisi

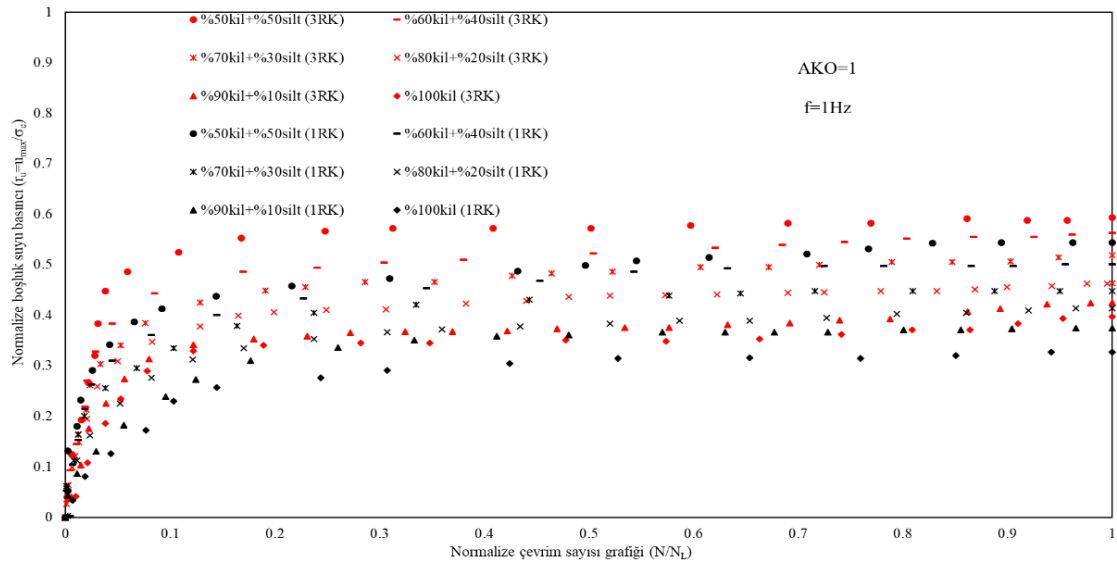
#### 8.4.3. Boşluk suyu basıncına etkisi

Bu çalışmada tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda her bir rezonant kolon deneyinde dinamik kayma modülünde azalma meydana gelmiştir. Buna paralel olarak burulmalı kesme deneyinde ise tüm karışımlarda boşluk suyu basınçlarında tek rezonant kolon deneyine kıyasla bir miktar artış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8.60). Bu artış %100kil karışımında en az %50kil+%50silt en fazla olarak gerçekleşmiştir (Şekil 8.60). Bu durum hem AKO'su 1 ve 2 olan zeminlerde hem de 0.5Hz ve 1Hz frekanslarda aynı şekilde olmuştur. Ayrıca karışımlara ait normalize boşluk suyu basıncı eğrileri de karşılaştırılmıştır. 3 kere rezonant kolon deneyine tabi tutulan numunelerde boşluk suyu

basıncındaki yükselmenin 1 kere rezonant kolon deneyi yapılan numunelere kıyasla daha hızlı olduğu görülmüştür (Şekil 8.61). Bu durum numunede meydana gelen yumuşamadan ve oluşan birikimli deformasyonlardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.60.:Tekrarlı RK deneyinin boşluk suyu basıncına etkisi



Şekil 8.61.:Tekrarlı RK deneyinin normalize boşluk suyu basıncına etkisi

## 8.5. Yükleme Frekansının Etkisi

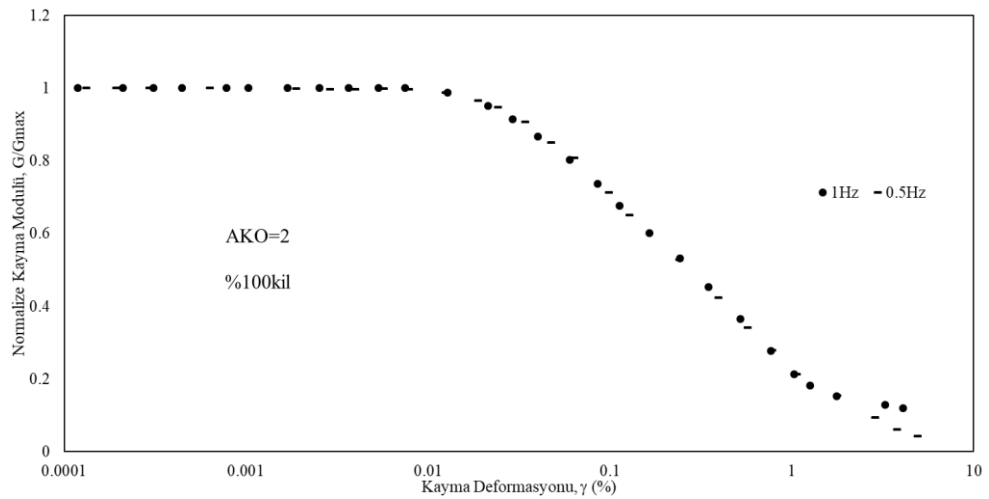
Bu çalışmada yükleme frekansının etkisinin görülmesi amacıyla 0.5Hz ve 1Hz frekanslarda tüm karışımlarda burulmalı kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. %1 kayma

deformasyonuna kadar rezonant kolon deneyi ile dinamik etkilere bırakılan karışımlar %1 ile  $\pm 2.5$  birim arası kayma deformasyonuna kadar burulmalı kesme deneyi ile dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlarla frekansın zeminlerdeki etkisi incelenmiştir. Hem farklı aşırı konsolide oranları için hem de tekrarlı rezonant kolon deneyleri için yapılan deneylerde benzer trendler görüldüğü için burada sadece AKO 2 olan ve tek bir rezonant kolon deneyi yapılan numunelerde frekansın etkisi tartışılmıştır.

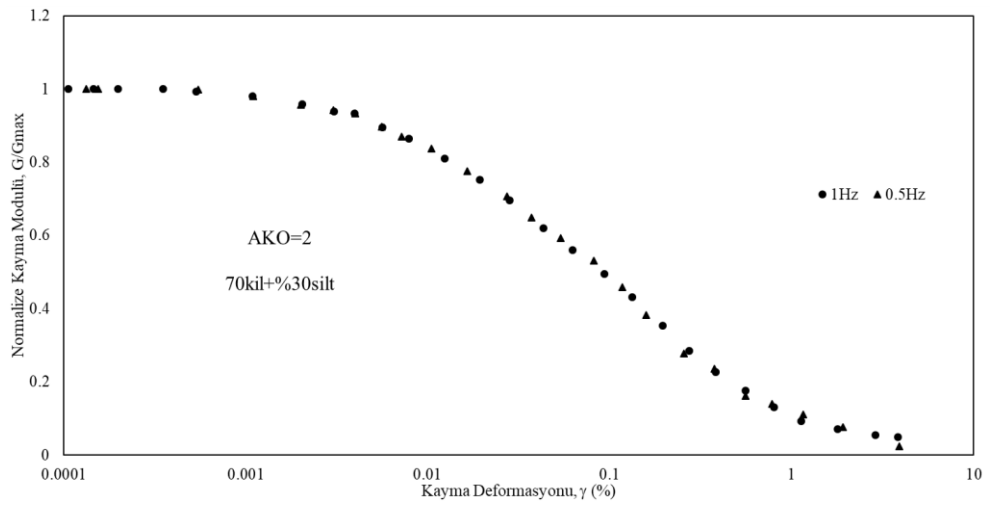
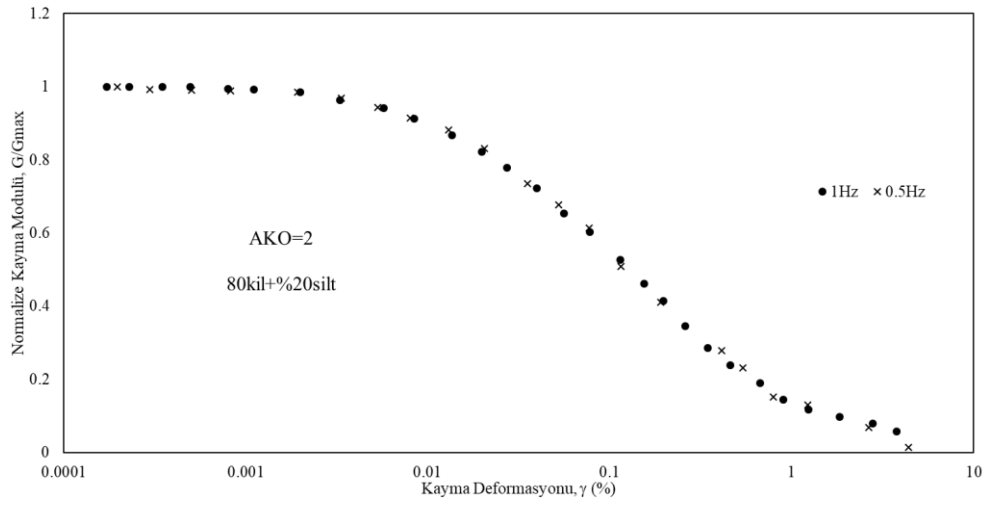
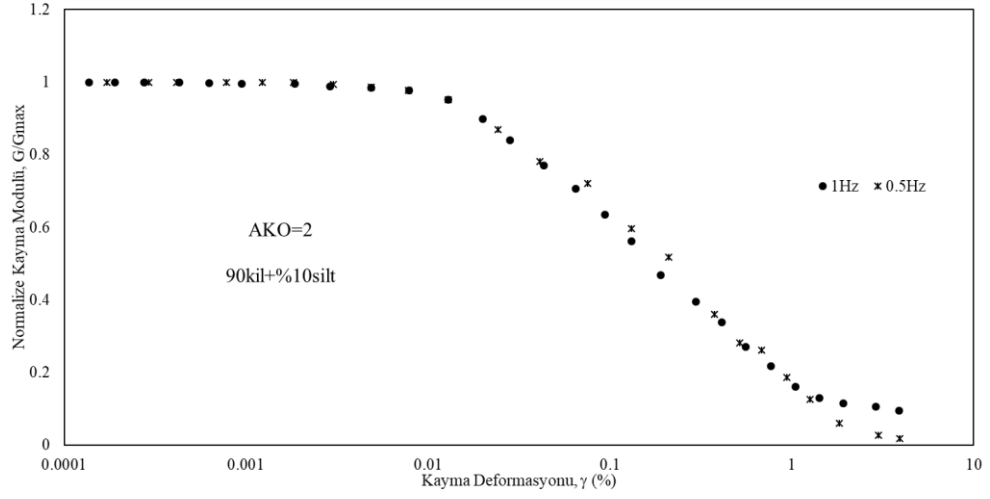
### 8.5.1. Dinamik kayma modülüne etkisi

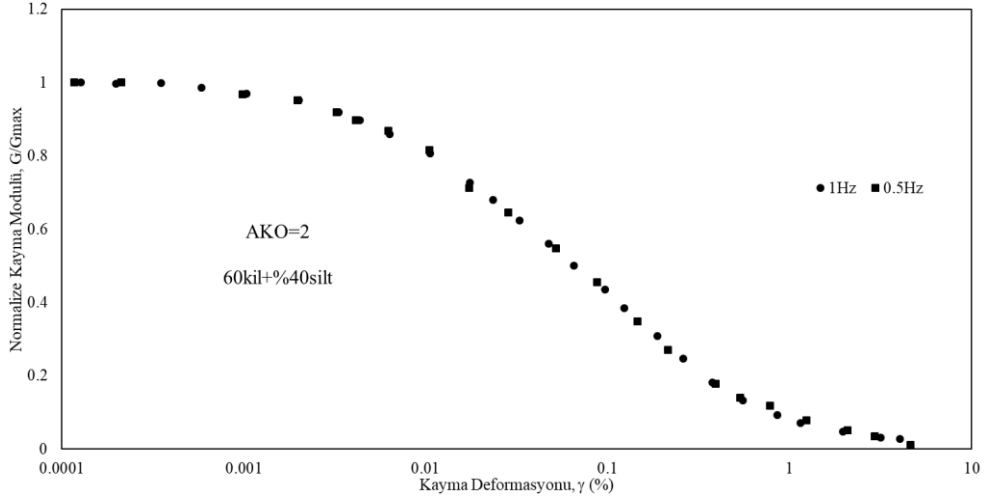
Hardin ve Drenvich (1972a) yapmış olduğu çalışma sonucunda 0.1Hz üzerindeki frekansın zeminlerin kayma modülü üzerinde etkisi olmadığını söylemiştir. Darandeli (2001) yaptığı çalışmalar sonucunda frekansın etkisinin zemin tipine ve plastisite oranına bağlı olduğunu söylemiştir ve 1Hz frekansın üzerinde frekansın normalize kayma modülü eğrisi üzerinde az da olsa etkisi olduğunu belirtmiştir.

Bu çalışmada, AKO 2 olan zeminlerde frekansın etkisi incelenmiştir. %100kil ve %90kil+%10silt zeminlerde frekansın etkisiyle normalize kayma modülü eğrilerinde az da olsa bir fark görülmektedir (Şekil 8.62-8.63). %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarında ise normalize kayma modülü eğrileri birbirine çok yakındır (Şekil 8.64-8.67).

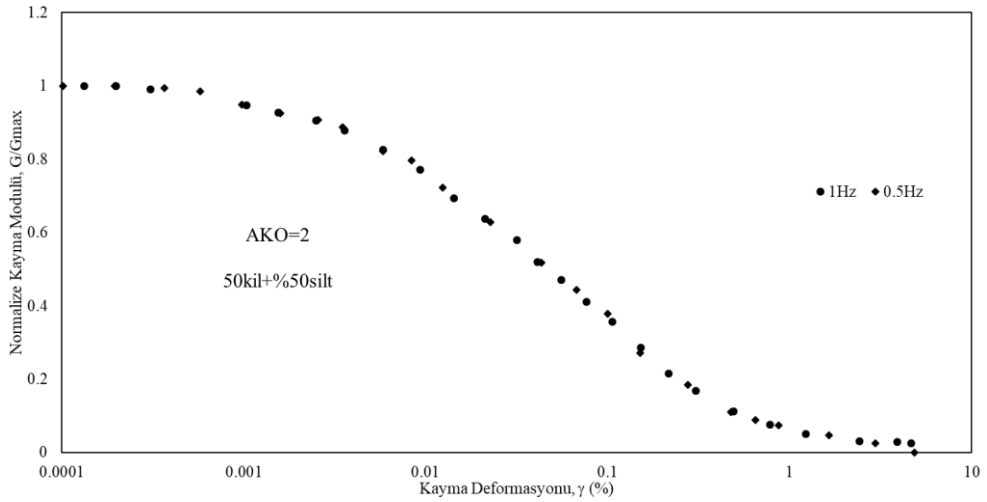


Şekil 8.62.:%100kilde frekansın  $G/G_{max}$ 'a etkisi





Şekil 8.66.: %60kil+%40siltte frekansın  $G/G_{max}$ 'a etkisi

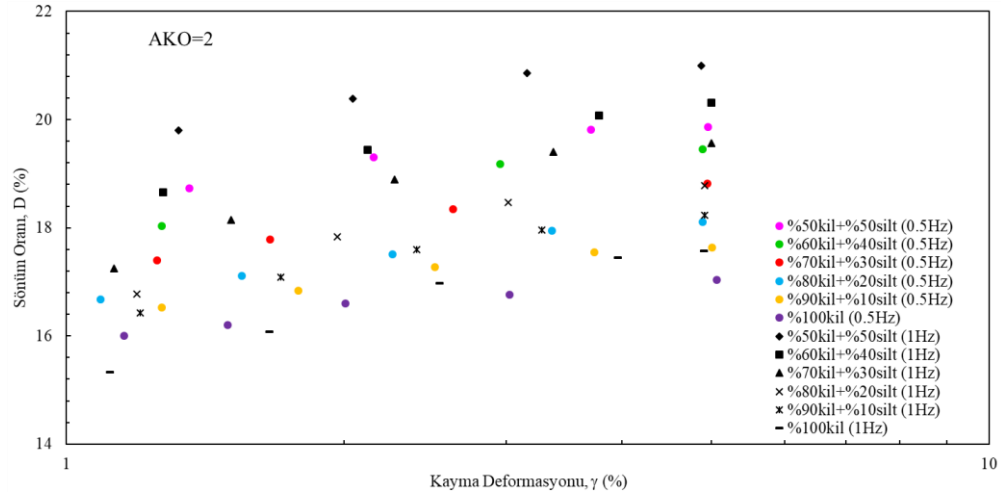


Şekil 8.67.: %50kil+%50siltte frekansın  $G/G_{max}$ 'a etkisi

### 8.5.2. Sönüm oranına etkisi

Hardin ve Drenvich (1972a) kohezyonlu zeminlerde sönüm oranı eğrisine 0.1Hz frekansın üzerindeki frekansların etkisinin önemli olduğunu söylemiştir. Darendeli (2001) 1Hz ve üzerindeki frekansların sönüm oranı eğrisine etkisinin önemli olduğunu belirtmiştir. Teachavorasinskun vd., (2002) yaptıkları çalışmada örselenmemiş Bangkok kilini kullanarak bu zeminde frekansın sönüm oranını üzerine etkisini dinamik üç eksenli deneyi ile incelemiştir. Çalışma sırasında yükleme frekansının ve dinamik gerilme geçmişinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisine bakıldığında; 0,1 Hz'den 1 Hz'e olan frekans artışı kayma modülü üzerinde herhangi bir etkiye sebep olmamasına rağmen sönümlenme değerinde küçük bir artışa sebep olmuştur.

Bu çalışmada yapılan analizlerde de frekansın değerinin artmasıyla sönüm oranında bir miktar artış gözlenmiştir (Şekil 8.68). Bu artış zemin içerisindeki silt oranı azaldıkça, azalış göstermiştir.



Şekil 8.68.:Karışımlarda frekansın sönüm oranına etkisi

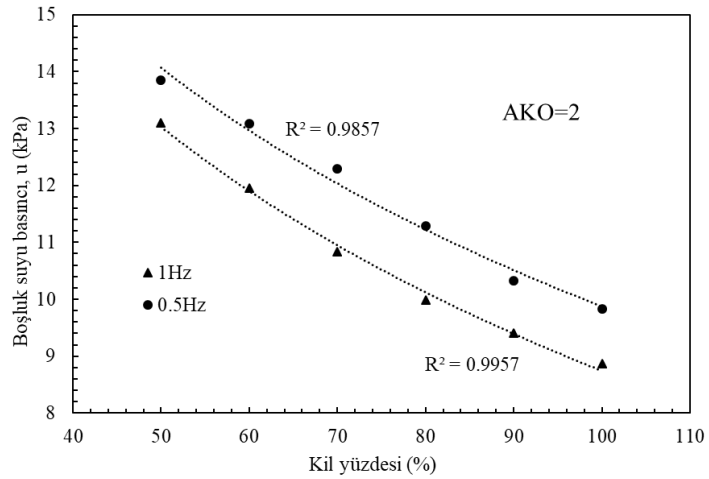
### 8.5.3. Boşluk suyu basıncına etkisi

Literatürde yapılan çalışmalar artan çevrim sayısının yükleme frekansının etkisini azalttığını ortaya koymuştur. Kohezyonlu zeminler yüksek frekanslarda yüklendiğinde düşük frekanslara göre daha yüksek mukavemet göstermiştir. Yapılan çalışmalarda düşük frekanslarda daha büyük kayma deformasyonları ve daha büyük boşluk suyu basınçları ortaya çıkmıştır (Ishihara ve Yasuda, 1980; Matsui, T. Vd., 1980; Procter ve Khaffaf, 1984; Lebevre ve LeBoeuf, 1987; Ansal ve Erken, 1989; Lebevre ve Pfendler, 1996; Zhou ve Gong, 2001; Mesri, 2013).

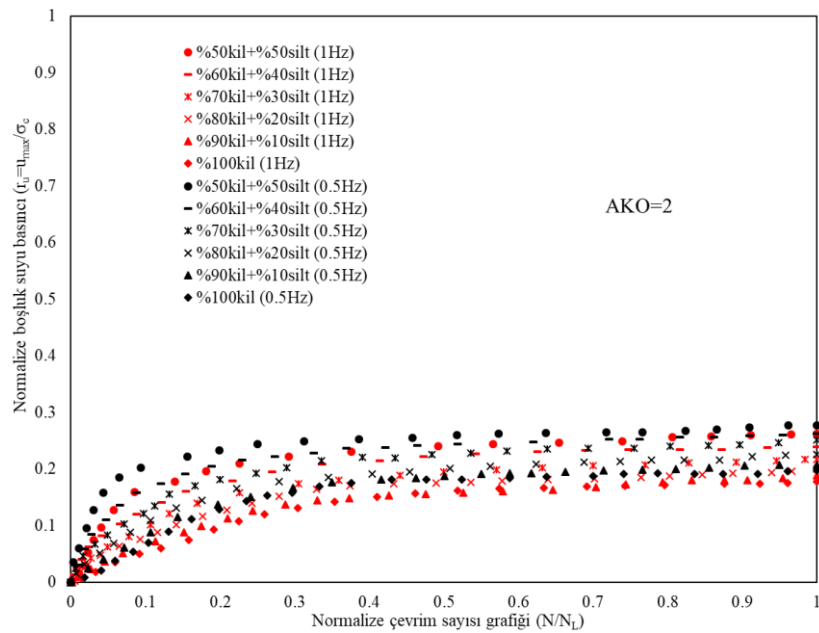
Matsui ve diğ. (1980) normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde frekansın drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncı üzerine etkisini incelemiştir. Belirli bir sayıda çevrim için, daha düşük frekanslarda daha yüksek aşırı boşluk basınçları ve eksenel deformasyonlar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ansal ve Erken (1989) ile Zhou ve Gong (2001), kil zeminlerde frekansın yumuşama parametresine etkisini incelemiştir. Yükleme frekansı azaldıkça killerdeki yumuşama etkisinin arttığını gözlemlemiştir.

Bu çalışmada frekansın etkisinin gözlenmesi amacıyla 0.5 ve 1Hz frekanslarda burulmalı kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda frekans değeri arttıkça daha düşük boşluk suyu basınçları bulunmuştur. Ayrıca numuneler Bölüm 7'de

belirtildiği üzere 1Hz frekansta (25 çevrim) 0.5Hz frekansa (23 çevrim) kıyasla daha yüksek çevrim sayısında yenilmişlerdir ve 1Hz frekansta (8kPa) 0.5Hz frekansa (6kPa) kıyasla daha yüksek gerilmelerde yenilmeye uğramışlardır. Burulmalı kesme deneyinde boşluk suyu basınçları 1Hz frekanslarda 0.5Hz frekansa kıyasla daha düşük bulunmuştur (Şekil 8.69). Normalize boşluk suyu basıncı grafiğinde de 1Hz frekansta yapılan deneylerde karışımlardaki boşluk suyu basıncının maksimuma ulaşması için daha uzun çevrim sayısı gerektiği görülmektedir (Şekil 8.70).



Şekil 8.69.:Karışımlarda frekansın boşluk suyu basıncına



Şekil 8.70.:Karışımlarda frekansın normalize boşluk suyu basıncına etkisi

## 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kil zeminlerin dinamik etkiler altında davranışı incelenmiştir. Bu amaçla Söğüt Seramik fabrikasından temin edilen İstanbul kili kullanılmıştır. Kil zeminde yapılan hidrometre deneyi sonucunda kilin içerisinde %78 oranında kil ve %22 oranında silt olduğu görülmüştür. Kil zeminin likit limiti 51, plastik limiti 23 ve zemin sınıfı CH olarak bulunmuştur. Kil zeminlerin içerisinde yer alan silt oranının dinamik gerilme şekil değiştirme ve mukavemet parametrelerine etkisinin incelenmesi adına kil zemin içerisindeki kil ve silt, dekantasyon yöntemiyle ayrılmıştır. Bu sayede %100kil ve %100siltten oluşan numune elde edilmiştir.

Ayrılan numuneler ağırlıkça %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt, %50kil+%50silt oranlarında karıştırılmıştır. Elde edilen karışımların plastisite indisi silt oranı azaldıkça artmıştır. Kullanılan numunelerin plastisite indisi 17 ile 39 arasındadır. Zemin sınıfı ASTM D2487-11 standardına göre, 100kil, %90kil+%10silt ile %80kil+%20silt karışımları için CH ve 70kil+%30silt, %60kil+%40silt ile %50kil+%50silt karışımları için ise CI olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık deneyi sonucunda numunelerin içerisinde silt oranı azaldıkça özgül ağırlığın azaldığı ve numunelerin özgül ağırlıklarının 2.53 ile 2.63 arasında değiştiği görülmüştür.

Deneylerde kullanılmak üzere karışımlar etüvden çıkarıldıktan sonra ağırlıkça %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt, %50kil+%50silt oranlarında karıştırılarak %25 su muhtevasında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmıştır. Islak tokmaktama yöntemi eşit yoğunlukta ve homojen numuneler üretilebileceği için seçilmiştir. Islak tokmaktama yöntemiyle 50kPa sıkışma enerjisinde hazırlanan numuneler ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi amacıyla ödometre deneyine tabi tutulmuştur. Ön konsolidasyon basıncının her karışım için 50kPa olduğu bulunduktan sonra dinamik deneyleri etkilememesi açısından numunelerin boşluk oranları ölçülmüş ve boşluk oranlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada Werden ve diğ. (2013) tarafından tanıtılan ve Drenvich ve Ashlock (2017) tarafından yeni bir rezonant kolon deney tipi olarak ifade edilen deney sistemi kullanılmıştır. Sistemde, numune üst başlığı üzerinde bulunan hassas deformasyon ölçerler sayesinde küçük birim kayma deformasyonu seviyelerinde ( $10^{-5}$ ) ölçümler yapılabilmektedir. Kullanılan bu sistemde elektromanyetik osilatörün yerine bir tork motoru kullanıldığı için cihaz tarafından yapılan sönümler ortadan kalkmaktadır. Bu

sistemle, geniş bir aralıkta değişen tekrarlı kayma deformasyonu seviyelerinde rezonant kolon ( $10^{-5}$ - $10^0$ ) ve bu sisteme birleşik bir sistem halinde çalışan burulmalı kesme ( $10^{-1}$ - $10^1$ ) deneyleri yapılabilmektedir. Dinamik deneylerde, bu çalışma kapsamında kullanılan rezonant kolon deneyi sistemini oluşturan Werden ve diğ. (2013) çalışmasından yola çıkarak hazırlanan ASTM D4015-15e1 standardı kullanılmıştır. Bu standartta numune ile ilgili işlemler için ASTM D4767 standardı referans olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında numune hazırlama ve doyurma işlemleri ASTM D4767-11 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Doyurma işlemi sonrasında konsolidasyon deneyi izotropik koşullar altında yapılmıştır. Bu çalışmada karışımlarda %1 şekil değiştirme seviyesine kadar rezonant kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Burulmalı kesme deney sisteminde ise tork motorlarına uygulanan voltajla belirlenen minimum ve maksimum uyarım aralığında drenajsız koşullarda burulma etkisiyle zemine ait dinamik parametreler belirlenmektedir. Bu çalışmada karışımlar 0.5Hz ve 1Hz frekanslarında sinüzoidal yükleme ile burulmalı kesme deneyinde drenajsız koşullarda dinamik etkilere maruz bırakılmıştır. Maksimum kayma deformasyonu %5 olarak belirlenmiştir. Rezonant kolon deneyinde %1 kayma deformasyonuna uğrayan karışımlar hemen ardından %5 kayma deformasyonuna kadar burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuşlardır.

Bu çalışma kapsamında yapılan, dinamik deneylerde arazide kil zeminlerin dinamik etkiler altında davranışını etkileyecek 5 parametre incelenmiştir. Bunlar; çevre basıncı, kil zemin içerisindeki silt oranı, kil zeminin aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı yükleme ve yükleme frekansının etkisidir. Zeminlerin dinamik davranışının belirlenmesi için dinamik etkiler altında kayma deformasyonuna uğrayan zeminin sönüm oranı ile kayma modülü değişimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca zeminlerde dinamik etkiler altında mukavemet davranışının tespit edilmesi de gereklidir. Mukavemet davranışının analizinde tekrarlı yükler sonucu oluşan deformasyon ve boşluk suyu basınçlarının bilinmesi gereklidir. Bu sebeple kil zeminlerin davranışını etkileyecek parametreler bu kapsamda incelenmiştir.

Çevre basıncının etkisinin gözlenmesi amacıyla 50, 100, 150 ve 200kPa'lık çevre basınçlarında %75kil+%25silt karışımı kullanılarak efektif çevre basıncı değişiminin kayma modülüne ve sönüm oranı eğrisine etkisi incelenmiştir. %50kil ve %100kil arasında ortalama bir değer olması açısından bu karışım seçilmiştir. Yapılan bu çalışma

sonucunda efektif gerilmenin artmasıyla kayma modülünde artış meydana geldiği görülmüştür. Bu artışın doğrusal olduğu gözlenmiştir. Bulunan sonuçlara göre maksimum dinamik kayma modülü ve kayma modülü eğrilerinde çevre basıncı çok önemlidir. Ancak her bir çevre basıncı için oluşturulan normalize dinamik kayma modülü eğrilerinde birbirine oldukça yakın eğriler elde edilmiştir. Bununla birlikte söz konusu eğride, çevre basıncı arttıkça normalize kayma modülünde artış olduğu görülmektedir. Sönüm oranı eğrilerinde normalize kayma modülü eğrilerine benzer şekilde birbirine çok yakın eğriler elde edilmiştir. Ancak çevre basıncının artmasıyla sönüm oranlarında azalma görülmektedir.

Kil zemin içerisindeki, silt oranının etkisinin gözlenmesi amacıyla %100kil, %90kil+%10silt, %80kil+%20silt, %70kil+%30silt, %60kil+%40silt, %50kil+%50silt karışımları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu karışımlarda zemin içerisinde silt oranı azaldıkça plastisite indisinde doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Literatürde yapılan çalışmaların tümünde plastisite indisini arttırmak için yüksek plastisiteye sahip kil ile karışımlar yapıldığı veya bu kil zeminlerin direk kullanılarak analizler yapıldığı görülmüştür. Aynı şekilde kum-kil karışımlarında da ince danelerden arınmış kum kullanırken kil zemin içerisinde siltin de bulunduğu görülmüştür. Elbette ki arazide %100 kil içeren bir zeminle karşılaşmak pek olası değildir. Ancak yapılan analizlerde kilin dane yapısının, kullanılan kilin yaşlanma etkisi ve maruz kaldığı kimyasal etkilerin de ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Bu sebeple yapılan analizlerde dinamik kayma modülüne plastisite oranının etkisi ve kil zeminde boşluk suyu basıncı artış hızı gibi önemli özelliklerin belirlenebilmesi için aynı kil zeminin kullanılmasının oldukça önemli olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde kil zemin içerisinde %100kil olan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple burada bulunan sonuçların ve sonrasında bu konudaki daha kapsamlı çalışmaların literatüre önemli bir katkı yapacağı düşünülmektedir. Yapılan dinamik deneyler sonucunda kil zeminde silt oranının azalmasıyla kayma modülünde logaritmik olarak azalış meydana geldiği görülmüştür. Normalize kayma modülü eğrisinde ise kil zemine silt eklenmesiyle  $G/G_{max}$  değeri azalarak eğriler daha aşağı duruma geçmişlerdir. Bununla birlikte karışımlardaki silt oranının azalmasıyla karışımların sönüm oranlarının azaldığı ve sönüm oranı eğrilerinin daha düşük bir duruma yerleştiği gözlenmiştir. Burulmalı kesme deneyinde kil zemin

içerisinde silt oranı azaldıkça boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür. Ayrıca silt oranının azalmasıyla boşluk suyu basınçlarındaki artış yavaşlamıştır.

Aşırı konsolidasyon oranının dinamik yükleme altında etkisinin incelenmesi amacıyla aşırı konsolidasyon oranı 1 ve 2 olan karışımlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşırı konsolide zeminlerde maksimum kayma modülünün ( $G_{max}$ ) normal konsolide zeminin kayma modülüne kıyasla daha büyük olduğunu göstermiştir. Bu durum tüm karışımlar için aynı şekilde bulunmuştur. Normalize kayma modülü eğrisinde aşırı konsolidasyon oranı incelendiğinde, %50kil+%50silt, %60kil+%40silt, %70kil+%30silt, %70kil+%20silt karışımları için normalize dinamik kayma modülü-kayma deformasyonu eğrisi aşırı konsolide oranı 1 ve 2 olan zeminler için aynı bulunmuştur. Ancak %80kil+%20silt, %90kil+%10silt ve %100kil karışımlarına ait normalize dinamik kayma modülü eğrisinde ise farklılıklar görülmektedir. Bulunan sonuca göre, bir kil zeminin dinamik etkiler altında göstereceği davranış incelenirken mutlaka kil zeminin içerisindeki kilin de dikkate alınması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar maksimum sönüm oranında ( $D_{max}$ ) aşırı konsolidasyon oranının bir etkisi olmadığını göstermiştir. Aşırı konsolide oranı arttıkça sönüm oranı sabit kalmıştır. Bununla birlikte, normalize dinamik kayma modülü eğrilerinde olduğu gibi %50kil+%50silt, %60kil+%40silt ve %70kil+%30silt karışımlarında sönüm oranı eğrileri, AKO'su 1 ve 2 olan zeminler için aynı bulunmuştur. Ancak %80kil+%20silt, %90kil+%10silt ve %100kil ait karışımların ise sönüm oranı eğrilerinde  $D_{max}$  aynı olmasına karşın eğrilerde farklılıklar görülmektedir. Bu karışımlarda AKO'su 1 olan killerde sönüm oranı eğrisi daha yüksek bir konumda yer almaktadır. Ancak sönüm oranı eğrilerindeki değişimin %100kil zeminde daha fazla AKO oranlarında incelenmesi bu konuda daha fazla veri ortaya koyulmasına yardımcı olacaktır. AKO'su 1 ve 2 olan zeminlerde yapılan drenajsız koşullardaki burulma kesme deneyinde aşırı AKO arttıkça boşluk suyu basıncında azalma meydana gelmiştir.

Tekrarlı rezonant kolon deneyinin kil zeminlerde etkisini görebilmek amacıyla bu çalışmada kullanılan karışımlar %1 kayma deformasyonuna ulaşıncaya kadar drejanlı koşullarda rezonant kolon deneyine tabi tutulmuştur. Sonrasında rezonant kolon deneyinde drenaja izin verilmiş ve boşluk suyu basınçlarının dağılımı ile deformasyonlar sonucunda ortaya çıkabilecek aşırı basınçların sönümlenmesi için tekrar %100konsolide oluncaya dek konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra bir kez daha aynı

numunelere rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. En son tekrar konsolidasyon deneyi uygulanan karışımlarda bir kez daha Rezonant kolon deneyi uygulandıktan sonra numuneler  $\pm 2.5$  birim kayma deformasyonu değerine ulaşıncaya kadar drenajsız koşullarda burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Bu sayede, dinamik koşullar altında yüklenen zeminlerde yenilme gerçekleşmediği durumlarda tekrar bir dinamik yük olması durumunda kayma modülü, sönüm oranı değişimleri incelenmiştir. Ayrıca bu duruma maruz kalan zeminlerin drenajsız ve tekrarlı gerilmelerde boşluk suyu basıncı oluşumları araştırılmıştır. %100kil zemin için elasto-plastik bölgenin başlangıcının yaklaşık %0.015 olduğu ve plastik bölgenin başlangıcının ise yaklaşık %1.5 olduğu görülmektedir. %50kil+%50silt için ise elasto-plastik bölgenin başlangıcının yaklaşık %0.003 olduğu ve plastik bölgenin başlangıcının ise yaklaşık %0.5 olduğu görülmektedir. Bu durum, zemin içerisinde silt oranı azaldıkça daha yüksek çevrim sayısında ve kayma deformasyonunda kalıcı deformasyonlar olduğunu göstermiştir. Kayma modülü eğrilerinde de bu durum görülmektedir. Zemin içerisinde silt oranı azaldıkça tekrarlı rezonant kolon deneyi sonucunda kayma modülündeki azalma %50kil+%50silte kıyasla daha azdır. Her ne kadar rezonant kolon deneyinde karışımlar plastik deformasyon oluşmasını sağlayabilecek %1 kayma deformasyonuna kadar tekrarlı gerilmeye maruz bırakılsa da sonrasında gerçekleştirilen konsolidasyon dolayısıyla, numunelerin kayma modüllerindeki azalma sınırlı kalmıştır. Ancak bu durum depreme maruz kalan zeminlerde yenilme gerçekleşmese de ve sonrasında ortaya çıkan boşluk suyu basınçları sönümlense de zeminlerin dinamik kayma modüllerinin azaldığını ortaya koymuştur. Kısa süreli aralıklarda tekrarlı depremlere maruz kalabilecek zeminlerde yapılacak tasarımlarda bu durumun modellenmesi son derece önemli olmaktadır. Burada her bir rezonant kolon deneyinden sonra numune yaklaşık 24 saat süren konsolidasyona bırakılmıştır. Ancak yine de %100kil zeminde ikinci rezonant kolon deneyinde kayma modülünde yaklaşık %4.5'lik ve üçüncü rezonant kolon deneyinde ise ilk duruma göre kayma modülünde yaklaşık %7'lik bir azalma meydana geldiği görülmektedir. %50kil+%50silt zeminde ise ikinci rezonant kolon deneyinden sonra kayma modülünde yaklaşık %7, üçüncü rezonant kolon deneyinden sonra ise kayma modülünde toplamda yaklaşık %15'lik bir azalma meydana gelmiştir.

Bu çalışmada %1 kayma deformasyonuna kadar tekrarlı rezonant kolon deneyine tabi tutulan zeminlerin normalize kayma modülü eğrileri bulunmuştur. Yapılan analizler

sonucunda kullanılarak %100kil, %90kil+%10silt ve %80kil+%20silt karışımlarında her rezonant kolon deneyi için normalize kayma modülü eğrileri aynı bulunmuştur. %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarında ise az da olsa rezonant kolon deneylerinin normalize kayma modülü eğrilerinde farklılıklar görülmektedir. Bunun sebebi bu karışımları %1 kayma deformasyonunda plastik bölgede olmasından kaynaklanmaktadır. Sönüm oranı açısından tekrarlı rezonant kolon deneyi değerlendirildiğinde rezonant kolon deneyi sayısı arttıkça sönüm oranlarında artış meydana gelmiştir. %100kil, %90kil+%10silt ve %80kil+%20silt karışımlarında sönüm oranları eğrileri birbirine oldukça yakın çıktığı ancak yine de bir yükselme trendi olduğu görülmüştür. %70kil+%30silt, %60kil+%40silt ve %50kil+%50silt karışımlarında ise tekrarlı rezonant kolon deneyinin sönüm oranına etkisi bariz şekilde görülmektedir. Burulmalı kesme deneyinde, tüm karışımlarda boşluk suyu basınçlarında tek rezonant kolon deneyine kıyasla tekrarlı rezonant kolon deneyine maruz kalan karışımlarda bir miktar artış meydana geldiği görülmüştür. Bu artış %100kil karışımında en az %50kil+%50silt en fazla olarak gerçekleşmiştir. 3 kere rezonant kolon deneyine tabi tutulan numunelerde boşluk suyu basıncındaki yükselmenin 1 kere rezonant kolon deneyi yapılan numunelere kıyasla daha hızlı olduğu görülmüştür. Bu durum numunede meydana gelen yumuşamadan ve oluşan birikimli deformasyonlardan kaynaklanmaktadır.

Yükleme frekansının etkisinin görülmesi amacıyla 0.5Hz ve 1Hz frekanslarda tük karışımlarda burulmalı kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. %1 kayma deformasyonuna kadar rezonant kolon deneyi ile dinamik etkilere bırakılan karışımlar %1 ile  $\pm 2.5$  birim arası kayma deformasyonuna kadar burulmalı kesme deneyi ile dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yapılan analizler sonucunda karışımlara normalize kayma eğrilerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Frekans değerinin artmasıyla sönüm oranında bir miktar artış gözlenmiştir. Bu artış zemin içerisindeki silt oranı azaldıkça, azalış göstermiştir. Burulmalı kesme deneyinde karışımlar 1Hz frekansta (25 çevrim) 0.5Hz frekansa (23 çevrim) kıyasla daha yüksek çevrim sayısında yenilmişlerdir. Karışımlar 1Hz frekansta (8kPa) 0.5Hz frekansa (6kPa) kıyasla daha yüksek gerilmelerde yenilmeye uğramışlardır. Burulmalı kesme deneyinde boşluk suyu basınçları 1Hz frekanslarda 0.5Hz frekansa kıyasla daha düşük bulunmuştur. 1Hz frekansta yapılan

deneylerde karışımlardaki boşluk suyu basıncının maksimuma ulaşması için daha uzun çevrim sayısı gerektiği görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda farklı killerde ve farklı oranlarda karışımlarla aynı dinamik etkilerin incelenmesi sonucu elde edilen sonuçların ve bu çalışmada bulunan sonuçların karşılaştırılarak değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Aynı zamanda bu çalışmada kullanılan karışımlarla farklı çevre basınçları ile farklı aşırı konsolidasyon oranları ve frekansların incelenmesi kil zeminlerde dinamik etkilerin araştırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan karışımların ve incelenen etkilerin başka deney sistemleri ile de analizi, deney sistemlerinin zemine ait kayma parametrelerine etkisinin gözlenmesi amacıyla değerli olacaktır. Tekrarlı rezonant kolon deneyinde, her bir konsolidasyon aşamasından ve uygulanan dinamik etkilerden sonra, numunenin iç yapısının incelenmesi ile siltin kil zemindeki etkisinin belirlenmesi, dinamik davranışın tespiti açısından önemli olacaktır. Gelecek çalışmalarda bu etkinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Literatürde bu çalışmadakine benzer şekilde kil zemin içerisindeki silt ve kilin birbirinden ayrılarak ve sonrasında istenilen oranlarda karıştırılarak dinamik deneylerde kullanıldığı bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu şekilde çalışmaların artmasıyla kil zeminlerin dinamik etkiler altında göstereceği davranışın daha doğru modellenebileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abbaspout, M., Porhoseini, R., Barkhordari, K. ve Ghorbani, A., “Coefficient of Consolidation by End of Arc Method”, *Journal of Central South University*, 22(1): 332-337 (2015).
- Afifi, S. S. ve Richart, F. E., “Stress-History Effects on Shear Modulus of Soils”, *Soils and Foundations*, 13(1): 77-95 (1973).
- Ahmad, I., Waseem, M., Abbas, M. ve Ayub, U., “Evaluation of Shear Wave Velocity Correlations and Development of New Correlation Using Cross-hole Data”, *International Journal of Georesources and Environment*, 1(1): 42-51 (2015).
- Aid, K. ve P. G. Richards., "Quantitative Seismology: Theory and Methods", *University Science Books*, San Francisco (2002).
- Ajmera, B. ve Tiwari, B., “*Damping and Shear Moduli of Laboratory-Prepared Mineral Mixtures*”, In *Geotechnical Frontiers*, 10-18 (2017).
- Allen, R., “Sixteenth Award of the Medal of the Seismological Society of America to Clarence”, *Seismological Research Letters*, 67: 28-40 (1996).
- Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. ve Rosenbrand, W.F., “Cyclic and Static Laboratory Tests on Drammen Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106(GT5):499-529, (1980).
- Anderson, D. G. ve Stokoe, K. H., “Shear Modulus: A Time-Dependent Soil Property”, *In Dynamic Geotechnical Testing, ASTM International* (1978).
- Ansal, A. M. ve M. Tuncan., "Consolidation in Clays Due to Cyclic Stresses", *Proceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3-6 (1989).
- Ansal, A.M. ve Erken, A., “Undrained Behavior of Clay Under Cyclic Shear Stresses”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 115(7): 968-983 (1989).
- Ansal, A.M., Iyisan, R. ve Yildirim, H., “The Cyclic Behaviour of Soils and Effects of Geotechnical Factors in Microzonation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21: 445-452 (2001).
- Ashmawy, A. K. ve Drnevich, V. P., “A General Dynamic Model for the Resonant Column/Quasi-Static Torsional Shear Apparatus”, *Geotechnical Testing Journal*, 17(3): 337-348 (1994).
- ASTM C136/C136M-14, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2014).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- ASTM D2166/D2166M-16, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2016).
- ASTM D2435/D2435M-11, “Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2011).
- ASTM D2487-17, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2017).
- ASTM D2850-15, “Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2015).
- ASTM D4015-15e1, “Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2015).
- ASTM D4318-17e1, “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2017).
- ASTM D4767-11, “Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2011).
- ASTM D7928-17, “Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2017).
- ASTM D854-14, “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”, *ASTM International*, West Conshohocken-PA (2014).
- Azzouz, A.S., Malek, A.M. ve Baligh, M.M., “Cyclic Behavior of Clays in Undrained Simple Shear”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 115(5): 637-657 (1989).
- Bartake, P. P. ve Singh, D. N., “Studies on the Determination of Shear Wave Velocity in Sands”, *Geomechanics and Geoengineering*, 2(1): 41-49 (2007).
- Beroya, M. A. A., Aydin, A. ve Katzenbach, R., “Insight into the Effects of Clay Mineralogy on the Cyclic Behavior of Silt–Clay Mixtures”, *Engineering Geology*, 106: 154-162 (2009).
- Brady A.G., “An Investigation of the Miyagi-Ken-Oki, Japan, Earthquake of June 12, 1978”, *US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards* (1980).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Brown, S.F., Lashine, A.K.F. ve Hyde, A.F.L. "Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay", *Geotechnique*, 25(1): 95-114 (1975).
- Bui, M. T., Clayton, C. R. I. ve Priest, J. A., "The Universal Void Ratio Function for Small Strain Shear Modulus", *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (2010).
- Cao, Y.L. ve Law, K.T., "Energy Dissipation and Dynamic Behaviour of Clay Under Cyclic Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 103-111 (1992).
- Carlton, B. D. ve Pestana, J. M. "Small Strain Shear Modulus of High and Low Plasticity Clays and Silts", *In 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon-Portugal (2012).
- Carraro, J. A. H. ve Prezzi, M. "A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines", *Geotechnical Testing Journal*, 31(1): 1-11. (2007).
- Cascante, G., Santamarina, C. ve Yassir, N., "Flexural Excitation in a Standard Torsional-Resonant Column Device", *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3): 478-490. (1998).
- Darcy, H., "Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application", *Victor Dalmont*, Paris (1856).
- Darendeli, M. B., "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves", PhD dissertation, *Univ. of Texas at Austin*, Austin-Texas (2001).
- Das, B. M. ve Ramana, G. V., "Principles of Soil Dynamics", *Cengage Learning*, Stamford (2010).
- Day, R. W., "Geotechnical Earthquake Engineering Handbook", *Mcgraw-Hill*, New York (2002).
- De Grosbois, A., "Fowler CMR: The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics." *Environmental Geology*, 48(7): 968-968 (2005).
- Do J., Heo S. B., Yoon Y. W. ve Chang I., "Evaluating the Liquefaction Potential of Gravel Soils with Static Experiments and Steady State Approaches", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 21(3): 642-651 (2017)
- Dobry, R. ve Vucetic, M., "Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits," *International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico City-Mexico, 51-87 (1987).
- Dong, Y. ve Lu, N., "Dependencies of Shear Wave Velocity and Shear Modulus of Soil on Saturation", *Journal of Engineering Mechanics*, 142(11): 04016083 (2016).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Drnevich, V. P., “Recent Developments in Resonant Column Testing”, *Richart Commemorative Lectures*, ASCE, 79-107 (1985).
- Drnevich, V. P., “A Relationship Between Modulus and Damping Provides for Simple, Unified Modeling of Both”, *Geotechnical Frontiers*, 48-60 (2017).
- Drnevich, V. P. ve Ashlock, J. C., “Measurement of Damping in Soils by the Resonant Column Test” *Geotechnical Frontiers*, 80-91 (2017).
- Drnevich, V. P., Hardin, B. O. ve Shippy, D. J., “Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method”, *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM International (1978).
- Drnevich, V. P., Werden, S., Ashlock, J. C. ve Hall, J. R., “Applications of the New Approach to Resonant Column Testing”, *Geotechnical Testing Journal*, 38(1): 23-39 (2014).
- Dutta, T. T., Saride, S. ve Jallu, M., “Effect of Saturation on Dynamic Properties of Compacted Clay in a Resonant Column Test”, *Geomechanics and Geoengineering*, 12(3): 181-190 (2017).
- Elgohary, M. M., “Consolidation of Soils under Cyclic Loading” Doctoral Dissertation, *McMaster University*, Ontario-Canada (1973).
- Encyclopedia Britannica Company, “Seismic Wave” <https://www.britannica.com/> (2018).
- Erken, A. ve Ülker, B. M. C. “Effect of Cyclic Loading on Monotonic Shear Strength of Fine-grained Soils”, *Engineering Geology*, 89: 243-257 (2007).
- France, J.W. ve Sangrey, D. A. “Effects of Drainage in Repeated Loading of Clays”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(Gt7): 769-785 (1977).
- Franke K., “Geotechnical Earthquake Engineering Lecture Notes”, *Brigham Young University*, USA (2016).
- Frost, J. D. ve Drnevich, V. P., “Towards Standardization of Torsional Shear Testing”, *Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM International*, 1213: 276-276 (1994).
- Frost, J. D. ve Park, J. Y., “A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique”, *Geotechnical Testing Journal*, 26(1): 57-70 (2003).
- Gabrys, K., Sas, W. ve Soból, E., “Small-Strain Dynamic Characterization of Clayey Soil”, *ACTA Sci Pol Ser Arch*, 14(1): 55-65 (2015).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Georgiannou, V. N., Hight, D. W. ve Burland, J. B., "Behaviour of Clayey Sands under Undrained Cyclic Triaxial Loading", *Géotechnique*, 41(3): 383-393 (1991).
- Gilbert, P. A. (1984). "Investigation of Density Variation in Triaxial Test Specimens of Cohesionless Soil Subjected to Cyclic and Monotonic Loading", *Vicksburg: US Army Corps of Engineering*, USA (1984).
- Gratchev I. B., Sassa K, Osipov V. I. ve Sokolov V. N., "The Liquefaction of Clayey Soils under Cyclic Loading", *Engineering Geology*, 86(1): 70-84 (2006).
- Hanna, A.M. ve Javed, K., "Design of Foundations on Sensitive Champlayn Clay Subjected to Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE*, 134(7): 929-937 (2008).
- Hardin, B. O. ve Black, W. L., "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.* (1968).
- Hardin, B. O. ve Drnevich, V. P., "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 98(SM6) (1972a).
- Hardin, B. O. ve Drnevich, V. P., "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 98(SM7) (1972b).
- Hardin, B. O. ve Richart, F. E., "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 89: 3407 (1963).
- Hirao, K. ve Yasuhara, K., "Cyclic Strength of Underconsolidated Clay", *Soils and Foundations*, 31(4): 180-186 (1991).
- Humphries, W. K. ve Wahls, H. E., "Stress History Effects on Dynamic Modulus of Clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.* 94(SM2): 371-389 (1968).
- Hyde, A. F. L. ve Ward, S. J., "The Effect of Cyclic Loading on the Undrained Shear Strength of a Silty Clay", *Marine Geotechnology*, 6(3): 299-314 (1986).
- Hyodo, M., Hyde, A., Yamamoto, Y. ve Fujii, T., "Cyclic Shear Strength of Undisturbed and Remoulded Marine Clays", *Soils and Foundations*, 39(2): 45-58 (1999).
- Iida, K., "The Velocity of Elastic Waves in Sand. Bull. Earthq. Res. Inst.", *University of Tokyo*, 16: 131-144 (1938).
- Iida, K., "On the Elastic Properties of Soil, Particularly in Relation to Its Water Content", *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 18: 675-691 (1940).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Ishibashi, I. ve Zhang, X. "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay", *Soils and Foundations*, 33(1): 182-191 (1993).
- Ishihara K. ve Koga Y., "Case Studies of Liquefaction in the 1964 Niigata Earthquake", *Soils and Foundations*, 21(3): 35-52 (1981).
- Ishihara, K., "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics", Oxford Engineering Science Series, *Oxford University Press*, Oxford (1996).
- Ishihara, K. ve Yasuda, S., "Cyclic Strengths of Undisturbed Cohesive Soils of Western Tokyo," *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, 57-66 (1980).
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. ve Takagi, Y., "Shear Moduli of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading", *Soils and Foundations*, 18(1): 39-56 (1978).
- Jamiolkowski, M., Leroueil, S. ve Lo Presti, D. C., "Design Parameters from Theory to Practice", *Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development*, Port and Harbour Research Institute, 2: 877-917 (1991).
- Jia, J., "Soil Dynamics and Foundation Modeling", *Springer*, Norway, 2018.
- Kagawa, T., "Moduli and Damping Factors of Soft Marine Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(9): 1360-1375 (1992).
- Kallioglou, P., Tika, T. H. ve Pitolakis, K., "Shear Modulus and Damping Ratio of Cohesive Soils", *Journal of Earthquake Engineering*, 12(6): 879-913 (2008).
- Kamai T., "Evaluation of the Maximum Excess Pore Pressure of Normally Consolidated Cohesive Soils During Undrained Shear", *Mem. Fac. Sci. Eng. Shimane Univ. Series A*, 30: 55-61 (1997).
- Kim, T. C. ve Novak, M., "Dynamic Properties of Some Cohesive Soils of Ontario", *Canadian Geotechnical Journal*, 18(3): 371-389 (1981)
- Kim, U., Kim, D. ve Zhuang, L., "Influence of Fines Content on the Undrained Cyclic Shear Strength of Sand-Clay Mixtures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83: 124-134 (2016).
- Koester, J. P., "The Influence of Fine Type and Content on Cyclic Strength", *Ground Failures Under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication*, 44: 330-345 (1994).
- Kokusho, T., "Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range," *Soils and Foundations*, 20(2): 45-60 (1980).
- Kokusho, T., Yoshida, Y. ve Esashi, Y., "Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range", *Soils and Foundations*, 22(4): 1-18 (1982).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Konrad, J. M. ve Wagg, B. T., “Undrained Cyclic Loading of Anisotropically Consolidated Clayey Silts”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 119(5): 929-949 (1993).
- Kramer, S. L., “Geotechnical Earthquake Engineering”, *Prentice–Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Prentice-Hall*, New Jersey (1996).
- Kuerbis, R. ve Vaid, Y. P., “Sand Sample Preparation-The Slurry Deposition Method”, *Soils and Foundations*, 28(4): 107-118. (1988).
- Kumar, S. S., Krishna, A. M. ve Dey, A., “Dynamic Properties and Liquefaction Behaviour of Cohesive Soil in Northeast India Under Staged Cyclic Loading”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2018).
- Ladd, R. S., “Preparing Test Specimens Using Undercompaction”, *Geotechnical Testing Journal*, 1(1): 16-23 (1978).
- Lade, P. V., “Triaxial Testing of Soils”, *John Wiley and Sons*, India (2016).
- Lanzo, G., & Vucetic, M. (1999). Effect of Soil Plasticity On Damping Ratio at Small Cyclic Strains. *Soils and Foundations*, 39(4), 131-141.
- Lanzo, G., Pagliaroli, A., Tommasi, P. ve Chiocci, F. L., “Simple Shear Testing of Sensitive, Very Soft Offshore Clay for Wide Strain Range”, *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11): 1277-1288 (2009).
- Lawson A. C., Leuschner A. O., Gilbert G. K., Reid H. F., Branner J. C., Davidson G., Burkhalter C., Campbell W. W., “The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission” *Carnegie Institution of Washington*, (1908)
- Lebeuvre, G. ve Leboeuf, D., “Rate Effects and Cyclic Loading of Sensitive Clays”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 113(Gt5): 476-489, (1987).
- Lebeuvre, G. ve Pfindler, P., “Strain Rate and Preshear Effects in Cyclic Resistance of Soft Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(1): 21-26, (1996).
- Lee, C. J. ve Sheo, S. F. “The Stiffness Degradation and Damping Ratio Evolution of Taipei Silty Clay Under Cyclic Straining”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: 730-740, (2007).
- Lee, K. L. ve Fitton, J. A., "Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil", *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations. ASTM International*, 71-75 (1969).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Leng, J., Liao, C., Ye, G. ve Jeng, D. S., "Laboratory Study for Soil Structure Effect on Marine Clay Response Subjected to Cyclic Loads", *Ocean Engineering*, 147: 45-50 (2018).
- Li, L. L., Dan, H. B. ve Wang, L. Z., "Undrained Behavior of Natural Marine Clay under Cyclic Loading", *Ocean Engineering*, 38(16): 1792-1805 (2011).
- Lo Presti, D., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A. ve Pedroni, S., "Shear Modulus and Damping of Soils", *Geotechnique*, 47(3): 603-617 (1997).
- Lo Presti, D., Pallara, O., Lancellotta, R., Armandi, M. ve Maniscalco, R. "Monotonic and Cyclic Loading Behavior of Two Sands at Small Strains", *Geotechnical Testing Journal*, 16(4): 409-424 (1993).
- Love, A. E. H., "Some Problems of Geodynamics", *Cambridge University Press*, United Kingdom (2015).
- Adachi, M., Yasuhara, K., ve Shimabukuro, A., "Influences of Sample Preparation Method on the Behavior of Non-Plastic Silts in Undrained Monotonic and Cyclic Triaxial Tests", *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 48(11): 24-27, (2000).
- Mancuso, C., Vassallo, R. ve D'onofrio, A., "Small Strain Behavior of a Silty Sand in Controlled-Suction Resonant Column Torsional Shear Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1): 22-31 (2002).
- Markowska-Lech, K., "The Determination of Shear Modulus in Overconsolidated Cohesive Soils". *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 12: 61-71. (2008).
- Marsal, R. J., "Behavior of a Sandy Uniform Soil During the Japan Earthquake", *Mexico Inproc. V Intern. Conf. Soil Mech. and Foundation Eng.*, 1: 229- 233 (1961).
- Matasovic, N. ve Vucetic, M., "Modelling of The Cyclic Stress-Strain Behavior of Liquefiable Sands", *UCLA School of Engineering and Applied Science*, (1992).
- Matsui, T., Bahr, M. A. ve Abe, N., "Estimation of Shear Characteristics Degradation and Stress-Strain Relationship of Saturated Clays after Cyclic Loading", *Soils and Foundations*, 32(1): 161-172 (1992).
- Matsui, T., Ohara, H. ve Ito, T., "Cyclic Stress Strain History and Shear Characteristics of Clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106(Gt10): 1101-1120 (1980).
- Tapan M., "Siltlerde Sivilaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Yanal Konsolidasyon Özelliğinin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2011).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Meidani, M., Shafiee, A., Habibagahi, G., Jafari, M. K., Mohri, Y., Ghahramani, A. ve Chang, C. S., “Granule Shape Effect on the Shear Modulus and Damping Ratio of Mixed Gravel and Clay”, *Iranian Journal of Science and Technology*, 32(B5): 501 (2008).
- Meimon, Y. ve Hicher, P. Y., “Mechanical Behaviour of Clays under Cyclic Loading”, *Proc. of the Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading*, 1: 77-87 (1980).
- Mendoza, M. J. ve G. Auvinet., "The Mexico Earthquake of September 19, 1985-Behavior of Building Foundations in Mexico City", *Earthquake Spectra*, 4(4): 835-853 (1988).
- Mesri, G., “Discussion of Cyclic Tests on High-Quality Undisturbed Block Samples of Soft Marine Norwegian Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 50(11): 1188-1190 (2013).
- Miura, S. ve Toki, S., “A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand”, *Soils and Foundation*, 22(1): 61-77 (1982).
- Mulilis, J. P., Chan, C. K. ve Seed, H. B., “The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands,” *EERC Report 75-18*, College of Engineering University of California, Berkeley, Calif. (1975).
- Mulilus, J. P., Seed H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., Arulanandan, K., “Effects of Sample Preparation on Sample Preparation”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(Gt2): 91-108 (1977).
- Naeini, S. A. ve Baziar, M. H., “Effect of Sample Preparation on Steady State”, *Geotechnical Measurements: Lab and Field*, 16-29 (2000).
- Nieto Leal, A. ve Kaliakin, V., “Behavior of cohesive soils subjected to cyclic loading: An extensive review of pertinent literature”, *Technical Report*, Department of Civil and Environmental Engineering of University of Delaware, USA (2013).
- Nieto Leal, A. ve Kaliakin, V. N., “General Response Observed in Cyclically Loaded Cohesive Soils”, *Ciencia E. Ingeniería Neogranadina*, 26(1): 21-39 (2016).
- Ohara, S. ve Matsuda, H., “Study on the Settlement of Saturated Clay Layer Induced by Cyclic Shear”, *Soils and Foundations*, 28(3): 103-113 (1988).
- Okur, D. V., “Farkli Dinamik Gerilme Genlikleri Altında İnce Daneli Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme ve Mukavemet Davranislari”, Doktora Tezi, *İtü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2002).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Okur, D. V. ve Ansal, A., “Stiffness Degradation of Natural Fine Grained Soils During Cyclic Loading”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(9): 843-854 (2007).
- Okur, D. V. ve Ansal, A., “Tekrarli Yük Etkisinde Kil Zeminlerin Lineer Olmayan Elastik Davranışı”, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 22(1): 169-185 (2009).
- Onur, M. I., Tuncan M. ve Tuncan A., “An Experimental Study for Determining the Shear Modulus of Toyoura Sand”, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 1-7 (2014).
- Onur, M. I., “Suya Doygun ve Doygun Olmayan Kum Zeminlerin Dinamik Yükler Altında Davranışlarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir (2015).
- O'reilly, M. P., Brown, S. F. ve Overy, R. F., “Cyclic Loading of Silty Clay with Drainage Periods”, *Geotechnical Engineering*, 117(2): 354-362 (1991).
- Özaydin, K., “Zemin Dinamiği”, *Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayinlari*, Istanbul, 1982.
- Özkan Y. M., “Zemin Dinamiğine Giriş”, *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara (2017).
- Papadopoulou, A., Kallioglou, P., Tika, T., Papadopoulos, S. ve Batum, E., “Liquefaction Resistance of Silty Sands and Dynamic Properties of Cohesive Soils from Düzce, Turkey”, *Journal of Earthquake Engineering*, 14(3): 351-362 (2010).
- Patel, A., Bartake, P. P. ve Singh, D. N., “An Empirical Relationship for Determining Shear Wave Velocity in Granular Materials Accounting for Grain Morphology”, *Geotechnical Testing Journal*, 32(1): 1-10 (2008).
- Pearson Prentice Hall Inc, “Earthquakes and Earth's Interior” <http://www.pearsoned.co.uk/> (2005)
- Pichugin, A. V., “Approximation of The Rayleigh Wave Speed”, *Preprinted Submitted to Elsevier Science*, (2008).
- Poppe, L. J., Paskevich, V. F., Hathaway, J. C. ve Blackwood, D. S., “A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction”, *US Geological Survey Open-File Report*, 1(041): 1-88 (2001).
- Procter, D. C. ve Khaffaf, J. H., “Cyclic Triaxial Tests on Remoulded Clays”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(10): 1431-1445 (1984).
- Robertson, P. K., Sasitharan, S., Cunning, J. C. ve Segoo, D. C., “Shear-Wave Velocity to Evaluate In-Situ State of Ottawa Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(3): 262-273 (1995).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Sas, W., Gabryś, K., Soból, E. ve Szymański, A. “Nonlinear Dynamic Properties of Silty Clay from Warsaw Area”, *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Land Reclamation*, 48(3): 201-220 (2016).
- Sas, W., Gabryś, K. ve Szymański, A., “Experimental Studies of Dynamic Properties of Quaternary Clayey Soils”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 95: 29-39 (2017).
- Sato, H., Nhan, T. T. ve Matsuda, H., “Earthquake-Induced Settlement of a Clay Layer”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104: 418-431 (2018).
- Seed, H. B. ve Chan, C. K., “Clay Strength under Earthquake Loading Conditions”, *Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 92(Sm2): 53-78 (1966).
- Seed H. B., Idriss I. M., “Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(3): 83-108 (1967)
- Seed H. B., Pyke R., Martin G. R., “Effect of Multi-Directional Shaking on Liquefaction of Sands”, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California (1975)
- Seed, H. B., “Design Problems in Soil Liquefaction”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8): 827-845 (1987).
- Shibuya, S., Toshiyuki, T., Fukuda, E. ve Degoshi, T. “Strain Rate Effects On Shear Modulus and Damping of Normally Consolidated Clay” *ASTM Geotech. Testing J.*, 18(3): 365-375 (1995).
- Stokoe, K. H., Darendeli, M. B. ve Menq, F., “Summary Laboratory Test Results,” *Rosrine Data Dissemination Workshop*, University of Southern California, Los Angeles, (1998).
- Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Andrus, R. D. ve Brown, L. T., “Dynamic Soil Properties: Laboratory, Field and Correlation Studies,” *Second Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, (3): 811-845 (1999).
- Subramaniam, P. ve Banerjee, S., “Shear Modulus Degradation Model for Cohesive Soils”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53: 210-216 (2013).
- Sun, J. I., Golesorkhi, R. ve Seed, H. B., “Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils,” Report, *UCB/EERC-88/15*, Univ. of California at Berkeley (1988).
- Sun, T., Chen G. ve Zhou E., “The Dynamic Shear Modulus and the Damping Ratio of Deep-Seabed Marine Silty Clay”, *In 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon-Portugal (2012).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

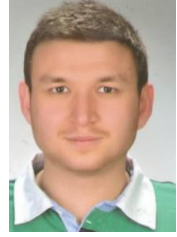
- Sun, J., Gong, M. ve Tao, X., “Dynamic Shear Modulus of Undisturbed Soil Under Different Consolidation Ratios and Its Effects on Surface Ground Motion”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12(4): 561-568 (2013).
- Sun, L., Gu, C. ve Wang, P., “Effects of Cyclic Confining Pressure on the Deformation Characteristics of Natural Soft Clay”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78: 99-109 (2015).
- Tan, K. ve Vucetic, M., “Behaviour of Medium and Low Plasticity Clays under Cyclic Simple Shear Conditions: Soil Dynamics and Liquefaction”, *4<sup>th</sup> International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Mexico City, 131-141 (1991)
- Tang, Y. Q., Zhou, J. ve Liu, S., “Test on Cyclic Creep Behavior of Mucky Clay in Shangay under Step Cyclic Loading”, *Environmental Earth Sciences*, 63: 321-327 (2011).
- Tatsuoka, E., Teachavorasinskun, S., Dong, J., Kohata, Y. ve Sato, T., “Importance of Measuring Local Strains in Cyclic Triaxial Tests on Granular Soils”, *Dyn. Geotech. Testing II*, 288-302 (1994)
- Taylor, P. W. ve Bacchus, D. R., “Dynamic Cyclic Strain Tests on a Clay” *7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 401-409 (1969).
- Teachavorasinskun, S., Thongchim, P. ve Lukkunaprasit, P., “Shear Modulus and Damping of Soft Bangkok Clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5): 1201-1208 (2002).
- Terzaghi, K., “Erdbaumechanik Auf Bodenphysikalischer Grundlage”, *F. Deuticke*, Leipzig (1925).
- Terzaghi, K., "Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay", *Engineering News-Record*, 95(3): 874-878 (1925).
- Thian, S. Y. ve Lee, C. Y., “Cyclic Stress-Controlled Tests on Offshore Clay”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2): 376-381 (2017).
- Thiers, G. R. ve Seed, H. B., “Cyclic Stress Strain Characteristics of Clay”, *Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94(Sm2):555-569 (1968).
- TS 1500/2000, “İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması” *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara (2010).
- Kim, U., Hyodo, M., Koga, C. ve Orense, R., “Effect of fines content on the monotonic shear behavior of sand-clay mixtures”, *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, 133-138 (2006).

### KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Milsom, J. ve Eriksen A., "Field Geophysics", *John Wiley and Sons*, New Delhi (2011).
- Ural N., "İnce Daneli Zeminlerde ninin Sivilaşmaya Etkisi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü*, Sakarya (2008).
- Ural, N., "Zemin Dinamiği DeneYlerinde Bilgisayar Kontrollü Sistemlerin Kullanılması", *6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium*, Elaziğ-Turkey, 35-39 (2011)
- Ural N., Görgün B. "Effect of Different Sands on One-Dimensional and Hydraulic Consolidation (Radial) Tests of Clay", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-11 (2018).
- U.S. Geological Survey, "Liquefaction", <https://www.usgs.gov/> (2018).
- Vardanega, P. J. ve Bolton, M. D., "Stiffness of Clays and Silts: Normalizing Shear Modulus and Shear Strain", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(9): 1575-1589 (2013).
- Vucetic, M., "Normalized Behavior of Offshore Clay under Uniform Cyclic Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, 25(1): 33-41 (1988).
- Vucetic, M. ve Dobry, R., "Degradation of Marine Clays under Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(2): 133-149 (1988).
- Vucetic, M. ve Dobry, R., "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1): 89-107 (1991).
- Vucetic, M., "Cyclic Threshold Shear Strains in Soils", *Journal of the Geotech. Engineering Div., ASCE*, 120(12): 2208-2229 (1994).
- Vucetic, M., Lanzo, G. ve Doroudian, M., "Damping at Small Strains in Cyclic Simple Shear Test", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(7): 585-594 (1998).
- Wang S. M., "Liquefaction of Triaxial Sand Damples Under Different Frequencies of Cyclic Loading", MSc Thesis, *Western Ontario University*, London (1972).
- Wang, G. X. ve Kuwano, J., "Modeling of Strain Dependency of Shear Modulus and Damping of Clayey Sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(6): 463-471 (1999).
- Wang, J., Guo, L., Cai, Y., Xu, C. ve Gu, C., "Strain and Pore Pressure Development on Soft Marine Clay in Triaxial Tests with a Large Number of Cycles", *Ocean Engineering*, 74: 125-132 (2013).

**KAYNAKLAR (Devam ediyor)**

- Weiler, W. A., "Small-Strain Shear Modulus of Clay", *ASCE Conference Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground-Motion Evaluation*, New York, 331-345 (1988).
- Werden, S. K., Drnevich, V. P., Hall, J. R., Hankour, C., Conlee, C. T. ve Marr, W. A., "New Approach to Resonant Column Testing", *Geotechnical Testing Journal*, 36(2): 169-177 (2013).
- Whitman, R. V., "The Response of Soils to Dynamic Loadings", *Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge Dept. of Civil Engineering, Report 26*, England (1970).
- Yamada, S., Hyodo, M., Orense, R. P., Dinesh, S. V. ve Hyodo, T., "Strain-Dependent Dynamic Properties of Remolded Sand-Clay Mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7): 972-981 (2008).
- Yasuhara, K. ve Toyota N., "Effect of Initial Static Shear Stress on Post-Cyclic Degradation of Plastic Silt", *13<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich 439-442 (1997).
- Yasuhara, K., Hirao, K. ve Hyde, A. F., "Effects of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay", *Soils and Foundations*, 32(1): 100-116 (1992).
- Yasuhara, K., Murakami, S., Song, B. W., Yokokawa, S. ve Hyde, A. F. L., "Post-cyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(8): 756-769 (2003).
- Yasuhara, K., Yamanouchi, T. ve Hirao, K., "Cyclic Strength and Deformation of Normally Consolidated Clay", *Soils and Foundations*, 22(3): 77-91 (1982).
- Yildirim, H. ve Ersan, H., "Settlements under Consecutive Series of Cyclic Loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: 577-585 (2007).
- Yilmaz, M. T., Pekcan, O. ve Bakır, B. S. "Undrained Cyclic Shear and Deformation Behavior of Silt Clay Mixtures of Adapazari, Turkey", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24: 497-507 (2004).
- Zhou, J. ve Gong, X., "Strain Degradation of Saturated Clay under Cyclic Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 208-212 (2001).
- Zhu, S., Yang, G., Wen, Y. ve Ou, L., "Dynamic Shear Modulus Reduction and Damping under High Confining Pressures for Gravels", *Géotechnique Letters*, 4(3): 179-186 (2014).

**ÖZGEÇMİŞ****Kişisel Bilgiler**

Adı Soyadı : Burak GÖRGÜN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir, 31/08/1987

**Eğitim Durumu**

Lisans Öğrenimi : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans Öğrenimi : Anadolu Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği ABD  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

**İş Deneyimi**

Çalıştığı Kurumlar : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü (2012- )

**İletişim**

Adres : Akarbaşı Mah. Ege Sk. 48/3 Odunpazarı-Eskişehir  
Tel : 0228 214 1679  
E-Posta Adresi : burak.gorgun@bilecik.edu.tr

**Akademik Çalışmaları**

Ural N. ve Görgün B., “Effect of Different Sands on One-Dimensional and Hydraulic Consolidation (Radial) Tests of Clay”, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-11 (2018).

**Yabancı Dil Bilgisi**

İngilizce: 86.25 (YÖKDİL)

**Tarih:15/11/2018**