

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLTİ VE KİLLİ ZEMİNLERİN TEKRARLI
YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mehmet Barış Can ÜLKER**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana kendisiyle çalışma olanağını tanıyan; çalışmamın her adımında ilgisini, desteğini, yardımlarını ve yönlendirmelerini esirgemeyen sevgili hocam Doç. Dr. Ayfer ERKEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Sayın Prof. Dr. Atilla M. ANSAL'a yüksek lisansta beni laboratuvar çalışmasına yönlendirmesinden dolayı, Sayın Prof. Dr. Gökhan BAYKAL'a ve Ar. Gör. Y. Müh. Zeynep ÖZKUL'a, Boğaziçi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndaki uygun çalışma ortamını sağlayıp yardımcı olduklarından dolayı; Dr. Selim ALTUN'a, Ar. Gör. Y. Müh. Zülküf KAYA'ya, Dr. Müh. Hüseyin Süha AKSOY'a ve Dr. Recep Özay'a çalışmalarında bana yardımcı olduklarından dolayı ve son olarak sevgili amcam Sayın Prof. Dr. Remzi A. ÜLKER'e bütün yüksek öğrenimim boyunca benimle engin bilgi ve tecrübesini paylaştığı, beni maddi ve manevi olarak her zaman desteklediği ve kolladığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu çalışmam boyunca beni anladıkları, bana destek oldukları ve sabır gösterdikleri için sevgili anneme ve babama ayrıca çok teşekkür ederim.

TEMMUZ 2004

Mehmet Barış Can ÜLKER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiv
SUMMARY	xxxi
1. GİRİŞ	1
2.ELE ALINAN KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Giriş	4
2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altında Dinamik Davranış Özellikleri	4
2.2.1 Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	7
2.2.2 Siltlerin ve Siltli Killerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	19
2.2.3 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi	30
2.2.3.1 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar	30
2.2.3.2 Dinamik Burulmalı Kesme ve Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinde Yapılan Çalışmaların Karşılaştırılması	32
2.2.4 Numune Hazırlama Yönteminin Dinamik Davranışa Etkisi	35
2.2.5 Dinamik Yükleme Sonrası Statik Mukavemetin Belirlenmesi	37
2.3 Zeminlerin Mikroyapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Şartları Altında Belirlenmesi	39
2.3.1. Zemin Yapısının Belirlenmesinde Mikroskop İncelemeleri	40
2.3.2. Zemin Yapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Koşullarında Değişimi	44
2.4 Sonuç	47
3.DENEY YÖNTEMİ, KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ	49
3.1. Giriş	49
3.2 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Sistemi	49
3.3 Numune Hazırlama Yöntemi ve Kullanılan Numunelerin Özellikleri	57
3.3.1 Numune Hazırlama Yöntemi	57
3.3.2 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Endeks Özellikleri	68
3.3.3 Numunelerin Statik Mukavemetlerinin Belirlenmesi	70
3.3.4 Yumuşak Silt Zeminin Konsolidasyon Özellikleri	74
3.4 Zeminde Oluşan Gerilme ve Şekil Değiştirmelerin Hesabı	81
3.5 Sonuç	85

4. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	87
4.1. Giriş	87
4.1.1. Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerde Deneyler	87
4.1.2 Örselenmemiş Numunelerde Deneyler	88
4.2 Laboratuvarda Hazırlanan Yumuşak Killi Zeminin Dinamik Davranışı	89
4.2.1 Konsolidasyon Süresinin Dinamik Davranışa Etkisi	92
4.2.2 Yumuşak Killerde Tekrarlı Yüklemenin Statik Mukavemete Etkisi	95
4.3 Laboratuvarda Hazırlanan Siltli Zeminlerin Dinamik Davranışı	104
4.3.1 Laboratuvarda Hazırlanan Zeminlerin Dinamik Davranışlarına Plastisitenin Etkisi	109
4.3.2 Laboratuvarda Hazırlanan Siltli Zeminlerin Dinamik Mukavemeti	116
4.3.3 Düşük Plastisiteli Siltlerde Tekrarlı Yüklemenin Statik Mukavemete Etkisi	121
4.3.4 Laboratuvar Numunelerinde Tekrarlı Yükleme Sonrası Statik Mukavemetlere Plastisitenin Etkisi	123
4.4 Örselenmemiş Numunelerde Deneyler	124
4.4.1 Örselenmemiş Numunelerde Tekrarlı Yüklemenin Statik Mukavemete Etkisi	131
4.4.2 Örselenmemiş Numunelerin Dinamik Mukavemetleri	149
4.4.3 Örselenmemiş Numunelerde Plastisite İndisi ve İnce Dane Miktarının Dinamik Mukavemete Etkisi	150
4.5 Laboratuvar Numuneleri İle Örselenmemiş Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	152
4.6 Deney Sonuçlarının Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması	154
4.7 Sonuç	158
5. NUMUNELERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE MİKROYAPI İNCELEMELERİ	160
5.1 Giriş	160
5.2 Numunelerin Alındığı Bölgelerin Özellikleri	160
5.2.1 Numunelerin Alındığı Bölgelerin Genel Jeolojisi	162
5.3 Optik Mikroskop İncelemeleri: Numune Hazırlama ve Görüntü Analizleri	163
5.3.1 Kullanılan Mikroskop Düzenneği	163
5.3.2 Numune Hazırlama	164
5.3.3 Görüntülerin Toplanması ve Mikrografik Analizler	165
5.3.4 Görüntü Önileme Tekniği ve Dane Sınırlarının Çıkartılması	166
5.3.5 Dane Oriyantasyonlarının Belirlenmesi	172
5.3.5.1 Dışbükey Kabuk Yöntemi	172

5.4 Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası İnce Kum ve Killi Siltlerdeki Yapının Belirlenmesi	175
5.4.1. İzotropik Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası Boşluklardaki Değişim	176
5.4.2 Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerle Örselenmemiş Numunelerin Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası Yapısal Farklılıkları	190
5.4.3 Deney Numunelerinde Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası Anizotropideki Değişimin Belirlenmesi	211
5.5 Sonuç	218
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	222
KAYNAKLAR	229
EKLER	240
EK A Kullanılan deney aletinin bölümleri	241
EK B Yapılan deneylerin grafikleri	245
EK C İncelemede kullanılan numuneler ve optik mikroskop görüntüleri	291
ÖZGEÇMİŞ	303

KISALTMALAR

DKGO	: Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı
DKÜE	: Deformasyon Kontrollü Üç Eksenli
DKKK	: Deformasyon Kontrollü Kesme Kutusu
GKDD	: Gerilme Kontrollü Düzlem Deformasyon
DKDD	: Deformasyon Kontrollü Düzlem Deformasyon
ÜEB	: Üç Eksenli Basınç
GÜEB	: Gerçek Üç Eksenli Basınç
SB	: Serbest Basınç
İDO	: İnce Dane Oranı
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1.	Burulmalı kesme deneylerinde izotropik gerilme durumunda çevre basıncı ve ters basıncın değişme oranları	63
Tablo 3.2.	Deneylerde kullanılan örselenmiş numunelerin endeks deney sonuçları	68
Tablo 3.3.	Örselenmiş numunelerin alındığı sondajlardaki zeminlerin endeks özellikleri	69
Tablo 3.4.	Deneylerde kullanılan örselenmemiş numunelerin endeks deney sonuçları	70
Tablo 3.5.	Konsolidasyon deneyi sonuçları	79
Tablo 3.6.	Konsolidasyon deneyi sonuçları	79
Tablo 3.7.	Taylor karekök-zaman yöntemiyle hesaplanan cv değerleri	80
Tablo 3.8.	Her yük kademesi için başlangıç, primer ve sekonder konsolidasyon yüzdeleri	80
Tablo 4.1.	Gümüşdere numunesinde yapılan dinamik deney özellikleri	93
Tablo 4.2.	Gümüşdere numunesinde yapılan dinamik deney ve statik deney özellikleri	103
Tablo 4.3.	Adapazarı siltli numunelerde yapılan dinamik deney özellikleri	109
Tablo 4.4.	Laboratuvarda hazırlanan farklı plastisitelerde göçme seviyesine kadar yapılan dinamik deneyler	120
Tablo 4.5.	Örselememiş numunelerin deney özellikleri	147
Tablo 5.1.	İnce kum ve silt danelerine ait ölçüm değerleri	174
Tablo 5.2.	Adapazarı örselenmemiş silt numunesi için optik mikroskop ölçümleri	179
Tablo 5.3.	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme durumu için Adapazarı numunesine ait ölçüm değerleri	183
Tablo 5.4.	Şekil 5.18'deki boşlukların ölçüm değerleri	187
Tablo 5.5.	Şekil 5.20'deki boşlukların ölçüm değerleri	187
Tablo 5.6.	Laboratuvar numunesi için optik mikroskop ölçümleri	188
Tablo 5.7.	Makro boyutta zemin özellikleri	190

Tablo 5.8	Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş numune düşey kesit ölçüm değerleri	194
Tablo 5.9	Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş numune yatay kesit ölçüm değerleri	194
Tablo 5.10	Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş numune Z kesiti ölçüm değerleri	195
Tablo 5.11	Konsolidasyon ve yükleme sonrası örselenmemiş numune düşey kesit ölçüm değerleri	200
Tablo 5.12	Konsolidasyon ve yükleme sonrası örselenmemiş numune yatay kesit ölçüm değerleri	201
Tablo 5.13	Plastisitesi % 18 olan örselenmiş numune ile plastisitesi % 13 olan örselenmemiş numunede anizotropinin değişimi	215
Tablo 5.14	Değişik deney koşullarında anizotropideki değişim	218

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, 1981).....	9
Şekil 2.2 : Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	10
Şekil 2.3 : Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang,1990).....	10
Şekil 2.4 : Plastisite indisi % 4 olan iy derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang,1990).....	11
Şekil 2.5 : Düşük plastisiteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981, Sherif ve diğ. 1983).....	12
Şekil 2.6 : Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987).....	12
Şekil 2.7 : İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester,1992).....	13
Şekil 2.8 : Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (Troncoso,1990).....	15
Şekil 2.9 : Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1994).....	16
Şekil 2.10a : Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher 1995).....	16
Şekil 2.10b : Plastik olmayan siltte boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher 1995).....	17
Şekil 2.10c : Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Erten ve Maher 1995)	17
Şekil 2.10d : Plastik olmayan siltte boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Erten ve Maher 1995).....	18
Şekil 2.11 : Örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinde tekrarlı gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Puri, 1984).....	20
Şekil 2.12 : Plastisite indisinin 10 ve 30 çevrimde çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonu oluşması için gerekli gerilme oranıyla değişimi (Puri, 1923).....	21
Şekil 2.13 : Ön sıvılaşma durumu için gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Puri, 1984).....	21
Şekil 2.14 : Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin davranışına plastisite indisinin etkisi (Puri, 1984).....	22
Şekil 2.15 : Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984).....	23
Şekil 2.16 : Dinamik mukavemetin plastisite indisıyla değişimi (El Hosri, 1984).....	24

Şekil 2.17 : Örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanan numunelerin sıvılaşma dayanımları arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988).....	25
Şekil 2.18 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	25
Şekil 2.19 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	26
Şekil 2.20 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	26
Şekil 2.21 : Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisitenin etkisi (Liu, 1992).....	27
Şekil 2.22 : Düşük plastisiteli siltlerde dinamik üç eksenli mukavemete plastisitenin etkisi (Sandoval ve Prakash, 1992).....	28
Şekil 2.23 : Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Sandoval, 1989).....	28
Şekil 2.24 : Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Sandoval, 1989)	29
Şekil 2.25 : Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin temiz kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)	32
Şekil 2.26 : Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin ince daneli kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992).....	33
Şekil 2.27 : İnce dane yüzdesinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992).....	34
Şekil 2.28 : Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992).....	34
Şekil 2.29 : Islak sıkıştırmayla hazırlanan numunelerin dinamik mukavemetleri (Tatsuoka ve diğ. 1984).....	36
Şekil 2.30 : Numune hazırlama yönteminin kumlarda dinamik mukavemete etkisi (Mullilis 1977).....	37
Şekil 2.31 : Sıvılaşma sonrası kumlu zeminde düzeltilmiş SPT-N-kalıcı mukavemet ilişkisi (Seed, 1989).....	38
Şekil 2.32 : Tekrarlı yükler altında granüler zeminin yapısındaki değişim (Youd, 1977).....	46
Şekil 3.1 : Burulmalı kesme deney düzeneğine ait üç ayrı ünitenin detaylı gösterimi.....	50
Şekil 3.2 : Deney numunesinin düşey kesitte görünümü.....	51
Şekil 3.3 : Laboratuvarında hazırlanan içi boş silindirik deney numunesinin görünümü.....	53
Şekil 3.4 : Hava ve su kontrol ve uygulama birimi.....	54
Şekil 3.5 : Sinüzoidal yükleme veri edinim birimi.....	55
Şekil 3.6 : Farklı çaplardaki alt ve üst başlıklar.....	56
Şekil 3.7 : İç ve dış kalıplar.....	57
Şekil 3.8 : Dış kalıba vakum uygulayarak membranı gergin tutma.....	59
Şekil 3.9 : Kuru yağmurlama yöntemiyle numunenin oluşturulması.....	60
Şekil 3.10 : Deney sisteminin görünümü.....	62
Şekil 3.11 : Hazırlanmış numunenin son hali.....	64
Şekil 3.12 : Örselenmemiş numunelerin deneye hazırlanması.....	65
Şekil 3.13 : Örselenmemiş numunelerin orta kısımlarının oyulmasında kullanılan aletler.....	66
Şekil 3.14 : Örselenmemiş numunenin alt ve üst başlıklarla tutulu hali.....	66
Şekil 3.15a : Örselenmemiş numunenin düşey görünümü.....	67
Şekil 3.15b : Örselenmemiş numunenin yatay görünümü.....	67

Şekil 3.16 : Deneylerde kullanılan örselenmiş numunelerin granülometri eğrileri.....	68
Şekil 3.17 : Örselenmemiş numunelerin granülometri eğrileri.....	70
Şekil 3.18 : Laboratuvarda hazırlanan numunelerin burulmalı kesme statik mukavemetleri.....	71
Şekil 3.19 : Statik deneyden elde edilen boşluk suyu basıncı birim kayma ilişkileri.....	72
Şekil 3.20 : Laboratuvarda hazırlanan numunelerin statik burulmalı kesme deneyinden elde edilen gerilme izleri	73
Şekil 3.21 : Yükleme hızının statik mukavemetlere etkisi	74
Şekil 3.22 : Yükleme hızının boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi	74
Şekil 3.23 : Konsolidasyon eğrisi.....	75
Şekil 3.24 : Boşluk oranı-düşey gerilme ilişkisi.....	76
Şekil 3.25 : Ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemiyle belirlenmesi.....	76
Şekil 3.26 : Ön konsolidasyon basıncının Janbu yöntemiyle belirlenmesi.....	77
Şekil 3.27 : Ön konsolidasyon basıncının Butterfield yöntemiyle belirlenmesi.....	78
Şekil 3.28 : P=25 kPa basınç kademesi için oturma-karekök zaman grafiği	80
Şekil 3.29 : İçi boş silindirik numunede oluşan gerilme bileşenleri	82
Şekil 4.1a : Gümüşdere numunesinde yapılan DG1 deneyinde kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi.....	89
Şekil 4.1b : DG1 deneyinde birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	90
Şekil 4.1c : DG1 deneyinde boşluk suyu basıncının gelişimi	90
Şekil 4.2 : DG1 deneyinde histerisis ilmleri.....	91
Şekil 4.3 : DG1 deneyinde birim kayma-efektif gerilme ilişkisi	91
Şekil 4.4 : DG1 deneyinde efektif gerilme izi.....	92
Şekil 4.5 : Konsolidasyon süresinin yumuşak kil laboratuvar zemin numunesinin dinamik mukavemetine etkisi	93
Şekil 4.6 : Konsolidasyon süresinin boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi.....	94
Şekil 4.7 : Gümüşdere numunesinde birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	94
Şekil 4.8 : Gümüşdere numunesinde boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	95
Şekil 4.9 : DG2 numunesi, birim kayma efektif gerilme ilişkisi	96
Şekil 4.10 :Gümüşdere örselenmiş numunelerinde yapılan deneylerde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	96
Şekil 4.11a :DSG1 kayma gerilmesi-zaman değişimi.....	97
Şekil 4.11b :DSG1 birim kayma-zaman değişimi.....	97
Şekil 4.11c :DSG1 boşluk suyu basıncı-zaman değişimi.....	98
Şekil 4.12 : DSG1 kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi.....	99
Şekil 4.13 : Tekrarlı yüklemenin statik mukavemetlere etkisi.....	100
Şekil 4.14 : Tekrarlı gerilme oranı birim kayma gerilmesi ilişkisi.....	100
Şekil 4.15 : Gümüşdere killi numunesinde yapılan dinamik ve statik deney serisinin dinamik yükleme kısmına ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi	101
Şekil 4.16 : Gümüşdere killi numunesinde yapılan dinamik ve statik deney serisinin dinamik yükleme kısmına ait boşluk suyu basıncı birim kayma ilişkisi.....	102
Şekil 4.17 : Tekrarlı yükleme geçmişinin statik deneylerde boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi.....	103

Şekil 4.18 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi ML1 numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%2$, $\gamma_{kc}=14.3 \text{ kN/m}^3$).....	104
Şekil 4.19 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi ML1 numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%2$, $\gamma_{kc}=14.3 \text{ kN/m}^3$)....	105
Şekil 4.20 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi ML2 numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%11$, $\gamma_{kc}=12.9 \text{ kN/m}^3$).....	106
Şekil 4.21 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi ML2 numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%11$, $\gamma_{kc}=12.9 \text{ kN/m}^3$)...	106
Şekil 4.22 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi MH numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%33$, $\gamma_{kc}=12.9 \text{ kN/m}^3$).....	107
Şekil 4.23 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi MH numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%33$, $\gamma_{kc}=12.9 \text{ kN/m}^3$).....	108
Şekil 4.24 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı siltli numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.22$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$).....	110
Şekil 4.25 : Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı siltli numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.22$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$).....	110
Şekil 4.26 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	111
Şekil 4.27 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.15$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)	111
Şekil 4.28 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.16$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)	112
Şekil 4.29 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.16$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)	113
Şekil 4.30 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.17$, $\gamma_{kc}=14.3 \text{ kN/m}^3$)	114
Şekil 4.31 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.17$, $\gamma_{kc}=14.3 \text{ kN/m}^3$)	114
Şekil 4.32 : Tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi değişimi ($\gamma_{z0}=\pm\% 2.5$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)	115
Şekil 4.33 : Boşluk suyu basıncı oranı-plastisite indisi değişimi ($\gamma_{z0}=\pm\% 2.5$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)	116
Şekil 4.34 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 2-33$, $\gamma_{kc} = 12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$).....	117

Şekil 4.35 : Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 2-33$, $\gamma_{kc} = 12.9-1.43 \text{ kN/m}^3$).....	118
Şekil 4.36 : Adapazarı örselenmiş numunelerine ait dinamik deney sonuçları ($I_p = \% 11-33$, $\gamma_{kc} = 12.9 \text{ kN/m}^3$. $\gamma_{z0} = \pm \% 2.5$).....	119
Şekil 4.37 : Adapazarı örselenmiş numunelerine ait dinamik deney sonuçları ($I_p = \% 2-18$, $\gamma_{kc} = 12.9 \text{ kN/m}^3$. $\gamma_{z0} = \pm \% 2.5$).....	119
Şekil 4.38 : Adapazarı örselenmiş numunelerine ait dinamik deney sonuçları ($I_p = \% 2-18$, $\gamma_{kc} = 12.9 \text{ kN/m}^3$. $\gamma_{z0} = \pm \% 2.5$).....	121
Şekil 4.39 : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p = \%2$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ kN/m}^3$).....	122
Şekil 4.40 : Tekrarlı yükleme sonrası boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p = \%2$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ kN/m}^3$).....	122
Şekil 4.41 : Tekrarlı yükleme sonrası boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p = \%11-18$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ kN/m}^3$).....	123
Şekil 4.42a : Adapazarı numunesine ait kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi.....	125
Şekil 4.42b : Adapazarı numunesine ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	125
Şekil 4.42c : Adapazarı numunesine ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \%13$, İnce dane= $\%95$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.327$).....	126
Şekil 4.43 : Adapazarı örselenmemiş numunesine ait histerisis ilmkleri	126
Şekil 4.44a : İzmir A5 7.50-8.00 m'den alınan örselenmemiş numuneye ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	127
Şekil 4.44b : İzmir A5 7.50-8.00 m'den alınan örselenmemiş numuneye birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	127
Şekil 4.44c : İzmir A5 7.50-8.00 m'den alınan örselenmemiş numuneye boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi.....	128
Şekil 4.45 : İzmir A5 7.50-8.00 m'den alınan örselenmemiş numuneye ait histerisis ilmkleri.....	128
Şekil 4.46 : Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 13-18$, $\gamma_{kc} = 12.7-14.4 \text{ kN/m}^3$).....	129
Şekil 4.47 : Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 13-18$, $\gamma_{kc} = 12.7-14.4 \text{ kN/m}^3$).....	129
Şekil 4.48a : İzmir A5 9.00-9.50 m'den alınan örselenmemiş numune birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	130
Şekil 4.48b : Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \%5$, İnce dane= $\%80$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.208$).....	130
Şekil 4.49a : İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi.....	131
Şekil 4.49b : İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	131
Şekil 4.49c : İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi.....	132
Şekil 4.50 : İzmir numunesine ait deneyde oluşan histerisis ilmkleri ($I_p = \%9$, İnce dane= $\%55$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.248$).....	132
Şekil 4.51a : İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune statik deney kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi.....	133

Şekil 4.51b : İzmir A3 5.00-5.50 m‘den alınan örselenmemiş numune boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi.....	133
Şekil 4.51c : İzmir A3 5.00-5.50 m‘den alınan örselenmemiş numune efektif gerilme izi-birim kayma ilişkisi	134
Şekil 4.52a : İzmir A5 9.00-9.50 m‘den alınan örselenmemiş numune kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	134
Şekil 4.52b : İzmir A5 9.00-9.50 m‘den alınan örselenmemiş numune birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	135
Şekil 4.52c : İzmir A5 9.00-9.50 m‘den alınan örselenmemiş numune boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi.....	135
Şekil 4.53 : İzmir A5 7.50-8.00 m‘den alınan örselenmemiş numuneye ait histerisis ilmikleri.....	136
Şekil 4.54a : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p=\%8$, $\gamma_{kc}=14.4 \text{ kN/m}^3$).....	136
Şekil 4.54b : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-boşluk suyu basıncı kayma deformasyonu değişimi ($I_p=\%8$, $\gamma_{kc}=14.4 \text{ kN/m}^3$).....	137
Şekil 4.54c : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-efektif gerilme değişimi ($I_p=\%8$, $\gamma_{kc}=14.4 \text{ kN/m}^3$).....	137
Şekil 4.55 : Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%8-9$).....	138
Şekil 4.56 : Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%8-9$).....	138
Şekil 4.57a : İzmir A3 5.00-5.50 m‘den alınan örselenmemiş numune kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	139
Şekil 4.57b : İzmir A3 5.00-5.50 m‘den alınan örselenmemiş numune birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	140
Şekil 4.57c : İzmir A3 5.00-5.50 m‘den alınan örselenmemiş numune boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi.....	140
Şekil 4.58 : İzmir A3 5.00-5.50 m‘den alınan örselenmemiş numuneye ait histerisis ilmikleri.....	141
Şekil 4.59a : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p=\%6$, $\gamma_{kc}=14.0 \text{ kN/m}^3$).....	141
Şekil 4.59b : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-boşluk suyu basıncı kayma deformasyonu değişimi ($I_p=\%6$, $\gamma_{kc}=14.0 \text{ kN/m}^3$).....	142
Şekil 4.59c : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-efektif gerilme değişimi ($I_p=\%6$, $\gamma_{kc}=14.0 \text{ kN/m}^3$).....	142
Şekil 4.60a : İzmir A5 4.50-5.00 m‘den alınan örselenmemiş numune kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi	143
Şekil 4.60b : İzmir A5 4.50-5.00 m‘den alınan örselenmemiş numune birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	144
Şekil 4.60c : İzmir A5 4.50-5.00 m‘den alınan örselenmemiş numune boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi.....	144
Şekil 4.61 : İzmir A5 4.50-5.00 m‘den alınan örselenmemiş numuneye ait histerisis ilmikleri.....	145
Şekil 4.62a : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p=\%7$, $\gamma_{kc}=14.8 \text{ kN/m}^3$).....	145
Şekil 4.62b : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-boşluk suyu basıncı kayma deformasyonu değişimi ($I_p=\%7$, $\gamma_{kc}=14.8 \text{ kN/m}^3$).....	146
Şekil 4.62c : Tekrarlı yükleme sonrası kayma gerilmesi-efektif gerilme değişimi ($I_p=\%7$, $\gamma_{kc}=14.8 \text{ kN/m}^3$).....	146

Şekil 4.63 : Örselenmemiş numunelerde dinamik deney sonrası statik deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi b) Boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi c) Efektif gerilme izi ($I_p = \%6-9$, İnce dane= $\%52-63$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.170-227$).....	148
Şekil 4.64 : Örselenmemiş numunelerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı çevrim sayısı ilişkisi.....	149
Şekil 4.65 : Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	150
Şekil 4.66 : Tekrarlı kayma gerilmesi oranı-plastisite indisi ilişkisi.....	151
Şekil 4.67 : Örselenmemiş numunelerde plastisite indisinin boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi.....	151
Şekil 4.68 : Tekrarlı kayma gerilmesi oranı-ince dane miktarı ilişkisi.....	152
Şekil 4.69 : Örselenmemiş ve laboratuvarda hazırlanan numunelerde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	153
Şekil 4.70 : Örselenmemiş ve laboratuvarda hazırlanan numunelerde boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	153
Şekil 4.71 : Siltli numunelerde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	155
Şekil 4.72 : Örselenmiş laboratuvar siltli numunelerde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	155
Şekil 4.73 : Örselenmemiş laboratuvar siltli numunelerde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	156
Şekil 4.74 : Örselenmiş laboratuvar siltli numunelerde tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi ilişkisi.....	157
Şekil 4.75 : Örselenmemiş siltli zemin numunelerinde tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi ilişkisi.....	157
Şekil 4.76 : İnce dane miktarının laboratuvar numunelerinde dinamik mukavemete etkisi.....	158
Şekil 5.1 : Gümüşdere bölgesinin İstanbul il sınırları içerisindeki yeri.....	161
Şekil 5.2 : Resim önifleme tekniği ve akış diyagramı	167
Şekil 5.3 : Dinamik deney sonrası örselenmemiş numune yatay kesit görüntüsü ($X150$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.327$, $\sigma_c = 100$ kPa).....	168
Şekil 5.4 : Örselenmemiş numune yatay kesit işlem sonrası görüntü ($X150$).....	168
Şekil 5.5 : Adapazarı numunesinden alınan görüntünün renk histogramı.....	169
Şekil 5.6 : T eşik değeri 189 olarak seçilen mikroyapının siyah beyaz görüntüsü ($X150$, yatay: 1.00 mm, dikey: 0.75 mm).....	171
Şekil 5.7 : Adapazarı numunesine ait kum ve silt danelerinin dinamik deney sonrası şekil ve boyutları ($X150$, yatay: 1.00 mm, dikey: 0.75 mm).....	171
Şekil 5.8 : Danelere ait poligonların en dış noktalarının birleştirilmesiyle oluşturulan dışbükey kabuklar ($X150$).....	173
Şekil 5.9 : Dane oriyantasyonları ($X150$, Adapazarı örselenmemiş numune).....	173
Şekil 5.10 : Açısal histogram (Adapazarı siltli numune, DÖ2 deneyi).....	174
Şekil 5.11 : Kil-silt karışımının olası mikroyapısı (Wagg, 1990).....	177
Şekil 5.12 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi Adapazarı örselenmemiş numunesinin yatay düzlem görüntüsü ($X150$, yatay: 1.00 mm, dikey: 0.75 mm).....	180
Şekil 5.13 : Şekil 5.12'teki mikroyapıya ait boşluklu bölgeler ($X150$, yatay: 1.00 mm, dikey: 0.75 mm)	180
Şekil 5.14 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesinin yatay düzlem görüntüsü ($X150$).....	181

Şekil 5.15 :	Şekil 5.14'deki mikrografiğe ait siyahla görülen boşluklu bölgeler....	182
Şekil 5.16a :	Adapazarı örselenmemiş numunesi konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi boşluk çapı dağılımı.....	182
Şekil 5.16b :	Adapazarı örselenmemiş deney numunesi konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası boşluk çapı dağılımı ($\tau_d/\sigma_c'=0.327$, $PI=\%13$).....	182
Şekil 5.17 :	Tekrarlı yüklemede granüler zeminlerde yapı değişimi (Youd, 1977).....	184
Şekil 5.18 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası örselenmemiş Adapazarı siltli numuneden alınan mikrografikte boşlukların dağılımı, (X150).....	185
Şekil 5.19 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi laboratuvar numunesi düşey düzlem görüntüsü ($I_p=\%18$), (X300).....	185
Şekil 5.20 :	Gümüşdere laboratuvar siltli numunesinde boşlukların dağılımı.....	186
Şekil 5.21 :	Laboratuvar numunesinde konsolidasyon sonrası düşey düzlem görüntüsü, (X300, $I_p=\%2$).....	186
Şekil 5.22a :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi % 11 plastisiteli laboratuvar numunesinin üç düzlemine ait dijital görüntülerdeki boşluk çapı dağılımı.....	189
Şekil 5.22b :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası % 11 plastisiteli laboratuvar numunesinin üç düzlemine ait dijital görüntülerdeki boşluk çapı dağılımı.....	189
Şekil 5.23 :	Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş numune düşey kesit görüntüsü (X150).....	192
Şekil 5.24a:	Konsolidasyon öncesi örselenmemiş ince kumlu killi silt X (X150)...	193
Şekil 5.24b:	Konsolidasyon öncesi örselenmemiş ince kumlu killi silt Z kesiti.....	193
Şekil 5.25:	Konsolidasyon öncesi örselenmemiş ince kumlu killi silt Z doğrultusu (X150).....	196
Şekil 5.26:	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi örselenmemiş siltli numunede ince kum ve silt danelerinin şekli.....	196
Şekil 5.27:	Konsolidasyon ve yükleme sonrası örselenmemiş zeminde R oranı.....	196
Şekil 5.28:	Deney sonrası örselenmemiş siltli kil numunesi yatay kesit görüntüsü (X300).....	197
Şekil 5.29 :	Dinamik deney sonrası örselenmemiş numune yatay kesit görüntüsü (X300).....	198
Şekil 5.30 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesi düşey kesit Y-düzlemi (X150 yatay: 1 mm, düşey 0.75 mm).....	199
Şekil 5.31 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesi yatay kesit X-düzleminden alınan görüntü....	200
Şekil 5.32 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası $I_p=\%11$ olan laboratuvar numunesi yatay kesitinden alınan görüntü, X150 ($\tau_d/\sigma_c'=0.185$).....	201
Şekil 5.33 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası $I_p=\%11$ olan laboratuvar numunesi düşey kesitinden alınan görüntü X150 ($\tau_d/\sigma_c'=0.185$).....	202
Şekil 5.34 :	Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası $I_p=\%11$ olan laboratuvar numunesi Z kesitinden alınan görüntü, X150 ($\tau_d/\sigma_c'=0.185$).....	203
Şekil 5.35 :	Örselenmemiş numune yatay kesit konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü.....	203
Şekil 5.36 :	Şekil 5.42'e ait dane oriyantasyonları.....	204

Şekil 5.37 : İzmir örselenmemiş numunesi yatay kesit açısıl histogram.....	204
Şekil 5.38 : Örselenmemiş numune düşey kesit konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü (X75, yatay: 2.0 mm, düşey: 1.5 mm).....	205
Şekil 5.39 : Şekil 5.38'e ait dane oriyantasyonları.....	205
Şekil 5.40 : Şekil 5.39'a ait açısıl histogram.....	206
Şekil 5.41 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi dane şekli dağılımı.....	206
Şekil 5.42 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi yatay kesit görüntüsü (X75).....	207
Şekil 5.43 : Şekil 5.42'ye ait açısıl histogram.....	208
Şekil 5.44 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi düşey kesit görüntüsü (X300).....	208
Şekil 5.45 : Şekil 5.44'e ait açısıl histogram	209
Şekil 5.46 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş siltli numune Z kesiti görüntüsü.....	209
Şekil 5.47 : Şekil 5.46'ya ait açısıl histogram.....	210
Şekil 5.48 : Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi dane şekli dağılımı ($D_{dane}=0.02-0.25$ mm).....	210
Şekil 5.49 : Kaolin kristallerinden elde edilen teorik gri renk histogramı değişimi (Dudoignon ve Pantet, 1998).....	213
Şekil 5.50 : Plastisite indisi % 18 olan siltli laboratuvar numunesinde konsolidasyon öncesi histogramlar.....	216
Şekil 5.51 : Laboratuvar numunesinde konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası histogramlar.....	216
Şekil 5.52 : Örselenmemiş Adapazarı numunesinde konsolidasyon öncesi histogramlar.....	217
Şekil 5.53 : Örselenmemiş zeminde konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası histogramlar.....	217
Şekil A.1 : Burulmalı kesme deney aletinde numune düşey kesiti ve ölçüm saatleri.....	241
Şekil A.2 : Burulmalı kesme deney aletinde numunenin yerleştirildiği hücre ve yükleme düzenekleri.....	242
Şekil A.3 : Hava ve su basınçlarının ayarlandığı bölümdeki vana ve göstergeler...	243
Şekil A.4 : Dinamik yüklemeye ait frekans ve genliklerin ayarlandığı ve deney parametrelerinin ölçüldüğü bölüm.....	244
Şekil B.1 : DG1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	245
Şekil B.2 : DG1 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	246
Şekil B.3 : DG2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	247
Şekil B.4 : DG2 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	248
Şekil B.5 : DG3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	249
Şekil B.6 : DG3 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	250

Şekil B.7 :	DG4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	251
Şekil B.8 :	DG4 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	252
Şekil B.9 :	DG5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	253
Şekil B.10 :	DG5 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	254
Şekil B.11 :	DSG1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	255
Şekil B.12 :	DSG1 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	256
Şekil B.13 :	DSG2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	257
Şekil B.14 :	DSG2 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	258
Şekil B.15 :	DSG3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	259
Şekil B.16 :	DSG3 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	260
Şekil B.17 :	DSG4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	261
Şekil B.18 :	DSG4 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	262
Şekil B.19 :	DSG5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	263
Şekil B.20 :	DSG5 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	264
Şekil B.21 :	DSA1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	265
Şekil B.22 :	DSA1 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	266
Şekil B.23 :	DSA2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	267
Şekil B.24 :	DSA2 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	268
Şekil B.25 :	DSA3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	269
Şekil B.26 :	DSA3 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	270

Şekil B.27 : DSA4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	271
Şekil B.28 : DSA4 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	272
Şekil B.29 : DSA5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	273
Şekil B.30 : DSA5 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	274
Şekil B.31 : DA1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	275
Şekil B.32 : DA1 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	276
Şekil B.33 : DSA6 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri.....	277
Şekil B.34 : DSA6 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	278
Şekil B.35 : DA2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	279
Şekil B.36 : DA2 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	280
Şekil B.37 : DA3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	281
Şekil B.38 : DA3 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	282
Şekil B.39 : DA4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	283
Şekil B.40 : DA4 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	284
Şekil B.41 : DA5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	285
Şekil B.42 : DA5 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	286
Şekil B.43 : DA6 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	287
Şekil B.44 : DA6 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	288

Şekil B.45 : DA7 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri.....	289
Şekil B.46 : DA7 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	290
Şekil C.1 : SG1 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü.....	291
Şekil C.2 : DSG1 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü.....	291
Şekil C.3 : DSG1 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü.....	292
Şekil C.4 : DSG5 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü.....	293
Şekil C.5 : DÖ2 no'lu deneyden sonra Adapazarı örselenmemiş numunesinin görünümü.....	293
Şekil C.6 : DSÖ1 no'lu deneyden sonra İzmir-Çiğli örselenmemiş numunesinin görünümü.....	294
Şekil C.7 : DSÖ1 no'lu deneyden sonra İzmir-Çiğli örselenmemiş numunesinin görünümü.....	294
Şekil C.8 : A5 Sondajı 9.00-9.50 m 'den alınan örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi yatay düzlem görüntüsü (X 75)	295
Şekil C.9 : A5 Sondajı 9.00-9.50 m 'den alınan örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi düşey düzlem görüntüsü (X 300)	295
Şekil C.10 : A5 Sondajı örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X75) b) Düşey kesit (X 150) c) Z kesiti (X300).....	296
Şekil C.11 : A5 Sondajı örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X300) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X300).....	297
Şekil C.12 : Adapazarı örselenmiş laboratuvar (ML1) numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X75) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X750).....	298
Şekil C.13 : Gümüşdere örselenmiş (CL) laboratuvar numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü a) Düşey kesit (X150) b) Yatay kesit (X 150).....	299
Şekil C.14 : Gümüşdere örselenmiş laboratuvar numunesinin (CL) konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X 75) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X 150).....	300
Şekil C.15 : İzmir Çiğli A5 7.50-8.00 m örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü a) Yatay kesit (X 75) b) Z kesiti (X 53) c) Düşey kesiti (X 150).....	301
Şekil C.16 : C16 İzmir Çiğli A5 7.50-8.00 m örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X 150) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X 300).....	302

SEMBOL LİSTESİ

τ_d, τ_{cyc}	: Dinamik kayma gerilmesi
σ_d	: Dinamik düşey gerilme
σ_c, σ_v'	: Efektif çevre gerilmesi
σ_p'	: Ön konsolidasyon basıncı
σ_{z0}	: Ortalama kayma gerilmesi
σ_r	: Radyal gerilme
σ_z	: Üniform düşey eksenel gerilme
σ_θ	: Çevre gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
$\Delta\sigma_r$	: Radyal gerilme artımı
$\Delta\sigma_z$	: Üniform düşey eksenel gerilme artımı
$\Delta\sigma_\theta$	: Çevre gerilmesi artımı
F_z	: Düşey eksenel kuvvet
T	: Burulma momenti
P_i	: İç hücre basıncı
P_0	: Dış hücre basıncı
ΔH	: Düşey eksenel yerdeğiştirme
$\Delta\theta$	: Burulma açısı
ΔV_i	: İç hücre hacim değişimi
ΔV_s	: Numune hacim değişimi
B	: Skempton doygunluk parametresi
γ_{z0}	: Ortalama birim kayma deformasyonu
ε_{z0}	: Kayma şekil değiştirmesi artımı
ε	: Hacimsel deformasyon
ε_z	: Eksenel şekil değiştirme artımı
ε_θ	: Çevresel şekil değiştirme artımı
ε_r	: Radyal şekil değiştirme artımı
A_s	: Numune kesit alanı
z	: Numune üst yüzeyinden olan düşey mesafe
u	: Boşluk suyu basıncı bileşeni
H_i	: Numune başlangıç yüksekliği
H_s	: Numune deney sonu yüksekliği
r_i	: Numune başlangıç iç yarıçapı
r_d	: Numune başlangıç dış yarıçapı
V	: Başlangıç hacmi
N	: Çevrim sayısı
ΔU	: Boşluk suyu basıncı artımı
K_c	: Yatay toprak basıncı katsayısı
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı

SPT-N₁(60)	: Düzeltilmiş standart penetrasyon darbe sayısı
A₀	: Anizotropi indisi
H_p	: Yatay doğrultuda yönlenmiş piksel sayısı
V_p	: Düşey doğrultuda yönlenmiş piksel sayısı
R_p	: Sağa çapraz doğrultuda yönlenmiş piksel sayısı ($\alpha=45^0$)
L_p	: Sola doğrultuda yönlenmiş piksel sayısı ($\alpha=135^0$)
A	: Dane alanı
Ç	: Dane çevresi
x	: Dane orta noktası apsisi
y	: Dane orta noktası ordinatı
X_M	: Dane merkesinin apsisi
Y_M	: Dane merkezinin ordinatı
W	: Dane genişliği
L	: Dane uzunluğu
C_r	: Yuvarlaklık
L_d	: En uzun köşegen uzunluğu
α	: Oriyantasyon açısı
R	: Yuvarlaklık oranı
W_N	: Doğal su muhtevası
w	: Doygun durumda su muhtevası
W_L	: Likit limit
W_P	: Plastik limit
I_p, PI	: Plastisite indisi
FC	: İnce dane miktarı
e_{max}	: En büyük boşluk oranı
e_{min}	: En küçük boşluk oranı
e₀	: Başlangıç boşluk oranı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlığı
γ_k	: Konsolidasyon öncesi başlangıç kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kc}	: Konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ'	: Efektif birim hacim ağırlığı
ML	: Yumuşak ve düşük plastisiteli silt zemin
CL	: Yumuşak ve düşük plastisiteli siltli kil zemin
SM	: Siltli kum zemin
SC	: Killi kum zemin
ML₁	: Bu çalışmada kullanılan plastisite indisi % 2 olan silt zemin
ML₂	: Bu çalışmada kullanılan plastisite indisi % 11 olan silt zemin
MH	: Bu çalışmada kullanılan plastisite indisi % 33 olan plastik silt zemin
NP	: Plastik olmayan zemin
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
a_v	: Sıkışma sayısı
M_c	: Sıkışma modülü
C_v	: Konsolidasyon katsayısı
t	: Konsolidasyon süresi
H_d	: Sıkışan tabaka yüksekliği
T_v	: Sıkışma oranı
t₉₀	: Konsolidasyonun % 90'ının tamamlanması için gerekli süre
P	: Yük miktarı
ΔP	: Yük artımı

ΔH	: Sıkışma miktarı
Δh	: Sıkışma artımı
Δe	: Boşluk oranı değişimi
R_i	: Başlangıç konsolidasyon oranı
R_p	: Birincil konsolidasyon oranı
R_s	: İkincil konsolidasyon oranı
M_w	: Deprem büyüklüğü
E	: Mikrografik eşik değeri
D	: Mikrografikte monokromatik görüntü için esas eşik değeri
e'	: Kaba danelerarası boşluk oranı
e''	: İnce danelerarası boşluk oranı
n'	: Mikrografikten belirlenen porozite
A_b	: Mikrografikteki boşluk alanı
A_t	: Mikrografigin tüm alanı
X	: Blok alt örneğin yatay düzlemi
Y	: Blok alt örneğin düşey düzlemi
Z	: Blok alt örneğin ortogonal üçüncü düzlemi
D_{dane}	: İncelenen dane çapı aralığı
i, f, g, h	: İnce kesite iletilen ışığın birim alana gelen şiddeti
θ	: Mikroskop dönme açısı
ϕ	: Sapma açısı
I, F, G, H, K	: Işık şiddeti katsayıları
M	: En büyük ışık şiddeti
N	: En düşük ışık şiddeti
C	: Oriyantasyon derecesi

ÖZET

Yurdumuzun geçirdiği en büyük deprem felaketlerinden biri olan Kocaeli (1999) depreminin zeminde neden olduğu taşıma gücü kayıpları ve sıvılaşma nedeniyle önemli yapısal hasarlar ortaya çıkmış ve büyük ölçüde can ve mal kayıpları meydana gelmiştir. Dolayısıyla tarihte böyle büyük depremler geçirmiş veya geçirme ihtimali olan bölgelerdeki, özellikle temel altı zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranış özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu yüzden zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özellikleri farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılacak dinamik ve statik laboratuvar deneyleriyle belirlenmelidir.

Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranışı araştırılırken arazideki mevcut zemin koşullarının aynen laboratuvarda modellenmesi alışılmalıdır. Bu açıdan laboratuvar ortamında, doğadaki zemin tabakalarının durumunu en ideal biçimde modellemek üzere farklı numune hazırlama yöntemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte doğadaki mevcut zemin tabakalarının daneli ve boşluklu iç yapısının temsili olarak oluşturulması oldukça zordur. Bu nedenle laboratuvar çalışmalarında genellikle örselenmiş zeminlerden yerinde hazırlanan numunelerle, araziden sondajlarla alınan örselenmemiş zemin numunelerinde farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarında deneyler yapılarak, sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanır.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin tayinine bağlıdır. Tekrarlı yükleme altındaki gerilme şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesinde birim şekil değiştirmelere bağlı dinamik kayma modülü ve sönüm oranının, mukavemet özellikleri için de, tekrarlı kayma gerilmesi oranı ve çevrim sayısının bilinmesi gereklidir.

Bu çalışmada değişik plastisitelerdeki siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı, dinamik burulmalı kesme deney aletinde, farklı koşullarda yapılan dinamik ve statik deneylerle araştırılmıştır. Dinamik deneyler gerilme kontrollü, statik deneyler ise deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneyler, JICA projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilen dinamik burulmalı kesme deney aletiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi, düşey eksenel kuvvet F_z , burulma momenti T , iç hücre basıncı P_i ve dış hücre basıncı P_o dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilmesinin yanı sıra; düşey eksenel yer değiştirme ΔH , burulma açısı $\Delta \theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_i ve numune hacim değişimi ΔV_s 'nin belirlenmesine olanak tanır. Burulma momenti istenilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda uygulanmaktadır. Düşey yük ve ters basınç ise hem dışarıdan elle hem de otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Bu deney aleti ile içi boş, silindirik numuneye drenajlı veya drenajsız şartlarda, izotropik ve anizotropik üç eksenli gerilme koşullarında, 0.01~10.00 Hz yükleme frekansı aralığında yük uygulanarak, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ile kayma mukavemeti özellikleri belirlenmektedir.

Deneylerde içi boş silindirik zemin numuneleri kullanılmıştır. Laboratuvarda kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin iç yarıçapı $r_i = 3.0$ cm, dış yarıçapı $r_d = 5.0$ cm ve yüksekliği yaklaşık $H_i = 20.0$ cm dir. Örselenmemiş numunelerin ise iç yarıçapı $r_i = 1.5$ cm, dış yarıçapı $r_d = 3.5$ cm ve yüksekliği yaklaşık $H_i = 14.0$ cm dir. Numuneyi içten ve dıştan çevreleyen lastik membranların kalınlığı 0.3 mm dir. Numunelerin doygunluğa ulaşmasını sağlamak amacıyla alt başlıktan itibaren üst yüzeye kadar su geçirmek için zeminin plastisite indisine bağlı olarak belli bir süre beklenmiştir. Suyu doyurma aşamasında ise numuneler ters basınç altında bırakılmıştır. Doygunluğun sağlanmasının ardından iç ve dış çevre basınçları istenen efektif konsolidasyon basıncına eş zamanlı olarak getirilmiş ve numune izotropik olarak konsolidasyona bırakılmıştır. Deneylerde konsolidasyon basıncı olarak 100 kPa uygulanmıştır. Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından dinamik deneylerde farklı kayma gerilmesi oranlarında zemin numuneleri göçmeye ulaşınca kadar yüklenmiş, numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncının değişimi deney boyunca izlenmiştir. Statik deneyler ise 0.35- 0.50 -0.75 mm/dk deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Bir doğrultuda sabit hızda uygulanan burulma momenti ile statik olarak yüklenen içi boş silindirik zemin numunelerinde akmanın meydana geldiği andaki kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında altı farklı türde deney serileri uygulanmıştır. Bunlar, laboratuvarda hazırlanan numunelerde ve araziden alınan örselenmemiş numunelerde yapılmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Muayene çukurlarından alınan örselenmiş zeminler kullanılarak hazırlanan laboratuvar numuneleri üzerinde öncelikle göçme seviyesi olarak belirlenen çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan tekrarlı yükleme deneyleri, ilk deney

serisini oluşturmaktadır. Bu deneylerde İstanbul Gümüşdere Köyü'nde açılan muayene çukurlarından alınan ve % 18 plastisite indisine sahip siltli kil numunesi kullanılmıştır. Deneylerde izotropik konsolidasyonun tamamlanmasının ardından farklı gerilme oranlarında sinüzoidal yüklemeye, zemin numunelerinde göçme oluşması için gerekli çevrim sayıları belirlenmiştir.

İkinci deney serisinde aynı şekilde hazırlanan numunelerle sabit gerilme oranında artan çevrim sayılarında bir dizi dinamik deney yapılmış, deney devam ederken belirli çevrim sayılarından sonra durdurularak statik yüklemeye geçilmiştir. Bu deney serisinde dinamik deneyler, ilk deney serisinden elde edilen dinamik mukavemet eğrisinden $N=20$ çevrim sayısına karşı gelen dinamik gerilme oranında yapılmıştır. Bu deneylerde siltli kil zemin, 5, 8, 12, 15 çevrimde tekrarlı burulma momentine maruz bırakılmış, ardından 0.50 mm/dak sabit deformasyon hızında statik olarak yüklenmişlerdir. Dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisinde kritik akma eğrisi olarak belirtilen eğri ile bu deney sonuçları karşılaştırılarak, akma durumundan önceki ve numunede kalıcı deformasyonlar oluştuktan sonraki statik mukavemetler hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Böylelikle aynı plastisitedeki numuneler farklı koşullar altında tekrarlı yüke maruz bırakılmış ve ardından statik olarak yüklenmişlerdir.

Üçüncü deney serisinde plastisite indisi %2-33 arasında olan ve Adapazarı'ndan getirilen siltli laboratuvar numunelerinde göçme seviyesine kadar dinamik deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde laboratuvar da kuru yağmurlama yöntemiyle farklı kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numunelere tekrarlı yükleme, drenajsız durumda uygulanmıştır.

Laboratuvar da hazırlanan numunelerde yapılan son deney serisinde ise % 2 ve % 11 plastisite indisine sahip silt numunelerine önce tekrarlı yükleme, numunede göçme seviyesi oluşuncaya kadar uygulanmış, ardından 0.50 mm/dk deformasyon hızında %10 birim kayma oluşuncaya kadar statik deney yapılmıştır.

Örselenmemiş numuneler, ortası dikkatlice oyulduktan sonra burulmalı kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerde yapılan ilk seri deneyde önce düşük deformasyonlarda belirli tekrarlı kayma gerilmesi oranında dinamik yükleme uygulanmış, numunenin kalıcı deformasyona uğramasına izin verilmeden ve drenajlar açılmadan 0.50 mm/dk hızında statik deneye geçilmiştir. Hem dinamik hem de statik deneyde gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu ilişkileri elde edilmiştir.

İkinci deney serisinde ise içi boş, örselenmemiş numunelere göçme oluşuncaya kadar farklı gerilme genliklerinde tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Böylece doğal numunelerin mevcut yapısı bozulmadan ve örselenme olmadan tekrarlı yükler altındaki davranışları belirlenmiştir.

Deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler, tekrarlı gerilme seviyesi, birim kayma genliği, çevrim sayısı, kritik birim akma deformasyonu, plastisite indisi, ince dane miktarı, kuru birim hacim ağırlığı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı, deney sistemi, numune hazırlama yöntemi ve numune yapısı olarak belirlenmiştir.

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. Örselenmiş laboratuvar numunesinde ise plastisite indisi azaldıkça boşluk suyu basınçları artarken, efektif gerilmeler azalmaktadır. Böylelikle düşük plastisiteli siltte mukavemet kayıpları artan birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçlarına da bağlı olmaktadır.

Deney sonuçlarında yumuşak killi zeminde konsolidasyon süresiyle dinamik mukavemetin arttığı belirlenmiştir. Yapılan statik deneylerde ise yükleme hızıyla mukavemet artmaktadır. Dinamik deneylerden sonra yapılan statik deneylerde laboratuvarda hazırlanan siltli numunelerle örselenmemiş numunelerin drenajsız statik mukavemetlerinde önemli ölçüde azalma olduğu belirlenmiştir. Buna karşın tekrarlı gerilmeler altında siltli ve killi zeminin statik mukavemeti, kritik bir akma deformasyonu seviyesine kadar fazla azalmamaktadır. Ancak bu seviyeden sonra siltli kil zemin numunesinde kalıcı deformasyonlar oluşmakta ve kayma mukavemeti % 40'a varan oranda azalmaktadır.

Laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan dinamik deneylerde plastisite arttıkça belli bir seviyeden sonra dinamik mukavemet artmaktadır. Bununla birlikte artan plastisitelerde boşluk suyu basınçları aynı çevrim sayısında daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Örselenmemiş zemin numunelerinde $\pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan dinamik deneylerde mukavemetin, laboratuvar numunelerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Boşluk suyu basınçları örselenmemiş numunelerde de çevrim sayıları arttıkça sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte birim kayma deformasyonları hızla artmakta, belirli bir kayma deformasyonundan sonra numunede kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, laboratuvarda hazırlanan örselenmiş siltli numunelerle, deney tüplerinden çıkarılan örselenmemiş yumuşak killi ve kumlu silt numunelerin izotropik konsolidasyon öncesi ve konsolidasyon ve yükleme sonrası yapısal değişimleri incelemiştir. İncelemede dijital kameralı yüzeysel ışık kaynağına sahip, X330'a kadar büyütme yapabilen optik mikroskop kullanılmıştır. Görüntülerin alımı sırasında önceden hazırlanan blok numuneler mikroskop merceği altına yerleştirilip, odak uzaklığı mikroskop düzeneği aracılığıyla ayarlanmıştır. Dijital kamera aracılığıyla elde edilen görüntüler bilgisayara 640*480 piksel çözünürlükte iki boyutlu olarak aktararak, kamerada istenen netliğin sağlandığı bir anda dondurulup kaydedilmiştir.

Zemin yapısının belirlenmesi amacıyla tabii su muhtevasını koruyan örselenmemiş numunelerden, numune yüksekliği boyunca aralarında 2'şer cm; laboratuvar numunelerinde ise 4'er cm mesafe olacak şekilde numune üst yüzeyinden, ortasından ve altından; örselenmemiş numunelerde 3'er cm, laboratuvar numunelerinde ise 4'er cm'lik kısımdan kesitler alınmıştır. Daha sonra bu kesitlerden yaklaşık 1x1x1 cm boyutlarında, ilk aşamada 5'er adet blok numune çıkarılmıştır. Bunun için kesitler önce sıvı azota batırılıp 5-15 dakika arasında bekletilmiştir. Donmanın sağlanmasından sonra numunelerin birbirine dik üç kesitinden, blok örnekler çıkarılmıştır. Böylece numunelerin mevcut yapısı korunarak, incelenecek kesitlerin rastgele kırılmayla elde edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu örnekler, 30 kPa basınçta vakum uygulanan desikatörde 1-7 gün bekletilmişlerdir. Bekleme süresi numune boyutlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Böylece numune boşluklarındaki suyun katı fazdan direkt olarak gaz fazına geçişi sağlanmıştır. Havada veya etüvde sağlanan kuruma sırasında oluşan kapiler gerilmeler etkisiyle, mevcut danesel yapıda değişiklikler olacağından, sıvı azotla dondurduktan sonra vakum uygulanarak boşluk suyu alınan örselenmemiş zeminin doğal danesel ve boşluklu yapısını koruduğu düşünülmektedir. Desikatörden çıkarılan blok numunelerin birbirine dik üç kesiti plastik bantla stabilize edilmiştir. Mümkün olduğunca düz bir yüzey elde edilmesine çalışılmış, görüntülerdeki topografik etkilerin en düşük seviyede tutulması sağlanmıştır. Bu işlemten sonra numuneler mikroskop altına yerleştirilmiştir ve her üç yüzeyden birbirini takip eden görüntüler alınmıştır.

Mikrografik analizler, dijital görüntü analiz programı "Image J", kullanılarak yapılmıştır. Bu program yardımıyla, farklı büyütmelerle elde edilen mikrografiklere göre ince kum ve silt boyutundaki danelerin şekil, boyut ve dağılımları belirlenip ölçülebilmektedir. Ayrıca danelerin birbirleriyle ve boşluklarla aralarındaki sınırlar belirlenebilmektedir. Dane sınırları

belirlendikten sonra, “Dışbükey Kabuk” yöntemiyle kum ve silt danelerinin oriyantasyonları ve boşluk ve çatlakların uzanım doğrultuları ve açıları hesaplanabilmektedir. Dane oriyantasyonlarının belirlenmesiyle açılal histogramları da çizilmektedir.

Bu çalışmada, incelenen zeminlerin izotropik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası dane şekil ve boyutlarıyla, oriyantasyonlarında değışiklik olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Konsolidasyon sonrası zeminin boşluklarındaki azalma ve danelerin paralel ve yatay doğrultudaki oriyantasyonları araştırılmıştır. Laboratuvarıa hazırlanan siltli numunelerin oluşturduğu üniforma yakın izotropik yapı ile, örselenmemiş numunelerin doğada oluşturdukları anizotropik yapı karşılaştırılmıştır. Bu iki farklı zemine ait mikroyapının tekrarlı burulma momenti altında oluşan kayma deformasyonları etkisiyle uğradığı değışim belirlenmeye çalışılırken, özellikle silt ve ince kum boyutundaki danelerin, zeminin maruz kaldığı kayma deformasyonlarının bir göstergesi olup olmadığı araştırılmıştır.

Sonuçlarda, izotropik konsolidasyonla birlikte hem laboratuvarıa hazırlanan örselenmiş ince kumlu ve killi silt numunelerde, hem de örselenmemiş killi silt numunelerde, kaba danelerarası büyük ve ince danelerarası küçük boşluklarda belirgin bir azalma olduğu belirlenmiştir. Bu azalma, örselenmemiş zeminde daha fazladır. Laboratuvarıa hazırlanan örselenmiş siltli numunede ise konsolidasyon öncesi porozite örselenmemiş numuneye göre daha büyüktür. Laboratuvar siltli numunelere ait görüntülerden çoğunlukla boşlukların birbiriyle bağlantılı olarak dağıldığı, örselenmemiş yumuşak siltli zeminde ise boşlukların, laboratuvarıa hazırlanan siltli numuneye kıyasla daha rastgele bir dağılıma sahip olduğu görölmüştür. Ayrıca çapları 0.1 mm’den büyük boşluklara rastlanmış, numune yüksekliği boyunca bu boşluklarda artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak yine de, plastisite indisi % 18 olan örselenmiş numunelerin konsolidasyon öncesi boşluk oranları, düşük frekanslı titreşimle sıkıştırmaya da bağılı olarak daha düşük hesaplanmıştır.

Bir başka sonuç ise tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli zeminden elde edilmiştir. Buna göre yükleme öncesinde her üç doğrultudan alınan görüntülerin analizinden, büyük çaptaki boşlukların heterojen bir dağılıma sahip olduğu görölmüştür. Kum ve silt daneleri arasındaki bu boşluklarda tekrarlı yükleme de yeniden bir dane dağılımı ve yapısına sahip olan numunede, boşluk çaplarının da yeni yerleşime bağılı olarak değıştiğı ve her üç düzlemde yapılan ölçümlerde bu çap değlerlerinin birbirine yaklaştığı belirlenmiştir.

Adapazarı örselenmemiş siltli numuneden alınan görüntülerde ortalama dane şeklinin birbirine dik üç kesitteki dağılımı birbirine yakındır. R oranı 1'e yakın olan dane sayısı % 50 dir. Böylece örselenmemiş zeminde kesme öncesi danelerin yaklaşık yuvarlak dağıldıkları söylenebilir. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasında yuvarlağa yakın danelerin dağılımında biraz azalma görülürken uzun doğrultularında belirli bir yönlenmeye sahip oldukları söylenebilir. Ancak tekrarlı yüklemede çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonuna uğrayan zeminde böyle bir dane şekli değişiminin olduğunu söylemek için daha fazla sayıda deneyden alınan blok ve ince kesitlere ve ilave elektron mikroskobu incelemesine ihtiyaç vardır.

İzotropik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası laboratuvarda hazırlanan ve örselenmemiş zemin numunelerinde boşlukların çapı ve dağılımıyla, ince kum ve silt dane oriyantasyonlarına ilave olarak anizotropik yapı özelliği de önem kazanmaktadır. Bu çalışmada anizotropi, öne sürülen bir bağıntıyla ve dijital mikrografiklere ait gri renk histogramlarının değişiminden belirlenmiştir. Buna göre laboratuvarda hazırlanan siltli zemin numunesinden alınan çok sayıda görüntüde anizotropinin değişmediği belirlenmiştir. Bunun yanında örselenmemiş numunelerde ise konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle anizotropide bir miktar artış olduğu söylenebilir.

Yapı incelemesinde çok sayıda görüntünün analiziyle belirlenen bu sonuçlar bize ancak tahmini bir fikir vermekte, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası çift genlikli % 5 birim kayma genliğine ulaşan zemin numunesinde danelerin ve boşlukların şekil, boyut, dağılım ve oriyantasyonlarında meydana gelen değişimin belirlenmesi için kapsamlı ve detaylı bir araştırma gerekmektedir.

Son olarak, bu çalışmada yapılan dinamik ve statik deneylerle siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranış özellikleri araştırılmış, numunelerin daneler ve boşluklu yapısı optik mikroskop incelemeleri ve görüntü analizleriyle belirlenmeye çalışılmıştır. Bütün bu çalışmalar bu tezin konusunu oluşturmaktadır.

SUMMARY

Due to the loss of bearing capacity and liquefaction that resulted from the Kocaeli (1999) earthquake which is one of the biggest disasters that our country has experienced, there had been occurred many structural damages and lots of casualties. So, especially the cyclic behavior of foundation soils should be determined in those regions which has experienced huge earthquakes and has a potential in the near future. In this respect, the stress-strain relationships and cyclic shear strength properties of soil stratum should be determined by conducting static and dynamic soil laboratory tests under distinct consolidation and stress conditions.

It's been accustomed to model the in-situ soil conditions exactly in the laboratory while researching the behavior of soils under cyclic loadings. From this point of view, in order to model the in-situ soil conditions in the laboratory, many specimen preparation methods are used. However, it is extremely hard to constitute the exact fabric of natural soils. Therefore, the soil tests are performed under different consolidation and loading conditions by using reconstituted and undisturbed soil specimens together and the results are interpreted with the comparison between them.

The cyclic behavior of soils depend on the determination of stress-strain and strength properties. The dynamic shear modulus and damping ratio depending on strains should be known in order to determine the stress-strain properties, and the relationship between the cyclic shear stress ratio and number of cycles should be determined in order to know the shear strength properties of soils under cyclic loadings.

In this study, the cyclic behavior of silty and clayey soils have been investigated by conducting static and dynamic tests under different conditions using cyclic torsional shear loading device. The dynamic tests have been applied stress controlled and the static tests were performed strain controlled.

All the tests have been performed with the dynamic torsional shear testing apparatus brought to İ.T.U. Soil Mechanics Laboratory by the JICA project. The testing system enables the measure and the automatic record of vertical axial load F_z , torque load T , inner and outer confining pressures P_i and P_o as well as the vertical axial strain ΔH , angular displacement $\Delta \theta$, change in the volume of inner cell ΔV_i and the soil specimen ΔV_s . The torque load can be applied in one direction or cyclically under desired speed and value. Also the vertical load and the back pressure can be controlled automatically or manually. By using this testing apparatus, the stress-strain properties and the shear strength properties of the soils can be determined with the application of the load under different isotropic and anisotropic triaxial stress conditions within a frequency range of 0.01~10.00 Hz.

In the tests, hollow cylinder soil specimens were used. The inner radius of the air pluviated specimens is 3.0 cm, outer radius of them is 5.0 cm whereas the dimensions of the undisturbed soil specimens are $r_i = 1.5$ cm, $r_d = 3.5$ cm and $H_i = 14.0$ cm. The rubber membranes that cover the inner and outer part of the soil specimens have a thickness of 0.3 mm. A certain amount of time was passed by to saturate the specimen by applying water diffusion from the bottom part through the whole specimen. And after that a certain value of back pressure was applied to the specimens. After the saturation process, inner and outer confining pressures increased up to desired effective consolidation pressure simultaneously. The consolidation pressure is 100 kPa. At the end of consolidation, cyclic shear stress were applied to the specimens up to failure limit in dynamic tests and the change in the excess pore water pressure and the residual shear strains were observed during the test. Monotonic loadings were conducted under 0.35-0.5-0.75 mm/sec loading rates. The shear stress value occurred in the specimen in the yielding limit was determined.

In the concept of this study, there are six number of series of tests which are mainly divided into two of which the reconstituted and undisturbed specimens were used. The first series of tests were applied till the reconstituted specimens reach the failure limit of DA of 5 %. In these tests, the silty clay specimen was taken from Gümüşdere. The number of cycles of loading cause to failure of the specimen were determined in all the tests.

In the second series, the constant stress ratio was applied to the specimens for various increasing numbers of cycles and after that, soils were loaded statically. This constant stress ratio was determined according to the failure curve corresponding the $N=20$ value. In those tests, silty clay soil was loaded cyclic torque at cycles of $N=5, 8, 12, 15$. The test results were

compared with the curve obtained for the critical yield condition from the previous tests. And the static undrained shear strengths were also determined before and after the critical yield limit.

In the third series of tests, the silty soil specimens with a plasticity range of 2-33 % taken from Adapazarı were used and they were loaded till the failure limit. The undrained cyclic loading was applied to these specimens which prepared under different dry density.

In the last series of tests of reconstituted soil specimens, the cyclic torque loading was applied till they reach failure limit and then they were loaded statically under 0.50 mm/sec constant loading rate.

The torque loading was applied to the undisturbed soil specimens after the inner cylindrical part of them sheared carefully. In the first series of tests low amplitude shear stresses were applied to cause limited shear strains, and then in the undrained condition and preventing the soil from the residual shear strains, they were loaded statically up to reach the failure limit which is described as 5 % DA shear strain. In both parts, the stress-strain relationship was determined and the pore water pressure response was measured.

In the second series, the cyclic load was applied to cause failure in the soil. As a result, the dynamic shear strengths were determined for the undisturbed specimens. The main parameters that affect the test results were obtained as the shear strain amplitude, number of cycles, cyclic shear stress ratio, critical yield strain, plasticity index, fines content, dry unit weight, consolidation time, rate of loading, testing apparatus, specimen preparation method and soil fabric.

From the results, it was also obtained as the pore water pressures stay limited but the shear strains increase rapidly due to the loading cycles in the fine grained soil resulting in softening that cause bearing failure of the specimen because of the residual strains. The increase in plasticity index decreases the degree of pore water pressures, especially in silty soils. Yet, the pore water pressures increase with the decrease in plasticity which results in the reduction of effective stresses.

The consolidation time significantly increases the dynamic strength in soft silty clays whereas the static strengths increase due to the increase in loading rate.

It has been observed that the static undrained shear strengths decrease with the cyclic stress history. However, up to a certain critical yielding strain limit, there wasn't a significant change in the static strengths. But after this limit, large amounts of strains started to develop and the static strengths decreased exceeding nearly 40 % although the specimen had not been reached the failure.

Plasticity increases the dynamic strength, however; the pore water pressures generate through the test depends certainly on the plasticity of the silty specimen.

It was also determined that the undisturbed specimens are highly much more resistant to bearing capacity failure than the reconstituted ones. The stress ratios required to cause DA of 5 % strain was determined higher than the reconstituted soil specimens at the same cycles. Also the pore water pressures stayed limited while the strains increased rapidly as well as the tests conducted on the reconstituted specimens.

In this study, the microstructure and the fabric of the reconstituted and undisturbed soil specimens were determined by optical microphotometrical analyses using an optical microscope that enables up to X330 magnification equipped with a digital camera and a fiber optical illuminator.

Optical micrographs were collected from each block sub-samples prepared from the three orthogonal surfaces of each testing specimens. The sub-samples were taken out from the three different surfaces of corresponding heights. They are 2cm from the top and bottom in the undisturbed ones and 4cm in reconstituted specimens. Then all the sections were put into liquid nitrogen and then the freezed sections were cut down to prepare sub-samples. Many sub-samples were prepared and they were applied 30 kPa vacuum pressure in order to come out of the water inside the pores without disturbing the actual fabric.

The digital micrographs were taken from these sub-samples after stabilizing the rough surface with a rubber band waiting after 2-7 days. They were analysed by a software called "Image J" and mainly the pore voids and the grainy parts were distinguished from each other.

The silty and sandy grains were measured and their specific physical properties were determined such as orientation, circularity, area, etc. Additionally the orientations of soil grains were determined by the Convex Hull method.

In some series of micrographs were taken from the original hollow cylindrical soil specimen in pre-consolidation, post-consolidation and post shear conditions. The uniform fabric of reconstituted soil specimens were compared with the anisotropic microstructure of undisturbed specimens.

The main objective is to determine the change in the pore sizes and the distributions of them after cyclic loading, the change in the orientation and the circularity and elongation of silt and sand grains and lastly the main aim is to find the anisotropic structure of the different kinds of soils having different initial fabric which were applied consolidation and cyclic shear.

At the results, it was observed that the pore sizes decrease after consolidation both in reconstituted and undisturbed specimens. Yet, this reduction is more in undisturbed specimens. Their heterogeneity increases at a certain amount. Also anisotropy increases in undisturbed specimens after consolidation and cyclic shear,, but it stays constant in reconstituted specimens after loading.

Another finding is, after cyclic loading, due to dilatancy in sandy grains, large amount of reoriented particles observed which forms new small pores. But with the stress reversal, these pores collapses and decreases due to the new arrangement of the particles in order to be stabil.

At the end, we may say that these observations just tell us an approach to the fabric determination study of various kinds of soil types. We should have quantitative approach as well as the qualitative results. Also it can be said that the preparation of thin sections and the electron microscope analysis.

1.GİRİŞ

Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği, son yıllarda giderek önem kazanan bilim dalları haline gelmiştir. Özellikle nüfusun yoğunlaştığı sanayileşmiş bölgelerdeki mühendislik yapılarına gelecek deprem yüklerinin hesaplanması ve bu yapıların temel sistemlerinin zeminle olan etkileşimi, zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesini gerekli kılar.

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmeleri zeminlerin farklı mertebelerde şekil değiştirmelere uğramasına sebep olmaktadır. Bu şekil değiştirmeler, uygulanan kayma gerilmesi genliğine ve yükleme hızına bağlı olarak, zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre zemin içerisinde değişik etkiler bırakmaktadır. Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğinin temel amacı, zeminlerin tekrarlı yükler altında uğrayacakları deformasyonları belirlemek ve yapılacak farklı mühendislik yapıları için zeminden kaynaklanan dinamik etkilerin derecesini saptamaktır.

Bu çalışmanın öncelikli amacı, farklı endeks özelliklerine sahip yumuşak ve suya doygun kumlu ve killi siltlerin ve siltli killerin tekrarlı yükler altındaki dinamik mukavemet özelliklerini belirlemektir. Bu kapsamda dinamik burulmalı kesme deney aleti ile farklı özellikteki laboratuvar numuneleri ve örselenmemiş numuneler üzerinde statik ve dinamik deneyler yapılmıştır.

Deneyisel çalışmada ilk olarak farklı yükleme hızlarında yapılan statik deneylerde yumuşak siltli kil zeminin drenajsız statik mukavemetindeki değişimin belirlenmesidir. Daha sonra seçilen sabit bir yükleme hızında laboratuvarda hazırlanan numunelerin statik mukavemetleri saptanmıştır.

Dinamik deneylerde ilk amaç yumuşak siltli kil zeminin dinamik mukavemetinin belirlenmesi ve tekrarlı yükleme sonrası önceden belirlenen statik mukavemetinde meydana gelen azalmanın derecesini saptamaktır. Bu yüzden, deneylerde önce laboratuvarda hazırlanan, örselenmiş, yumuşak, siltli kil zemine farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri altında tekrarlı burulma momenti uygulanmıştır. Daha sonra belirlenen sabit bir tekrarlı kayma

gerilmesi seviyesinde, farklı çevrim sayılarında dinamik yüklemeler yapılmıştır. Bu yüklemeler sonrasında zemin statik olarak kesilmiştir. Elde edilen sonuçlarda siltli kil zeminin tekrarlı yükleme sonrası statik mukavemetlerindeki değişim belirlenmiştir.

Dinamik deneylerin ikinci amacı, farklı plastisite indislerindeki silt zeminlerin dinamik mukavemetlerinin belirlenmesidir. Bu yüzden farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan deneylerde zeminlerin göçme seviyesine ulaşmaları için gereken çevrim sayıları bulunmuştur.

Bir başka deney serisinde, iki farklı plastisite indisindeki silt zeminin göçmeye kadar uygulanan tekrarlı burulma momenti sonrasındaki statik mukavemetleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar numunelerin başlangıç drenajsız statik mukavemetleriyle karşılaştırılmıştır.

Dinamik deneylerde son olarak örselenmemiş zemin numunelerinin mukavemetleri belirlenmiştir. Bunun için tekrarlı burulma momenti farklı genliklerde numunelere uygulanmıştır ve tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkileri çıkartılmıştır. Örselenmemiş zemin numunelerinde yapılan son deney serisinde ise önce düşük genlikli dinamik yüklemenin ardından numunelerin statik mukavemetleri belirlenmiş, sonra dinamik yüklemede oluşan göçme seviyesinden sonra bu mukavemetlerdeki değişim araştırılmıştır.

Bu çalışmanın diğer bir amacı da farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarında zemin dane yapısında meydana gelen değişimlerin belirlenmesidir. Bunun için optik mikroskop incelemeleri yapılmış, farklı büyütme oranlarında dijital görüntüler alınmıştır. Daha sonra bu görüntüler, analiz programı yardımıyla işlemlere tabi tutularak, anlamlı ölçülebilir büyüklükler elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilenler araştırmacıların yaptığı çalışmalarla karşılaştırılarak laboratuvar numunelerinin ve örselenmemiş numunelerin yapısal özellikleri belirlenmiştir.

Bu anlatılanlar ışığında ikinci bölümde literatürde araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalardan örnekler verilmiştir. Farklı koşullar altında yapılan dinamik deney sonuçları belirtilmiş, bu çalışma ile olan ilgileri tespit edilmiştir. Ayrıca numune yapısının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalardan da örnekler sunulmuş, özellikle geometrik yapı incelemelerine ağırlık verilmiştir.

Üçüncü bölümde, kullanılan deney sistemi ve numune hazırlama yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca numunelerin dinamik deneyler öncesindeki drenajsız statik mukavemetleri ve konsolidasyon özellikleri belirlenmiştir.

Dördüncü bölümde yapılan deney sonuçları sunulmaktadır. Dinamik ve sonrasında yapılan statik deney serileri anlatılırken, kullanılan zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki mukavemet özellikleri ve statik mukavemetlerinin tekrarlı gerilme genlikleri altındaki değişimleri açıklanmıştır. Ayrıca bu bölümde, laboratuvarı hazırlanan örselenmiş numunelerle, örselenmemiş zemin numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılmış, tüm bu sonuçlar diğer araştırmacıların elde ettikleriyle birlikte yorumlanmıştır.

Beşinci bölümde yapı incelemesi üzerine yapılan araştırma anlatılmaktadır. Kullanılan mikroskop düzeneği, numune hazırlama yöntemi, görüntülerin toplanması ve görüntü analizleri, detaylı bir biçimde anlatılmaktadır. Daha sonra bu görüntüler yorumlanmış, kullanılan analiz programıyla daneli ve boşluklu yapı hakkında bilgi verecek ölçümler yapılmıştır. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası zeminin yapısal özellikleri; boşluk yapıdaki değişim, ince kum ve silt danelerinin yapısal özellikleri ve zeminin anizotropisindeki değişim kapsamında ele alınmıştır.

Son bölümde ise deneysel çalışmadan elde edilen ve mikroskop incelemeleriyle belirlenen tüm bu bulgular önemli hatları vurgulanarak birarada sunulmuştur.

2. ELE ALINAN KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Bu bölümde, çalışma kapsamında ele alınan konuyla ilgili literatürde yer alan çalışmalar iki ayrı kısımda anlatılmaktadır. İlk kısımda öncelikle zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemlerden ve son yıllarda yapılmış çalışma örneklerinden bahsedilmektedir. Sonra bunlar konularına göre ayrılıp, her bir konuda araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar, bu çalışmanın kapsamı içerisinde dikkate alınmaktadır. İkinci kısımda ise, ince kumlu ve killi siltlerin mikro yapılarının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Zeminin mikro yapısının konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonucu uğradığı değişimlerle birlikte danesel ve boşluklu yapının optik mikroskop ve elektron mikroskobu aracılığıyla incelenmesi çalışmalarından örnekler verilmiştir.

2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altında Dinamik Davranış Özellikleri

Tarihsel açıdan bakıldığında geçmişte çeşitli büyüklüklerde depremler geçirmiş ve gelecekte de geçirme ihtimali olan bölgelerde yapılacak mühendislik yapılarına gelecek deprem yüklerinin belirlenebilmesi için, öncelikle bu yerlerdeki temel altı zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranış özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu yüzden zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özellikleri farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılacak deneylerle belirlenmelidir. Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranışı araştırılırken arazideki mevcut zemin koşullarının aynen laboratuvarda modellenmesi alışılmalıdır. Ancak, araziden sondajlarla alınan zemin numunelerinde gerek numune alımı sırasında, gerek numunelerin laboratuvara gelişi sırasında, gerekse laboratuvarda yapılacak deney için numune hazırlanması sırasında meydana gelen örselenme nedeniyle laboratuvar deney sonuçlarının tek başına yorumlanması beraberinde birtakım olumsuzluklar da getirmektedir. Bu olumsuzlukları en düşük seviyeye

indirmek için arazide ve laboratuvarda yapılan deneyler birlikte değerlendirilmelidir (Ansal ve Erken, 1986). Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği kapsamında yapılan laboratuvar ve arazi deneylerinde genel olarak aşağıdaki zemin özellikleri belirlenmeye çalışılır:

1. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi; dinamik kayma modülü (elastik kayma deformasyonlarında, G_0 , kayma modülü-birim kayma ilişkisi), elastisite modülü, sönüm oranı,
2. Dinamik kayma mukavemeti özellikleri; dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı,
3. Konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeye birlikte hacimsel deformasyon değişiminin belirlenmesi;
4. Boşluk suyu basıncı gelişimi.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarını tanımlarken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olarak ikiye ayırabiliriz. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak dinamik kayma modülü ve sönüm oranının birim şekil değiştirmeye bağlı olarak tanımlanması gerekir. Bu özelliklerin belirlenmesi sırasında laboratuvarda zeminin elastik davranış gösterdiği 10^{-6} 'dan küçük deformasyon seviyelerinde deneyler yapılabilirken, arazide de zeminin doğal yapısı bozulmadan, yerinde özelliklerinin belirlenmesi yoluna gidilir. Mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için ise, göçme seviyesi olarak belirlenen birim kayma seviyesine ulaşmak için gerekli dinamik kayma gerilmesi oranı ve çevrim sayısının bulunması gerekir.

Zeminleri, yükleme altında davranış özelliklerinde meydana gelen farklılıklardan ötürü ince daneli, kohezyonlu ve kaba daneli, kohezyonsuz zeminler olarak ikiye ayırabiliriz. Doğada danesiz, anizotropik, heterojen ve elasto-plastik davranış özelliği gösteren zeminlerin bu iki grup içerisinde birbirinden oldukça farklı özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılan siltli zeminler ise, dane boyutu olarak ince dane sınıfına girmesine rağmen, yapısal özellik açısından kohezyonsuz zeminlere benzemektedir. O yüzden değişik konsolidasyon ve gerilme şartlarında yapılacak statik ve dinamik deneylerle siltlerin ve belli oranda silt içeren ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenmelidir. Bu nedenle literatür araştırmasında siltli zeminlerle ilgili çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar, kohezyonlu, ince daneli ve kohezyonsuz kaba daneli zeminlerin, tekrarlı yükler altında büyük deformasyonlara uğrayarak mukavemetlerinde önemli oranda kayba uğradığını göstermektedir. Bu mukavemet kayıpları sonucu oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle, zeminde kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. İçerisinde belli oranda kil olan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının artan deformasyonların yanında sınırlı kalması sonucu taşıma gücünde önemli miktarda azalma meydana geldiği görülürken, ince daneli kumlarda artan boşluk suyu basınçları efektif gerilmelerde önemli ölçüde azalmaya yol açmakta, zeminde kalıcı deformasyonlar oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilenler, diğer araştırmacıların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına etkiyen parametreler, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmayı doğrudan etkileyen,

1. Dane şekli,
2. Dane boyutları ve dağılımı,
3. Boşluk oranı (relatif sıklık),
4. Birim kayma genliği,
5. Çevre basıncı,
6. Çevrim sayısı,
7. Orta asal gerilme,
8. Efektif konsolidasyon basıncı,
9. Yatay toprak basıncı katsayısı

şeklindedir. Belirli miktarda plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlerde ise yumuşamaya bağlı taşıma gücü kaybına etkiyen en önemli parametreler,

1. Su muhtevası,
2. Plastisite indisi,
3. Çevre basıncı,
4. Aşırı konsolidasyon oranı,

5. Yatay toprak basıncı katsayısı
6. Doygunluk derecesi
7. Birim kayma genliği
8. Çevrim sayısı
9. Efektif konsolidasyon basıncı

olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin doğal zeminlere olan etkisi, yapılan detaylı deneysel araştırmalarla belirlenmiştir. Ayrıca, numune hazırlama yönteminin ve kullanılan deney sisteminin sınır koşulları ve gerilme şekil değiştirme ilişkisi bakımından önemli oranda sonuçları etkilediği belirlenmiştir. Kullanılan deneysel yöntem ve numune özelliklerine bağımlılığı nedeniyle zeminlerin dinamik davranışları modellenirken sınır koşullarının ve yükleme durumunun etkisi gözönüne alınmalıdır.

2.2.1 Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, zemin cinsine göre ayrı olarak ele alınmaktadır. Örneğin suya doymuş ve temiz kumların tekrarlı yüklemeyle birlikte boşluk suyu basıncındaki artış sonucu efektif gerilmede azalma meydana gelirken, yüklemenin bir çevriminde boşluk suyu basıncı efektif çevre gerilmesine eşit olur. Böylelikle efektif gerilmeler iyice azalarak sıfıra düşer. Bu davranışa *ön sıvılaşma* adı verilir. Danesel bir malzeme olan zeminlerde, danelerin temas noktalarındaki sürtünmenin yok olması kum zeminin bir sıvı gibi davranmasına yol açar. Bu da zemin elemanında büyük şekil değiştirmeler oluşmasına sebep olur. Devam eden yükleme çevrimiyle birlikte yeniden kararlı bir konuma geçmek isteyen danelerin, meydana gelen kayma direncine bağlı olarak oluşturdukları duraylı duruma *sınırlı ön sıvılaşma* adı verilir. Bunun yanında siltli kumlarda boşluk suyu basıncı artışları sınırlı kalarak hızla artan birim kaymalar nedeniyle zemin göçmeye uğrayabilmektedir. Temiz ve gevşek kumların tekrarlı yükler altındaki davranışları bu çalışma kapsamında bulunmadığı için bu bölümde yalnızca içerisinde belli miktarda ince dane bulunan kumların davranışından ve silt zeminlere göre farklılığından bahsedilmektedir.

Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği konuları kapsamında yapılan çalışmalar, çoğunlukla temiz, gevşek ve suya doymuş kumların tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı üzerinde durmuş, artan boşluk suyu basınçları sonucu kumlu zeminde meydana

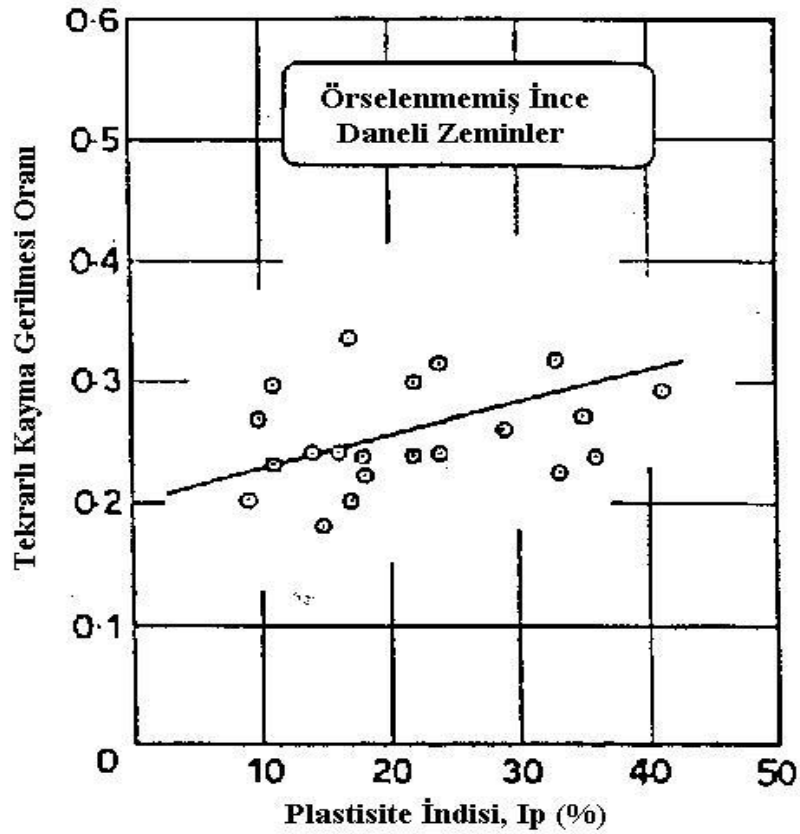
gelen efektif gerilme azalımı ve dolayısıyla artan birim kaymalarla birlikte oluşan mukavemet kayıpları, bu çalışmaların ana temasını oluşturmuştur. Bunun yanında, son yıllarda içerisinde belli miktarda ince dane olan kumlu zeminlerle, plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları da, büyük depremlerde gözlenen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları nedeniyle önem kazanmıştır.

Siltli kum zeminlerin sıvılaşması günümüze kadar pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir; Ishihara, (1978), Ishihara ve diğ. (1980), Ishihara ve diğ., (1981), Kaufman, (1981), Sherif, Tien ve Pan, (1983), Troncoso ve Verdugo (1985), Kondoh, Sasaki ve Matsumoto, (1987), Koester ve Tsuchida, (1988), Chang, (1988, 1990), Troncoso, (1990), Koester, (1992), Erken ve Ansal, (1994), Erten ve Maher, (1995), Yamamuro ve Lade (1997b, 1998), Lade ve Yamamuro (1997), Amini ve Qi, (2000), Salgado, Bandini ve Karim, (2000), Yamamuro ve Covert, (2001), Polito ve Martin, (2001).

Ishihara ve diğ. (1978), tarafından laboratuvar dinamik deneyleriyle yapılan araştırmada, kum zeminin sıvılaşmasına ince dane miktarının etkisi belirlenmiştir. İnce dane miktarı arttıkça, kumlu zeminin dinamik mukavemeti de gevşek durumda belli bir seviyeye kadar artmaktadır. Ancak sıkı olduğu durumda, bu artış daha fazla olmaktadır. Buradan ince danelerde bulunan kohezyon mukavemetinin, tekrarlı yükleme sırasında danelerin birbirinden ayrılmasını zorlaştırdığı, dolayısıyla boşluk suyu basıncı artışlarını azalttığı ve geciktirdiği, böylelikle de sıvılaşma dayanımını artırdığı sonucuna varılabilir.

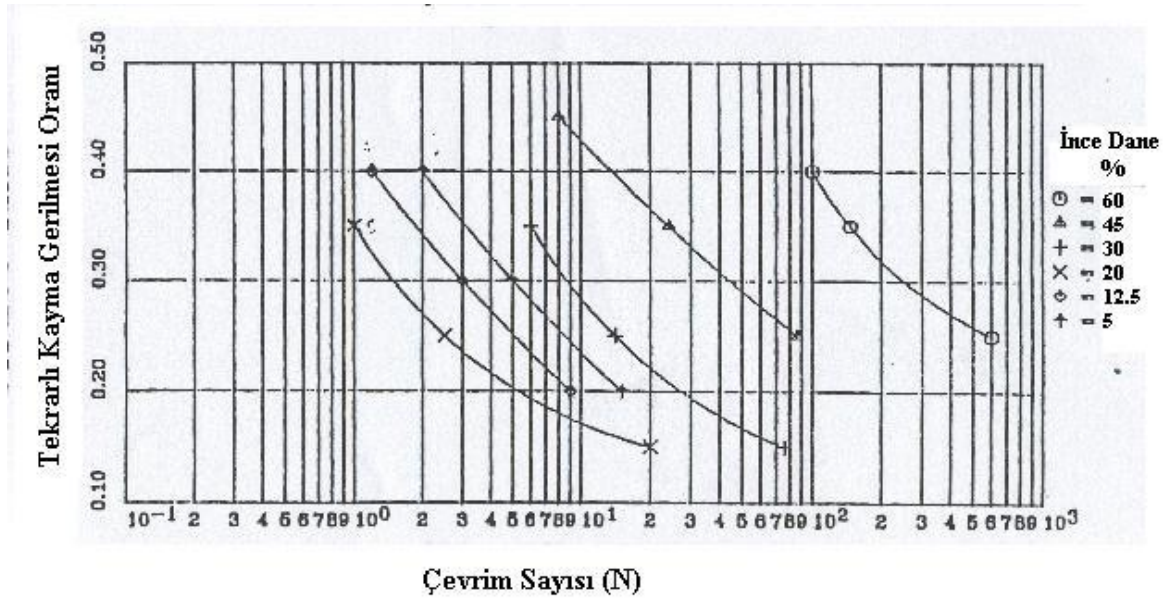
Ishihara ve diğ. (1980), tarafından kum zeminde yapılan çalışmada, belli bir yüzdeye kadar ince dane oranı arttıkça, sıvılaşma dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında, plastik olmayan siltlerin, % 15-20 arası plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlere göre çok daha düşük dinamik mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ortalama olarak % 30 ince dane içeren kum zeminde ise, plastisitenin dinamik mukavemete olan etkisi araştırılmış, lineer dağılıma ait $I_p/35$ oranının % 30'dan fazla ince dane içeren zeminlerde sabit olduğu ileri sürülmüştür, (Ishihara ve diğ., 1981). Bununla birlikte plastisite indisi arttıkça, aynı çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine erişmek için gerekli tekrarlı gerilme oranı artmaktadır (Şekil 2.1).

Chang (1988), Kaufmann (1981), kumlarda % 10-60 arasında değişen oranlarda silt miktarı arttıkça, sıvılaşma potansiyelinin de arttığını söylemişlerdir. Chang, (1990), ise silt-kum

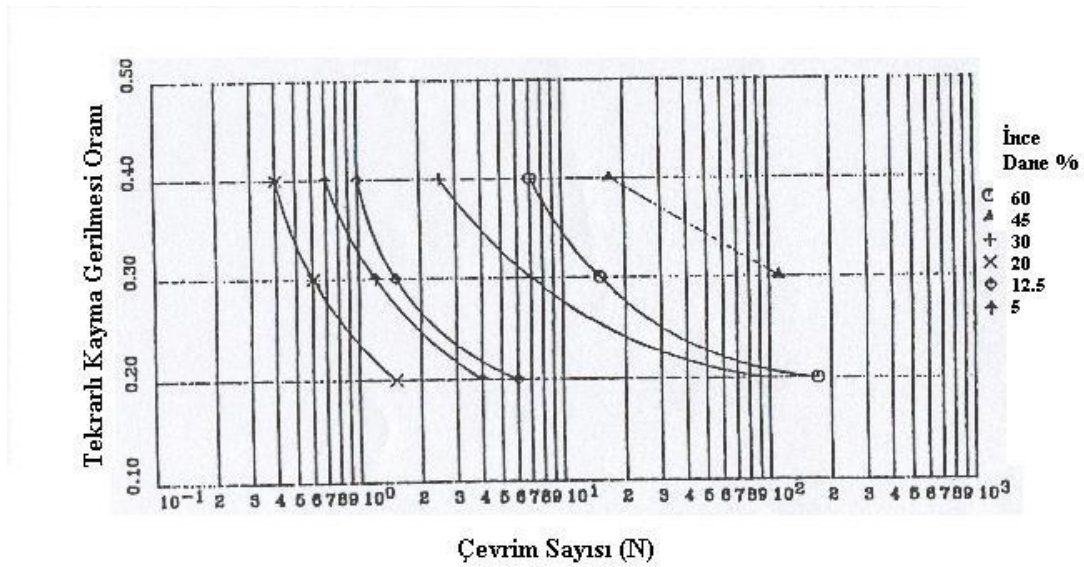


Şekil 2.1 İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, Yasuda ve Yokota, 1981)

karişimlarında yaptığı dinamik deneylerde, silt yüzdesinin dinamik mukavemet üzerinde önemli olduğunu belirtirken, % 20'ye kadar silt eklenen kumlu numunelerde mukavemetin silt miktarıyla azaldığını ancak bu yüzdeden sonra ince danelerin boşluk suyu basıncı oluşumunu geciktirerek sıvılaşma dayanımını belli ölçüde artırdığını söylemiştir. Ayrıca, suya doymuş, temiz, orta sıkı ve iyi derecelenmiş üç farklı kum numunesinde yaptığı deneylerde ince dane oranı ve plastisite indisinin dinamik mukavemete etkisini araştırmıştır (Şekil 2.2, 2.3, 2.4). Plastisite indisi % 4 olan numunelerdeki silt miktarının dinamik mukavemete olan etkisi görülmektedir. En büyük mukavemet içerisinde hiç silt bulunmayan temiz kumda oluşurken silt yüzdesi % 20 olana kadar mukavemet ince dane miktarıyla azalmaktadır. Temiz ve iyi derecelenmiş kumda yapılan deneylerde ise plastisite indisinden bağımsız olarak % 5 ince dane eklendiği takdirde dinamik mukavemetin arttığı görülmektedir. Ayrıca iyi derecelenmiş kumlar, diğer kum numuneler göre ince dane miktarından daha az oranda etkilenmektedir. Tüm kum numunelerinde en düşük mukavemet ince dane yüzdesi % 4 olan kumda görülürken, temiz ve iyi derecelenmiş kumlarda % 2 ince dane oranı, genel olarak sıvılaşma dayanımını artırmaktadır.

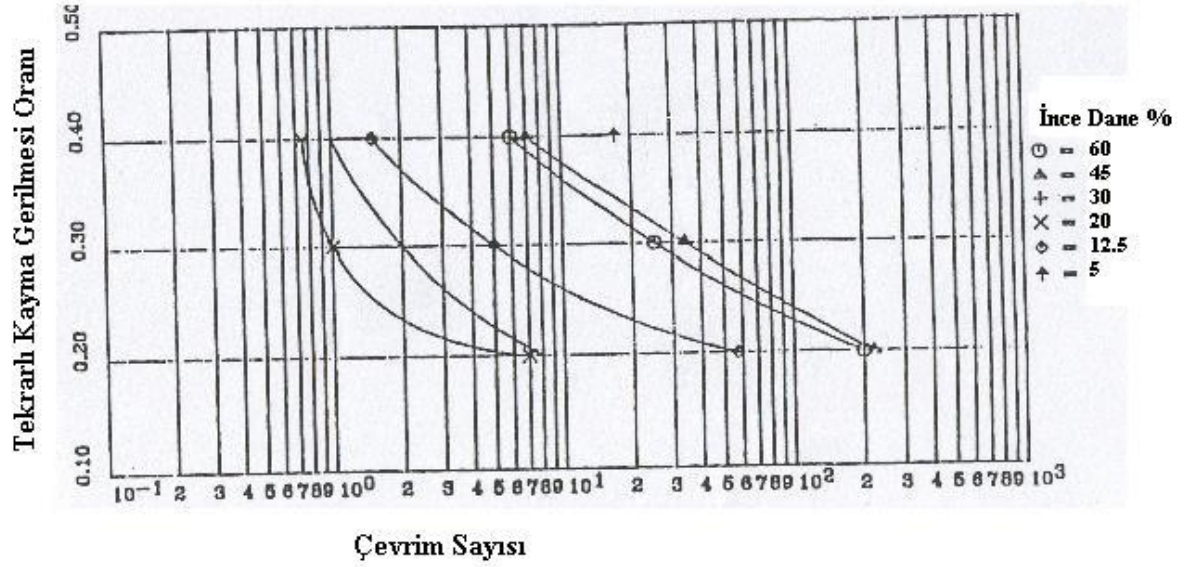


Şekil 2.2 Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)



Şekil 2.3 Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Kaufman (1981) ve Sherif ve diğ. (1983), benzer granülometri eğrilerine ve endeks özelliklerine sahip farklı plastisitedeki silt miktarının, kum-silt karışımının dinamik mukavemetini belirlemek üzere dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney aletleriyle % 5 çift genlikli deformasyon seviyesine kadar deneyler yapmışlardır. Şekil 2.5'den de görüleceği gibi ince dane yüzdesi arttıkça kumlu zeminde dinamik mukavemet artmaktadır.



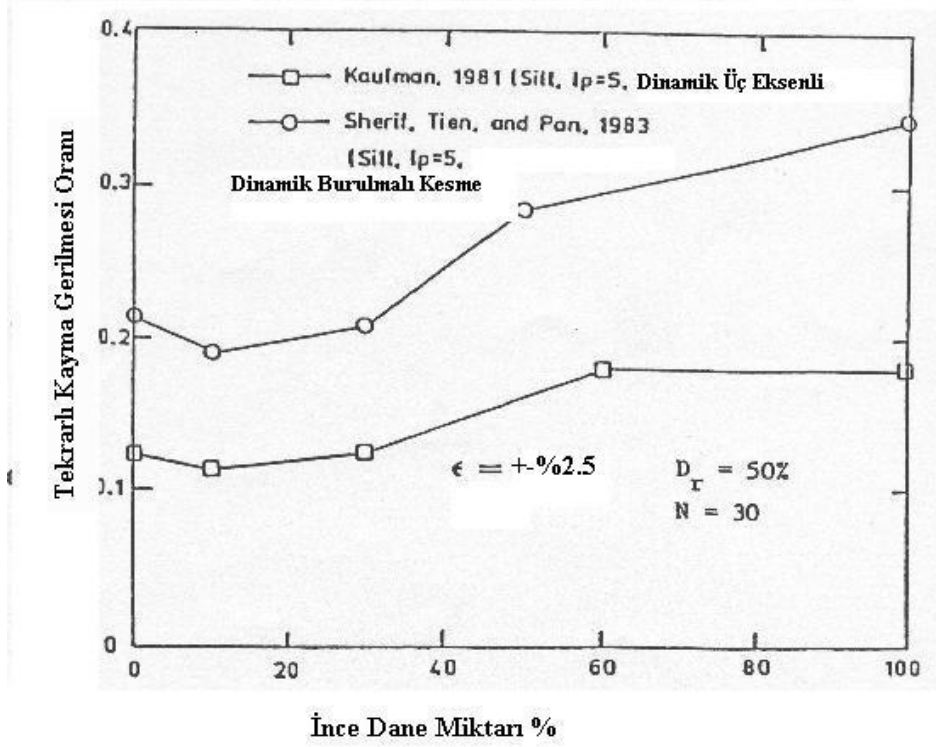
Şekil 2.4 Plastikite indisi % 4 olan iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Saf silt içeren numunelerde dinamik mukavemet, % 30 veya daha az ince dane içeren numunelere göre dinamik üç eksenli deneylerde % 45 (Kaufman, 1981), Sherif ve diğ. (1983) tarafından yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerinde ise yaklaşık olarak % 65 daha fazla mukavemet elde edilmiştir.

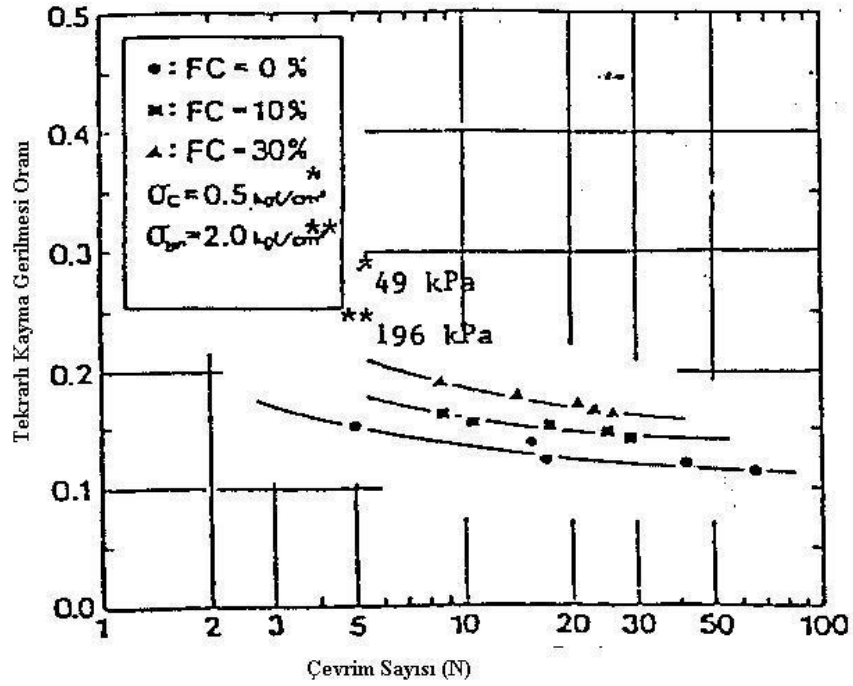
Troncoso ve Verdugo (1985) tarafından dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan deneylerde ise, plastik olmayan ince dane oranı arttıkça dinamik mukavemetin azaldığı belirlenmiştir.

Kondoh ve diğ. (1987), kumlarda sıvılaşma dayanımına etkiyen faktörlerden ince dane oranını, Sengenyama kumuna kaolin kili ekleyerek araştırmışlardır. Ağırlıkça % 0-30 oranında eklenen ince danelerle hazırlanan numuneler üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Buna göre çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine ulaşmak için aynı tekrar sayısında, % 30 ince dane içeren kum zemindeki gerilme oranı, % 10 ince dane miktarı olan kumla, temiz kumdan daha büyüktür (Şekil 2.6).

Koester ve Tsuchida, (1988), A.B.D., Çin ve Japonya'dan elde ettikleri ince daneli kum zeminler üzerindeki çalışmalarında, ince dane oranının, sıvılaşma eğilimi olan kumlu zeminleri, olmayanlardan ayırmada yeterli bir parametre olmadığını söylemişlerdir.

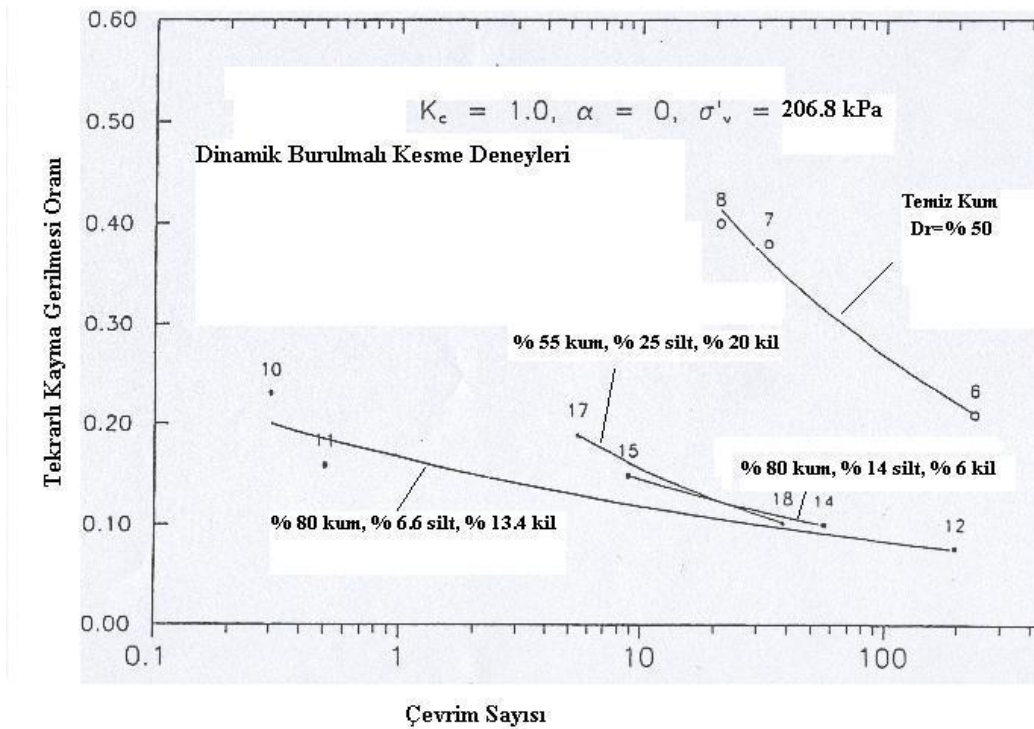


Şekil 2.5 Düşük plastisiteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981 ve Sherif ve diğ. 1983)



Şekil 2.6 Kaolin kilinin Sengeyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987)

Koester (1992), kum zeminlere değişik oranlarda dūřuk plastisiteli silt ve plastik kil katarak, sıvılaşma dayanımını, yaptığı dinamik ũç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleriyle belirlemiştir. Yapılan laboratuvar deney sonuçları, belirli bir boşluk oranına sahip kum zeminde, % 20 oranla ilave edilen dūřuk plastisiteli ince dane miktarına kadar sıvılaşma dayanımı azalmakta, bu sınırdan sonra ise ince dane yūzdesiyle, sıvılaşma dayanımı artmaktadır (şekil 2.7). Temiz kumda ise dinamik burulmalı kesme mukavemeti diğer ince daneli kumlara gōre daha būyūktūr. Ayrıca, laboratuvarda Casagrande aletiyle yaptığı likit limit deneylerini, koni penetrasyon aleti ile yaptığı deney sonuçlarıyla karşılaştırdıktan sonra, bulgularını arazideki sıvılaşma ve yumuşama potansiyeli yūksek olan ve ōnemli taşıma gūcū kayıplarının gōzlemlendięi bōlgelerdeki endeks deney sonuçlarıyla korele etmiştir. Casagrande aletinde yaptığı likit limit deney sonuçlarının koni penetrasyonla bulduğu değerlere gōre % 4 daha dūřuk su muhtevasında olduğunu belirlemiştir. Buradan kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yūkler altında dinamik mukavemet kayıplarının belirlenmesinde bu farkın dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. İnce danelerinin Casagrande yōntemiyle % 31'in ũzerinde likit limite sahip kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin bulunduğunu sōylemenin aşırı gūvenli tarafta kalacağını belirtmiştir.



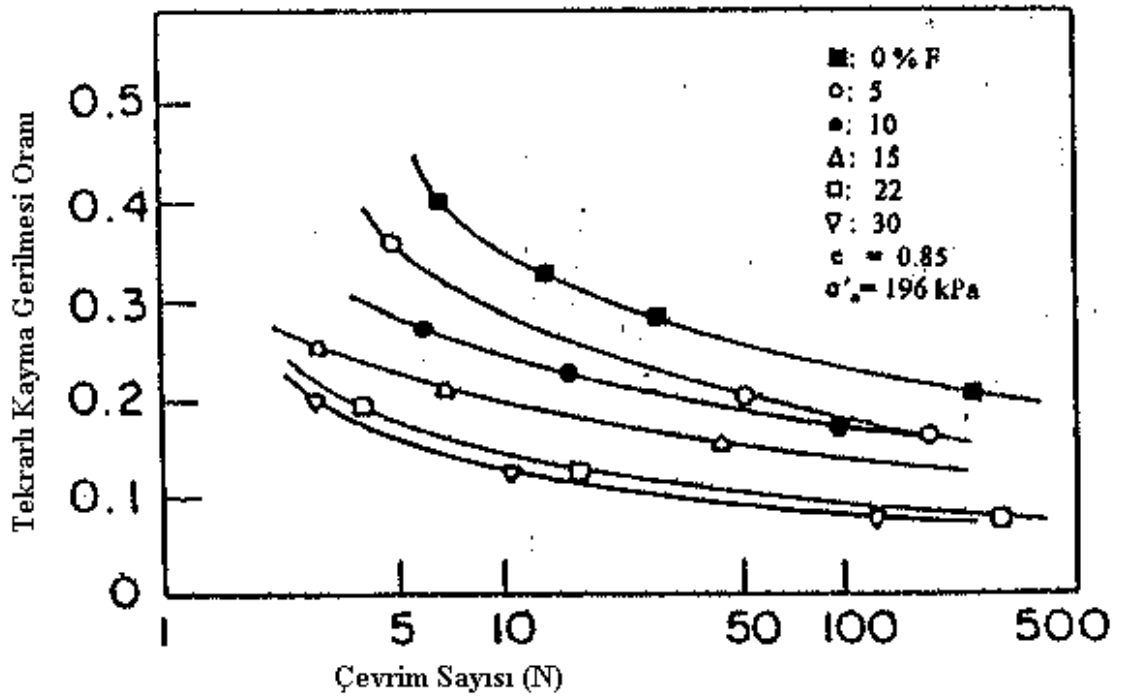
şekil 2.7 İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992)

Koester (1992), dinamik üç eksenli deney aletinde ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırladığı 129 farklı türdeki numuneleri izotropik olarak konsolide ettikten sonra yaptığı yaklaşık 500 deney ile ince dane türü ve oranının kum-silt-kil karışım zeminlerinin dinamik mukavemeti üzerine olan etkisini araştırmıştır. Dinamik burulmalı kesme deney aletinde ise dört tür numune kullanarak izotropik ve anizotropik koşullarda dinamik deneyler yapmıştır. Kullandığı numuneler; temiz ince kum; plastisite indisi $PI = \% 10$ olan $\% 20$ ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 25$ olan $\% 20$ ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $\% 15$ olan $\% 45$ ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum numuneleridir. Bununla birlikte bu iki tür deney sisteminin sonuçları arasında ilişki bulunduğunu söylemiş, bu ilişkinin, zeminin granülometrisine, tekrarlı yüklemenin genlik ve frekansına ve numune hazırlama yöntemine bağlı olduğunu belirtmiştir. Deney sonuçlarından, $\% 20$ 'den fazla ince dane içeren kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımının, temiz ince kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımına kıyasla daha az efektif çevre basıncına bağlı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kumlar üzerinde yaptığı gerek dinamik üç eksenli, gerekse dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptığı sıvılaşma deneylerinin, ince dane türü ve miktarından doğrudan etkilendiğini ve belirli bir yüzdeye kadar eklenen ince dane miktarının sıvılaşma dayanımını fazla artırmadığını, ancak bu sınır değerini üzerine çıkıldığında, plastisite indisinden bağımsız olarak, sıvılaşma dayanımının, ince dane yüzdesiyle arttığını belirtmiştir.

Troncoso (1990), 0.85 sabit boşluk oranında, $\% 0-30$ arasında değişen oranlarda silt içeren kumların dinamik mukavemetini araştırmıştır. Şekil 2.8'de artan silt miktarıyla, değişen dinamik mukavemetler görülmektedir. Buna göre, aynı boşluk oranında silt yüzdesi $\% 30$ 'a kadar artırıldıkça, kum zeminin mukavemeti azalmaktadır. Troncoso (1990), sabit boşluk oranında gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği bu sonuçların, diğer araştırmacıların sonuçlarından farklı olduğunu öne sürmüştür.

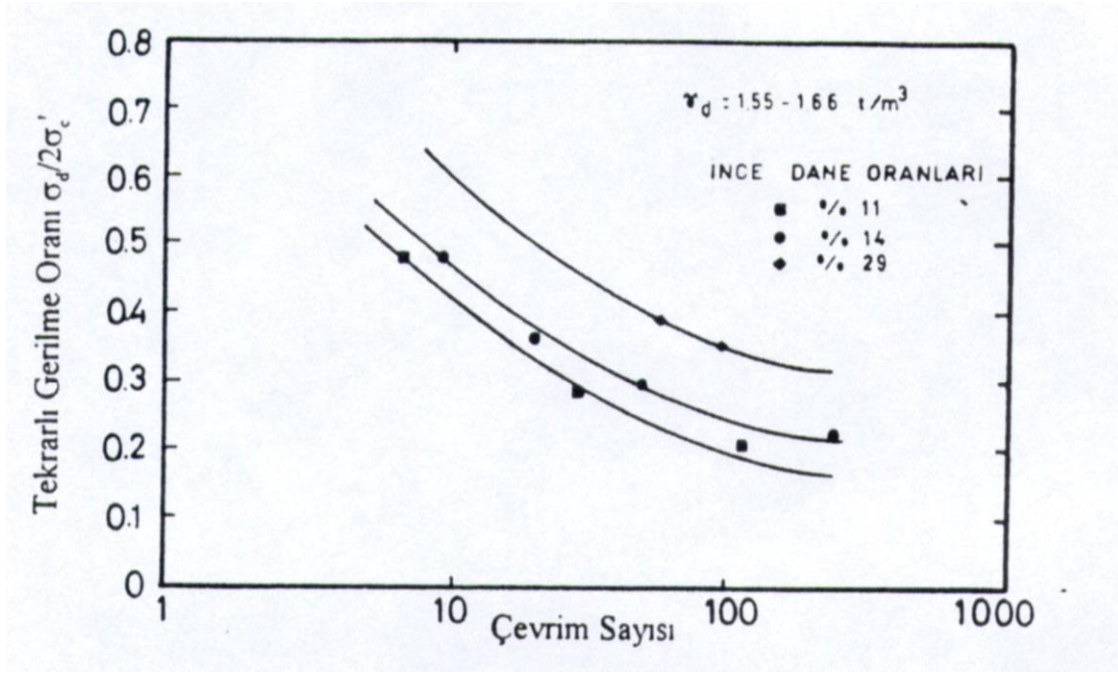
Erken ve Ansal, (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde yapılan deneylerde ise plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşma dayanımının da arttığı görülmüştür (Şekil 2.9). Erten ve Maher, (1995) ise kumlarda boşluk suyu basıncı oluşumuna ince dane miktarının etkisini incelemek amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Silt miktarı, plastisite ve boşluk oranı, deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler olarak belirlenmiştir. Sonuçlardan, silt miktarının ve plastisitesinin, boşluk suyu basıncı oluşumunda $\% 10^{-2}$ birim kayma deformasyonundan küçük değerlerde pek etkisinin olmadığı, siltli kumlarda ise akma

deformasyonu eşik değerinin, temiz kumlardakiyle yaklaşık aynı olduğu görülmüştür (Şekil 2.10a, 2.10b). Şekil 2.10c, 2.10d'de boşluk suyu basıncının artan birim kayma değerlerinde değişimi görülmektedir. Buna göre, % 0.015 ve % 0.15 birim kayma seviyesine kadar yapılan deneylerden elde edilen boşluk suyu basınçları saf kumlarla % 10 plastik olmayan silt içeren kumlarda yaklaşık aynı seviyelerdeyken, % 0.75 ve % 1.5 birim kayma seviyesinde boşluk suyu basınçları temiz kumlarda daha düşük değerlerde kalmaktadır. Erten ve Maher tarafından yapılan diğer çalışmalarda ise, % 60 silt miktarına kadar eklenen plastik olmayan siltin, kum numunedeki boşluk suyu basıncı oluşumuna bir etkisi olmadığı, % 60'ın üzerindeki silt miktarıyla boşluk suyu basıncının düştüğü belirlenmiştir.

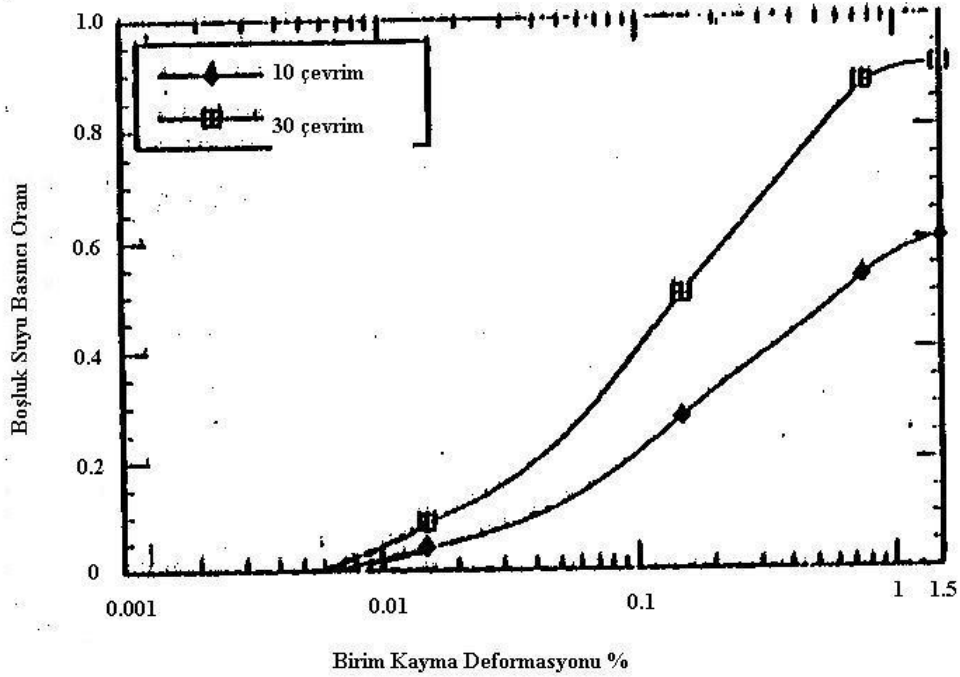


Şekil 2.8 Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (F=Silt Yüzdesi) (Troncoso, 1990)

Bir diğer çalışmada, plastik olmayan silt miktarı arttıkça, kumlu zeminde drenajlı ve drenajsız durumda hacımsal sıkışma potansiyelinin arttığı ve böylece mukavemetin azalarak sıvılaşmanın olduğu görülmüş, zeminde akma meydana geldiği belirtilmiştir (Yamamuro ve Lade 1997b, 1998; Lade & Yamamuro 1997). Ayrıca Ishihara (1993) ve Verdugo ve Ishihara (1996), plastik olmayan silt yüzdesi arttıkça zeminin daha kolay sıvılaştığını söylemişlerdir.

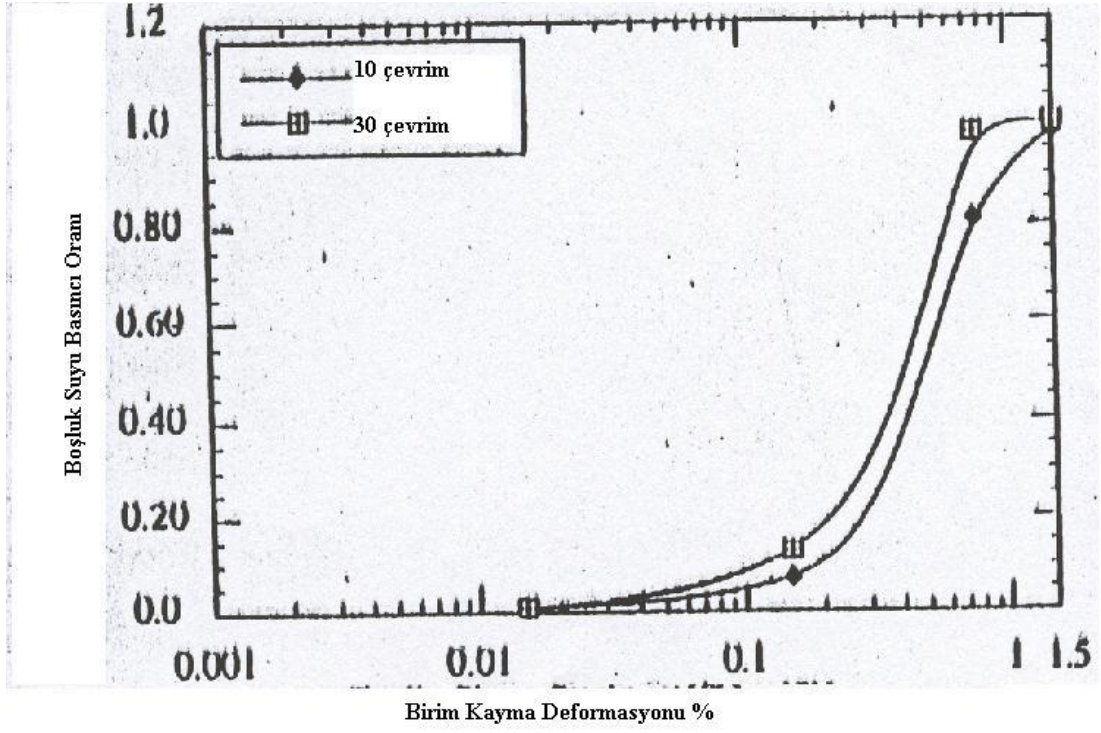


Şekil 2.9 Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1994)

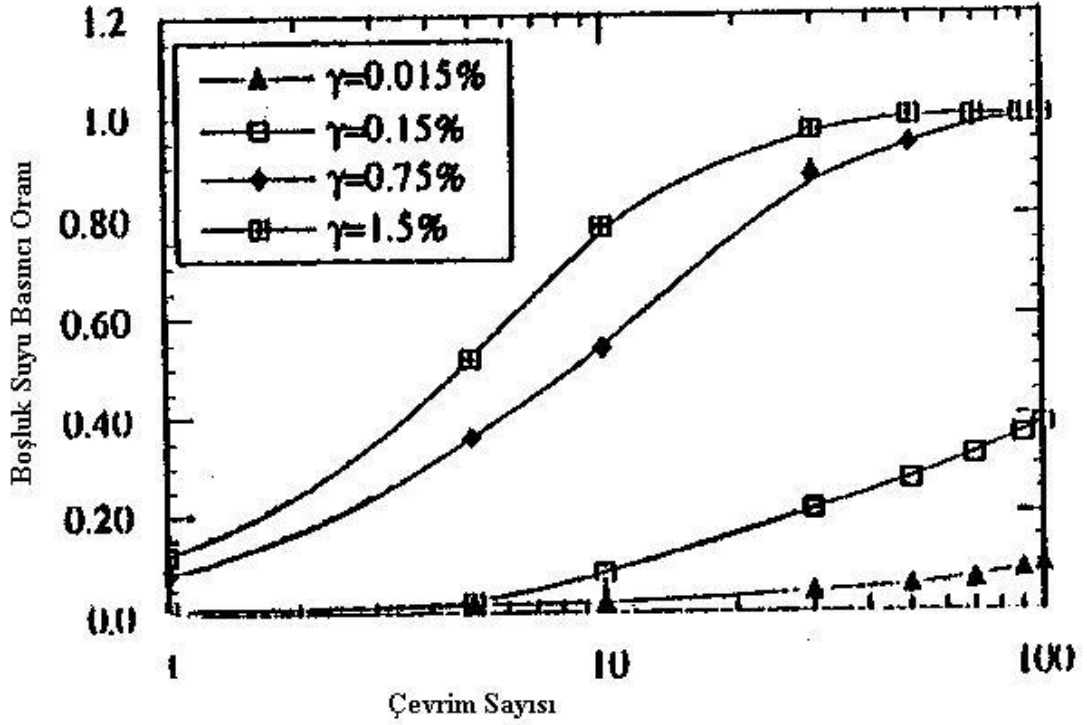


Şekil 2.10a Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995)

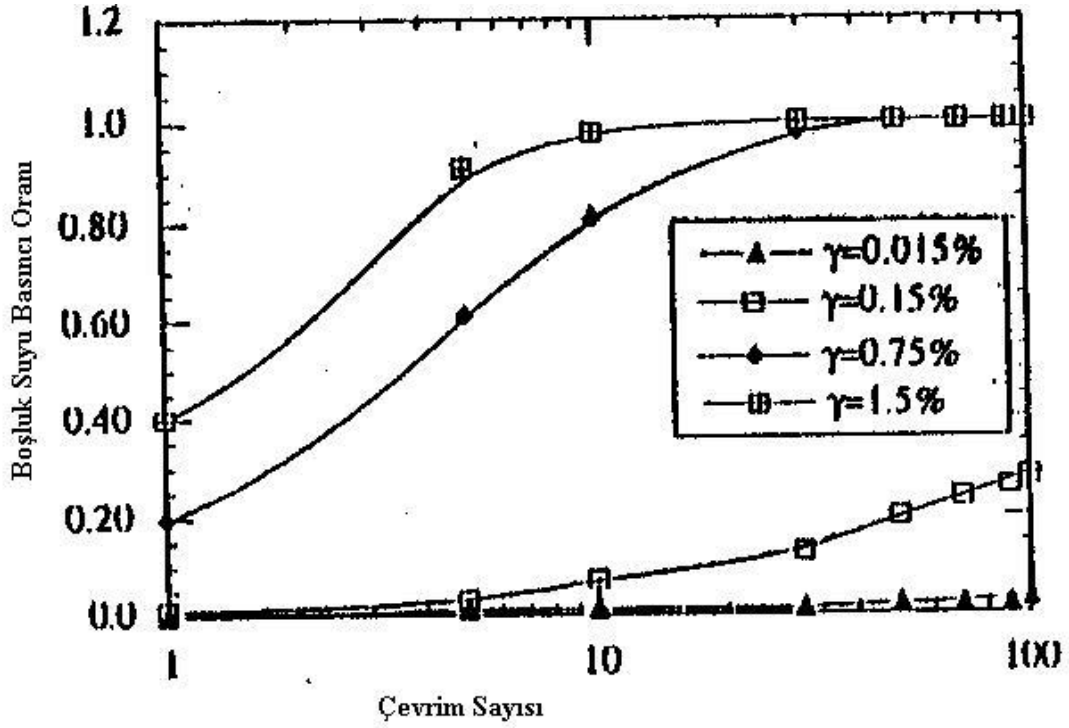
Amini ve Qi, (2000), tarafından homojen olarak hazırlanan ve 250 kPa çevre basıncı uygulanan silt-kum karışımı numunelerde dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan bir seri deneyde % 10'dan % 50'ye kadar artan silt miktarının, $N=10$ çevrim sayısına karşılık gelen dinamik gerilme oranında % 60'a kadar bir artışa sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 2.10b Plastik olmayan siltte boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995)



Şekil 2.10c Temiz kumda boşluk suyu basıncı gelişimi (Erten ve Maher, 1995)



Şekil 2.10d Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı değişimi (Erten ve Maher, 1995)

Çevre basıncının 50, 100, 250 kPa değerlerinde ve sabit boşluk oranında yapılan deneylerde, üniform ve tabakalı zeminlerin davranışları birbirine yakın elde edilmiştir. Buna göre çevre basıncı arttıkça, sıvılaşma dayanımı azalmaktadır. Homojen olarak hazırlanan ve % 30 silt içeren numunelerde çevre basıncının 50 kPa'dan 250 kPa'a kadar artmasıyla, $N=10$ çevrime karşı gelen dinamik gerilme oranında % 38 bir düşüş meydana gelmektedir. Tabakalı olarak hazırlanan numunelerde ise bu azalma % 20 seviyesindedir (Amini ve Qi, 2000).

Salgado ve diğ. (2000), dinamik mukavemetin yanında, kumlarda düşük deformasyon seviyelerindeki elastik davranışın ve kayma mukavemetinin de, ince dane miktarıyla arttığını belirtmişlerdir.

Yamamuro ve Covert (2001), % 40 silt içerikli gevşek kum zeminlerde drenajsız statik ve dinamik üç eksenli deneyler yapmışlar, statik üç eksenli deneylerden elde ettikleri kırılma zarfının dinamik deneylerde sıvılaşmanın oluşması için gerekli gerilme seviyesine yakın olduğunu belirlemişlerdir.

Polito ve Martin (2001) ise kumların sıvılaşma dayanımına plastik olmayan ince danelerin etkisini araştırmıştır. Plastik olmayan siltlerle aynı zeminde bulunan kumların dinamik davranışına hangi zeminin daha etkin olduğunu belirlemek için, kum zemin iskeletinin sahip

olduğu boşlukların hangi oranda siltle dolu olduğunu bilmek gerektiğini söylemişlerdir. Araştırmalardan, kum zeminin yapısını örselemeden danelerarası boşlukların alabileceği en büyük silt miktarına sınır değer silt yüzdesi adı verilmiştir ve yaklaşık olarak % 25-45 arasında olduğu bulunmuştur. Eğer, kum zeminin boşluklarının bir kısmı siltle doluysa, zeminin dinamik davranışına kum zeminin sahip olduğu relatif sıkılık etkili olmaktadır. İskeletin boşluk oranı azaldıkça mukavemet artmaktadır. Bu karışım zeminin içerdiği silt miktarı sınır değerinin üzerindeyse, bu durumda davranışa silt etkili olurken, tüm zeminin relatif sıkılığı dinamik mukavemete etkimektedir. Ancak relatif sıkılık, bir önceki duruma göre daha az oranda mukavemeti değiştirmektedir (Polito ve Martin, 2001).

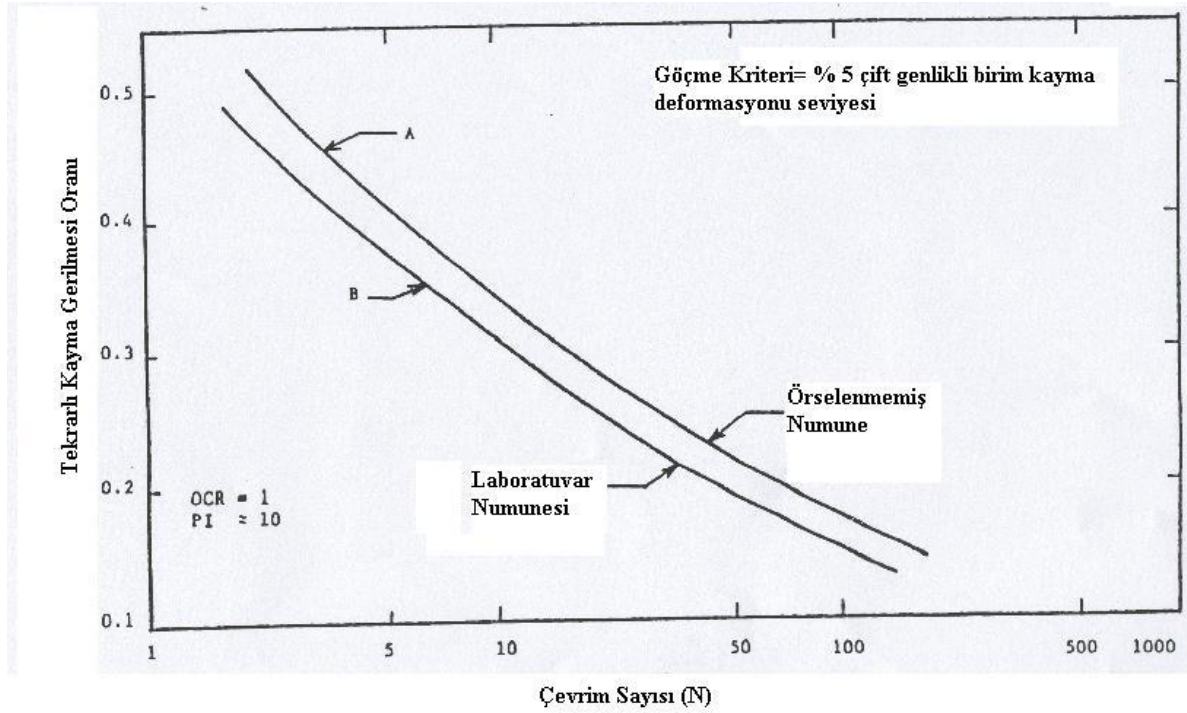
2.2.2 Siltlerin ve Siltli Killerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

Silt zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı, bazı araştırmalarda belli miktarda silt içeren kumlarınkinden farklı elde edilirken, bazı çalışmalarda da benzer özellikler göstermiştir. Silt zeminler temiz kumlar gibi sıvılaşabilirler ancak bu sıvılaşma davranışı kumlarınkinden farklı olarak belirli bir miktar sıkışma ve drenajlı durumda artık boşluk suyu basıncı sönümlenmesi nedeniyle konsolidasyonu da beraberinde getirmektedir. Siltlerde tekrarlı yüklemeler altında oluşan boşluk suyu basıncı artışları, davranışa etkiyen; kil ve/veya kum miktarı, ince danelerin plastisitesi, boşluk oranı ve efektif konsolidasyon basıncı gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Bu da zeminin dinamik kayma mukavemetini etkilemektedir. Bu bölümde, kumlardan ayrı olarak, plastik olmayan silt, plastik silt, killi silt ve siltli kil zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarını incelemek üzere yapılan çalışmaların bazılarından örnekler anlatılmaktadır.

Plastik olmayan siltlerde ve içerisinde belli miktarda plastik silt olan kohezyonsuz zeminlerde yapılan çalışmalarda, bu tür zeminlerin tekrarlı yüklemeler sonucu hızla artan boşluk suyu basınçları nedeniyle sıvılaştığı ve efektif gerilmelerin sıfıra düştüğü belirlenmiştir (Seed, 1976, Sandoval, 1989). İnce daneli zeminlerde yapılan çalışmalarda, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Buna göre her ikisi de arttığında dinamik mukavemette artış meydana gelmektedir.

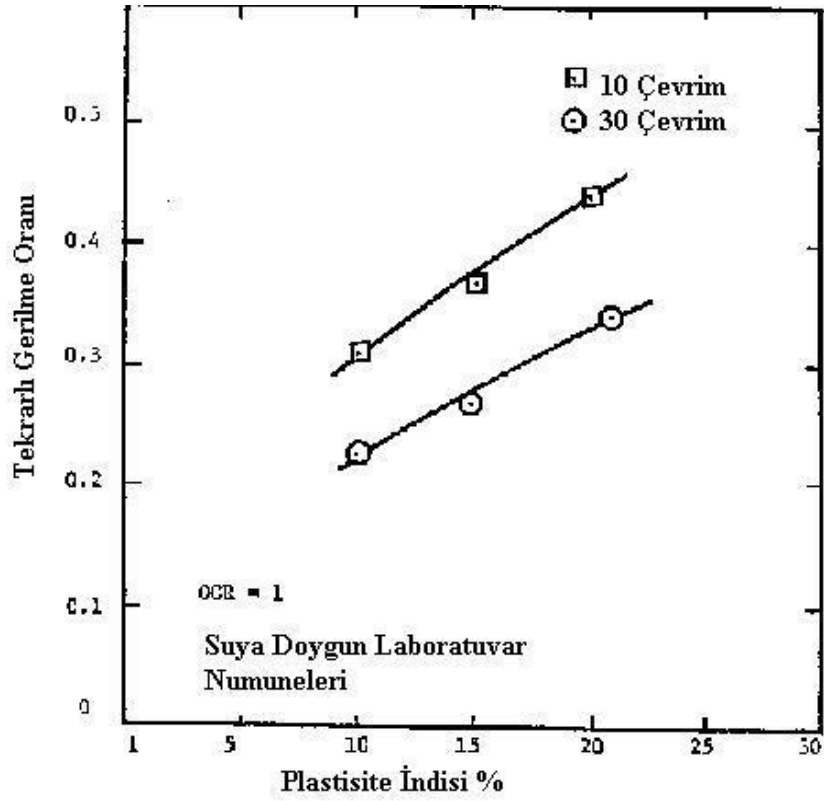
Puri (1984), örselenmemiş siltli numunelerde deneyler yapmıştır. Doğal su muhtevasında deneye tabi tutulmuş örselenmemiş numunelerin yanında, ters basınç altında doyurulduktan sonra önceden seçilmiş efektif konsolidasyon basıncında konsolide edilen laboratuvar numunelerinde de deneyler yapmıştır. Şekil 2.11'de, bu iki tür numunenin % 5 çift genlikli

deformasyon seviyesine kadar yüklendikleri duruma ait mukavemet eğrileri görülmektedir. Buna göre, örselenmemiş plastik olmayan siltli numunelerin dinamik mukavemetleri laboratuvarda hazırlananlara göre daha yüksektir. Şekil 2.12’de ise plastisite indisinin laboratuvarda hazırlanan normal konsolide silt numunelerinin dinamik mukavemetine olan etkisi görülmektedir. Aynı çevrim sayısında plastisite indisiyle birlikte gerilme oranı artarken, çevrim sayısı ile birlikte aynı plastisitedeki numunelerde gerilme oranının azaldığı görülmektedir.

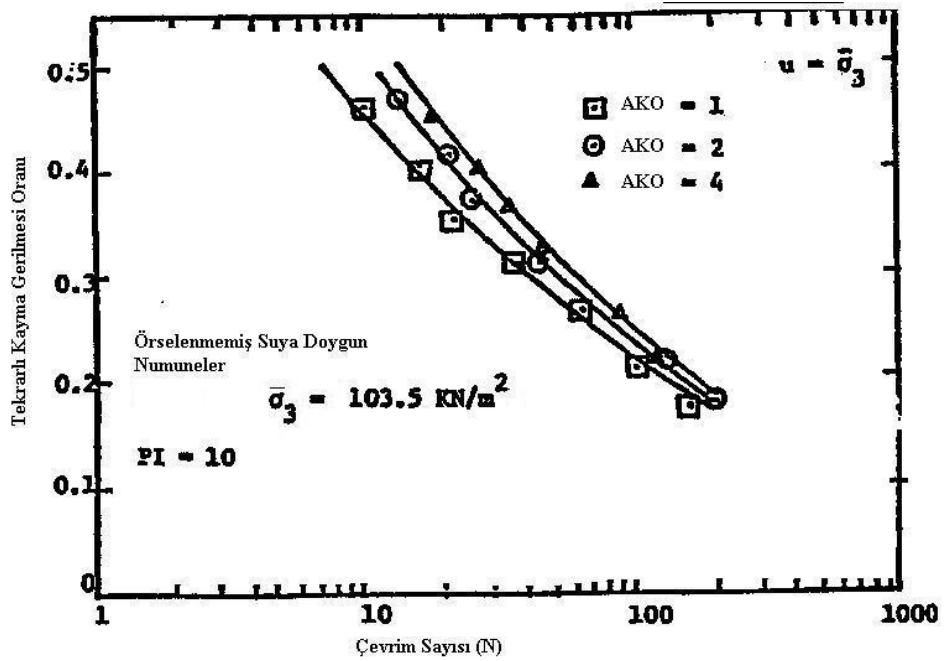


Şekil 2.11 Örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinin dinamik davranış farklılığı (Puri, 1984)

Şekil 2.13’te ise aşırı konsolidasyon oranıyla örselenmemiş siltli numunelerin dinamik davranışı arasındaki ilişki verilmiştir (Puri, 1984). Buna göre aşırı konsolidasyon oranı arttıkça aynı çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli gerilme oranı ve dolayısıyla dinamik mukavemet artmaktadır.

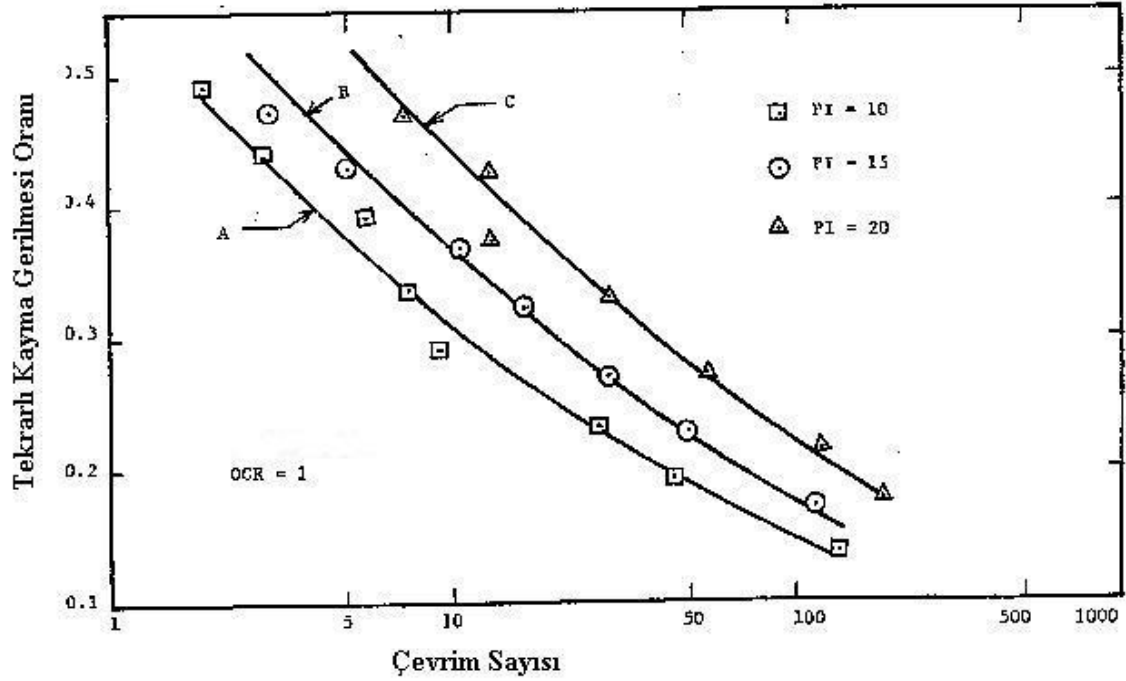


Şekil 2.12 Plastisite indisinin 10 ve 30 çevrimde % 5 çift genlikli deformasyonun oluşması için gerekli gerilme oranıyla değişimi (Puri, 1984)



Şekil 2.13 Ön sıvılaşma durumu için gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Puri, 1984)

Puri (1984), yaptığı çalışmada plastisitenin etkisini belirlemek üzere göçme kriterini, % 5 çift genlikli deformasyon seviyesi olarak alıp, Şekil 2.14'te görülen dinamik mukavemet eğrileri ile ifade etmiştir. Buna göre, laboratuvarında hazırlanan silt numunelerinde % 10-20 aralığında plastisite indisi arttıkça, zeminin dinamik mukavemeti de artmaktadır.



Şekil 2.14 Laboratuvarında hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına plastisite indisinin etkisi (Puri, 1984)

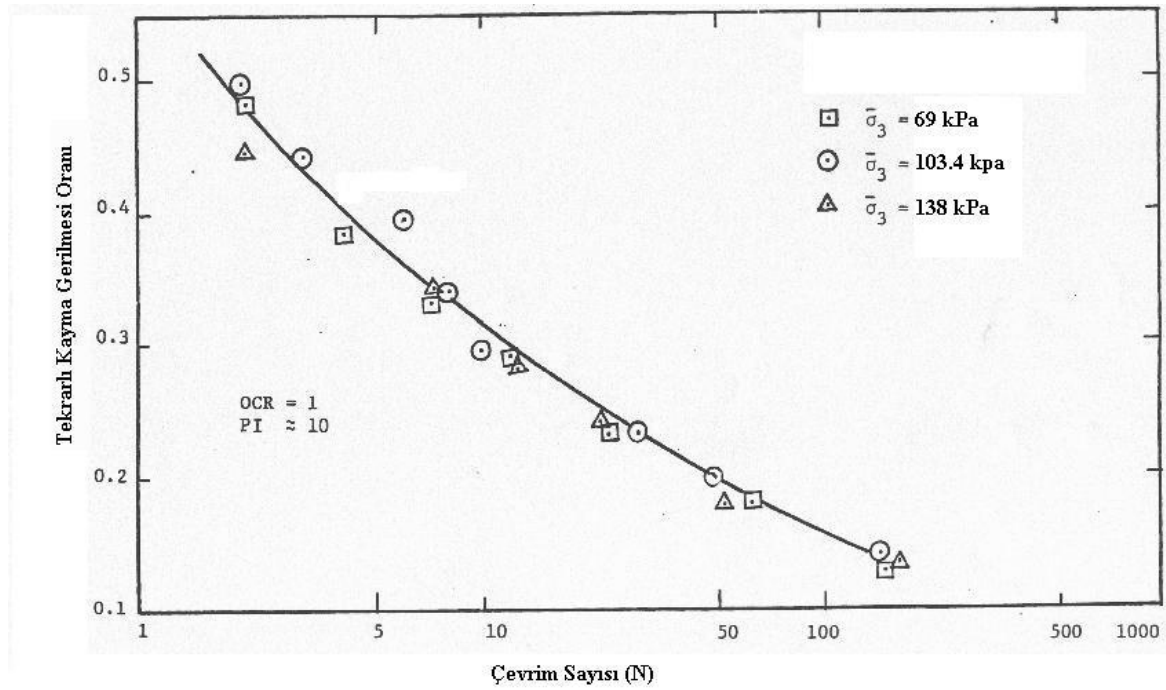
Şekil 2.15'te Puri (1984) tarafından laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları görülmektedir. Çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonu seviyesi zeminde göçme kriteri olarak alınmıştır. Plastisite indisi % 10 olan siltli numunelerde farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde numunelere 0.1-0.5 arasında değişen oranlarda tekrarlı gerilme uygulanmış ve sonuçlarda fazla bir farklılık görülmemiştir.

El Hosri (1984), iki farklı bölgeden 20-40 m'den aldığı örselenmemiş silt numunelerinde çeşitli dinamik deneyler yapmıştır. Siltli kum numunesi dışında diğer numuneler, % 5-15 arası plastisiteye sahip (ML-CL veya ML-MH) siltli kil ve killi silt özelliktedir. Elde ettiği sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Boşluk oranı 0.478, plastisite indisi % 5 olan numune, 0.32 dinamik gerilme oranında göçmeye uğramıştır. Boşluk oranı 0.644 olan plastik olmayan siltli numune ise 0.295

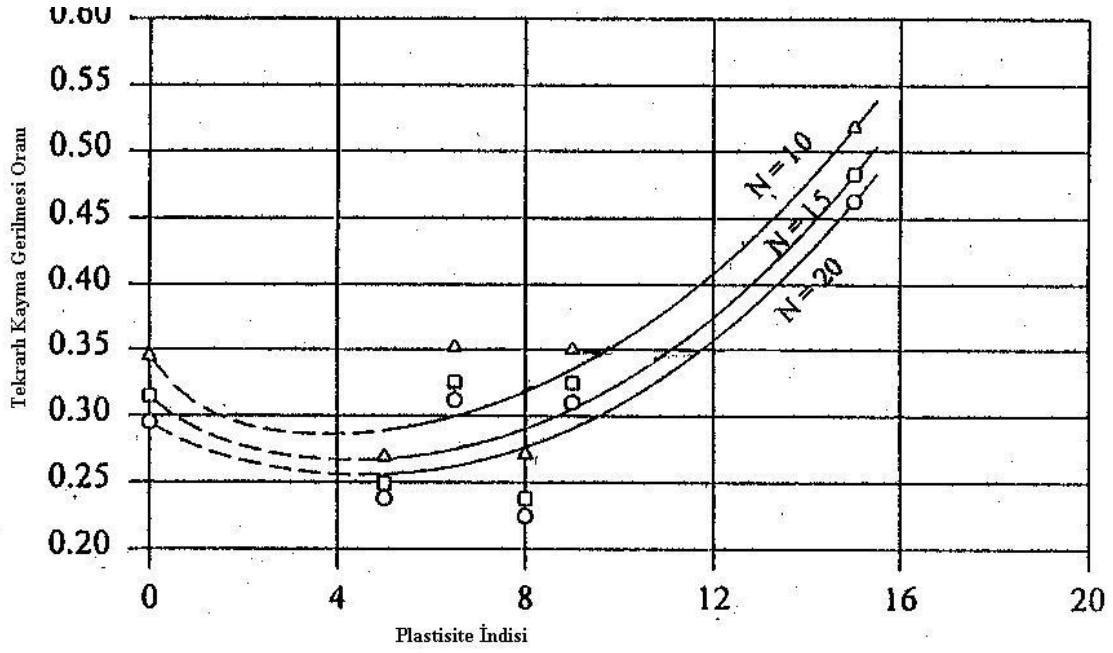
gerilme oranında göçmeye ulaşmıştır. İlk numune ikincisine oranla daha sıkı olmasına rağmen, göçmenin oluşması için gerekli gerilme oranı yalnızca az bir miktar daha fazladır. Buradan boşluk oranının yanında plastisitenin de dinamik mukavemette etkili olduğu sonucuna varılmaktadır.

2. Üçüncü bir numunede boşluk oranı 0.548, plastisite indisi ise % 8 olup, göçmeye 0.265 gerilme oranında ulaşılmıştır. Yine bu numune de ikinci numuneden daha sıkı olmasına karşın sıvılaşmaya karşı dayanımı daha düşüktür. Aynı şekilde bu numunede de plastisite indisi, ilk numuneye göre daha fazladır, ancak gerilme oranı daha düşüktür. Bununla birlikte bu son kıyas tartışmaya açıktır çünkü bu son numunedeki boşluk oranı ilk numunedekinden daha büyüktür.



Şekil 2.15 Laboratuvar ortamında hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984)

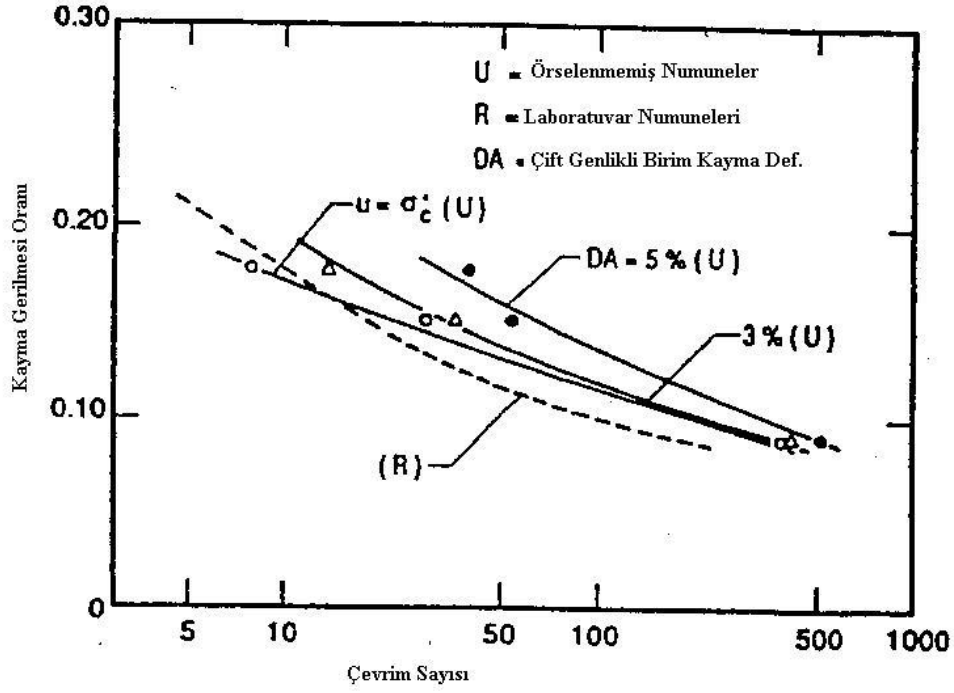
Sadece plastisitenin etkisini araştırmak amacıyla, boşluk oranına göre normalize edilen gerilme oranı ile plastisite indisi ilişkisi çizilmiş, % 5 plastisiteye kadar gerilme oranında azalma görülürken, sonraki değerlerde plastisite indisi ile gerilme oranı da artmaktadır (Şekil 2.16). Artan çevrim sayılarında ise bu artış daha düşük gerilme oranlarında meydana gelmektedir.



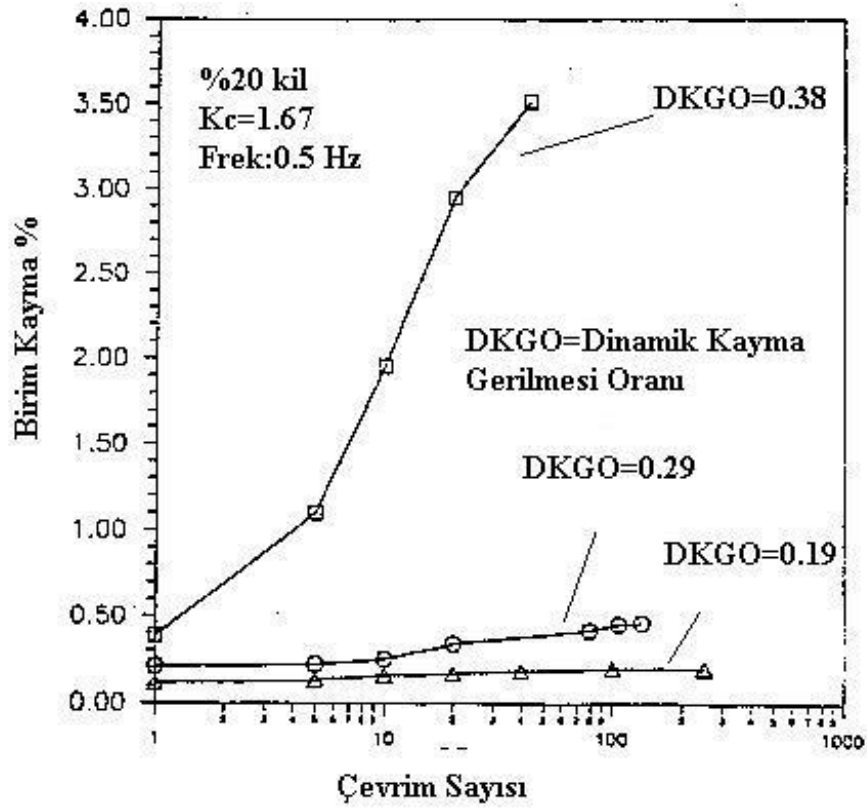
Şekil 2.16 Siltli ve kumlu zeminde dinamik mukavemetin plastisite indisiyle değişimi (El Hosri, 1984)

Zhu ve Law (1988), ise örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanan plastik olmayan siltli numunelerde yaptıkları deneylerde sabit boşluk oranında siltlerin dinamik mukavemetlerinin kumlarınkine benzediğini kaydetmişlerdir. Ayrıca, örselenmemiş numunelerde artık boşluk suyu basıncının efektif konsolidasyon basıncının % 80'i olduğu anda kayma deformasyonlarının hızla arttığını, laboratuvar numunelerinde ise bu seviyenin % 85'e karşılık geldiğini söylemişlerdir (Şekil 2.17).

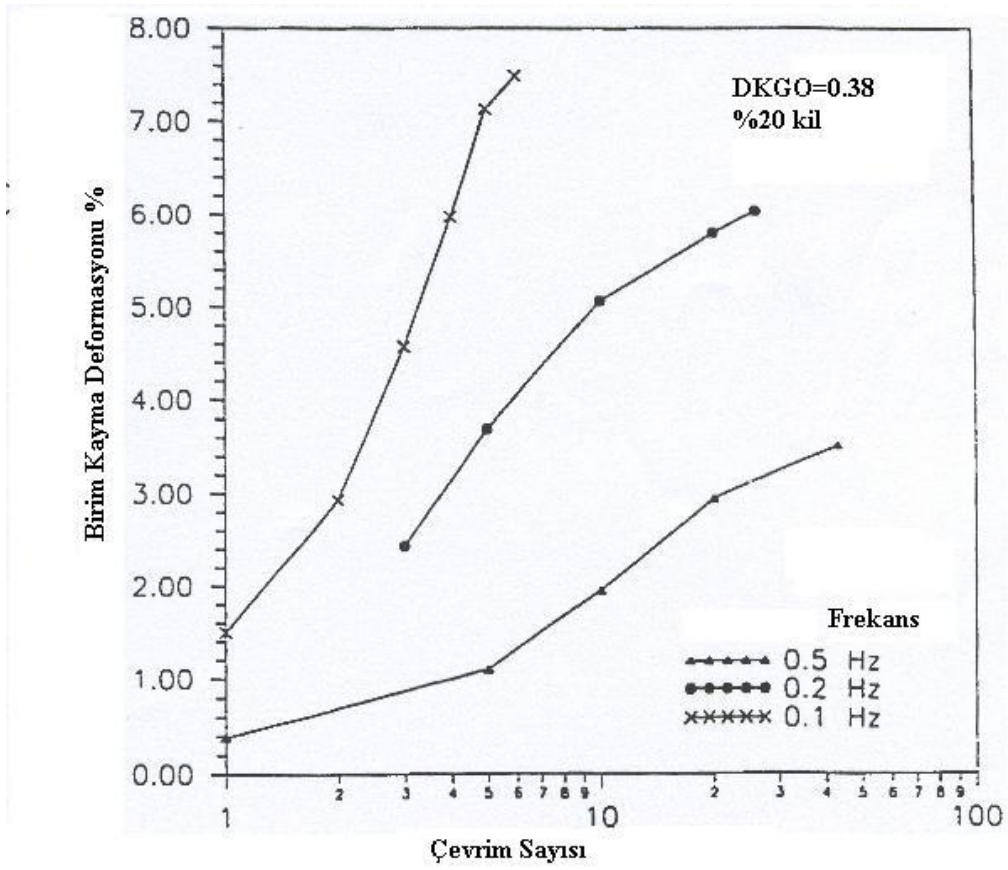
Konrad ve Wagg (1991), anizotropik olarak konsolide edilen killi siltler üzerinde yaptıkları drenajsız dinamik deneylerde, saf siltten, % 40 kil içeren killi silt karışımlarına kadar olan zeminlerde deformasyon seviyesinin üniform olmayan boşluk suyu basıncı dağılımında etkili olduğunu belirtmiştir. Kil miktarı % 20 olan silt-kil karışımına ait birim kaymanın çevrim sayısı ile değişimini gösteren eğriler Şekil 2.18, 2.19, 2.20'dedir. Şekil 2.18 ve 2.20'de farklı tekrarlı gerilme genliklerinde, aynı yükleme frekansında yapılan dinamik deneylerde birim kaymanın çevrim sayısı ile olan değişimi görülürken, Şekil 2.19'da birim kayma oluşumuna yükleme frekansının etkisi gösterilmiştir. Buna göre frekans arttıkça aynı çevrim sayısında numunede oluşan birim kaymalar azalmaktadır. Dolayısıyla tekrarlı yüklemenin frekansı, ince daneli zeminde dinamik mukavemeti artırmaktadır.



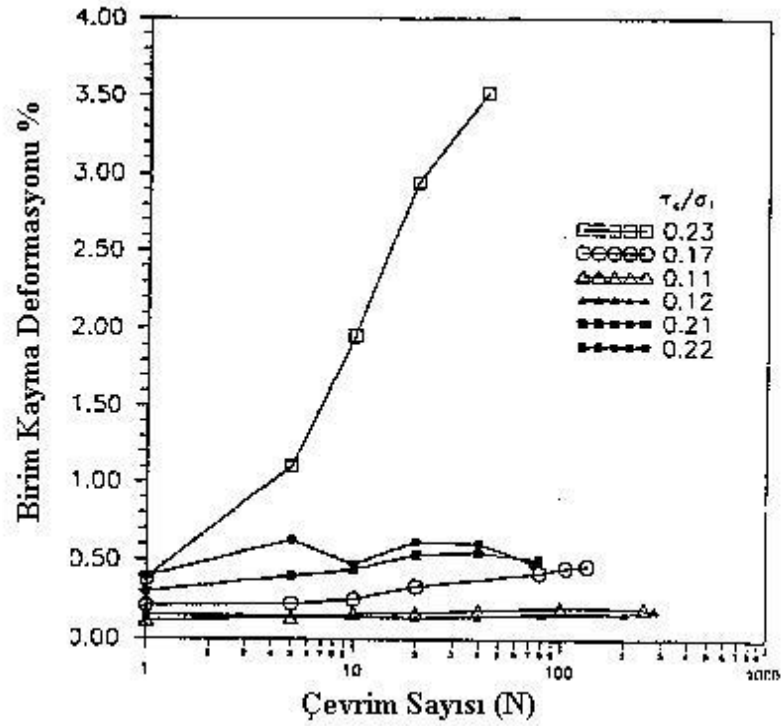
Şekil 2.17 Örselenmemiş numunelerde ve laboratuvarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988)



Şekil 2.18 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

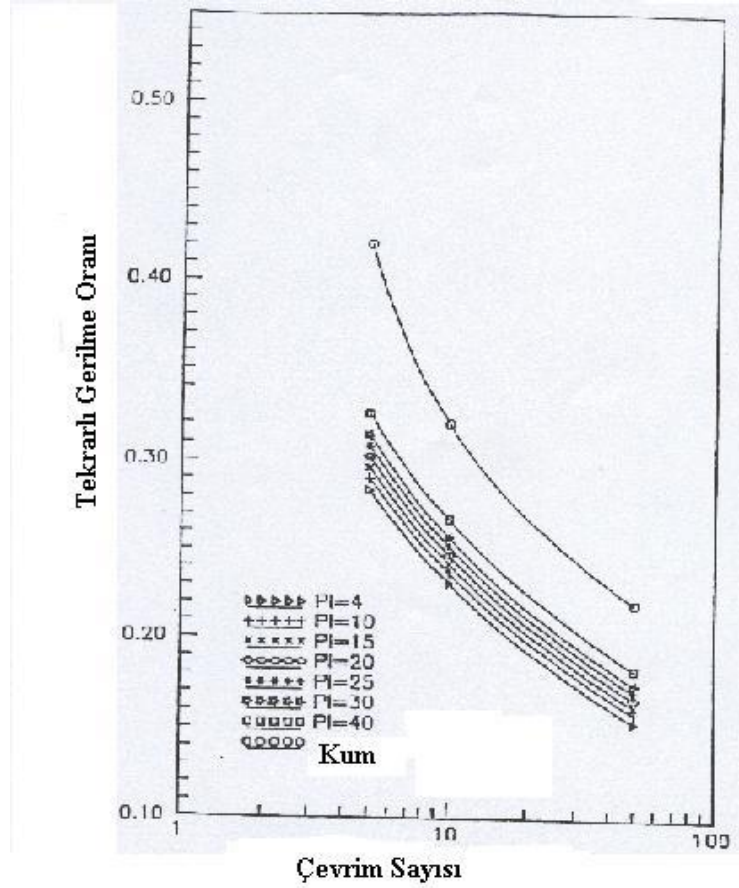


Şekil 2.19 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)



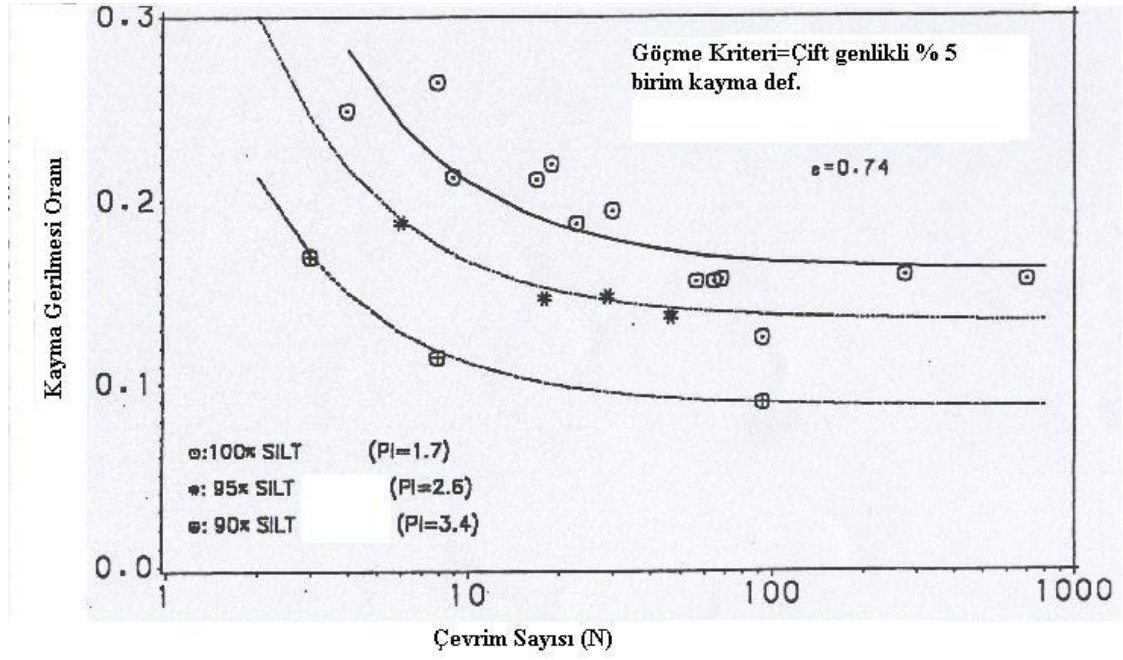
Şekil 2.20 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

Liu (1992), regresyon analiziyle elde ettiği dinamik mukavemet eğrilerinde, 10 çevrimde plastisite indisinin ince daneli, kohezyonlu zeminde dinamik mukavemet üzerindeki etkisini araştırmıştır (Şekil 2.21). Plastisite indisinin % 4-40 arası değerlerinde artan plastisite ile dinamik mukavemet artarken, en yüksek mukavemet temiz kumda elde edilmiştir.

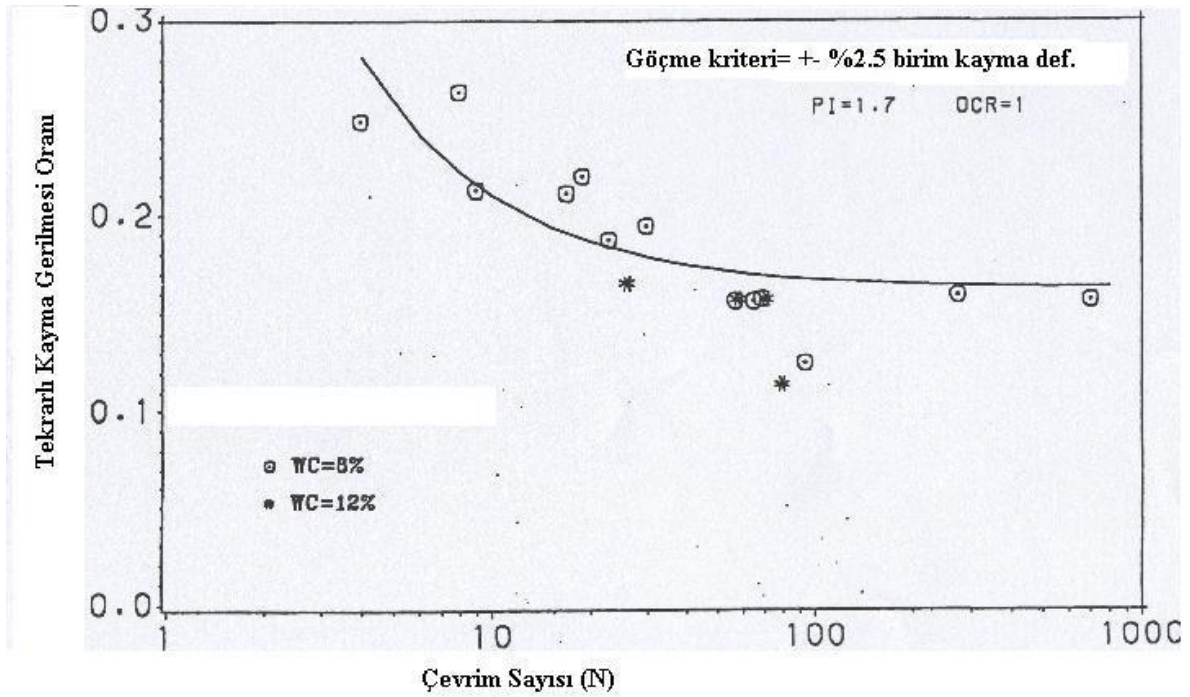


Şekil 2.21 Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu, 1992)

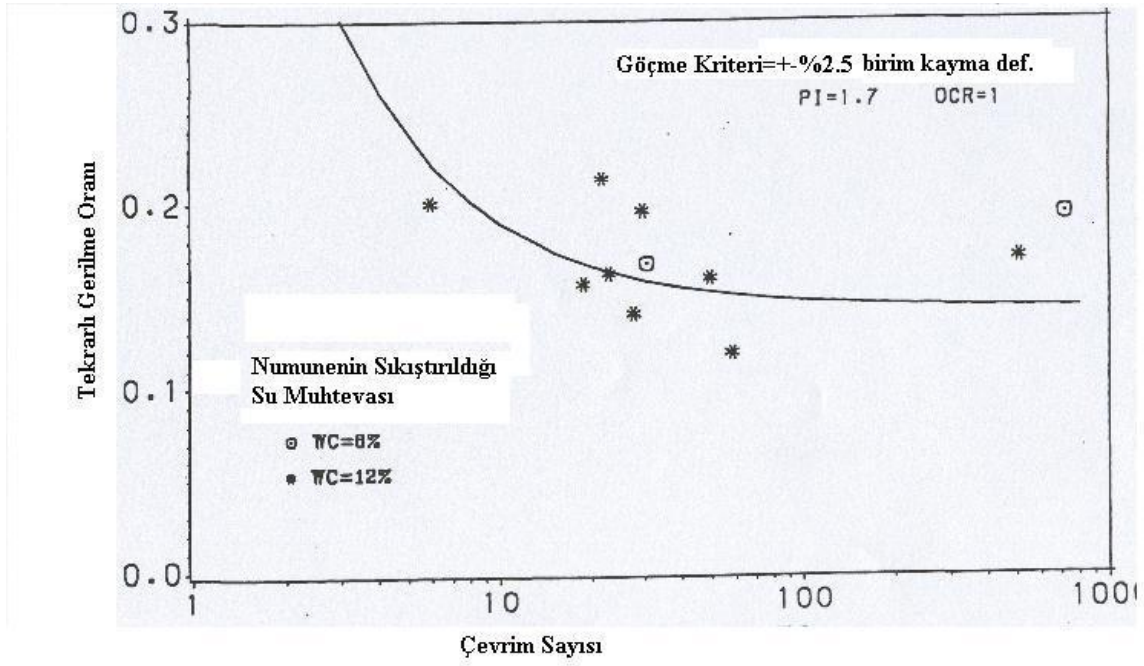
Sandoval (1989), Prakash ve Sandoval (1992), siltlerin sıvılaşma potansiyeline plastisite indisinin etkisini araştırmıştır. Düşük plastisiteli silte ($I_p = \% 1.7-3.4$), % 5-10 oranında kaolin kili ekleyerek hazırladıkları numuneleri, boşluk suyu basıncı efektif çevre basıncına eşit olana kadar veya % 5-10-20 birim kayma genliklerine ulaşılan kadar tekrarlı yüklemeye maruz bırakmışlardır. Sonuçlardan, düşük plastisitelere, plastisite indisi arttıkça siltlerin dinamik mukavemeti azalmaktadır (Şekil 2.22). Benzer şekilde, siltli zeminde kil yüzdesi arttıkça, göçmenin oluşması için aynı çevrim sayısında eksenel deformasyon miktarı artmakta buna karşın dinamik gerilme oranı azalmaktadır. Şekil 2.23 ve 2.24'te % 8 ve % 12 su muhtevasında laboratuvarında sıkıştırılarak hazırlanan, aynı efektif çevre basıncında farklı birim hacim ağırlıktaki düşük plastisiteli silte ait mukavemet eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.22 Düşük plastisiteli siltlerde % 5 çift genlikli deformasyon durumuna plastisitenin etkisi (Sandoval ve Prakash, 1992)



Şekil 2.23 Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi ($\gamma=15.3 \text{ kN/m}^3$) (Sandoval, 1989)



Şekil 2.24 % 5 çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi ($\gamma_k = 16.0 \text{ kN/m}^3$) (Sandoval, 1989)

Das ve diğ. (1999) tarafından yapılan dinamik üç eksenli deneylerde % 9-14 plastisite indisi değerlerine sahip killi silt numunelerde sıvılaşma meydana gelmiş, % 15 ve üzeri plastisiteye sahip numunelerde ise boşluk suyu basıncı artışları sınırlı kalarak dinamik mukavemetteki azalma, yumuşama ile kendini göstermiştir. Bununla beraber, plastisite indisinin % 4-5 değerlerinde en düşük dinamik mukavemetin olduğu görülmüştür. Zeminin plastisitesi, kaolin kili eklenerek bir miktar artırılmış ve aynı çevrim sayısında zemin numunesinde göçmenin olabilmesi için gerekli dinamik gerilme oranının, plastisite indisiyle beraber artış gösterdiği belirlenmiştir.

Prakash ve Guo (1999), ise silt ve kil karışımlarının tekrarlı yükler altındaki davranışlarını belirlemişlerdir. Plastik olmayan siltlerde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı oluşumunun kumlardakine benzediğini söylemişlerdir. Ancak, düşük bir miktarla da olsa yüksek plastisiteli kil eklendiğinde zeminde oluşan kohezyon etkisiyle sıvılaşma dayanımı artmaktadır. Saf siltlerle kıyaslandığında, kil-silt karışımlarında sıvılaşmanın veya yumuşamanın oluşumu genel olarak plastisiteye bağlıdır.

Thevanayagam ve Martin (2002), arazi incelemeleri ve deney sonuçlarından, siltli zeminlerin hacımsal sıkışma potansiyeli ve sıvılaşma sonrası sıkışma özelliklerinin dane temas

noktalarındaki gerilmelere ve relatif sıklığa bağlı olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca ince danelerin türü ve plastisitesi de sıvılaşma sonrası hacim değişimi üzerinde etkili olmaktadır.

2.2.3 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, deney sistemine de bağlı olarak sinüzoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapez yükleme şekilleri kullanılmıştır. Dikdörtgen yükleme biçiminin kullanılması durumunda en büyük gerilme değerinin numune üzerinde diğer yükleme şekillerine göre daha uzun süre etkimesinden dolayı daha büyük şekil değiştirmeler ve dolayısıyla daha büyük artık boşluk suyu basınçları elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının temel amacı doğadaki durumu modellemek olduğu için, deneylerde kullanılan yükleme biçimi, deprem yüklemesine eşit bir etki yaratacak tipte olmalıdır. Günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan sinüzoidal yükleme şekli, gerçekte deprem tarafından zemin tabakalarına uygulanan yükleme şekli değildir ancak deney sonuçları her iki tür yükleme arasında fazla bir fark olmadığını göstermektedir. Bu farkın az olması laboratuvarda yüklemenin eşdeğer tekrarlı gerilme genliği şeklinde olmasındandır. Böylece çift yönlü yüklemeyle birlikte uygulanan tekrarlı gerilme genliğinin hem çekme hem de basınç bölgesinde kalması sağlanır. Sonuçta şekil değiştirmeler daha büyük olmakta, daha küçük mukavemet değerleri elde edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan dinamik burulmalı kesme deney sisteminin diğer dinamik deney aletlerine göre bazı avantajları vardır. Deneylerde kullanılan numunelerin içi boş silindirik şekle sahip olması nedeniyle numune yüksekliği boyunca üniform gerilme dağılımının oluşması, düşey eksenel kuvvet, burulma momenti ve iç ve dış hücre basınçlarının bağımsız bir şekilde uygulanabilmesi, orta asal gerilme etkisinin incelenebilmesi, asal eksen yönlerinin istenilen koşullara göre döngüsünün sağlanması, bu avantajlardan en önemlileridir. Ayrıca anizotropik konsolidasyonun sağlanabilmesi, zeminin arazide maruz kaldığı gerilme koşullarını, laboratuvarda aynen modellemek açısından yarar sağlar. Bu bölümde dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yapılmış çalışmalar anlatılırken, dinamik üç eksenli ve burulmalı kesme deney sisteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

2.2.3.1 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar

Tatsuoka ve diğ. (1982), dinamik burulmalı kesme deney aletinde Toyoura ve Sengenyama kumu kullanarak sıvılaşma deneyleri yapmışlardır. Relatif sıklığın sıvılaşma dayanımını

artırdığını belirten araştırmacılar, sıkı kumlarda sınırlı ön sıvılaşma ve çevrimsel oynaklık davranışını gözlemişlerdir. Ayrıca ince dane içermeyen Toyoura kumunun dinamik mukavemetinin, % 1.6 ince dane içeren Sengenyama kumuna göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir. İnce dane oranı az olmasına rağmen davranışlar arasında böyle bir farklılığın oluşması numunelerdeki dane yapısının üzerinde durulmasına sebep olmuştur.

Tatsuoka ve diğ. (1982), sıkı kumların drenajsız tekrarlı yükler altında yapılan burulmalı kesme deneyleriyle, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini araştırmışlardır. Sonuçlardan, relatif sıkılığın belli bir değerinden sonra, % 7.5 ve % 15 birim kayma elde etmek için gerekli gerilme seviyesinin statik deneylerden elde edilen gerilme değerine yakın olduğu bulunmuştur.

Hong ve Lade (1989), K_0 şartıyla konsolide edilen killerden hazırladıkları içi boş, silindirik deney numunelerinde dinamik burulmalı kesme deneyleri yapmışlar, göçmenin oluşmasından önceki gerilme şekil değiştirme ilişkisine gerilme izinin ve asal gerilme döngüsünün etkisini araştırmışlardır. Deneylerden elde ettikleri kırılma zarfını, izotropik bir kırılma kriteri yardımıyla modelleyen araştırmacılar gerilme anizotropisinin etkisinin burulmalı kesme deney aleti yardımıyla en ideal yaklaşımla belirlenebileceğini öne sürmüşlerdir.

Sayao ve Vaid, (1991), ise gerilme anizotropisini ve asal eksenlerin döngüsünü, Tatsuoka ve diğ., (1986) ise, kumlarda mukavemet ve deformasyon özelliklerini yaptıkları burulmalı kesme deneyleriyle araştırmışlardır. Sonuçların doğruluğu açısından düşey eksenel yük ve burulma momentinin doğrulukla ölçülmesi gerektiğini belirtmişler, ayrıca numunede oluşan gerilmelerin membran penetrasyonu açısından düzeltilmesi gerektiğini söylemişlerdir.

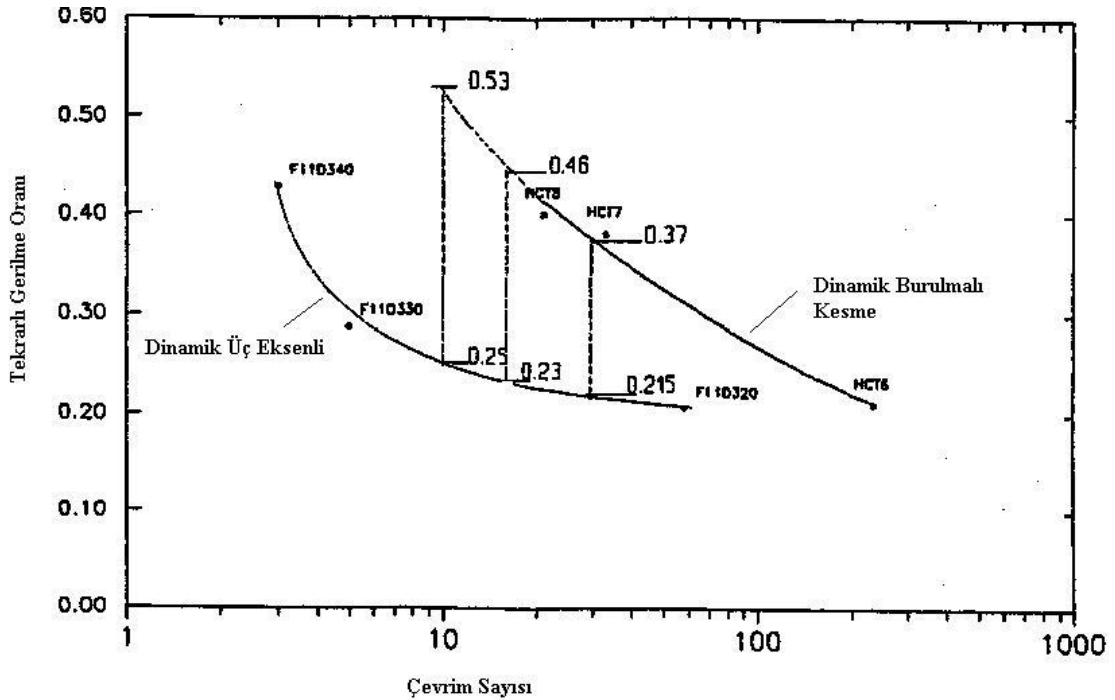
Yoshimine ve diğ. (1999), İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında yaptıkları burulmalı kesme deneylerde drenajsız düzlem deformasyon durumunda kayma mukavemetini ve drenajsız kayma mukavemetini karşılaştırmışlardır.

Shahnazari ve Towhata (2002), kumlarda gerilme-hacim değişimi ilişkisini araştırmak amacıyla dinamik burulmalı kesme deneyleri yapmışlardır. Araştırmalarında Toyoura kumu kullanarak, drenajlı deneyler altında başlangıç anizotropik gerilme durumu ile efektif çevre gerilmesinin ve birim hacim ağırlığının deney sonuçlarına ve gerilme-hacim değiştirme ilişkisine etkisini araştırmışlardır.

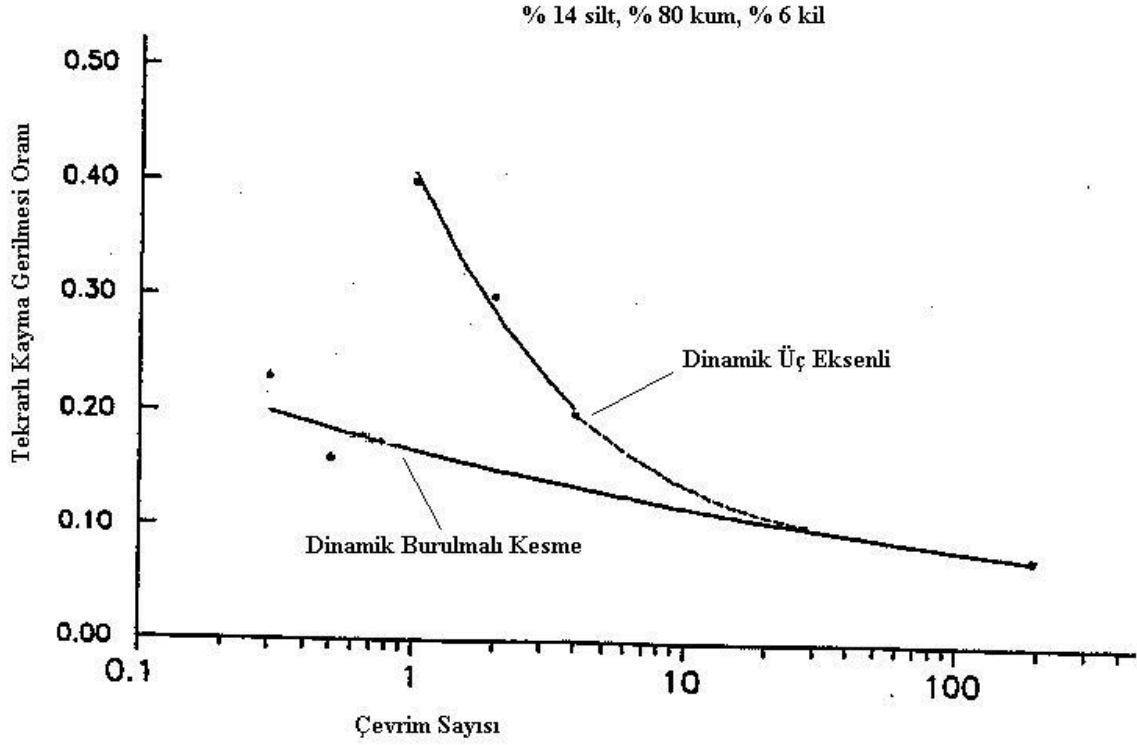
2.2.3.2 Dinamik Burulmalı Kesme ve Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinde Yapılan Çalışmaların Karşılaştırılması

Ishihara ve Yasuda (1975), % 55 sıklıkta, Fuji Nehri'nden temin ettiği kum numunelerinde burulmalı kesme deney sistemini kullanarak sıvılaşma deneyleri yapmıştır. Bu deneylerde numunelere düzensiz gerilme genlikleri uygulamıştır. Ayrıca dinamik üç eksenli sisteminde de deneyler yaparak iki deney aletinden elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuçlar birbirine benzemektedir. Ancak burulmalı kesme deney sonuçları kesme doğrultusundan etkilenmemektedir.

Koester (1992), ince daneli kumlarda ve kohezyonlu zeminler üzerinde dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleri ile sıvılaşma davranışını araştırmıştır. Sonuçları boşluk suyu basıncı oluşumu ve farklı gerilme ve konsolidasyon şartları altında elde ettiği dinamik kayma mukavemeti açısından karşılaştırmıştır. Buna göre, dinamik üç eksenli deney aleti ile temiz kumlarda yaptığı deneylerden elde ettiği dinamik mukavemetler, burulmalı kesme deney aletinden elde ettiği mukavemetlerden daha düşük olmasına karşın içerisinde % 14 silt ve % 6 kil bulunan kumlar kullanarak yaptığı dinamik üç eksenli deneylerden elde ettiği dinamik mukavemetler ise daha büyüktür (Şekil 2.25, 2.26).

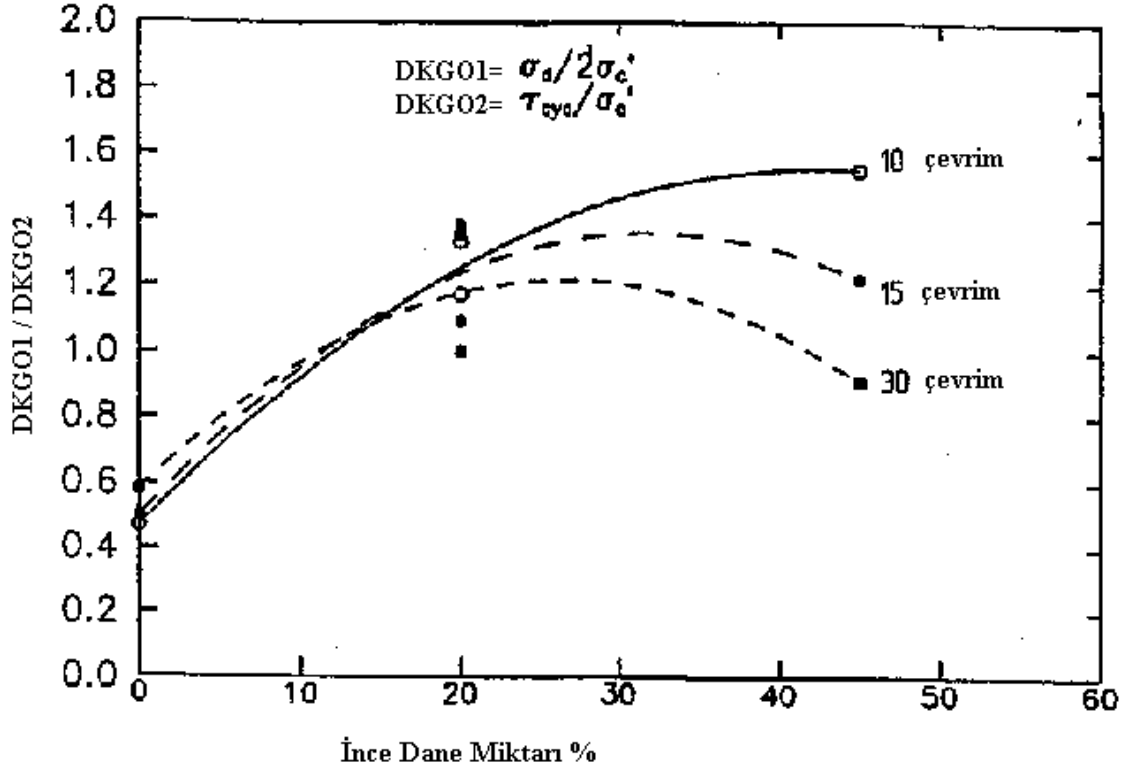


Şekil 2.25 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin temiz kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)

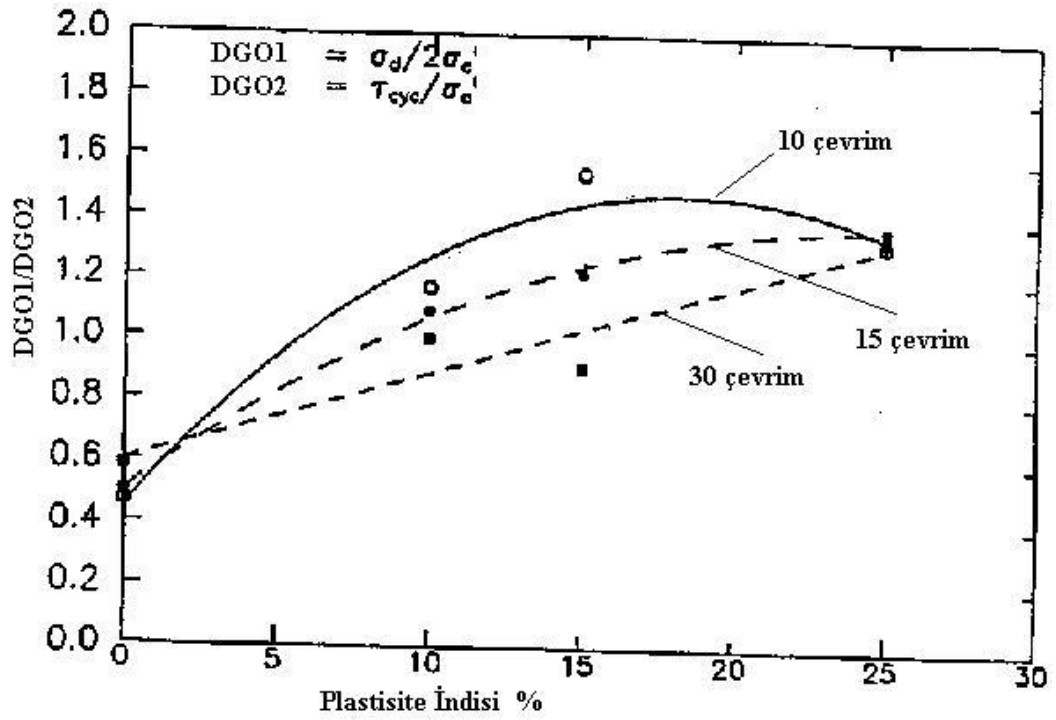


Şekil 2.26 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin ince daneli kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)

Koester (1992), yaptığı bir başka çalışmada ise ince dane oranı ve plastisite indisinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlerdeki farklılığa etkisini araştırmıştır. Bunun için 10, 15 ve 30 yükleme çevriminde farklı gerilme oranlarında deneyler yaparak Şekil 2.27 ve 2.28'deki eğrileri elde etmiştir. Buna göre, dinamik üç eksenli mukavemet, ince danelerin plastisite indisi % 8'den az olduğu durumda, dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen mukavemetin yanında daha düşük olmaktadır. Plastisite indisi % 8'den yüksek olduğu durumda üç eksenli deneyden elde edilen dinamik mukavemet daha büyüktür. 15 çevrimden elde edilen eğrilerin ise, ortalama olarak davranışı gösterdiği belirtilmiştir.



Şekil 2.27 İnce dane yüzdesinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992)



Şekil 2.28 Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992)

2.2.4 Numune Hazırlama Yönteminin Dinamik Davranışa Etkisi

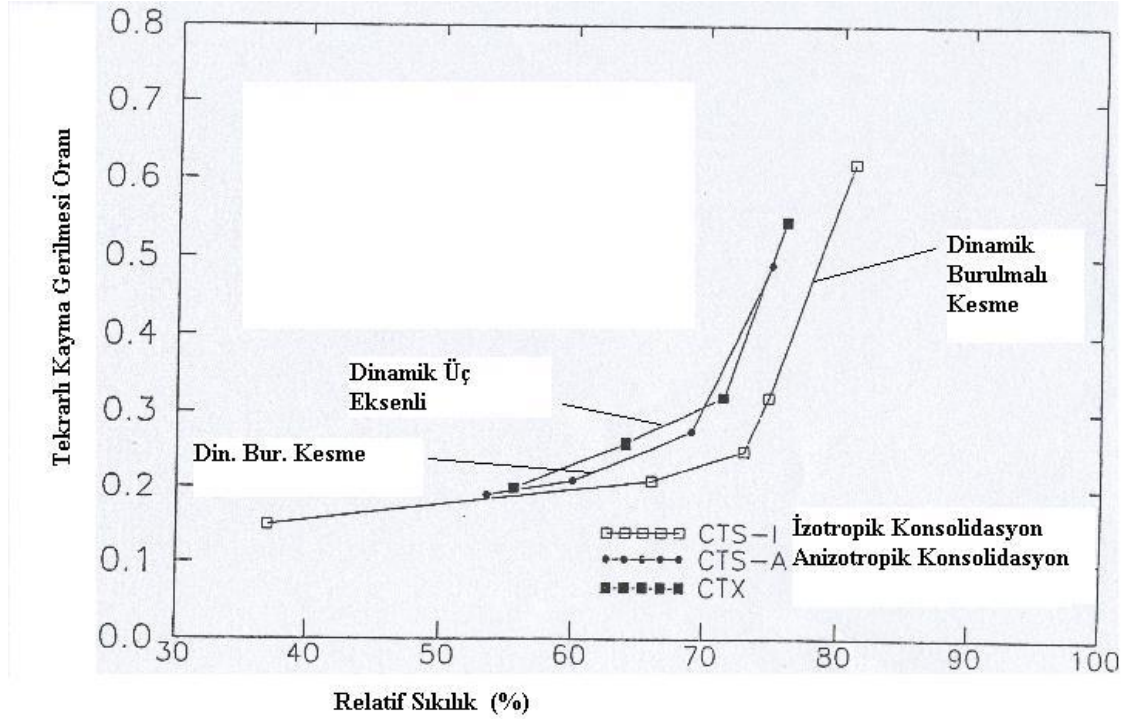
Deney sonuçlarına etkiyen bir diğer parametre ise numune hazırlama yöntemidir. Laboratuvar çalışmalarında yapılan dinamik deneylerde farklı yöntemler kullanılarak farklı sıklıkta örselenmiş numuneler oluşturulabilmektedir. Bunlar arasında, ıslak sıkıştırma, suda çökeltme, kuru yağmurlama, şişleme, düşük frekanslı titreşim, vibrasyonlu yüksek frekanslı titreşim genelde kullanılan yöntemlerdir.

Tatsuoka ve diğ. (1984), numune hazırlama yönteminin dinamik burulmalı kesme deney sonuçlarına etkisini araştırmışlardır. Bunun için ince dane içermeyen Toyoura kumu ile % 2.4 ince dane içeren Sengenyama kumu kullanmışlardır. Ancak en büyük ve en küçük boşluk oranının belirlenmesinde kullanılan yöntem ile dinamik deneylerde kullanılan numune hazırlama yöntemi farklı olduğundan, relatif sıklığın kumlarda dinamik mukavemete olan etkisini tek başına yeterli bir parametre olarak almanın yanlış olacağını belirtmişlerdir. Bunun yanında dinamik deney sonuçları, numune hazırlama yöntemine doğrudan bağlıdır. Tatsuoka ve diğ. (1984), ıslak sıkıştırma, kuru yağmurlama, ıslak vibrasyon ve vibrasyonla suda yağmurlama yöntemlerini kullanarak dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları deneylerde, 20 çevrim sayısında % 10 birim kayma elde etmek için gerekli gerilme oranı ıslak sıkıştırma yönteminde elde edilmiştir. Bu sonuç, Mulilis ve diğ. (1975), tarafından bulunan sonuçla uyushmaktadır. Bunun yanında ıslak sıkıştırma yöntemi ile elde edilen mukavemetlerle, ıslak vibrasyon yönteminden bulunan mukavemetler dinamik üç eksenli deneyde birbirine yakinken, ıslak vibrasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerle yapılan dinamik burulmalı kesme aletinden elde edilen mukavemetler (20 çevrimde % 15 birim kaymaya ulaşmak için gerekli gerilme oranı), daha büyüktür.

Şekil 2.29'da % 60 ile % 80 relatif sıklıkta Toyoura kumundan hazırlanan numunelerde yapılan dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney sonuçları görölmektedir. Dinamik burulmalı kesme deneyleri izotropik ve anizotropik konsolidasyon altında yapılmıştır ve relatif sıklık arttıkça numunede % 15 birim kayma deformasyonu oluşması için gerekli gerilme oranı, dinamik üç eksenli deneylerdekenden daha düşüktür.

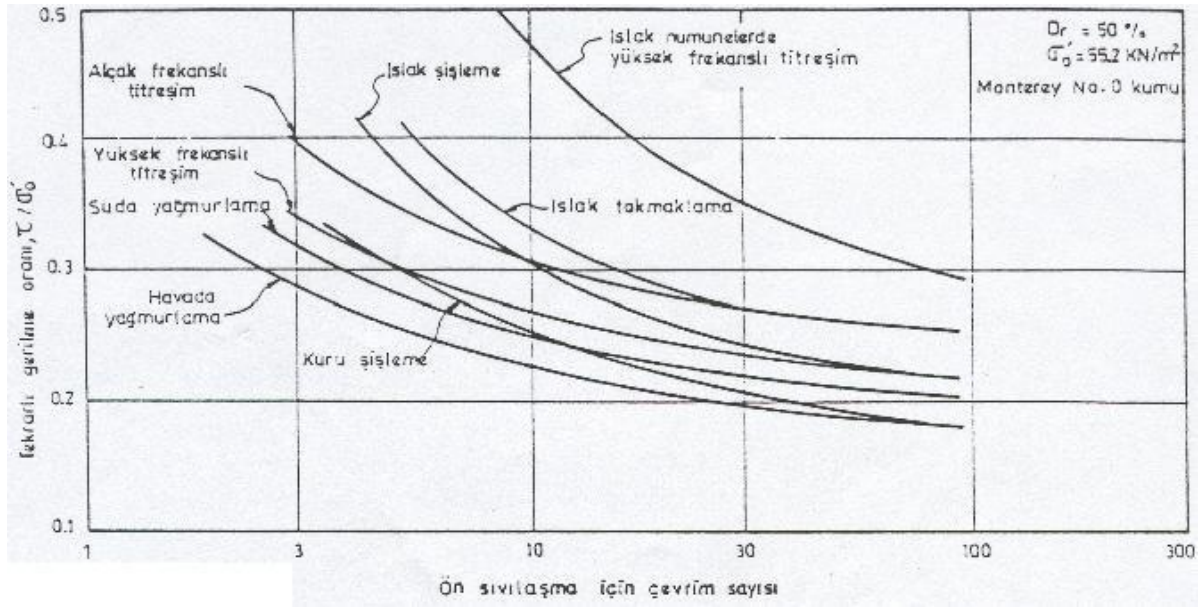
Vaid ve diğ. (1999), kumların drenajsız mukavemetlerine laboratuvarda yeniden hazırlama yöntemlerinin etkisini araştırmışlar, kuru yağmurlama, ıslak sıkıştırma ve suda depolama yöntemleriyle elde edilen numunelerin dinamik ve statik davranışlarını incelemişlerdir. Sabit boşluk oranında ve aynı çevre gerilmesi altında, ıslak sıkıştırma ile hazırlanan numunelerin

sıvılaşma potansiyeli olduğu ve hacim azalması gösterdikleri belirlenirken, suda yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin hacim artışı gösterdikleri bulunmuştur. Ayrıca ıslak sıkıştırmayla hazırlanan numunelerin suda çökeltmeyle elde edilen numunelere göre daha üniform olmayan bir davranış gösterdikleri belirlenmiştir.



Şekil 2.29 İslak sıkıştırmayla hazırlanan Toyoura kumu numunelerinin dinamik mukavemetleri (Tatsuoka ve diğ. 1984)

Suya doygün kumlar dikkate alındığında, numune hazırlama yönteminin, kumun sıvılaşma davranışı üzerinde etkili olduğu görülür (Şekil 2.30). Bunun nedeni ise, laboratuvarında farklı numune hazırlama yöntemleriyle, farklı dane yapısı ve yerleşimine sahip farklı sıklıktaki kumların oluşturulmasındandır. Mulilis ve diğ. (1975), farklı numune hazırlama yöntemleriyle, aynı çevre basıncı altında aynı relatif sıklıkta sarsma tablası deneyleri yapmışlardır. Şekil 2.30'dan da görülebileceği gibi, belirli bir tekrar sayısında ön sıvılaşma meydana getirecek tekrarlı gerilme oranları arasında % 200'e çıkan farklar olmaktadır. Bu farklılığın ayrıca kumun cinsinin relatif sıklığına ve efektif çevre gerilmesine bağlı olduğu da belirtilmiştir.



Şekil 2.30 Farklı numune hazırlama yöntemleriyle hazırlanan kum numunelerinin dinamik mukavemetleri (Mulilis ve diğ., 1975)

2.2.5 Dinamik Yükleme Sonrası Statik Mukavemetin Belirlenmesi

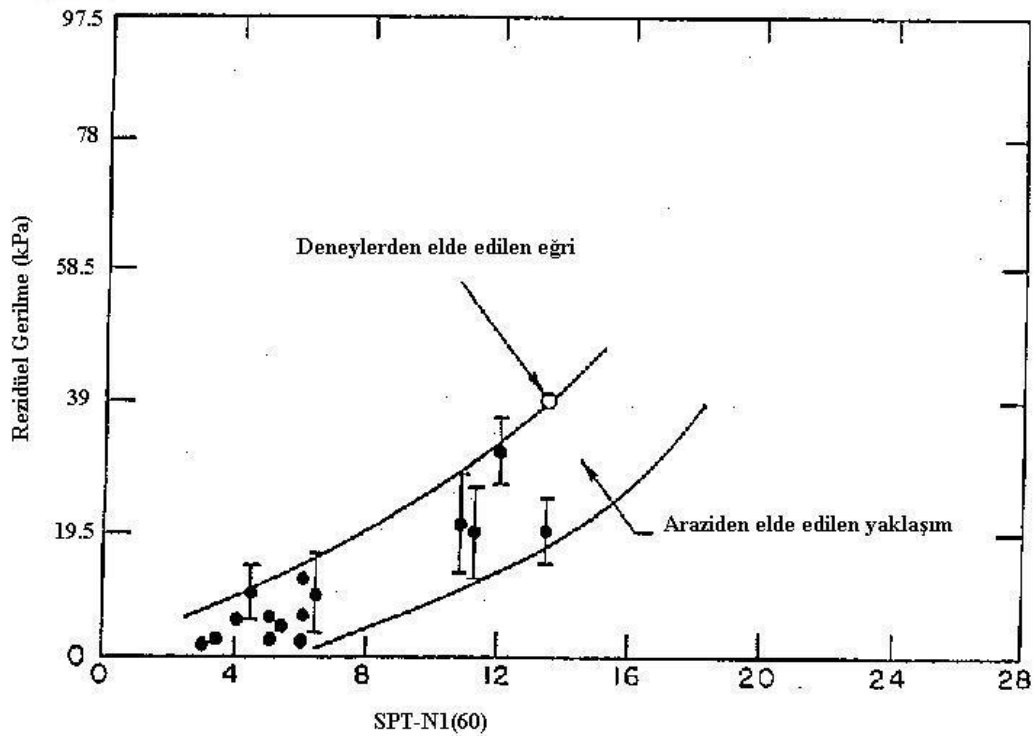
1980'lerin başından bu yana yapılan çalışmalarda, sıvılaşma sonrası arazide doğal yamaçlardaki ve yapı temelleri altındaki zeminlerde önemli ölçüde statik kayma mukavemeti kayıpları olduğu belirlenmiştir. Ancak tekrarlı yüklemeyle birlikte kalıcı deformasyonlara uğrayan zeminde kayma mukavemetinin sıfıra düştüğünü söylemek aşırı güvenli tarafta kalmak anlamındadır (Koester, 1992). Bu yüzden sıvılaşma sonrası zeminde meydana gelebilecek kalıcı deformasyonların önlenmesi için uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerinin, zeminde tekrarlı yükleme sonrası nihai kayma mukavemetine bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca deprem öncesi zeminin kayma mukavemetini artırmak ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla bir yöntem uygulanmadığı durumda, kısa dönemde çeşitli mühendislik yöntemleriyle şev ve temel zemini stabilitesini sağlamak, boşluk suyu basınçlarının sönmülerek zeminin yeniden kayma mukavemeti kazanmasına kadar etkili olabilmektedir.

Finn (1982a) ve Ramanujam ve diğ. (1978), deprem yükleri sonrası kalıcı drenajsız kayma mukavemetinin potansiyel göçme yüzeyi boyunca değiştiğini belirterek, zeminde limit denge durumunda çevre basıncı düzeltilmesiyle stabilite analizinin yapılması gerektiğini söylemişlerdir. Bu yaklaşım da yine oldukça güvenli taraftadır. Çünkü göçme yüzeyi boyunca

rezidüel durumda gerilmelerin etkili olmasıyla zemin stabil olmayan konumdadır, o yüzden aynı anda limit denge analizini kullanarak hesap yapılması söz konusu değildir.

Benzer yaklaşım, Castro (1969), La Gatta (1970), Poulos (1981), Castro ve diğ. (1982) ve Poulos ve diğ. (1985) tarafından da kullanılmıştır. Buna göre araştırmacılar monotonik, deformasyon kontrollü üç eksenli basınç deneyleri yapmışlar ve akma durumundan sonraki drenajsız kayma mukavemetini belirlemişlerdir. Bu mukavemet değeri drenajsız durumda zeminin sahip olabileceği en düşük değere karşılık gelmektedir (Koester, 1992).

Zeminlerin sıvılaşma sonrası statik kayma mukavemetleri ayrıca, Marcuson ve diğ. (1990), Seed ve diğ. (1989), Vasquez ve Dobry (1989), Castro ve diğ. (1989) tarafından da belirlenmiştir. Araştırmacılar, San Fernando Barajı hidrolik dolgusundan elde ettikleri numunelerle zeminin nihai durumda kalıcı kayma mukavemetini belirlemek için laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Sonuçları, menba tarafından aldıkları zemin numunelerinde belirledikleri standart penetrasyon sayısı ile birlikte tekrarlı yüklemeyle birlikte oluşan göçme sonrası statik mukavemetlerle karşılaştırmışlardır (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Sıvılaşma sonrası kumlu zeminde düzeltilmiş SPT-N-kalıcı mukavemet ilişkisi (Seed, 1989)

İnce daneli zeminlerin tekrarlı yükleme sonrası uğradıkları statik mukavemet kaybına ilişkin bir diğer çalışma Lee ve Focht (1975), tarafından yapılmıştır. Zeminin inşaat malzemesi olarak kullanıldığı mühendislik yapılarında ve yapı temelleri altındaki zeminlerde tekrarlı yüklemeyle birlikte oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle göçme meydana gelmektedir. Statik akma birim şekil değiştirmesinin % 70'i kadar bir şekil değiştirme seviyesine tekrarlı yükleme altında uğrayan ince daneli zeminde statik mukavemet % 20 oranında düşmüştür. Araştırmacılar tekrarlı yükleme sonrası yaptıkları statik üç eksenli basınç deneylerinde, dinamik yüklemede oluşan boşluk suyu basınçlarının, birim şekil değiştirmeler arttıkça sabit bir değere kadar azaldığını belirtmişlerdir.

2.3 Zeminlerin Mikroyapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Şartları Altında Belirlenmesi

Doğal zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, mikro boyutta danesel ve boşluklu yapılarının incelenmesi, zemin mekaniğinin kurulduğu ilk yıllardan beri yapılmaktadır. Terzaghi (1948), zemin yapısının mühendislik özellikleri üzerine etkisine değinerek, heterojen, anizotrop ve üç fazlı yapının önemini belirtmiştir. Suyu doygun kohezyonlu bir zemine etkileyen bir dış kuvvetin öncelikle boşluk suyundaki basınçla karşılandığı fikri ilk o tarihte ortaya atılmıştır. Casagrande (1932), zemindeki petek şeklindeki yapıyı tariflerken bunun diğer iskelet dane elemanlarını noktasal temaslarla bağladığını ileri sürmüştür. Lambe (1953-1958) ise, inorganik zeminin mikroyapısını ve dış yükle su muhtevasına karşı durumunu incelemiştir. Bu sayede kompaksiyon deney sonuçları daha kolay anlaşılmıştır.

Zeminin gerçekte ideal izotropik, homojen ve üniform yapıya sahip olmadığı düşünülürse, anizotrop ve heterojen yapının ve bu yapıda yüklemeyle birlikte meydana gelen değişimin incelenmesi önem kazanmaktadır. Günümüzde zeminin mikro ve makro boyutta yapısını belirlemek için genelde sırasıyla şu adımlar uygulanmaktadır:

1. Zeminin endeks özelliklerinin belirlenmesi,
2. Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışının, mukavemet deneyleriyle tespiti,
3. Farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarına maruz bırakılan zemin numunelerinden ince kesit ve blok örnekler çıkarılması (Mitchell 1976),

4. Yapıyı belirlemek için uygun yöntemin seçilmesi,
5. Kullanılan yöntemle elde edilen görüntülerin toplanması ve görüntü işleme programıyla iki boyutta ön analizlerin yapılması (Oda ve diğ., 1985; Tovey ve diğ. 1988; Smart ve diğ., 1992; ; Luo ve diğ. 1992; Lee ve Dass, 1993; Bai ve diğ. 1994; Desrues ve diğ. 1996),
6. Dane şekil ve boyutunun, dane oriyantasyonlarının ve boşluklu yapının görüntü analiziyle belirlenmesi (Bai ve diğ. 1994; Luo ve diğ. 1992; Dudoignon ve diğ. 2001),
7. İstatistiksel analiz ile ele alınan tüm görüntülerden hesaplanan parametrelerin birleştirilerek geometrik yapının tahmini (Curry, 1956; Bai ve diğ. 1994),
8. Kinetik yapının belirlenmesi için model oluşturulması ve nümerik analizlerin yapılması (Kuo ve diğ. 1998; Nougier ve diğ. 2003),
9. Oluşturulan modelde kullanılan teoriyi destekleyecek ve zemin yapısını temsil edebilecek fiziksel büyüklüklerin hesabı ve bunların mikroyapıyla ilişkilendirilmesi (Santamarina ve Cascante, 1998)
10. Zemin mikroyapısının gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisiyle, nihai durumda mikro ölçekte yapıda meydana gelen değişimin belirlenmesi (Dudoignon ve diğ. 2001).

Yukarıda sayılan adımların bir kısmı bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan yalnızca tanımlamayla yetinilmiştir. Bu bölümde doğal zeminlerle, laboratuvarda hazırlanan numunelerin çeşitli konsolidasyon ve yükleme koşulları altında daneli ve boşluklu yapılarındaki değişimleri ve zemin mukavemetine bu yapısal değişimlerin etkilerinin belirlenmesi üzerine yapılmış çalışmalardan örnekler anlatılmaktadır.

2.3.1 Zemin Yapısının Mikroskop İncelemeleriyle Belirlenmesi

Günümüzde çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan farklı çalışmalarla, granüler ve ince daneli zeminlerin yapıları gerek optik gerekse elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmektedir. Dane boyutu 2 μ 'dan küçük olan kil minerallerinin birleşimiyle oluşan tabletlerin kenar-kenar, köşe-kenar ve köşe-köşe şeklindeki dizilimleri, oluşturdukları petek

ve/veya yassı yapı, elektron mikroskobu aracılığıyla incelenirken, daha büyük çaplı siltli zeminlerle, 74 μ 'dan büyük çapa sahip granüler zeminlerin mikroyapı incelemeleri, X 500 büyütmeye sahip optik mikroskoplarla yapılabilmektedir. Son elli yılda, özellikle granüler zeminlerin mikro yapısının, zeminin mühendislik ve fiziksel özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır (Mitchell, 1976; Smart, 1966; Smart ve diğ. 1979). Bazı çalışmalarda ise zeminin yapısı, geometrik ve kinetik yapı olarak iki ayrı şekilde ele alınmıştır (Chen ve diğ. 1988).

Geometrik yapıda; çoğunlukla dönme eksenini, incelenen ince zemin kesitine göre relatif olarak sabit tutulan optik mikroskop yardımıyla veya optik eksenle numune ekseninin beraber belli açılarla döndürüldüğü durumda, zeminin sahip olduğu dane boyutu, şekli, yüzey pürüzlülüğü, yuvarlaklığı, boşlukların çapı ve dağılımı, fisür ve çatlak genişlikleri doğrultudan bağımsız olarak belirlenmektedir (Bai ve diğ. 1994). Dane oriyantasyonları ile boşlukların uzanım doğrultuları ise doğrultu tarifi gerektirmektedir. Bunun yanında üç boyutlu olarak silt ve kum danelerinin oriyantasyonlarını belirlemek oldukça güçtür. Pratikte tercih edilen yöntem ise iki boyutlu olarak düşey ve yatay kesitlerden alınan görüntülerin birlikte analiz edilmesiyle üçüncü boyutun tahmin edilmesi şeklindedir (Kuo ve diğ. 1998). Kinetik yapı ise danelerarası temas noktalarına etkiyen kuvvetlerin ve bu kuvvetler altında temas normali doğrultusunda ve ona dik olan kayma doğrultusundaki gerilmelerin hesaplanması yoluyla belirlenir. Pan ve Dong (1999), granüler zeminin mikro-mekanik açıdan yapısını tanımlamak üzere yeni bir yöntem öne sürerek, çeşitli mikroskop görüntülerinin de yardımıyla teorik olarak gerilme bağımlı, elastik bir model oluşturmuştur. Bu model, anizotropik bir malzemede elastik dalga yayılımına dayanarak granüler zeminlerin geometrik ve kinetik yapısının belirlenmesine çalışmaktadır. Ayrıca, granüler zeminin sahip olduğu geometrik yapıyı fiziksel olarak temsil edebilecek; temas normal vektörü ve bağlantı vektörü olarak iki büyüklük tanımlamışlardır.

Rothenburg ve Bathurst (1992), Oda ve diğ. (1985), doğal ortamda akarsu havzalarında taşınarak çökelen zeminlerin oluşturduğu yapının, ortamın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kuo ve diğ. (1998) ise, dane oriyantasyonlarının, temas normallerinin ve boşluk genişliklerinin belirlenmesiyle zemin yapısını tarifleyen yapı tansörlerinin oluşturulabileceğini söylemişlerdir. Bu tansörler; serbest uzanım tansörü, yüzey alanı tansörü ve porozite tansörü olarak üçe ayrılmaktadır. İki boyutlu olarak hesaplanan bu tansörler, daha sonra eksenel simetri kabulüyle üç boyutlu yapı tansörüne genişletilir. Tekrarlı veya statik yükleme sonrası yapı değişimi ise araştırmalarda önemli bir yer tutar. Bunun için

zeminin mikroyapısının, yükleme öncesi ve yükleme sonrasındaki durumunun danesel bazda ve özel numune hazırlama teknikleriyle incelenmesi gerekir. Aynı şekilde geometrik olarak dane oriyantasyonlarının ve boşluklu yapının belirlenmesi de gereklidir.

Killerde ise mikroyapı, kil minerallerinin oluşturduğu tabletler ve bu tabletlerin birbirleri arasında suyunda etkisiyle oluşan elektriksel çekim kuvvetlerine bağlıdır. Paralel ve rastgele doğrultuda yerleşime sahip kil tabletlerinin kayma mukavemetleri de farklı değerlerdedir. Örneğin, kaolin kilinde partiküller, yassı plakalar halinde bulunarak, çoğunlukla kenar-kenar yerleşimine sahiptir. Yük altında killerde meydana gelen büzülme ve yükün kalktığı durumda oluşan şişme sonucu meydana gelen deformasyonlar, kil minerallerinin türüne ve oluşturdukları tabletlerin dizilim şekline bağlıdır (Bai ve Smart, 1997). Dickson ve diğ. (1978), normal konsolide kaolin kilinde yaptıkları drenajlı üç eksenli deneylerin sonrasında yapıda meydana gelen değişimi optik ve elektron mikroskobu görüntüleriyle araştırmışlardır. Buna göre, pik öncesi kaolin kilindeki deformasyonlar dane oriyantasyonlarında önemli bir değişim olmadan oluşmaktadır. Kil grupları arasındaki boşluklarda bir miktar azalma olurken, grup içi boşluklar değişmemektedir. Kil tabletlerinin durumu değişmezken, pik sonrası kil numunesi göçmeye uğradığında bu tabletlerde ilerleyen göçme oluşmadan ani kırılmalar olduğu belirtilmiştir.

Kil tabletlerinin yapısını incelemek için hazırlanan numuneler, öncelikle Carbowax 6000'e ve plastik veya Vestopal isimli maddeye doyurulmaktadır (Smart, 1967). Kullanılan bu maddeler, zemin suyunun yerini alarak boşlukları doldurmakta ve danesel yapı ile boşlukların birbirinden ayrılarak belirlenmelerini sağlamaktadır. Daha sonra bu numunelerden *ince kesit* örnekler çıkarılarak, mikroskop görüntüleri alınır.

Dane şekil ve boyutunun, dane oriyantasyonlarının ve boşluklu yapının görüntü analizleriyle belirlenmesi yöntemi son yıllarda birçok araştırmacı tarafından benimsenmektedir (Bai ve diğ. 1994). Buna göre zemin yapısının durumu, sahip olduğu anizotropi ve kırılma düzleminin şekli, çeşitli mikroskop görüntülerinden yapılan analizlerle belirlenmektedir. Bu çalışmada bu analiz yöntemi, kullanılan optik mikroskoptan elde edilen görüntüler üzerinde uygulanmıştır.

Smart (1985), polarize ışık kullanarak yaptıkları mikroskop incelemelerinde, hazırladıkları ince kesit zemin numunesi yüzeyine verilen ışığın şiddetinin en büyük ve en küçük değerinden zeminin anizotropisini, kil plakalarında meydana gelen değişimden çıkarmıştır. Ayrıca, zemin yapısına ait tutarlılık oranını, oriyantasyon derecesini ve oriyantasyon oranını

tanımlamıştır. Ayrıca Luo ve diğ. (1997), tutarlılık oranının hesabı için haritalama yöntemiyle her bir piksele ait gri renk değerini, o pikselin görüntüdeki koordinatına oranlamış ve vektörel bir toplam yaparak tutarlılık oranı yanında anizotropi indisini de belirlemiştir. Buna göre tutarlılık oranı 0 olduğunda *izotropik* bir yapı söz konusuysa, oranın 1'e eşit olduğu durumda *tam paralel oriyantasyon* olduğu söylenmektedir.

Smart ve diğ. (1992), yaptığı bir diğer çalışmada zemin mikroyapısını elektron ve optik mikroskop görüntülerinin analiziyle belirlemiştir. Görüntü analizinde gerekli olan algoritmalara bir yenisini ekleyen araştırmacılar, yaptıkları çalışmalarda, kenar-kenar diziliimli kaolin plakalarının yapısını mikroskop görüntülerinin analiziyle belirlemiştir.

Elektron ve yüzeysel ışık altı optik mikroskop görüntülerinden yola çıkılarak yapılan analizlerden, farklı kesitlerden alınan bir seri görüntüye ait *gri renk histogramları* çıkarılarak, görüntülerin sahip olduğu daneler anizotropi belirlenebilmektedir (Dudoignon ve Pantet, 1998). Buna göre, histogramın belirli bir yerinde keskin, tek bir tepe noktasına sahip görüntü, yatay yönde oriyantasyona sahip, aynı tip danelerden oluşan, üniform bir zemine aitken, birden çok sayıda keskin tepe noktalarına sahip görüntü, yataydan belli açıyla oriyente olan üniform danelerin oluşturduğu yapıyı göstermektedir. İdeal anizotrop ve üniform olmayan bir yapıya ait histogram ise belirli bir tepe noktası göstermeden yatayda sabit oluşmaktadır.

Dudoignon ve diğ. (2001), üç eksenli hücrede hazırladıkları kaolin numunelerinde normal ve aşırı konsolide durumda iki farklı deney serisi yapmışlar, deney sonuçlarını petrografik incelemelerle birleştirerek, makro ve mikro boyutta kaolin numunelerine ait göçme yüzeyinde dane yerleşimini belirlemiştir. Elektron ve optik mikroskop görüntülerinde matris içerisinde gri renk histogramının durumuna göre zeminin anizotropisi sayısal olarak 0 ile 1 arasında bir değerle hesaplanmıştır.

Bir başka yöntemde ise görüntü anizotropisi, zeminin sahip olduğu anizotropi olarak alınmaktadır. Buna göre mikrografiklerdeki zemin danelerinin yatayda, düşeyde, alt sol köşegen ve alt sağ köşegen doğrultularında sahip oldukları oriyantasyona ait piksel sayıları dikkate alınarak, A_0 , *anizotropi indisi* hesaplanır (Bai ve diğ., 1994). İndisin 0 olması ideal izotropik bir yapıyı gösterirken, 1 olması durumunda görüntünün anizotrop danelerden oluştuğu söylenebilir. Bu yöntemler aracılığıyla, yapıdaki değişim belli ölçüde belirlenebilmektedir. Ancak, analizi yapılan görüntülerin ele alınan zemindeki mikro yapıyı tamamıyla temsil ettiği ise kısmen yapılan kabuller arasındadır. En ideal yol, her zemin

numunesinden hazırlanan ince veya blok örneklerin birbirine dik üç düzlemdeki kesitlerinden sırasıyla aynı sayıda ve belli bir dönme açısını takip ederek alınan dijital görüntülerin teknolojik olarak gelişmiş, uygun görüntü işlemci programıyla analizlerinin yapılmasıdır. Çok sayıda analizden elde edilen ölçümlerin birbiriyle ilişkisi ise istatistik hesaplar sonucunda belirlenen tutarlılık oranıyla tespit edilir (Bai ve Smart, 1997). Ancak bu işlem uzun ve karmaşıktır. Öncelikle belli sayıda görüntünün analizleri değerlendirilerek, tüm ölçümler birarada yorumlanmalıdır. Daha sonra ise istatistik hesapları yapılır. Sonuçların tutarlılığı sağlanırsa, farklı kesitlerden alınan görüntülerle araştırma genişletilebilir. Tekrarlı ve statik yükler altında oluşan kayma deformasyonları sonucu yapıda meydana gelen değişim her farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarındaki numunelerden elde edilen ince kesit ve blok örneklerle incelenir.

Luo ve diğ. (1992), zemin kaba danelerinin otomatik analiz ile oriyantasyonlarını belirlemişlerdir. Bunun için resim önileme tekniği ile önce optik mikroskoplardan elde ettikleri görüntüleri düzenlemişler, sonra bu görüntüler üzerinde dışbükey kabuk yöntemiyle dane oriyantasyonlarını belirlemişlerdir.

Resim önileme tekniğini Bryant ve Davidson, (1996), ince ve kaba daneleri ve bunlar arasındaki boşlukları birbirinden ayırmak amacıyla kullanmıştır. Oda ve Kazama, (1998) ise, Toyoura kumuna ait kayma bandının ve bu yüzeye ait mikroyapının belirlenmesinde mikroskop ölçümlerinden ve X-ışını kırılma yöntemiyle elde ettikleri görüntülerden yararlanmışlardır.

Bowman ve diğ. (2001), farklı kum numunelerine ait danelerin şekillerini, elektron mikroskopundan aldıkları görüntülerle gruplandırarak, morfolojinin belirlenmesinde mikroskop görüntülerinin ve bu görüntülere ait resim analizinin önemine değinmişlerdir.

2.3.2 Zemin Yapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Koşullarında Değişimi

Zemin mekaniği'nde deneysel çalışmalar sırasında kullanılan ince daneli, kohezyonlu ve kaba daneli kohezyonsuz zeminlerin sahip oldukları yapı, üç fazlı ve daneli malzeme olan zeminlerin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışına doğrudan etkimektedir. Bu açıdan günümüzde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerine yapılarının etkisini belirlemek üzere çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu bölümde, yapılan bu araştırmalardan örnekler sunulmaktadır.

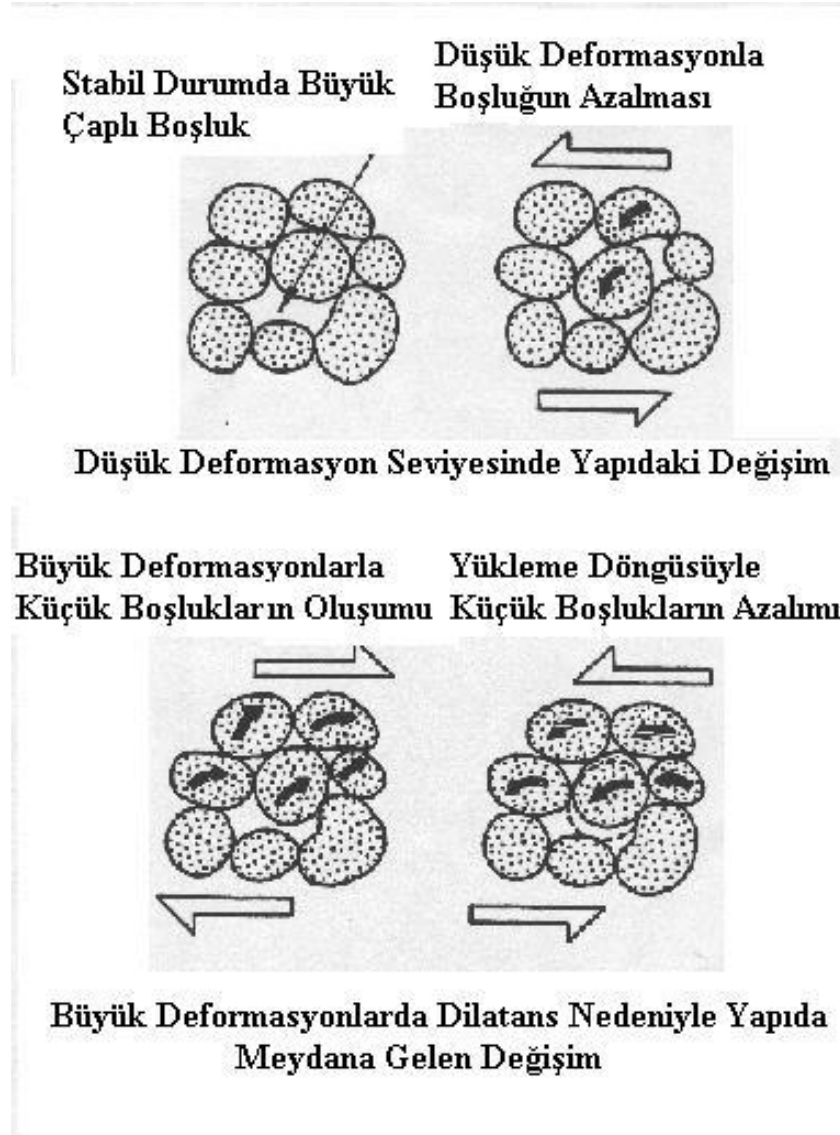
Farklı efektif gerilmelerde konsolide edilen ince daneli zeminlerde yapı değişimleri meydana gelmektedir. İzotropik konsolidasyon öncesindeki mevcut zemin yapısı, konsolidasyon sonrasındakine göre oldukça farklı olmaktadır. Laboratuvarda çeşitli yöntemlerle hazırlanan numunelerin oluşturduğu yapı, konsolidasyon öncesi daha gevşek ve belli ölçüde anizotropikken, konsolidasyonla birlikte azalan poroziteye de bağlı olarak yönlendirilmiş ve izotrop bir yapı oluşabilmektedir. Bai ve Smart, (1997) kaolin kilinden hazırladıkları numunedeki yapı değişimini incelemişler, birim kayma deformasyonu ile dane oriyantasyonlarındaki sapmayı ölçmüşlerdir. Statik deney sonuçlarından, tercih edilen oriyantasyonun düşük deformasyon seviyesinde kayma yüzeyine paralel doğrultuda olduğu, artan deformasyonlarla bu doğrultuda fazla bir değişim oluşmadığı ortaya çıkmıştır. Örselenmemiş zeminlerde ise genellikle yatay doğrultuda bir oriyantasyon oluşmaktadır. Ancak farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarıyla bu oriyantasyonda bir değişim meydana gelebilmektedir (Dudoignon ve diğ. , 2001).

Youd (1977), tekrarlı yüklemenin granüler zeminler üzerindeki etkisine değinmiştir. Buna göre kumlarda yüklemeyle birlikte dilatans nedeniyle oluşan hacimsel deformasyona bağlı olarak yeniden bir yerleşim olmaktadır. Bu yeni dane düzeni ise boşluklu yapıyı etkilemektedir. Düşük deformasyon seviyelerinde kum daneleri arasında oluşan küçük çaplı boşluklar, deformasyonlar arttıkça yükleme döngüsüyle birlikte azalmaktadır. Bu da tekrarlı yüklemenin kum zeminin mikromekanizmasına olan etkisini göstermektedir (Şekil 2.32).

Cotecchia ve Chandler (1997), doğal kil zeminin statik kayma gerilmeleri altındaki göçme öncesindeki davranışına numune yapısının etkisini araştırmıştır. Araziden örselenmemiş olarak alınan doğal kil zemin ile laboratuvarda ödometre deney aletinde konsolide edildikten sonra yoğurularak üç eksenli deneyde kullanılan kil numuneleri arasında yapısal farklılık olduğunu belirten araştırmacılar, elektron mikroskobu görüntüleriyle örselenmemiş numunelerin oluşumları sırasında paralel tabletler halinde sıralandıklarını söylemişlerdir. Bunun yanında, laboratuvar numuneleri ise daha açık bir yapıya sahiptir. Rastgele oriyantasyona sahip bu numunelerin *petek* yapıda oldukları da belirtilmiştir.

Anson ve Hawkins, (1999), İngiltere'nin güneyinde, Cotswolds'da kayan bir şevden alınan zemin numunelerinden blok örnekler hazırlayarak, laboratuvarda yaptıkları kayma mukavemeti deneylerinden elde edilen kayma yüzeyine ait elektron mikroskobu görüntüleri almışlardır. Bu görüntülerin analizinden kayma yüzeyinin morfolojisini ve numunedeki mineral türü ve yapısının zemin mukavemeti üzerine etkisini belirlemişlerdir. Buna göre kalsit

içeriği ve kil mineralinin türü, arazide suya doymun durumdaki yapay şev zeminine ait kayma mukavemeti üzerinde önemli ölçüde etkilidir.



Şekil 2.32 Tekrarlı yüklemeler altında granüler zeminin yapısındaki değişim (Youd, 1977)

Nouguier-Lehon ve diğ. (2003), dane şeklinin granüler zeminlerin davranışına etkisini araştırmış, ele alınan kesitteki danelerin oriyantasyonlarının yerçekimi ve yükleme doğrultusuna göre değiştiğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca danelerin yuvarlaklığı arttıkça statik mukavemetlerinin de azaldığını belirtmişlerdir.

Kuganenthira ve diğ. (1996), üç eksenli kesme deneyinde yaptıkları deneylerde yapı anizotropisinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Sayısal verilerle tanımladıkları anizotropi değişimleri için eksenel ve radyal doğrultularda zeminin elektrik iletkenliğini belirlemişlerdir. Bu yöntemle izotropik konsolidasyon ve üç eksenli kesme sırasında

anizotropik yapı özelliği belirlenmektedir. Buna göre konsolidasyon ve üç eksenli çekme durumunda anizotropi azalırken, üç eksenli basınç durumunda anizotropi artmaktadır.

Wagg, (1990), farklı numune hazırlama teknikleri kullanarak yaptığı dinamik deneylerde numune yapısını, epoksi ile doyurduktan sonra hazırladığı ince kesitlerle incelemiştir. Üç orthogonal düzlemde dane temas noktalarında oriyantasyonları ölçmüştür. Buna göre kuru yağmurlama yönteminde düşey temas noktalarının sayısı en düşükken, ıslak sıkıştırmada en fazla bulunmuştur. Dinamik mukavemet açısından düşey temas noktaları daha fazla olan numunenin mukavemeti diğerlerine göre daha fazladır. Buna göre ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerin dinamik mukavemeti diğer yöntemlerle hazırlanan numunelere göre daha fazladır.

Mulilis ve diğ. (1977), boşluklu yapıyı açıklamak için “oluşum faktörü”nü tanımlamıştır. Buna göre oluşum faktörü, elektrolitin elektrik iletkenliğinin, elektrolite doyurulan numunenin iletkenliğine oranıdır ve bu oran arttıkça lineer olarak numunenin relatif sıkılığı artmakta, bu da farklı numune hazırlama yöntemleri dikkate alındığında, dinamik mukavemeti artırmaktadır.

2.4 Sonuç

Bu bölümde çalışma kapsamında faydalanan literatürdeki mevcut çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu çalışmalar iki ayrı kısımda toplanmıştır. Bunlar; zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvarda yapılan deneysel araştırmalarla, doğal zeminlerin yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan mikroskop incelemeleri ve teorik modellemelerden oluşmaktadır.

İlk kısımda çeşitli araştırmacıların laboratuvarda yaptıkları deneysel çalışmalarla, siltli kumların, kumlu siltlerin ve siltli killerin dinamik davranışları belirlenmiştir. Ayrıca deney sisteminin, yükleme koşullarının ve numune hazırlama yönteminin zeminlerin dinamik davranışına etkisi de araştırılan diğer konular arasındadır. Bunun yanında zeminlerin tekrarlı yükleme sonrası statik mukavemetlerinin belirlenmesinden de bahsedilmiştir.

İkinci kısımda, doğal zeminlerin çeşitli konsolidasyon ve yükleme koşulları altında yapılarında meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar anlatılmaktadır. Buna göre deney numunelerinden hazırlanan ince kesit ve blok örneklerle

optik ve elektron mikroskobu kullanılarak çeşitli büyütmelerde dijital görüntüler alınmaktadır. Sonra bu görüntüler farklı programlarla analizden geçirilerek zemin numunesinin mikroyapısının açıklanmasına yönelik sayısal büyüklükler belirlenmekte, ölçümlerin yapılmadığı durumda sözel ifadeler kullanılmaktadır. Bu açıdan öncelikle zeminlerin mikromekanizmasının belirlenmesinde uygulanan yöntemlerden bahsedilmiştir. Sonra bu çalışmanın kapsamı dahilinde olan optik mikroskobu incelemelerine ve görüntü analizlerine değinilmiştir. Daha sonra zeminlerin konsolidasyon ve statik ve tekrarlı yüklemeyle birlikte yapılarında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi üzerine yapılan araştırmalardan örneklerle bu bölüm tamamlanmıştır.

3. DENEY YÖNTEMİ, KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

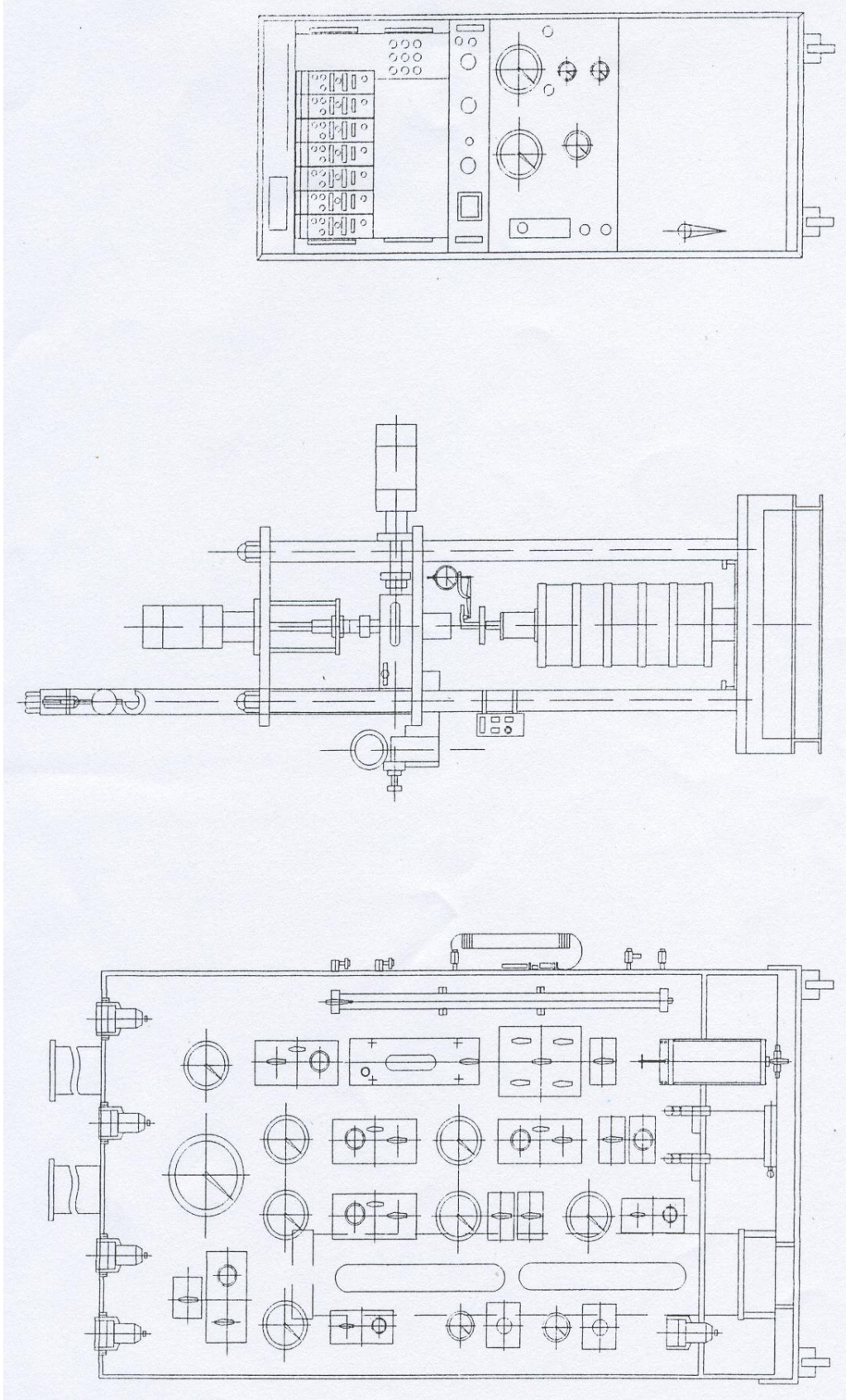
3.1 Giriş

Bu bölümde sırasıyla deney aleti ve numune hazırlama yöntemiyle deneylerde kullanılan örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinin özellikleri ve bu numunelerde oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerin hesap yöntemleri açıklanmaktadır.

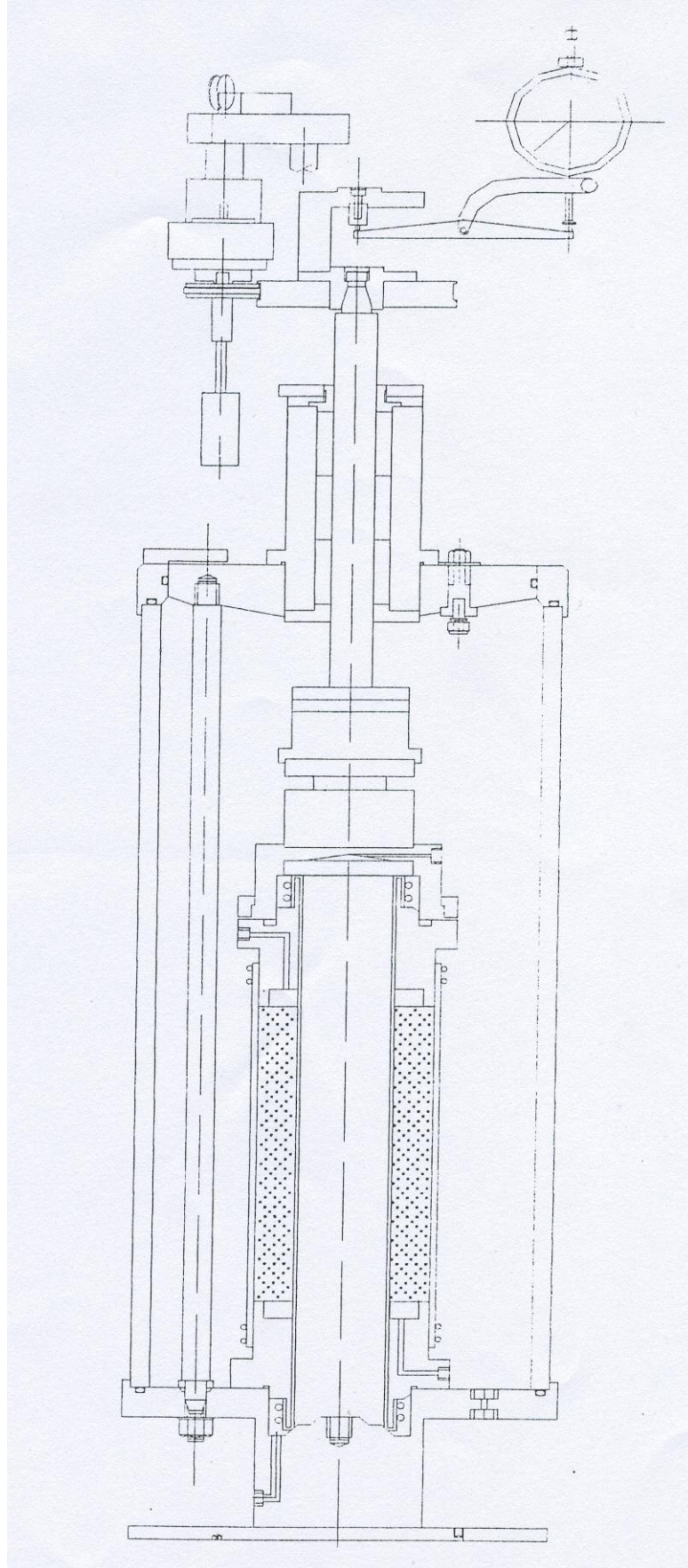
3.2 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Sistemi

Bu çalışma kapsamında statik ve dinamik deneyler, JICA projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilen içi boş silindirik burulmalı kesme deney aletiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi, düşey eksenel kuvvet F_z , burulma momenti T , iç hücre basıncı P_i ve dış hücre basıncı P_0 dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilmesinin yanı sıra; düşey eksenel yer değiştirme ΔH , burulma açısı $\Delta \theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_i ve numune hacim değişimi ΔV_s 'nin belirlenmesine olanak tanır. Burulma momenti istenilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda uygulanmaktadır. Düşey yük ve ters basınç ise hem dışarıdan elle hem de otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Bu deney aleti ile içi boş, silindirik numuneye drenajlı veya drenajsız şartlarda, izotropik ve anizotropik üç eksenli gerilme koşullarında, 0.01~10.00 Hz yükleme frekansı aralığında yük uygulanarak, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ile kayma mukavemeti özellikleri belirlenmektedir. Şekil 3.1'de dinamik burulmalı kesme deney aletinin genel görünüşü görülmektedir. Şekil 3.2'de ise içi boş silindirik deney numunesine ait düşey kesit görülmektedir. Ayrıca deney sistemindeki tüm gösterimler detaylı biçimde eklerde verilmiştir.

Genel olarak deney sistemi dört ana ünite ve bunları destekleyen yan ünitelerden oluşmaktadır. Esas üniteler sırasıyla; üç eksenli yükleme hücresi, düşey yük ve burulma momenti yükleme sistemi, hava-su kontrol ve uygulama birimi ve pnömatik



Şekil 3.1 Burulmalı kesme deney düzenine ait üç ünitenin detaylı gösterimi



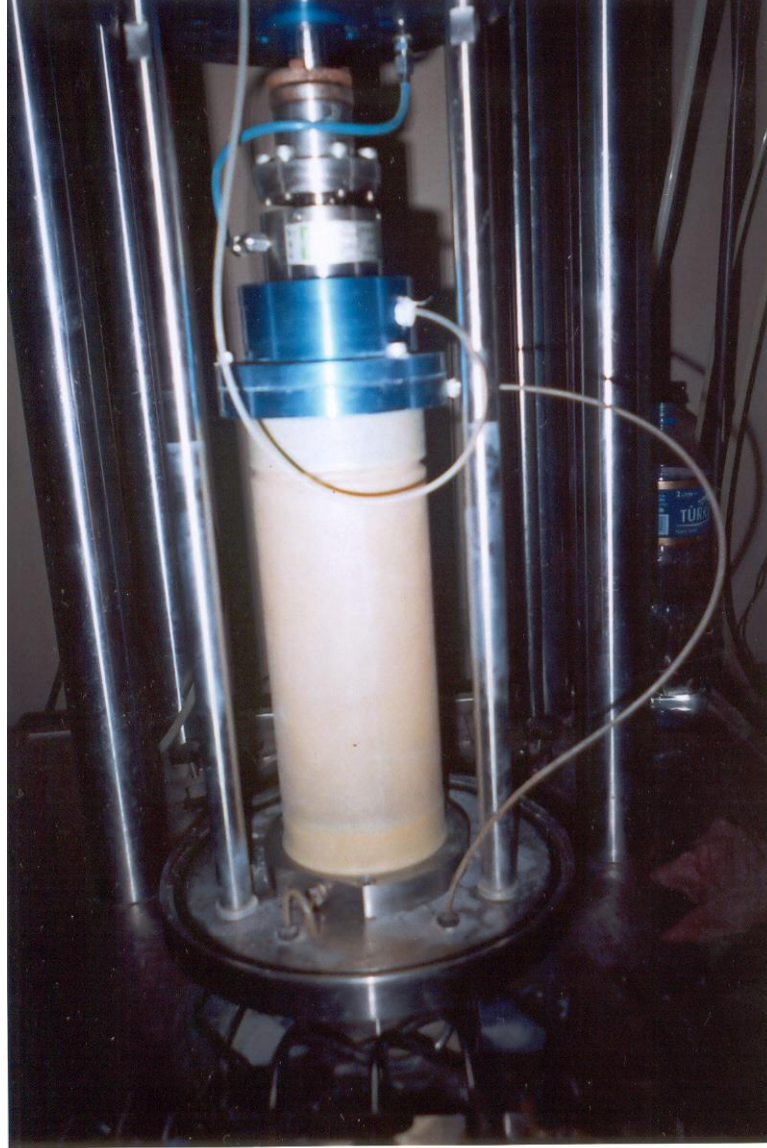
Şekil 3.2 Deney numunesine ait düşey kesitin görünümü

sinüzoidal yükleme ve veri edinim birimidir. Destek üniteleri ise mekanik ve otomatik birimlerdir ve hava, vakum ve su basınç sistemi ile elektrikli kontrol ve ölçüm sistemlerinden ibarettir.

Numunenin içinde bulunduğu üç eksenli deney hücresinin yapıldığı madde akriliktir ve numunenin etrafını saran damıtık suya 1 Mpa'a varan basınçlar uygulanmasına olanak tanır. Hücre, alt ve üst düzlemlere lastik conta ve vidalarla sıkıca sabitlenerek hava ve su sızıntısı engellenir. İçi boş silindirik numunenin vakumla tutulmuş hali Şekil 3.3'te görülmektedir. Numuneye düşey eksenel yük en fazla 200 kg, burulma momenti de en fazla 200 kg-cm olacak şekilde iki ayrı yükleme pistonu aracılığıyla uygulanır. Bu yüklemeler altında zemin numunesinde oluşan gerilmeler ise bir yük hücresi yardımıyla belirlenir. Burulma momenti, numuneye yatay piston aracılığıyla bir doğrultuda statik veya iki doğrultuda tersinir sinüzoidal şekilde, dinamik olarak iletilir. Numunenin dış yüzeyine uygulanacak basınç (p_0), hücreye verilen hava basıncının, dış kısma doldurulan damıtık su ile homojen bir şekilde numuneye aktarılması ile gerçekleştirilir. İç silindirik kısımda oluşturulmak istenen gerilme (p_i) ise suyla dolu olan iç kısma bağlı bir büret aracılığıyla elde edilir. Bu büretten iç hücre hacim değişimi (ΔV_i) ve büretin altına yerleştirilen bir basınç ölçerle de iç hücre basıncı (P_i) ölçülebilmektedir. Numuneye alt kısmından iki, üst kısmından bir olmak üzere üç drenaj hattı bağlanmıştır. Alt başlığa bağlı olan iki hat, özellikle kum numunelerde uygulanan CO_2 geçişinde, tüm numunelerde doygunluğun sağlanmasında kullanılan su geçişinde ve numuneye ters basıncın uygulanmasında kullanılırlar.

Konsolidasyon ve yükleme sırasında numunede meydana gelen hacim değişimi (ΔV_s) ise, drenaj hatlarının bağlı olduğu 100 ml'lik diğer bir büretle ölçülmektedir. Alt başlığa bağlı drenaj hatlarından birinin üzerine yerleştirilen basınç ölçerle de boşluk suyu basıncı (u), deney sırasında her aşamada ölçülebilmektedir. Üst başlığa bağlı olan hat ise, su geçirme ve konsolidasyon sırasında drenaj hattı olarak kullanılmaktadır.

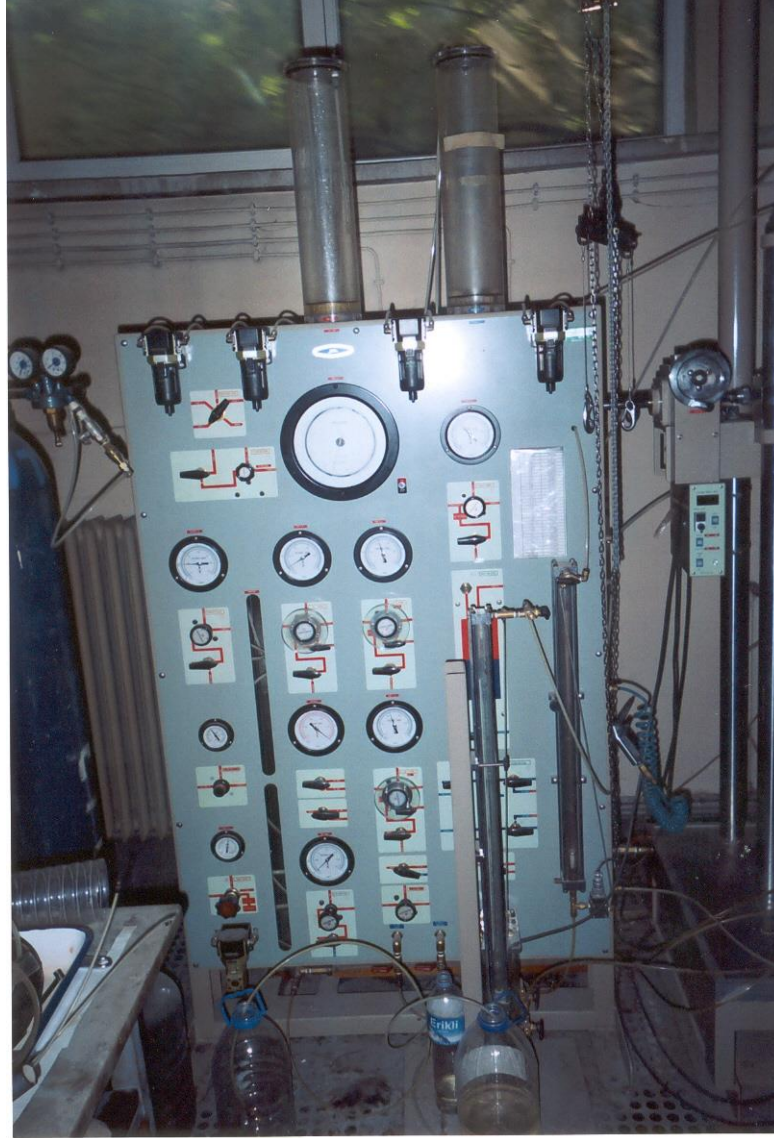
Deney süresince, düşey yük ve burulma momenti numuneye aynı anda iletildiği için meydana gelen sürtünme etkisini en aza indirmek amacıyla hava taşıyıcı sistemler kullanılmıştır. Düşey ve açısallık yer değiştirmeler, hücre dışına yerleştirilen ölçüm saatleri aracılığıyla ölçülür. Bu saatlerin hassasiyeti % 0.02 mertebesinde.



Şekil 3.3 Laboratuvarda hazırlanan içi boş silindirik deney numunesinin görünümü

Diğer bir ünite ise hava ve su kontrol ve uygulama birimidir (Şekil 3.4). Bu panel, numuneye doygunluğun sağlanması sırasında verilen damıtık suyun ve numune hazırlama sırasında uygulanan vakumun kontrol edildiği birimdir. Panel üzerindeki su ve hava basıncı ölçüm düzenekleri ve vanalar yardımıyla elle ayarlamalar yapılarak, yükleme hücresine iç ve dış çevre basınçları, ters basınç ve düşey eksenel basınç pnömatik olarak iletilmektedir. Deneyin son aşaması olan burulma momenti yüklemesine kadar tüm basınçlar bu birimden ayarlanır. Panel üzerinde ve arkasında yer alan su ve vakum tankları ile isteğe göre numunenin içine veya lastik

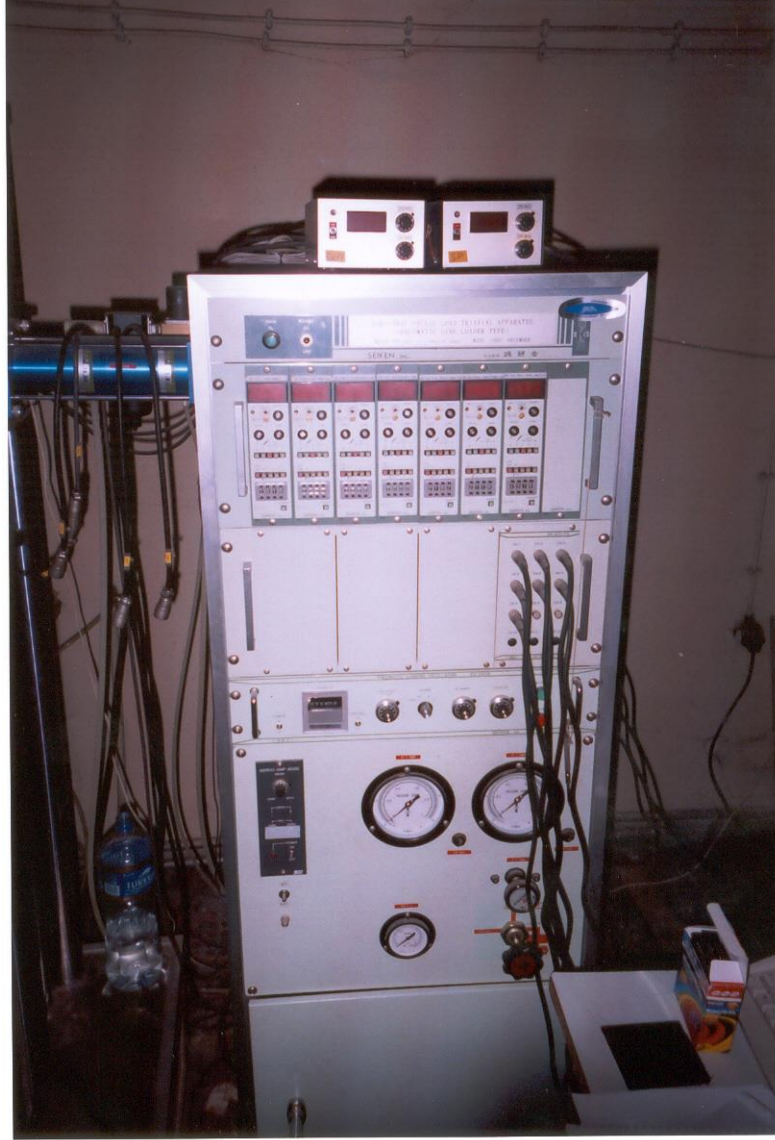
membranlarla sarılı dış kısmına su ve/veya vakum uygulanmaktadır. Ölçülen basınçlardaki hata oranı yaklaşık % 1 mertebelerindedir.



Şekil 3.4 Hava ve su kontrol ve uygulama birimi

Pnömatik sinüzoidal yükleme veri edinim birimi ise en son kesme aşamasında numuneye uygulanacak statik veya dinamik yüklerin frekans ve genliklerinin kontrol edildiği ünedir (Şekil 3.5). Bu ünite de deney sırasında ölçülüp ayarlanan düşey yük, burulma momenti, açısal yerdeğiştirme, düşey yerdeğiştirme, iç ve dış çevre basınçları ve boşluk suyu basıncının değerlerinin elektriksel olarak belirlendiği amplifikatörler bulunur. Seçilen kalibrasyona göre volt cinsinden okunan dijital değerler, deney sırasında, toplam dokuz kanalın bağlı olduğu “*data logger*” ile “*Labtec*” yazılımının yüklü olduğu kişisel bilgisayara aktarılır. Statik ve dinamik

yüklemeler istenen deney şartlarına göre gerilme ve deformasyon kontrollu olarak yapılabilmektedir. Ayrıca kontrol panelindeki düzenekler yardımıyla, numuneye uygulanacak dinamik yükün dalga özellikleri ve frekansı ayarlanabilmektedir.

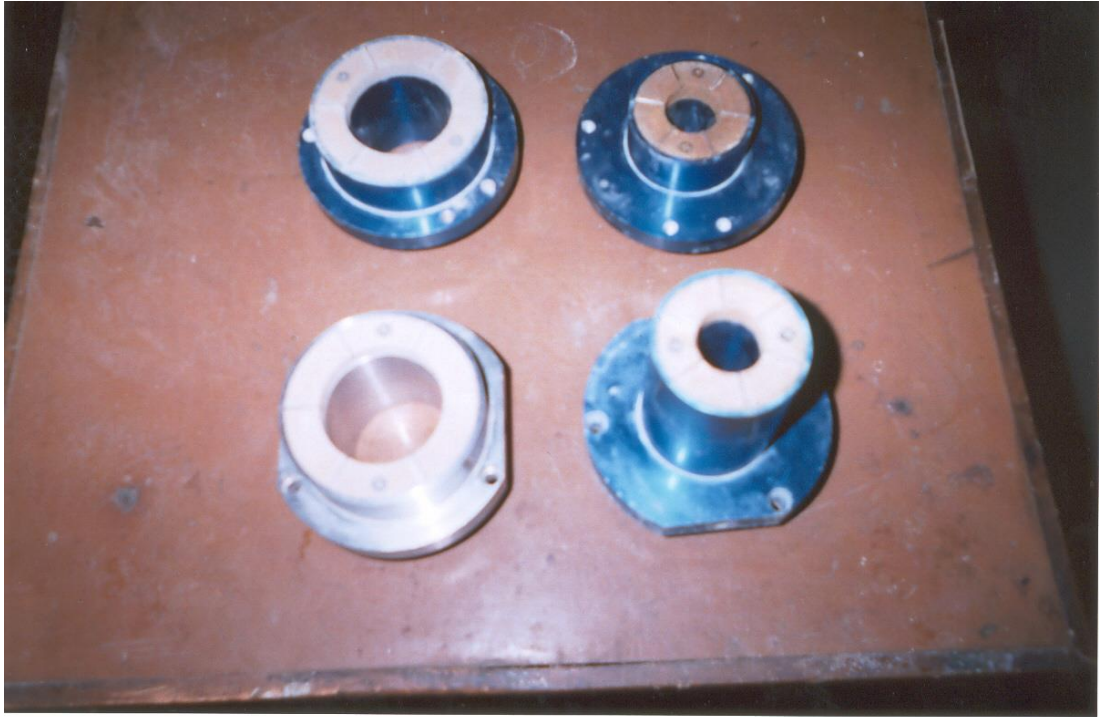


Şekil 3.5 Sinüzoidal yükleme veri edinim birimi

Bu esas ünitelerin yanında farklı tür ve boyutta numune hazırlanmasında kullanılan yardımcı aletler vardır. Bunlardan en önemlileri Şekil 3.6’da görülen alt ve üst başlıklardır. Hazırlanacak numunenin özelliğine göre iki farklı tip başlık seçilebilir. İçi boş silindirik numune örselenmiş olarak hazırlanacaksa, dış çapı 10.00 cm, iç çapı 6.00 cm olan başlıklar, örselenmemiş numunelerde ise dış çapı 7.00, iç çapı 3.00 cm olan başlıklar kullanılır. Başlıkların içerisinde, yaklaşık 1.00 cm kalınlığında poröz taşlar bulunur. Bu taşların üzerinde ise 6 adet 0.50 mm kalınlığında metal bıçak ara

mesafeleri aynı olacak şekilde düzgünce yerleştirilmiştir. Bu bıçaklar, numune kesilinceye kadar, numune üst yüzeyi ile başlık arasındaki kaymayı önleyerek, burulma momentinin numuneye aktarılmasını sağlarlar. Poroz taşlar ise konsolidasyon sırasında drenaj yolunu belirlemek ve drenajın hem alt hem de üst başlıklara doğru olmasını sağlamak amacıyla kullanılır. Ayrıca burulma momentinin numuneye daha etkin iletilmesini sağlamak amacıyla pürüzlü olarak yapılmışlardır.

Deneyde kullanılan bir diğer yardımcı alet, numune hazırlama sırasında, numune iç ve dış kısım yan yüzeylerinin düzgün bir yapıya sahip olmasını sağlamak amacıyla kullanılan iç ve dış kalıplardır (Şekil 3.7). Bu kalıplarla sabitlenmiş iç ve dış lastik membranların arasında oluşan boş bölmeye doldurulan toz numunelerin, numune hazırlama işlemi sona erene kadar düzgünlüğünü korumaları için, dış kalıba 20 kPa civarında bir basınçla vakum uygulanmaktadır.



Şekil 3.6 Farklı çaplardaki alt ve üst başlıklar



Şekil 3.7 İç ve dış kalıplar

3.3 Numune Hazırlama Yöntemi ve Kullanılan Numunelerin Özellikleri

3.3.1 Numune Hazırlama Yöntemi

Deneylerde hazırlanan numuneler, örselenmiş ve örselenmemiş olmak üzere iki türdür. Örselenmiş numuneler, araziden alındıktan sonra laboratuvarda dane dağılımı belirlenmiş ve en büyük dane çapının No:40 eleğin altında kaldığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan örselenmiş numuneler farklı plastisite indisine sahip kumlu ve killi silt ve düşük plastisiteli siltli kil numunelerdir.

Dinamik burulmalı kesme deney aletinde iç yarıçapı 1.50-3.00 cm dış yarıçapı 3.50-5.00 cm ve yüksekliği yaklaşık 14.00-20.00 cm boyutlarında hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde deney yapılabilir. Numune içeriden ve dışarıdan boyutlarına uygun 0.3 mm kalınlığında lastik membranlarla çevrilmiştir. Membranların üst ve alt kısımları geçirimsizlik için lastik conta ve bantlarla sıkıca sarılmaktadır.

Bir grup zemin numunesi laboratuvarda 3.00 iç yarıçapında, 5.00 cm dış yarıçapında ve 20.00 cm yüksekliğinde, kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Bu yöntemde iç ve dış membranlarla çevrili 20 kPa basıncında vakum uygulanarak

tutulan kalıpların arasına toz numune çapı belirli ince bir borudan, numune yüksekliği referans alınarak doldurulmaktadır. Bu çalışmada doldurma işlemi dört tabaka halinde gerçekleştirilmiş, her tabakanın kuru birim hacim ağırlığı sabit tutulmuştur.

Laboratuvarda örselenmiş numune hazırlama sırasında farklı yöntemler uygulanabilmektedir. Bunlar arasında en çok uygulananlar, kuru yağmurlama, kuru depolama, ıslak sıkıştırma, suda çökeltme, şişleme, düşük frekanslı titreşim, vibrasyonlu titreşimdir. Bu yöntemlerin seçiminde, numunenin tür ve özellikleri, deney aletinin sınır koşulları ve deneyin yapılış amacı önemli yer tutar. Farklı yöntemlerle hazırlanmış aynı tür numuneler üzerinde yapılan deneyler birbirinden oldukça farklı sonuçlar verebilmektedir (Tatsuoka ve diğ., 1986b). Bu çalışmada kuru yağmurlama yöntemi kullanılmış, numunelerin yerleşim sıklıkları, dış kalıba karşılıklı dört yönden eşit şiddet ve sayıda vuruş yapılarak oluşturulan düşük frekanslı titreşim ile sağlanmıştır.

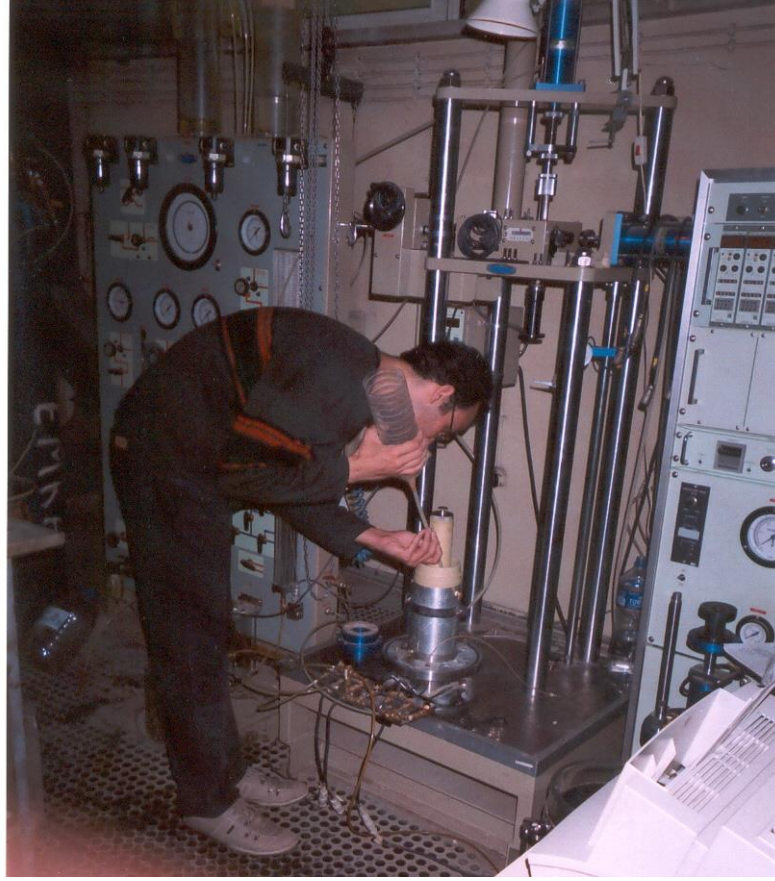
Bu çalışmada uygulanan numune hazırlama yöntemi, Japonya Geoteknik Enstitüsü (JGS) tarafından yayınlanan standartlara (JGS 0543 2000) uygun olarak yürütülmüştür. Bu yöntem aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır:

1. Öncelikle vakum uygulanarak, en az iç ve dış hücrelere alınacak ve numune içerisinden geçirmeye yetecek miktarda damıtık su, su tanklarına doldurulur.
2. Alt başlığa iç membran, uygun çaptaki lastik contalar yardımıyla monte edilir ve başlık vidalar yardımıyla yerine yerleştirilir. Alt drenaj boruları, alt başlığa takılır ve anahtarla sıkıştırılır. İç membrana dört parçadan oluşan iç kalıplar yerleştirilir ve hepsi birden silindirik metal çubukla sabitlenir. Alt başlığın poroz taş kısımlarına eşit boyutta poroz kağıtlar kesilerek yerleştirilir ve kağıtların doygunluğu suyla sağlanır. Sonra dış membran uygun çaptaki lastik contalarla alt başlığa takılır ve dışına iki dış kalıp birbirine kenetlenecek şekilde monte edilir. Dış kalıplar iki farklı metal vidayla sıkıştırılan kelepçeyle birbirine bağlanır. Kelepçe, anahtarla iyice sıkıştırıldıktan sonra dış membran üst tarafından dış kalıba bağlanır. Daha sonra yaklaşık 20 kPa basınçta vakum harici boru aracılığıyla uygulanarak, dış membran dış kalıba gerdirilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Dış kalıba vakum uygulayarak membranı gergin tutma

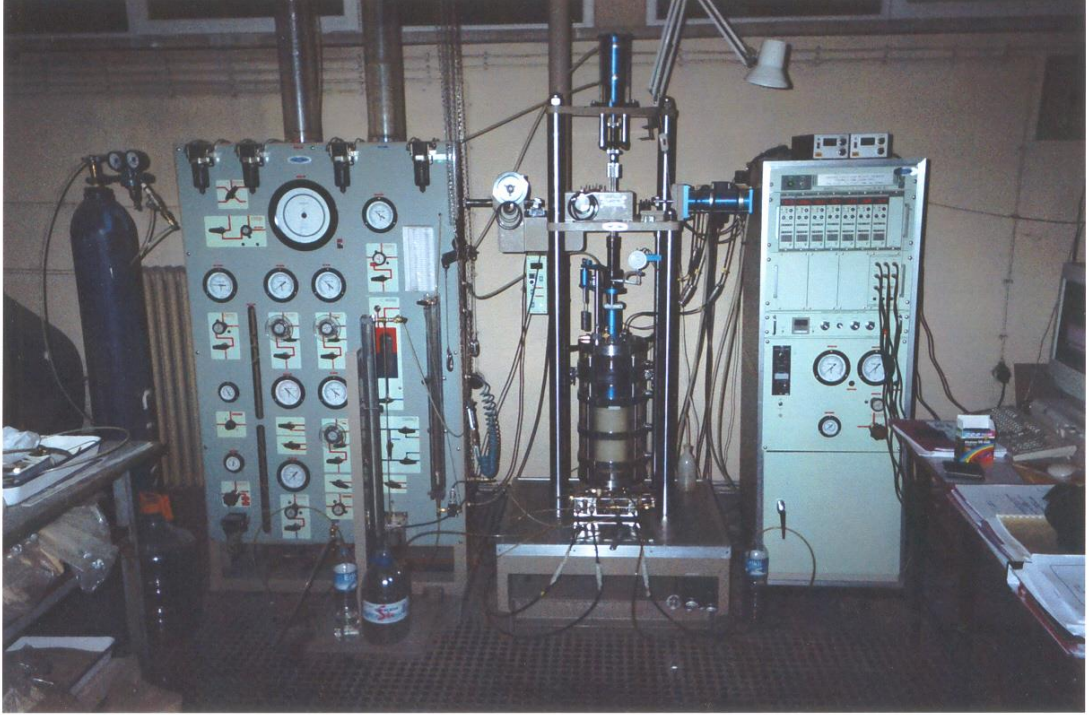
3. Böylece oluşturulan içi boş silindirik bölmeye önceden kurutulmuş toz numune istenilen kuru birim hacim ağırlığı sağlayacak şekilde Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, belirli bir yükseklikten ve çapı sabit ince bir borudan dökülecek şekilde doldurulur. Yeterince düzgün ve homojen bir dağılımın sağlanması amacıyla doldurma işlemi hem saat yönünde hem de saatin tersi yönünde dolanarak yapılır. Toz numunenin ağırlık kaybının oluşmaması nedeniyle dış kalıba silindirik metal tabak yerleştirilir. Numune doldurma işlemi bu çalışmada dört tabaka halinde yapılmış, her tabakanın kuru birim hacim ağırlığı sabit tutulmuştur. Doldurma işlemi bittikten sonra, numune üst yüzeyi pürüzsüz yatay bir metal veya benzeri cisimle düzlenir. Önceden suya doymuş poroz kağıtları takılmış olan üst başlık, bıçakları numuneye girecek şekilde dikkatlice yerleştirilir ve üst drenaj borusu üst başlığa takılır.



Şekil 3.9 Kuru yağmurlama yöntemiyle numunenin oluşturulması

4. Alt drenaj hattına bağlı boru çıkartılarak yerine harici vakum borusu takılır. Vakum borusunun diğer ucu da vakum ana vanasına takıldıktan sonra alt drenaj vanaları açılır ve dış kalıba uygulanan 20 kPa değerindeki vakum, numune alt başlığına verilmiş olur. Bundan sonra numune kendisini dış kalıplar olmadan da tutabilmektedir. O yüzden dış kalıba vakum uygulayan harici boru çıkartılır.
5. Harici tripot, üç ayak boşluğuna denk gelecek şekilde dikkatlice yerleştirilir ve düşey yükleme başlığı üst başlıktaki vida yerlerine karşı gelecek şekilde indirilir. Vidalar, numune üst yüzeyinde ilave düşey yük ve burulma momenti etkisiyle aşırı deformasyon meydana getirmeyecek şekilde sıkıştırılır. Tripodun üç ayağı vidalarla iyice sıkıştırılarak hücre dışına verilen suyun sızması engellenir.

6. Dış kalıplar yerinden sökülür ve numune boyu ve dış çapı, yükseklik boyunca en az üç farklı yerden ölçülür ve kaydedilir. Sonra hücreyi oluşturan akrilik üç eksenli hücre yerine dikkatlice yerleştirilir ve üst metal başlığıyla tripoda kalın vidalarla sabitlenir.
7. Düşey ve açısız deformasyon ölçüm saatleri yerlerine yerleştirilir ve yükleme şaftına tam olarak degecek şekilde sıfırlanır. İlgili kanallara ait kablo bağlantıları yapıp, hava basıncı borusu da takıldıktan sonra kalibrasyon işlemine geçilir. Elektrikli amplifikatördeki 7 kanal sırasıyla sıfırlanır. Kalibrasyon sırasında okunan volt değerleri istenen katsayıyla çarpılmak üzere ayarlanır. Bu çalışmada bu katsayı değerleri 5 volta göre belirlenmiştir.
8. Düşey basınç bir miktar artırılarak düşey yük yükleme barı, yükleme başlığına yaklaştırılır ve değdiği yerden vidalarla sabitlenir. Yine bu işlem sırasında da numuneye ilave düşey yük ve burulma momenti uygulanmamasına özen gösterilir. Daha sonra düşey yük sıfırlanır ve iç kısmın tamamı, dış kısmın da numune üst başlığına gelecek şekilde hücre suyla doldurulur. Sonra 20 kPa değerine getirilir. Bu sırada numuneye su sızıntısının olup olmadığı kontrol edilir ve harici vakum borusu çıkartılarak yerine drenaj borusu bağlanır.
9. Basınçların ayarlandığı panelden ilgili vanalar birbiriyle ilişkilendirilir ve numuneye kendi hidrolik yüküyle alt başlıktan geçecek şekilde damıtık su geçişi sağlanır. Şekil 3.10'da su geçişi sırasında deney sistemi görülmektedir. Numunenin ıslanıp ıslanmadığı dışarıdan çıplak gözle veya tanktaki su seviyesindeki azalmayla kontrol edilir. Su geçirme işlemi numune doygunluğunun sağlanması içindir ve üst başlıktan su çıkana ve numune, yüksekliği boyunca tamamen ıslanana kadar devam eder. Bu süre hava boşluklarının konumu ve numunenin permeabilitesine göre 1 saatten, 3 güne kadar değişebilmektedir. Bu işlemle numunenin tüm hava boşluklarının suyla dolmasına çalışılır.



Şekil 3.10 Deney sisteminin görünümü

10. Su geçirme işleminin ardından numuneye, ilgili vanalar birbiriyle ilişkilendirilerek kademeli olarak ters basınç uygulanır. Numune türüne göre değişebilen değer ve sürelerde ters basınç uygulanabilir.
11. Doygunluğun kontrolü için drenaj vanaları kapatılarak ters basınç değeri 0.50 artırılırken, elektronik göstergeden boşluk suyu basıncı değerindeki artış miktarı gözlenir. Skempton B parametresi olarak adlandırılan artış miktarlarının oranının 0.96 ve üzeri olduğu anda doygunluğun sağlandığı söylenebilir.
12. Bundan sonra izotropik veya anizotropik olarak uygulanan konsolidasyon aşamasına geçilir. İzotropik konsolidasyon için iç ve dış çevre basınçları istenen efektif gerilme seviyesine kadar eş zamanlı olarak artırılır ve bu sırada düşey yükün de aynı seviyede artması için Tablo 3.1’de belirtilen oranlara dikkat edilir. Anizotropik konsolidasyon içinse düşey yük ve çevre basınçları istenen anizotropi ve efektif gerilme değeri dikkate alınarak artırılır. Bu çalışmada tüm deneyler izotropik şartlarda yapılmıştır. Konsolidasyon işlemi hacim değişiminin ölçüldüğü büretlerden ve düşey

deformasyon saatlerinden takip edilerek istenen bir süre boyunca devam ettirilir. Bu süre bazı deneylerde 3, çoğunlukla 1 gün olarak uygulanmıştır.

Örselenmemiş numunelerin hazırlanması ise daha farklıdır. Araziden sondajlarla alınan 7.5 cm çapında ve yaklaşık 50.0 cm yüksekliğindeki örselenmemiş tüp (shellby) numuneleri, laboratuvarında dış çapı 7.0 cm, iç çapı 3.0 cm ve yüksekliği yaklaşık 14.0 cm olacak şekilde içi boş, silindirik numuneler haline getirilir. Bunun için numuneler önce aynı boyutlardaki metal kalıba yerleştirilir ve ortası, keskin, metal delici yardımıyla sabit hızda oyulur. Burulma yoluyla oymaya numunenin iç çapı yaklaşık 3.0 olana kadar devam edilir. Daha sonra numunenin etrafına ıslak poroz kağıtlar sarılır ve vakumla, numune dışına boyutlarına uygun lastik membran geçirilir. Numune, alt ve üst yüzeyine de poroz kağıtlar takıldıktan sonra alt başlığa bağlı iç membrandan geçirilir ve hücreye yerleştirilir. Bundan sonraki aşamalar örselenmiş numunedekine benzemekle birlikte farklılık örselenmemiş numuneye su geçişi olmamasında ortaya çıkmaktadır. Hücre içine ve dışına su alındıktan sonra, örselenmemiş numuneye kademeli olarak yavaşça ters basınç uygulanır. Daha sonra belirli zaman aralıklarında B kontrolü yapılır ve drenaj vanaları açıldıktan sonra iç ve dış çevre basınçları yavaşça artırılır. Aynı anda düşey basınç da çizelgedeki (Tablo3.1) uygun değerine getirilir. Böylelikle numune izotropik konsolidasyona bırakılmış olur.

Tablo 3.1 Burulmalı Kesme Deneylerinde İzotropik Gerilme Durumunda Çevre Basıncı ve Ters Basıncın Değişme Oranları

Çevre										
Basıncı	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
(kPa)										
Düşey										
Basıncı	1.15	2.3	3.45	4.6	5.75	6.9	8.05	9.2	10.35	11.5
(kPa)										

Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından numunelere dinamik deneylerde farklı gerilme oranlarında burulma momenti uygulanmıştır. Bunun için veri edinim amplifikatörünün ve 7 ayrı kanalın bulunduğu panelden dinamik yük vanası açılır ve göstergeler kontrol edilir. Daha sonra istenen frekans ve gerilme genliği seçilir. Dinamik burulma momentinin uygulanacağı yatay yük hücresi düşey yük hücresine yaklaştırılır ve yuvarlak vidayla bağlanır. Kişisel bilgisayarda gerekli komutlar girildikten sonra “Labtec” programı çalıştırılır ve deneye başlanır. Statik deneylerde ise hızın etkisini incelemek amacıyla numuneler bir seri deneyde 0.35-0.5 ve 0.75 mm/dak sabit deformasyon hızlarında kesilmiştir. Diğer statik deney serilerinde ise yalnızca 0.5 mm/dak hızı uygulanmıştır. Bunun için mekanik yük uygulama birimi çalıştırılır ve istenen deformasyon hızı ayarlanır. Yatay burulma momenti uygulama halkası düşey yük hücresine mekanik olarak yaklaştırılır ve yuvarlak vidayla bağlanır. Deney serilerinden ileride ayrıntılı olarak bahsedilecektir. Şekil 3.11’de hazırlanmış numunenin deney sonu hali görülmektedir.



Şekil 3.11 Hazırlanmış numunenin son hali

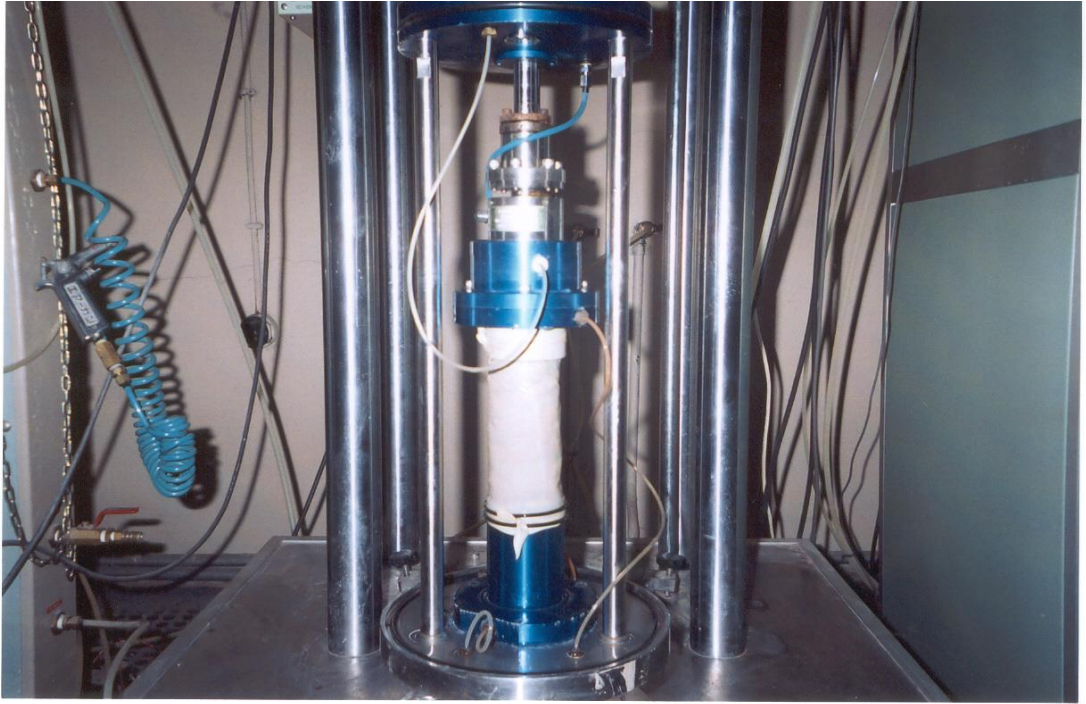
Bu çalışmada laboratuvarda yukarıda anlatılan yöntemle hazırlanan numunelerin yanısıra, orta kısımlarının yükseklik boyunca aynı çapa sahip olacak şekilde oyulması suretiyle hazırlanan örselenmemiş numuneler de kullanılmıştır (şekil 3.12). şekil 3.13'te örselenmemiş numunelerin orta kısımlarının oyulmasında kullanılan alet görülmektedir. Alt ve st başlıklarla tutularak tripota bağlanmış olan örselenmemiş numunenin görüntüsü şekil 3.14'te görülürken, şekil 3.15a ve 3.15b'de ise örselenmemiş numunenin deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



şekil 3.12 örselenmemiş numunelerin deneye hazırlanması



Şekil 3.13 Örselenmemiş numunenin orta kısmının oyulmasında kullanılan aletler



Şekil 3.14 Örselenmemiş numunenin alt ve üst başlıklarla tutulu hali



Şekil 3.15a Örselenmemiş numunenin düşey görünümü



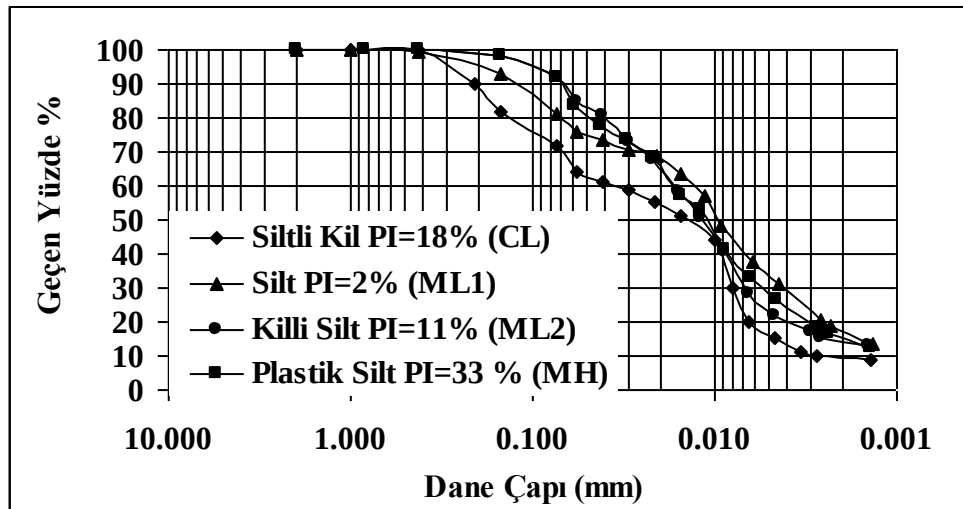
Şekil 3.15b Örselenmemiş numunenin yatay görünümü

3.3.2 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Endeks Özellikleri

Bu çalışmada hem örselenmiş hem de örselenmemiş zeminlerle deneyler yapılmıştır. Örselenmiş zeminler Adapazarı şehir merkezinde ve İstanbul Gümüşdere Köyü'nde açılan muayene çukurlarından 3.0-4.0 m derinliklerden alınmıştır. Adapazarı'nda Ozanlar ve Pabuççular Mahalleleri'nden ve İstanbul Gümüşdere Köyü'nden alınan numunelerin endeks özellikleri Tablo 3.2'de görülmektedir. Tabloda görülen tabii ve kuru birim hacim ağırlıkları, Gümüşdere numunesi için serbest basınç deneyi'nden elde edilen değerleri gösterirken, diğer değerler de burulmalı kesme deneyi'nde hazırlanan laboratuvar numunelerine aittir. Bu numunelerin granülometri eğrileri ise Şekil 3.16'da görülmektedir.

Tablo 3.2 Deneylerde Kullanılan Örselenmiş Numunelerin Endeks Deney Sonuçları

Geldiği Yer	Kuyu No	W_N %	W_L %	W_P %	I_P %	İnce Dane %	Kum %	Kil %	Silt %	e_{max}	e_{min}	γ_n (kN/ m ³)	γ_{kc} (kN/ m ³)	γ_s (kN/ m ³)	Grup
Gümüşdere	M ₆	20	40	22	18	72	28	12	60	1.25	0.72	21.2	18.1	2.55	CL
Ozanlar	1	41	28	26	2	81	19	16	65	1.56	0.87	17.8	14.5	2.67	ML
Ozanlar	2	13	39	28	11	92	8	11	81	1.28	0.95	15.3	13.4	2.62	ML
Pabuççular	3	43	70	37	33	92	8	12	80	1.86	1.01	15.4	13.2	2.68	MH



Şekil 3.16 Deneylerde kullanılan örselenmiş numunelerin granülometri eğrileri

Bu çalışma kapsamında örselenmiş toz numunelerin yanında ortası oyularak hazırlanan örselenmemiş numuneler de kullanılmıştır. Deneye hazırlanan örselenmemiş numuneler, İzmir-Aydın Otoyolu projesi dahilinde Çiğli Kavşağı Mevkii'nde ve Adapazarı'nda DSİ Merkez Binası yanında açılan sondajdan alınmıştır. Sondajlarda belirlenen zeminlerin laboratuvar deneyleri sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir. Örselenmemiş numunelere ait endeks özellikleri Tablo 3.4'tedir. Şekil 3.17'de ise bu numunelerin granülometri eğrileri görülmektedir.

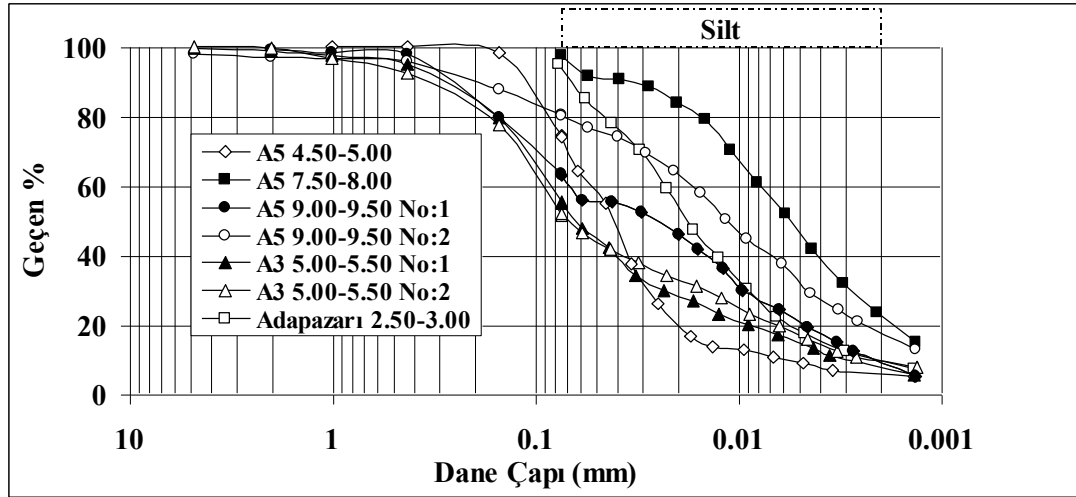
Tablo 3.3 Örselenmemiş numunelerin alındığı sondajlardaki zeminlere ait endeks özellikleri

Derinlik (m)	W _N %	W _L % 105 ⁰ C	W _L % 60 ⁰ C	W _{Lk} %	W _P %	I _P %	İnce Dane %	Kum %	Kil %	Silt %	Grup
İzmir Çiğli A3 Sondajı											
5.00-5.50	35	31	Y.N.	22	9	55	45	9	46	CL	
5.50-5.95	42	45	43	45	30	15	97	3	27	70	ML
7.50-7.95	49	48	Y.N.	32	16	94	6	21	73	ML	
12.00-12.45	51	56	Y.N.	37	19	98	2	26	72	MH	
15.00-15.45	41	37	47	44	27	10	76	24	14	62	ML
16.50-16.95	38	42	44	47	30	12	90	10	22	68	ML
İzmir Çiğli A5 Sondajı											
3.00-3.45	41		Non-Plastik				49	51	5	45	SM
4.50-5.00	25	33	Y.N.	26	7	74	26	6	68	ML	
6.00-6.45	47	34	39	44	28	6	60	40	10	50	CL-ML
7.50-8.00	43	55	Y.N.	37	18	98	2	24	74	MH	
9.00-9.50	32	34	Y.N.	26	8	63	37	11	52	ML	
12.00-12.45	47	40	52	47	32	8	85	15	16	69	CL-ML
18.00-18.45	42	47	51	55	35	12	89	11	15	74	ML
24.00-24.45	55	65	64	74	39	26	99	1	26	73	MH
Adapazarı DSİ Civarı											
1.50-1.95	32	48	Y.N.	30	18	90	10	2	88	CL	
3.00-3.45	52	38	Y.N.	24	14	90	10	3	87	CL	
4.50-4.95	10	50	Y.N.	30	20	40	60	2	38	SC	
6.00-6.45	15	NP	Y.N.	NP	NP	45	55	4	41	SM	
7.50-7.95	9	NP	Y.N.	NP	NP	38	62	6	32	SM	
9.50-9.95	33	50	Y.N.	30	20	38	62	6	32	SM	

Not: YN, gösterimi yetersiz numuneye, NP ise plastik olmayan numuneye karşı gelir.

Tablo 3.4 Deneylerde kullanılan örselenmemiş numunelerin endeks deney sonuçları

Geldiği Yer	Kuyu No	Derinlik (m)	W _N %	W _L %	I _p %	İnce Dane %	Kum %	Kil %	Silt %	γ_n (kN/m ³)	γ_{k0} (kN/m ³)	γ_{kc} (kN/m ³)	Grup
İzmir	A5	4.50-5.00	25	33	7	74	26	6	68	20.1	16.1	16.9	ML
İzmir	A5	7.50-8.00	43	55	18	98	2	24	74	17.0	14.0	14.8	MH
İzmir	A5	9.00-9.50	32	34	8	63	37	11	52	18.9	13.0	14.4	ML
İzmir	A5	9.00-9.50	21	31	5	80	20	18	62	16.9	13.9	14.6	ML
İzmir	A3	5.00-5.50	35	31	9	55	45	9	46	18.4	13.6	14.4	CL
İzmir	A3	5.00-5.50	35	31	6	52	48	10	42	18.5	13.7	14.0	ML
Adapazarı	1	2.50-3.00	40	37	13	95	5	10	85	18.8	13.4	13.9	ML



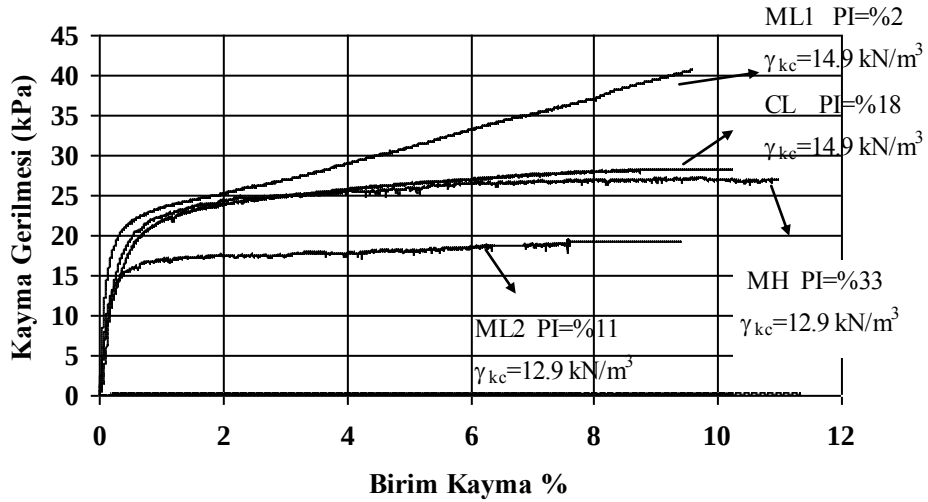
Şekil 3.17 Örselenmemiş numunelerin granülometri eğrileri

3.3.3 Numunelerin Statik Mukavemetlerinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında laboratuvarında hazırlanan numunelerin statik mukavemetleri burulmalı kesme deney aletinde 0.50 mm/dk sabit deformasyon hızında yapılan deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca, plastisite indisi % 18 olan Gümüşdere numunesi kullanılarak, 0.35-0.50-0.75 mm/dk deformasyon hızlarında statik deneyler yapılmış, yükleme hızının gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi araştırılmıştır.

Şekil 3.18, 3.19 ve 3.20’de laboratuvarında hazırlanan killi silt ve siltli kil numunelerinin statik deney sonuçları görülmektedir. Deney sisteminin mekanik

olarak izin verdiği % 10 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan deneylerde, plastisite indisi % 2 olan silt numunesinin statik mukavemeti diğer numunelere göre daha yüksek çıkmaktadır (Şekil 3.18). Buna göre bu numunede birim kaymanın % 10 olduğu andaki kayma gerilmesi değeri 42 kPa civarındadır. Burada sıkı kum zemine benzer davranış özelliği gösteren düşük plastisiteli silt zeminin, danelerarası sürtünmeden kaynaklanan mukavemetinin, zeminde kayma deformasyonları oluşukça etkili olduğu düşünülebilir. Ayrıca izotropik konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı 14.9 kN/m^3 olan silt numunesinin, 12.9 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlığa sahip daha yüksek plastisite indisi ($I_p = \%11-18$) siltli kil ve plastik silt numunelerine göre daha sıkı bir konumda olması da sonuçların farklılığı açısından dikkate alınmalıdır.

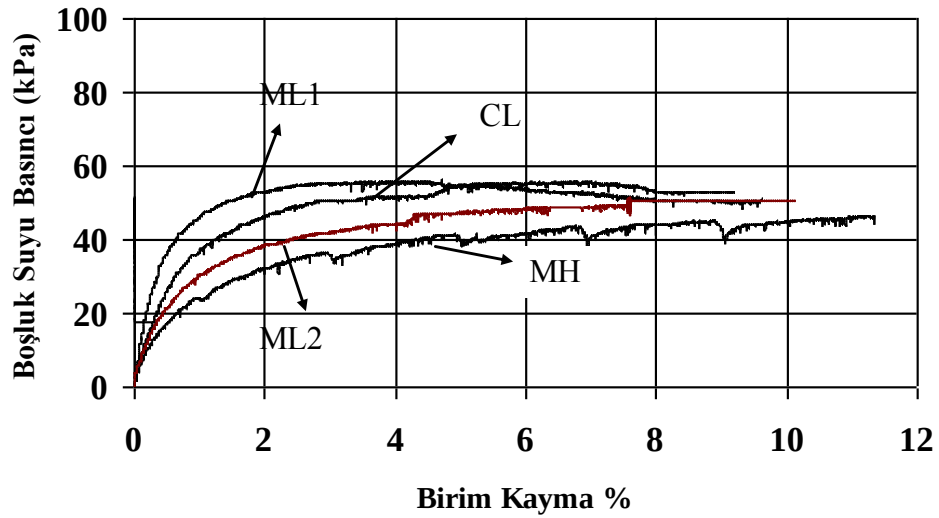


Şekil 3.18 Laboratuvar numunelerinin burulmalı kesme statik mukavemetleri

Diğer Adapazarı numunelerinin ($I_p = \%11$ ve $\%33$) göçme birim kayma deformasyonu seviyesi olarak alınan % 10'a karşı gelen statik mukavemetleri, plastisite indisiyle birlikte artmaktadır. Ancak % 18 plastisiteli Gümüşdere numunesi, %11-33 plastisiteli siltli numunelere göre daha yüksek mukavemete sahiptir. Bu seviye yaklaşık olarak 28.0 kPa değerindedir. Burada konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı 14.9 kN/m^3 olan Gümüşdere numunesinin sıkı konumda olmasının statik mukavemeti artırdığı görülmektedir. Ayrıca kum miktarının % 28 olması da statik mukavemeti artırıcı yönde etki etmiş olabilir. Plastik silt numunesinin statik mukavemeti ise daha düşük plastisiteli silt zemine göre yüksektir. Plastisite indisi %

11 olan siltli numunede ise göçme anındaki kayma gerilmesi değeri 20 kPa olarak en düşük seviyeye karşılık gelmektedir.

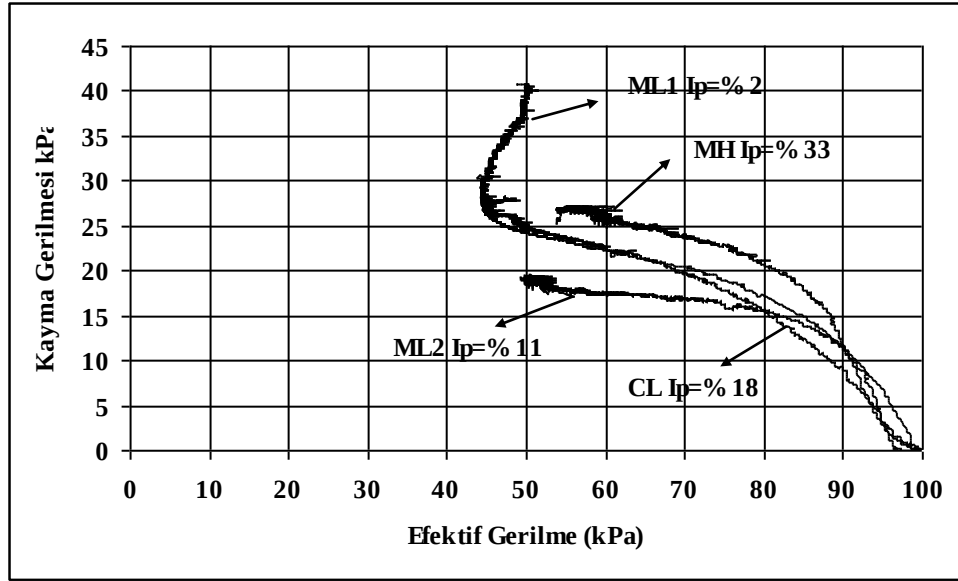
Genel olarak statik mukavemetlerde % 2 plastisiteli silt zeminin diğer numunelere göre daha yüksek mukavemetli olduğu görülürken plastisitesi düşük bir silt numunesi olmasına rağmen % 19 oranında içerdiği kum miktarının ve 14.9 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlığının, statik mukavemeti artırıcı yönde etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.19 Statik deneyden elde edilen boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkileri

Şekil 3.19'da görülen boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu ilişkisi, statik deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan laboratuvar numunelerine aittir. Buna göre grafikte, plastisite indisi % 2 olan silt numunesinde boşluk suyu basıncı % 5 birim kayma seviyesine kadar diğer numunelere göre yüksek çıkmaktadır (55 kPa). Boşluk suyu basınçları bu seviyeye ulaştıktan sonra artan birim kaymalarla birlikte bir miktar sönümlenmektedir. Diğer numunelere göre daha yüksek kum içeren (% 28) CL'de ise 0.50 mm/dk deformasyon hızında oluşan statik gerilmeler altında boşluk suyu basınçları, % 11-33 plastisite indisli silt numunelerine göre daha yüksek seviyededir. ML2 ve MH numunelerindeki kum miktarı % 8-19 dur. Silt numunelerinde oluşan boşluk suyu basınçları kendi içerisinde plastisite indisi dikkate alındığında uyumludur. Buna göre siltlerde plastisite indisi arttıkça statik deneyden elde edilen boşluk suyu basınçları % 8 birim kayma seviyelerine kadar azalmaktadır. Ancak göçme seviyesi olarak alınan % 10 birim kayma seviyesinde tüm

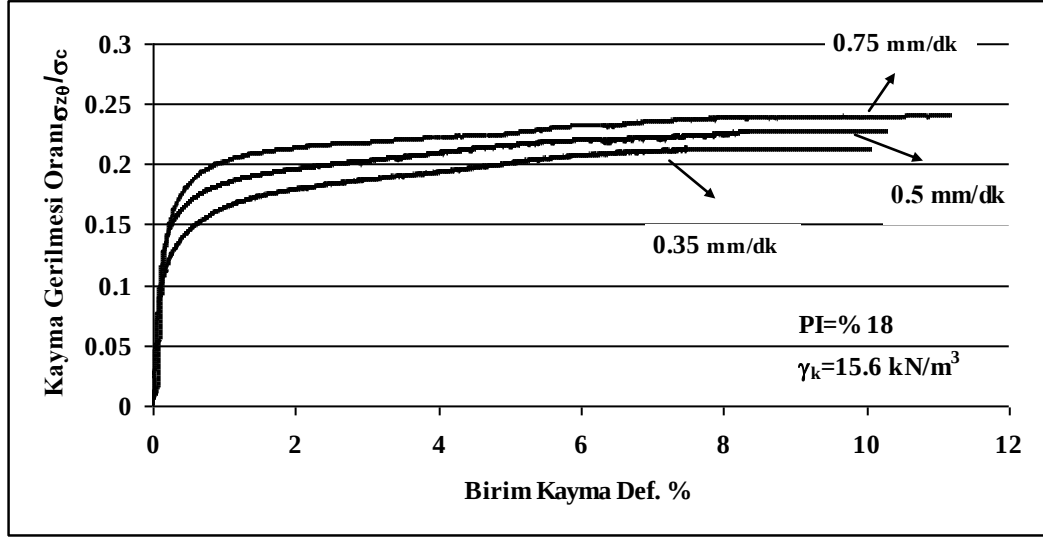
numunelerde nihai boşluk suyu basıncı yaklaşık 50 kPa değerindedir (Şekil 3.19). Statik deneylerden elde edilen efektif gerilme izleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



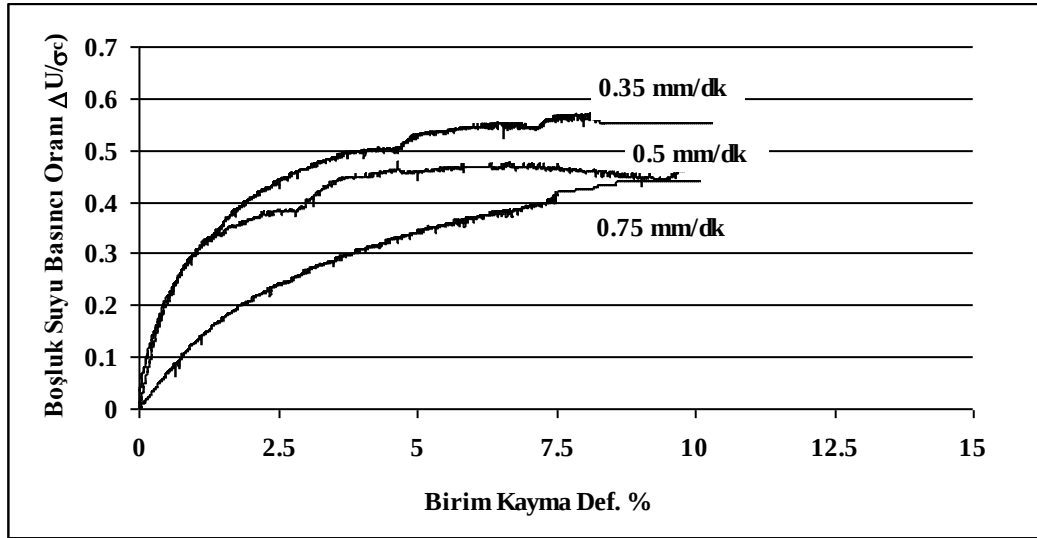
Şekil 3.20 Laboratuvar ortamında hazırlanan numunelerin statik burulmalı kesme deneyinden elde edilen efektif gerilme izleri

Statik deneylerde yükleme hızının etkisini araştırmak amacıyla 0.35-0.50-0.75 mm/dk hızlarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde, plastisite indisi % 18 olan Gümüşdere siltli kil numunesi kullanılmıştır (CL). Deney sonuçlarına göre, artan deformasyon hızlarında statik mukavemetler de artmaktadır (Şekil 3.21). Buna göre gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde belirli bir birim kayma deformasyonu seviyesine (yaklaşık ± 0.75) kadar artan kayma gerilmeleri, akmanın başlamasından sonra deformasyonlarla birlikte daha fazla artmayarak yaklaşık sabit kalmaktadır. Bunun yanında statik mukavemetlerin yükleme hızından etkilenmesinin nedeni, deney sırasında yüklemeyle birlikte numunede oluşan artık boşluk suyu basıncına bağlıdır. Daha yüksek hızlarda yapılan deneylerde tüm numune boyunca oluşan boşluk suyu basıncının doğrulukla ölçülebilmesi zorlaşmaktadır. Dinamik burulmalı kesme deney aletinde alt başlıktan ölçülen boşluk suyu basınçlarının, bütün numunede meydana gelen boşluk suyu basıncını gösterebilmesi için bir dengelenme süresine ihtiyaç vardır. Bu sürenin çok kısa olması durumunda, oluşan basınçların ancak belli bir kısmı ölçülebilmektedir. Sürenin çok fazla olması durumunda ise, meydana gelen boşluk suyu basınçları, zemin dane yapısında zaman bağlı akma olayından etkilenmektedir. Dolayısıyla boşluk suyu basınçları, düşük deformasyon hızlarında

yapılan statik yüklemeye göre daha düşük seviyelerde kalmaktadır (Şekil 3.22). Bundan dolayıdır ki, efektif gerilmelerdeki azalma yüksek deformasyon hızlarında daha az iken, deformasyon hızları düştükçe artmaktadır. Böylece statik mukavemetler de büyük deformasyon hızlarında daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 3.21 Deformasyon hızının statik mukavemete etkisi



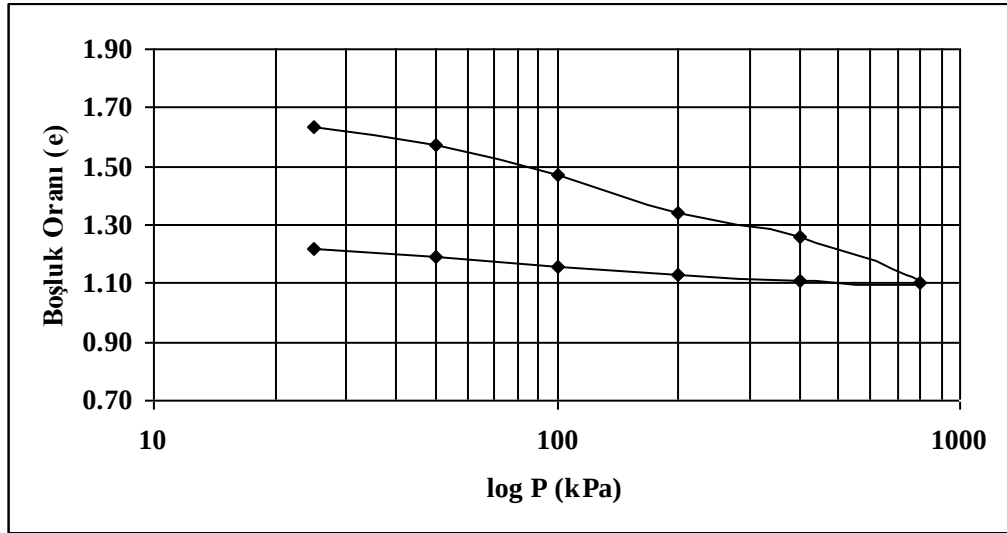
Şekil 3.22 Deformasyon hızının boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi

3.3.4 Yumuşak Silt Zeminin Konsolidasyon Özellikleri

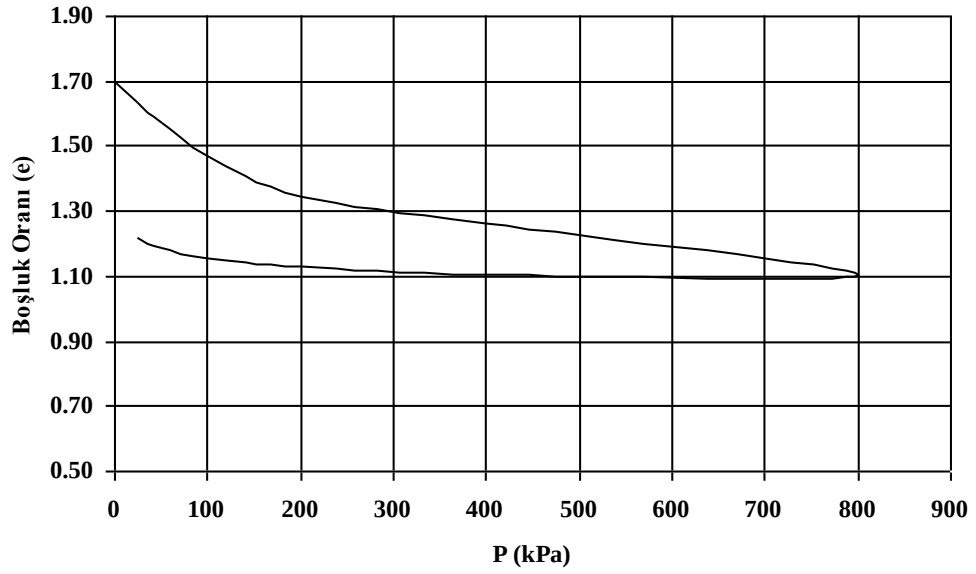
İzmir Çiğli'den getirilen örselenmemiş numunelerden A5 kuyusu 9.00-9.50 m derinliğinden alınan killi silt numunesinde kademeli yükleme konsolidasyon deneyi

yapılmıştır. Yük artımları 25-50-100-200-400-800 kPa şeklinde uygulanmış, her bir kademedeki oturmaların tamamlanması için 24 saat beklenmiştir.

Deneyde kullanılan örselenmemiş numunenin başlangıç su muhtevası % 45, doğal birim hacim ağırlığı 16.0 kN/m^3 olup boşluk oranı, 1.697 olarak hesaplanmıştır. Deney sonu su muhtevası ise % 42, doğal birim hacim ağırlığı 18.2 kN/m^3 , boşluk oranı da 1.22 dir. Şekil 3.23'te deneyden elde edilen e-logP, Şekil 3.24'te de e-P grafikleri görülmektedir. Numunenin ön konsolidasyon basıncı Casagrande yöntemiyle yaklaşık 130 kPa (Şekil 3.25), Janbu yöntemiyle yaklaşık 120 kPa (Şekil 3.26) ve Butterfield yöntemiyle de yaklaşık 90 kPa bulunmuştur (Şekil 3.27). Arazideki mevcut jeolojik yükü 144 kPa olan yumuşak silt numunesinin normal konsolide durumda olduğu ve konsolidasyonunu tamamlamadığı belirlenmiştir. Konsolidasyon deneyinden elde edilen bir diğer parametre ise hacımsal sıkışma katsayısı m_v dir. Ayrıca her basınç kademesi için boşluk oranındaki azalma ve sıkışma modülleri de Tablo 3.5' de belirtilen deney sonuçlarında görülmektedir. Tablo 3.6'da ise boşluk oranındaki değişim ve a_v katsayısının hesap adımları verilmektedir.

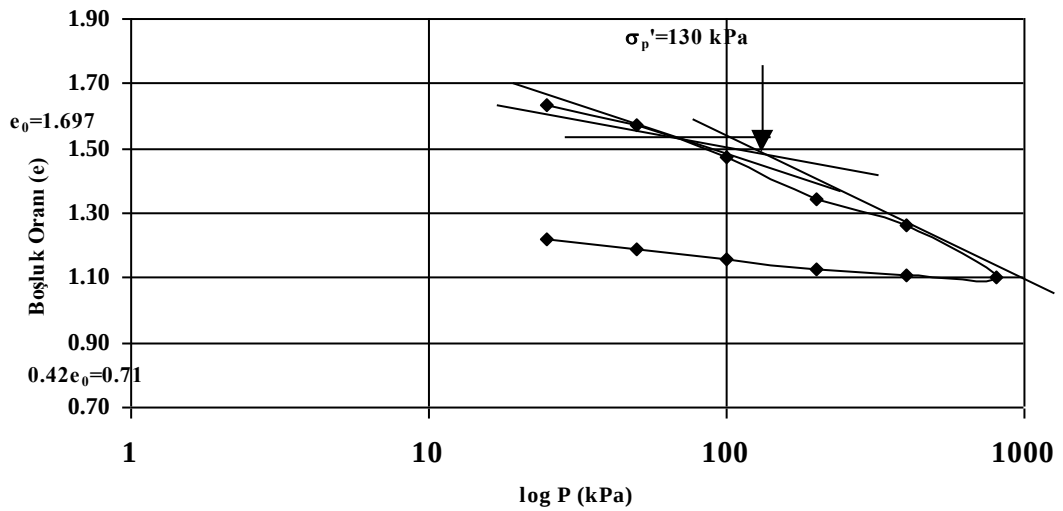


Şekil 3.23 Konsolidasyon eğrisi

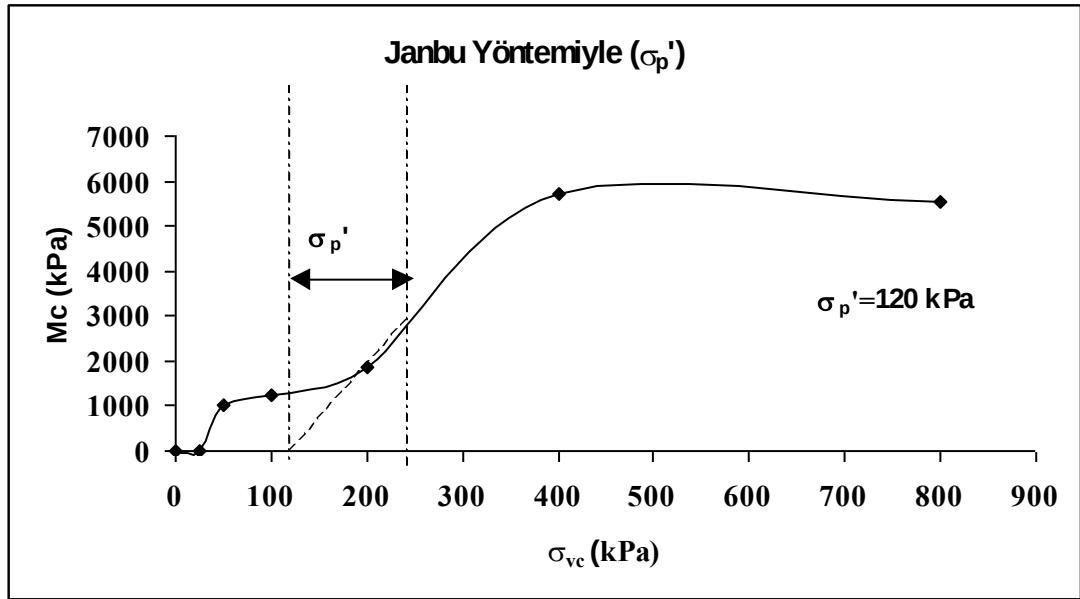


Şekil 3.24 Boşluk oranı-gerilme ilişkisi

Oturma-zaman ilişkisi konsolidasyon deneyinden elde edilebilecek ve örselenmemiş zeminin konsolidasyon özellikleri hakkında bilgi verebilecek önemli bir diğer bulgudur. Bu açıdan öncelikle zeminin konsolidasyon katsayısını (C_v) belirlemek gerekir. Her yükleme kademesi için karekök-zaman yöntemiyle konsolidasyon katsayısı değerleri hesaplanabilmektedir. Karekök-zaman yönteminde konsolidasyon

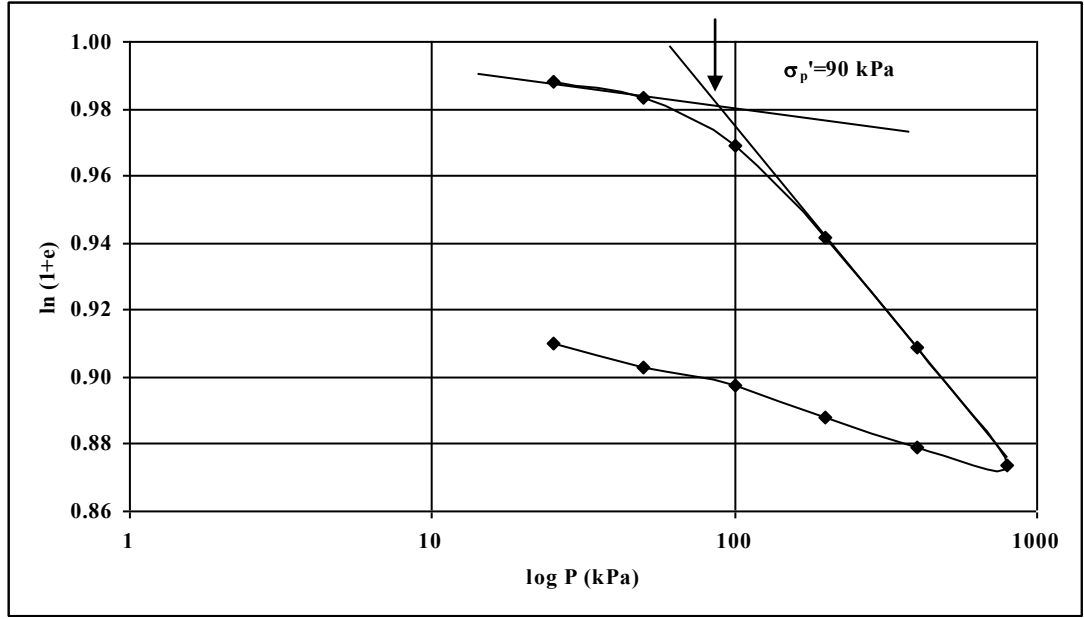


Şekil 3.25 Ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemiyle belirlenmesi



Şekil 3.26 Ön konsolidasyon basıncının Janbu yöntemiyle belirlenmesi

katsayısının bulunması laboratuvar deney sonuçlarının apsiste $t^{0,5}$ alınarak çizilen eğrinin kullanılması ile yapılır. Bu halde parabol olması gereken laboratuvar eğrisinin başlangıç kısmının doğru olarak görülmesi gerekir. Doğru olan bu kısmın uzatılarak ordinat eksenini kestiği yer düzeltilmiş basınç noktasını verir. Teorik eğri $t^{0,5}$ ölçeğine göre çizilirse $U=\%60$ oturma yüzdesi değerine kadar bir doğru olarak görülür. Bu doğru kısım uzatılır ve $U=\%90$ 'a tekabül eden hat ile kesiştirilirse elde olunan apsis, teorik eğri apsisinin $1/1.15$ katı olur. Daha sonra laboratuvar eğrisinin doğru kısmı uzatılır, düzeltilmiş orijinden geçen ve laboratuvar eğrisinin doğru olarak ortaya çıkan kısmına tekabül eden apsislerin 1.15 katı alınarak ikinci bir doğru çizilir. Bu doğrunun eğriyi kestiği nokta $U=\%90$ 'a tekabül eder. Buradan da t_{90} bulunur. Buna göre hesaplanan C_v değerleri, Tablo 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.27 Ön konsolidasyon basıncının Butterfield yöntemiyle belirlenmesi

$$T_v = C_v \cdot t / H_d^2 \quad (3.1)$$

denkleminde $U = \%90$ için $T_v = 0.848$ değeri kullanılarak $C_v = 0.848 \cdot H_d^2 / t_{90}$ elde olunur. Burada H_d cm cinsinden sıkışan tabaka kalınlığına karşı gelirken, t_{90} saniye biriminden olmalıdır. Şekil 3.28’de ise 25 kPa basınç kademesi için oturma-karekök zaman grafiği çizilmiştir. Grafikte Y, yaklaşım doğrusunu, U uzatılmış doğruyu, B ise birleştirilmiş doğruyu gösterirken, t_{90} değeri 3.61 olarak belirlenmiştir. Tablo 3.8’de tüm basınç kademeleri için başlangıç, primer ve sekonder konsolidasyon yüzdeleri belirtilmiştir. Buradan yumuşak siltli numunede önemli oranda sekonder konsolidasyon olduğu görülmektedir.

Tablo 3.5 Konsolidasyon deneyi sonuçları

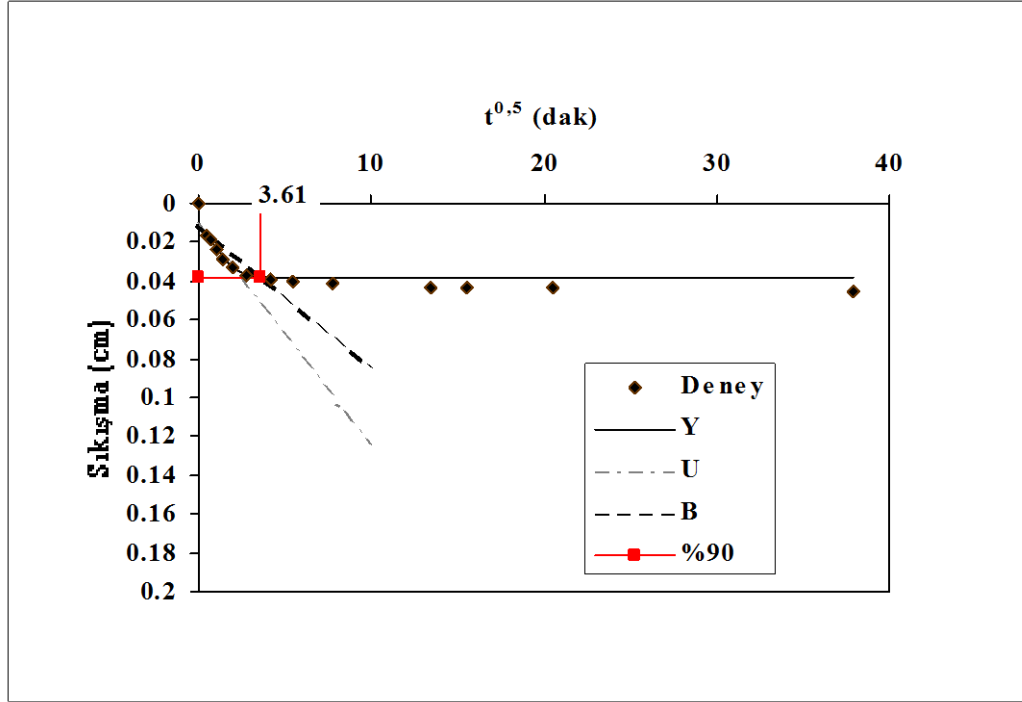
$\Delta H/H_0$	P	ΔH Sıkışma	$H_i - \Delta H$	ΔP	Δh H1-H2	H_{ort}	m_v	M_c
(%)	(kPa)	(mm)	(mm)	(kPa)	(mm)	(mm)	(1/kPa)	(kPa)
0	0	0	20.00	0	0	20.00	0	0
2.25	25	0.45	19.55	25	0.45	19.78	91	0.0
4.65	50	0.93	19.07	25	0.48	19.31	0.099	1010
8.36	100	1.67	18.33	50	0.74	18.70	0.079	1260
13.15	200	2.63	17.37	100	0.96	17.85	0.054	1860
16.14	400	3.23	16.77	200	0.60	17.07	0.017	5720
21.97	800	4.39	15.61	400	1.17	16.19	0.018	5550
21.86	400	4.37	15.63	400	-0.02	15.62	-	-
21.10	200	4.22	15.78	200	-0.15	15.70	-	-
20.00	100	4.00	16.00	100	-0.22	15.89	-	-
18.86	50	3.77	16.23	50	-0.23	16.11	-	-
17.78	25	3.56	16.45	25	-0.22	16.34	-	-

Tablo 3.6 Konsolidasyon deneyi sonuçları

P	ΔP	ΔH	Δh (H1-H2)			
(kPa)	(kPa)	(mm)	(mm)	Δe	e	a_v
0	0	0	0	0.000	1.697	0
25	25	0.12	0.12	0.011	1.686	0.043
50	25	0.255	0.14	0.012	1.674	0.048
100	50	0.69	0.44	0.039	1.635	0.078
200	100	1.48	0.79	0.071	1.564	0.071
400	200	2.4	0.92	0.082	1.482	0.041
800	400	3.37	0.97	0.087	1.395	0.022
400	400	3.225	-0.15	-0.013	1.408	-
200	200	2.98	-0.25	-0.022	1.430	-
100	100	2.72	-0.26	-0.023	1.453	-
50	50	2.57	-0.15	-0.013	1.467	-
25	25	2.365	-0.21	-0.018	1.485	-

Tablo 3.7 Taylor karekök-zaman yöntemiyle hesaplanan C_v değerleri

Yük kPa	25	50	100	200	400	800
t_{90} (dak)	3.61	3.66	3.29	4.06	4.68	5.53
C_v (cm^2/dak)	0.1335	0.1298	0.1607	0.103	0.079	0.055



Şekil 3.28 $P=25$ kPa basınç kademesi için oturma-karekök zaman grafiği
(Y=Yaklaşım, U=Teğet, B=Birincil)

Tablo 3.8 Her yük kademesi için başlangıç, primer ve sekonder konsolidasyon yüzdeleri

Yük kPa	25	50	100	200	400	800
R_i	0.26	0.20	0.005	0.17	0.13	0.29
R_p	0.60	0.58	0.065	0.63	0.57	0.49
R_s	0.14	0.22	0.93	0.20	0.43	0.22

3.4 Zeminde Oluşan Gerilme ve Şekil Değişikliklerinin Hesabı

Burulmalı kesme deney aletinde kullanılan numunelerde, deney sisteminin ve içi boş, silindirik numune özelliğinden dolayı uygulanan yüklemeler altında zeminde oluşan toplam ve efektif gerilmeler belli kabuller altında hesaplanmaktadır. Bunun için öncelikle, tüm numuneyi tam bir dairesel silindir ve deformasyona uğrayan tek bir eleman olarak düşünmek gerekir. Ayrıca gerilme ve şekil değişiklikleri, farklı yükleme koşulları altında numune yüksekliği boyunca değişeceğinden ortalama olarak hesaplanmaları gerekir. Şekil 3.30'da içi boş silindirik numunede oluşan gerilme bileşenleri görülmektedir.

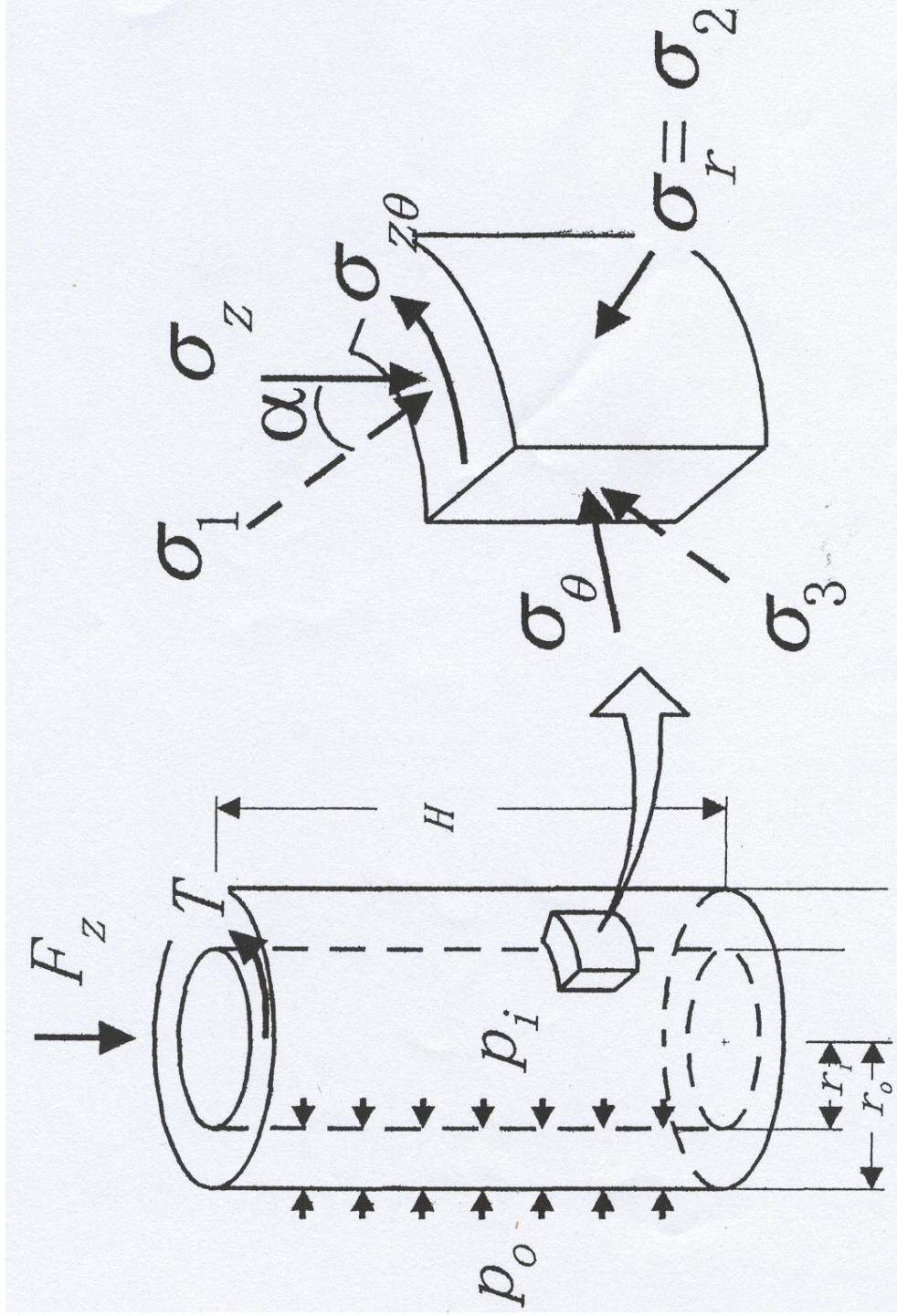
Gerilme dağılımının belirlenmesinde bir takım belirsizlikler söz konusudur. Polar koordinatlarda hesaplanan σ_r , σ_θ , σ_z ve $\sigma_{z\theta}$ 'nın belirlenmesi için yapılması gerekli kabuller şu şekilde sıralanabilir;

1. Düşey eksenel gerilme σ_z , üniform,
2. Çevre gerilmesi σ_θ ve radyal gerilme σ_r , lineer elastik,
3. Ortalama kayma gerilmesi $\sigma_{z\theta}$ ise elastik ve ideal plastik bir dağılım gösterir.

Ortalama düşey eksenel gerilme,

$$\sigma_z = \frac{P}{A_s} + z\gamma' + \Delta\sigma_z \quad (3.2)$$

şeklinde hesaplanır. P , numuneye gelen toplam eksenel yüke, A_s numunenin ortalama kesit alanına, z numunenin üst yüzeyinden itibaren yüksekliği boyunca olan düşey mesafeye, γ' numunenin efektif birim hacim ağırlığına, $\Delta\sigma_z$ ise membran düzeltme gerilmesine karşılık gelmektedir. Bu çalışmada membran penetrasyon etkisi göz ardı edilmiştir. Düşey eksenel yükün belirlenmesinde kullanılan yük hücresi, üç eksenli hücre içerisinde olduğu için, hesaplamada yükleme şaftının alanı dikkate alınmamaktadır. Ortalama efektif radyal ve çevre gerilmeleri ise sırasıyla;



Şekil 3.29 İçi boş silindirik numunede oluşan gerilme bileşenleri

$$\sigma_r = \frac{P_0 r_0 + P_i r_i}{r_0 + r_i} + \Delta\sigma_r \quad (3.3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_0 r_0 - P_i r_i}{r_0 - r_i} + \Delta\sigma_\theta \quad (3.4)$$

şeklinde hesaplanır. Bu bağıntılar Hight ve diğ., (1983) tarafından türetilmiştir. $\Delta\sigma_r$ ve $\Delta\sigma_\theta$ elastik ince kabuklar teorisine dayanan membran düzeltme gerilmeleridir. Lineer elastik ve ideal plastik dağılıma uyan ve numune yüksekliği boyunca sabit olduğu kabul edilen ortalama kayma gerilmesi;

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_0^2 + r_i^2)} \right\} + \Delta\sigma_{z\theta} \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanır. Yukarıdaki ifadelerde r_i ve r_0 numunenin son iç ve dış yarıçaplarını, T ise burulma momentini göstermektedir. (3.5) bağıntısındaki ilk kısım ideal plastik dağılımı, ikinci kısım ise lineer elastik ve izotropik bir malzemeyi temsil etmektedir. Küçük kayma gerilmesi ve deformasyon seviyelerinde lineer elastik dağılım en kabul edilebilir sonucu verdiği için ifadenin ilk kısmının kullanılması uygun olmaktadır. Bunun yanında göçme seviyesi civarında ideal plastik dağılım söz konusu olduğundan, ifadenin ikinci kısmının kullanılması uygun hale gelmektedir.

Ortalama şekil değiştirme bileşenleri, numunenin deney başındaki düzgün silindirik yapısını koruduğu kabulüyle, düşey eksenel yer değiştirme, ΔH , numunenin açısal sapması $\Delta\theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_s 'den hesaplanan iç ve dış yarıçap değişimleri Δr_0 ve Δr_i ve numunenin ilk yarıçapları r_0 ve r_i cinsinden hesaplanır. Ortalama şekil değiştirmeler aşağıdaki kabullere uygun olarak hesaplanmaktadır:

1. ΔH üniform eksenel yer değiştirmedir.
2. Numune yüksekliği boyunca lineer olarak değişen radyal yer değiştirme, u_r dir.

3. $\Delta\theta$, üniform açısal sapmaya karşılık gelir.

Bu kabuller altında ortalama şekil değiştirme bileşenleri; aksenal şekil değiştirme, ε_z , radyal şekil değiştirme artımı, ε_r , çevresel şekil değiştirme artımı, ε_θ ve kayma şekil değiştirme artımı, $\varepsilon_{z\theta}$, sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\varepsilon_z = -\Delta H/H_0 \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\left[\frac{r_0}{r_i} \int \frac{\partial U_r}{\partial r} r dr \right]}{\left[\frac{r_0}{r_i} \int r dr \right]} = -\frac{\Delta r_0 - \Delta r_i}{r_0 - r_i} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\left[\frac{r_0}{r_i} \int \frac{U_r}{r} r dr \right]}{\left[\frac{r_0}{r_i} \int r dr \right]} = -\frac{\Delta r_0 + \Delta r_i}{r_0 + r_i} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{z\theta} = \frac{1}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} \int_{r_i}^{r_0} \int_0^{2\pi} \varepsilon_{z\theta}(r) r dr \quad (3.9a)$$

$$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\Delta\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3h(r_0^2 - r_i^2)} \quad (3.9b)$$

Buradan (3.9b) ifadesi kullanılarak ortalama birim kayma şekil değiştirme artımı, $\gamma_{z\theta}$,

$$\gamma_{z\theta} = 2\varepsilon_{z\theta} = \frac{2\Delta\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3h(r_0^2 - r_i^2)} \quad (3.10)$$

şeklinde yazılır.

Sonuç olarak burulmalı kesme deneyleri boyunca içi boş silindirik numunede oluşan dokuz bileşen belirlenebilmektedir. Bunlardan dört tanesi gerilme bileşeni, dört tanesi şekil değiştirme bileşeni ve sonuncusu da boşluk suyu basıncı, u dur.

3.5 Sonuç

Bu bölümde çalışmada kullanılan dinamik burulmalı kesme deney aleti, numune özellikleri ve numune hazırlama yöntemi anlatılmıştır. Burulmalı kesme deney aletinde laboratuvarda hazırlanan ve örselenmemiş, içi boş, silindirik zemin numunelerinde istenilen genlik ve hızda, statik ve dinamik deneyler yapılabilmektedir. Statik deneyler deformasyon kontrollü olarak, dinamik deneyler ise gerilme kontrollü olarak yapılmaktadır.

Bu çalışmada laboratuvar numuneleri kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Örselenmemiş numuneler ise sondaj tüpünden dikkatlice çıkarıldıktan sonra, iç çapları 3.0 cm olacak şekilde burulma yoluyla hazırlanmışlardır.

Laboratuvarda hazırlanan numunelerin drenajsız statik mukavemetleri farklı yükleme hızları altında belirlenmiştir. Buna göre statik deneyde ince daneli zeminde yükleme hızı arttıkça, mukavemet artmakta, boşluk suyu basınçları ise azalmaktadır. Ayrıca sabit deformasyon hızında yapılan deneylerde, düşük plastisiteli siltin statik mukavemeti diğer zemin numunelerine göre daha yüksektir. Siltli kil zeminin mukavemeti ise daha yüksek plastisiteli silt zemine göre bir miktar daha fazla mukavemete sahiptir. Boşluk suyu basınçları, permeabiliteye de bağlı olarak plastisite arttıkça azalan siltli zeminlerde ise, daha yüksek plastisiteli zeminin drenajsız statik kayma mukavemeti de yüksek olmaktadır.

Son olarak örselenmemiş, yumuşak silt zeminin konsolidasyon davranışı kademeli yükleme ödometre deneyi ile belirlenmiştir. Buna göre siltli zeminin n konsolidasyon basıncı yaklaşık 120 kPa değerindedir. Normal konsolide zeminde eksenel düşey yüklemeyle meydana gelen bir boyutlu oturmalarla zeminde plastik deformasyonlar oluştuktan sonra boşaltma ile bu deformasyonların ancak düşük bir kısmı geri alınmıştır. Siltli zeminde konsolidasyon oturmalarının tamamlanmasının ardından belli bir miktar da sekonder konsolidasyon meydana geldiği belirlenirken, zeminin boşluk oranı ise konsolidasyonla birlikte yaklaşık % 20 azalmıştır.

4. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Burulmalı kesme deney sisteminde, deney aletinin özelliğinden dolayı araştırma yapılan konuya göre değişik drenaj ve yükleme koşullarında gerilme ve deformasyon kontrollu deneyler yapılabilmektedir. Bu çalışmada dinamik burulmalı kesme deney aletinde, farklı plastisite indisine sahip siltli ve killi zemin numuneleri kullanılarak dinamik ve statik deneyler yapılmıştır. Dinamik deneyler gerilme kontrollu, statik deneyler ise deformasyon kontrollu olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde konsolidasyon basıncı izotropik olarak 100 kPa uygulanmıştır. Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından 0.10 Hz frekansında sinüzoidal burulma momenti yüklemesiyle numuneler kesilmiştir. Numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncının değişimi deney boyunca izlenmiştir. Statik deneyler ise 0.5 mm/dk deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Bir doğrultuda sabit hızda uygulanan burulma momenti ile statik olarak yüklenen içi boş silindirik zemin numunelerinde akmanın meydana geldiği andaki ve % 10 kayma deformasyonundaki kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında altı farklı türde deney programı uygulanmıştır. Bunlar, laboratuvarda hazırlanan numunelerde ve araziden alınan örselenmemiş numunelerde yapılmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

4.1.1 Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerde Deneyler

Muayene çukurlarından alınan örselenmiş numuneler kullanılarak hazırlanan laboratuvar numuneleri üzerinde öncelikle göçme seviyesi olarak belirlenen $\pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan tekrarlı yükleme deneyleri, ilk deney serisini oluşturmaktadır. Bu deneylerde İstanbul Gümüşdere Köyü'nde açılan muayene çukurlarından alınan ve % 18 plastisite indisine sahip siltli kil numunesi kullanılmıştır. Deneylerde izotropik konsolidasyonun tamamlanmasının ardından farklı gerilme oranlarında sinüzoidal

yüklemeye, zemin numunelerinde göçme oluşması için gerekli çevrim sayıları belirlenmiştir. Deneylerin bir bölümünde konsolidasyon süresi olarak 3 gün beklenmiş, diğer deneylerde ise izotropik konsolidasyon 1 gün süreyle devam etmiştir.

İkinci deney serisinde aynı şekilde hazırlanan numunelerle sabit gerilme oranında artan çevrim sayılarında bir dizi dinamik deney yapılmış, deney devam ederken belirli çevrim sayılarından sonra durdurularak statik yüklemeye geçilmiştir. Bu deney serisinde dinamik deneyler, ilk deney serisinden elde edilen dinamik mukavemet eğrisinden $N=20$ çevrim sayısına karşı gelen dinamik gerilme oranında yapılmıştır. Bu deneylerde siltli kil zemin, 5, 8, 12, 15 çevrimde tekrarlı burulma momentine maruz bırakılmış, ardından 0.50 mm/dak sabit deformasyon hızında statik deney yapılmıştır. Bir başka deneyde ise aynı özellikteki zemine, bu sefer % 5 çift genlikli deformasyonda göçmeye ulaşınca kadar tekrarlı yük uygulanmış, ardından yine statik yükleme yapılmıştır. Dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisinde kritik akma eğrisi olarak belirtilen eğri ile bu deney sonuçları karşılaştırılarak, akma durumundan önceki ve numunede kalıcı deformasyonlar oluştuğundan sonraki statik mukavemetler hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Böylelikle aynı plastisitedeki numuneler farklı koşullar altında tekrarlı yüke maruz bırakılmış ve ardından statik olarak yüklenmişlerdir.

Üçüncü deney serisinde plastisite indisi %2-33 arasında olan siltli laboratuvar numunelerinde $\pm\%2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesine kadar dinamik deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde laboratuvarda kuru yağmurlama yöntemiyle farklı kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numunelere tekrarlı yükleme drenajsız durumda uygulanmıştır.

Laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan son deney serisinde ise % 2 ve % 11 plastisite indisine sahip silt numunelere önce tekrarlı yükleme, numunede $\pm\%2.5$ birim kayma deformasyonu oluşuncaya kadar uygulanmış, ardından 0.50 mm/dk deformasyon hızında %10 birim kayma oluşuncaya kadar statik deney yapılmıştır.

4.1.2 Örselenmemiş Numunelerde Deneyler

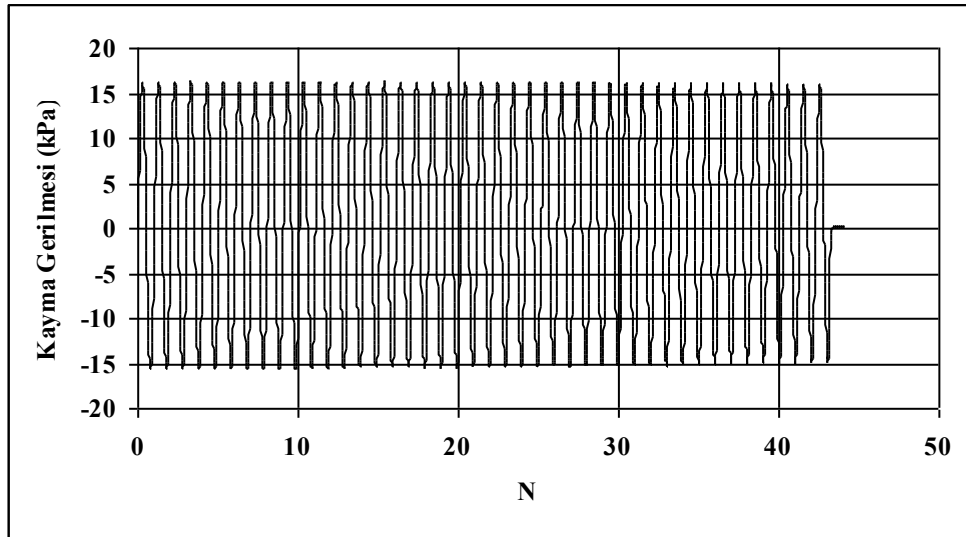
Örselenmemiş numuneler, ortası dikkatlice oyulduktan sonra burulmalı kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerde yapılan ilk seri deneyde önce düşük deformasyonlarda belirli tekrarlı kayma gerilmesi oranında dinamik yükleme uygulanmış, numunenin kalıcı deformasyona uğramasına izin verilmeden ve drenajlar açılmadan 0.50 mm/dk hızında statik

deneye geçilmiştir. Hem dinamik hem de statik deneyde gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu ilişkileri elde edilmiştir.

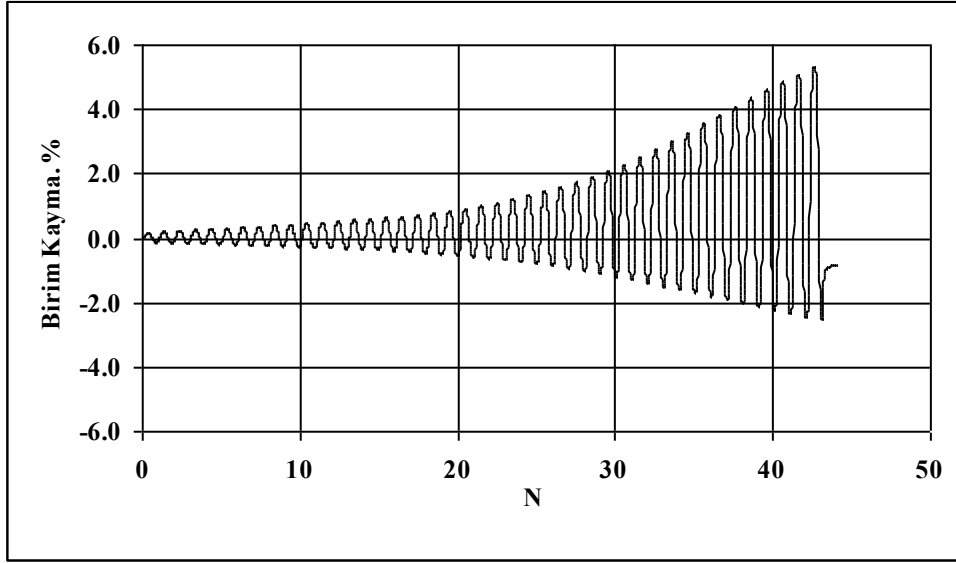
İkinci deney serisinde ise içi boş, örselenmemiş numunelere göçme oluşuncaya kadar farklı gerilme genliklerinde tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Böylece doğal numunelerin mevcut iç yapısı bozulmadan ve mümkün olduğunca örselenme olmadan tekrarlı yükler altındaki davranışları belirlenmiştir.

4.2 Laboratuvarda Hazırlanan Yumuşak Killi Zeminin Dinamik Davranışı

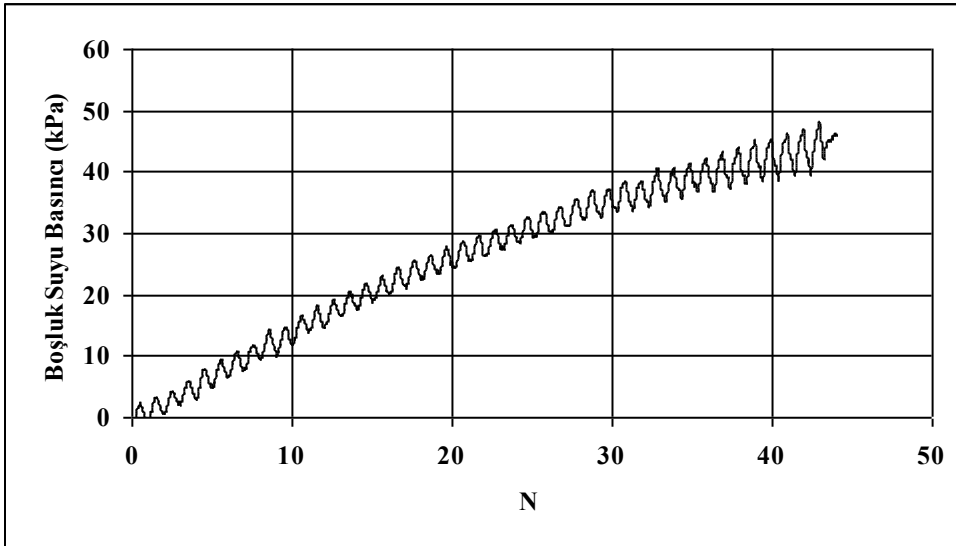
Bu çalışmada yapılan ilk seri deney, farklı tekrarlı gerilme oranlarında göçmeye ulaşuncaya kadar yapılan dinamik deneyleri kapsamaktadır. Bu deneylerde plastisite indisi % 18 olan ve Gümüşdere'den alınan, ortalama 14.3 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlığında laboratuvarda toz halinde kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan siltli kil numuneler kullanılmıştır. Burulmalı kesme deney aletinde üniform gerilme genliği altında sinüzoidal olarak uygulanan dinamik yüklemeyle ait tipik deney kayıtları Şekil 4.1a, 4.1b ve 4.1c'de görülmektedir. Buna göre deney kayıtlarında tekrarlı kayma gerilmesi oranı (τ_d/σ_c') 0.16 seçilen Gümüşdere numunesinde yapılan deneye ait tekrarlı gerilme oranının çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir (Şekil 4.1a).



Şekil 4.1a Kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi, $\tau_d/\sigma_c' = 0.163$, $I_p = \% 18$



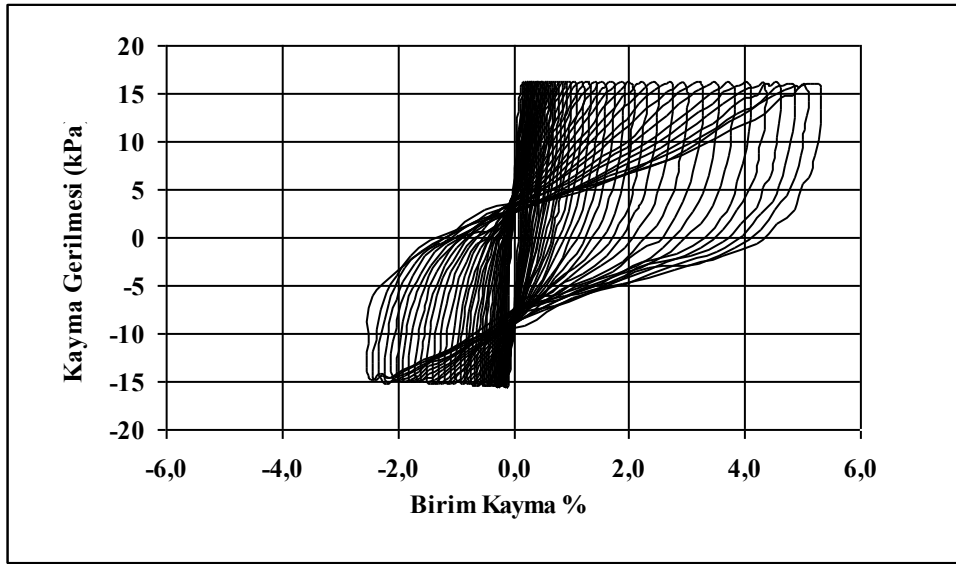
Şekil 4.1b Birim kayma deformasyonu-çevrim sayısı ilişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.163$, $I_p = \% 18$



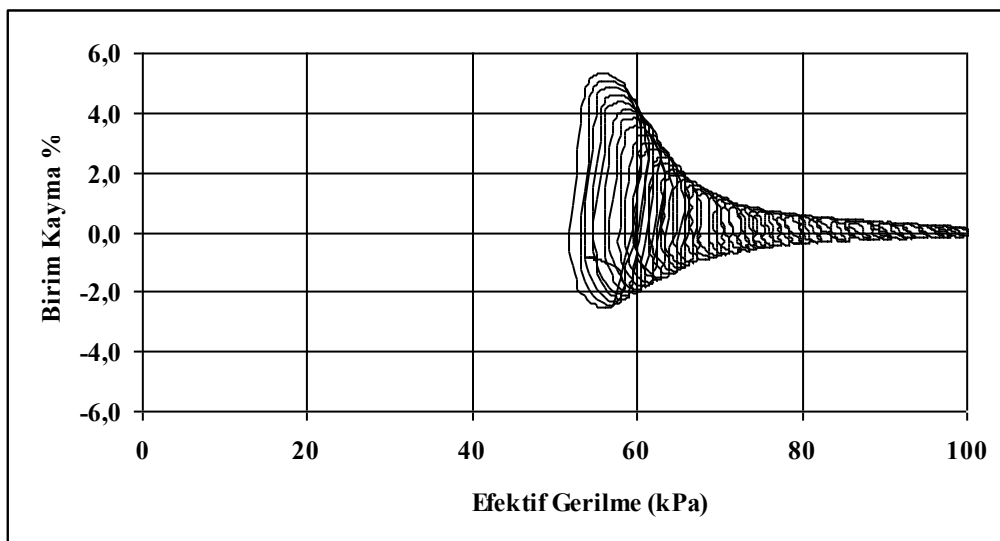
Şekil 4.1c Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.163$, $I_p = \% 18$

Birim kayma deformasyonunun ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi ise sırasıyla Şekil (4.1b) ve Şekil (4.1c)'de görülmektedir. $N=35$ çevrimde göçmeye ulaşan numunede aynı seviyeye karşı gelen boşluk suyu basıncı 40 kPa'dır. Numunede hızla artan birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçları sınırlı kalmıştır. Şekil 4.2'de ise bu deneye ait histeresis ilmikleri görülmektedir. Ortalama kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi şeklinde elde edilen ilmiklerde, çevrim sayılarıyla birlikte büyüme ve yatıklaşma meydana gelmektedir. Artan birim kayma genliklerine bağlı olarak zeminde oluşan kalıcı

deformasyonlar nedeniyle ince daneli zeminde yumuşama olmaktadır. Bundan dolayı zemin devam eden yükleme çevrimlerinde önemli mukavemet kayıplarına uğramaktadır. Tekrarlı yüklemeyle birlikte zeminde oluşan birim kaymalarla, efektif gerilmelerin değişimi Şekil 4.3'te görülmektedir. Buna göre artan kayma deformasyonları, numunede oluşan boşluk suyu basınçları nedeniyle meydana gelen efektif gerilme azalmasıyla ilişkilidir. Belirli bir kayma deformasyonu seviyesinden sonra numunede akma meydana gelirken, efektif gerilmelerde de önemli ölçüde düşme görülmektedir. Bu kayma deformasyonu seviyesi *kritik akma deformasyonu* olarak tanımlanmıştır.

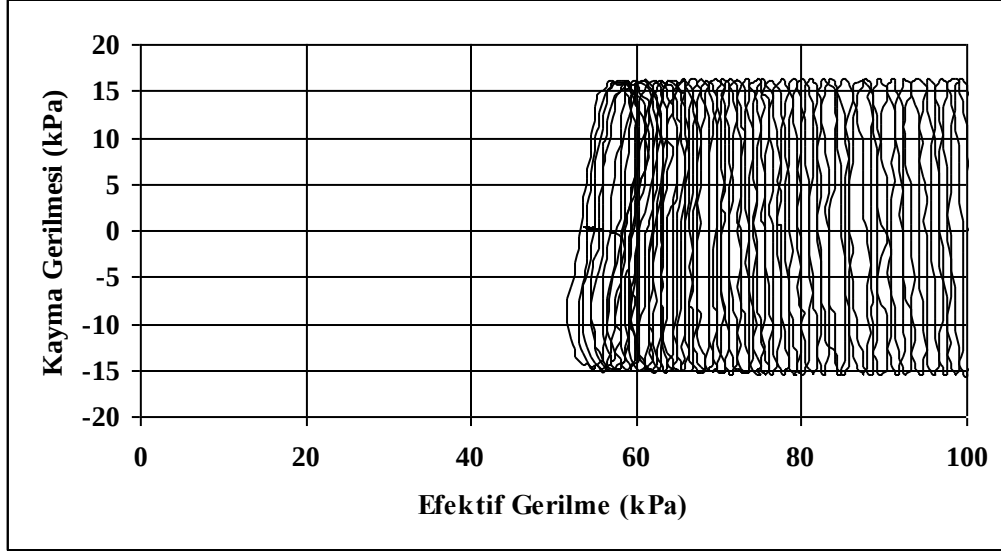


Şekil 4.2 Siltli kil zeminde meydana gelen histeresis ilmikleri, $\tau_d/\sigma_c = 0.16$, $I_p = \% 18$



Şekil 4.3 Siltli kilde birim kayma deformasyonu-efektif gerilme ilişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.16$, $I_p = \% 18$

Bu çalışmada kullanılan % 18 plastisite indisli siltli kil numunesinde yapılan drenajsız dinamik deneylerde bu deformasyon seviyesi yaklaşık $\pm\% 0.75$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.4'te aynı deneye ait gerilme izleri görülmektedir.



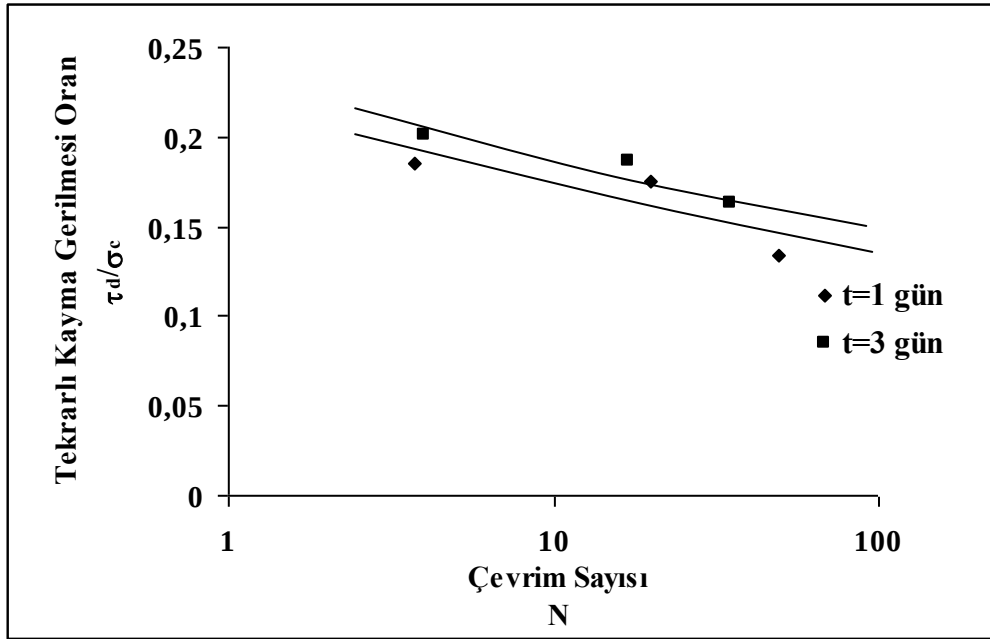
Şekil 4.4 Siltli kilde gerilme izleri, $\tau_d/\sigma_c = 0.16$, $I_p = \% 18$

4.2.1 Konsolidasyon Süresinin Dinamik Davranışa Etkisi

Drenajsız koşullarda yapılan bu ilk seri dinamik deneyde plastisite indisi % 18 olan siltli kil zemine belli çevrim sayılarında tekrarlı gerilme genlikleri uygulanmış, farklı gerilme oranlarında numunede $\pm\% 2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesine ulaşılması için gerekli çevrim sayıları belirlenmiştir. Bir kısım deneyde konsolidasyon aşaması 1 gün süreyle devam ederken bazı deneylerde de konsolidasyon 3 gün devam ettirilmiştir. Şekil 4.5'teki gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisinde elde edilen mukavemet eğrileri görülmektedir. Buna göre konsolidasyon zamanının siltli ve killi zeminde dinamik davranışa olan etkisi, boşluklardaki suyun drene olmasıyla konsolide olan zemindeki mukavemeti artırıcı yönde olmaktadır. Ayrıca konsolidasyonun devam etmesiyle düşük plastisiteli kilde çimentolaşma ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.6'da ise boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Daha iyi mukavemete sahip uzun süreli konsolide olan numunelerin boşluk suyu basınçları, 1 gün süreyle konsolide olan numunelere göre aynı çevrim sayısında daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Tablo 4.1'de Gümüşdere numunesinde yapılan deney özellikleri görülmektedir.

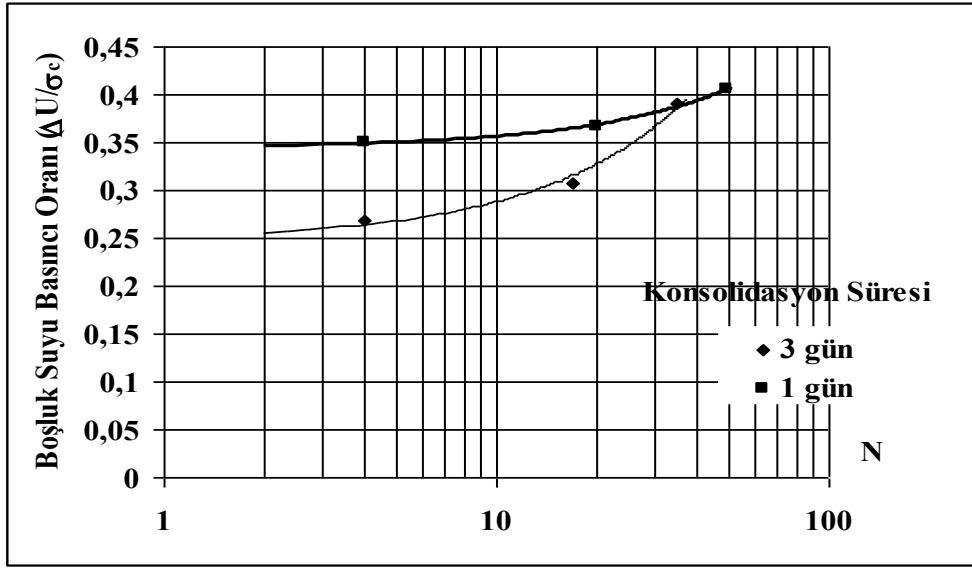
Tablo 4.1 Gümüşdere numunesinde yapılan dinamik deney özellikleri ($I_p=18$)

Deney No	σ_3 kPa	σ_c kPa	Kons. Süresi (gün)	B %	γ_{kc} (kN/m^3)	τ_d/σ_c'	Çevrim Sayısı
DG1	350	100	3	98	15.2	0.163	35
DG2	400	100	3	98	15.0	0.186	17
DG3	400	100	3	98	14.9	0.201	4
DG4	450	100	1	96	14.9	0.185	5
DSG1	400	100	1	96	15.0	0.175	20
DG5	450	100	1	96	15.1	0.134	49



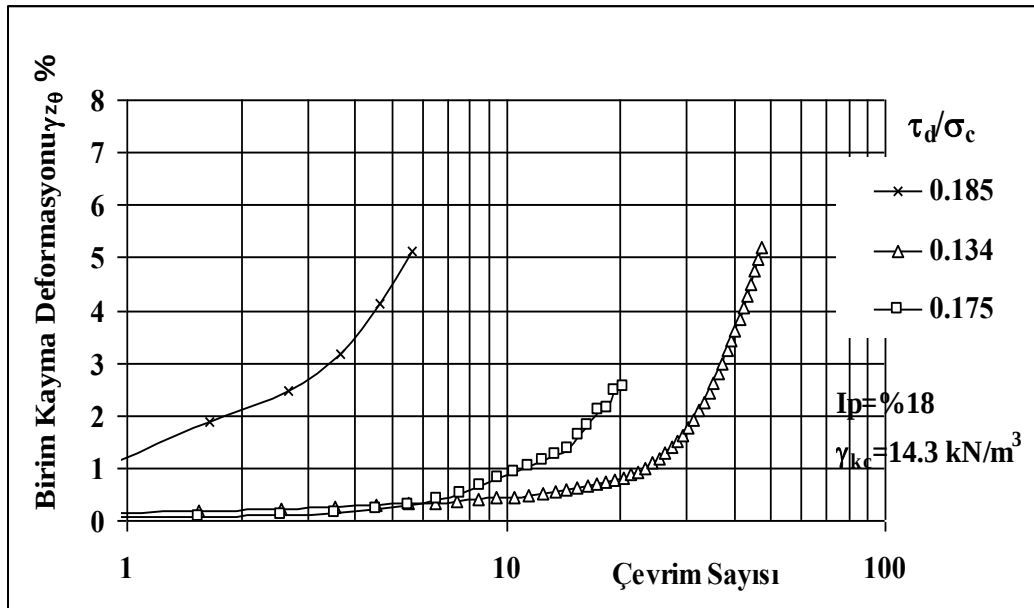
Şekil 4.5 Konsolidasyon süresinin laboratuvar numunelerinde dinamik mukavemete etkisi

Şekil 4.7’de göçme seviyesine kadar bu numunede yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Deneyler 0.185-0.134 gerilme oranında yapılmıştır. Buna göre, aynı çevrim sayısında gerilme oranı arttıkça numunede oluşan birim kayma deformasyonları da artmaktadır.

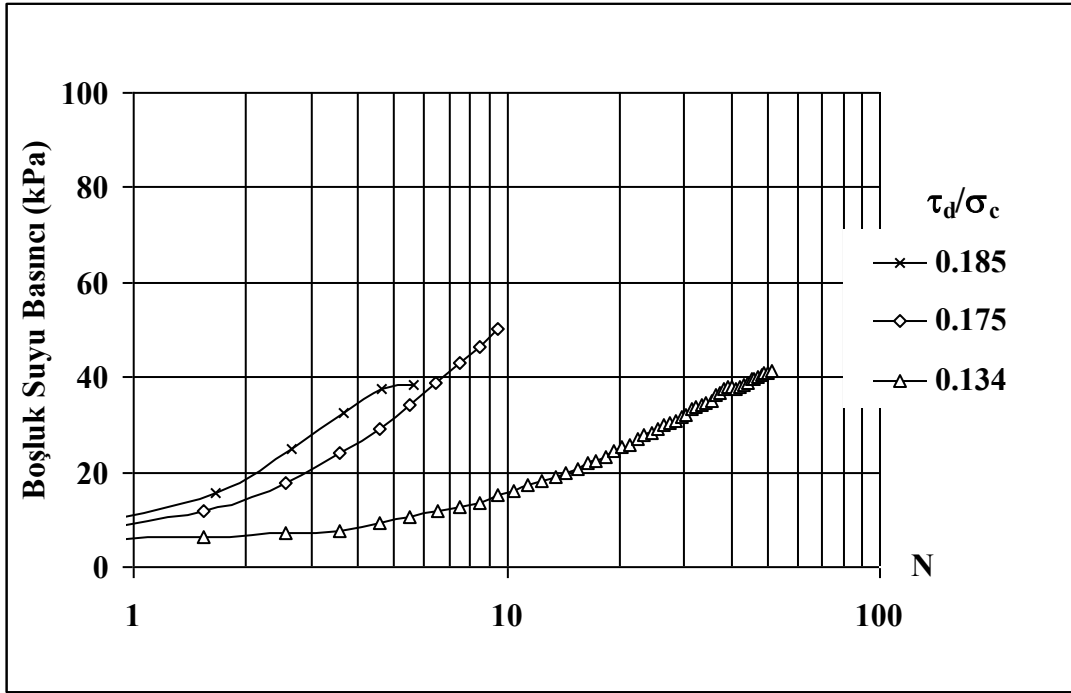


Şekil 4.6 Konsolidasyon süresinin boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi

Şekil 4.7’de aynı zamanda gerilme oranları arttıkça, birim kaymalar daha hızlı ve düşük çevrim sayılarında göçme seviyesine ulaştığı görülmektedir. 0.185 dinamik gerilme oranında yapılan deneyde $\pm\%$ 2.5 birim kayma seviyesine 4 çevrimde ulaşılırken, 0.175 dinamik gerilme oranında bu seviyeye 20 çevrimde, 0.134 gerilme oranında ise 47 çevrim sayısında göçme seviyesi elde edilmektedir. Şekil 4.8’de ise çevrim sayılarıyla birlikte numunede oluşan boşluk suyu basınçları görülmektedir. Boşluk suyu basınçları 0.134 ve 0.185 dinamik gerilme oranında 40 kPa, seviyelerindeyken, 0.175 gerilme oranında yapılan deneyde nihai boşluk suyu basıncı 50 kPa seviyesini aşmaktadır.



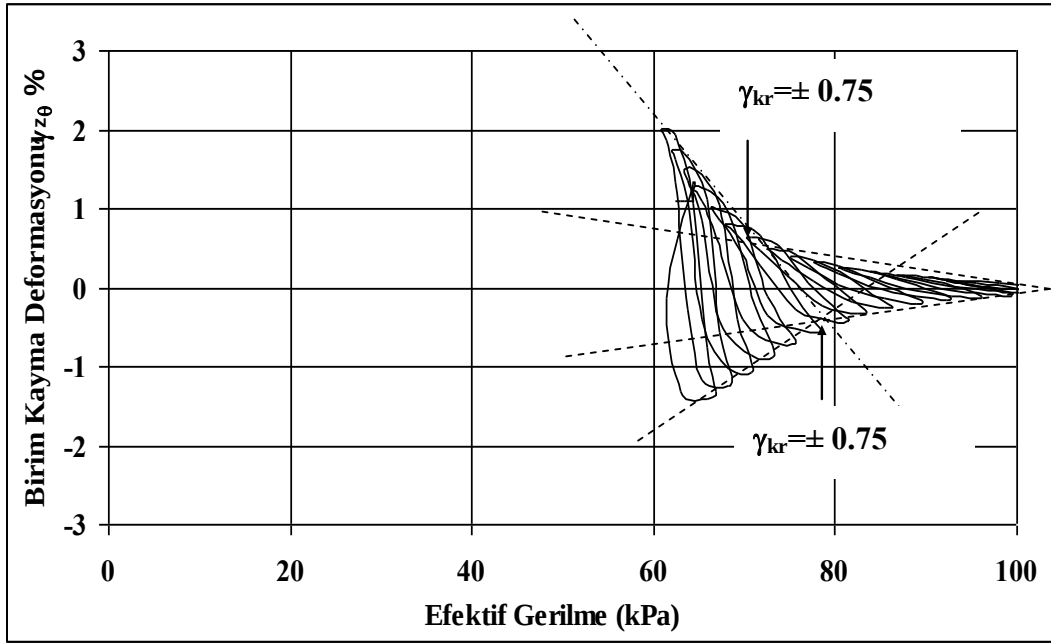
Şekil 4.7 Laboratuvarda hazırlanan İstanbul Gümüşdere numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \%18$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ t/m}^3$)



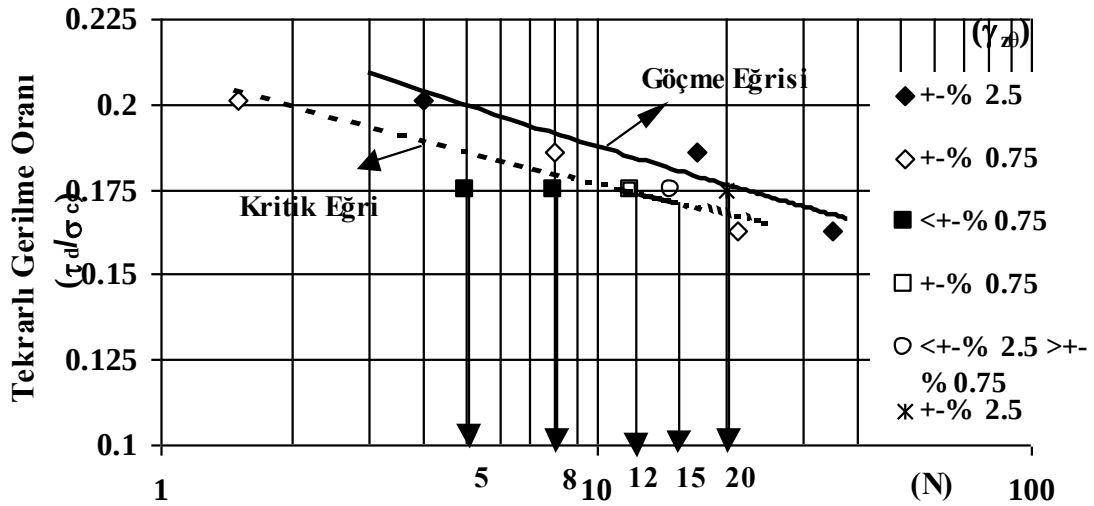
Şekil 4.8 Laboratuvarda hazırlanan İstanbul Gümüşdere numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%18$, $\gamma_{kc}=14.3 \text{ kN/m}^3$)

4.2.2 Yumuşak Killerde Tekrarlı Yüklemenin Statik Mukavemete Etkisi

Yapılan bu ilk deneylerde artan birim kaymalarla birlikte oluşan boşluk suyu basıncına da bağlı olarak, efektif gerilmede önemli ölçüde azalma meydana geldiği görülmüştür. Bir diğer deney serisinde ise aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında farklı çevrim sayılarında yapılan dinamik deneylerden sonra yumuşak killi zemin statik olarak yüklenmiştir. Yukarıda anlatılan ilk seri dinamik deneyde belirlenen birim kayma-efektif gerilme ilişkisinde, yaklaşık $\pm \% 0.75$ birim kayma seviyesinden sonra numunede deformasyonların hızla arttığı görülmüştür (Şekil 4.9). Hızla artan kayma deformasyonlarının yanında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarına da bağlı olarak efektif gerilmelerde de önemli ölçüde azalma meydana geldiği görülmektedir. Kritik birim kayma deformasyonu olarak adlandırılan $\pm \% 0.75$ seviyesine karşı gelen çevrim sayıları ile Şekil 4.10'da belirtilen kritik eğri elde edilmiştir. Göçme eğrisinden ise deprem aletsel büyüklüğü $M_w=7.5$ 'a karşı gelen $N=20$ çevrim sayısındaki (Seed, 1975), gerilme oranı (τ_d/σ'_c), 0.175 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu gerilme oranında dinamik deney yapılarak, zeminin $N=20$ çevrimde $\pm \% 2.5$ birim kayma deformasyonuna ulaştığı tespit edilmiştir.

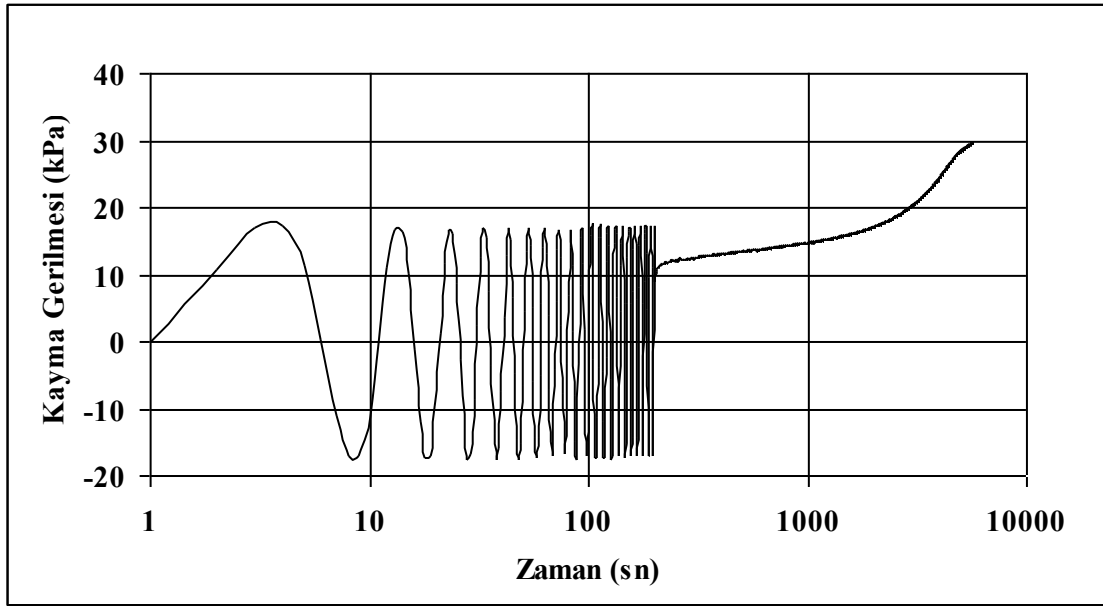


Şekil 4.9 Birim kayma deformasyonu-efektif gerilme ilişkisi, ($\tau_d/\sigma_c = 0.175$, $I_p = \%18$)

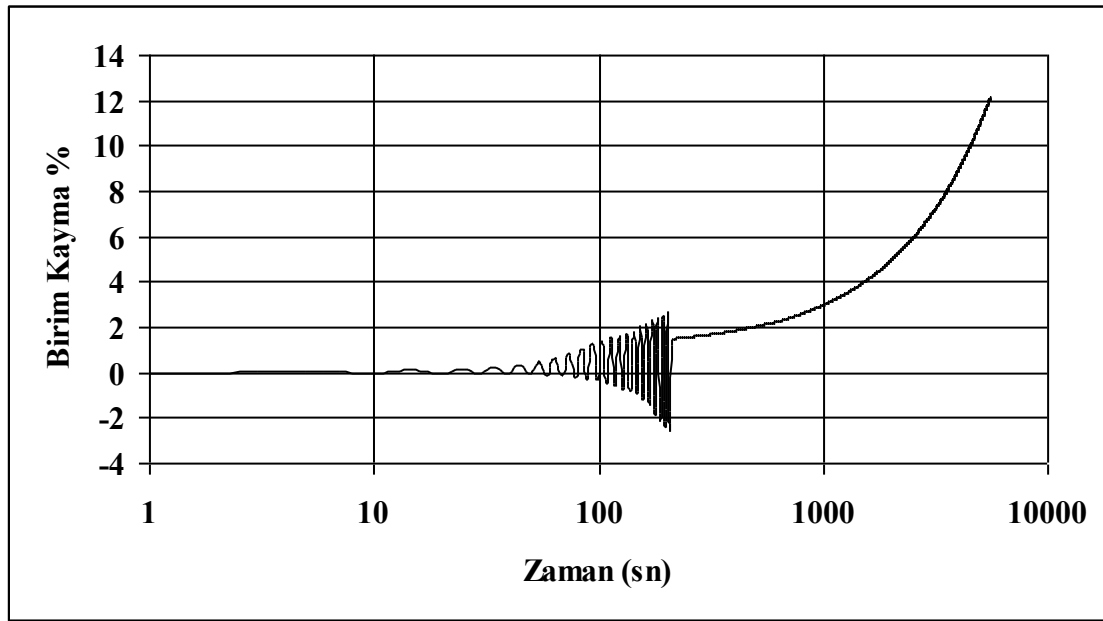


Şekil 4.10 Tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Bu deney serisinde, önce 0.175 dinamik gerilme oranında belirli çevrim sayılarında tekrarlı yük uygulandıktan sonra deneyler durdurulup, statik yüklemeye geçilmiştir. Şekil 4.11a, 4.11b ve 4.11c'de bu deney serisine ait bir deney kaydı görülmektedir. Burada görülen kayma gerilmesinin zamanla olan değişimi, 0.10 Hz frekansında, 5 çevrimde uygulanan tekrarlı gerilmeleri takiben 0.50 mm/dak sabit deformasyon hızında yapılan statik burulmalı kesme deneyine aittir (Şekil 4.11a). Numunede oluşan birim kayma deformasyonlarının dinamik ve statik deneyde zamanla değişimi Şekil 4.11b'de görülmektedir. Şekil 4.11c'de ise bu deneye

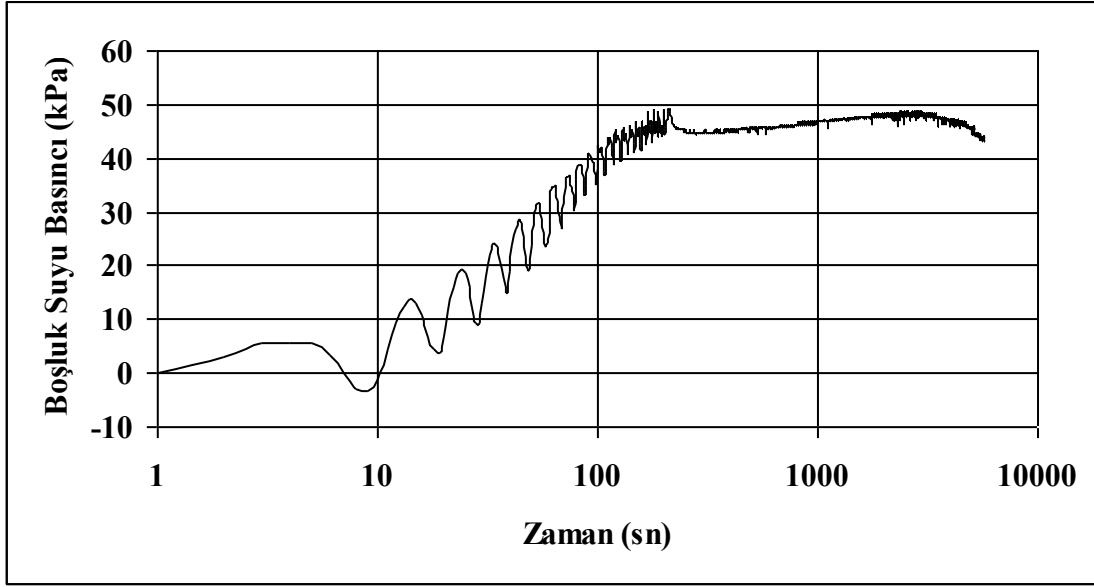


a)



b)

Şekil 4.11 Yumuşak kilde yapılan dinamik ve statik deney serisinin kayıtları a) Kayma gerilmesinin değişimi b) Birim kayma deformasyonunun değişimi c) Boşluk suyu basıncının değişimi

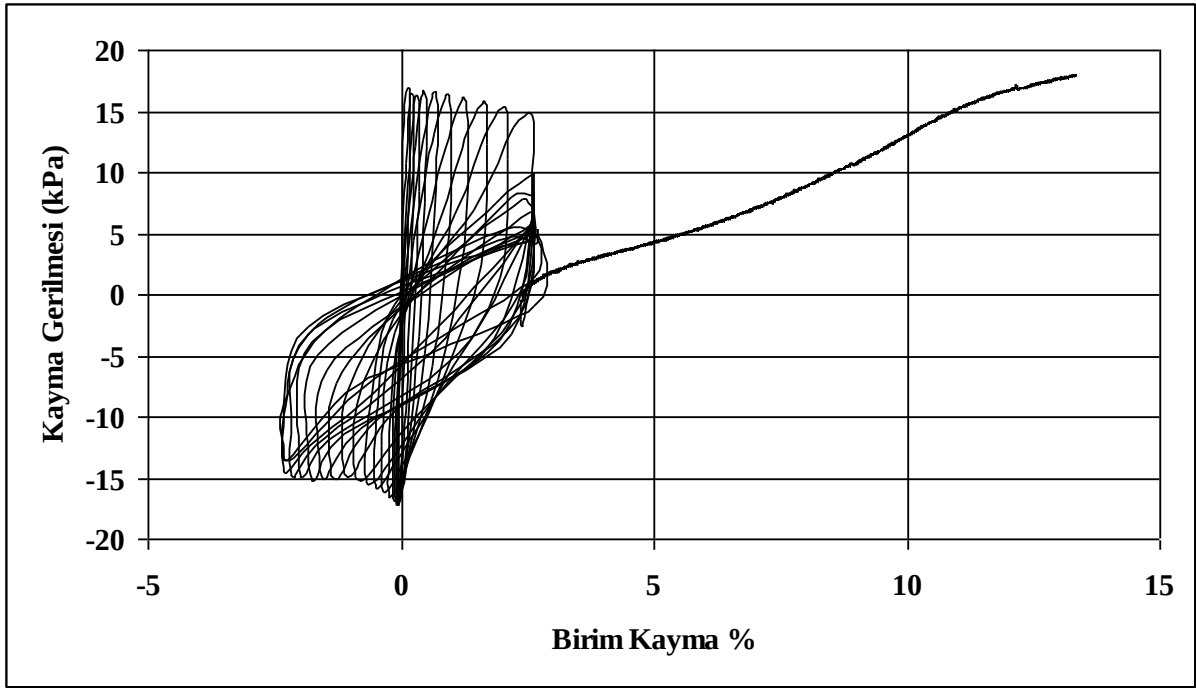


c)

Şekil 4.11 (devamı) Yumuşak kilde yapılan dinamik ve statik deney serisinin kayıtları a) Kayma gerilmesinin değişimi b) Birim kayma deformasyonunun değişimi c) Boşluk suyu basıncının değişimi

ait boşluk suyu basıncının zamanla değişimi görülmektedir. Bu şekillerde belirtilen dinamik yükleme, yumuşak killi zeminde akma oluştuktan sonra sonlandırılmıştır (N=20). Bu yüzden devamında yapılan statik deneyde zeminde önemli mukavemet kaybı görülmektedir. Statik deneyde killi zeminde % 10 birim kayma deformasyonuna karşı gelen kayma gerilmesi değeri 25 kPa seviyesindedir. Boşluk suyu basınçları ise dinamik deneyde düşük seviyelerde kaldığından, önemli bir mukavemet kaybına uğramayan killi zeminde statik yüklemeyle birlikte boşluk suyu basınçları da 50 kPa seviyesine kadar artmaya devam etmiştir (Şekil 4.11c). Şekil 4.12’de bu deneyden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi görülmektedir.

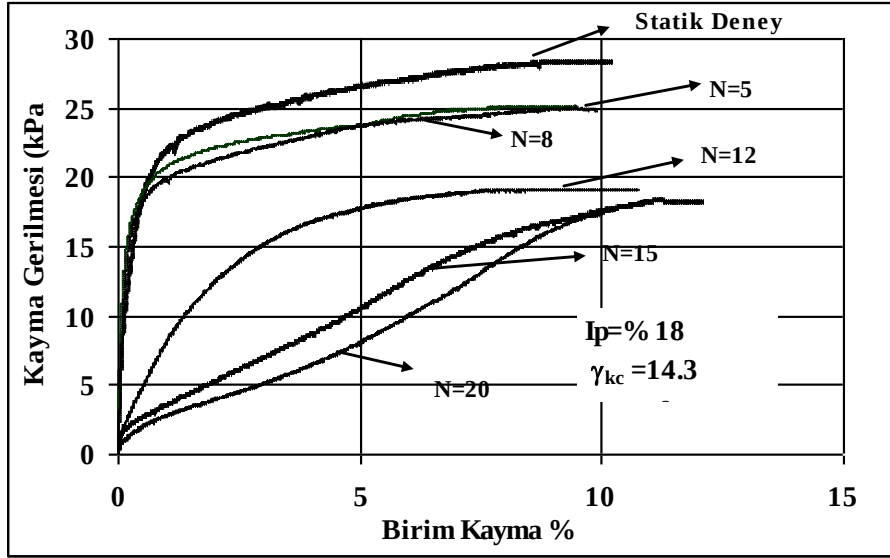
Bu deney serisine, kritik akma deformasyonu olarak belirlenen $\pm\% 0.75$ seviyesine erişilmeden 8 çevrim sayısında yapılan dinamik deneyle devam edilmiştir. Daha sonra dinamik deney sonlandırılıp ardından 0.5 mm/dak sabit hızda statik deney yapılmıştır. Sonra aynı gerilme oranında kritik eğriye karşı gelen 12 çevrimde tekrarlı yük uygulanırken, yükleme sonrası statik mukavemette kritik seviyeden sonra azalma meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.12 Yumuşak killi zeminde yapılan dinamik ve statik deneylerde kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi (PI=% 18)

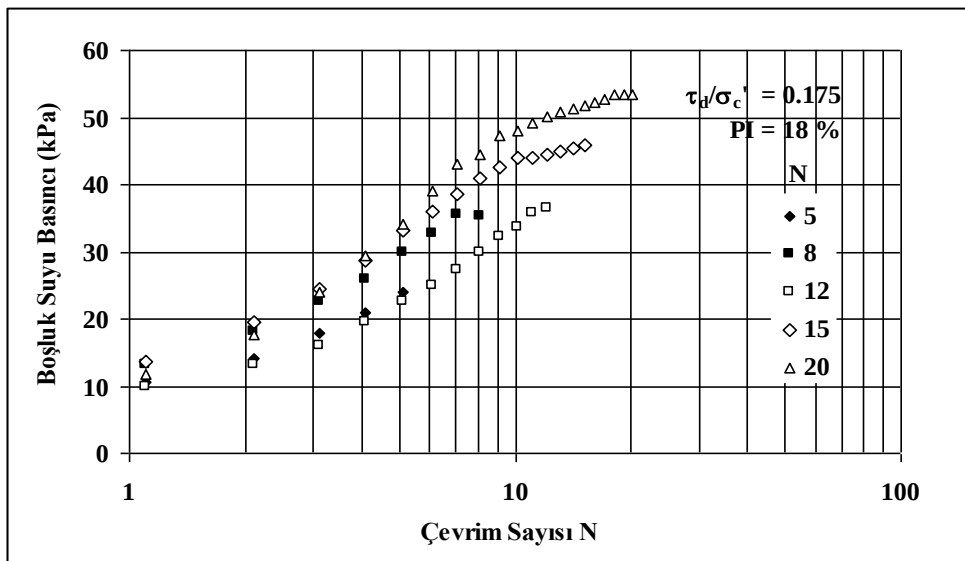
Zeminin 15 yükleme çevriminde birim kayma deformasyonu seviyesi olarak, $\pm 0.75 < \gamma_{z0} < \pm 2.5$ aralığında deformasyona uğramasına izin verildikten sonra yapılan statik deneylerde ise kayma mukavemetinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Şekil 4.13). İnce daneli zeminde tekrarlı gerilmeler altında statik mukavemetler gittikçe azalmaktadır. Bunun yanında kritik birim kayma deformasyonunu aşan çevrim sayılarından sonraki statik mukavemetlerde azalma, % 40 seviyelerine kadar çıkmaktadır (Şekil 4.13).

Kritik seviyeye kadar statik mukavemetlerdeki azalma fazla olmamakla birlikte bu seviyeden sonra numunede oluşan kalıcı deformasyonların etkisiyle drenajsız statik mukavemetlerde azalma olmuştur. Tekrarlı yüklemede ± 2.5 birim kayma seviyesine erişildikten sonra yapılan statik deneylerde de yine drenajsız durumdaki mukavemet değerleri düşük seviyelerdedir. Böylece, zeminde kalıcı deformasyonlar oluştuğundan sonraki statik mukavemetlerin önemli ölçüde azaldığı söylenebilir. Dolayısıyla tekrarlı yüklemede kritik birim kayma deformasyonu seviyesine ulaşıldıktan sonra zeminde göçme oluşmasa da statik mukavemetler önemli ölçüde azalmaktadır.



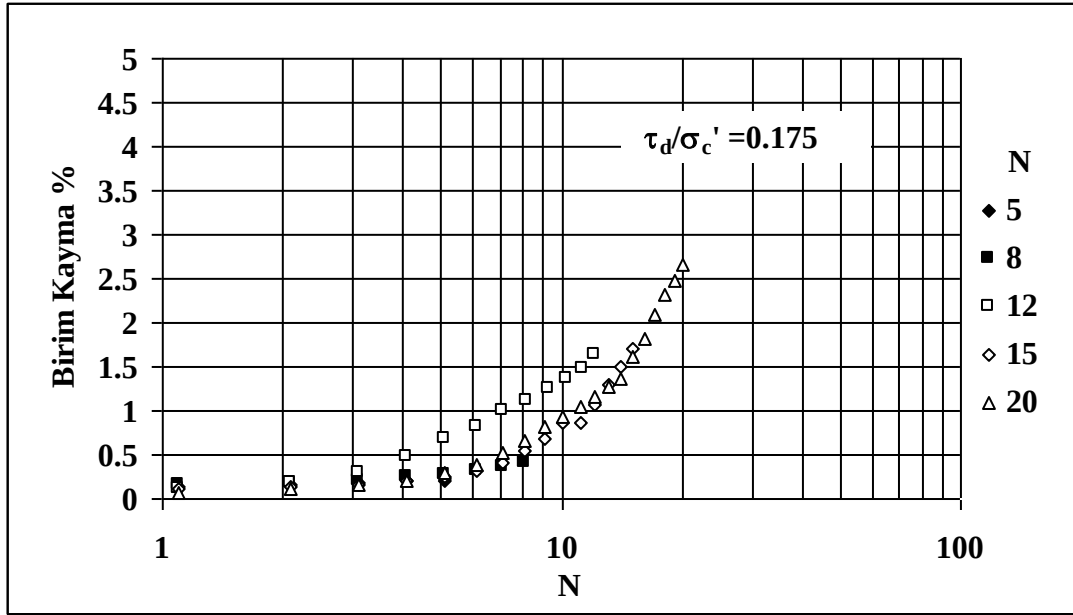
Şekil 4.13 Tekrarlı yüklemenin statik mukavemete etkisi ($I_p = \% 18$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ kN/m}^3$)

Ayrıca dinamik deney sonrası beklemeden ve drenajlar açılmadan yapılan statik deneylerde boşluk suyu basıncı davranışları da incelenmiştir. Deneylerde kullanılan plastik ve ince daneli zeminlerde dinamik yüklemeyle oluşan boşluk suyu basıncının miktarı uygulanan tekrar sayısına bağlı olarak değişim göstermiştir (Şekil 4.14). Aynı plastisitede ve aynı yöntemle hazırlanan laboratuvar numunelerinde dinamik deneyde oluşan boşluk suyu basınçları, çevrim sayılarıyla birlikte artmaktadır. Kritik deformasyon seviyesinden sonra 40 kPa seviyesini geçen boşluk suyu basınçları, göçme seviyesinde de statik deneylerde olduğu gibi 53 kPa mertebesindedir.



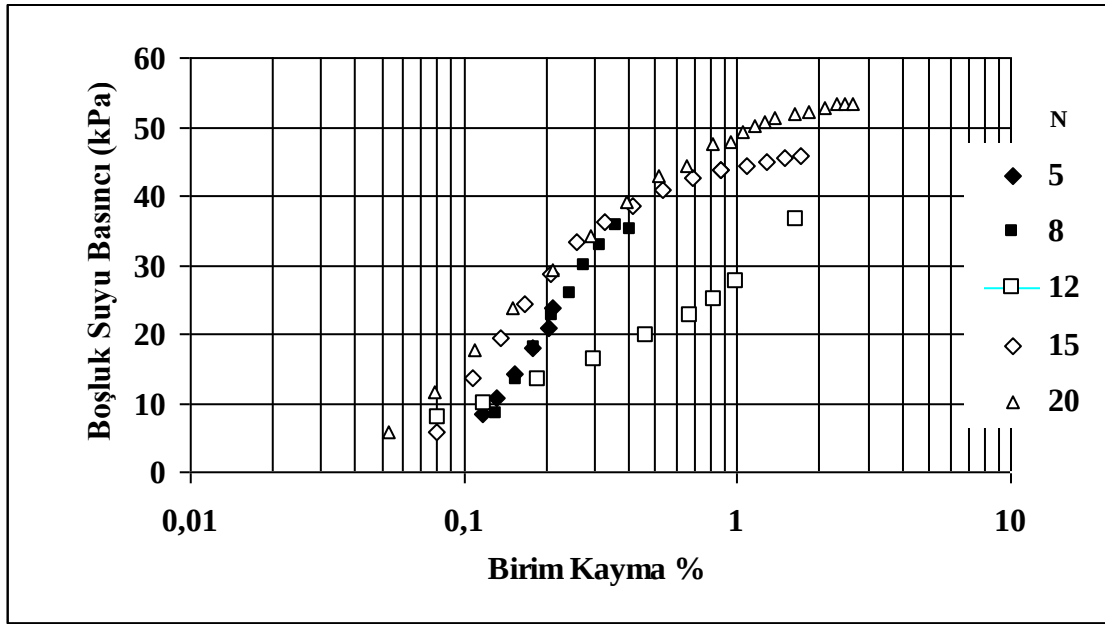
Şekil 4.14 Gümüşdere killi numunesinde yapılan dinamik ve statik deney serisinin dinamik yükleme kısmına ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 4.15'te bu deney serisinin dinamik yükleme kısmına ait birim kayma deformasyonunun çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir. Aynı gerilme oranında artan çevrim sayıları ile birlikte siltli kil numunesinde oluşan birim kaymalar da artmaktadır. N=5 ve N=8 çevrimlerde, numunede oluşan birim kayma deformasyonları yaklaşık çift genlikli %0.5 seviyesinde kalırken, kritik akma deformasyonu olarak alınan $\pm$ % 0.75 seviyesinden sonra (N=12), numunede yumuşama oluşmakta, birim kaymalar da hızla artmaktadır. N=20 çevrimde ise birim kaymalar $\pm$ % 2.5 seviyesine ulaşmaktadır.



Şekil 4.15 Gümüşdere killi numunesinde yapılan dinamik ve statik deney serisinin dinamik yükleme kısmına ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi

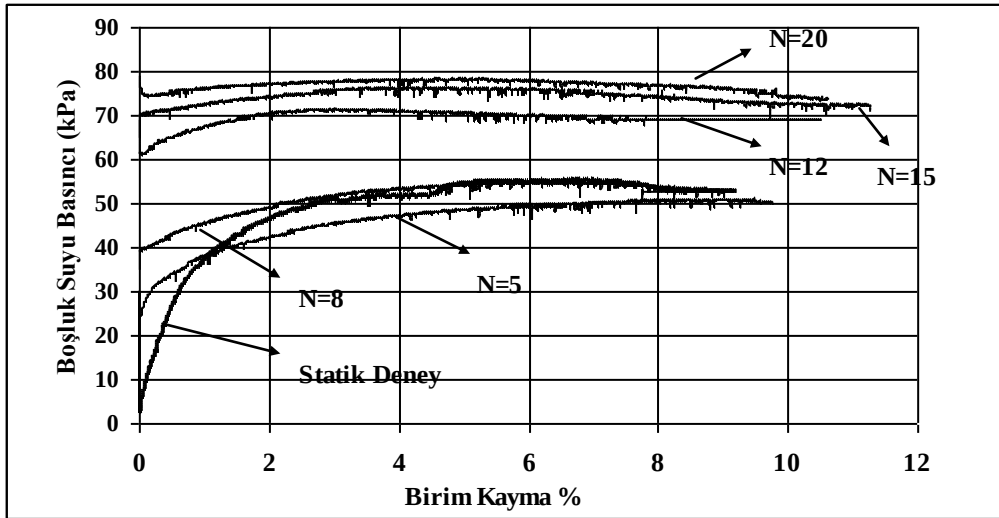
Şekil 4.16'da ise aynı deney serisine ait boşluk suyu basıncının birim kayma ile olan değişimi gösterilmiştir. Kritik akma deformasyonundan önceki 5 ve 8 çevrim sayılarında numunede boşluk suyu basınçları oldukça düşük seviyelerde kalırken, 12 çevrimden sonra artmaya başlamakta, zeminde çift genlikli % 4 birim kayma oluştuğundan sonra ise boşluk suyu basınçları 50 kPa değerini geçmektedir. Boşluk suyu basınçlarının özellikle kritik akma deformasyonuna ulaşmak için uygulanan N=12 çevrim sayısından sonra artmaya başlaması, ince daneli zemin numunesinde önemli mukavemet kayıplarının başladığı seviyenin de $\pm$ % 0.75 birim kayma deformasyonuna karşı geldiğinin göstergesi olarak düşünülebilir.



Şekil 4.16 Gümüşdere killi numunesinde yapılan dinamik ve statik deney serisinin dinamik yükleme kısmına ait boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu ilişkisi

Buna göre numune kritik akma deformasyonuna eriştikten sonra artan boşluk suyu basınçlarından dolayı zemin iskeletinin sahip olduğu düşünülen efektif gerilmelerde azalma olmaktadır. Bu da kohezyonlu ve % 18 plastisite indisine sahip zeminde geçerli bir mukavemet kaybına yol açmaktadır.

Şekil 4.17’de dinamik yükleme sonrası statik deneylerde boşluk suyu basıncı değişimleri görülmektedir. Dinamik yüklemede zeminin uğradığı farklı birim kayma seviyelerinden sonra yapılan statik deneyde boşluk suyu basınçları da değişmektedir. Buna göre kritik seviyeye kadar boşluk suyu basınçları birim kaymalarla birlikte artarken, dinamik deneyde zeminde kalıcı deformasyonların oluşmaya başladığı kritik değerden sonra 40-50 kPa seviyesini geçen statik boşluk suyu basınçları, statik deneyde daha fazla artmamaktadır. Diğer yandan kritik seviyeden sonra, statik deneyin başlangıcında boşluk suyu basınçları ani bir artmayla hızla 70-80 kPa seviyesine kadar çıktıktan sonra, yataya yakın bir eğilime sahip olup % 10 deformasyon seviyesine kadar artan birim kaymalarla birlikte daha fazla artmamaktadır (Şekil 4.17). Bu durum zeminde önemli mukavemet kayıplarının oluştuğunu göstermektedir. İnce daneli, kohezyonlu zeminlerin permeabilitesi düşük olduğundan artan boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi kohezyonsuz zeminlere göre uzun sürmektedir. Bu durum ise statik gerilmeler öncesi geçerli bir mukavemet kaybı anlamına gelir (Şekil 4.13).



Şekil 4.17 Gümüşdere killi numunesinde yapılan dinamik ve statik deney serisinin statik yükleme kısmına ait boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu ilişkisi (Tekrarlı yüklemenin statik deneylerde boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi)

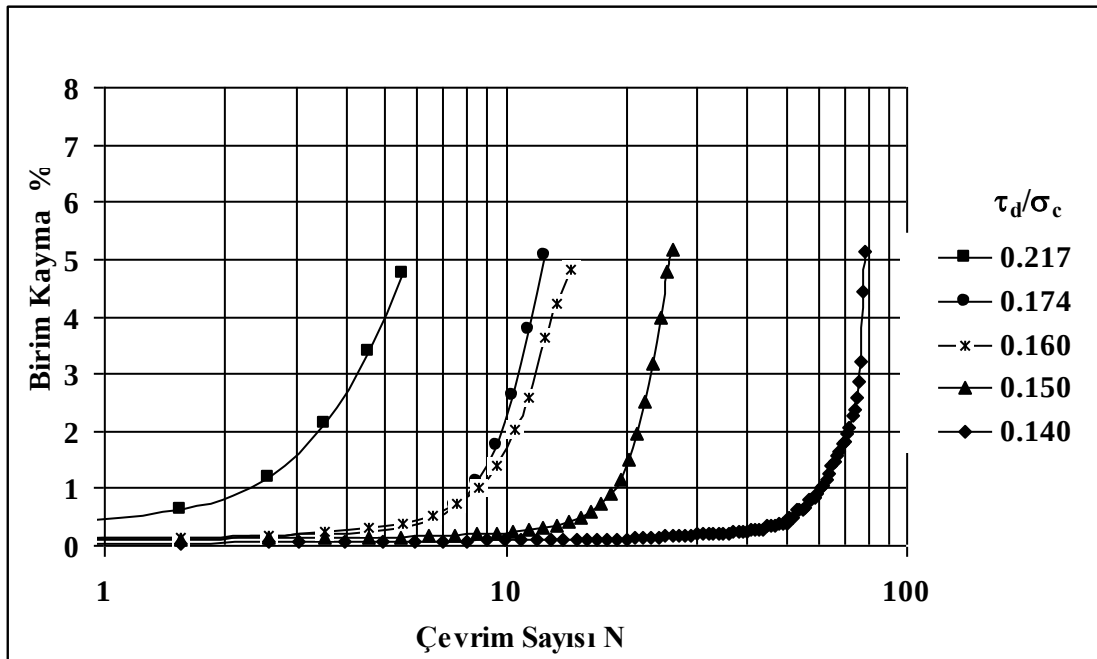
Aynı tekrarlı gerilme oranında siltli kil zeminde yapılan dinamik deneylerde, uygulanan düşük çevrim sayılarında, akmanın başladığı birim kayma seviyesine kadar statik mukavemetlerde önemli bir azalma oluşmamıştır. Ancak akma deformasyonu seviyesi olan ± 0.75 birim kayma değerinden sonra statik mukavemetlerde de önemli ölçüde azalma görülmüştür. Bu azalma aynı tekrarlı gerilme genliğinde uygulanan çevrim sayısına da bağlı olarak % 40'a kadar varabilmektedir. Tablo 4.2'de bu deney serisine ait özellikler görülmektedir.

Tablo 4.2 Gümüşdere numunesinde yapılan dinamik ve statik deney özellikleri ($\gamma_k=14.3$ kN/m³, $I_p=\%18$)

Deney No	σ_3 (kPa)	σ_c (kPa)	Kons. Süresi (gün)	B %	τ_d/σ_c'	Çevrim Sayısı	Statik Deney Yükleme Hızı (mm/dk)
DSG1	450	100	1	96	0.175	20	0.5
DSG2	400	100	1	98	0.175	5	0.5
DSG3	500	100	1	100	0.175	8	0.5
DSG4	450	100	1	96	0.175	12	0.5
DSG5	400	100	1	96	0.175	15	0.5
SG1	450	100	1	96	-	-	0.5

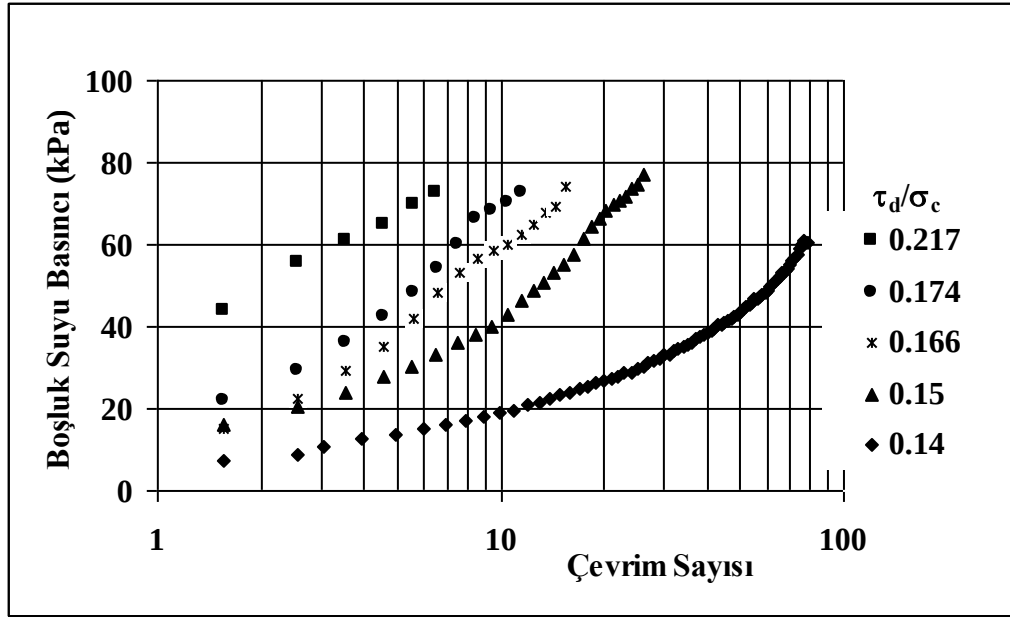
4.3 Laboratuvarda Hazırlanan Siltli Zeminlerin Dinamik Davranışı

Laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan diğer bir deney serisinde, plastisite indisi % 2, 11 ve 33 olan siltli zemin numunelerine $\pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonuna kadar tekrarlı yük uygulanmıştır. Plastisite indisinin % 2 olduğu Adapazarı Ozanlar Mahallesi örselenmiş siltli numuneleri kullanılarak yapılan deneylerde, 0.217-0.140 dinamik gerilme oranı aralığında tekrarlı yükleme yapılmıştır. Gerilme oranı arttıkça aynı birim kayma deformasyonu seviyesine ulaşmak için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir (Şekil 4.18). Ayrıca, 0.217 tekrarlı gerilme oranında yapılan deneyde numune, $\pm$ %5 birim kayma deformasyonuna 6 çevrimde ulaşırken, 0.174 ve 0.166 gerilme oranlarında bu seviyeye ulaşmak için gerekli çevrim sayıları sırasıyla 11 ve 14 tür. τ_d/σ_c gerilme oranı 0.140 ile 0.150 de yapılan dinamik deneylerde ise önemli ölçüde fark vardır. 0.150 gerilme oranında yapılan deneyde göçme seviyesine 23 çevrimde ulaşılırken, 0.140 gerilme oranında bu değer 89 çevrime çıkmaktadır.



Şekil 4.18 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%2, γ_{kc} =14.3 kN/m³)

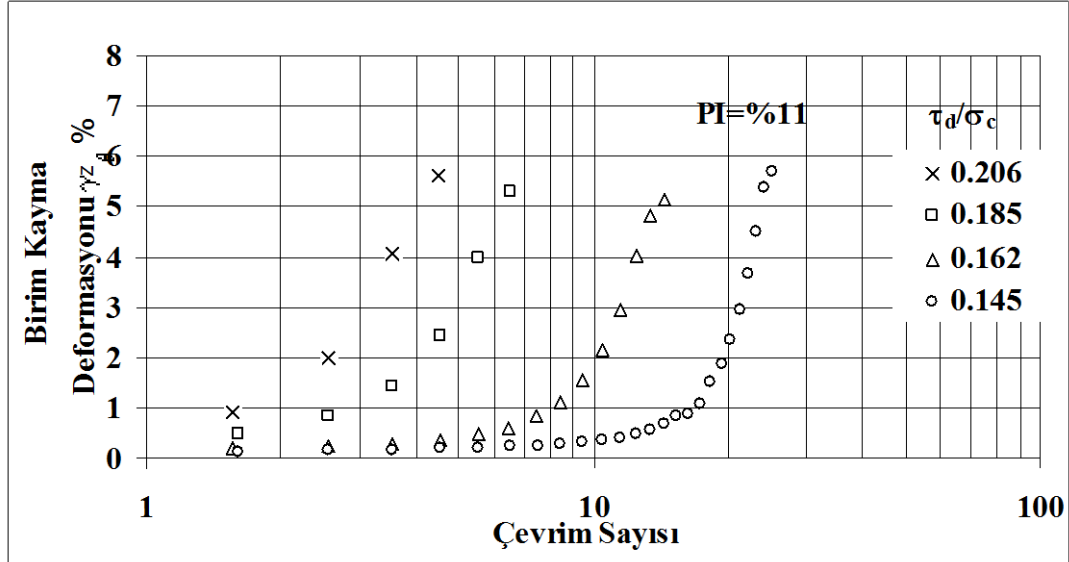
Genel olarak düşük plastisiteli siltli zeminde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basınçları, belirli bir gerilme seviyesinden sonra artmaktadır. Şekil 4.19’da görülen % 2 plastisiteli silt zemine ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisinde çevrim sayıları arttıkça, aynı gerilme oranında boşluk suyu basınçları da artmaktadır. Yaklaşık olarak 70.0-80.0 kPa seviyelerine kadar çıkan boşluk suyu basıncı değerleri, ilk 10 çevrimde gerilme oranı arttıkça artarken, bu artış 0.217 ve 0.174 gerilme oranında yapılan deneylerde artan birim kaymalara da bağlı olarak daha fazla olmaktadır.



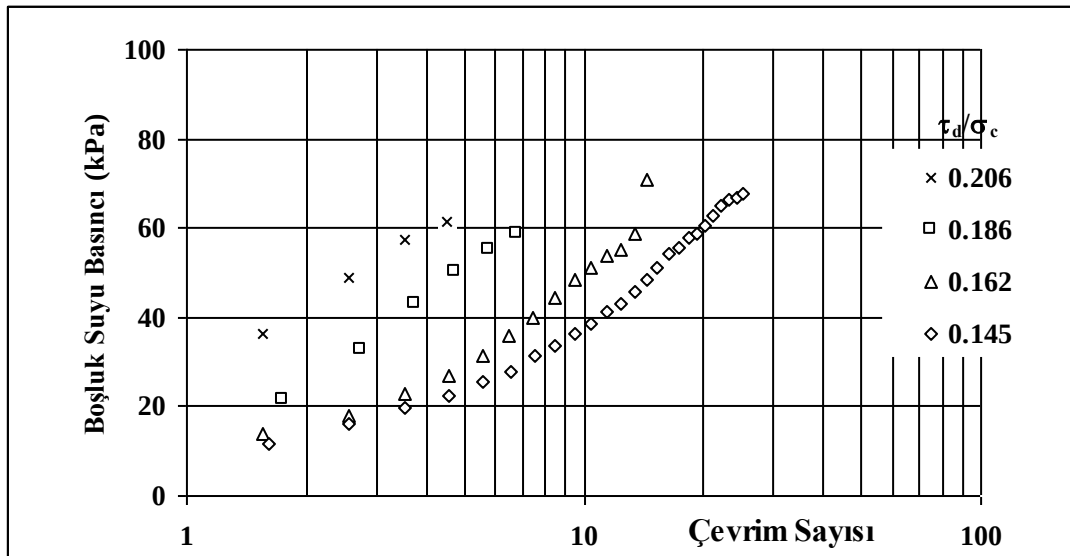
Şekil 4.19 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%2, γ_{kc} =14.3 kN/m³)

Bu deney grubunda diğer bir deney serisi Adapazarı Ozanlar Mahallesi’nden alınan siltli zemin kullanılarak yapılmıştır. Numunenin plastisite indisi % 11 dir. Bu deney serisinde deneyler 0.206 ile 0.145 gerilme oranları arasında zemin numunesinde $\pm$ %5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlıkları 12.9 kN/m³ tür. Şekil 4.20 ve 4.21’de bu numunede yapılan dinamik deneylerin sonuçları görülmektedir. Artan gerilme oranlarıyla birlikte numunede daha düşük çevrim sayılarında $\pm$ % 2.5 deformasyon seviyesine ulaşılmaktadır (Şekil 4.20). Tekrarlı kayma gerilmesi oranı (τ_d/σ_c) 0.206 olan deneyde siltli numune 3 çevrimde göçme seviyesine ulaşırken, 0.185 gerilme oranı uygulanan deneyde 4.5, 0.162 gerilme oranı uygulanan deneyde 11 ve gerilme oranı 0.145 olan deneyde de 21 çevrimde numunede ($\gamma=\pm$ %2.5) seviyesine ulaşılmaktadır. Aynı şekilde birim kaymalar

çevrim sayılarıyla birlikte arttıkça, boşluk suyu basınçları da yüksek değerlere çıkmaktadır (Şekil 4.21). Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisinde boşluk suyu basınçları 60.0-70.0 kPa seviyelerine 0.206 ve 0.185 gerilme oranlarında ilk 10 çevrim içerisinde; 0.162 ve 0.145 gerilme oranlarında yapılan deneylerde ise 15-25 çevrimde ulaşmaktadır. Yüklemenin başında çevrim sayısı ile birlikte hızla artan boşluk suyu basınçları, laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan deneylere ait tipik bir özellik olarak görülmektedir.



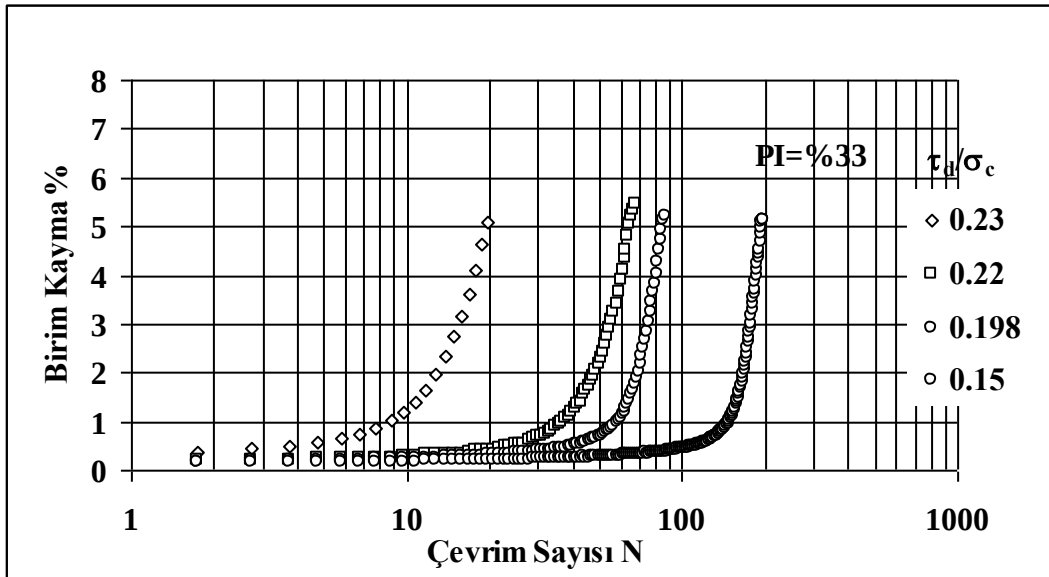
Şekil 4.20 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%11, γ_{kc} =12.9 kN/m³)



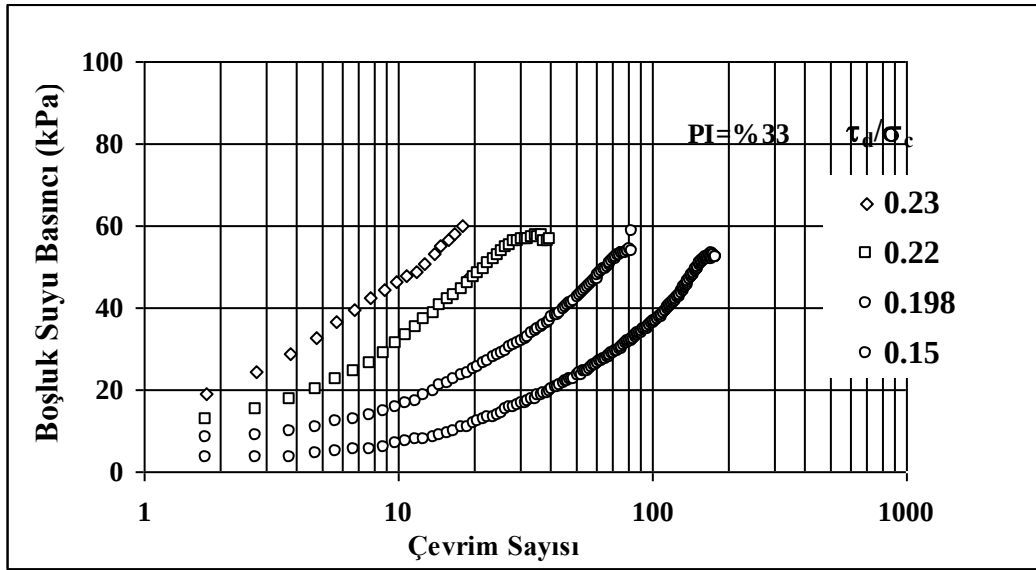
Şekil 4.21 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%11)

Artan bu boşluk suyu basınçları, numune dane yapısında bir gevşemeye, birim kaymalar da yumuşama ve kalıcı deformasyonlara sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla tekrarlı gerilme genlikleri altında siltli zemin numunesi, çevrim sayıları arttıkça mukavemet kayıpları sonucu taşıma gücü kaybına uğramaktadır.

Diğer bir deney serisi, Adapazarı Pabuççular Mahallesi'nden alınan ve plastisite indisi % 33 olan plastik silt numunesi kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.22 ve 4.23'te görülmektedir. Diğer deneylerde olduğu gibi, gerilme oranları arttıkça numunede göçmenin oluşması için gerekli çevrim sayıları azalmaktadır. Ancak bu deney serisinde aynı birim kayma deformasyonu seviyesine ulaşmak için plastisite indisi % 2 ve % 11 olan diğer numunelerde yapılan deneylere göre daha fazla çevrim sayısı gerektiği görülmektedir. Bu deney serisinde gerilme oranı, 0.23-0.15 arasında uygulanmıştır. Gerilme oranı 0.15 olan deneyde numune, 173 çevrimde göçmeye uğramıştır. Aynı gerilme oranı uygulanan plastisite indisi % 2 olan silt numunesine göre mukavemetin zeminin plastisitesine bağlı olarak arttığı göze çarpmaktadır. Bu numunede yapılan dinamik deneylerde 0.23 gerilme oranında 20 çevrimde, 0.22 gerilme oranında 67 çevrimde, 0.198 gerilme oranında 87 çevrimde numune göçmeye uğramaktadır.



Şekil 4.22 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı Pabuççular Mahallesi numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%33, γ_{kc} =12.9 kN/m³)



Şekil 4.23 Laboratuvar ortamında hazırlanan Adapazarı Ozanlar Mahallesi numunesinde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%33, γ_{kc} =12.9 kN/m³)

Şekil 4.23'te görülen boşluk suyu basıncı çevrim sayısı ilişkisinde ise, numunede oluşan boşluk suyu basınçları, 50.0-60.0 kPa mertebelerindedir. Plastisite indisi düşük diğer numunelerde ise aynı çevrim sayılarında daha fazla boşluk suyu basınçları oluşmuştur. Burada plastisitenin önemli ölçüde sonuçlarda etkili olduğu görülmektedir. Silt zeminin permeabilitesi, siltli kil ve plastik silt zemine göre daha yüksek olduğundan, boşluklardaki su, tekrarlı yükleme altında zemini terk etmeye çalışmaktadır. Ancak tekrarlı yükleme süresi, zemin suyunun drenajına imkan tanımadığından, boşlukları dolduran su, zemini terk edemeyerek boşluk suyu basıncı oluşumuna sebep olmaktadır. Tekrarlı yüklemeyle birlikte artan boşluk suyu basınçları nedeniyle, zemin iskeletinin sahip olduğu efektif gerilmelerde kayda değer azalmalar meydana gelmektedir. Diğer yandan kil yüzdesi arttıkça, zeminin permeabilitesi azalacaktır. Böylece aynı süre boyunca, aynı genlikli sinüzoidal yüklemeye maruz kalan killerde ve plastik siltlerde, plastik olmayan ve düşük plastisiteli silte oranla boşluk suyu basınçları daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Tablo 4.3'te Adapazarı numunelerinde yapılan dinamik deney özellikleri görülmektedir.

Tablo 4.3 Adapazarı siltli numunelerde yapılan dinamik deney özellikleri

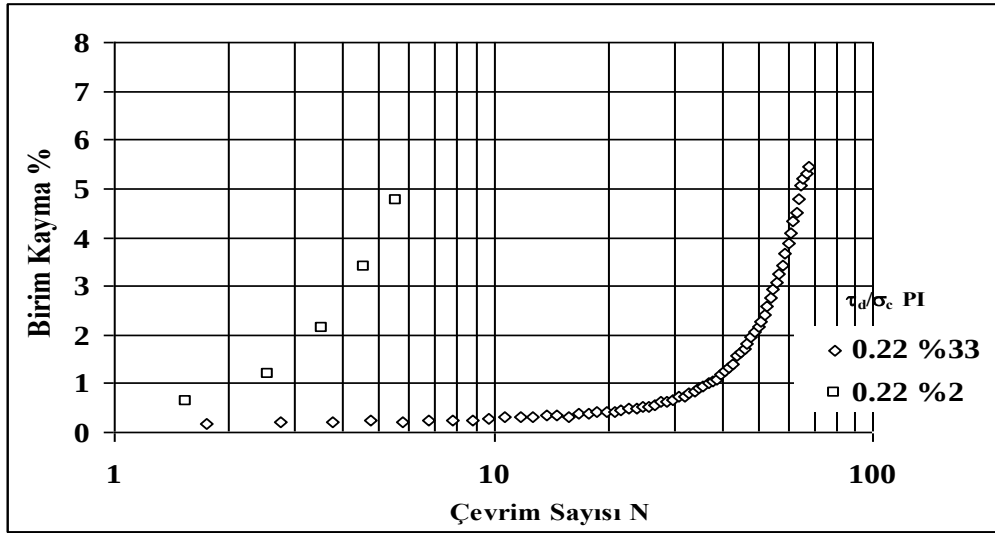
Deney No	σ_3 kPa	σ_c kPa	Kons. Süresi (gün)	I_p %	γ_{kc} (t/m ³)	B %	τ_d/σ_c'	Çevrim Sayısı ($\gamma_{z0}=\pm\%2.5$)
DSA1	500	100	1	2	1.46	96	0.217	4
DSA2	500	100	1	2	1.43	96	0.174	11
DSA3	450	100	1	2	1.42	98	0.166	13
DSA4	450	100	1	2	1.43	96	0.150	23
DSA5	550	100	1	2	1.44	98	0.140	89
DA1	525	100	1	11	1.29	98	0.206	3
DSA6	450	100	1	11	1.27	96	0.185	4.5
DA2	450	100	1	11	1.30	98	0.162	11.5
DA3	500	100	1	11	1.29	96	0.145	21
DA4	500	100	1	33	1.29	96	0.230	14
DA5	500	100	1	33	1.27	98	0.220	51
DA6	500	100	1	33	1.28	96	0.198	73
DA7	500	100	1	33	1.29	96	0.150	173

4.3.1 Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerin Dinamik Davranışlarına Plastisitenin Etkisi

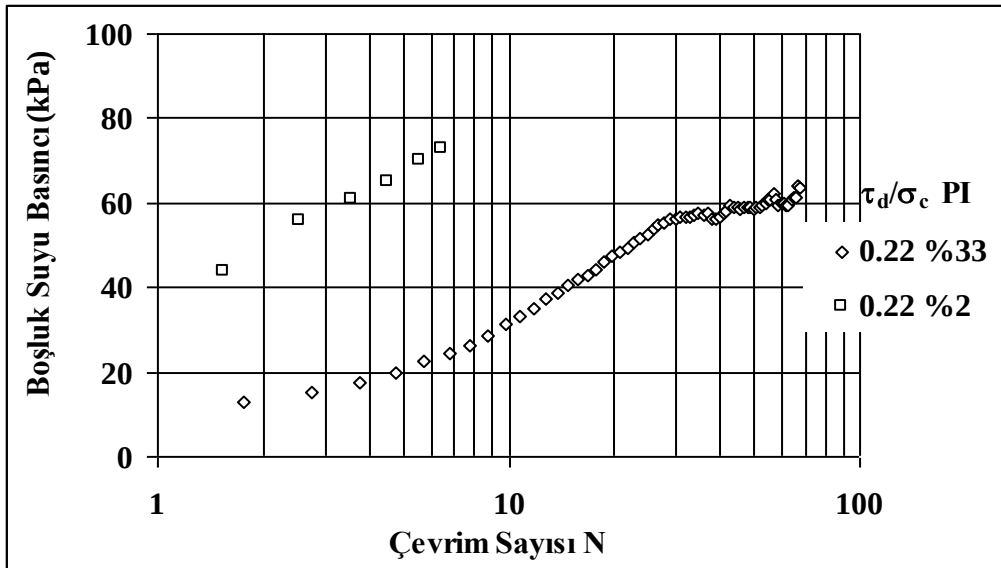
Bu çalışmada kullanılan örselenmiş kumlu ve killi silt zeminlerle, laboratuvarda değişen plastisite indislerinde numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerde değişik kayma gerilmesi oranlarında dinamik deneyler yapılmıştır. Adapazarı'ndan getirilen numuneler silt karakter göstermektedir. Belli oramlarda kum ve kil miktarı olan bu siltlerin dinamik deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametrenin plastisite indisi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı, ince dane yüzdesi ve doygunluk derecesi de siltli zeminlerin dinamik davranışına etkiyen diğer parametreler olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.24'te 0.22 dinamik gerilme oranında, 12.8-14.6 kN/m³ kuru birim hacim ağırlığında, % 2 ve % 33 plastisite indisine sahip laboratuvar numunelerine ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Plastisite indisi % 33 olan numunede birim kaymalar, çok daha yüksek çevrim sayılarında göçme seviyesine ulaşırken (N=52), % 2 plastisiteli siltte kuru birim hacim ağırlığı daha fazla olmasına rağmen, birim kaymalar yüklemenin başında hızla artmaktadır. Dolayısıyla plastisitesi daha yüksek olan numunenin dinamik mukavemeti de yüksek olmaktadır. Artan bu birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçları da % 2 plastisiteli siltte

hızla artarak yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Şekil 4.25). 0.22 gerilme oranında, plastik silt (MH) numunesinde +% 2.5 birim kayma deformasyonunda boşluk suyu basıncı 58.0 kPa olmaktadır. Oysa, % 2 plastisiteli numunede aynı tekrarlı gerilme oranının etkisi altında N=52 çevrimde göçmeye ulaşılmakta ve bu deformasyon seviyesinde boşluk suyu basıncı 62.0 kPa olmaktadır. Düşük plastisiteli siltte meydana gelen mukavemet kayıpları, hızla artan birim kaymaların yanında, tekrarlı yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarına da bağlı olmaktadır.

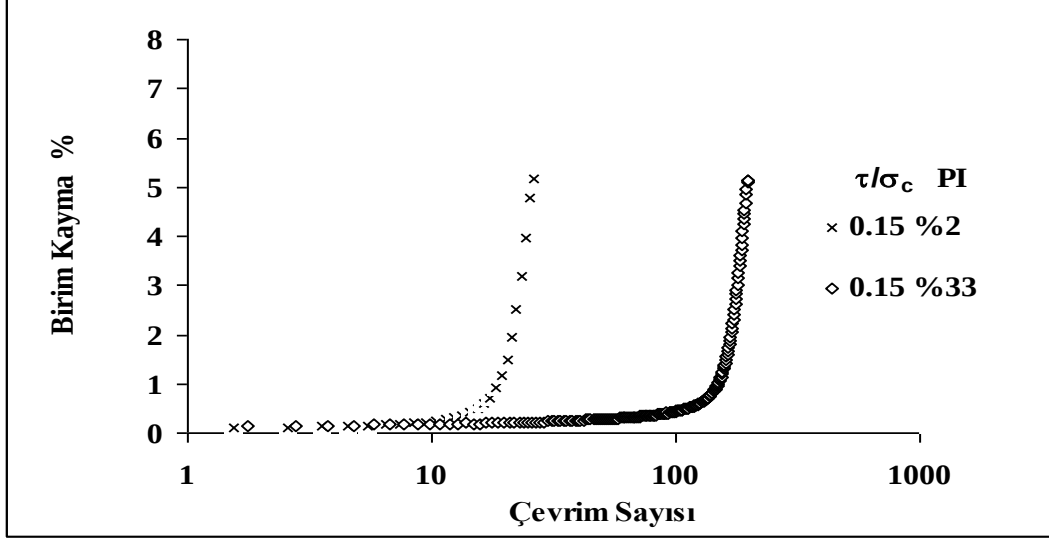


Şekil 4.24 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı siltli numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.22$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)

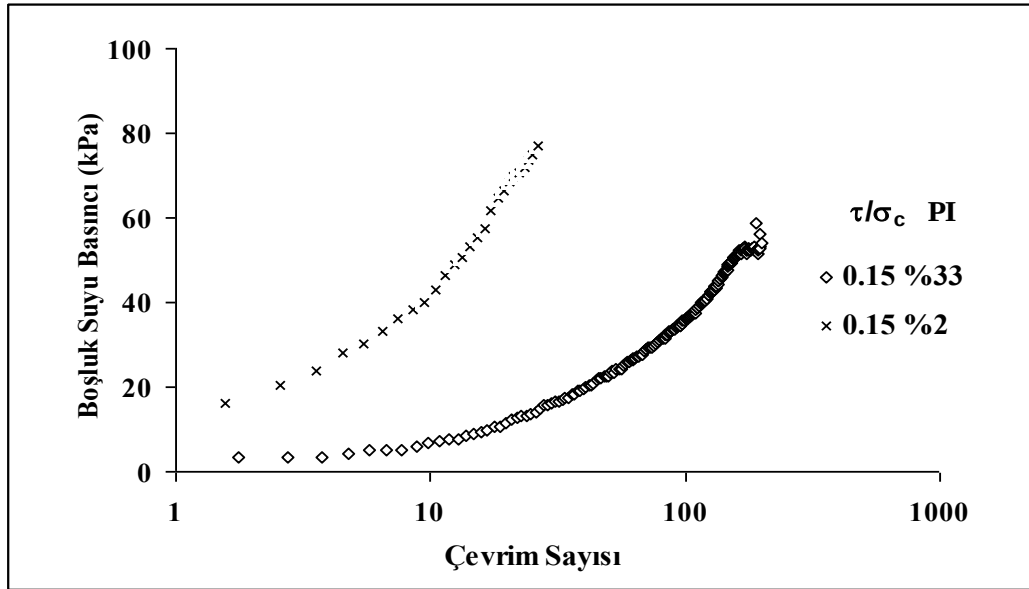


Şekil 4.25 Laboratuvarda hazırlanan Adapazarı siltli numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.22$)

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de 0.15 gerilme oranında iki farklı numunede yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre dinamik davranış plastisite indisinden etkilenmektedir. Plastisite indisi arttıkça dinamik mukavemet te artmaktadır. Bunun yanında artan plastisiteyle birlikte boşluk suyu basınçları da daha düşük seviyelerde kalmakta, birim kaymalar ise daha yüksek çevrim sayılarında $\pm$ % 2.5 seviyesine ulaşmaktadır.



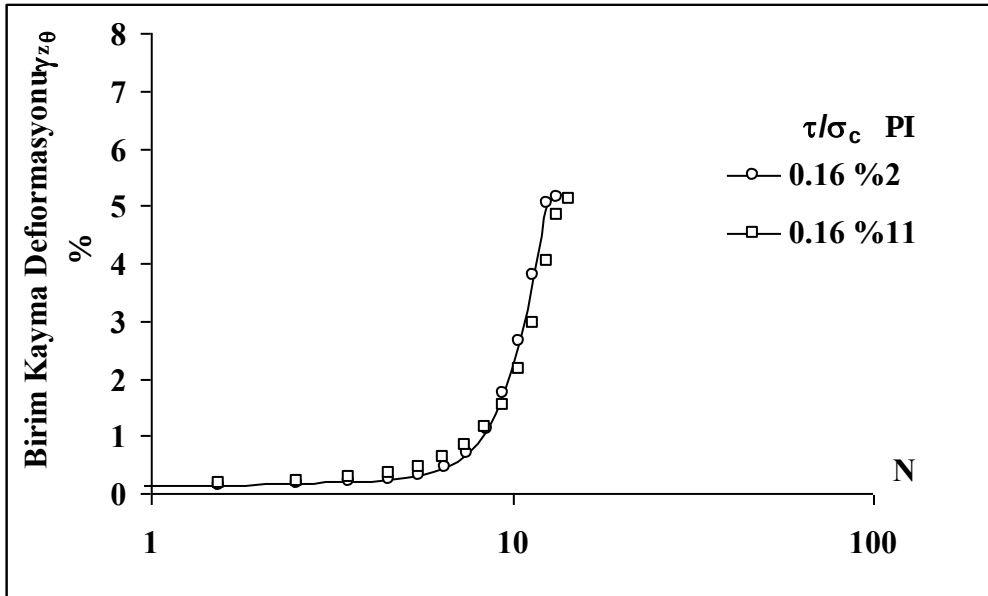
Şekil 4.26 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.15$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3$ kN/m³)



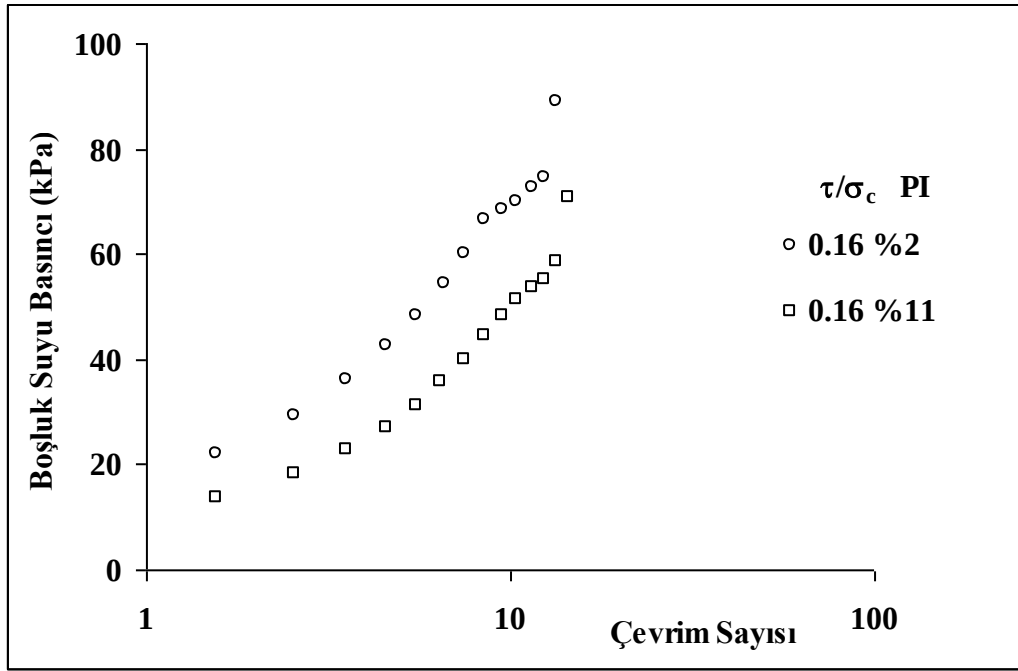
Şekil 4.27 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.15$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3$ t/m³)

Şekil 4.27’de konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı 14.3 kN/m^3 olan ML1 ve 12.9 kN/m^3 olan MH’ta oluşan boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir. Daha gevşek yapıda olan yüksek plastisiteli silt numunesinde nihai boşluk suyu basıncı 60.0 kPa seviyesindedir. ML1 numunesinde ise deney sonunda oluşan en yüksek boşluk suyu basıncı 78.0 kPa değerindedir. Şekil 4.28’de 0.16 gerilme oranında yapılan dinamik deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Plastisitesi $\% 2$ ve $\% 11$ olan siltli numunelerde davranış benzemektedir. Buna göre ML2 numunesinde birim kaymaların plastisite indisinin daha yüksek olmasından dolayı daha büyük çevrim sayılarında göçme seviyesine ulaşması beklenirken, konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı 12.9 kN/m^3 olduğundan, plastisitesi düşük silt zeminle aynı çevrim sayısında göçme seviyesine ulaşılmaktadır ($N=12$). ML1 numunesinde ise plastisite indisi düşük olmasına karşın, 14.3 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlığındaki numunenin davranışı ML2’ye benzemektedir.

Şekil 4.29’da 0.16 gerilme oranında yapılan deneylere ait en büyük boşluk suyu basıncı değerlerinin çevrim sayısı ile olan ilişkisi görülmektedir. ML1’de boşluk suyu basınçları 90.0 kPa seviyesine ulaşırken, ML2’de, boşluk suyu basınçları 70.0 kPa değerine varmaktadır. Boşluk suyu basıncı artışları siltli numunenin plastisitesi arttıkça azalmaktadır. Bu ise düşük plastisiteli siltte mukavemet kayıplarının hızla artan birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçlarına da bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.28 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.16$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)

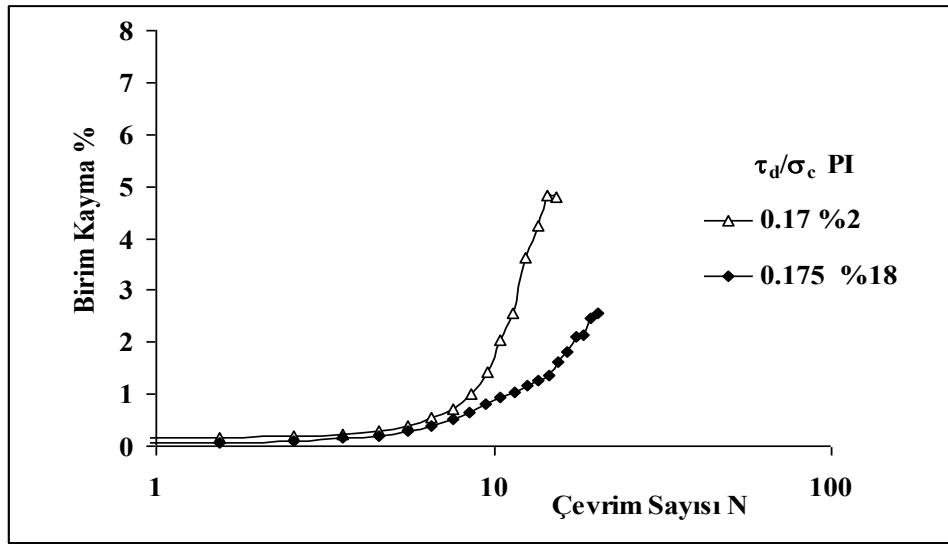


Şekil 4.29 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.16$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)

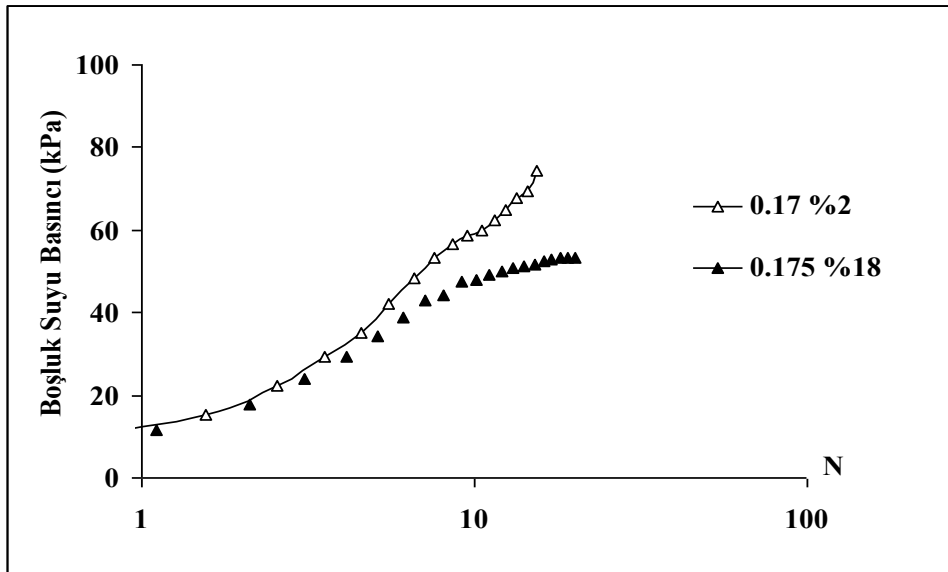
Şekil 4.30'da 0.17 dinamik gerilme oranında ve 14.3 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlığında yapılan iki farklı dinamik deney sonucu görülmektedir. Ortalama birim kaymalar silt numunesinde yaklaşık 12 çevrim sayısında $\pm\% 2.5$ seviyesine ulaşırken, % 18 plastisiteli siltli kil zeminde bu deformasyon seviyesine 20 çevrimde ulaşılmıştır. Silt numunesinde ise $\pm\% 5$ deformasyon seviyesi 15 çevrimde elde edilmektedir. Aynı numune hazırlama yöntemiyle aynı kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan bu iki numunenin davranışları arasındaki farklılık öncelikle plastisitelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak yapılan deneyler, % 18 plastisiteli siltli kil numunesinin tekrarlı yükleme altında Adapazarı numunelerine göre fazla bir mukavemetinin olmadığını göstermektedir. Bunun nedeni olarak Gümüşdere numunesinde % 28 kum içeriğinin, dinamik mukavemet üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Buna göre siltli kilde kum yüzdesi numunede dinamik mukavemeti azaltıcı yönde etkili olmaktadır. Ancak ince daneli zeminde kum miktarının artmasıyla numunede meydana gelen mukavemet kayıplarının detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Bu numunede birim kaymalar, düşük plastisiteli silte göre daha düşük çevrim sayılarında göçme seviyesine ulaşmaktadır. Siltli kil zeminin bu davranışında kum yüzdesinin yanısıra dane yapısında ki farklılığın da etkili olduğu düşünülebilir. Kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin danesel ve boşluklu yapılarının durumu ve konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeye

meydana gelen değişimleri ve deney sonuçlarına olan etkisi ayrıca Bölüm 5’te anlatılmaktadır.

Şekil 4.31’de 0.17 dinamik gerilme oranında yapılan deneylere ait boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi görölmektedir. ML1’de artan boşluk suyu basınçlarının hızla yüksek değerlere ($U=75.0$ kPa) çıkmasıyla efektif gerilmeler azalırken, CL’de ise mukavemet kayıpları boşluk suyu basınçlarının yanında tekrarlı yüklemeyle birlikte hızla artan birim kayma deformasyonlarına bağlı olmaktadır (Şekil 4.30). Böylece hem siltli kil hem de düşük plastisiteli silt zemin tekrarlı yüklemde önemli oranda mukavemet kaybına uğramaktadır.

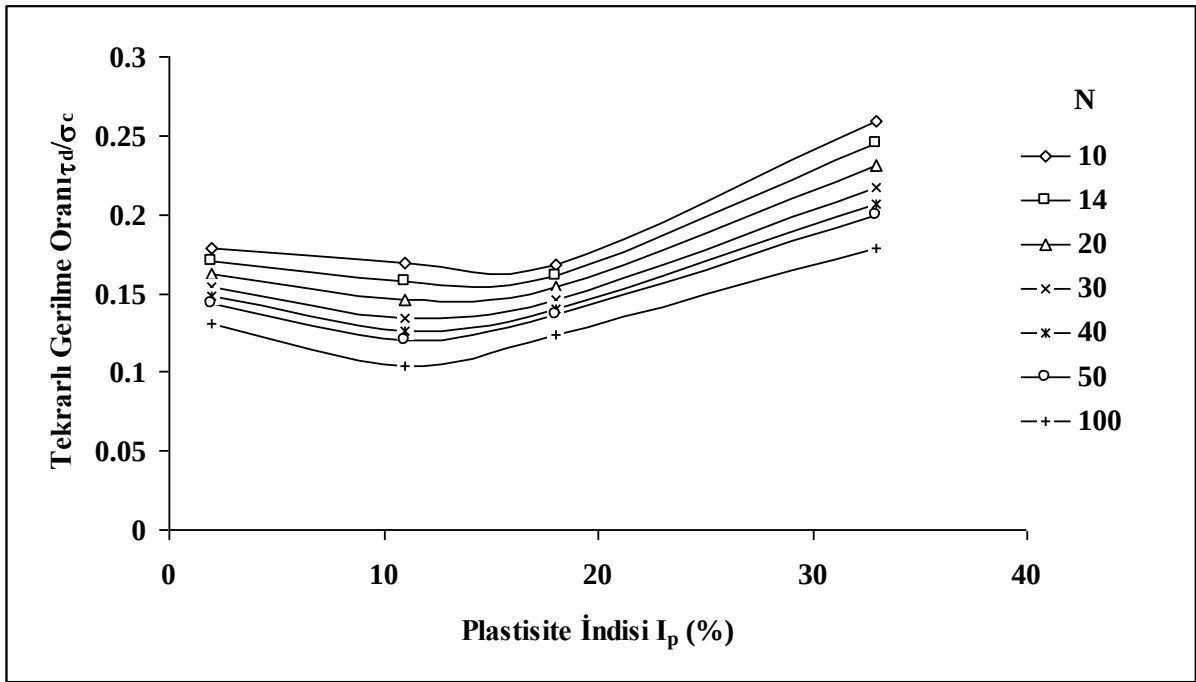


Şekil 4.30 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($\tau_d/\sigma_c=0.17$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3$ kN/m³)



Şekil 4.31 Laboratuvar numunelerinde boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi

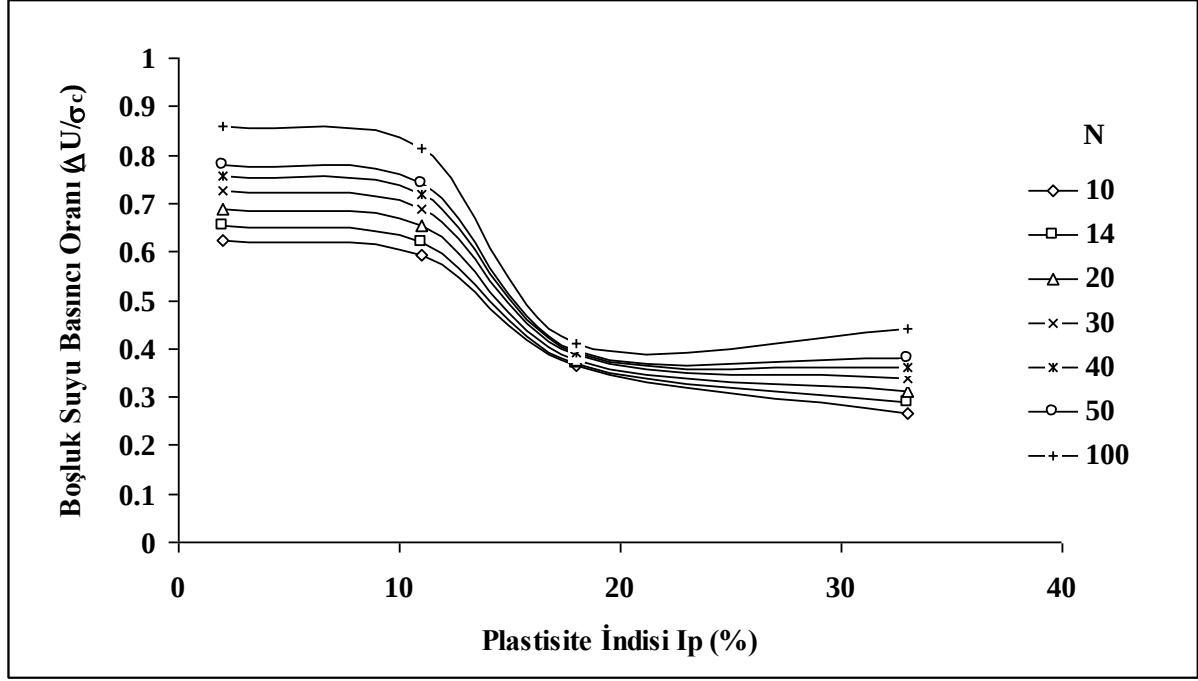
Bu iki tür zemin numunesinin olası büyük bir depremde suya doygun olduğu durumda taşıma gücü kaybına uğrayacağından temel altı zemini olarak tehlike arz ettiği ve böyle zeminlerin bulunduğu ortamlarda zemin iyileştirme yöntemlerinden yararlanılması gerektiği önerilebilir. Bu çalışmada kullanılan örselenmiş numunelerin dinamik davranışlarına plastisite indisinin etkisi Şekil 4.32'deki tekrarlı gerilme oranı - plastisite indisi ilişkisinde belirtilmiştir. Laboratuvar numunelerinde göçme kriteri olarak belirlenen $\pm\%$ 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan dinamik deneylerde uygulanan tekrarlı gerilme oranının numunelerin plastisite indisine göre değişimi görülürken artan çevrim sayılarında davranış plastisiteden daha fazla etkilenmektedir. Buna göre uygulanan yükleme çevrim sayısı arttıkça aynı plastisitedeki numunenin göçme seviyesine erişmesi için daha düşük gerilme seviyesi yeterli olmaktadır. Bununla birlikte siltlerde plastisite indisi % 11'e kadar arttıkça zeminin dinamik mukavemeti azalırken, bu değerden sonra plastisite arttıkça aynı çevrim sayısında numunenin göçmeye ulaşması için daha büyük gerilme seviyeleri gerekmektedir.



Şekil 4.32 Tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi değişimi ($\gamma_{z0}=\pm\%$ 2.5, $\gamma_{kc}=12.9-14.3$ kN/m³)

Plastisite indisi ile boşluk suyu basıncı oranının değişimi ise Şekil 4.33'te görülmektedir. Boşluk suyu basınçları plastisite indisinin % 2 ve % 11 olduğu silt numunelerinde fazla yüksek değerlerde (65.4-85.8 kPa) olup artan plastisite indisiyle fazla değişmemektedir. % 18 ve % 33 plastisiteli numunelerde ise önemli ölçüde azalmaktadır (28.7-44.3 kPa). Ayrıca, % 2 plastisiteli silt zeminde çevrim sayıları arttıkça, numunede oluşan boşluk suyu basınçları

arasındaki fark artmaktadır (20.4 kPa). Benzer şekilde % 11 plastisiteli zeminde oluşan boşluk suyu basınçları arasında da artan çevrim sayısı ile birlikte 19.3 kPa bir fark oluşurken, % 18 plastisite indisli numunede oluşan boşluk suyu basınçları arasında fazla bir fark olmamaktadır (9.4 kPa). Aynı şekilde % 33 plastisite indisli plastik silt numunesinde ki boşluk suyu basınçları arasında da en fazla 15.6 kPa fark oluşmaktadır. Genel olarak boşluk suyu basınçlarının % 11 plastisiteden sonra azaldığı ve $PI=25$ 'ten sonra ise arttığı söylenebilir.

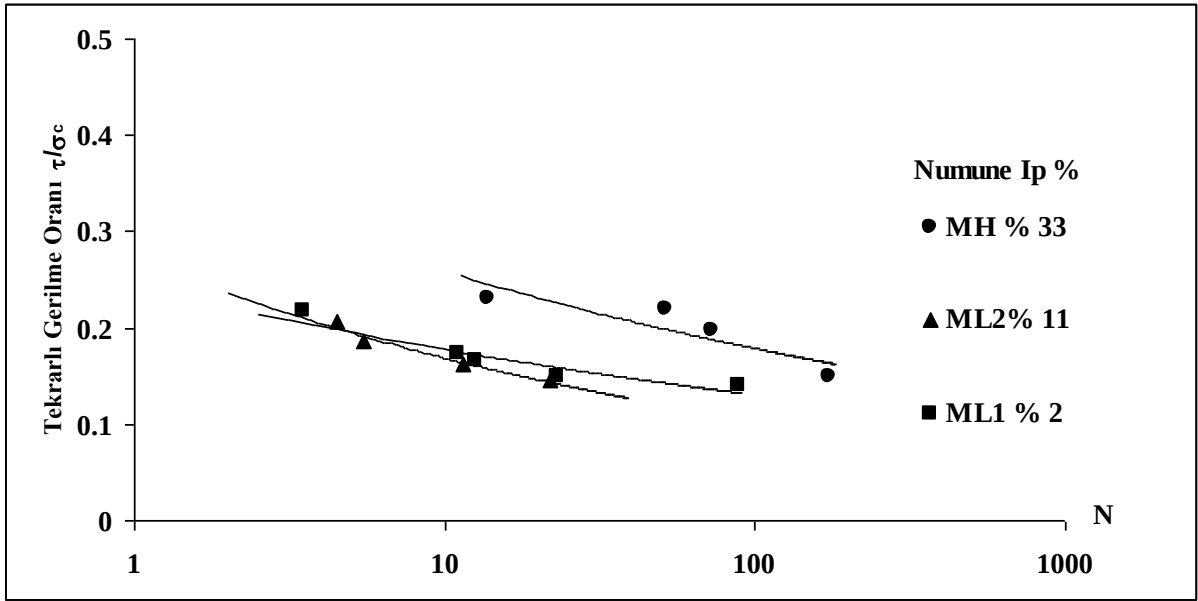


Şekil 4.33 Boşluk suyu basıncı oranı-plastisite indisi değişimi ($\gamma_{z0}=\pm 2.5\%$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3$ kN/m^3)

4.3.2 Laboratuvarda Hazırlanan Siltli Numunelerin Dinamik Mukavemetleri

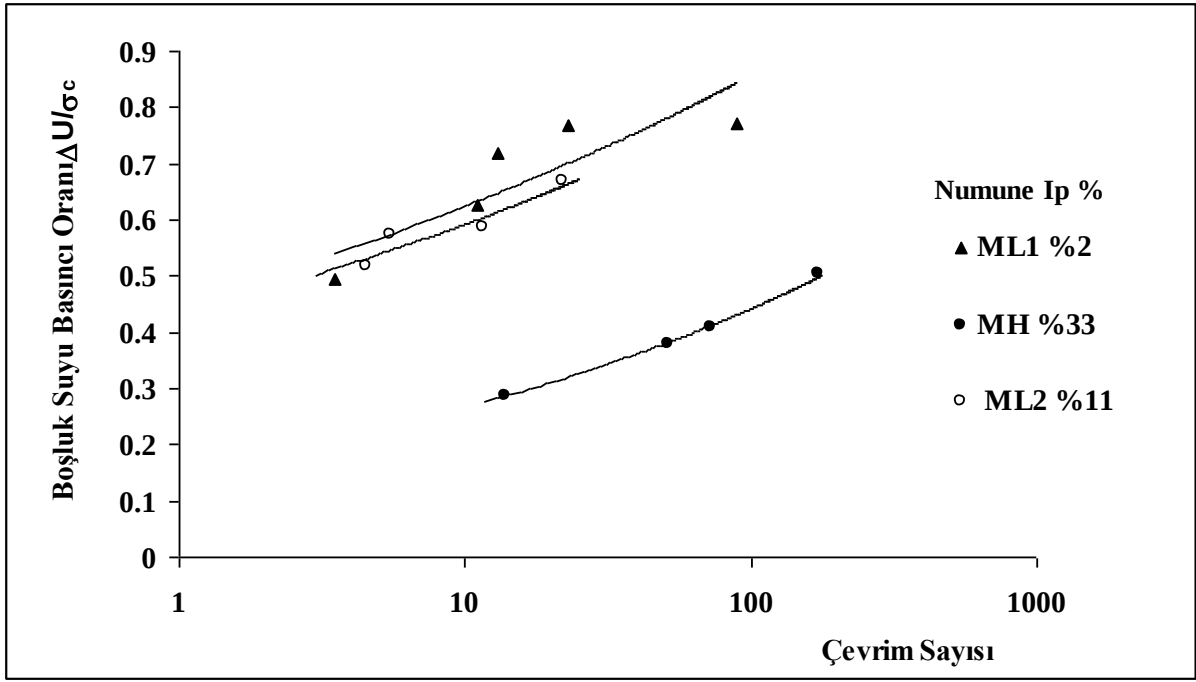
Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları, dinamik mukavemet özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan dinamik gerilme oranı (τ_d/σ'_c)-çevrim sayısı (N) ilişkilerinden yararlanılarak açıklanmaktadır. Buna göre numuneye uygulanan tekrarlı gerilme genliği ile göçme seviyesi olarak belirlenen ± 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine karşı gelen çevrim sayıları, yarı logaritmik eksen takımında gösterilmektedir. Şekil 4.34'te Adapazarı numunelerine ait gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Farklı plastisitede olan bu numunelerden % 33 plastisite indisine sahip olan silt numunesinin dinamik mukavemeti diğer iki numuneye göre daha yüksektir. Düşük plastisiteli iki silt numunesinden % 11 plastisite indisli ML2'de dinamik mukavemet biraz

daha düşük seviyededir. Plastisitesi yüksek olmasına rağmen, konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı daha düşük olduğu için (12.9 kN/m^3), dinamik davranış özelliği de daha farklı olmaktadır. Ancak araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalar, siltlerde belirli bir plastisite seviyesine kadar artan plastisite ile dinamik mukavemetin azaldığı, bu seviyeden sonra ise arttığını göstermiştir. Bu durum dikkate alındığında, elde edilen bu sonuç, düşük plastisiteli siltlerde dinamik mukavemetin belirli sınır değer bir plastisite indisine bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.34 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 2-33$, $\gamma_{kc} = 12.9-1.43 \text{ kN/m}^3$)

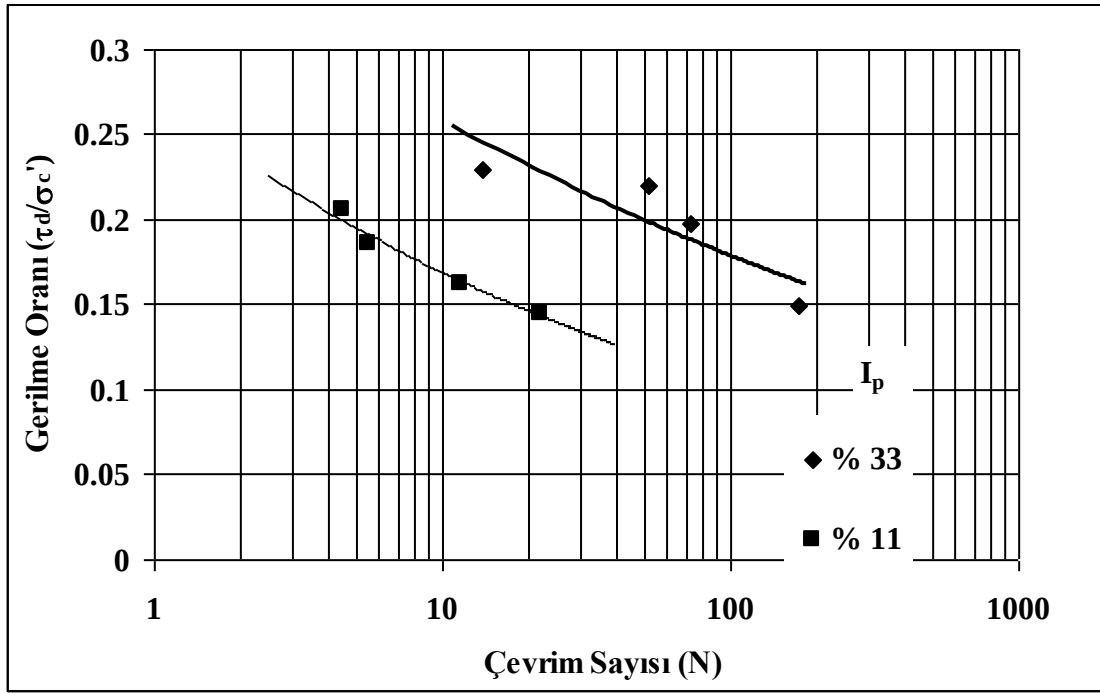
Şekil 4.35'te aynı numunelere ait $\pm \% 2.5$ birim kayma deformasyonuna karşı gelen boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Numunelerin plastisite indisleri arttıkça aynı çevrim sayısındaki boşluk suyu basınçları da azalmaktadır. Örneğin $N=12$ çevrim sayısında, $\% 33$ plastisiteli plastik silt numunesinde boşluk suyu basıncı yaklaşık 28.0 kPa elde edilirken, plastisitesi $\% 11$ olan ML2 numunesinde yaklaşık 59.0 kPa , $\% 2$ plastisiteli ML1 numunesinde de bu seviye yaklaşık 63.0 kPa dır.



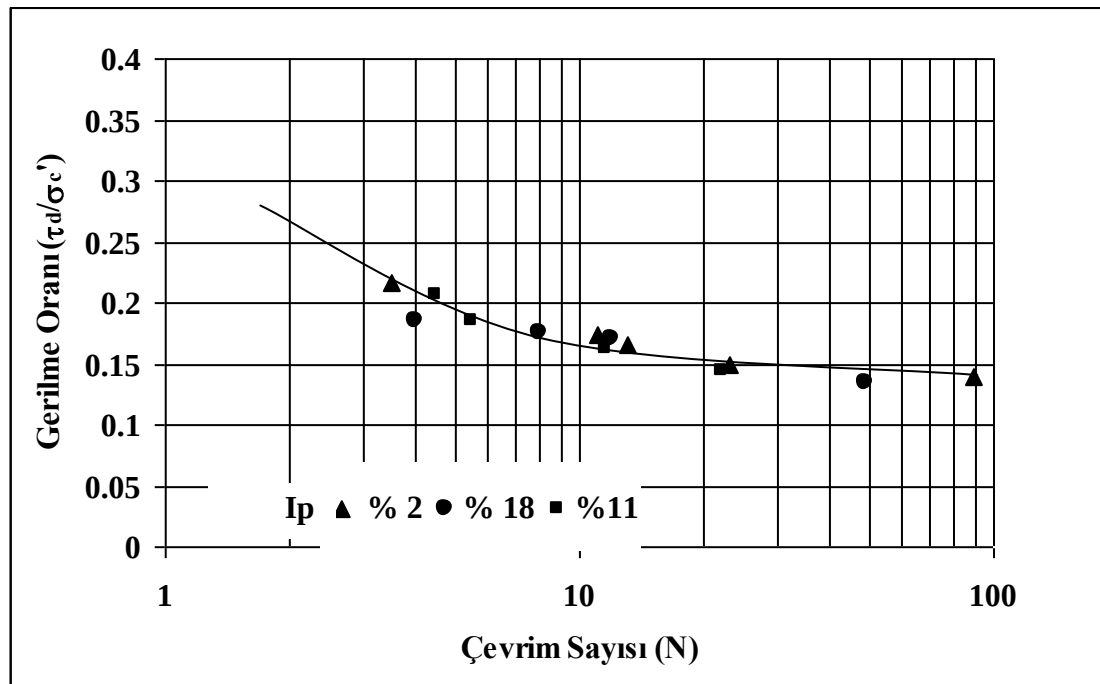
Şekil 4.35 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 2-33$, $\gamma_{kc} = 12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)

Plastisite indisinin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi ayrıca Şekil 4.36'da da görülmektedir. Dinamik deneylerde uygulanan gerilme seviyesi arttıkça siltli numuneler daha düşük çevrim sayılarında $\pm \%2.5$ birim kayma deformasyonuna ulaşmaktadır. Siltli zeminde $\%11$ plastisite seviyesinden sonra plastisite indisi arttıkça dinamik mukavemet de artmaktadır. Bu yüzden $\% 33$ plastisiteli siltte dinamik mukavemet diğer parametrelerin sabit olduğu dinamik deneylerde, plastisite indisi yüksek olduğu için daha yüksek mukavemete sahiptir.

Şekil 4.37'de plastisite indisi $\% 2-18$ aralığında değişen üç farklı zeminde yapılan deneylerden elde edilen dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi $\pm\% 2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesi için çizilmiştir. Siltli zeminde $\% 18$ plastisite indisine kadar dinamik davranışın tek bir eğriyle temsil edilebildiği görülmektedir. Gerilme oranındaki az bir miktar düşme, siltli numunenin göçme seviyesine ulaşması için çok daha büyük çevrim sayılarında tekrarlı yüke maruz kalmasını gerektirmektedir. Silt içeren zemin numunelerinde yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerinde davranışlar $\% 33$ plastisiteli plastik silt numunesi dışında birbirine benzemektedir. Ancak farklı plastisitede yapılacak ilave deneylerle siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışına plastisite indisinin etkisi araştırılmalıdır.



Şekil 4.36 Adapazarı örselenmiş numunelerine ait dinamik deney sonuçları ($\gamma_{kc}=12.9 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{z0}=\pm \% 2.5$)

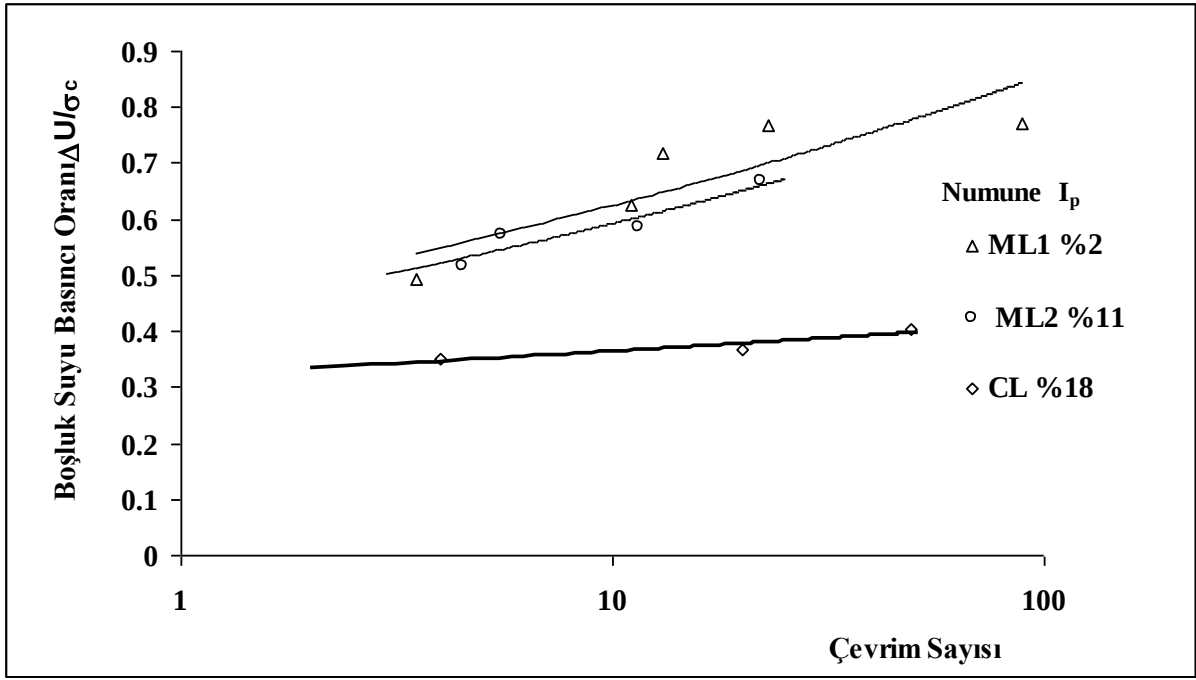


Şekil 4.37 Laboratuvar numunelerinde yapılan deneylere ait, dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 2-18$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)

Şekil 4.38’de aynı zemin numunelerinde oluşan boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir. Dinamik mukavemet eğrisinin tersine, farklı plastisitelerdeki siltlerin boşluk suyu basıncı davranışları farklı olmaktadır. Silt zeminin plastisite indisi arttıkça aynı çevrim sayısında oluşan boşluk suyu basınçları azalmaktadır. Örneğin 20 çevrimde, % 18 plastisiteli numunede boşluk suyu basıncı 36.0 kPa, % 11 plastisiteli zeminde 65.0 kPa, % 2 plastisiteli numunede ise 69.0 kPa değerindedir. Tablo 4.4’te laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik deneylere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 4.4 Laboratuvarda hazırlanan farklı plastisitelerdeki numunelerde göçme seviyesine kadar yapılan dinamik deneyler

Deney No	σ_3 kPa	σ_c kPa	Kons. Süresi (gün)	I_p %	γ_{kc} (t/m ³)	B %	τ_d/σ'_c	Çevrim Sayısı ($\gamma_{z0}=\pm\%2.5$)
DG1	350	100	3	18	15.2	98	0.163	35
DG2	400	100	3	18	15.0	98	0.186	17
DG3	400	100	3	18	14.9	98	0.201	4
DG4	400	100	1	18	1.52	96	0.185	5
DSG1	450	100	1	18	1.49	96	0.175	20
DG5	450	100	1	18	1.49	96	0.134	49
DSA1	500	100	1	2	1.46	96	0.217	4
DSA2	500	100	1	2	1.43	96	0.174	11
DSA3	450	100	1	2	1.42	98	0.166	13
DSA4	450	100	1	2	1.43	96	0.150	23
DSA5	550	100	1	2	1.44	98	0.140	89
DA1	525	100	1	11	1.29	98	0.206	3
DSA6	450	100	1	11	1.27	96	0.185	4.5
DA2	450	100	1	11	1.3	98	0.162	11.5
DA3	500	100	1	11	1.29	96	0.145	21
DA4	500	100	1	33	1.29	96	0.230	14
DA5	500	100	1	33	1.27	98	0.220	51
DA6	500	100	1	33	1.28	96	0.198	73
DA7	500	100	1	33	1.29	96	0.150	173

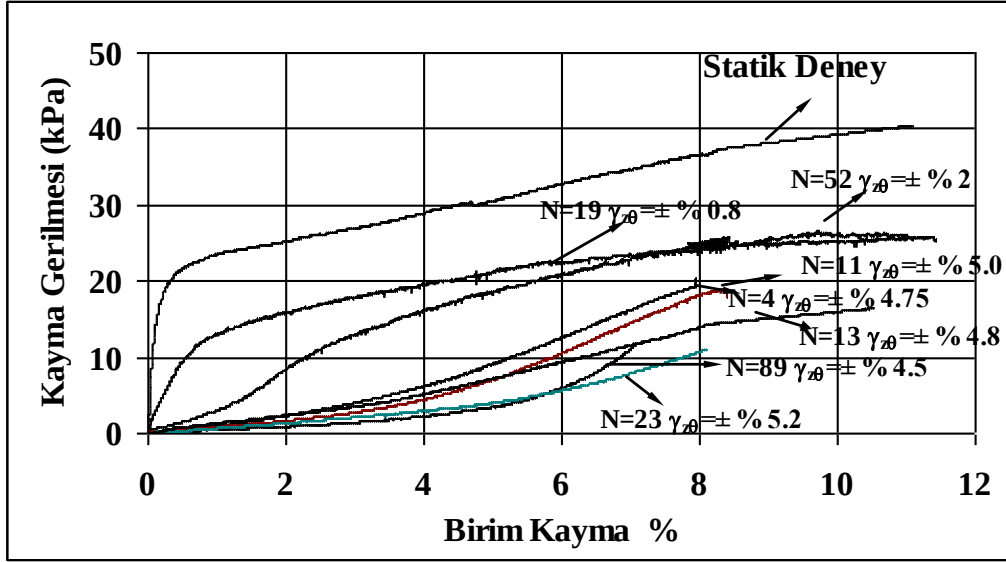


Şekil 4.38 Üç farklı laboratuvar numunesinde boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi

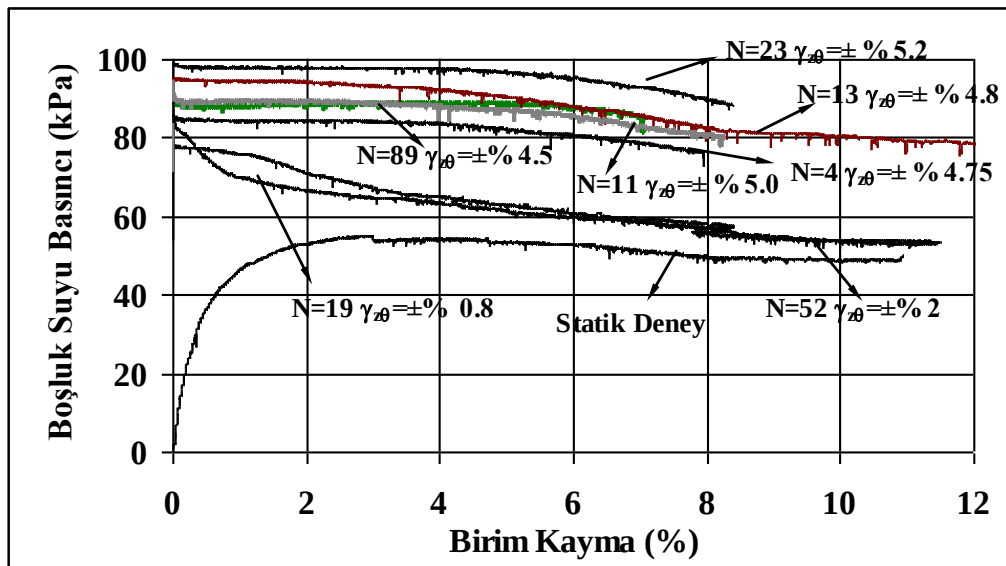
4.3.3 Düşük Plastisiteli Siltlerde Tekrarlı Yüklemenin Statik Mukavemete Etkisi

Laboratuvarda hazırlanan numunelerle yapılan bir diğer deney serisinde ise % 2 plastisitedeki siltli numuneler, $\pm\% 5$ birim kayma deformasyonu seviyesine kadar tekrarlı yüke maruz bırakıldıktan sonra statik deney yapılmıştır. Statik deney sonuçları Şekil 4.39 ve 4.40'ta görülmektedir. Buna göre farklı tekrarlı gerilme oranında yapılan dinamik deneylerden sonra statik gerilme-şekil değiştirme ilişkileri arasında çevrim sayısına bağlı olan bir davranış söz konusudur. Numunelerde göçme seviyesine ulaşıldığından sonuçlar arasında pek bir farklılık olmasa da, tekrarlı gerilme oranı arttıkça, dinamik deney sonrası statik mukavemetler de az bir miktarla da olsa yüksek çıkmaktadır. Çevrim sayısının azalmasıyla böyle bir durum söz konusu olurken dinamik deney sonrasında meydana gelen çift genlikli % 10 birim kayma deformasyonu seviyesinin, silt numunesinin statik mukavemetinde yaklaşık % 50 gibi bir azalmaya sebep olduğu görülmektedir (Şekil 4.39). Bunun yanında 0.140 tekrarlı gerilme oranında 19 çevrimde yapılan deneyde $\pm \% 0.8$ birim kayma seviyesine ulaşılmış, sonrasında statik mukavemet $\pm\%2$ birim kayma seviyesine ulaşılan deneydeki değerine yakın elde edilmiştir. Yine de drenajsız statik mukavemetlerin aynı gerilme oranında artan çevrim sayılarıyla önemli ölçüde azaldığı söylenebilir. Şekil 4.40'ta da aynı numunede dinamik deneylerdeki göçme seviyesinden sonraki boşluk suyu basıncı davranışı görülmektedir. Gerilme-şekil değiştirmenin tersine artan tekrarlı gerilme oranı ile boşluk suyu basıncında bir

azalma söz konusudur. Genel olarak statik yüklemenin başında 95 kPa değerine ani olarak artan boşluk suyu basınçları, devam eden yüklemeyle birlikte yaklaşık 10 kPa'lık bir azalmaya uğramaktadır. Ancak göçme seviyesine ulaşan numunede boşluk suyu basınçları arasında fazla bir fark elde edilmemiştir. Bundan başka 19 ve 52 çevrimda yapılan dinamik deney sonrasında boşluk suyu basınçlarının % 10 birim kayma deformasyonuna kadar 20 kPa'dan fazla azaldığı söylenebilir.



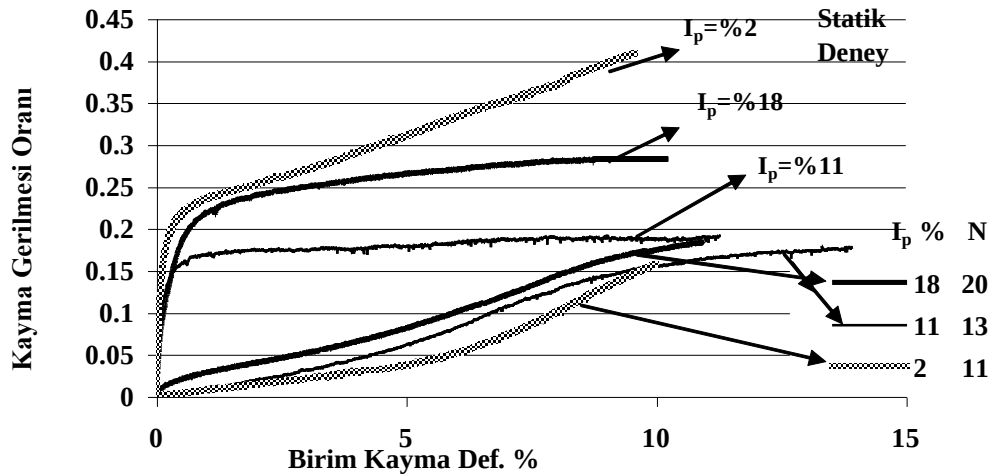
Şekil 4.39 Kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu değişimi ($I_p = 2$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ kN/m}^3$)



Şekil 4.40 Boşluk suyu basıncı-birim kayma değişimi ($I_p = 2$, $\gamma_{kc} = 14.3 \text{ kN/m}^3$)

4.3.4 Laboratuvar Numunelerinde Tekrarlı Yükleme Sonrası Statik Mukavemetlere Plastisitenin Etkisi

Şekil 4.41’de % 2, 11 ve 18 plastisite indisine sahip üç farklı laboratuvar numunesinde ölçülen statik kayma mukavemetleri ve aynı tekrarlı gerilme oranında $\pm\%$ 2.5 birim kayma seviyesine kadar yapılan dinamik deney sonrasında statik deney sonuçları görülmektedir. Daha önce 3. bölümde belirtildiği gibi, plastisite indisi % 2 olan siltte % 10 birim kaymaya karşı gelen statik mukavemet değeri diğer numunelere göre daha büyüktür. Burada kum zemine benzer davranış gözükürken farklı bir yapıya sahip siltli zemin numunesinde, danelerarası sürtünmeden kaynaklanan mukavemetin etkili olduğu söylenebilir. Dinamik deney sonrası göçme seviyesine kadar yapılan statik deneylerde ise, $\pm\%$ 2.5 birim kayma deformasyonunda göçmeye ulaşmış farklı plastisitedeki siltli ve killi zeminlerde statik mukavemet, plastisite indisi yüksek olan siltli kil zemine göre daha az bir miktarla düşmesinin yanında yaklaşık olarak birbirine aynı elde edilmiştir (Şekil 4.41).



Şekil 4.41 Tekrarlı yükleme sonrası statik mukavemetlere plastisitenin etkisi

Sonuçlarda ise dinamik yük uygulanarak % 5 çift genlikli deformasyon seviyesine ulaşan numunelerin deney sonrası statik mukavemetlerinde önemli ölçüde azalma meydana geldiği görülürken, bu azalmanın plastisite indisine ve boşluk suyu basıncı artışlarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Statik deneyden elde edilen boşluk suyu basıncı artışları, tekrarlı yükleme çevrimi arttıkça azalmış, ancak nihai boşluk suyu basıncı değerleri, göçmenin meydana geldiği çevrim sayısının üzerindeki değerlerde daha büyük elde edilmiştir.

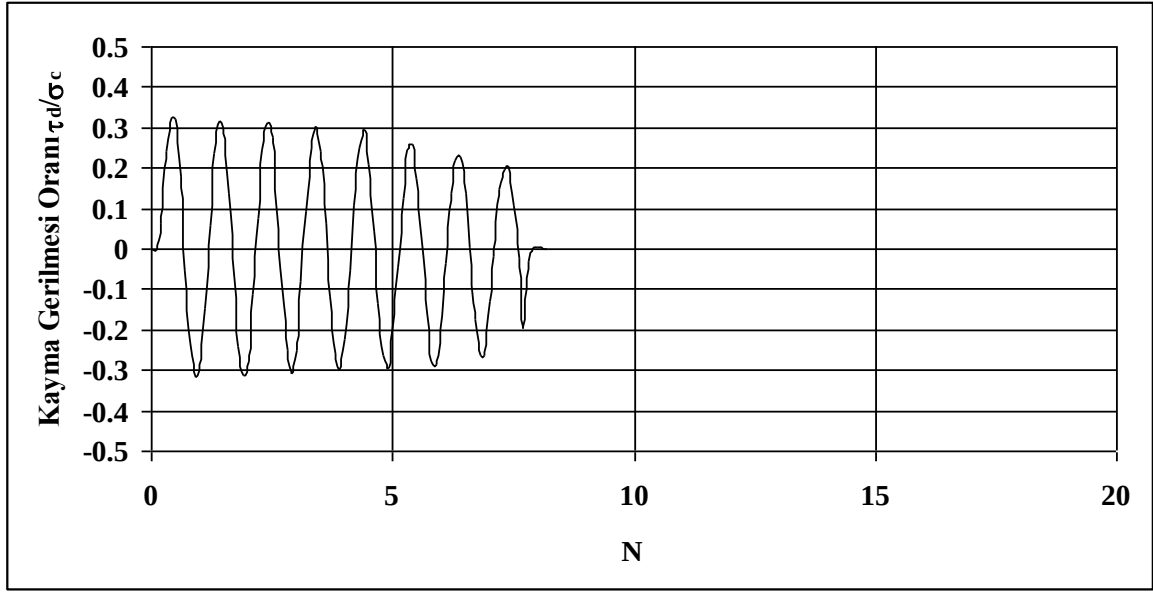
Düşük plastisiteli killerde ve plastik siltlerde, tekrarlı gerilme genlikleri altında hızla artan birim kayma deformasyonlarına bağlı olarak statik mukavemet kayıpları oluşurken, düşük plastisiteli siltlerde aynı tekrarlı gerilme genliği altında mukavemet kayıpları, artan birim kaymaların yanında artık boşluk suyu basıncı artışlarına da bağlı olmaktadır. Tekrarlı kayma gerilmeleri altında kohezyonlu zeminde kayma deformasyonları hızla artmakta, boşluk suyu basınçları ise sınırlı kalarak artan çevrim sayılarıyla birlikte zeminde yumuşamaya neden olmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde laboratuvarında kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan farklı plastisitedeki örselenmiş numuneler kullanılarak dinamik burulmalı kesme deneyleri, $\pm$ %2.5 göçme seviyesine kadar yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin plastisitesi % 2-33 arasında değişmektedir. Deney sonuçları, hızla artan birim kayma genliklerinin yanında sınırlı kalan boşluk suyu basınçları nedeniyle, ince daneli zeminde dinamik mukavemette önemli ölçüde azalma ve numunedeki yumuşamaya bağlı olarak taşıma gücü kayıplarının meydana geldiğini göstermektedir. Belirli bir tekrarlı gerilme seviyesinden sonra, numunelerde birim kaymalar artarken boşluk suyu basınçları da önemli boyutlara ulaşmaktadır. Bu nedenle ince daneli zeminde efektif gerilmeler azalırken, malzemede önemli mukavemet kayıpları meydana gelmektedir. Bu mukavemet kaybı, plastik siltlerde sınırlı kalan boşluk suyu basınçları yanında hızla artan birim kaymalar nedeniyle gerçekleşirken, düşük plastisiteli siltlerde birim kaymaların yanında yüksek seviyelere çıkan boşluk suyu basınçlarına da bağlı olmaktadır.

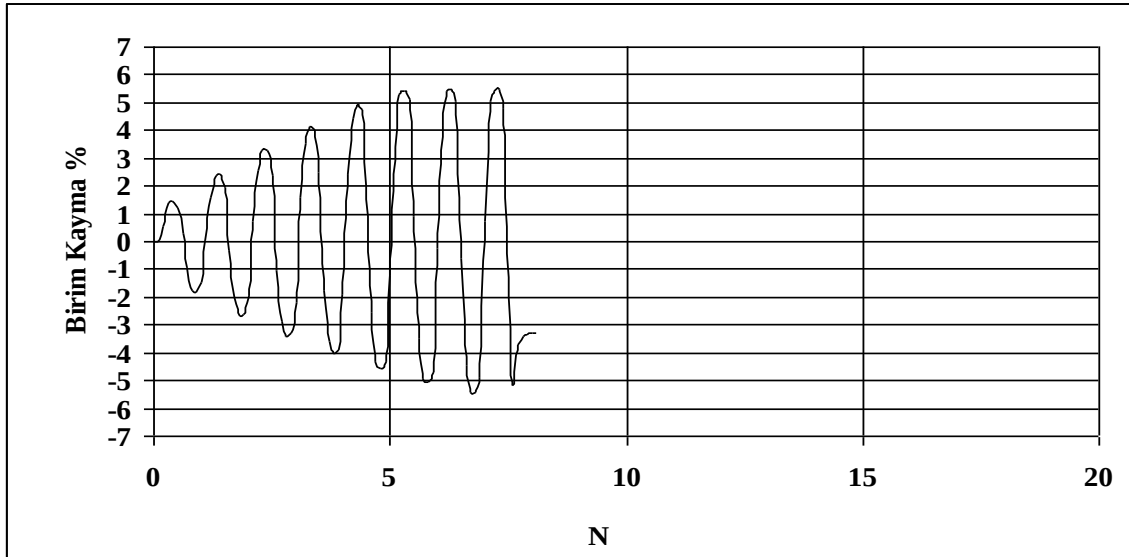
4.4 Örselenmemiş Numunelerde Yapılan Deneyler

Bu çalışma kapsamında diğer bir grup deney serisi, Adapazarı şehir merkezi'nde ve İzmir Çiğli'de açılmış olan sondajlardan alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılmıştır. Bu deney serileri, göçme seviyesi olarak alınan $\pm$ %2.5 birim kayma seviyesine kadar yapılan dinamik deneyle başlamaktadır. Daha sonra aynı seviyeye kadar yapılan dinamik deneylerin ardından statik yüklemeye örselenmemiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilmiştir. Ardından N=20 çevrim sayısında dinamik yüklemeyi takiben numunede oluşan düşük birim kayma deformasyonu seviyesinden sonra yapılan statik yüklemeye bir diğer deney serisine geçilmiştir. En sonda ise artan gerilme oranında yapılan N=5'er çevrimlik tekrarlı yüklemeyi takiben yapılan statik deneyle örselenmemiş deney grubu tamamlanmıştır.

Örselenmemiş numunelerde ilk yapılan deneyler dinamik deneylerdir. Bu deneylerde numunelere $\pm\% 2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesini aşarak çift genlikli $\% 10$ birim kaymalara varan dinamik yük uygulanmıştır. Şekil 4.42a, 4.42b ve 4.42c’de Adapazarı’ndan alınan $\% 13$ plastisite indisli örselenmemiş numuneye ait deney kayıtları görülmektedir. Çevrim sayıları arttıkça birim kaymalar da hızla artmaktadır. Boşluk suyu basınçları da hızla 60.0 kPa seviyelerine çıkmaktadır. Şekil 4.43’te aynı deneye ait histerisis ilmikleri görülmektedir. İlmiklerde artan birim kaymalara bağlı olarak yatıklaşma ve büyüme meydana

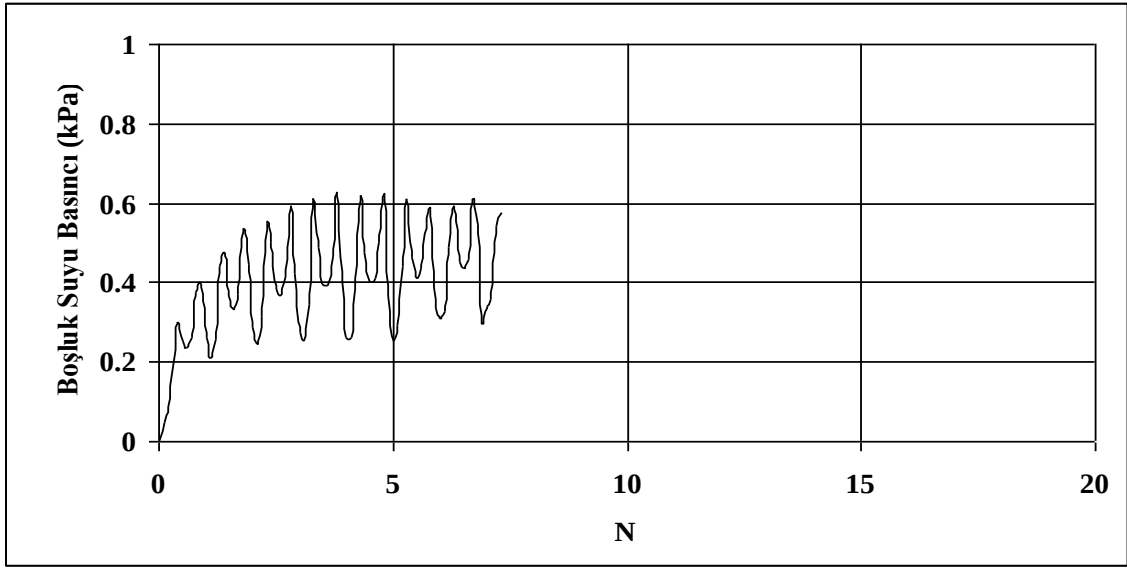


a)



b)

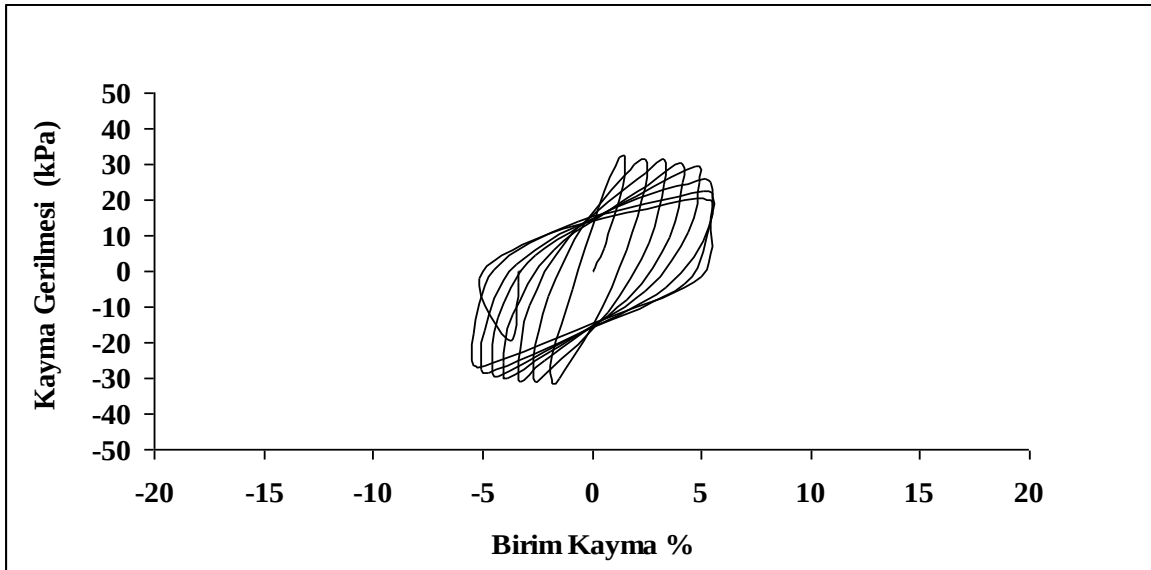
Şekil 4.42 Adapazarı örselenmemiş numunesine ait deney kayıtları a) Kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi b) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=\%13$, $\tau_d/\sigma_c'=0.327$)



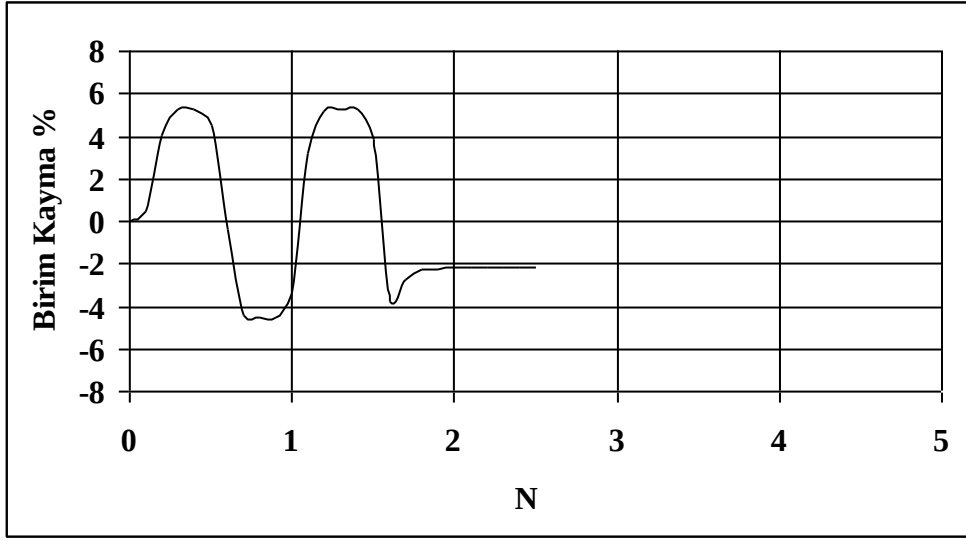
(c)

Şekil 4.42 (devamı) c) Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=13$, İnce dane= 95 , $\tau_d/\sigma_c'=0.327$)

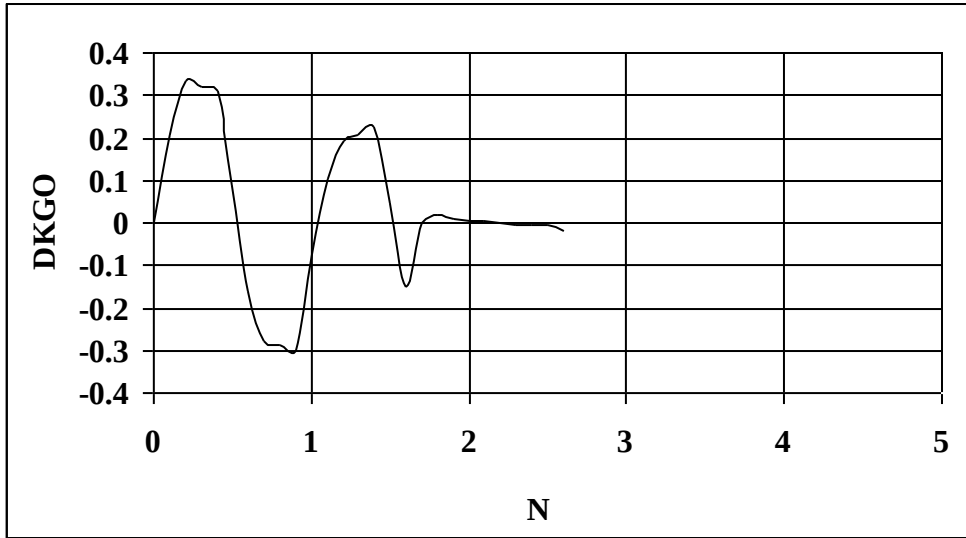
gelmektedir. Şekil 4.44'te ise İzmir'den 7.50-8.00 m derinliğinden alınan örselenmemiş numuneye ait deney kayıtları görülmektedir. Kullanılan numune tabakalı yapıya sahiptir. Örselenmemiş numunenin üst yüzeyinden 2.0 cm'lik kısmı plastik olmayan kumlu zeminken, diğer 12.0 cm'lik bölüm plastisite indisi 18 olan killi silttir. Numunede yüklemenin ilk çevriminde ± 5 birim kayma deformasyonu aşılmaktadır.



Şekil 4.43 Adapazarı numunesine ait deneyde oluşan histerisis ilmikleri ($I_p=13$, İnce dane= 95 , $\tau_d/\sigma_c'=0.327$)

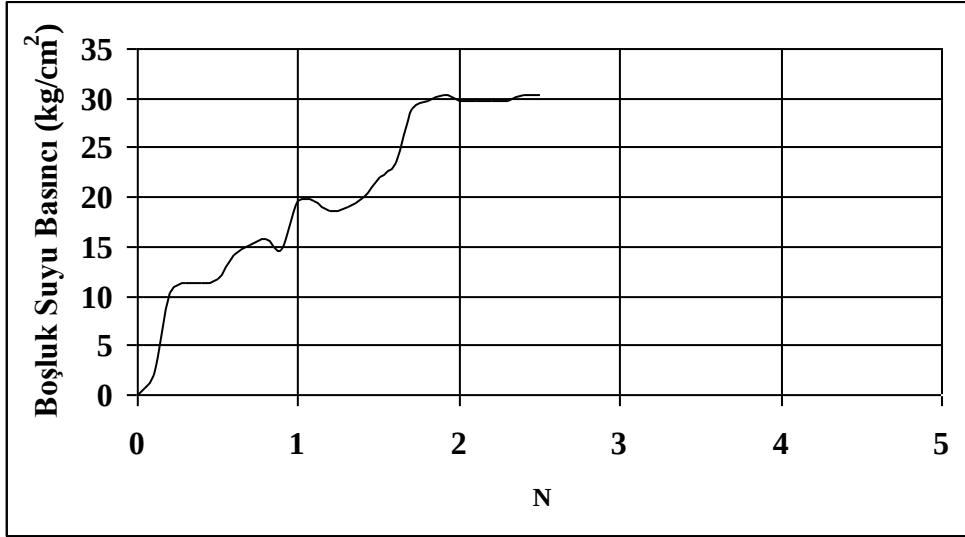


a)



b)

Şekil 4.44 İzmir A5 7.50-8.00 m'den alınan örselenmemiş numuneye ait deney kayıtları a) Kayma gerilmesi oranı -çevrim sayısı ilişkisi b) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi

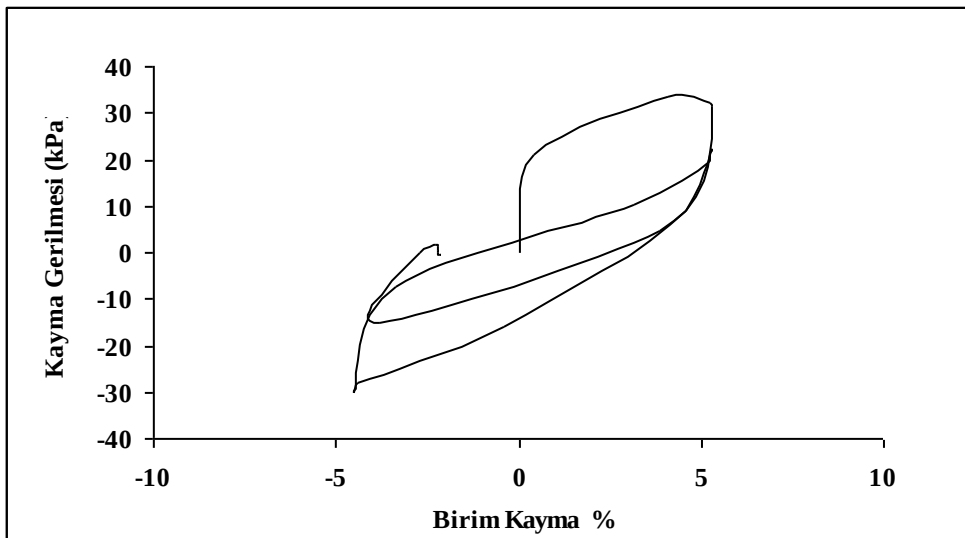


c)

Şekil 4.44 (devamı) c) Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \%18$, İnce dane = $\%98$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.333$)

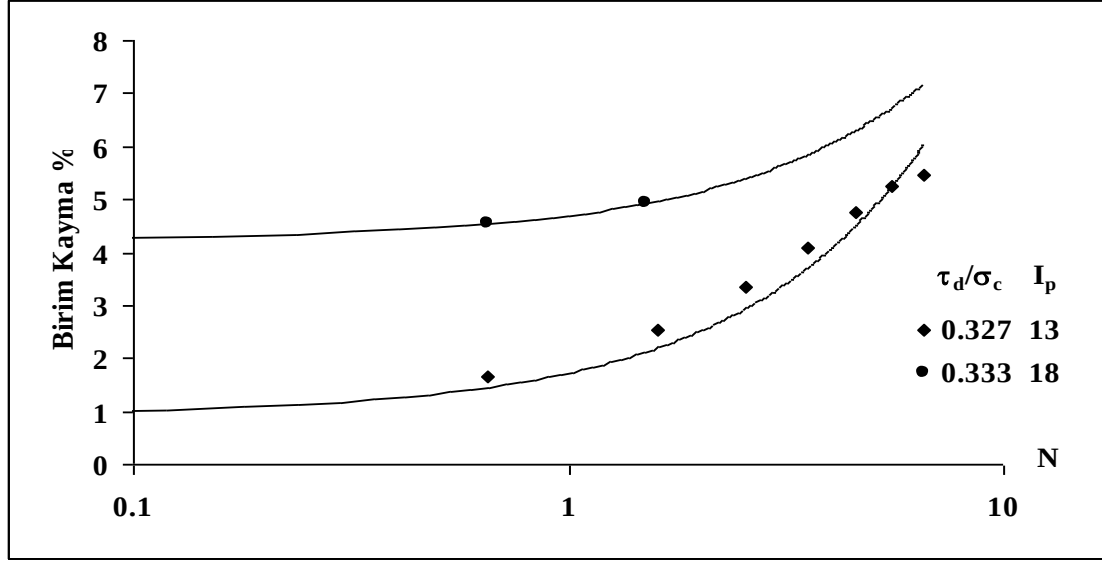
Boşluk suyu basıncı artışları ise sınırlı kalarak, daha önce laboratuvar numunelerinde yapılan deney sonuçlarına benzemektedir.

Şekil 4.45'te İzmir numunesine ait deneyde oluşan histerisis ilmikleri görülmektedir. İlmiklerde hızla büyüme ve birim kaymalar $\pm \% 5$ seviyesine ulaştıkça yatıklaşma meydana gelirken, örselenmemiş ince daneli zeminde yumuşama oluşmaktadır.

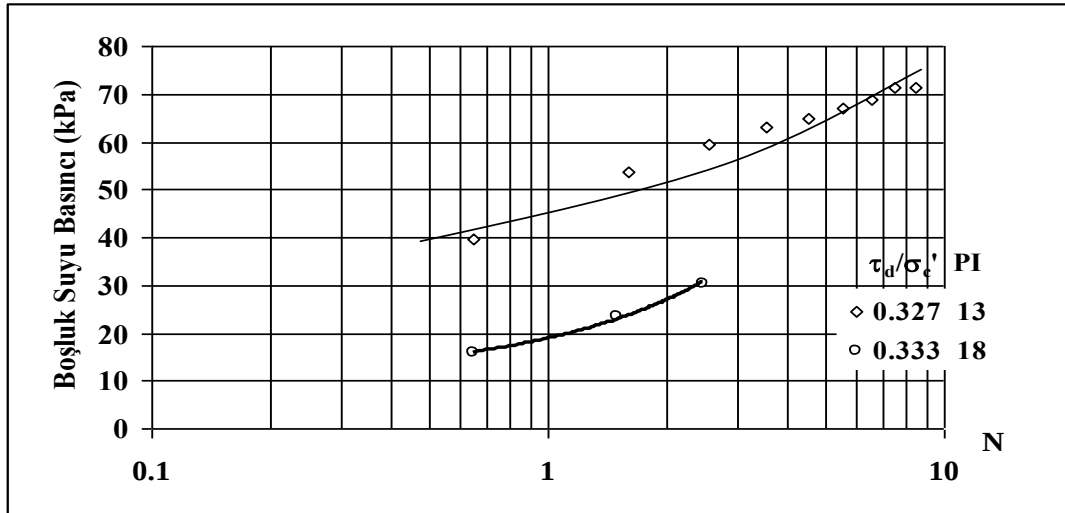


Şekil 4.45 İzmir numunesine ait deneyde oluşan histerisis ilmikleri ($I_p = \%18$, İnce dane = $\%98$, $\tau_d/\sigma_c' = 0.333$)

Şekil 4.46’da bu deney serisine ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Gerilme oranı arttıkça birim kaymalar daha düşük çevrim sayılarında $\pm\%2.5$ ve $\pm\% 5$ seviyelerine ulaşmaktadır. Şekil 4.47’de ise aynı deneylerden elde edilen boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan ilişkisi verilmiştir. Düşük plastisiteli silt zemin özelliğine sahip Adapazarı numunesinde boşluk suyu basınçları hızla 70.0 kPa seviyelerine çıkmaktadır. Plastisitesi $\% 18$ olan örselenmemiş numunede de ancak 30.0 kPa’a ulaşmaktadır.

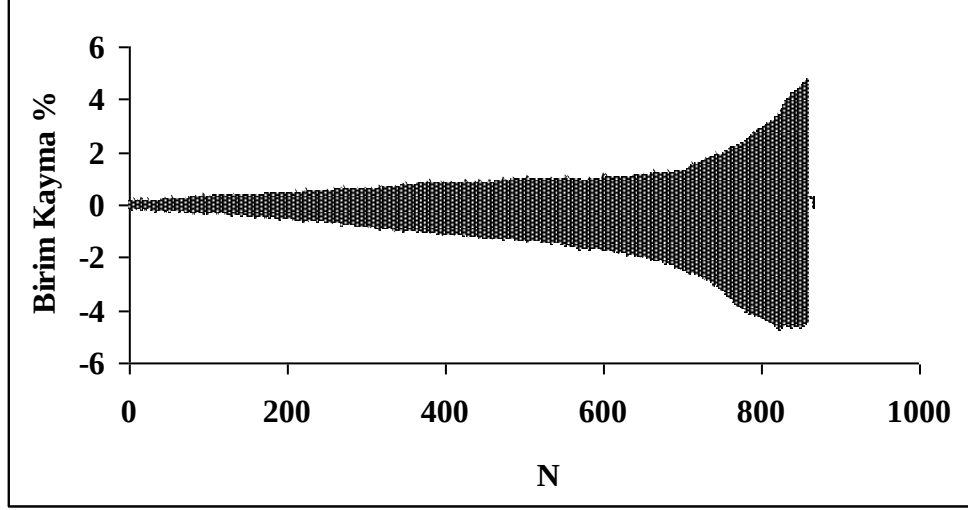


Şekil 4.46 Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 13-18$, $\gamma_{kc} = 13.9-14.8 \text{ kN/m}^3$)

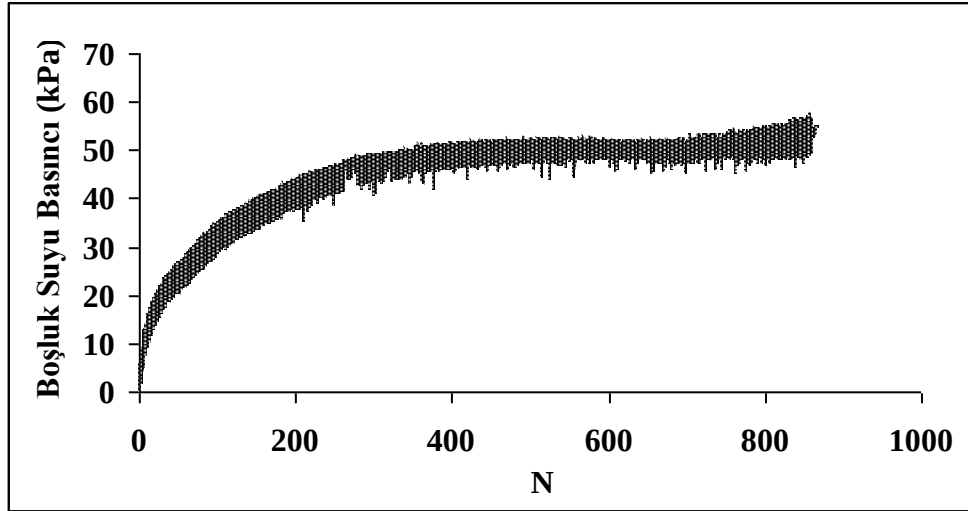


Şekil 4.47 Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 13-18$, $\gamma_{kc} = 13.9-14.8 \text{ kN/m}^3$)

İzmir A5 sondajı 9.00-9.50 numunesinde tekrarlı kayma gerilmesi oranı olarak 0.208 uygulanmıştır. Bu zemin numunesinde plastisite indisi % 5 ve ince dane oranı % 80 dir. Göçme seviyesinde boşluk suyu basıncı oranı sınırlı kalarak 0.55 seviyesine erişmiştir. Deneyden elde edilen birim kayma ve boşluk suyu basıncı artımının çevrim sayısı ile olan değişimi Şekil 4.48’de görülmektedir.



a)

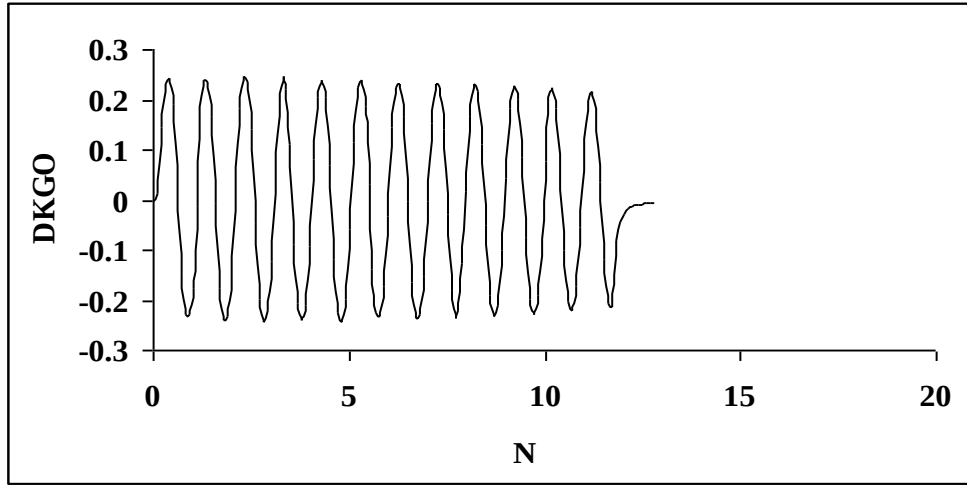


b)

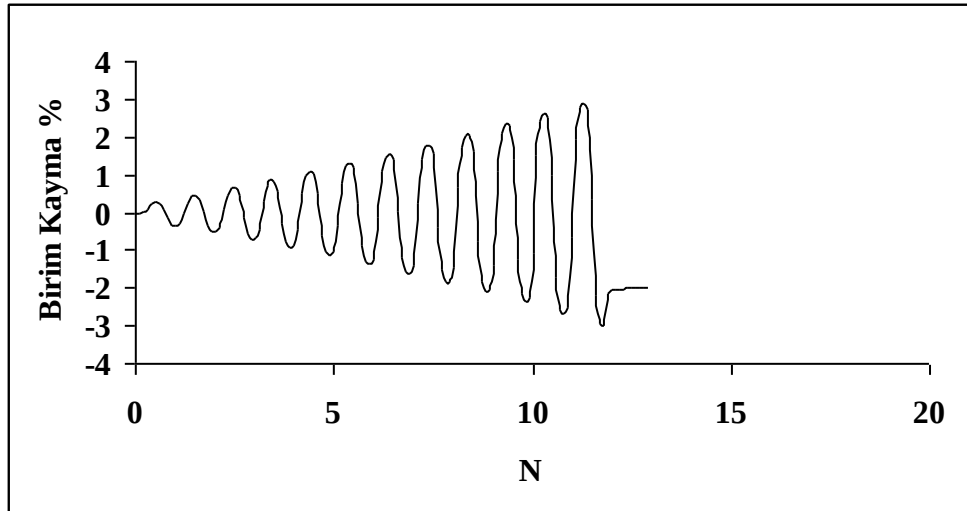
Şekil 4.48 İzmir A5 9.00-9.50 m’den alınan örselenmemiş numune deney sonuçları a) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi c) Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi (I_p =%5, İnce dane=%80, $\tau_d/\sigma_c'=0.208$)

4.4.1 Örselenmemiş Numunelerde Tekrarlı Yüklemenin Statik Mukavemete Etkisi

Örselenmemiş numunelere ait bir başka deney serisinde ise numuneye tekrarlı yükleme uygulandıktan sonra statik deneye geçilmiştir. Tekrarlı kayma gerilmeleri üniform olarak, göçme seviyesine kadar uygulanmıştır. Ardından yapılan statik deneye ise % 14 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar devam edilmiştir. Şekil 4.49’da İzmir Çiğli A3 sondajı 5.00-5.50 m’den alınan ince daneli örselenmemiş numuneye ait deney kayıtları görülmektedir. N=10 çevrim sayısında göçme seviyesi olarak alınan $\pm\%2.5$ birim kayma deformasyonuna ulaşan zeminde boşluk suyu basınçları 57.0 kPa seviyesine çıkmaktadır. Bu deneye ait histerisis ilmkikleri Şekil 4.50’de verilmiştir.

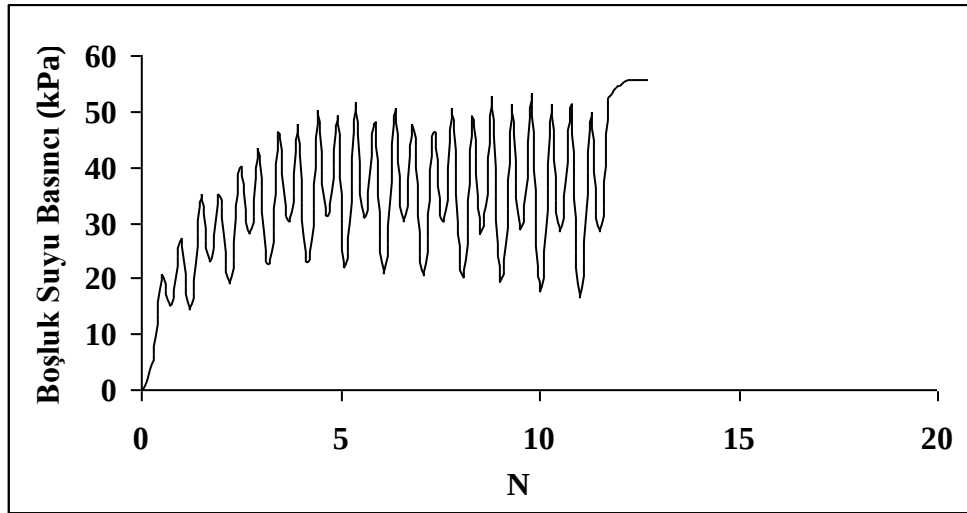


a)

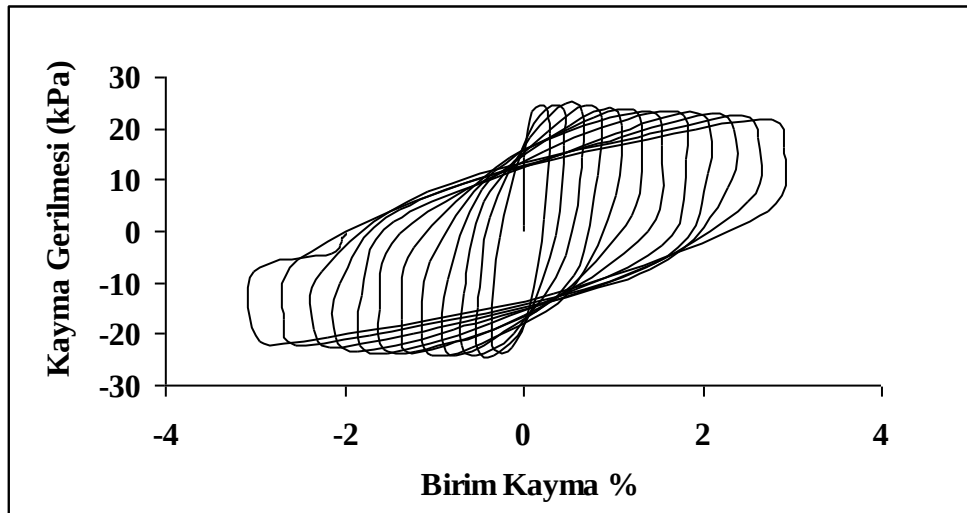


b)

Şekil 4.49 İzmir A3 5.00-5.50 m’den alınan örselenmemiş numune deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi b) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi



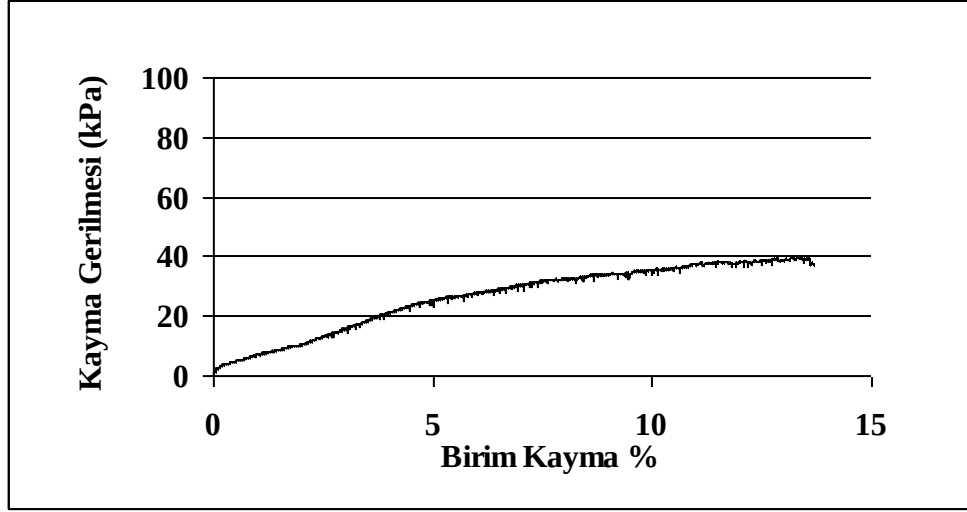
Şekil 4.49 (devamı) c) Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=9$, İnce dane=%55, $\tau_d/\sigma'_c=0.248$)



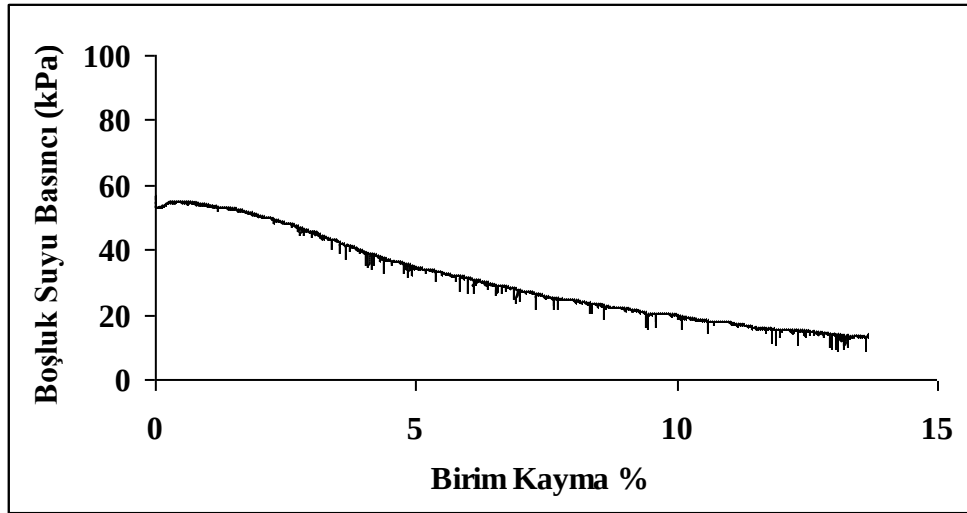
Şekil 4.50 İzmir numunesine ait deneyde oluşan histerisis ilmikleri ($I_p=9$, İnce dane=%55, $\tau_d/\sigma'_c=0.248$)

Şekil 4.51'de aynı numuneye tekrarlı yük uygulandıktan sonraki drenajsız statik deney sonuçları görülmektedir. Birim kayma deformasyonu % 14 seviyesindeki kayma gerilmesi değeri olarak 40.0 kPa'a ulaşan numunenin tekrarlı gerilme geçmişi olmasına rağmen mukavemetinin yüksek olduğu söylenebilir (Şekil 4.51a). Tekrarlı yüklemede göçmeye ulaşmış numune, ardından yapılan statik deneyde genişlemeye çalışmakta, dolayısıyla hacim artışına bağlı olarak boşluk suyu basınçları azalmaktadır. Bu davranış aşırı konsolide zemin davranışına benzemektedir. Bu çalışmada kullanılan tüm numuneler izotropik olarak 100 kPa basınçta konsolide edilmişlerdir. Bu değer örselenmemiş numunelerin arazide etkisinde

bulunduğu efektif konsolidasyon basıncının üzerinde olup numuneleri normal konsolide durumda tutmaktadır. Boşluk suyu basıncının artan birim kaymalarla 14.0 kPa değerine kadar azaldığı ancak negatif değerler almadığı görülmektedir (Şekil 4.51b). Şekil 4.51c’de de bu deneye ait efektif gerilme izi görülmektedir.

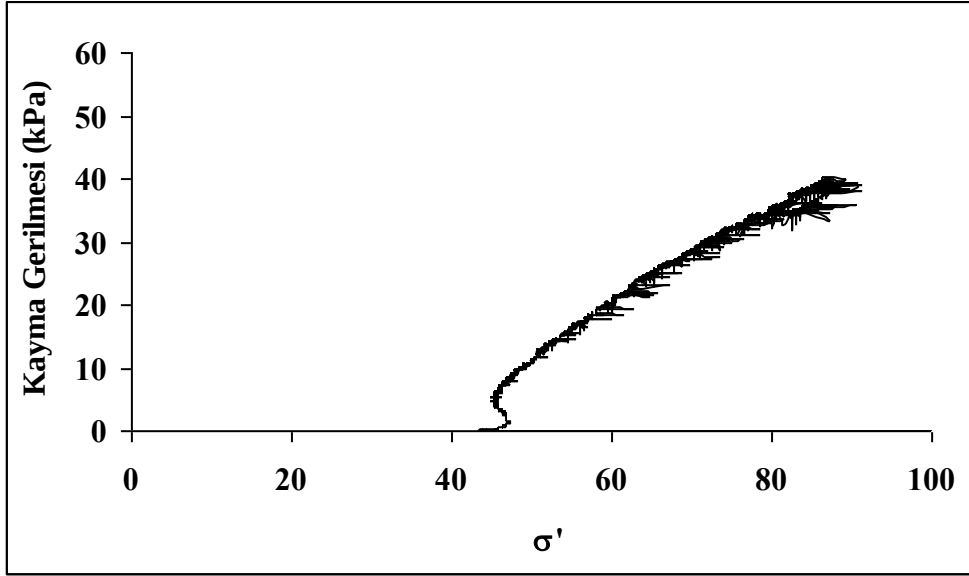


a)



b)

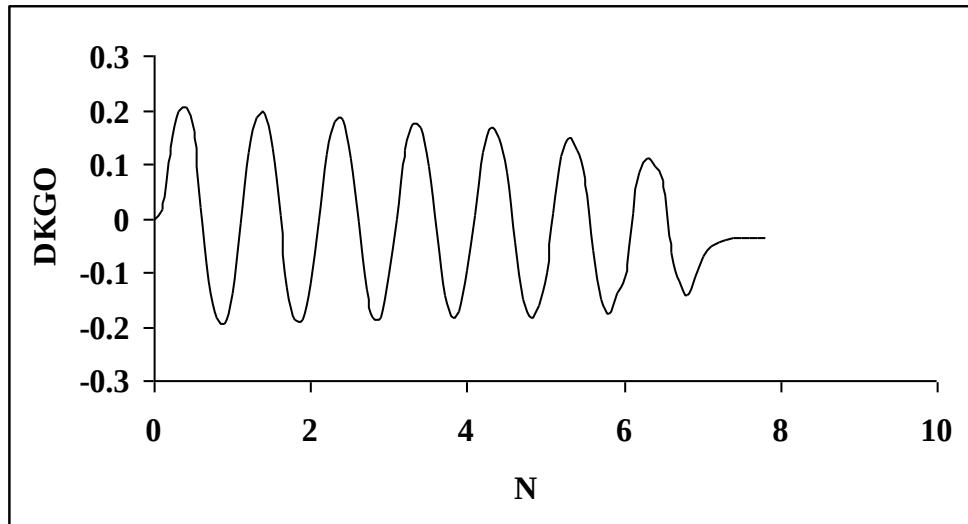
Şekil 4.51 İzmir A3 5.00-5.50 m’den alınan örselenmemiş numune statik deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi b) Boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi



c)

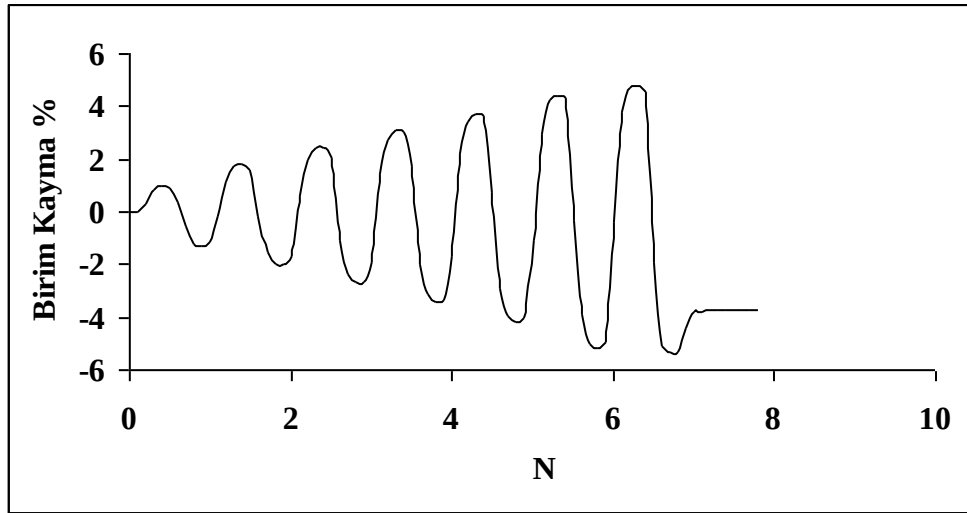
Şekil 4.51 (devamı) c) Efektif gerilme izi ($I_p=9$, İnce dane=%55, $\tau_d/\sigma_c'=0.248$)

Aynı deney serisinde diğer bir deney yine İzmir'den gelen A5 sondajı 9.00-9.50 m derinliğe ait örselenmemiş numunede yapılmıştır. Numune yine önce üniform gerilme oranında (0.227) tekrarlı burulma momentine maruz bırakılmış, ardından drenajsız durumda statik olarak yüklenmiştir. Şekil 4.52'de bu numuneye ait dinamik deney kayıtları görülmektedir. N=3 çevrimde göçme seviyesine ulaşan numunede boşluk suyu basınçları 58.0 kPa'dır.

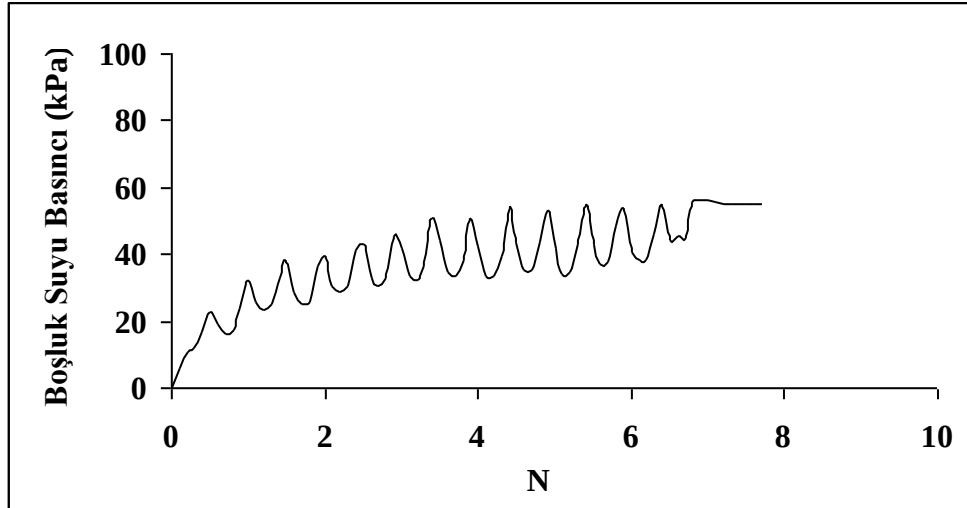


a)

Şekil 4.52 İzmir A5 9.00-9.50 m'den alınan örselenmemiş numune deney sonuçları a) Kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi



b)



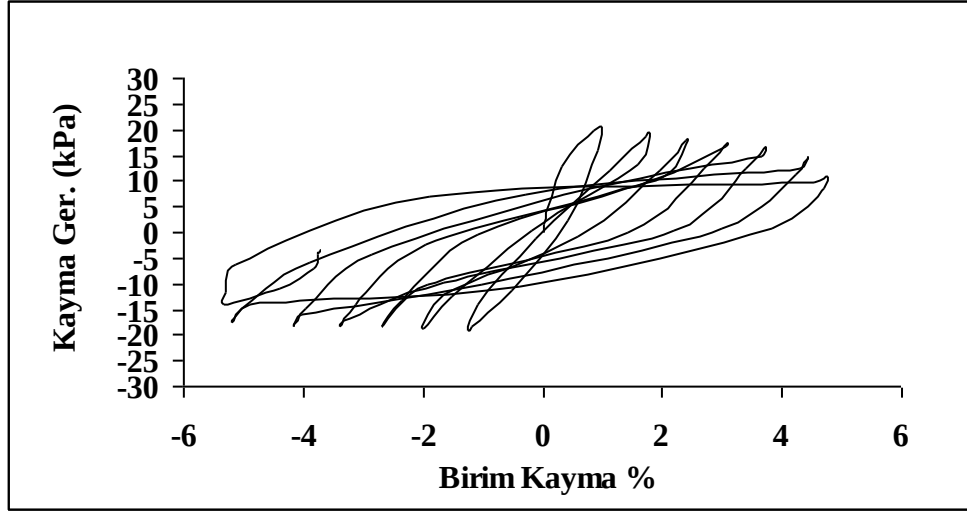
c)

Şekil 4.52 (devamı) b) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi c) Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = 8$, İnce dane = 63, $\tau_d/\sigma'_c = 0.227$)

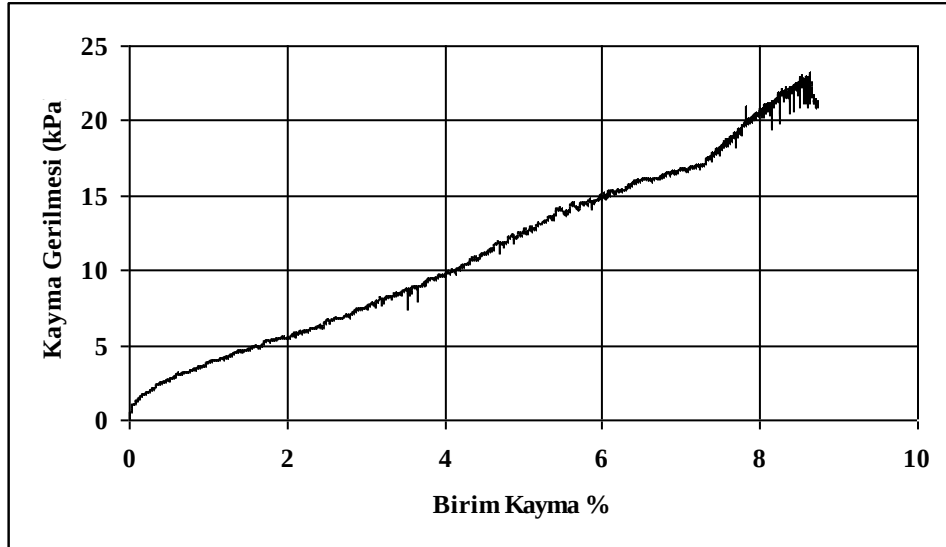
Şekil 4.53'te bu deneye ait histerisis ilmikleri görülmektedir. Zeminde oluşan birim kaymaların da etkisiyle ilmiklerde düşük çevrim sayısında hızla yatıklaşma ve büyüme meydana gelmekte, numunede ± 5 birim kayma deformasyonları oluşmaktadır.

Dinamik yükleme sonrası statik deney sonuçları Şekil 4.54a, 4.54b ve 4.54c' de görülmektedir. Birim kayma deformasyonu olarak 8 'e karşı gelen kayma gerilmesi değeri yaklaşık 20.0 kPa dır. Tekrarlı yükleme sonrası boşluk suyu basıncında meydana gelen azalma siltli numunenin ± 4.75 birim kayma seviyesine ulaşmış olmasındandır. Boşluk suyu

basıncında yaklaşık 20.0 kPa'lık bir azalmaya bağlı olarak efektif gerilmelerde de artma olmaktadır.

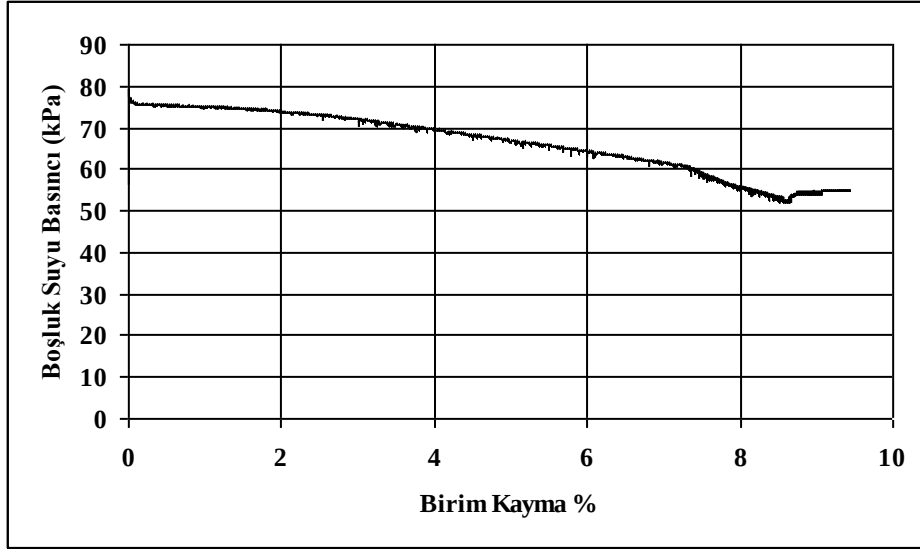


Şekil 4.53 İzmir A5 sondajı 9.00-9.50 m derinliğinden alınan örselenmemiş numuneye ait histeresis ilmkleri ($I_p=8$, İnce dane=%63, $\tau_d/\sigma_c'=0.227$)

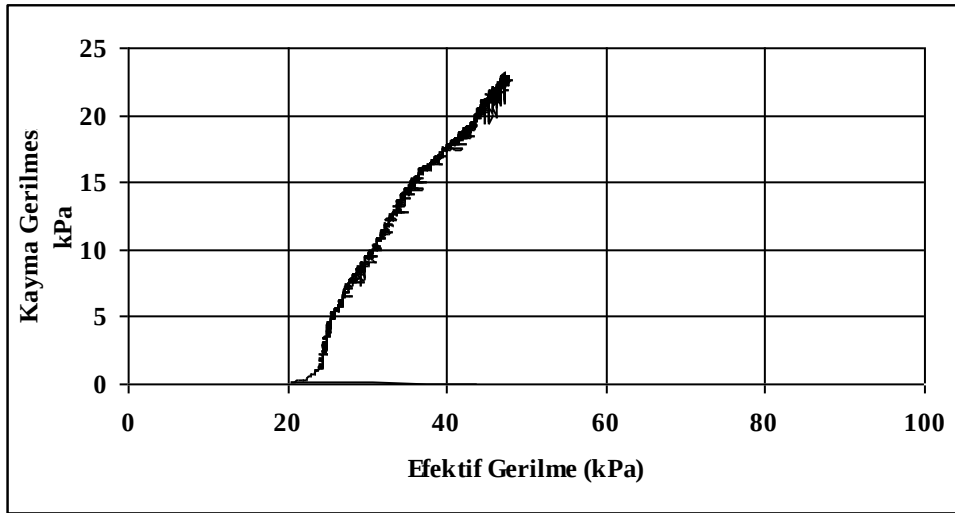


a)

Şekil 4.54 İzmir A5 9.00-9.50 m'den alınan örselenmemiş numune statik deney sonuçları
a) Kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi



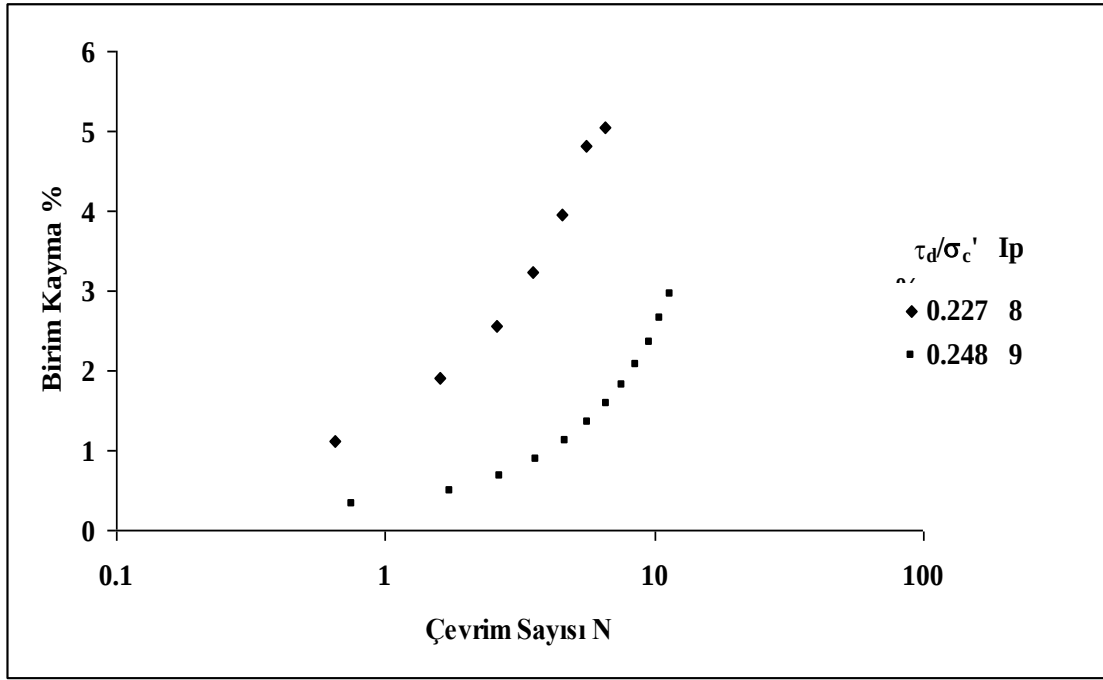
b)



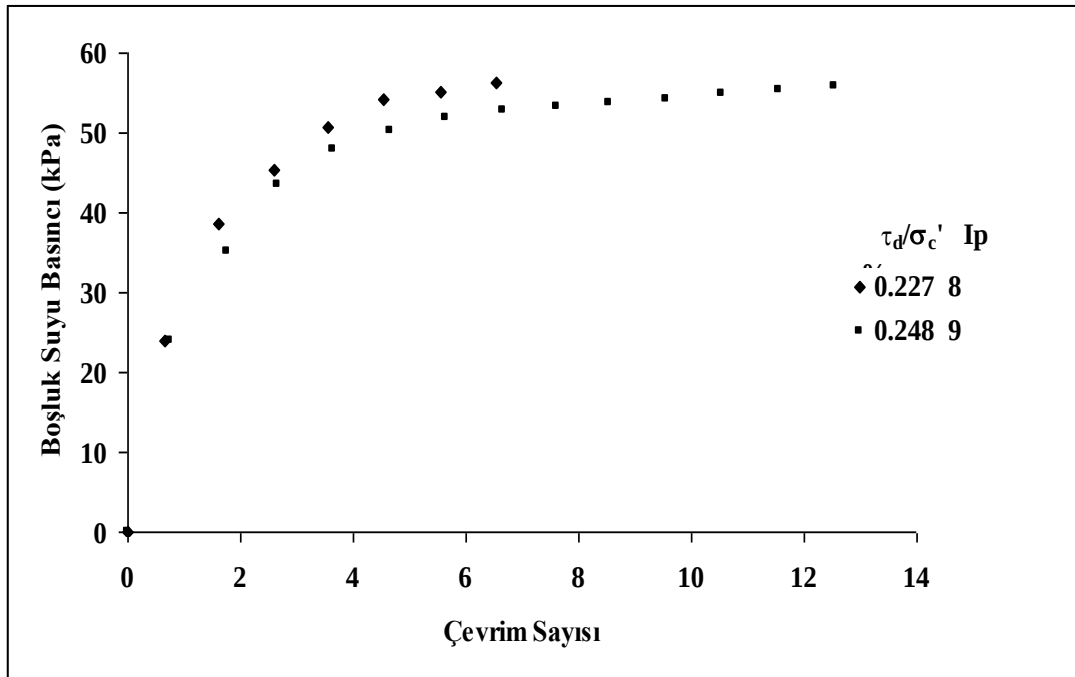
c)

Şekil 4.54 (devam) b) Boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi c) Etkatif gerilme izi ($I_p = 8$, İnce dane = 63, $\tau_d/\sigma_c' = 0.227$)

Bu deney serisine ait dinamik deneylerden elde edilen birim kayma deformasyonu-çevrim sayısı ilişkisi Şekil 4.55'te görülmektedir. Yaklaşık aynı özelliklere sahip iki ayrı örselenmemiş numunede davranış farklı olmaktadır. Uygulanan kayma gerilmesi oranı düşük olmasına rağmen, plastisitesi % 8 olan numunede birim kaymalar daha düşük çevrim sayısında göçme seviyesine ulaşmaktadır. İnce dane oranları arasındaki farklılık bu davranış farklılığını yaratmıştır. Boşluk suyu basınçları ise daha düşük plastisiteli numunede daha yüksek elde edilmiştir (Şekil 4.56).

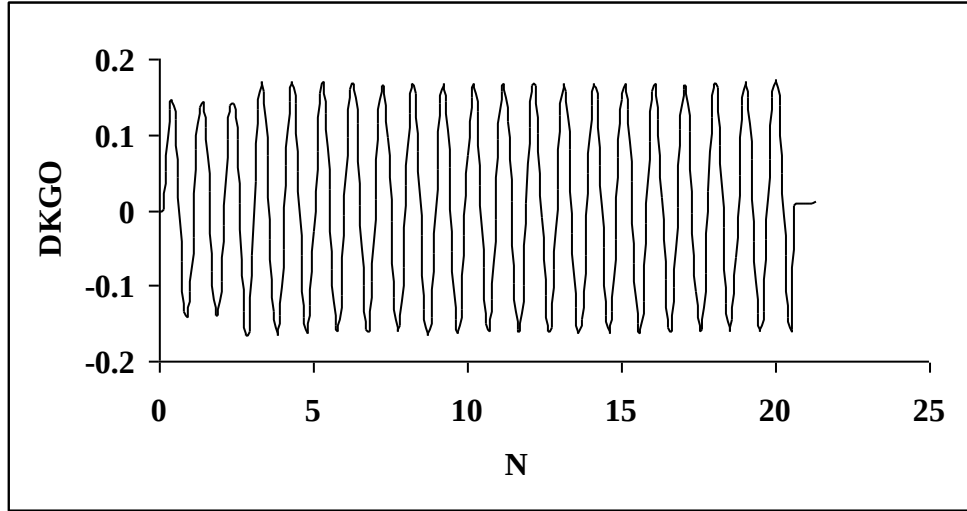


Şekil 4.55 Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 8-9$)



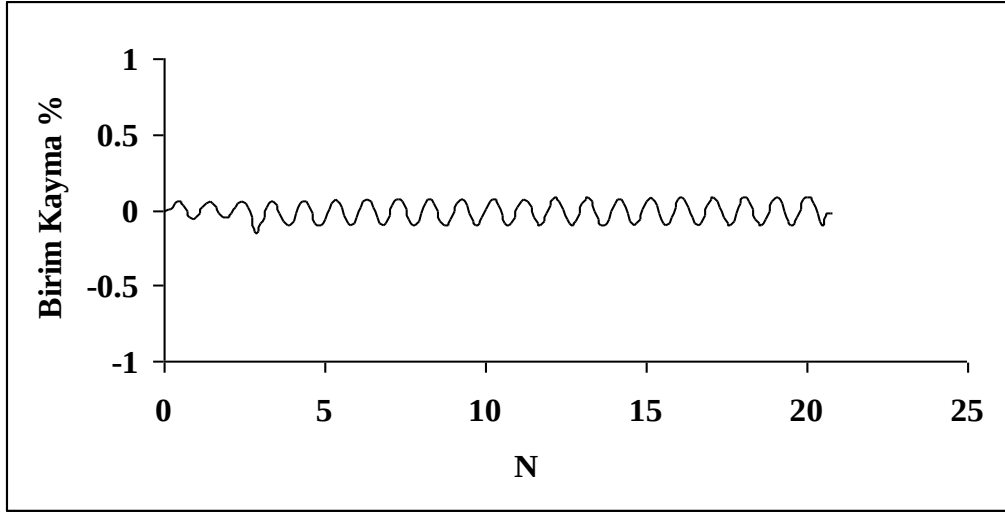
Şekil 4.56 Örselenmemiş numunelerde yapılan dinamik deney sonuçları, boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = \% 8-9$)

Bir diğer deney serisinde N=20 çevrim dinamik yüklemeyi takiben numunede oluşan düşük birim kayma deformasyonu seviyesinden sonra 0.50 mm/dk hızında statik yükleme yapılmıştır. Bu deneyde İzmir Çiğli'deki A3 sondajından, 5.00-5.50 m'den gelen örselenmemiş numune kullanılmıştır. Plastisite indisi % 6, ince dane yüzdesi % 52 olan bu numuneye uygulanan tekrarlı gerilme oranı 0.170 dir. Bu gerilme seviyesinde numunede 20 çevrim sonunda yaklaşık $\pm\% 0.1$ mertebesinde birim kayma deformasyonu oluşmuştur. Boşluk suyu basıncı ise sınırlı kalarak 12.0 kPa seviyesine kadar artmıştır. Şekil 4.57a, 4.57b ve 4.57c' de bu deney serisine ait dinamik deney kayıtları görülmektedir. Buna göre Şekil 4.57a'da dinamik kayma gerilmesi oranının çevrim sayısı ile olan değişimi verilmiştir. İlk üç çevrimde 0.14 gerilme oranı elde edilen numunede sonraki çevrimlerde, yüklemede herhangi bir değişim yapılmadan, örselenmemiş zeminde kayma gerilmesi artışı belirlenmiştir. Şekil 4.57b'de ise birim kaymanın çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir. Zemin numunesinde çok küçük mertebelerde kayma deformasyonları olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla zeminde herhangi bir mukavemet kaybı ve kalıcı deformasyon söz konusu değildir.

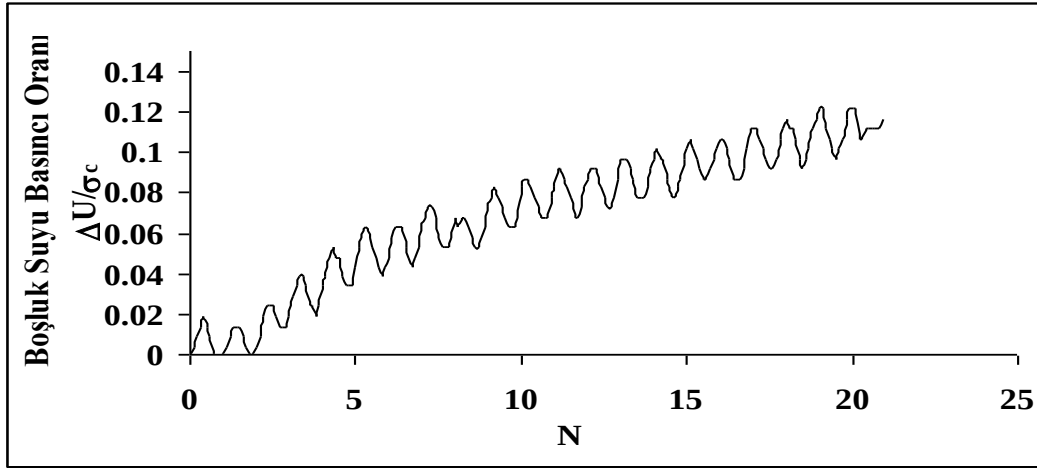


a)

Şekil 4.57 İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-çevrim sayısı ilişkisi



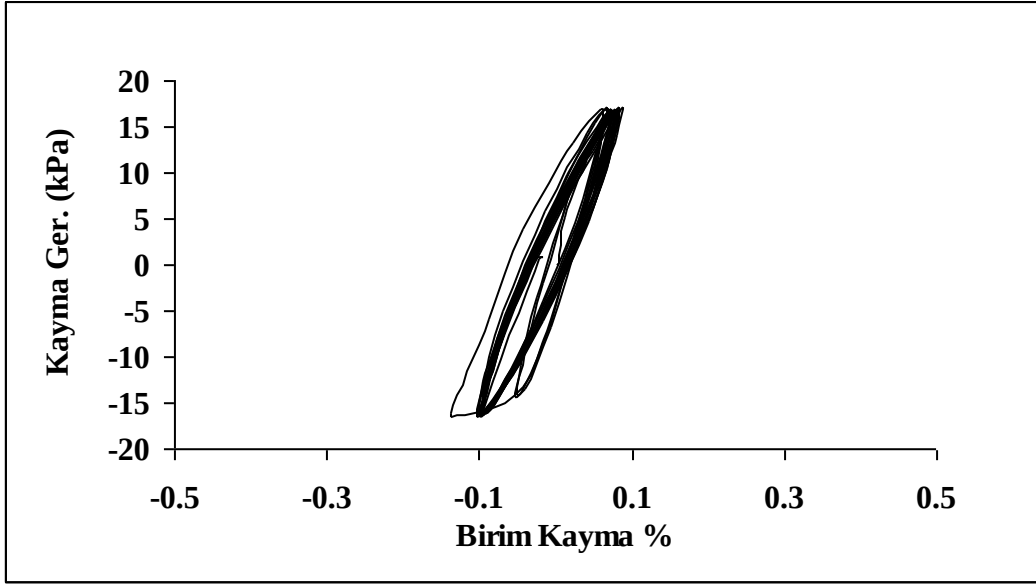
b)



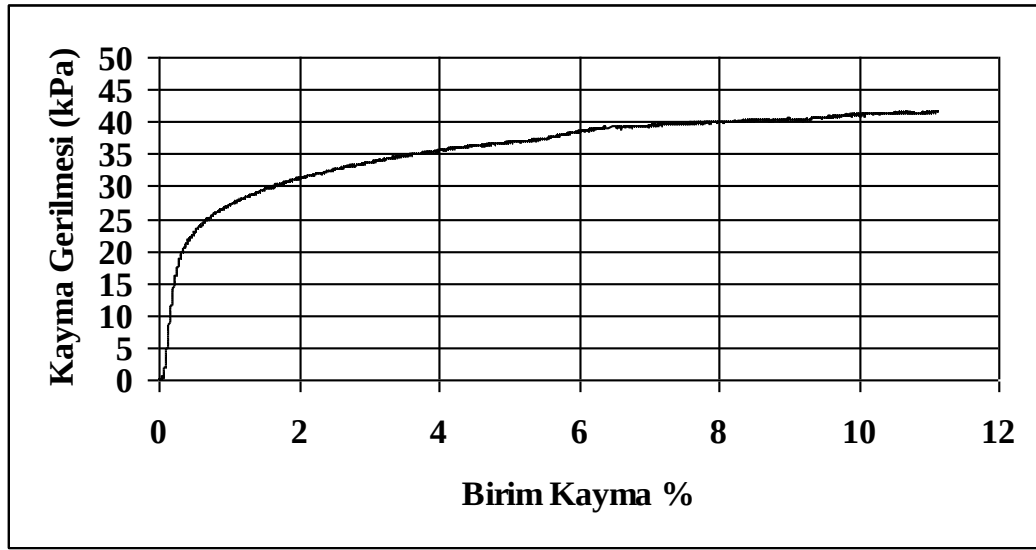
c)

Şekil 4.57 (devam) İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune deney sonuçları
b) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi c) Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p = 6\%$, İnce dane $= 52$, $\tau_d/\sigma'_c = 0.170$)

Şekil 4.57c'de boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir. Örselenmemiş zemin numunesinde $N=20$ çevrimde boşluk suyu basıncı oranı 0.12 seviyesindedir. Zemin içerisinde düşük genlikli gerilmeler olduğundan, boşluk suyu basınçları da sınırlı kalmaktadır. Sonrasında yapılan statik yüklemede, % 10 birim kaymaya karşı gelen kayma gerilmesi değeri 40.0 kPa elde edilmiş (Şekil 4.59a), boşluk suyu basıncı da 42.0 kPa'a kadar artmıştır (Şekil 4.59b). Şekil 4.58'de histeresis ilmikleri görülmektedir.

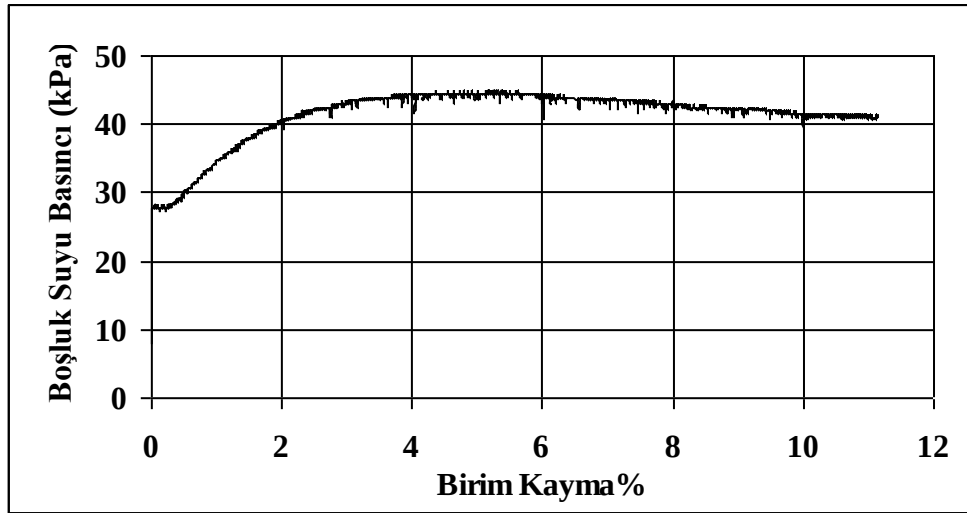


Şekil 4.58 İzmir A3 sondajı 5.00-5.50 m derinliğinden alınan örselenmemiş numuneye ait histerisis ilmikleri (I_p =%6, İnce dane=%52, τ_d/σ'_c =0.170)



a)

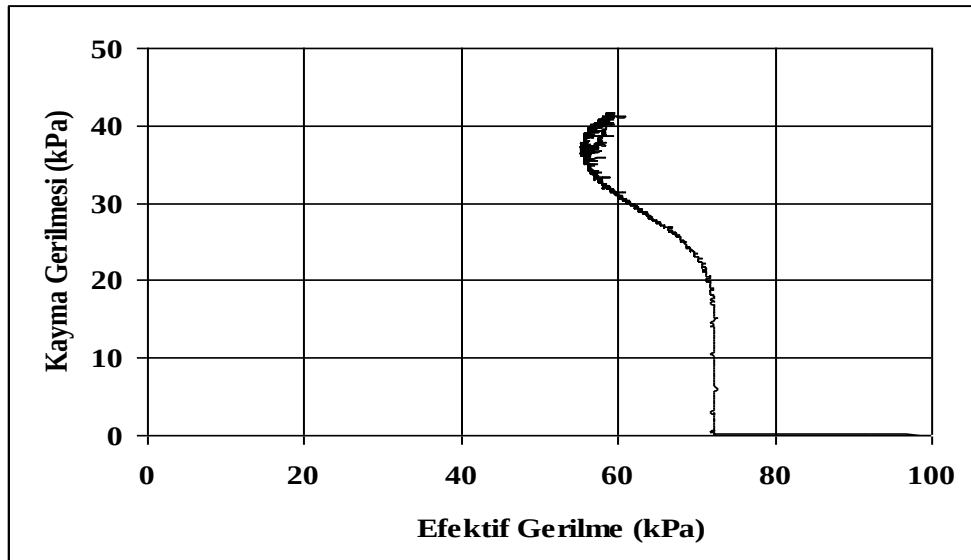
Şekil 4.59 İzmir A3 5.00-5.50 m'den alınan örselenmemiş numune statik deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi



b)

Şekil 4.59 (devam) b) Boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi

Uygulanan düşük tekrarlı gerilme oranına sahip sismik geçmişli örselenmemiş numunenin statik mukavemeti de, büyük genlikli tekrarlı yüklemeye maruz kalmış zemine göre daha büyük olmaktadır. İzmir'den alınan örselenmemiş siltli numunede deney aletinin izin verdiği % 10 birim kayma deformasyonu seviyesi yaklaşık 40 kPa'dır. Şekil 4.59c'de aynı deneyden elde edilen efektif gerilme izi görülmektedir. Normal konsolide bir zemine ait bu eğilim, boşluk suyu basıncındaki azalmaya da bağlıdır.

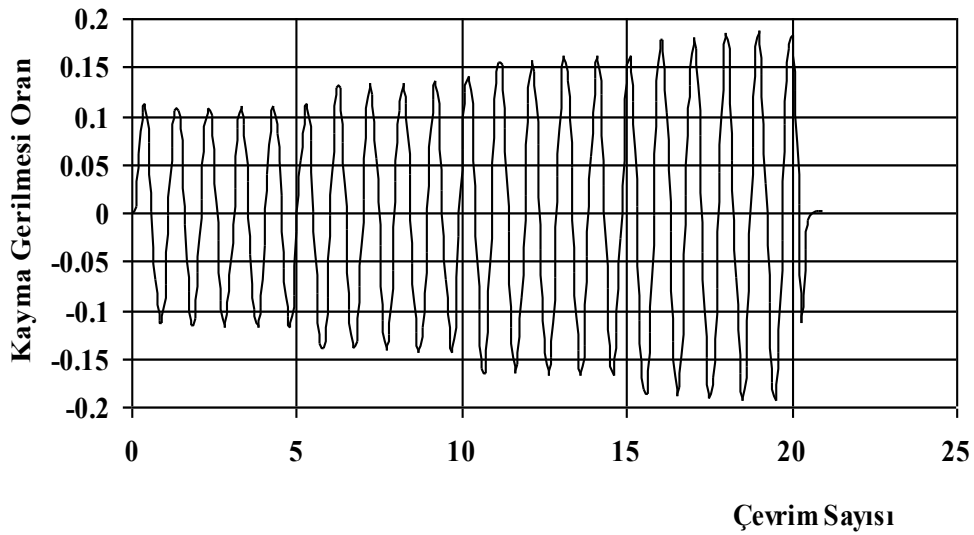


c)

Şekil 4.59 (devam) c) Efektif gerilme izi ($I_p=6$, İnce dane=%52, $\tau_d/\sigma'_c=0.170$)

Bu bölümde örselenmemiş numuneler kullanarak yapılan son deney ise, beşer çevrimde artan kayma gerilmesinde yapılan dinamik ve sonrasında yapılan statik deneydir. Bu deneyde İzmir Çiğli'den gelen A5 sondajına ait 4.50-5.00 m derinlikten alınan örselenmemiş ve yumuak, siltli zemin numunesi kullanılmıştır.

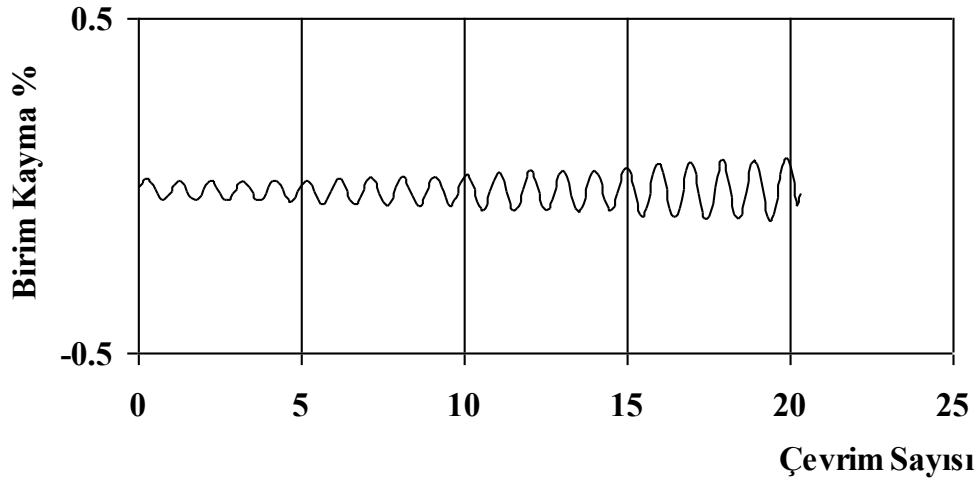
Dinamik yükleme 20 çevrimde gerçekleştirildikten sonra 0.50 mm/dk deformasyon hızında statik deney yapılmıştır. Dinamik yüklemede 0.11-0.18 gerilme oranları arasında uygulanan tekrarlı burulma momenti ile zeminde yaklaşık $\pm$ % 0.1 birim kayma mertebesinde deformasyon oluşmuştur. Boşluk suyu basıncı ise 14.0 kPa seviyesine kadar çıkmıştır. Düşük gerilme oranı altında örselenmemiş numunede düşük birim kayma deformasyonları oluşmaktadır. Şekil 4.60a'da kayma gerilmesi oranının zamanla değişimini gösteren deney kaydı görülmektedir.



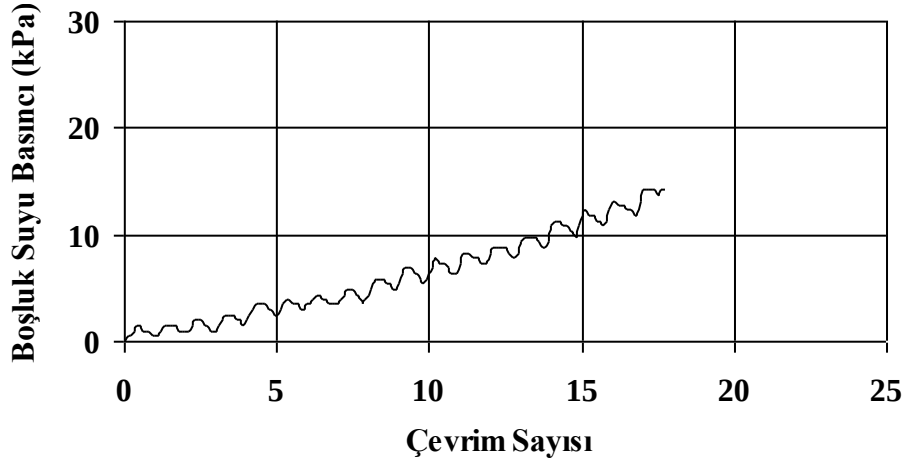
a)

Şekil 4.60 İzmir A5 4.50-5.00 m'den alınan örselenmemiş numune deney sonuçları a) Kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 4.60b'de bu deneyden elde edilen birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi verilmiştir. Birim kaymalar düşük tekrarlı gerilme oranı ve çevrim sayısından dolayı sınırlı kalmaktadır. Boşluk suyu basınçları ise 17 çevrimde yaklaşık 15 kPa seviyesine kadar çıkmakta ve daha fazla artmamaktadır (Şekil 4.60c).



b)



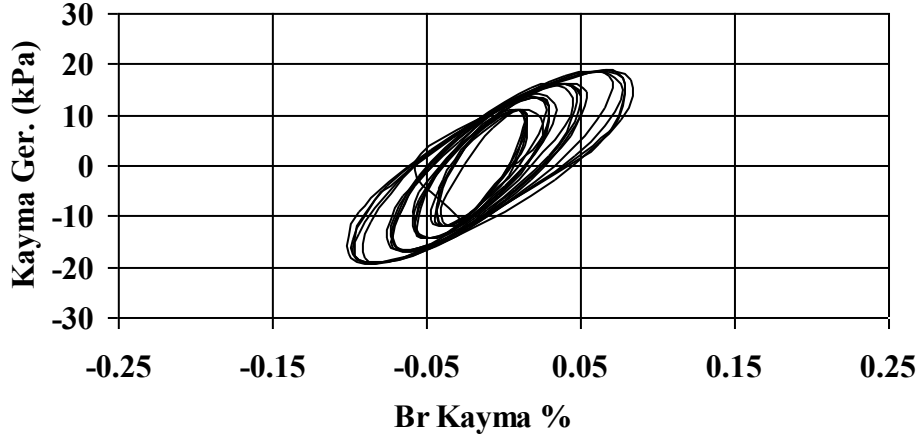
c)

Şekil 4.60 (devam) b) Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi c) Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi ($I_p=7\%$, İnce dane= 74% , $\tau_d/\sigma'_c=0.110-180$)

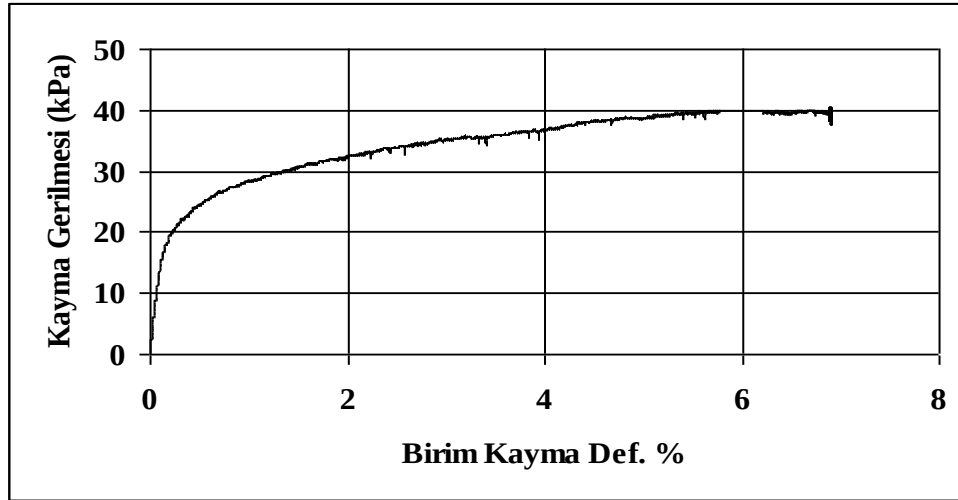
Histerisis ilmikleri ise Şekil 4.61’de verilmiştir. Düşük birim kaymalara uğrayan zeminde histerisis ilmiklerinde yatıklaşma oluşmazken, büyüme de gerçekleşmemektedir. Çünkü deformasyonlar çok düşük seviyelerde kalmış ve bu anda deney durdurulup statik yüklemeye geçilmiştir.

Şekil 4.62a’da statik deneydeki kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi görülmektedir. Numunede 7% birim kayma seviyesine karşılık gelen kayma gerilmesi değeri 40.0 kPa seviyesindedir. Boşluk suyu basıncı, ise 2% birim kayma seviyesindeki 23.0 kPa değerine kadar artarken, daha sonra artan kayma deformasyonları ile 17.5 kPa’a kadar

azalmaktadır (Şekil 4.62b). Genleşmeye çalışan numunede drenajsız durumda efektif gerilmede de artış olmaktadır (Şekil 4.62c). Tablo 4.5’te örselenmemiş numunelere ait deney özellikleri görülmektedir.

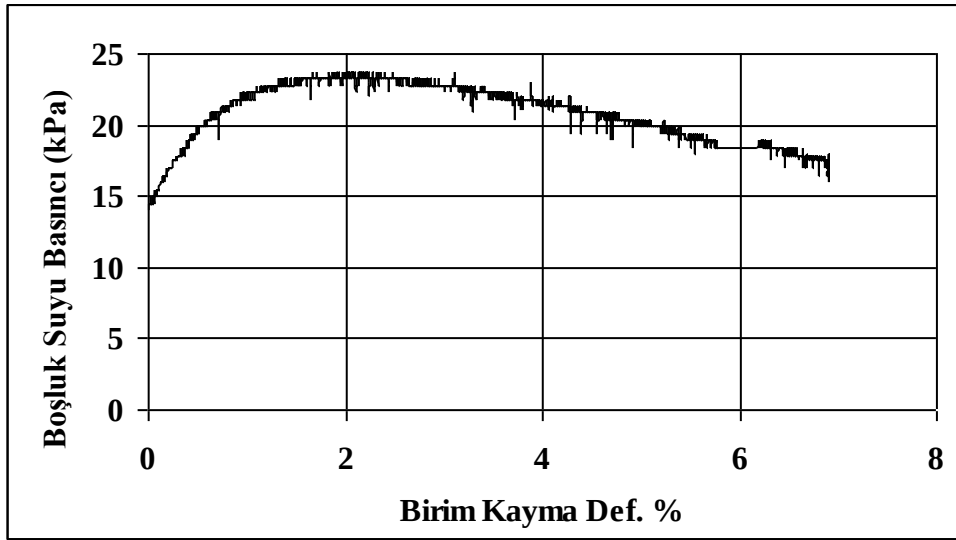


Şekil 4.61 İzmir A5 sondajı 4.50-5.00 m derinliğinden alınan örselenmemiş numuneye ait histerisis ilmkleri (I_p =%7, İnce dane=%74, τ_d/σ_c' =0.110-180)

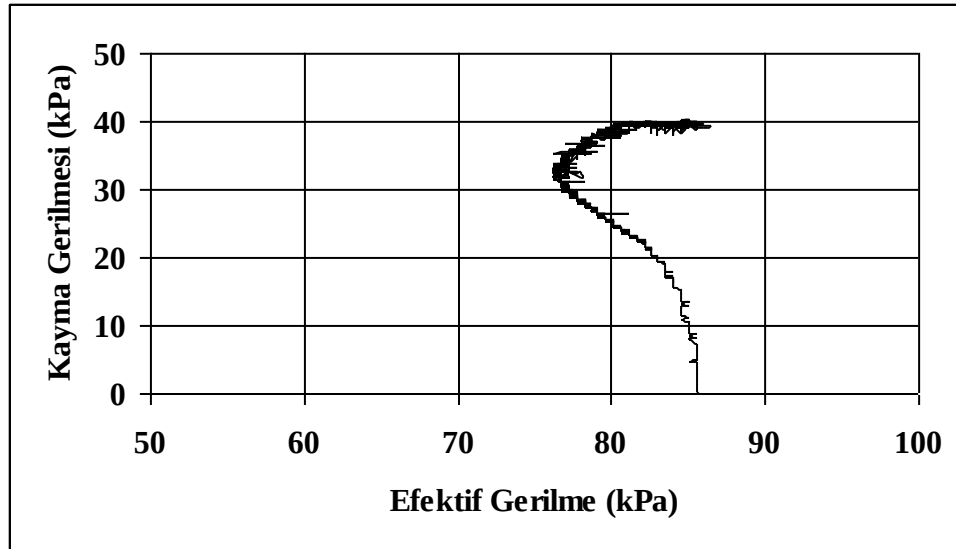


a)

Şekil 4.62 İzmir A5 4.50-5.00 m’den alınan örselenmemiş numune statik deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi



b)



c)

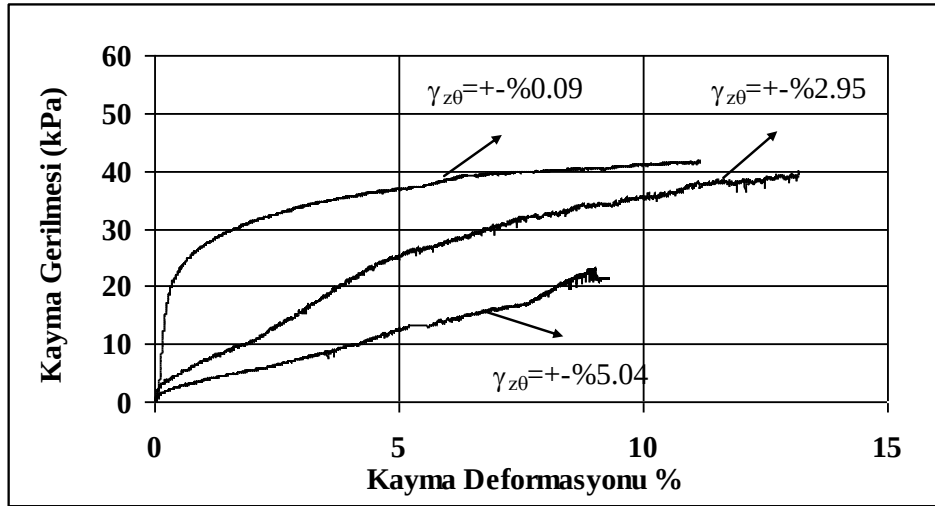
Şekil 4.62 (devam) b) Boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi c) Efektif gerilme izi ($I_p = 7$, İnce dane = 74, $\tau_d/\sigma'_c = 0.110-180$)

Tablo 4.5 Örselenmemiş numunelere ait deney özellikleri

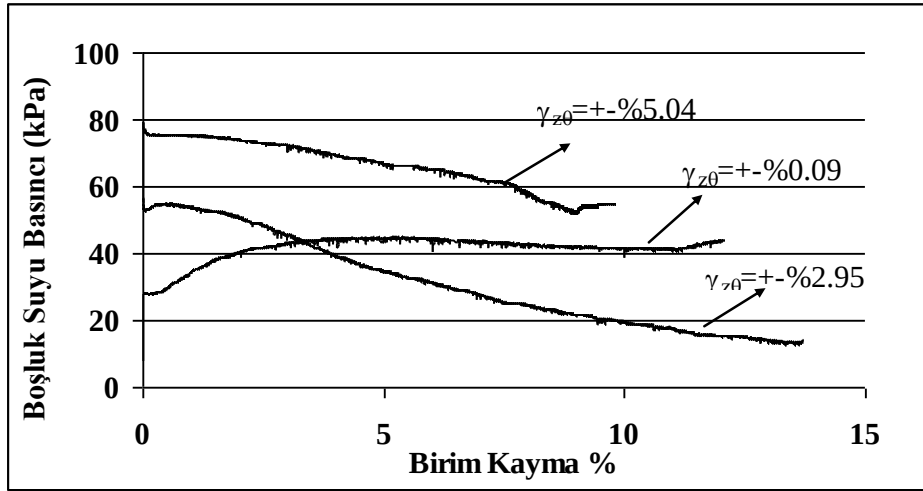
Deney No	σ_3 kPa	σ_c kPa	Kons. Süresi (gün)	I_p %	γ_{kc} (kN/m ³)	B (%)	τ_d/σ_c'	Çevrim Sayısı ($\gamma_{z0}=\pm\%2.5$)
DÖ1	350	100	1	18	14.8	98	0.327	2
DÖ2	350	100	1	13	13.9	100	0.333	1
DÖ3	350	100	1	5	14.6	98	0.208	760
DSÖ1	350	100	1	9	14.4	96	0.240	10
DSÖ2	400	100	1	8	14.4	96	0.227	3
DSÖ3	450	100	1	6	14.0	98	0.170	20*
DSÖ4	450	100	1	7	16.9	100	0.11-0.17	20*

*Birim kayma seviyesi $\pm\%2.5$ seviyesine kadar ulaşmamıştır.

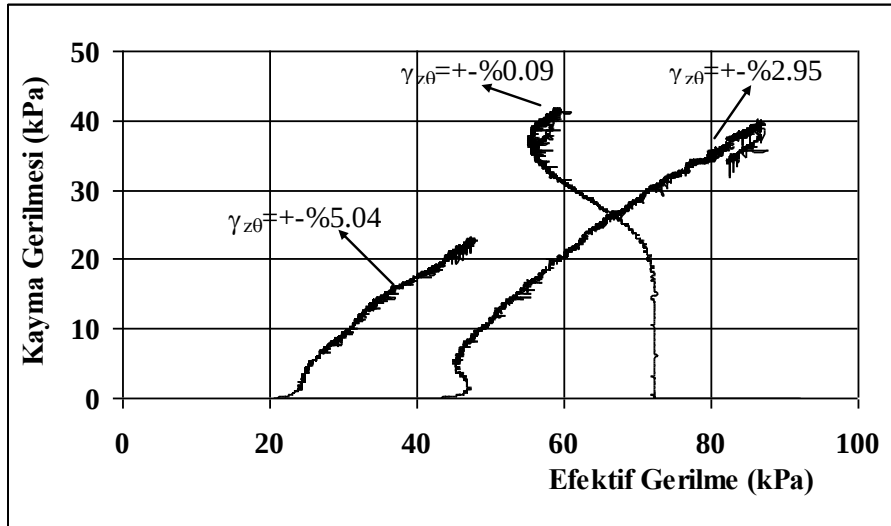
Şekil 4.63'te dinamik burulmalı kesme deneyinde kullanılan üç örselenmemiş numunede, farklı birim kayma deformasyonu seviyelerine kadar yapılan tekrarlı yüklemeden sonraki statik mukavemet değişimleri görülmektedir. Numunelerin plastisite indisi % 6-9, konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlıkları ise 14.0-14.4 kN/m³, ince dane yüzdeleri ise %52-63 arasındadır. Buna göre düşük genlikli tekrarlı yükleme sonrasında elde edilen $\pm\%0.09$ birim kayma seviyesi, statik mukavemeti pek etkilememiştir. Ancak göçme seviyesi olarak alınan $\pm\% 2.5$ seviyesini aşan dinamik deneyler sonrasında % 10 birim kayma deformasyonu seviyesine karşı gelen statik mukavemetler daha düşüktür. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0.227 ve 0.240'ta yapılan dinamik deneylerde çift genlikli kayma deformasyonu % 10 seviyesine ulaşan numunede ise statik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.63a'da görülmektedir. Statik deneyde kayma deformasyonu seviyesi olarak % 10'a karşı gelen 20.0 kPa kayma gerilmesi değeri elde edilmiştir. Buradan örselenmemiş numunelerde de tekrarlı gerilme geçmişinin ince daneli zeminde drenajsız kalıcı statik mukavemetleri etkilediği görülmektedir. Statik deneyden elde edilen boşluk suyu basıncı ilişkileri Şekil 4.63b'de görülmektedir. Buna göre dinamik yüklemede göçmeye ulaşan numunede 78.0 kPa seviyesine kadar çıkan boşluk suyu basınçları, drenajsız statik deneyde 50.0 kPa değerine kadar düşmektedir. Aynı şekilde dinamik deneyde $\pm\%2.95$ birim kayma seviyesine ulaşan numunede, statik deneyden elde edilen boşluk suyu basınçları, 55.0 kPa seviyesinden 14.0 kPa seviyesine düşmektedir. Dinamik deneyde $\pm\% 0.09$ birim kayma seviyesi elde edilen numunede ise boşluk suyu basınçları 29.0 kPa'dan 45.0 kPa seviyesine çıkmaktadır. Şekil 4.63c'de dinamik sonrası statik deneye ait gerilme izleri görülmektedir.



a)



b)

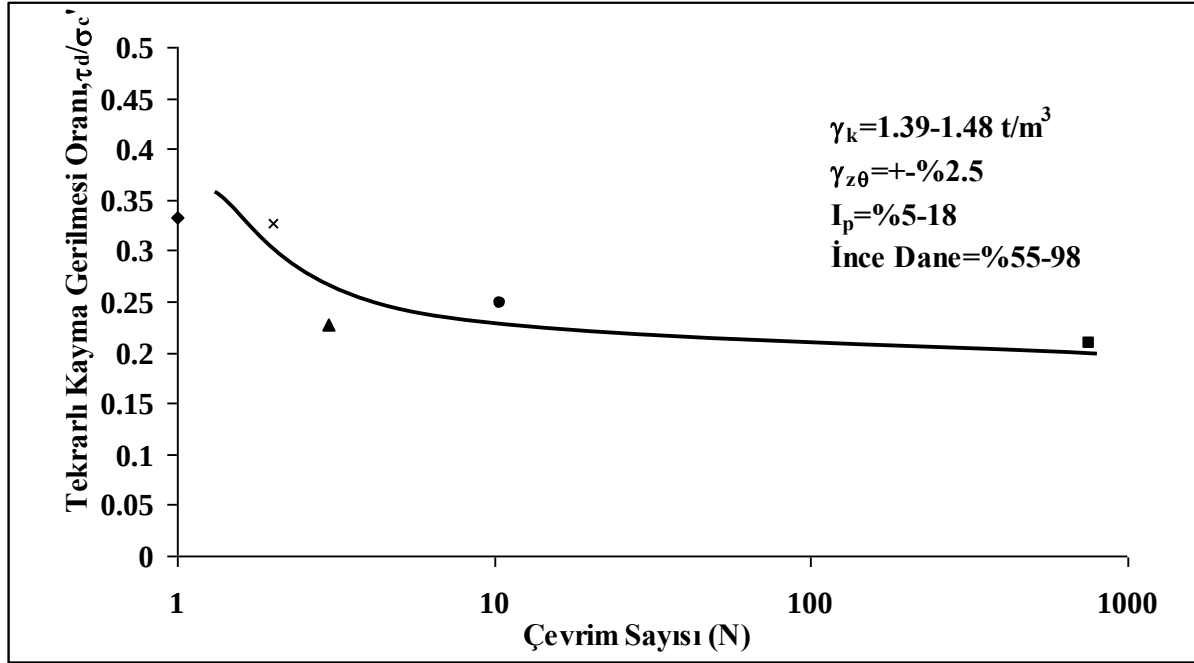


c)

Şekil 4.63 Örselenmemiş numunelerde dinamik deney sonrası statik deney sonuçları a) Kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi b) Boşluk suyu basıncı-birim kayma ilişkisi c) Efektif gerilme izi ($I_p = 6-9$, İnce dane = $52-63$, $\tau_d/\sigma'_c = 0.170-227$)

4.4.2 Örselenmemiş Numunelerin Dinamik Mukavemetleri

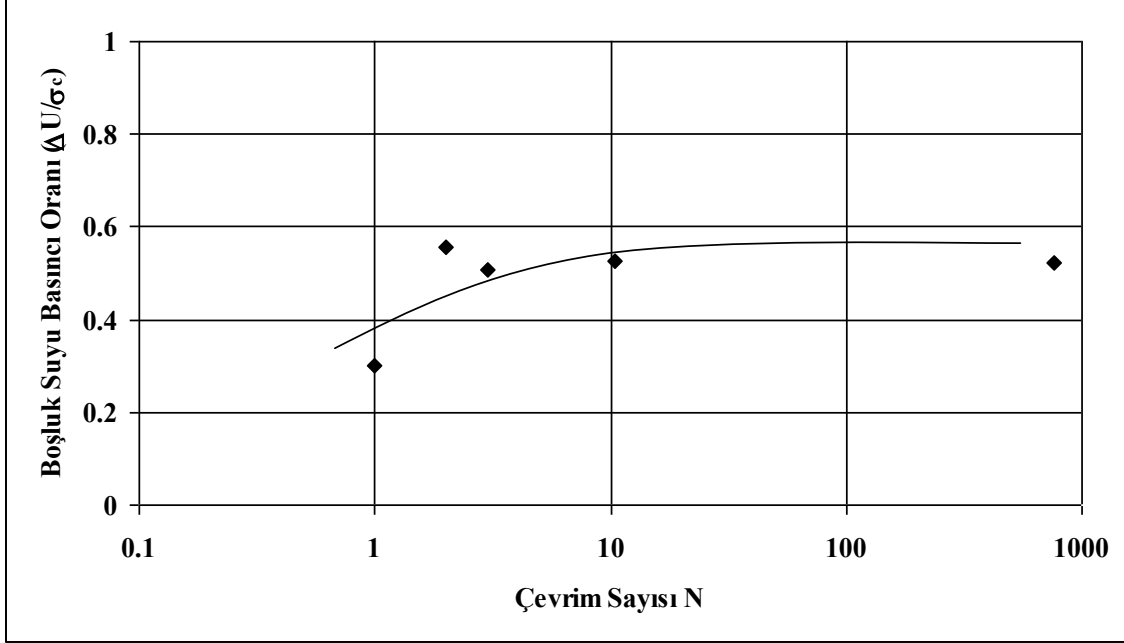
İçi boş, silindirik, örselenmemiş numunelerde bu çalışmada göçme seviyesi olarak alınan $\gamma = \pm 2.5$ birim kayma deformasyonuna kadar yapılan dinamik deney sonuçları, Şekil 4.64'te dinamik kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi şeklinde görülmektedir. Artan gerilme oranında zeminin göçmeye ulaşması için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0.333 ve 0.327 olan deneylerde yüklemenin ilk iki çevriminde yumuşak siltli örselenmemiş zemin numunesinde birim kaymalar oldukça hızlı artmış ve ± 10 seviyesine ulaşmıştır. Buna karşın 0.208 gerilme oranı uygulanan İzmir A5 sondajı 9.00-9.50 m derinliğinden alınan silt numunesinde göçme seviyesine ulaşmak için 760 çevrim gerekmiştir. Buradan gerilme oranı 0.22-0.25 arası bir seviyeye kadar örselenmemiş numunelerde önemli deformasyon artımları oluşmadığı söylenebilir.



Şekil 4.64 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Boşluk suyu basıncı gelişimi örselenmemiş numunelerde çevrim sayısına göre elde edilmiştir. Buna göre Şekil 4.65'te bu çalışmada kullanılan örselenmemiş numunelere ait boşluk suyu basıncı oranı değişimi görülmektedir. Eğilim doğrusu lineer elde edilmiştir. Artan çevrim sayılarında boşluk suyu basınçlarının da arttığı görülürken, İzmir A5 sondajı 7.50-8.00 m derinliğinden alınan numunede oluşan 0.30 boşluk suyu basıncı oranı dışında diğer deneylerde 0.50-0.55 arasında bir değişim belirlenmiştir. Boşluk suyu basınçları laboratuvarında hazırlanan örselenmiş numunelerdeki gibi artan çevrim sayıları ile sınırlı

kalmaktadır. Buna karşın birim kaymalar bu çalışmada kullanılan tüm numunelerde tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri altında belirli bir birim kayma deformasyonu seviyesinden sonra hızla artmaktadır. Bu durum hem doğal zeminlerin hem de laboratuvarında hazırlanan model deneyleri numunelerinin, deprem yükleri altında mukavemetlerini kaybetmelerinde boşluk suyu basıncı artışlarından çok, hızla artan birim kaymaların etkili olduğunu göstermektedir.



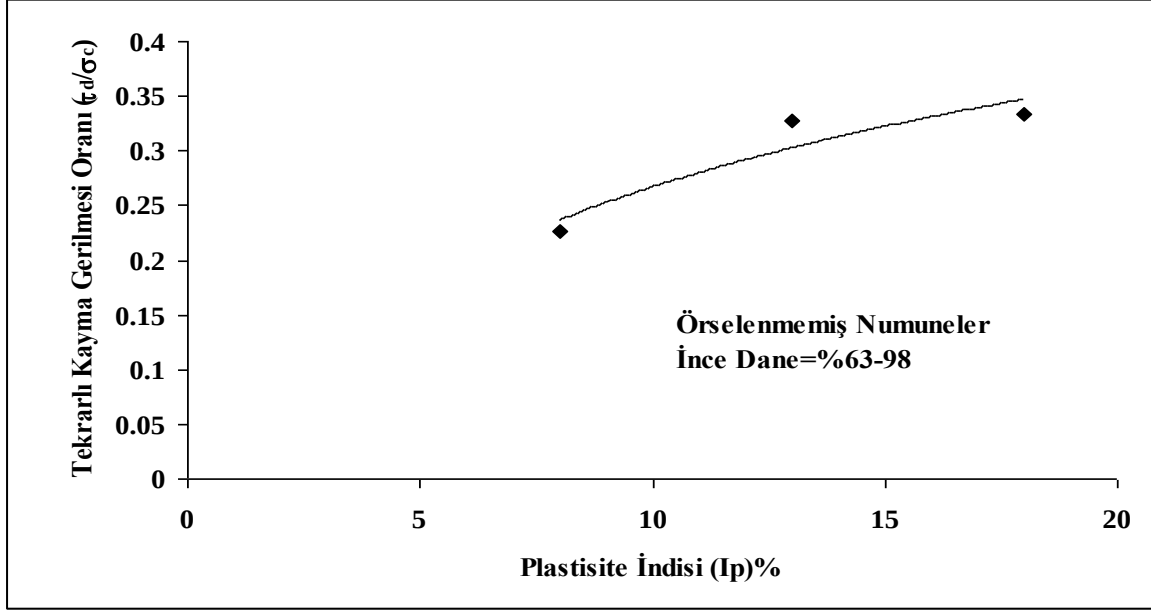
Şekil 4.65 Örselenmemiş numunelerden elde edilen boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ilişkisi

4.4.3 Örselenmemiş Numunelerde Plastisite İndisi ve İnce Dane Miktarının Dinamik Mukavemete Etkisi

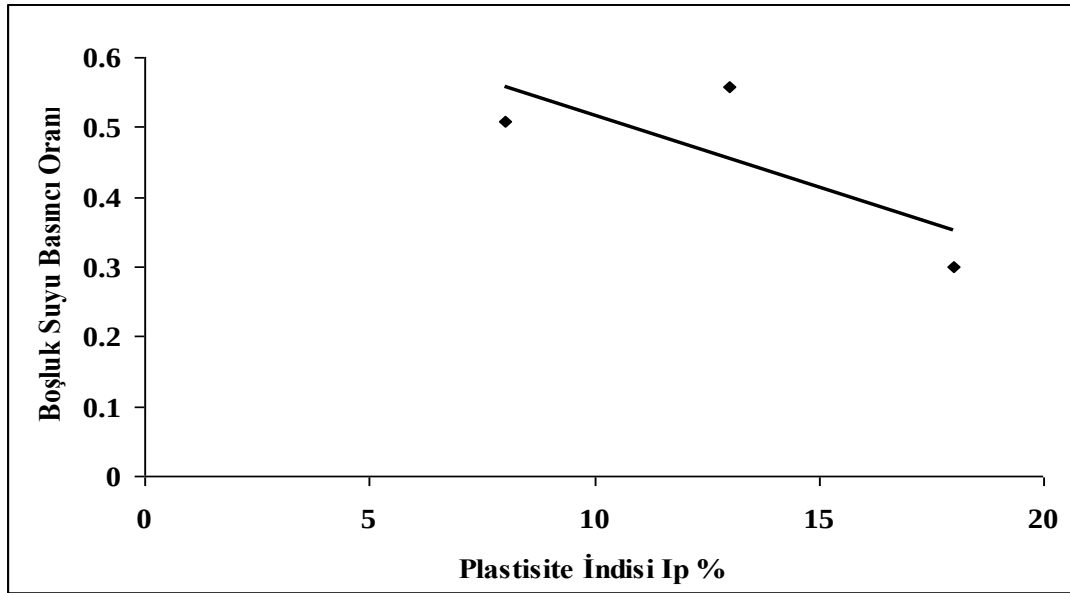
Şekil 4.66'da örselenmemiş numunelerde yapılan deneylerden elde edilen tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi ilişkisi belirtilmiştir. N=2 çevrim sayısı için çizilen eğriden artan plastisite indislerinde doğal numunenin de laboratuvarında hazırlanan numuneler gibi dinamik mukavemetinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.67' de ise boşluk suyu basıncı oranının ($\Delta U/\sigma_c$) plastisite indisiyle değişimi görülmektedir. Artan plastisitelerler örselenmemiş zemin numunesinde belli bir plastisite indisinden sonra boşluk suyu basınçları azalmaktadır. Şekil 4.68'de ince dane miktarının siltli örselenmemiş zemin numunelerinde dinamik mukavemete etkisi gösterilmiştir. Tekrarlı gerilme oranının ince dane oranı (İDO) ile değişimi,

$$\tau_d/\sigma_c = 0.006 \times \text{İDO}^{0.8764} \quad (4.3)$$

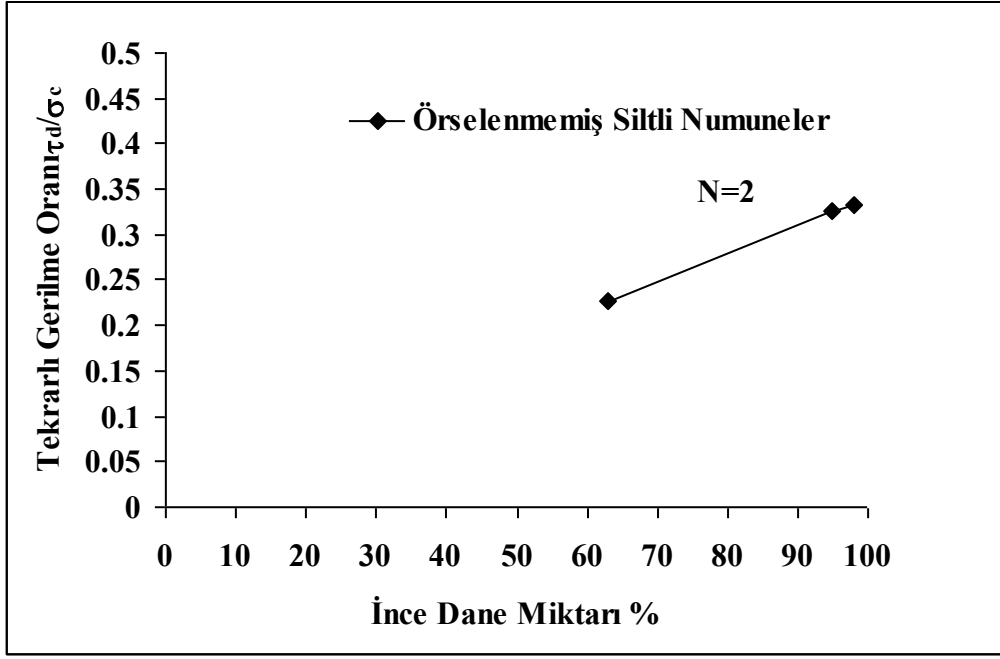
şeklinde hesaplanmıştır. Bağıntının R^2 değeri 0.99 dur. Plastisite indisi % 8-18 aralığında değişen numunelerde N=2 çevrimde göçmeye ulaşıldığı durumda ince dane yüzdesi daha büyük olan zemin numunesinin dinamik mukavemeti de daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte ele alınan zeminler ince daneli ve kohezyonlu zeminler olduğundan kum miktarı sonuçlarda etkili olmaktadır. Şekil 4.68’den kum miktarının, zemin çakıl içermediği için, dinamik mukavemeti azaltacağı bulunabilir.



Şekil 4.66 Örselenmemiş numunelerde plastisite indisinin dinamik mukavemete etkisi



Şekil 4.67 Örselenmemiş numunelerde plastisite indisinin boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi



Şekil 4.68 Örselenmemiş numunelerde ince dane miktarının dinamik mukavemete etkisi

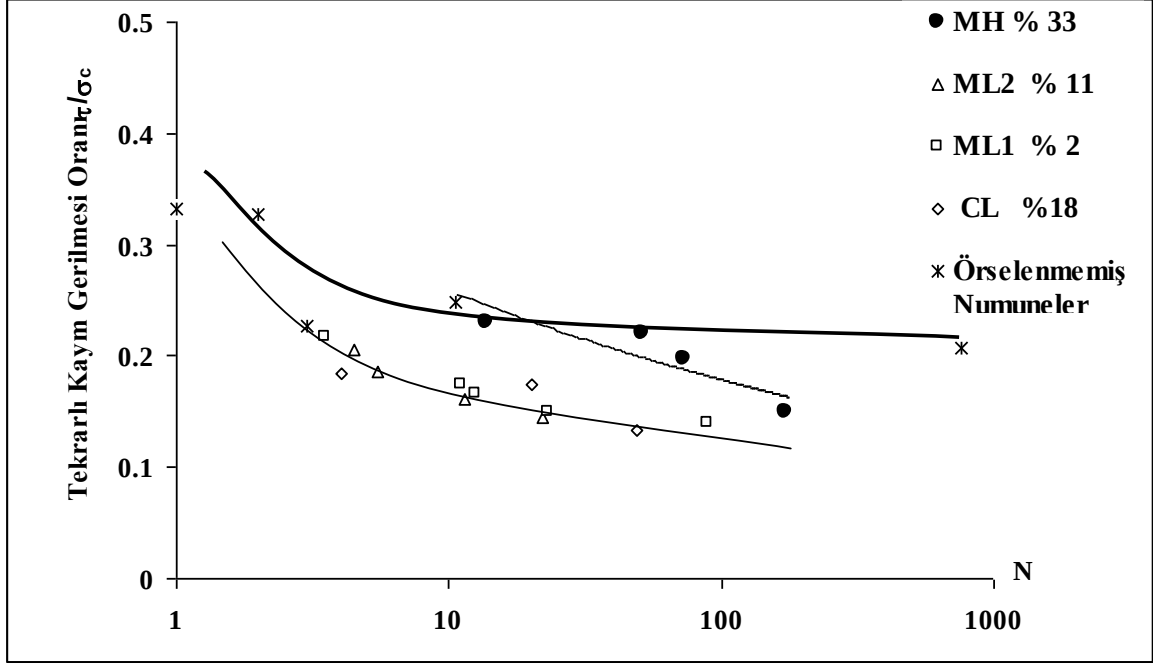
4.5 Laboratuvar Numuneleri İle Örselenmemiş Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada laboratuvarda hazırlanan ve örselenmemiş olmak üzere iki farklı türde zemin numunesinde dinamik ve statik burulmalı kesme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı değişimleri şeklinde açıklanmıştır. Bu bölümde ise, bu sonuçlar kendi içerisinde kıyaslanmaktadır.

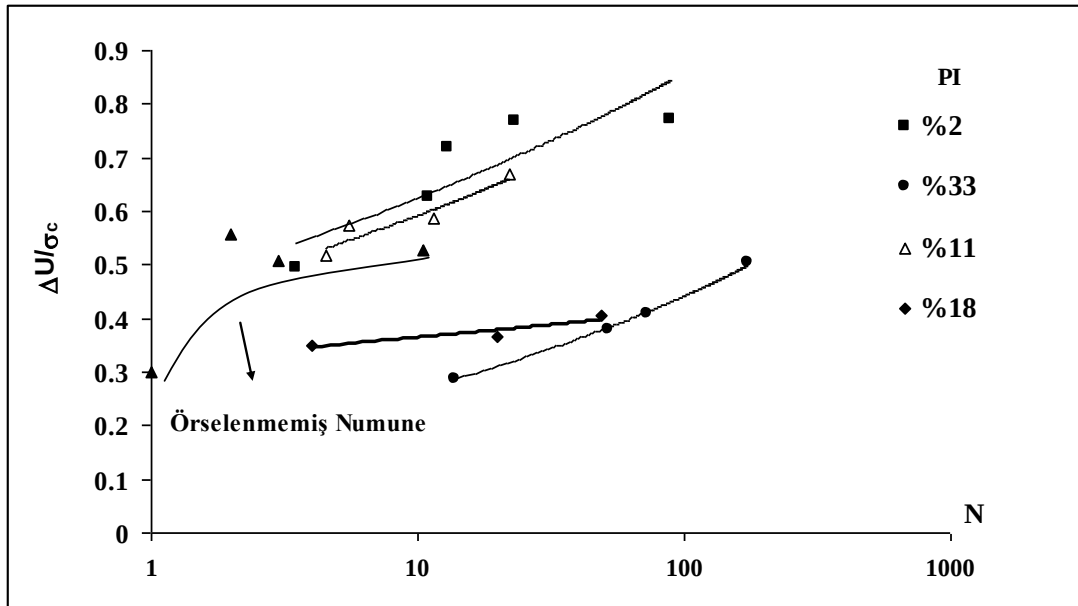
Şekil 4.69’da laboratuvar numunelerinde ve örselenmemiş numunelerde elde edilen tekrarlı kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı ilişkileri görülmektedir. Örselenmemiş yumuşak siltli numuneler laboratuvarda hazırlanan örselenmiş numunelere göre daha fazla dinamik mukavemete sahiptir. Örselenmiş numunelerde ise plastisitesi % 33 olan Adapazarı numunesinin mukavemeti diğer numunelere göre daha fazladır.

Numunelerin boşluk suyu basıncı oluşumları da yapılarından etkilenmektedir. Arazide mevcut daneler ve boşluklu yapısını koruyan örselenmemiş numunelerde yapılan tekrarlı yüklemelerde boşluk suyu basınçları, plastisite indisine bağlı olmaktadır. Buna göre plastisite indisi %18 ve % 33 olan laboratuvar numunelerinde oluşan boşluk suyu basınçları

örselenmemiş numunelere oranla daha düşük seviyelerdedir (Şekil 4.70). Örneğin 12 çevrimde % 18 plastisiteli zemin numunesinde boşluk suyu basıncı oranı 0.37, % 33 plastisiteli numunede 0.26 iken, örselenmemiş zemin numunelerinde bu oran yaklaşık 0.48 mertebesindedir. Laboratuvar numunelerinde plastisite azaldıkça boşluk suyu basınçları da artmaktadır.



Şekil 4.69 Örselenmemiş numunelerle laboratuvar numunelerinde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi



Şekil 4.70 Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkileri

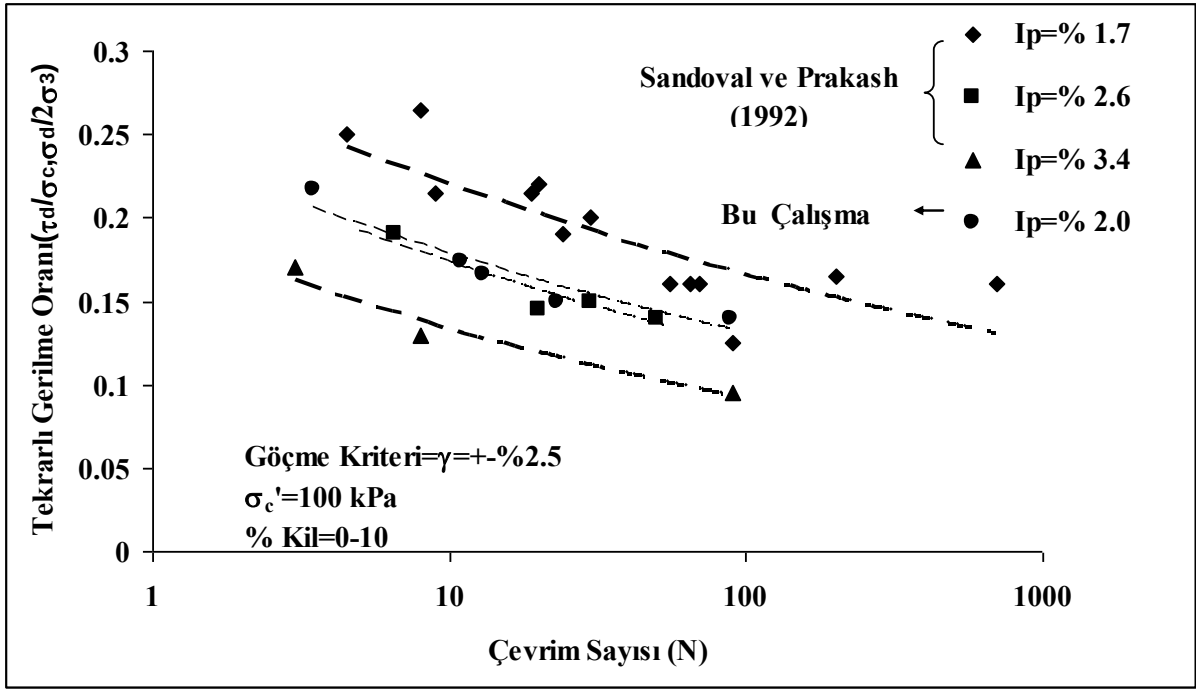
Örneğin aynı çevrim sayısında (N=12), % 2 plastisiteli numunede boşluk suyu basıncı oranı 0.65, % 11 plastisiteli numunede ise yaklaşık 0.60 civarındadır.

Sonuç olarak örselenmemiş numunelerde yapılan tekrarlı yükleme deneylerinde dinamik mukavemet önemli ölçüde laboratuvar numunelerinden daha yüksektir. Bununla birlikte örselenmemiş zemin numunelerinde de laboratuvar numuneler gibi plastisite ile boşluk suyu basınçları azalmakta, ancak laboratuvar numunelerinde elde edilen boşluk suyu basınçları, örselenmemiş numunelerle kıyaslandığında, plastisite indisinden daha çok etkilenmektedir.

4.6 Deney Sonuçlarının Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

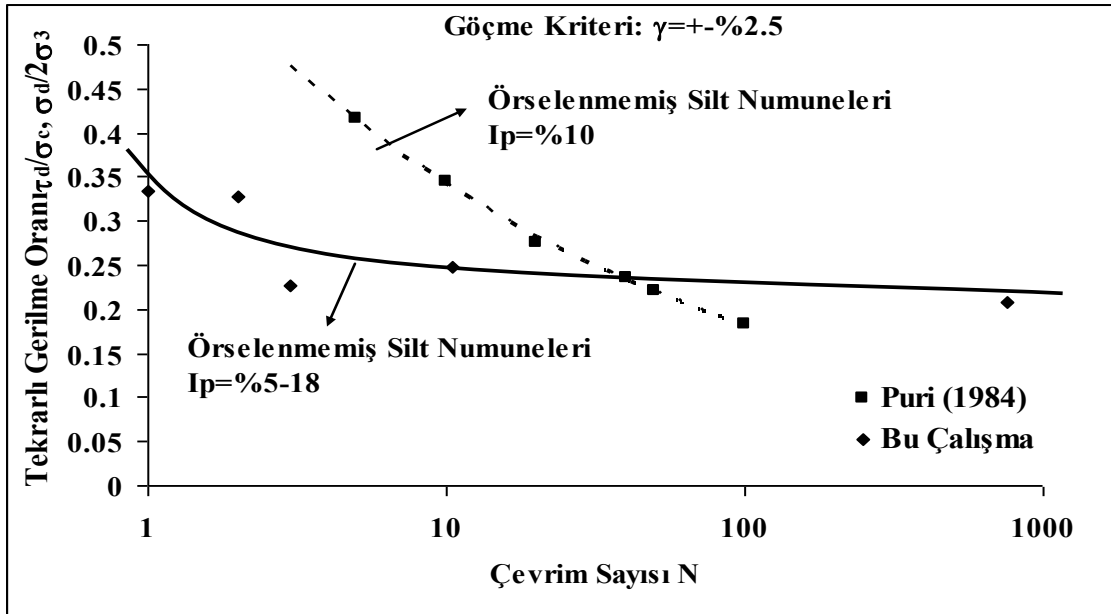
Bu bölümde, elde edilen dinamik deney sonuçları çeşitli araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalarla karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla deneylerde kullanılan numuneler ve deney aletinin özellikleri iki farklı kriter olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Şekil 4.71’de bu çalışmada kullanılan % 2 plastisiteli laboratuvar numunesinin deney sonuçları, Sandoval ve Prakash (1992) tarafından yapılan araştırma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, plastisite indisi % 1.7-3.4 arasında değişen killi silt numunelerinde, 100 kPa konsolidasyon basıncı altında $\pm$ % 2.5 birim kayma seviyesine kadar dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Artan plastisite ile siltli zeminin dinamik mukavemeti azalmaktadır. Bu çalışmada kullanılan siltli numunenin dinamik mukavemeti % 1.7 plastisiteli numuneden daha düşük çıkmakla birlikte, % 2.6 ve 3.4 plastisiteli numunelere göre daha mukavemetlidir. Ancak Sandoval ve Prakash (1992), düşük plastisiteli siltli zeminin dinamik mukavemetinin % 1.7-3.4 plastisite aralığından sonra artan plastisite ile arttığını, ancak belli bir orandan sonra azalmanın başladığını öne sürmüşlerdir.

Şekil 4.72’de Puri (1984)’nin % 10 plastisiteli örselenmiş siltli zemin numunelerinde yaptığı dinamik üç eksenli deneylerle ile bu çalışmada kullanılan % 11 plastisiteli laboratuvar numunesinde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Aynı özellikteki zemin numunelerinde aynı koşullar altında yapılan dinamik deneylerde, deney sisteminin etkisi görülmektedir. Numunelerin dinamik burulmalı kesme mukavemetleri, dinamik üç eksenli mukavemetlerden daha düşük elde edilmektedir.

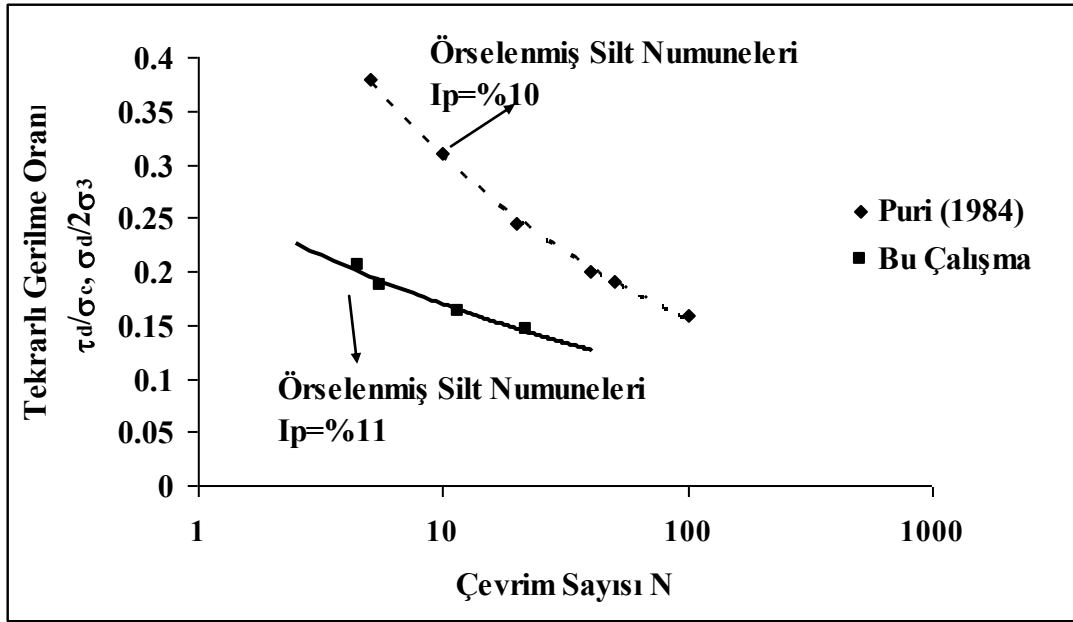


Şekil 4.71 Siltli zeminlerde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Sandoval ve Prakash (1992))

Şekil 4.73'te ise yine Puri (1984), tarafından gerçekleştirilen dinamik üç eksenli deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan numuneler örselenmemiş yumuşak siltli zemine aittir. Dinamik üç eksenli deneyden elde edilen mukavemetler, laboratuvar numunelerinde olduğu gibi daha yüksek seviyelerdedir.



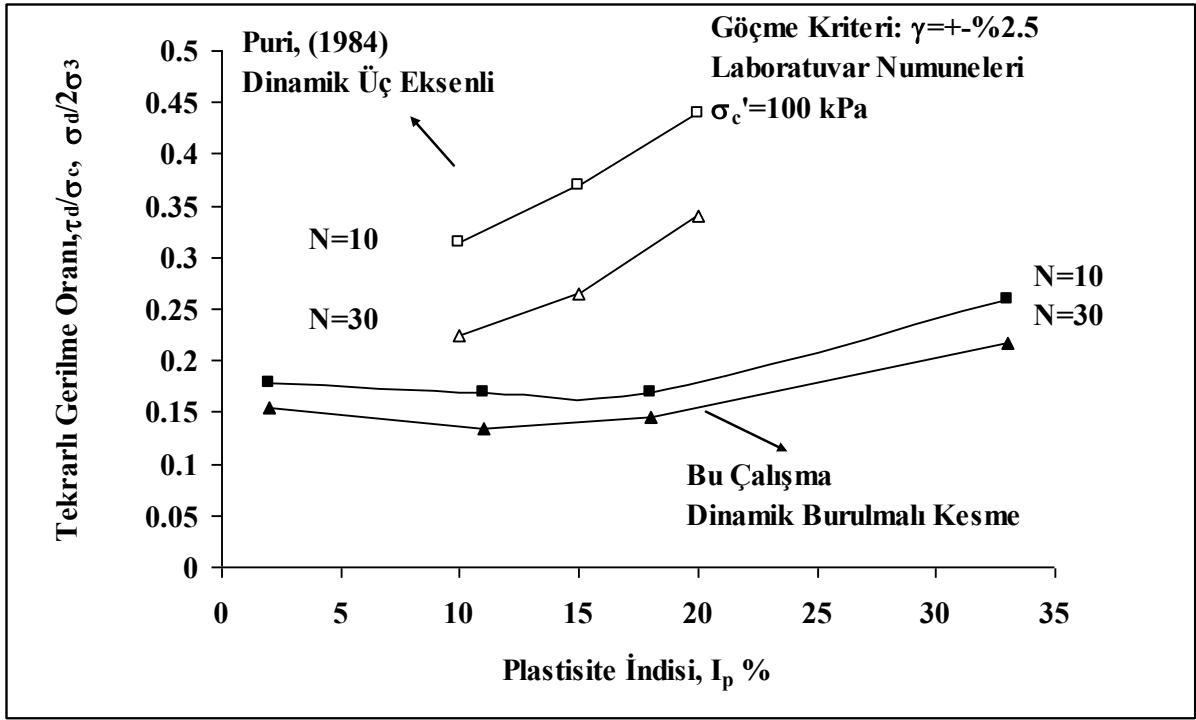
Şekil 4.72 Örselenmiş siltli zemin numunelerinde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi



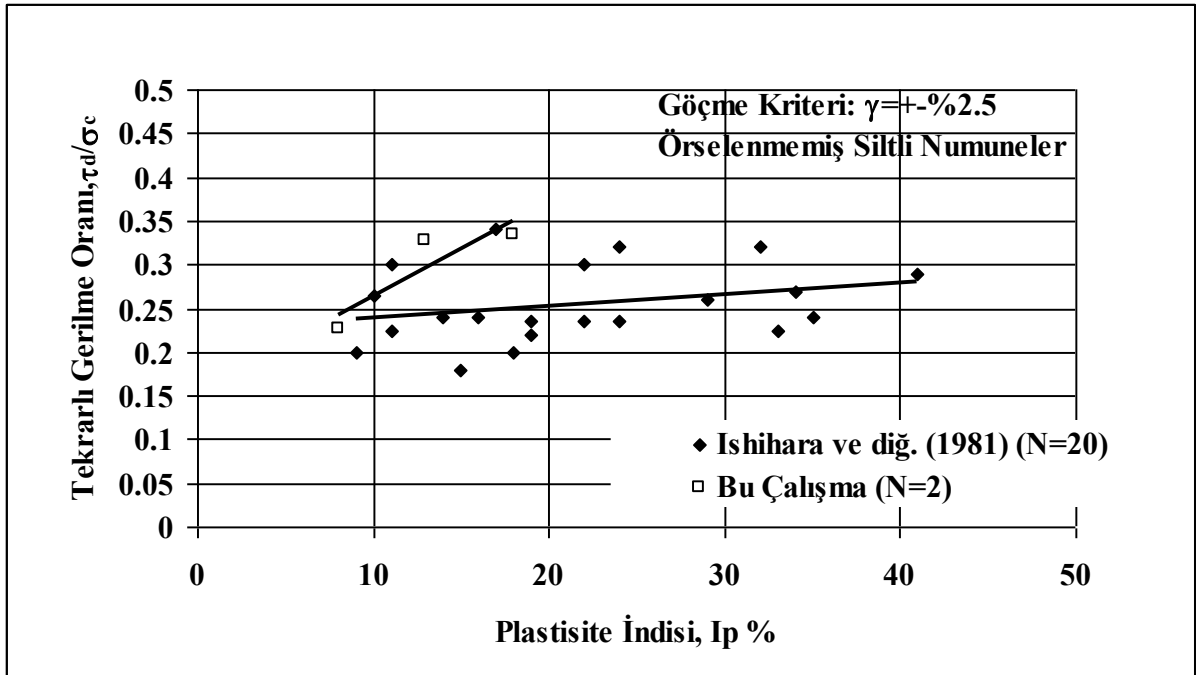
Şekil 4.73 Örselenmemiş zemin numunelerinde tekrarlı gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 4.74'te 10 ve 30 çevrimde laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Puri (1984), tarafından yapılan dinamik üç eksenli deneylerde yumuşak siltli laboratuvar numuneleri kullanılmıştır. Buna göre göçme seviyesine kadar ($g=\pm\%2.5$) yapılan dinamik deneylerde plastisite indisi arttıkça siltli zeminin mukavemeti artmaktadır. Ancak artan çevrim sayılarında, mukavemetteki artış daha düşük gerilme seviyelerinde olmaktadır. Şekil 4.72 ve 4.73'te de görüldüğü gibi dinamik üç eksenli deneyden elde edilen mukavemetler dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen mukavemetlere göre daha büyüktür. Bu çalışmada % 11 plastisite indisine kadar mukavemetin azaldığı ancak bu seviyeden sonra Puri (1984)'ün çalışmasında olduğu gibi dinamik mukavemet plastisite indisi ile artmaktadır.

Şekil 4.75'te bu çalışmada kullanılan örselenmemiş, yumuşak siltli zemin numunelerinde yapılan dinamik deneylerde tekrarlı kayma gerilmesi oranının plastisite indisiyle olan değişimi, Ishihara (1981)'nin % 30 ince dane içeren siltli zeminlerde yapmış olduğu dinamik üç eksenli deneylerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada % 10-20 plastisite aralığında tekrarlı kayma gerilmesi oranının 0.35 seviyelerine çıktığı görülürken, Ishihara (1981)'in çalışmasında eğilim $\tau_d/\sigma_c=0.25-0.35$ mertebesinde-dir. Bununla birlikte çalışmalarda plastisite indisiyle birlikte siltli kum ve killi silt zeminlerin dinamik mukavemetinin arttığı belirlenmiştir.

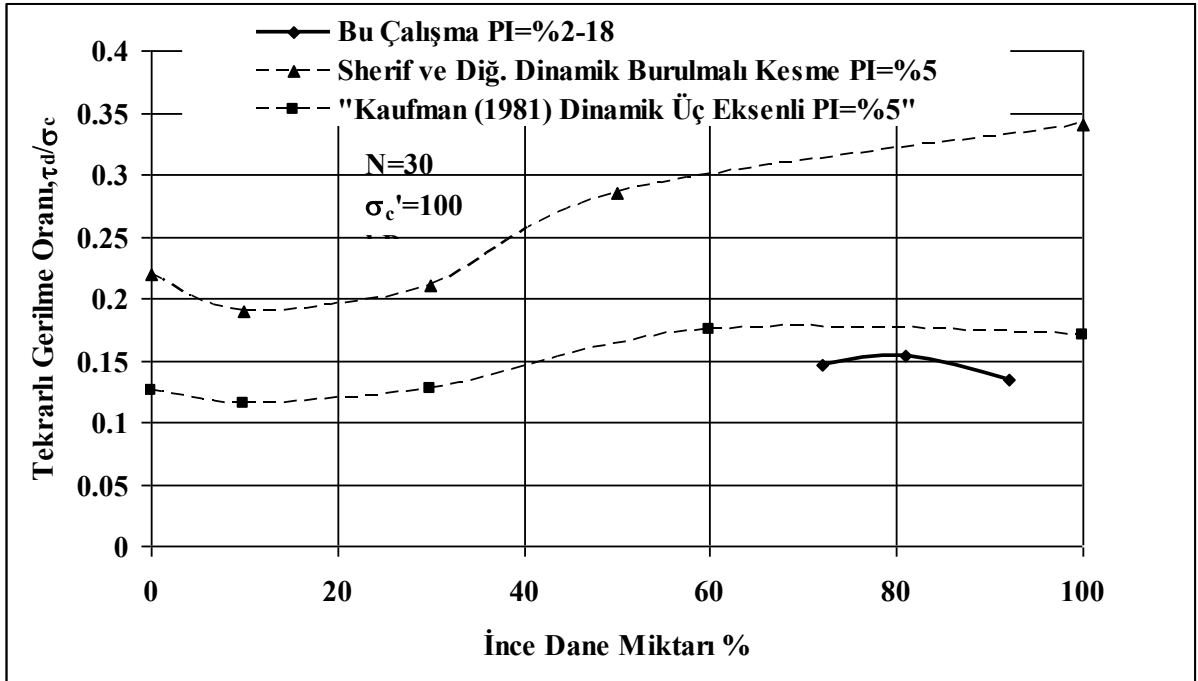


Şekil 4.74 Laboratuvar ortamında hazırlanan siltli zemin numunelerinde tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi ilişkisi



Şekil 4.75 Örselelenmemiş siltli zemin numunelerinde tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi ilişkisi

Şekil 4.76’da bu çalışmada kullanılan örselenmiş laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik burulmalı kesme deneyleriyle, Kaufman (1981) tarafından $I_p = \% 5$ plastisiteli siltli zeminde 30 çevrim sayısında $\pm \% 2.5$ birim kayma seviyesine kadar yapılan dinamik üç eksenli deneyleri ve Sherif ve diğ. (1983) tarafından benzer numuneler üzerinde yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre araştırmacılar tarafından kumlu zeminlerde ince dane miktarı arttıkça dinamik mukavemetin fazla değişmediği belirlenmiştir. Ancak $\% 30$ ince dane yüzdesinden sonra dinamik mukavemet ince dane eklendikçe artmaktadır. Bu çalışmada ise sınırlı bir aralıkta ince dane miktarının değiştiği düşünülürse dinamik mukavemetin fazla değişmediği söylenebilir. Bunun yanında, dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen sonuçlar Kaufman (1981)’in sonuçlarına yakındır. Ayrıca dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen mukavemetler dinamik burulmalı kesme deneylerinden daha düşük bulunmuştur.



Şekil 4.76 İnce dane miktarının laboratuvar numunelerinde dinamik mukavemete etkisi

4.7 Sonuç

Bu bölümde dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan dinamik ve statik deney sonuçları sunulmuştur. Buna göre deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler, tekrarlı gerilme seviyesi, birim kayma genliği, çevrim sayısı, kritik birim akma deformasyonu,

plastisite indisi, ince dane miktarı, kuru birim hacim ağırlığı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı, deney sistemi, numune hazırlama yöntemi ve numune yapısı olarak belirlenmiştir.

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. Örselenmiş laboratuvar numunesinde ise plastisite indisi azaldıkça boşluk suyu basınçları artmakta, dolayısıyla efektif gerilmeler azalmaktadır. Böylelikle düşük plastisiteli siltte mukavemet kayıpları artan birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçlarına da bağlı olmaktadır.

Deney sonuçlarında yumuşak killi zeminde konsolidasyon süresiyle dinamik mukavemet arttığı belirlenmiştir. Yapılan statik deneylerde ise yükleme hızıyla mukavemet artmaktadır. Dinamik deneylerden sonra yapılan statik deneylerde laboratuvarda hazırlanan siltli numunelerle örselenmemiş numunelerin drenajsız statik mukavemetlerinde önemli ölçüde azalma olduğu belirlenmiştir. Buna karşın tekrarlı gerilmeler altında siltli ve killi zeminin statik mukavemeti, kritik bir akma deformasyonu seviyesine kadar fazla azalmamaktadır. Ancak bu seviyeden sonra siltli kil zemin numunesinde kalıcı deformasyonlar oluşmakta ve kayma mukavemeti % 40'a varan oranda azalmaktadır.

Laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan dinamik deneylerde plastisite arttıkça belli bir seviyeden sonra dinamik mukavemet artmaktadır. Bununla birlikte artan plastisitelerde boşluk suyu basınçları aynı çevrim sayısında daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Örselenmemiş zemin numunelerinde $\pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan dinamik deneylerde mukavemetin, laboratuvar numunelerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Boşluk suyu basınçları örselenmemiş numunelerde de çevrim sayıları arttıkça sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte birim kayma deformasyonları hızla artmakta, belirli bir kayma deformasyonundan sonra numunede kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir.

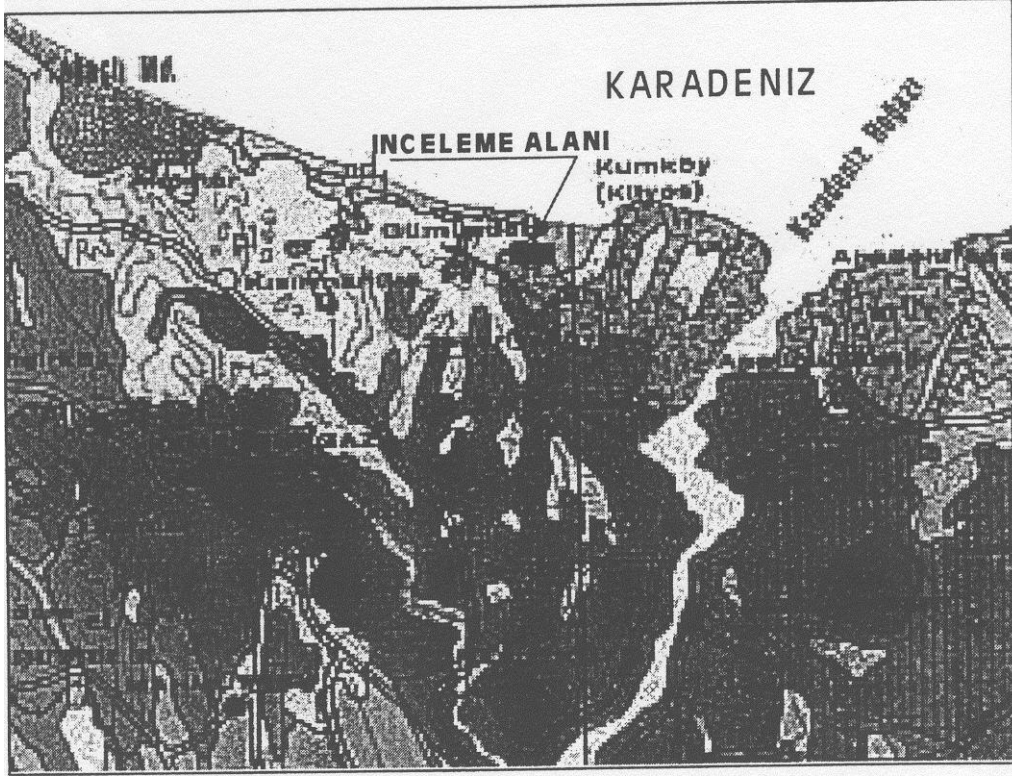
5. NUMUNELERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE MİKROYAPI İNCELEMELERİ

5.1 Giriş

Bu bölümde laboratuvarı hazırlanan örselenmiş numunelerle araziden alınmış örselenmemiş numunelerin yapısal özelliklerini belirlemek üzere yapılan mikroskop inceleme çalışması anlatılmaktadır. Öncelikle malzemelerin alındığı bölgelerin jeolojisi hakkında bilgi verilmektedir. Sonra optik mikroskopta hazırlanan numune yapısının inceleme adımları anlatılmakta, bu çalışmada kullanılan yöntem hakkında bilgi verilmektedir. İnceleme sonuçları ise, dinamik burulmalı kesme deney aletinin üç eksenli hücresinde uygulanan konsolidasyon öncesi ve tekrarlı yükleme sonrası zemin numunesinin boşluklu yapısındaki değişimi, daneler özelliklerinin tayinini ve zeminin anizotropisinin görüntü analizleri ile belirlenmesini kapsamaktadır.

5.2 Numunelerin Alındığı Bölgelerin Özellikleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan örselenmiş numunelerin ilki, İstanbul Sarıyer Belediyesi sınırları içinde Gümüşdere Köyü Bağlar Mevkii M6 numaralı çukurdan alınmıştır. Bölgeyi kapsayan parsel, kuzey-güney uzanımlı sığ bir vadi ve bunun iki yamacında yer almaktadır. Arazinin deniz seviyesinden yüksekliği 88-100 m dir. Kuzeyinde Karadeniz, güneyinde ise orman alanı bulunmaktadır (Şekil 5.1). Arazi güneybatıya eğimli bir yamaç niteliğindedir. Kuzeyde 100 kotuna kadar yükselmekte, güneybatıda ise 88 kotuna kadar inmektedir.



Şekil 5.1 Gümüşdere bölgesinin İstanbul il sınırları içerisindeki yeri

Örselenmiş numunelerin diğerleri Adapazarı şehir merkezinde Ozanlar ve Pabuççular Mahallelerinde açılan muayene çukurlarından alınmıştır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi'nden sonra bölgede önemli maddi hasar ve can kaybı meydana gelmiş olduğundan, şehir merkezi'nde bir çok geoteknik araştırma ve incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan örselenmiş numuneler de, deprem sırasında zeminde sıvılaşma ve taşıma gücü kaybı meydana gelen bölgelerden alınmış olup, yumuşak siltli ve killi özellik göstermektedir. Genel olarak alüvyonlar üzerine kurulmuş olan Sakarya ilinin birçok yerinde yumuşak, gevşek ve suya doygun zemin özellikleri bölgeye hakimdir. O yüzden depremler sırasında sıvılaşan zeminde yatay ve düşey yerdeğiştirmeler meydana gelirken bu zeminler üzerine inşa edilmiş yapılarda da önemli hasarlar oluşmaktadır.

5.2.1 Numunelerin Alındığı Bölgelerin Genel Jeolojisi

Gümüşdere bölgesi ve çevresinde Karbonifer'den Miyosen'e kadar değişen zaman aralığında çökelmiş sedimanter kökenli kaya birimleri bulunmaktadır. Avrupa yakasında geniş alanlarda yüzeyleyen ve İstanbul Paleozoyiği'nin en üst kesimini oluşturan Karbonifer, yaşlı Trakya formasyonu, kireçtaşı mercekli, fosfat yumruları içeren, çört tabakaları ile başlamakta, bunun üzerine ardalanmalı olarak kilitaşı, kumtaşı, türbiditik kumtaşı şeyl ve çamurtaşından oluşan klastik istif gelmektedir. Türbiditik çökel niteliği taşıyan istifin, taze kumtaşı düzeyleri açık gri, açık yeşil renktedir. Hava ile temas eden yüzeyleri, hızla ayrışarak açık kahve, kirli sarı renk almakta ve kısa sürede çamur haline dönüşmektedir. İnce tabakalı ve kalın laminalı, koyu gri, siyah renkli şeyl katmanlarını oluşturan kil, kaolinit ve illit türündedir. Bazı kumtaşı düzeylerinde izlenen alt paralel laminasyon zonunda, çökeltme sırasında dip akıntıları ile oluşmuş, küçük ölçekli devrik kıvrımlar gözlenmektedir. Tabanı izlenemeyen formasyonun kalınlığı 2000 m den daha fazla tahmin edilmektedir.

İstanbul ve dolaylarında iki farklı Mesozoyik istifi bulunur. İstanbul boğazının kuzeybatısında Sarıyer Gümüşdere Köyü'nün güneyinde mostraları izlenen Triyas, Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu ile birlikte Kretase üzerinde bindirmeli olarak izlenir. Buradaki Triyas, yaşlı çökel istif, sarı renkli kumlu kireçtaşları, gri-siyah renkli dolomitik kireçtaşı-dolomit ve şeyller ile temsil edilir.

Gümüşdere ve çevresinde, ince bitkisel toprak örtüsü altında Çukurçeşme formasyonuna ait killi kumlu silt, killi silt ve az çakıllı kum ve bunların karışımından oluşmuş zemin tabakaları bulunmaktadır. Üstte yaklaşık 0.4 m kalınlığında bitkisel toprak, bunun altında killi silt en altta ise çapraz tabakalı seyrek çakıllı kum bulunmaktadır. Çukurçeşme formasyonu İstanbul yarımadasında Haliç-Büyükçekmece arasında düzenli bir seri halinde, kuzeye doğru Kemerburgaz-Kilyos arasında ise , genellikle tepelerin en üst kesimlerinde münferit mostralar şeklinde yaygın olarak izlenir. Sarımsı kahve ve pas renkli gevşek kil çimentolu veya çimentosuz kil, silt ve çakıl arakatlı, tutturulmamış veya kötü tutturulmuş, yer yer omurgalı kemik ve diş kalıntıları içeren bol mikalı kum ve kumtaşlarından oluşur.

Bu çalışmada kullanılan örselenmiş numunelerin bir diğer kısmı Adapazarı şehir merkezi'nden alınmıştır. Adapazarı ve çevresinin büyük bir kısmını Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin getirdiği, çakıllı ve siltli kumlar içeren Kuvaterner alüvyon birikintileri oluşturur. Genellikle çakıl-kum-silt serileri devamlı bir şekilde görülür. Bu birikintiler merceksi veya bant şeklinde düşük plastisiteli kil ve silt serileri içerirler. Kil, kum, çakıl ve silt bazen tek başlarına belli seviyelerde bazen de bunların değişik kombinasyonları şeklinde ardalanmalı olarak görülmektedir (Önalp, A. ve diğ., 2000).

Adapazarı, Türkiye kuzeyinde doğudan-batıya uzanan Kuzey Anadolu Fayı'ndan dolayı tektonik açıdan aktiftir. Şehir kötü zemin koşullarından dolayı tarihte pek çok farklı büyüklükteki depremlerden zarar görmüştür. Yerel zemin koşullarından dolayı, deprem yükleri altında büyük oranda sıvılaşma potansiyeli ve taşıma gücü kaybı açısından tehlike arz etmektedir (Erken, 2001). Bu nedenle Adapazarı zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının ve yapısal özelliklerinde meydana gelebilecek değişimlerin araştırılması önem kazanmıştır.

Örselenmemiş numunelein alındığı İzmir Çiğli bölgesi de benzer jeolojik ve zemin yapısına sahiptir. Yumuşak, alüvyon dolguların yeraldığı bölge, 1. deprem kuşağındadır. Bu nedenle yerel zemin koşulları, deprem etkisi altında mevcut mühendislik yapılarına önemli ölçüde tehlike arz etmektedir.

5.3 Optik Mikroskop İncelemeleri: Numune Hazırlama ve Görüntü Analizleri

5.3.1 Kullanılan Mikroskop Düzeneği

Çalışmanın bu bölümünde, dinamik burulmalı kesme deney sistemi için laboratuvarda hazırlanan ve örselenmemiş numunelerin izotropik konsolidasyon öncesi sahip oldukları yapı ile konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası oluşturdukları yapının araştırılması yapılmıştır. Bunun için, Boğaziçi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndaki dijital kameralı yüzeysel ışık kaynağına sahip, X330'a kadar büyütme yapabilen optik mikroskop kullanılmıştır. Görüntülerin alımı sırasında önceden hazırlanan blok numuneler mikroskop merceği altına yerleştirilip, odak uzaklığı mikroskop düzeneği aracılığıyla ayarlanmıştır. Dijital kamera

aracılığıyla elde edilen görüntüler bilgisayara 640*480 piksel çözünürlükte iki boyutlu olarak aktarılarak, kamerada istenen netliğin sağlandığı bir anda dondurulup kaydedilmiştir.

5.3.2 Numune Hazırlama

Optik mikroskop altı yapı incelemesinde kullanılmak üzere blok numuneler hazırlanmıştır. Konsolidasyon öncesindeki yapının incelemesinde kullanılan numuneler İzmir Çiğli'den ve Adapazarı'ndan sondajlarla alınmış örselenmemiş silindirik numunelerle, İstanbul Gümüşdere'de ve Adapazarı şehir merkezinde açılan muayene kuyularından alınan örselenmiş ve sondajlardan alınan örselenmemiş numunelerdir. Numunelerin yükseklikleri 14.0-20.0 cm, iç çapları 3.0-6.0 cm, dış çapları ise 7.0-10.0 cm dir. Numuneler, üç eksenli hücrede hazırlandıktan sonra ters basınç altında doygunlukları sağlanmıştır. Doygunluğun sağlanmasının ardından 100 kPa basınçta izotropik konsolidasyona bırakılmışlardır. Bir kısım numune konsolidasyonun tamamlanmasının ardından incelemelerde kullanılmak üzere numuneler hücreden çıkartılmıştır. Konsolidasyon öncesi yapılarının belirlenmesi amacıyla tabii su muhtevasını koruyan örselenmemiş numunelerden, numune yüksekliği boyunca aralarında 2'şer cm; laboratuvar numunelerinde ise 4'er cm mesafe olacak şekilde numune üst yüzeyinden, ortasından ve altından; örselenmemiş numunelerde 3'er cm, laboratuvar numunelerinde ise 4'er cm'lik kısımdan kesitler alınmıştır. Daha sonra bu kesitlerden yaklaşık 1x1x1 cm boyutlarında, ilk aşamada 5'er adet blok numune çıkarılmıştır. Bunun için kesitler önce sıvı azota batırılıp 5-15 dakika arasında bekletilmiştir. Suyun donması sırasında buzun kristalleşmesini önlemek için, donma sıcaklığının -130°C 'den daha düşük olması istenmektedir (Mitchell, 1976). Donmanın sağlanmasından sonra numunelerin birbirine dik üç kesitinden, blok örnekler çıkarılmıştır. Böylece numunelerin mevcut yapısı korunarak, incelenecek kesitlerin rastgele kırılmayla elde edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu örnekler, 30 kPa basınçta vakum uygulanan desikatörde 1-7 gün bekletilmişlerdir. Bekleme süresi numune boyutlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Böylece numune boşluklarındaki suyun katı fazdan direkt olarak gaz fazına geçişi sağlanmıştır. Havada veya etüvde sağlanan kuruma sırasında oluşan kapiler gerilmeler etkisiyle, mevcut danesel yapıda değişiklikler olacağından, sıvı azotla dondurduktan sonra vakum uygulanarak boşluk suyu alınan örselenmemiş zeminin

doğal danesel ve boşluklu yapısını koruduğu düşünülmektedir (Mitchell, 1976). Desikatörden çıkarılan blok numunelerin birbirine dik üç kesiti plastik bantla stabilize edilmiştir. Mümkün olduğunca düz bir yüzey elde edilmesine çalışılmış, görüntülerdeki topografik etkilerin en düşük seviyede tutulması sağlanmıştır. Bu işlemten sonra numuneler mikroskop altına yerleştirilmiştir ve her üç yüzeyden birbirini takip eden görüntüler alınmıştır.

5.3.3 Görüntülerin Toplanması ve Mikrografik Analizler

Optik mikroskoptan çeşitli ışık kaynakları yardımıyla dijital kamera kullanılarak farklı büyütmelerde alınan görüntülere mikrografikler adı verilmektedir. Bu çalışmada mikrografikler mikroskoba bağlı dijital kamera kullanılarak alınmıştır. Kullanılan ışık kaynağı fiber optik aydınlatıcıdır ve ısı yaymayarak numunelerin su kaybına uğramasını önlemektedir. Işık şiddeti görüntülerin alınması sırasında numune kesitine etkisinin en düşük seviyede tutulması için tüm görüntülerde sabit tutulmuştur. Aynı şekilde tüm görüntülerin birbiriyle kıyaslanması ve bir bütün olarak ele alınmaları amacıyla ışık kaynağı blok numunenin yerleşimine göre sol alt tarafta sabitlenmiştir. Bazı görüntülerde ise ışık kaynağı hem soldan hem de sağdan ışık gelecek şekilde ayarlanmıştır. Işığın numune yüzeyine geçmesiyle birlikte bilgisayar ekranında görülen parlak ve belirsiz görüntü, odak noktası ayarlamasıyla belirgin hale getirilir. Bunun için tercih edilen nominal büyütmeye göre, mikroskobun büyütme merceğinin, görüntüsü alınacak numune yüzeyine mesafesi sabit tutulmuştur. Belirgin görüntü ekranda seçildikten sonra “Global Lab. Acquire” yazılımı ile killi ve kumlu silt zemin kesitine ait iki boyutlu mikrografikler alınmıştır.

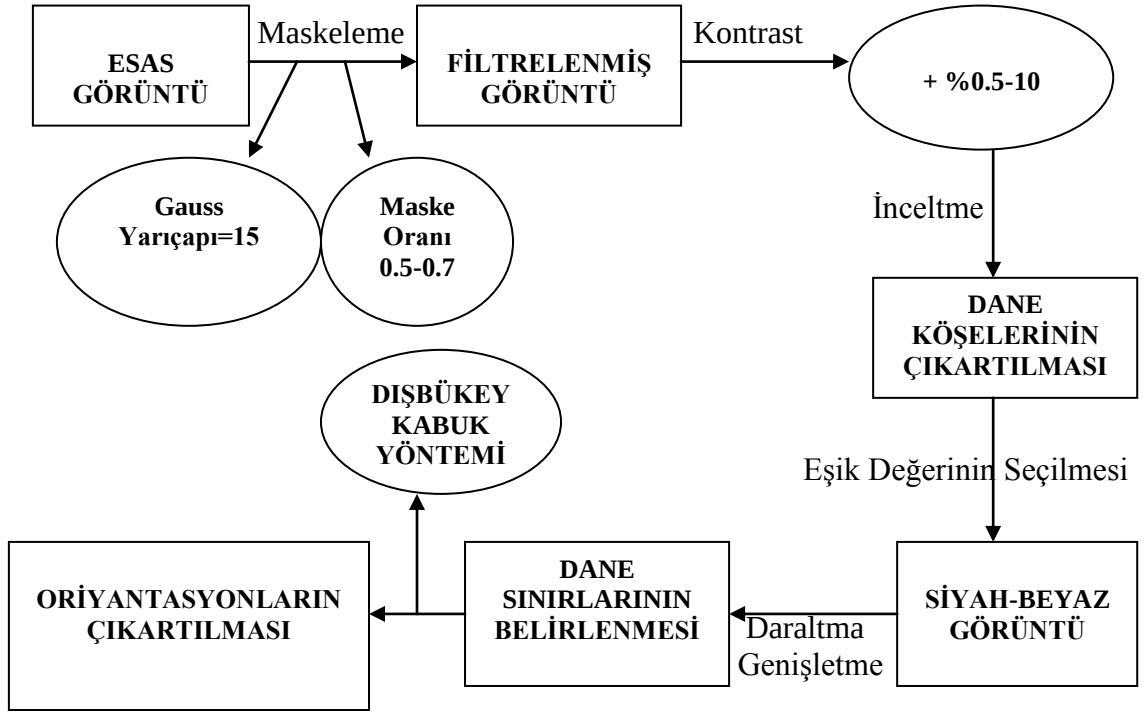
Mikrografik analizler, dijital görüntü analiz programı “Image J”, kullanılarak yapılmıştır. Bu program yardımıyla, farklı büyütmelerle elde edilen mikrografiklere göre ince kum ve silt boyutundaki danelerin şekil, boyut ve dağılımları belirlenip ölçülebilmektedir. Ayrıca danelerin birbirleriyle ve boşluklarla aralarındaki sınırlar belirlenebilmektedir (Smart, 1994). Dane sınırları belirlendikten sonra, “Dışbükey Kabuk” yöntemiyle (Luo ve diğ. 1992) danelerin oriyantasyonları ve boşluk ve çatlakların uzanım doğrultuları ve açıları hesaplanabilmektedir. Dane oriyantasyonlarının belirlenmesiyle açısız histogramları da çizilmektedir. Günümüze kadar çeşitli araştırmacılar, zeminin yapısı üzerinde araştırmalar yapmışlar, zemini oluşturan danesel ve boşluklu yapıyı ve oriyantasyonları belirlemeye çalışmışlardır.

Bunun nedeni, dane oriyantasyonlarının, zeminin jeolojik ve jeokimyasal durumunun bir göstergesi olduğu ve zeminlerin niteliksel olarak sınıflandırılmasında yardımcı olmasındandır (Smart, 1967, 1972; Dickson ve Smart 1978; Smart ve Dickson 1979; Smart ve Tovey, 1982).

Bu çalışmada, incelenen zeminlerin izotropik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası dane şekil ve boyutlarıyla, oriyantasyonlarında değişiklik olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Konsolidasyon sonrası zeminin boşluklarındaki azalma ve danelerin paralel ve yatay doğrultudaki oriyantasyonları araştırılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan siltli numunelerin oluşturduğu üniforma yakın izotropik yapı ile, örselenmemiş numunelerin doğada oluşturdukları anizotropik yapı karşılaştırılmıştır. Bu iki farklı zemine ait mikroyapının tekrarlı burulma momenti altında oluşan kayma deformasyonları etkisiyle uğradığı değişim belirlenmeye çalışılırken, özellikle silt ve ince kum boyutundaki danelerin, zeminin maruz kaldığı kayma deformasyonlarının bir göstergesi olup olmadığı araştırılmıştır.

5.3.4 Görüntü Önileme Tekniğı ve Dane Sınırlarının Çıkartılması

Mikroskopta elde edilen mikrografikler, gerek numune hazırlama sırasında, gerekse aydınlatmada kullanılan ışık şiddetinde meydana gelen değişimler nedeniyle, her zaman topografik açıdan düz ve belirgin olamamaktadır. Bunun için gelişmiş görüntü işleme programları yardımıyla öncelikle görüntülerin çeşitli filtreleme ve maskeleme adı verilen birtakım resim işleme tekniklerinden geçirilmesi gerekir. Bu tekniklere *görüntü önileme* teknikleri adı verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan *Image J* adlı görüntü işleme ve analiz programıyla bu tekniklerden bazıları, belli bir sırayı takip ederek uygulanmıştır (Şekil 5.2). Böylelikle elde edilen görüntüler ilk alındıkları andakinden daha belirgin ve seçilebilir olmakta, ince kum ve silt danelerinin ve görüntünün oluşturduğu matriks içerisinde killi bölgelerle boşluklu yapıdan ayırımı yapılabilmektedir.



Şekil 5.2 Resim önileme tekniği ve akış diyagramı

Şekil 5.3'te örselenmemiş ince kumlu ve siltli Adapazarı numunesinin yatay kesitinden X 150 büyütmeyle alınan mikrofotografik görülmektedir. Görüntüde yatay 1 mm'ye, dikey 0.75 mm'ye karşılık gelmektedir. Boşluklarla, silt daneleri ve killi bölgeler görüntüden kolaylıkla ayırt edilememektedir. Yalnız ince kum daneleri parlak beyaz olarak seçilmektedir.

Şekil 5.4'te ise aynı görüntünün önileme tekniği uygulandıktan sonraki hali görülmektedir. Bu çalışmada uygulanan görüntü önileme tekniklerinin matematiksel algoritmasına fazla değinilmeyecek, yalnızca kullanılan teknikten bahsedilecektir.



Şekil 5.3 Dinamik deney sonrası örselenmemiş Adapazarı numunesi yatay kesit görüntüsü ($X150$, $\tau_d/\sigma_c'=0.327$, $\sigma_c=100$ kPa)

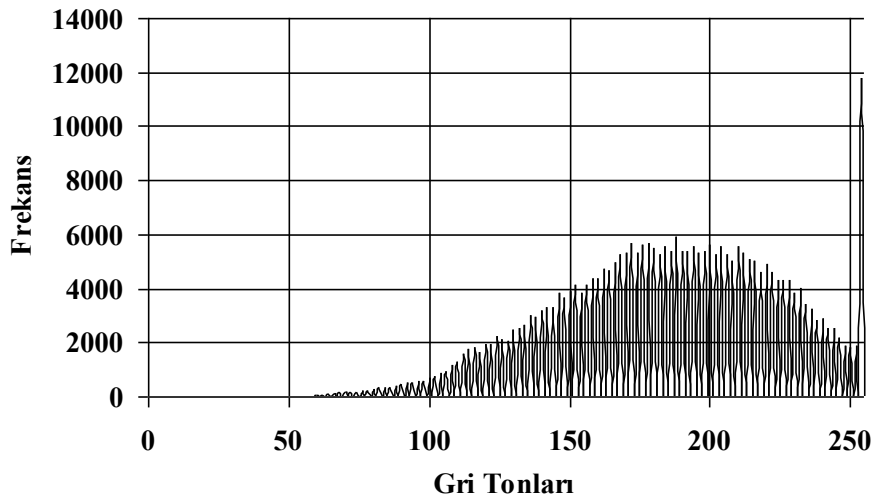


Şekil 5.4 Örselenmemiş Adapazarı numunesi yatay kesit işlem sonrası görüntü ($X150$, yatay: 1.00 mm, düşey: 0.75 mm)

Şekil 5.3, görüntü analiz programı aracılığıyla 640*480 piksel çözünürlükte taranarak üzerinde işlem yapmaya uygun hale getirilmiştir. Görüntü üzerinde yapılan ilk işlem filtreleme işlemidir. Görüntüdeki bulanıklığın kaybolması amacıyla maskeleme adı verilen bir tür filtre uygulanmıştır. Daha sonra resim üzerinde

zıtlıkların ayırt edilmesi için görüntünün kontrastı % 10 artırılmıştır. Şekil 5.4’de beyazla görülen bölgeler ise ince kum ve silt boyutundaki daneleri temsil etmektedir. Gri rengin farklı tonlarındaki kısımlar ise killi bölgelerdir. Önişlemden geçirilmiş mikrografik üzerinde bir sonraki adımda referans eksenine göre dane oriyantasyonları belirlenmiştir.

Mikrografiklerde görülen ince kum ve silt boyutundaki danelerin oriyantasyonlarının belirlenmesi için, önce görüntü içerisindeki farklı yapıdaki oluşumların ayırt edilmesi gerekmektedir. Bunun için de dane ve boşlukların birbirleriyle olan sınırları çıkartılır. Araştırmacılar ve mikromorfologlar, zemin dane sınırlarını belirlemek amacıyla farklı teknikler kullanmışlardır. Dane köşelerinin belirlenmesi (Haralick, 1984), renk ayırımı (Nevatia, 1977), ikinci türev yöntemi (Marr & Hildreth, 1980), bunlardan bazılarıdır. Önişleme programında dane sınırlarının belirlenmesi için uygulanan yöntem ise, mikrografik üzerinde farklı yapıdaki kısımlara ait köşeleri çıkartılmış görüntünün siyah-beyaz hale (Binary Image) dönüştürülmesi şeklindedir (Luo, 1992). Yalnızca siyah ve beyaz renklerin yer aldığı dönüştürme işlemi ise dane köşelerinin belirlenmesinden sonra yapılır (Bai, 1994). Şekil 5.5’te ilk görüntüye ait gri renk histogramı çizilmiştir. Daneler çoğunlukla 100-250 arasında bir değerle gri renk civarında toplanmıştır. Ancak bu histogram önişlem uygulanmadan önceki durumu göstermektedir.



Şekil 5.5 Esas görüntüye ait renk histogramı

Siyah beyaz görüntünün oluşturulması ise mikrogramdaki farklı yapıların birbirinden “segmentasyon” yoluyla ayırt edilmesi ve ön plandaki nesnelerin arka plandan ayrılması amacıyla, görüntüye ait en uygun “eşik değeri”nin seçilmesiyle gerçekleştirilir. Eşik değere sahip görüntünün tarifi;

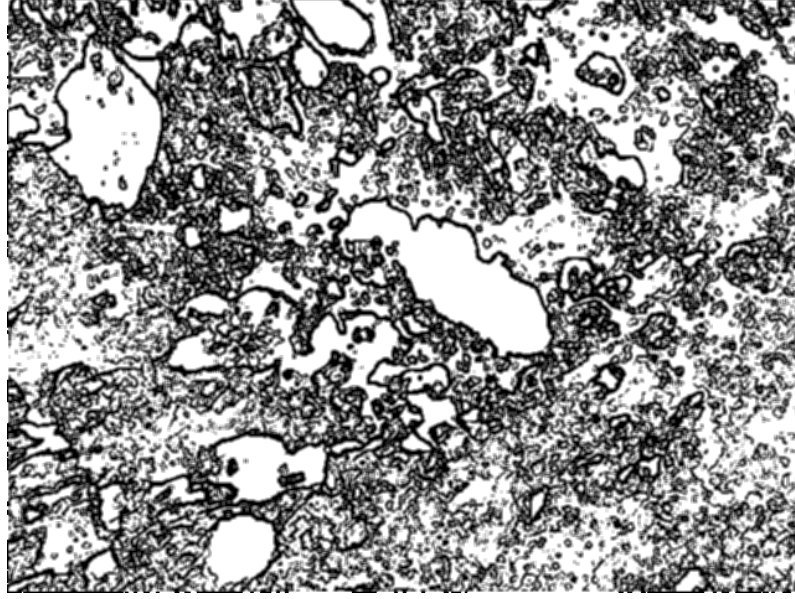
$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) > D \\ 0 & f(x,y) \leq D \end{cases} \quad (5.1)$$

şeklindedir. Buna göre histograma ait $g(x,y)$ fonksiyonu, görüntüye ait $f(x,y)$ fonksiyonunun, seçilen D değerinden büyük olduğu her piksel için 1 değerini alır. Diğer durumlarda arka plana ait 0 değerindedir. Tek bir işlem için eşik değeri E , deneme yanılma yoluyla belirlenebilir. Ancak elde edilen eşik değeri görüntüsünün ilk görüntüdeki partikül sınırlarına tam olarak uymasını sağlamak için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunun için geçerli bir yöntem, mikrograma ait “gri renk histogramı”ndan uygun bir eşik değerinin (5.2) ve (5.3) bağıntılarıyla seçilmesi suretiyle kullanılandır. Şekil 5.5’te görülen gri renk histogramına ait eşik değeri,

$$E = \int_t^{g_{\max}} P(g)gdg \quad (5.2)$$

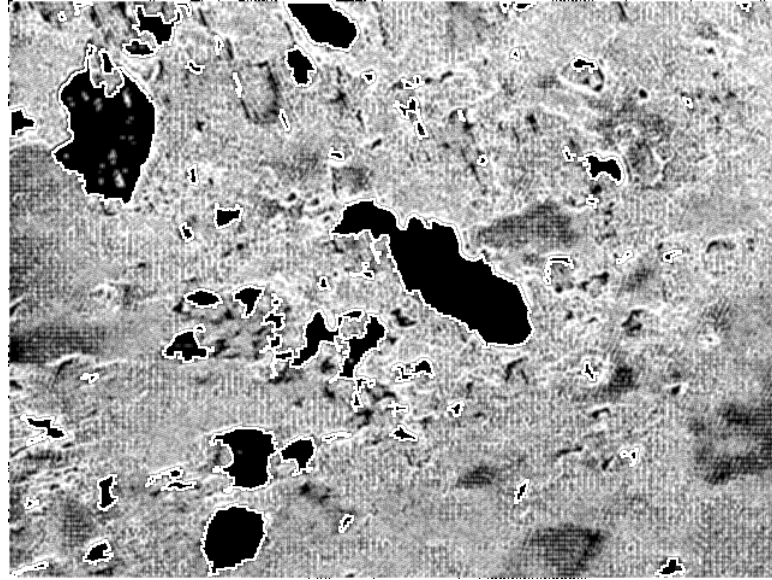
$$D = t \Big|_{E=C} \quad (5.3)$$

bağıntısından belirlenir (Luo ve Macleod, 1992). Burada $P(g)$, ele alınan görüntüye ait g gri renk şiddetindeki histogramın fonksiyonudur. D esas eşik değeri, partikül köşeleri belirlenmiş resme ait histogramın, D ile $g_{\max}$ aralığındaki ortalama frekansı, C gibi sabit bir değere eşit olacak şekilde belirlenir. Bu değer 0-255 arasındadır. Görüntü analizcileri ve mikromorfologlarca yapılmış çalışmalar bu sabit değer % 10 olabileceğini göstermiştir (Luo, Smart, 1992).



Şekil 5.6 D eşik değeri 189 olarak seçilen mikrografigin siyah beyaz görüntüsü (X150, yatay: 1.00 mm, düşey: 0.75 mm)

Şekil 5.4'ün eşik olarak belirlenmiş siyah beyaz görüntüsü Şekil 5.6'da görülmektedir. Böylece mikrografik, dane sınırlarının çizilmesi için uygun hale getirilmiştir. Şekil 5.7'de incelemesi yapılan orijinal mikrografikteki silt ve ince kum danelerinin diğer kısımlardan ayrıldığı partikül ve boşluk sınırları görülmektedir.



Şekil 5.7 Adapazarı numunesine ait kum ve silt danelerinin dinamik deney sonrası şekil ve boyutları (X150, yatay: 1.00 mm, düşey: 0.75 mm)

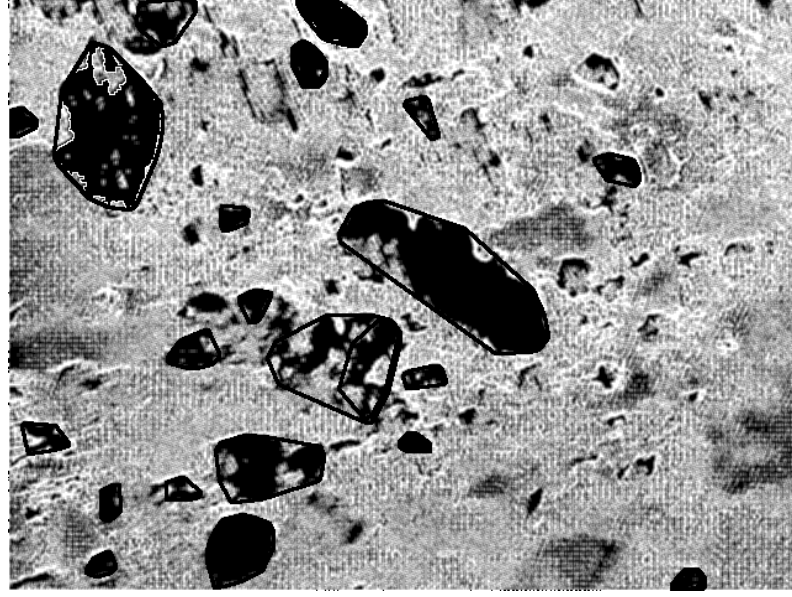
5.3.5 Dane Oriyantasyonlarının Belirlenmesi

Yapılan çalışmalarda farklı yöntemler kullanılarak dane oriyantasyonları belirlenebilmektedir. Bunlar arasında her bir daneyi tek tek ele alan dışbükey kabuk yöntemi, dönüş yarıçapı yöntemi ve yönlenmiş damar yöntemi en çok tercih edilenlerdir. Bunun dışında şiddet gradyanı, oriyantasyon haritalama, konturlama, tutarlılık oranı, morfolojik yöntem, Hough transformu, Fourier yöntemi, semi-varyans ve segmentasyon yöntemi de danelerin tek tek ayırt edilemediği durumda tercih edilen oriyantasyon belirleme yöntemlerindendir. Araştırmalar bu yöntemler arasında fazla bir farklılığın olmadığını göstermektedir (Luo ve diğ. 1992).

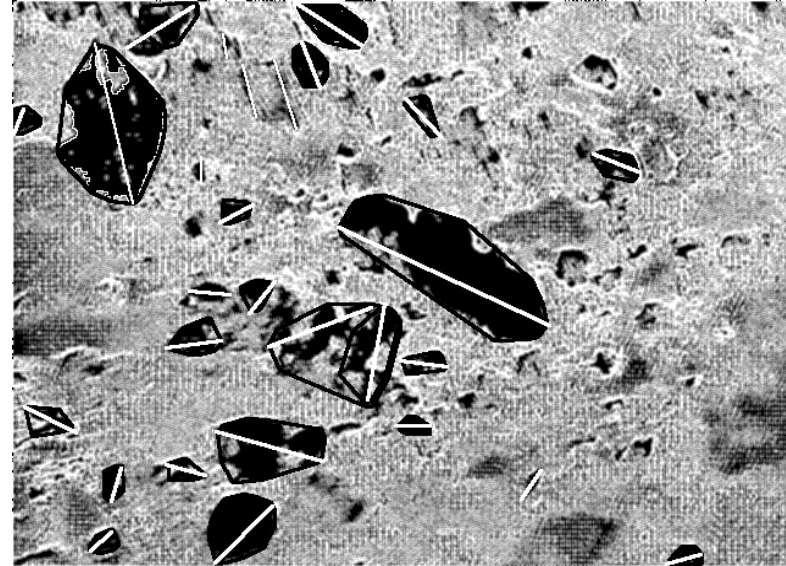
5.3.5.1 Dışbükey Kabuk Yöntemi

Bu çalışmada dane oriyantasyonları, Luo ve diğ. (1992) tarafından bulunan geometrik tabanlı “dışbükey kabuk” yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemde, görüntü üzerinde seçilen her bir danenin sınırı boyunca en uygun poligon çizilir. Daha sonra bu poligonun daneyi çevreleyen en dış noktaları birleştirilir ve daneyi dışbükey olarak saran kabuk oluşturulur. Şekil 5.8’de dane sınırları çıkarılan görüntüye ait dışbükey kabuklar görülmektedir. Çizilen bu dış poligonlara ait en uzun köşegen doğrultusu, danenin oriyantasyon doğrultusu olarak alınır. Bazı durumlarda poligonun bir kenarı, poligon içerisine çizilebilecek köşegenlerin tümünden daha uzun olabilir. Böyle bir durumda uzun kenar doğrultusu, oriyantasyon doğrultusu olarak alınır. Eğer dane dairesele yakın veya dairesele, teoride oriyantasyonu yok kabul edilir. Bu gibi durumlarda, daneyi saran dışbükey kabuğa ait en uzun köşegenden birden fazla olup olmadığı kontrol edilir. Olduğu takdirde köşegen sayısının 45^0 ’lık sektör dilimi içerisine girip girmediğine bakılır. Eğer dışbükey kabuğun tüm uzun köşegenleri aynı 45^0 ’lık dilim içerisindeyse, bu köşegenlerin yatayla yaptıkları açıların ortalaması danenin oriyantasyonu olarak kabul edilir (Luo ve diğ. 1992). Şekil 5.9’da ele alınan görüntüye ait dane oriyantasyonları görülmektedir. Tablo 5.1’de ise görüntüdeki ince kum ve silt danelerine ait sayısal büyüklüklerden sırasıyla; çevre (Ç), alan (A), resimdeki apsisi (x), ordinatı (y), ağırlık merkezi apsisi (X_M), ağırlık merkezi ordinatı (Y_M), genişlik (W), uzunluk (L), yatayla yaptığı açı olarak derece cinsinden oriyantasyonları (α), yuvarlaklık (Cr) ve en uzun köşegenin boyu (L_d) ölçüm değerleri verilmiştir. Tablo altında ise çevre, alan, yuvarlaklık ve en uzun köşegene ait ortalama değerleri

verilmiştir. Genel olarak geometrik yapı incelemelerinde sayısal büyüklükler dane ve/veya boşlukların fiziksel özelliklerini belirtmektedir. Kinetik yapıdan farklı olarak ölçülebilir büyüklüklerin bütün görüntülerin birarada ele alınmasıyla anlamlı hale geldiği görülmektedir. Bu parametrelerin değişik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme şartları altında değişiminin belirlenmesi, özellikle silt ve kum danelerinin yapı incelemelerinde önemlidir.



Şekil 5.8 Danelere ait poligonların en dış noktalarının birleştirilmesiyle oluşturulan dışbükey kabuklar (X150, Yatay: 1.00 mm, Düşey: 0.75 mm)

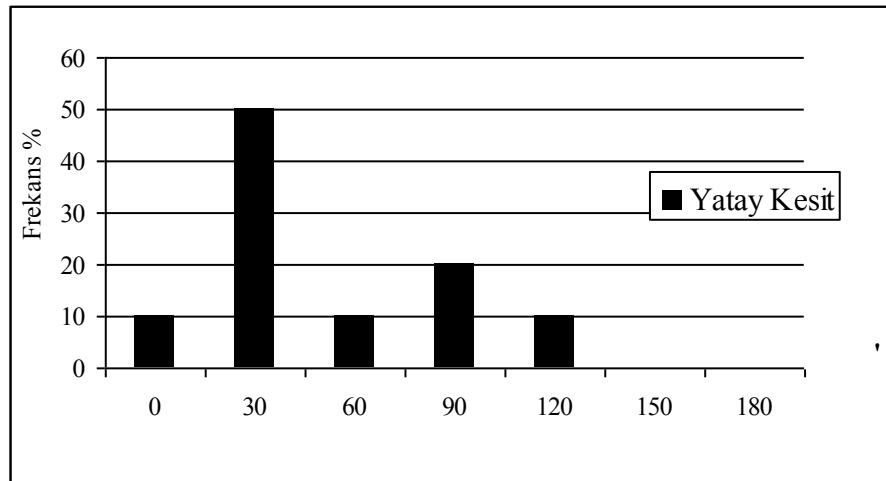


Şekil 5.9 Dane oriyantasyonları (X150, Yatay: 1.00 mm, Düşey: 0.75 m, Adapazarı örselenmemiş numune)

Aynı şekle ait danelerin oriyantasyonlarını gösteren açısal histogram, Şekil 5.10’da çizilmiştir. Buna göre yatayda kum ve silt danelerinin yaklaşık % 50’si 0-30° derece ile uzanımına sahiptir.

Tablo 5.1 Şekil 5.12’deki İnce kum ve silt danelerine ait ölçüm değerleri

Ç (mm)	A ($\times 10^{-3}$ mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	Cr	L _d (mm)
0.91	19.5	0.57	0.40	0.57	0.40	0.27	0.19	144.2	0.30	0.30
0.47	2.54	0.46	0.29	0.45	0.28	0.08	0.13	70.50	0.14	0.13
0.62	2.84	0.40	0.31	0.40	0.31	0.13	0.09	30.35	0.09	0.15
0.14	0.84	0.31	0.35	0.31	0.35	0.04	0.04	75.07	0.53	0.05
0.05	0.11	0.35	0.35	0.35	0.35	0.01	0.02	92.28	0.47	0.02
0.11	0.39	0.35	0.34	0.35	0.34	0.03	0.03	161.8	0.41	0.03
0.12	0.73	0.25	0.35	0.25	0.35	0.05	0.02	174.1	0.52	0.05
0.24	1.48	0.23	0.30	0.23	0.30	0.07	0.05	9.72	0.33	0.07
0.59	5.74	0.33	0.15	0.30	0.15	0.14	0.08	3.52	0.21	0.14
0.32	5.27	0.29	0.05	0.29	0.05	0.08	0.09	49.01	0.53	0.11
Ort:0.357	3.95								0.373	0.105



Şekil 5.10 Şekil 5.9’a ait açısal histogram (Örselenmemiş Adapazarı siltli numune, DÖ2 deneyi)

5.4 Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası İnce Kumlu ve Killi Siltlerdeki Yapının Belirlenmesi

Bu çalışmada, araziden örselenmemiş olarak alınan silindirik ince daneli zeminlerle, laboratuvarda hazırlanan numunelerin, dinamik burulmalı kesme deney aletini kullanarak dane yapısı ve boşluklarında meydana gelen değişim araştırılmıştır. Örselenmiş numunelerin deney hücresine yerleştirilmesiyle birlikte oluşturdukları yapıları ile örselenmemiş zeminlerin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi yapıları karşılaştırılmıştır. Her iki tür numunenin de izotropik konsolidasyon ve tekrarlı gerilme genlikleri altında uğradıkları hacimsel ve kayma deformasyonları sonucu dane ve boşluklu yapılarındaki değişim, optik mikroskoptan alınan dijital görüntülerin istatistiksel analiziyle belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre temel olarak araştırılması gerekli konular şunları kapsamaktadır:

1. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi örselenmemiş numunelerde tahmini olarak deformasyonlarla birlikte oluşacak potansiyel ilerleyen kırılma bölgelerinin belirlenmesi,
2. İzotropik konsolidasyonla birlikte silt ve kum dane boyut, şekil ve dağılımıyla killi bölgelerin belirlenmesi ve boşluklarda meydana gelen değişimin araştırılması,
3. Örselenmemiş, düşük plastisiteli ve yumuşak killi silt numuneleri ile, %2-33 arası plastisite indisine sahip örselenmiş, laboratuvar silt numuneleri arasındaki yapısal farklılıklar,
4. Tekrarlı yüklemeyle birlikte dane yapısında ve boşluklarda meydana gelen değişim ve anizotropinin belirlenmesi,
5. Konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte silt danelerinde yönelme olup olmadığının belirlenmesi,
6. Örselenmemiş numunelerde yüklemeyle birlikte potansiyel kırılma bölgelerinin oluşumunun ve bu bölgelerde ince kum, silt ve kil danelerinin tahmini oriyantasyonlarının belirlenmesi.

İzotropik veya anizotropik konsolidasyon sonrası kullanılan numunelerin daneler yapısı özelliklerinden, dane boyutu, şekli, dağılımı, pürüzlülük, yuvarlaklık gibi fiziksel özelliklerin durumu belirlenebilir. Ancak dane ve boşlukların oriyantasyonlarındaki değişimin belirlenmesi oldukça karmaşık ve güçtür. Bunun için ilave olarak nominal ince kesit kalınlığı 30-40 μ olan örneklerden elektron mikroskop görüntüleri alınıp bu görüntülerin bir bütün olarak yorumlanması gerekir. Bu çalışma metodolojik yapılmış, bu sebepten dane oriyantasyonlarının konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte nasıl değiştiği kapsam dışında tutulmuştur. Ancak ele alınan görüntülerdeki oriyantasyonlar belirlenmiştir. Çizilen açısal histogramlar ve gül diyagramlarıyla tahmini oriyantasyonların ve yüklemeyle birlikte bu oriyantasyonlardaki durumun ne olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Fiziksel özelliklerden boşlukların çapı ve dağılımıyla birlikte, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası örselenmiş ve örselenmemiş numunelerdeki anizotropinin üzerinde durulmuştur.

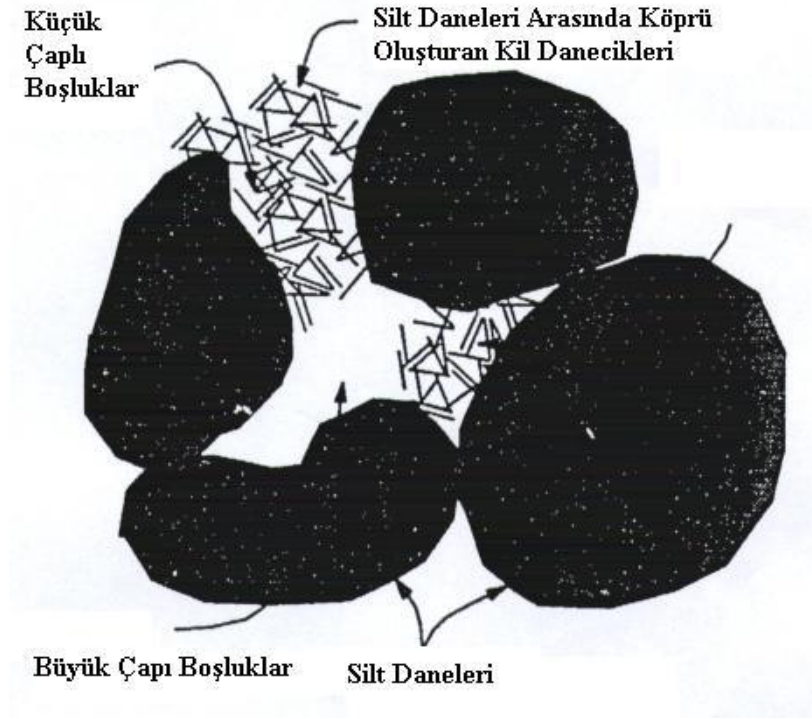
5.4.1. İzotropik Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası Boşluklardaki Değişim

Zeminler izotropik konsolidasyonla birlikte hacimsel deformasyona uğrayarak, drenajla boşluk suyunu kaybederler. Böylece ince daneli zeminlerde düşey ve yatay doğrultuda deplasmanlar meydana gelir. Oturma olarak adlandırılan düşey deplasmanlar killi zeminlerde permeabilitenin düşük olması nedeniyle zamana bağlı olarak gerçekleşir. Burulmalı kesme deney aletinin üç eksenli hücresi içerisine yerleştirilen örselenmemiş numuneler ve laboratuvarında hazırlanan numuneler, izotropik ve anizotropik olarak konsolide edilebilmektedirler. Bu çalışmada yapılan dinamik ve statik deneylerde izotropik konsolidasyon uygulanmıştır.

Konsolidasyonla birlikte zeminde meydana gelen hacimsel deformasyon, ince daneli zeminlerin yapısal özelliklerini de etkilemektedir. Zemin numunesinde meydana gelen konsolidasyon sonrası agregalar arası büyük boşluklarda ve daha küçük çaptaki danelerarası boşluklarda önemli ölçüde azalma görülmektedir. Şekil 5.11'de kil-silt karışımının sahip olabileceği olası bir yapı görülmektedir. Genel olarak kil danecikleri, silt danelerinin dış yüzeyi etrafını sararken, silt danelerini birbirine bağlamaktadır. Bu sırada oluşturdıkları yapı arasında küçük boşluklar meydana gelebilmektedir. Silt danelerinin arasında oluşan boşluklar ise daha geniş çapa sahip

olmaktadır. Bu boşluklara, yüklemeye birlikte kil danecikleri dolarak yapıyı değiştirebilmektedirler.

Bu çalışmada, dinamik burulmalı kesme deney aletinde 100 kPa efektif basınç altında izotropik olarak konsolide edilen numunelerin danesel ve boşluklu yapılarında meydana gelen değişim araştırılmıştır. Optik mikroskopta X150 ve X300 büyütme altında, siltli numunelerden hazırlanan blok örneklerin birbirine dik üç kesitinden alınan dijital görüntülerde iki boyutlu olarak porozite hesabı yapılmıştır. Hesaplar her üç doğrultu için konsolidasyon öncesi ve konsolidasyon sonrası durumda yapılırken, sonuçlar istatistik parametreleri de belirtilerek makro boyutta ele alınan büyüklüklerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.11 Kil-silt karışımının olası mikroyapısı (Wagg, 1990)

Hacimsel deformasyona uğrayan zeminlerin kuru birim hacim ağırlıklarında artış meydana gelerek danelerin birbirleri üzerinde yerleşimleri öncekine göre daha sıkı bir konumda olacak şekilde değişmektedir. Ancak bu davranışın özellikle ince daneli zeminlerde genel olarak mikrografikler üzerinde boşluk oranı ve porozite hesabıyla belirlenmesi oldukça zordur. Çünkü ince daneli zeminlerdeki boşluklar kaba daneli ve agregalı zeminlere göre daha geniş bir yüzey alanında ve çok daha küçük çaptadır (Smart, 1991). Bu yüzden, boşluk oranı tariflenirken, karışık dane dağılımı ve

yapısına sahip zeminlerde partiküller arası (e') ve partikül içi (e'') olmak üzere (5.5) ve (5.6) bağıntıları kullanılarak iki farklı boşluk oranı hesaplanıp, zeminin boşluk oranı (e);

$$e = w \gamma_s = e' + e'' \quad (5.4)$$

şeklinde bu iki değerin toplamı olarak ifade edilmektedir (Smart, 1991). Burada w , doymun durumdaki su muhtevası, γ_s ise danelerin birim hacim ağırlığıdır. Kaba danelerarası boşluklu yapı,

$$e' = n'(1+e) \quad (5.5)$$

bağıntısıyla, daha küçük çaptaki danelerin arasındaki boşluklar ise,

$$e'' = e - e' \quad (5.6)$$

bağıntısıyla temsil edilir. Ayrıca, danelerarası boşluk alanlarının toplamının, mikrografiğin toplam alanına oranı olarak tariflenen porozite de,

$$n' = A_b/A_t = e'/(1+e'+e'') \quad (5.7)$$

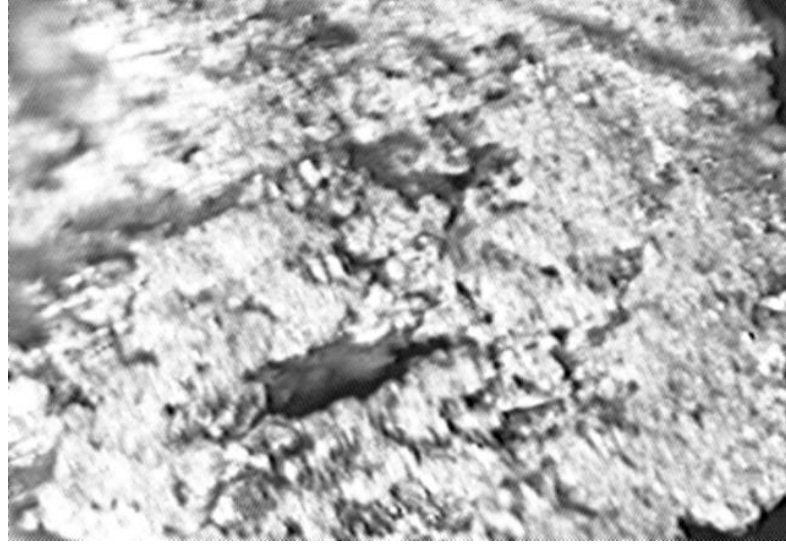
şeklinde hesaplanmaktadır (Smart, 1991). Bu çalışma kapsamında ilk hesaplar konsolidasyon öncesinde örselenmemiş ve laboratuvarda kuru yağmurlamayla hazırlanan numunelerden alınan mikrografikler üzerinde yapılmıştır. Tablo 5.2'de Adapazarı'ndan alınan örselenmemiş siltli zemin için hesap değerleri görülmektedir. Buna göre A_b , mikrografiklerden elde edilen ortalama boşluk alanına, A_t de toplam grafik alanına karşı gelmektedir. Örselenmemiş numunenin deney öncesi ve deney sonrası su muhtevası sırasıyla % 50 ve % 44, birim hacim ağırlığı ise 26.5 kN/m^3 tür. Buna göre konsolidasyon sonrası, porozitede ve buna bağlı olarak boşluk oranında her üç doğrultuda da belirgin biçimde düşme vardır. Bu azalma örselenmemiş zeminde daha fazladır. Konsolidasyonla birlikte doğal zeminin boşluk oranında azalma, laboratuvarda hazırlanan numuneye göre daha fazla olurken, mikrografiklerden elde edilen porozite değerleri ise konsolidasyondan önceki durumda daha düşüktür. Laboratuvarda düşük frekanslı titreşim uygulanarak sıkıştırılan örselenmiş numunedeki porozite değerlerinin daha düşük olması beklenir.

Ancak dane iskelet yapısı nispeten bozulmamış olan örselenmemiş zeminde, çökelmeyle birlikte üst tabakalar altında sıkışan zeminin boşluklarında zamanla belli oranda azalma meydana gelmektedir. Dolayısıyla örselenmemiş zeminin sahip olduğu konsolidasyon öncesi porozite, örselenmiş numuneye göre daha düşük hesaplanmıştır. İnce danelerarası boşluk oranında ise konsolidasyonla birlikte fazla bir değişim olmamaktadır. Bu durum araştırmacıların sonuçlarını destekler niteliktedir.

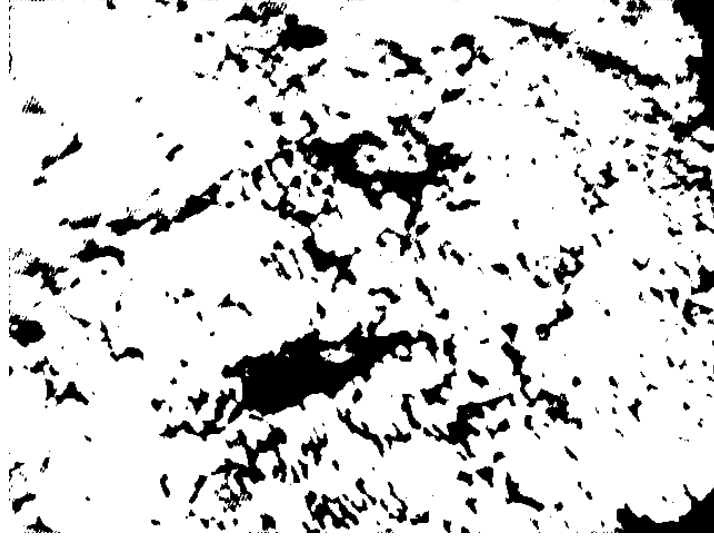
Tablo 5.2 Adapazarı örselenmemiş siltli numunesi için optik mikroskop ölçümleri, ortalama ve standart sapma

Örselenmemiş Numune ($I_p=13\%$)									
Parametre	Konsolidasyon Öncesi			Konsolidasyon Sonrası			Tekrarlı Yükleme Sonrası		
Düzlem	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$
A_b (mm^2)	8.02 (0.11)	6.53 (0.15)	5.30 (0.18)	3.86 (0.05)	2.86 (0.08)	2.62 (0.19)	4.08 (1.5)	5.05 (1.9)	3.60 (2.3)
A_t (mm^2)	26.75	25.12	26.3	15.44	13.00	17.50	17.0	24.04	21.2
n'	0.30	0.26	0.20	0.25	0.22	0.15	0.24	0.21	0.14
e	1.34	1.34	1.34	1.17	1.17	1.17	1.10	1.10	1.10
e'	0.70	0.61	0.47	0.54	0.47	0.33	0.50	0.44	0.29
e''	0.64	0.73	0.87	0.63	0.70	0.84	0.60	0.66	0.81

Smart ve Tovey (1982), düşük konsolidasyon basınçlarında e'' değerinde fazla bir değişim olmadığını ancak 100 kPa'ın üzerine çıkıldığında azaldığını söylemişlerdir. Buradan, topaklanmış kil tabletlerinin oluşturduğu bölgelerin de incelenmesi gerektiği ve boşluk oranının konsolidasyonla birlikte değişirken, zemin danelerinin bir bütün olarak davrandığı sonucunu çıkarabiliriz. Şekil 5.12'de konsolidasyon öncesi örselenmemiş zemin kesitine ait mikrografik görülmektedir. Daha sonra ise aynı görüntüden danelerin olduğu bölgeler çıkartılmıştır (Şekil 5.13).

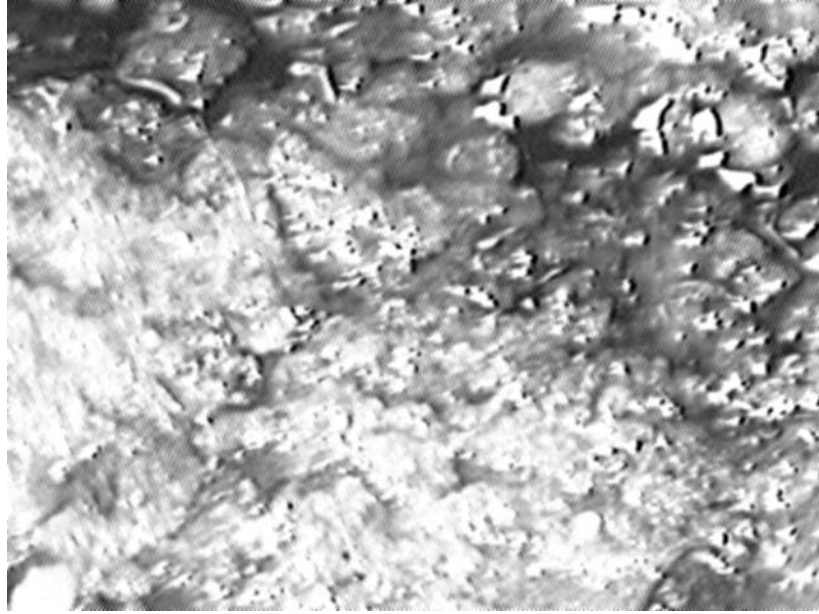


Şekil 5.12 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi Adapazarı örselenmemiş numunesinin yatay düzlem görüntüsü (X150, yatay: 1.00 mm, düşey: 0.75 mm)



Şekil 5.13 Şekil 5.12’teki mikrografiğe ait boşluklu bölgeler (X150, yatay: 1.00 mm, düşey: 0.75 mm)

Şekil 5.13’de örselenmemiş killi ve kumlu silt zemine ait mikrografikteki boşluklu bölgeler siyahla görülmektedir. Boşlukların birbiriyle pek bir bağlantısı olmamakla birlikte çapları da birbirinden farklıdır. Heterojen bir dağılım sözkonusudur. Şekil 5.14’de ise aynı numuneden konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasında yatay düzlemde alınan görüntü görülmektedir. Karışık ve rastgele doğrultularda oriyantasyona sahip ince kum ve silt daneleri beyazla görülürken, killi bölgeler gri ile

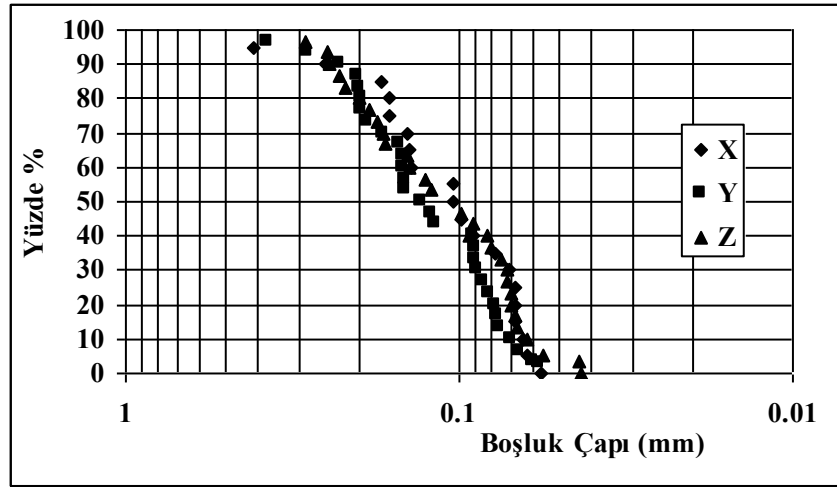


Şekil 5.14 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesinin yatay düzlem görüntüsü (X150, yatay: 1.00 mm, düşey: 0.75 mm)

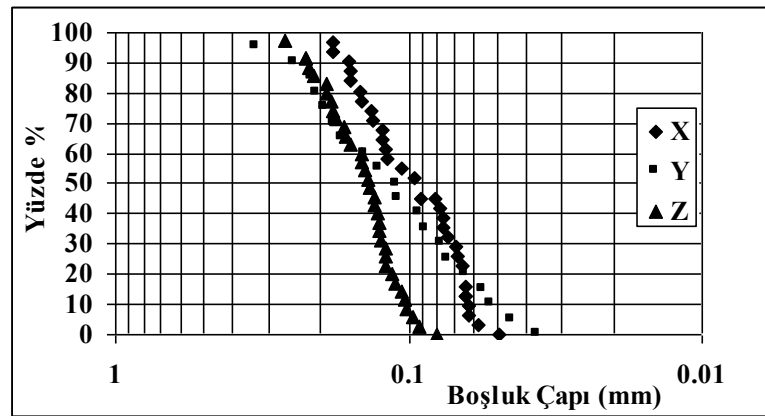
boşluklar da siyahla görülmektedir. Şekil 5.15'te bu görüntüden boşlukların ayrılmış hali verilmiştir. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonucu boşluk çapı dağılımında ise belli ölçüde yatay düzlemde değişme olmaktadır. Şekil 5.16a ve 5.16b'de Adapazarı örselenmemiş numunesinden konsolidasyon öncesi ve konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası birbirine dik üç düzlemde alınan görüntülere ait boşluk granülometrisi'ndeki değişme görülmektedir. Buna göre yatay ve düşey doğrultularda örselenmemiş numunede boşluk çapında önemli bir değişme görülmemektedir. Z doğrultusunda ise göçme seviyesinden sonra küçük çaplı boşluklarda artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, Youd, (1977)'nin öne sürdüğü tekrarlı yükleme sonrası yapı değişimini destekler niteliktedir (Şekil 5.17).



Şekil 5.15 Şekil 5.14'deki mikrografiğe ait siyahla görülen boşluklu bölgeler (X150)



Şekil 5.16a Adapazarı örselenmemiş numunesi konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi boşluk çapı dağılımı



Şekil 5.16b Adapazarı örselenmemiş deney numunesi konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası boşluk çapı dağılımı ($\tau_d/\sigma'_c=0.327$, $PI=\%13$)

Tablo 5.3'te de konsolidasyon ve 0.327 kayma gerilmesi oranında yapılan tekrarlı yükleme sonrası aynı numuneden alınan görüntüdeki boşlukların ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 5.3 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesi yatay düzlem görüntüsüne ait boşlukların ölçüm değerleri

Alan $\times 10^{-3}$ (mm ²)	x (mm)	y (mm)	Çevre (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	C _r	L _d (mm)
6.54	0.07	0.72	0.40	0.15	0.05	174.3	0.53	0.15
5.09	0.07	0.57	0.51	0.17	0.08	11.1	0.30	0.18
1.50	0.15	0.73	0.17	0.05	0.04	175.7	0.52	0.05
2.95	0.14	0.52	0.47	0.14	0.07	178.2	0.17	0.14
7.13	0.30	0.55	0.53	0.13	0.13	42.4	0.32	0.16
2.25	0.27	0.73	0.29	0.12	0.04	159.1	0.34	0.12
1.03	0.15	0.65	0.27	0.05	0.06	129.4	0.18	0.07
3.05	0.54	0.59	0.41	0.13	0.07	13.8	0.22	0.13
2.53	0.61	0.55	0.39	0.10	0.07	40.0	0.22	0.12
1.27	0.54	0.52	0.27	0.08	0.05	19.5	0.22	0.08
5.58	0.68	0.57	0.52	0.15	0.10	5.94	0.21	0.18
3.77	0.58	0.50	0.43	0.08	0.09	107.5	0.25	0.11
4.15	0.79	0.63	0.53	0.13	0.11	41.0	0.18	0.15
3.70	0.73	0.42	0.48	0.12	0.08	25.5	0.20	0.12
5.71	0.79	0.34	0.59	0.15	0.12	144.7	0.15	0.15
3.72	0.97	0.53	0.43	0.07	0.12	71.5	0.25	0.12
2.73	0.94	0.35	0.53	0.10	0.13	76.5	0.12	0.13
1.78	0.87	0.02	0.30	0.08	0.05	5.8	0.24	0.08
1.15	0.91	0.49	0.19	0.04	0.06	85.0	0.42	0.05
1.23	0.85	0.52	0.19	0.05	0.06	149.9	0.45	0.06
1.18	0.82	0.49	0.24	0.05	0.05	50.3	0.25	0.05
1.38	0.54	0.45	0.34	0.07	0.07	137.1	0.15	0.08
1.15	0.63	0.39	0.31	0.07	0.04	15.1	0.15	0.07

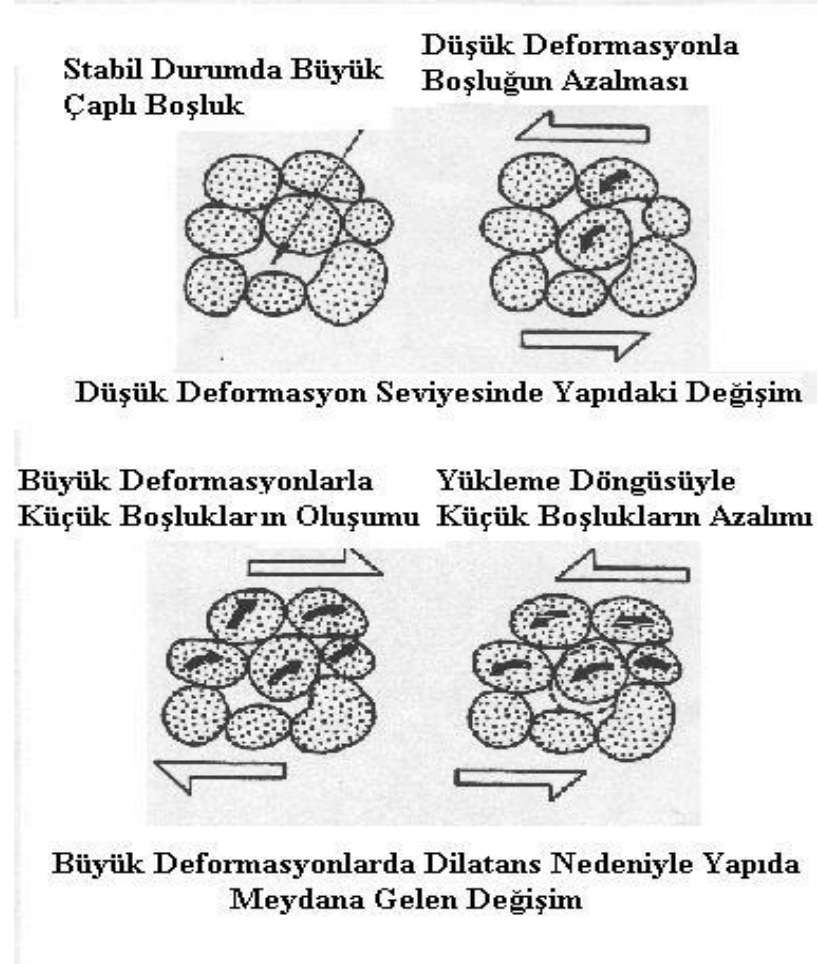
Ort: 70.57

0.382

0.11

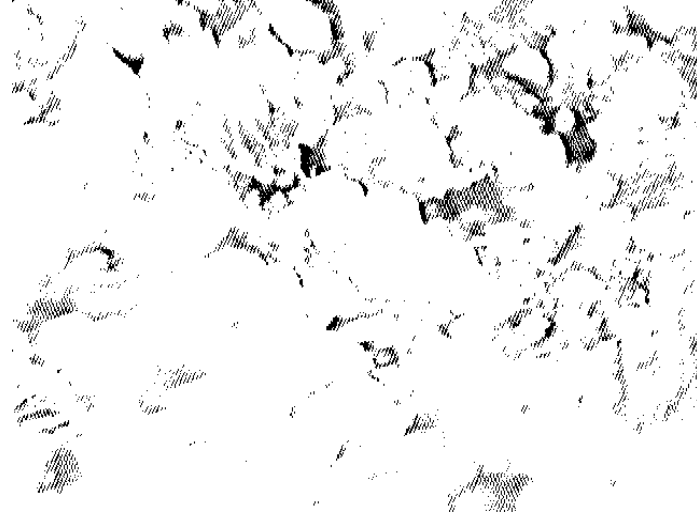
Burada ele alınan ve görüntü analiziyle hesabı yapılan boşluklar, silt, kum ve killi bölgeler arasında varolan büyük çaplı boşluklardır. Diğer yandan kil tabletlerinin silt ve kum daneleri dış yüzeyine yapışması sonucu oluşan danelerarası boşluklar ve petek ve/veya yassı bir yapıya sahip kil danecikleri arasında oluşan boşluklar ise Smart (1991) tarafından sayısal olarak ifade edilen 5.5 bağıntısıyla belirlenmektedir. Bunun yanında Tablo 5.2'de konsolidasyon sonrası azalan porozitede tekrarlı yükleme sonrası fazla bir değişme olmadığı görülmektedir. Boşluk granülometrilерinden de görülebileceği gibi tekrarlı yüklemede büyük deformasyonlarda artan danelerarası boşluklarda, yükleme döngüsüyle birlikte

danelerin yeniden bir yerleşime sahip olup dilatans etkisiyle yeniden azalma olmaktadır. Böylece nihai durumda boşluklardaki değişim, tekrarlı yükleme öncesine göre fazla olmamaktadır.



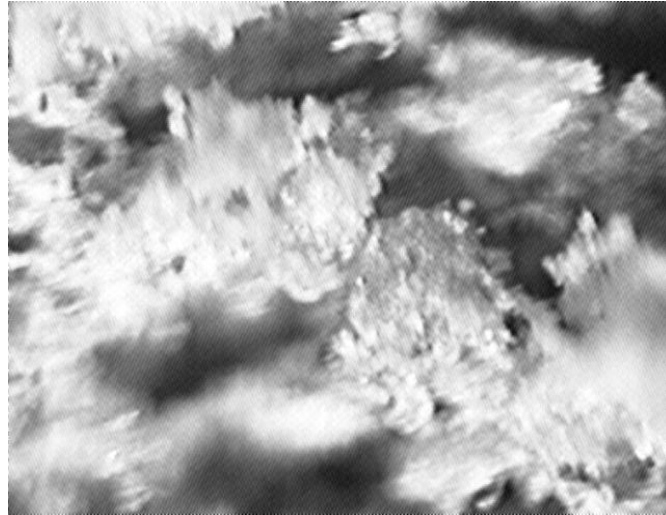
Şekil 5.17 Tekrarlı yüklemede granüler zeminlerde yapı değişimi (Youd, 1977)

Şekil 5.18’de ise konsolidasyon ve devamında yapılan ve dinamik gerilme oranı 0.33 olan tekrarlı yükleme sonrası Şekil 5.6’daki görüntüden boşluklu kısımların ayrılmış hali görülmektedir. Mikrografikte boşlukların çıplak gözle belirlenmesi oldukça zor olduğundan, siyah-beyaz görüntüdeki siyah bölgeler, genişletme ve daraltma tekniğiyle danelerin kapladığı alandan ayrılmıştır (Smart ve Leng, 1993).



Şekil 5.18 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası örselenmemiş Adapazarı siltli numuneden alınan mikrografikte boşlukların dağılımı, (X150)

Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası boşluklarda ve dolayısıyla porozitede belli oranda azalma görülmektedir. Aynı şekilde laboratuvar silt numunesinin, numune kurulması sırasındaki boşluklu yapısında da konsolidasyon sonunda azalma olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.19 ve 5.20’de laboratuvar da hazırlanan siltli toz numunenin konsolidasyon öncesindeki mikroskop görüntüleri görülmektedir. Çapı büyük boşlukların fazlalığı dikkati çekmektedir. Şekil 5.21’de ise aynı numunenin konsolidasyon sonrası görüntüsü görülmektedir. Aynı büyütmedeki (X300) bu görüntüde boşluklardaki azalım belirgindir.

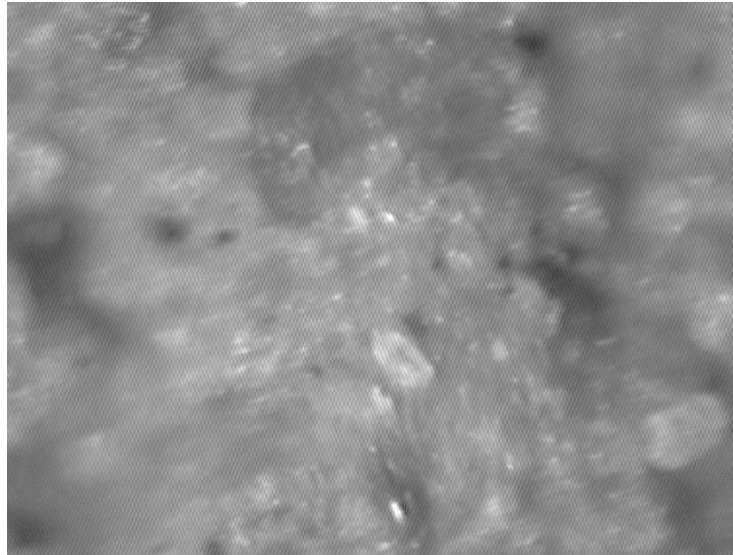


Şekil 5.19 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi laboratuvar numunesinesi düşey düzlem görüntüsü ($I_p=2$), (X300)



Şekil 5.20 Gümüşdere laboratuvar siltli numunesinde boşlukların dağılımı (X300, yatay: 0.50 mm, düşey: 0.38 mm)

Tablo 5.4 ve 5.5’te boşluklara ait ölçüm değerleri verilmiştir. Hesaplanan porozite değerleri de dikkate alındığında, konsolidasyon öncesinde az bir miktarla da olsa, laboratuvarda hazırlanan numunedeki boşlukluluğun, örselenmemiş numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte izotropik konsolidasyon sonrası her iki tip numune de boşluklarda önemli ölçüde azalma olmaktadır.



Şekil 5.21 Laboratuvar numunesinde konsolidasyon sonrası düşey düzlem görüntüsü, (X300, yatay: 0.50 mm, düşey: 0.38 mm ($I_p = 2\%$))

Tablo 5.4 Şekil 5.18'e ait boşlukların ölçüm değerleri

Ç (mm)	A (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	C _r	L _d (mm)
0.289	0.001	0.051	0.353	0.059	0.354	0.057	0.055	145.9	0.201	0.058
0.181	0.002	0.023	0.284	0.008	0.289	0.052	0.047	158.7	0.594	0.057
0.234	0.001	0.079	0.195	0.079	0.195	0.053	0.039	157.2	0.229	0.071
0.227	0.001	0.127	0.393	0.127	0.393	0.077	0.041	175.4	0.310	0.078
0.519	0.003	0.225	0.448	0.258	0.467	0.153	0.075	18.58	0.149	0.172
1.573	0.014	0.524	0.512	0.601	0.505	0.250	0.205	155.9	0.052	0.251
0.347	0.001	0.351	0.730	0.358	0.740	0.088	0.039	9.58	0.145	0.091
1.580	0.021	0.417	0.225	0.455	0.249	0.394	0.192	20.48	0.092	0.413
0.844	0.005	0.339	0.093	0.317	0.057	0.105	0.125	60.02	0.085	0.143
0.322	0.001	0.567	0.553	0.538	0.575	0.081	0.056	138.8	0.174	0.099
0.275	0.001	0.547	0.575	0.550	0.576	0.061	0.061	113.5	0.218	0.054
0.313	0.001	0.750	0.705	0.750	0.705	0.102	0.047	161.2	0.175	0.104
0.506	0.003	0.850	0.553	0.850	0.553	0.131	0.053	157.7	0.124	0.142
0.409	0.003	0.965	0.503	0.949	0.509	0.084	0.083	143.5	0.205	0.104
0.511	0.005	0.940	0.021	0.853	0.005	0.148	0.059	8.13	0.231	0.152
0.531	0.003	0.544	0.155	0.545	0.158	0.130	0.092	34.70	0.132	0.139
0.509	0.003	0.747	0.200	0.771	0.182	0.114	0.123	132.34	0.130	0.153
0.190	0.001	0.757	0.297	0.750	0.278	0.053	0.058	43.37	0.335	0.058
0.255	0.001	0.787	0.377	0.775	0.359	0.044	0.055	58.44	0.190	0.053
Ort:0.506	0.0037									0.125

Tablo 5.5 Şekil 5.20'e ait boşlukların ölçüm değerleri

Ç (mm)	Ax10 ⁻³ (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	Cr	L _d (mm)
0.15	1.08	0.02	0.27	0.01	0.28	0.04	0.03	152.2	0.55	0.05
0.51	3.02	0.09	0.28	0.09	0.28	0.07	0.11	71.1	0.10	0.12
0.13	0.43	0.05	0.25	0.07	0.25	0.03	0.03	130.5	0.33	0.03
0.07	0.27	0.01	0.20	0.01	0.20	0.02	0.02	11.5	0.52	0.02
0.05	0.10	0.01	0.17	0.00	0.17	0.01	0.01	32.0	0.55	0.02
0.92	8.27	0.15	0.12	0.20	0.12	0.19	0.09	14.5	0.12	0.20
1.18	10.45	0.23	0.33	0.23	0.31	0.20	0.12	171.5	0.09	0.21
1.93	25.58	0.41	0.27	0.45	0.28	0.23	0.25	51.1	0.09	0.29
0.12	0.45	0.38	0.14	0.38	0.14	0.02	0.03	99.9	0.42	0.03
0.18	0.35	0.35	0.17	0.34	0.17	0.03	0.03	155.0	0.13	0.04
0.13	0.19	0.33	0.20	0.33	0.20	0.03	0.02	155.1	0.14	0.03
0.05	0.09	0.30	0.18	0.31	0.18	0.01	0.02	84.9	0.32	0.02
0.05	0.14	0.05	0.31	0.05	0.31	0.02	0.01	34.3	0.43	0.02
0.07	0.10	0.05	0.24	0.05	0.24	0.01	0.02	98.0	0.29	0.02
0.03	0.07	0.23	0.27	0.23	0.27	0.01	0.01	130.7	0.75	0.01
0.04	0.05	0.13	0.30	0.13	0.30	0.01	0.02	110.5	0.45	0.02
0.04	0.05	0.17	0.23	0.18	0.23	0.01	0.01	150.5	0.49	0.01
Ort: 2.5						0.107	0.075		0.21	0.05

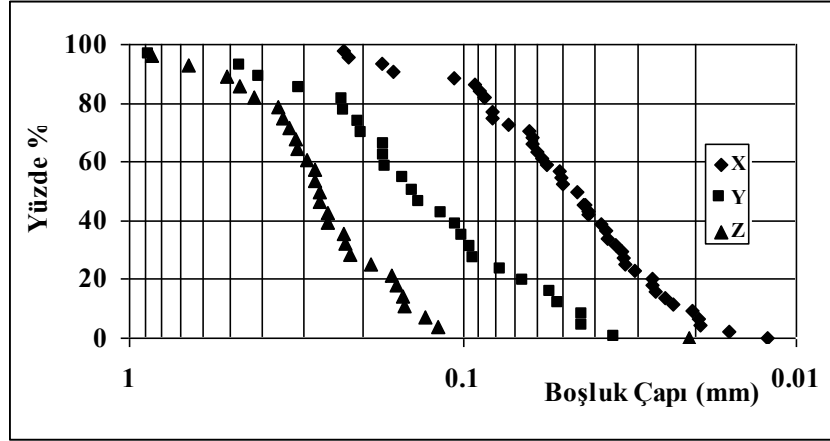
Tablo 5.6 Laboratuvar numunesi için optik mikroskop ölçümleri, ortalama ve standart sapma ($I_p = \%11$)

Parametre	Konsolidasyon Öncesi			Konsolidasyon Sonrası			Tekrarlı Yükleme Sonrası		
Düzlem	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
A_b (mm ²)	6.92 (0.05)	5.38 (0.09)	7.57 (0.15)	5.39 (0.19)	3.37 (0.25)	6.34 (0.10)	0.02	0.013	0.06
A_t (mm ²)	20.37	24.47	25.25	18.6	22.5	24.4	0.75	0.75	0.75
n'	0.34	0.22	0.30	0.29	0.15	0.26	0.03	0.017	0.08
e	0.80	0.80	0.80	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
e'	0.61	0.39	0.54	0.485	0.25	0.43	0.05	0.028	0.13
e''	0.19	0.41	0.25	0.185	0.42	0.24	0.62	0.642	0.54

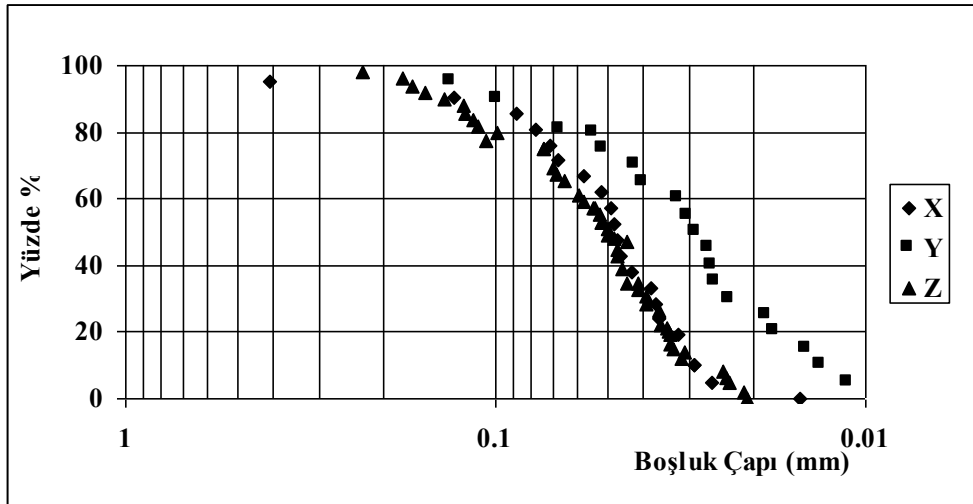
Tablo 5.6’da görülen laboratuvar siltli numuneye ait porozite hesabında, su muhtevası deney öncesi ve sonrası sırasıyla % 30 ve % 25 tir. Numune birim hacim ağırlığı ise 26.9 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Konsolidasyon sonrası boşluk oranında azalma olmaktadır. Tekrarlı yükleme sonrasında ise küçük çaplı boşluklarda dilatans nedeniyle artış olmaktadır. Hesapların ait olduğu bu laboratuvar numunesi ile diğer laboratuvarlarda hazırlanan numuneler ve örselenmemiş numunelerin üç ortogonal düzleminden alınan dijital görüntüler eklerde verilmiştir.

Şekil 5.22a ve 5.22b’de plastisitesi % 11 olan laboratuvar numunesinin üç ortogonal doğrultusundan alınan mikrografiklerdeki boşluk çapı dağılımları görülmektedir. Şekil 5.22a’da konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi duruma ait boşluk granülometrisinde, görüntü analizinden elde edilen farklı boşluklara ait çap ile o çaptan daha küçük çaptaki boşlukların yüzdesi ilişkisi belirtilmiştir. Buna göre konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesinde her üç doğrultuda da boşluk çapları yükleme sonrası duruma göre daha büyüktür. Özellikle izotropik konsolidasyon sonrasında azalan boşluklar, tekrarlı yüklemeyle birlikte yaklaşık aynı çap aralığında toplanmaktadırlar (Şekil 5.22b). İnce kum ve silt daneleri arasında sınırlı sayıda görüntüden temsili olarak elde edilen bu boşluk çapları, laboratuvarda kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin aslında oldukça gevşek yapıda olduklarını göstermektedir. Dolayısıyla düşük relatif sıkılığa sahip olan numunede dinamik mukavemet de düşük olmaktadır. Yapılan deney sonuçları, siltli zeminde çift genlikli % 5 birim kaymaların, 0.15-0.22 dinamik kayma gerilmesi oranları arasında yapılan dinamik deneylerde, düşük çevrim sayılarında elde edildiğini göstermektedir.

Benzer şekilde plastisitesi % 18 olan Gümüşdere siltli kil zeminde de, laboratuvarda kuru yağmurlamayla hazırlanan numuneler gevşek yapıya sahiptirler. Gümüşdere numunesinin daha düşük plastisiteli siltli numunelere göre aynı gerilme oranında daha düşük çevrim sayılarında göçme seviyesine ulaştığı ve bunda, numunenin daneler ve boşluklu yapısının etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.22a Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi % 11 plastisiteli laboratuvar numunesinin üç düzlemine ait dijital görüntülerdeki boşluk çapı dağılımı



Şekil 5.22b Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası % 11 plastisiteli laboratuvar numunesinin üç düzlemine ait dijital görüntülerdeki boşluk çapı dağılımı

Plastisite indisi % 18 olan laboratuvar numunesinde makro açıdan bakıldığında, konsolidasyon sırasındaki hacimsel deformasyon (ϵ_v) daha büyük olduğundan, danelerin yerleşimi de boşluk oranındaki azalmaya paralel olarak daha iyi olmaktadır (Tablo 5.7).

Tablo 5.7 Makro boyutta zemin özellikleri

Adapazarı Örselenmemiş Numune (PI=%18)		
Parametre	Konsolidasyon Öncesi	Konsolidasyon Sonrası
γ_k (g/cm ³)	1.25	1.32
V (cm ³)	412.8	392.8
e	1.34	1.23
ΔV (cm ³)	0	20
ε_v %	0	4.8
Adapazarı Örselenmiş Numune (PI=%18)		
Parametre	Konsolidasyon Öncesi	Konsolidasyon Sonrası
γ_k (g/cm ³)	1.45	1.53
V (cm ³)	1026.8	974.1
e	0.80	0.67
ΔV (cm ³)	0	52.7
ε_v %	0	5

5.4.2 Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerle Örselenmemiş Numunelerin Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası Yapısal Farklılıkları

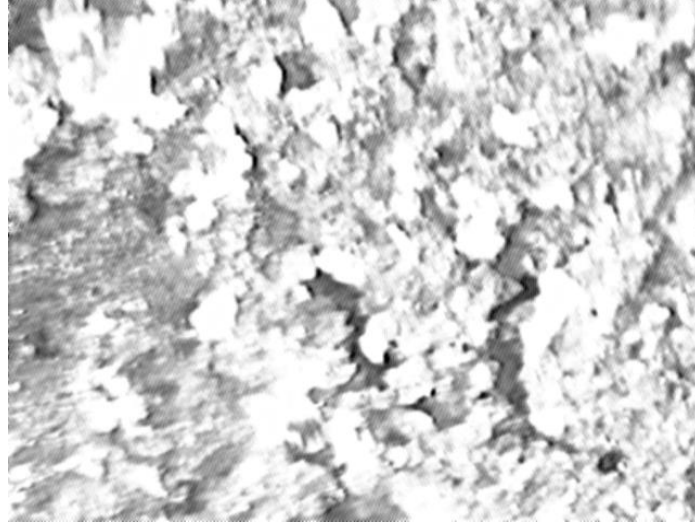
Genel olarak laboratuvarda hazırlanmış 4 farklı zemin numunesiyle 2 farklı örselenmemiş zeminden konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi ve sonrasında hazırlanan blok numunelerin her üç doğrultusundan da yaklaşık 300 kadar dijital görüntü alınmıştır. Bu görüntüler, daha sonra gruplar halinde değerlendirilerek yorumlanmıştır. Yorumlama sırasında konsolidasyon ve tekrarlı yüklemenin etkisi araştırılmış, elde edilen sonuçlar laboratuvardaki dinamik deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Böylece, ele alınan ince kumlu ve killi silt zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışına yapısal özelliklerin etkisi ve bu özelliklerde meydana gelen değişim belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu görüntülerin birçoğunda farklı dane ve boşluk yapısı özelliği içiçe görülebilmektedir. Bunların değerlendirilme aşamasında birbirinden ayrılması işlemi oldukça uzun ve zor bir çalışmayı gerektirmektedir. Burada ise bu çalışmanın ana hatlarıyla yalnızca belli bir bölümüne değinilmiştir. Bu çalışmada ele alınan zeminler siltli zeminler oldukları için, mikroskop altı incelemelerde de öncelikle silt danelerinin özellikleri araştırılmıştır. Ele alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin

numunelerinin silt yüzdesi % 50'dan fazladır. Dolayısıyla zeminlerin davranış özelliklerine çoğunlukla kısmen plastik, büyük oranda ise plastik olmayan siltlerin etkisi olacağı düşünülmektedir. Bu yüzden, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası silt danelerinin şekil, boyut ve dağılımında meydana gelebilecek değişiklikler tüm yapıyı etkileyerek zeminin davranışını belirleyecektir. Terzaghi (1948), bazı tür siltlerin petek yapıda olabileceğini söylemiştir. Bu petek yapı, gevşek zemin özelliğini gösteren, stabil olmayan bir durumdur.

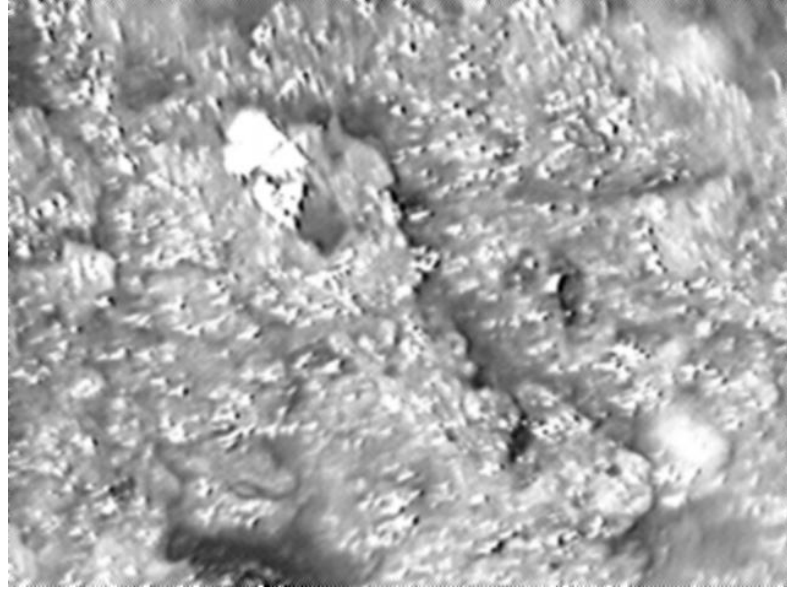
Bu tür zeminler, ani ve tekrarlı yükler altında yumuşayarak ve sıvılaşıarak, ani taşıma gücü kayıplarına ve dolayısıyla göçmeye uğrayabilmektedirler. Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik deneylerde kullanılan siltli zeminlerin hızla artan kayma deformasyonları ve bunun yanında sınırlı bir seviyeye kadar artan boşluk suyu basınçlarına bağlı olarak ani taşıma gücü kayıplarına uğradığı tespit edilmiştir. Örselenmiş ve örselenmemiş numunelerde yapılan deneylerin sonuçları Bölüm 4'te ayrıntılı olarak anlatılmıştı. Bu bölümde ise elde edilen deney sonuçlarına mevcut zemin yapısının etkisi araştırılmıştır.

Dinamik deney sonuçlarında çevrim sayıları arttıkça numunelerde oluşan birim kayma deformasyonlarının arttığı görülürken, boşluk suyu basınçları göçmenin meydana geldiği $\pm\%2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesinde örselenmemiş numunede 30-70 kPa seviyesinde, örselenmiş siltli numunelerde ise plastisite indisine ve konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak 45-70 kPa değerindedir. Silt zeminin plastisite indisi arttıkça, oluşan boşluk suyu basınçları düşük seviyelerde kalmaktadır. Çevrim sayıları arttıkça dinamik deneylerden elde edilen histeresis ilmiklerinde büyüme ve yatıklaşma meydana gelmektedir. Bu durum silt zeminin anizotropik ve gevşek yapısına bağlı olarak oluşmaktadır. Örselenmemiş killi silt zeminlerin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi mikroskop incelemelerinde kil topakları üzerinde rastgele doğrultularda, karışık agregalı bir dane dağılımı gözlemlenmiştir (Şekil 5.23). İnce kum ve silt boyutundaki daneler parlak beyaz olarak görülmektedir. Bu danelerin arasında yer yer farklı boyutlarda ve birbiriyle bağlantısı olmayan siyaha yakın renkli boşluklar görülmektedir. Numune hazırlama sırasında esas yapıyı örselemeden, pürüzsüz ve düz bir yüzey elde etmekte zorluk çekildiğinden, topografik özellikler nedeniyle görüntülerdeki farklı yapıları doğru biçimde ayırt etmekte zorlanılmıştır.

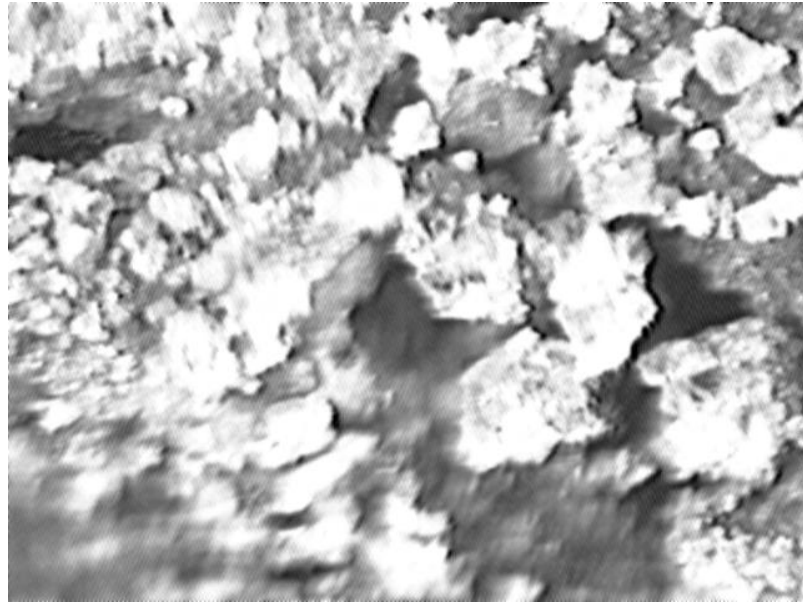


Şekil 5.23 Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş Adapazarı numunesi düşey kesit görüntüsü (X150)

Tablo 5.8’de, bu görüntüye ait ölçüm değerleri verilmiştir. Şekil 5.24’te Adapazarı örselenmemiş silt numunesinden konsolidasyon öncesinde alınan yatay kesit görüntüleri görülmektedir. Görüntülere ait resim analizi ölçüm değerleri Tablo 5.9 ve 5.10’da verilmektedir. İlk görüntüde koyu gri olarak görülen kısımlar killi bölgelerdir (Şekil 5.24a). Kil topaklarının üzerinde rastgele doğrultularda oriyantasyona sahip silt daneleri yer almaktadır. Yer yer farklı boyut ve şekillerde kum daneleri de görülmektedir. Boşlukların dağılımı ise diğer kesitlere göre biraz farklıdır. Mikrografinin ortasına doğru belirli bir oriyantasyona sahip bağlantılı boşluklar görülmektedir. Görüntünün altında ise, numune hazırlama sırasında koparak kabuğunu bırakan kum danesinin izi görülmektedir. Şekil 5.24b’de ise konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi örselenmemiş killi ve kumlu silt zeminden alınan görüntü görülmektedir. Görüntünün büyütmesi X150 dir. Bu görüntüde de farklı yapılar biraradadır. Karışık agregalı görüntüde kum ve silt danelerinin rastgele doğrultularda oriyantasyonları vardır.



Şekil 5.24a. Konsolidasyon öncesi Adapazarı örselenmemiş ince kumlu killi silt numunesi yatay kesit görüntüsü (X150)



Şekil 5.24b Konsolidasyon öncesi Adapazarı örselenmemiş ince kumlu killi silt numunesi Z kesiti (X150)

Şekil 5.24b’de boşluklu kısımlar da siyah bölgeler olarak görülmektedir. Ancak konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası örselenmemiş numunede boşluklu yapıda azalma olmaktadır. Görüntüde de görülebileceği gibi konsolidasyon öncesinde farklı şekil ve boyutlarda kum danelerinin oluşturduğu bu yapıda büyük boşluklar vardır.

Tablo 5.8 Konsolidasyon ve yükleme öncesi Adapazarı örselenmemiş numunesi düşey kesit ölçüm değerleri (Şekil 5.23'ün daneleri hesap değerleri)

Ç (mm)	A (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	C _r	L _d (mm)
0.628	0.005	0.47	0.52	0.48	0.52	0.13	0.115	42.7	0.165	0.141
0.635	0.005	0.02	0.58	0.03	0.59	0.05	0.181	89.5	0.152	0.182
2.155	0.017	0.39	0.15	0.37	0.13	0.21	0.273	70.89	0.045	0.280
0.348	0.005	0.50	0.03	0.62	0.03	0.12	0.055	157.4	0.506	0.125
0.755	0.004	0.54	0.11	0.57	0.12	0.14	0.141	147.7	0.098	0.157
0.409	0.006	0.77	0.18	0.75	0.20	0.08	0.123	106.2	0.353	0.125
0.350	0.006	0.78	0.30	0.74	0.23	0.08	0.130	55.47	0.444	0.136
1.021	0.009	0.84	0.34	0.84	0.32	0.09	0.258	81.93	0.107	0.265
0.484	0.004	0.88	0.68	0.85	0.65	0.11	0.102	29.91	0.239	0.129
0.981	0.005	0.65	0.55	0.65	0.52	0.09	0.157	95.16	0.082	0.171
0.535	0.004	0.57	0.49	0.57	0.49	0.07	0.128	90.14	0.150	0.129
1.541	0.007	0.77	0.04	0.72	0.07	0.23	0.108	176.4	0.035	0.233
1.317	0.006	0.92	0.15	0.91	0.15	0.14	0.180	107.0	0.043	0.182
1.003	0.007	0.14	0.15	0.12	0.16	0.14	0.134	144.9	0.082	0.177
Top: 14.703		0.113				2.102	2.591		2.964	2.980
Ort: 0.854		0.006				0.123	0.152		0.174	0.175

Tablo 5.9 Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş numune yatay kesit ölçüm değerleri (Şekil 5.24a daneleri hesap değerleri)

A (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	Ç (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	C _r	L _d (mm)
0.007	0.954	0.593	0.938	0.519	0.812	0.100	0.153	100.1	0.134	0.158
0.0024	0.507	0.588	0.518	0.582	0.251	0.058	0.057	53.9	0.471	0.075
0.0093	0.434	0.497	0.401	0.455	0.754	0.135	0.144	41.57	0.199	0.148
0.0088	0.722	0.422	0.719	0.437	1.194	0.145	0.117	150.3	0.078	0.150
0.0034	0.967	0.485	0.959	0.474	0.287	0.085	0.073	33.19	0.518	0.104
0.0129	0.573	0.417	0.555	0.407	1.015	0.159	0.159	141.5	0.157	0.203
0.0047	0.315	0.565	0.323	0.545	0.518	0.098	0.108	52.8	0.219	0.110
0.0050	0.059	0.484	0.081	0.450	0.882	0.117	0.155	121.48	0.081	0.178
0.0219	0.899	0.393	0.925	0.410	2.453	0.247	0.219	153.1	0.045	0.324
0.3042	0.455	0.187	0.435	0.184	13.455	0.998	0.555	0.281	0.021	1.022
Top:0.379					21.55	2.145	1.753		1.923	2.473
Ort: 0.038					2.155	0.214	0.175		0.192	0.247

Tablo 5.10 Konsolidasyon ve yükleme öncesi örselenmemiş numune Z kesiti ölçüm değerleri (Şekil 5.24b daneleri hesap değerleri)

A (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	Ç (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	Cr	L _d (mm)
0.0042	0.798	0.195	0.798	0.195	0.248	0.085	0.095	140.08	0.275	0.098
0.0025	0.737	0.294	0.739	0.295	0.333	0.066	0.094	113.85	0.389	0.104
0.0009	0.452	0.231	0.452	0.231	0.255	0.038	0.048	127.58	0.480	0.059
0.0020	0.492	0.253	0.492	0.257	0.288	0.084	0.064	148.50	0.257	0.088
0.0032	0.509	0.028	0.598	0.028	0.059	0.089	0.059	15.52	0.358	0.107
0.0028	0.700	0.021	0.594	0.015	0.055	0.114	0.06	151.50	0.240	0.122
0.0013	0.821	0.022	0.831	0.024	0.055	0.055	0.055	172.75	0.175	0.073
0.0015	0.874	0.029	0.874	0.029	0.055	0.059	0.065	124.44	0.223	0.070
0.0034	0.938	0.059	0.907	0.074	0.097	0.114	0.083	171.53	0.058	0.118
0.0017	0.794	0.419	0.794	0.419	0.447	0.054	0.053	53.92	0.175	0.058
0.0015	0.942	0.305	0.942	0.305	0.348	0.057	0.080	54.95	0.133	0.088
Top (A):0.025		(Ç)	2.242	(W)	0.847	(L)	0.753		2.774	0.995
Ort:	0.002		0.2		0.08		0.07		0.25	0.09

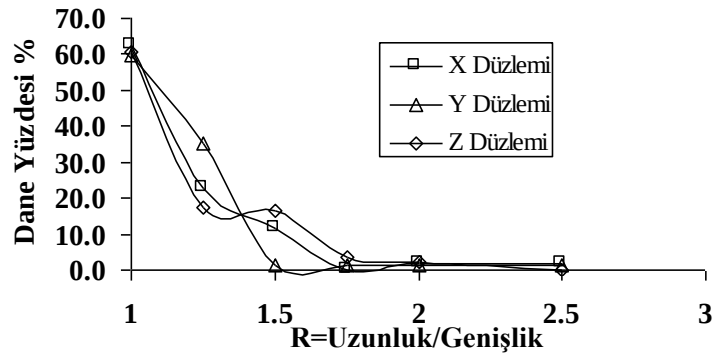
Ayrıca danelerarası küçük boşlukların da yer aldığı görülmektedir. Dane şekilleri daha çok köşeli olup yapı izotropikliğe yakındır çünkü aynı boyuttaki kaba daneler mikrografik içerisinde aynı yerde toplanmıştır. Bu görüntüye benzeyen diğer örselenmemiş numunelerden alınan mikrografikler eklerde verilmiştir.

Dane dağılımı, yatay düzlemde oldukça heterojendir. Mikrografikte soldan sağa doğru dane çapı artmaktadır. Genel olarak örselenmemiş siltli numunede kumların da önemli ölçüde yer aldığı ve dağılımları, şekil ve boyutlarıyla yapıda etkili olduğu görülmektedir. Üçüncü boyuttan alınan görüntüde de benzer dane şekil ve boyutları görülmektedir (Şekil 5.25). Matriks içerisinde karışık agregalı, ince kum ve silt danelerinden oluşan heterojen bir dağılım söz konusudur. Ancak dane şekil ve boyutları düşey düzleme göre daha farklıdır (Şekil 5.26). Boşluklar daha az olmakla birlikte görüntünün alt tarafında toplanmıştır ve aralarında bir bağlantı yoktur. Bu çalışmada incelenen örselenmemiş zemin çoğunlukla konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi anizotropik yapıya sahip olduğundan matriks içerisinde her noktada farklı zemin dane özelliği belirlemektedir.

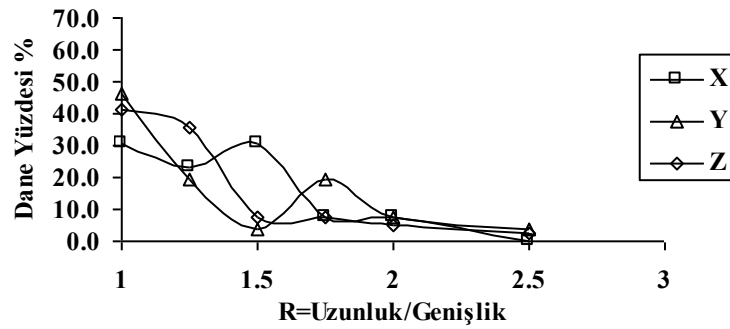


Şekil 5.25 Konsolidasyon öncesi örselenmemiş ince kumlu killi silt Z doğrultusu (X150)

Şekil 5.26’da konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi, Adapazarı örselenmemiş siltli numuneden alınan görüntülerde ortalama dane şeklinin birbirine dik üç kesitteki dağılımı görülmektedir. R oranı 1’e yakın olan dane sayısı % 60 dır.

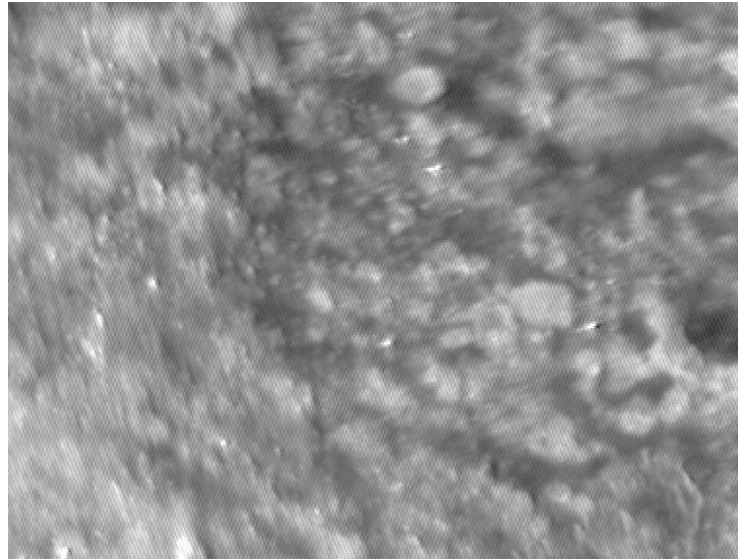


Şekil 5.26 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi örselenmemiş siltli numunede ince kum ve silt danelerinin şekli



Şekil 5.27 Konsolidasyon ve yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş zeminde R oranı

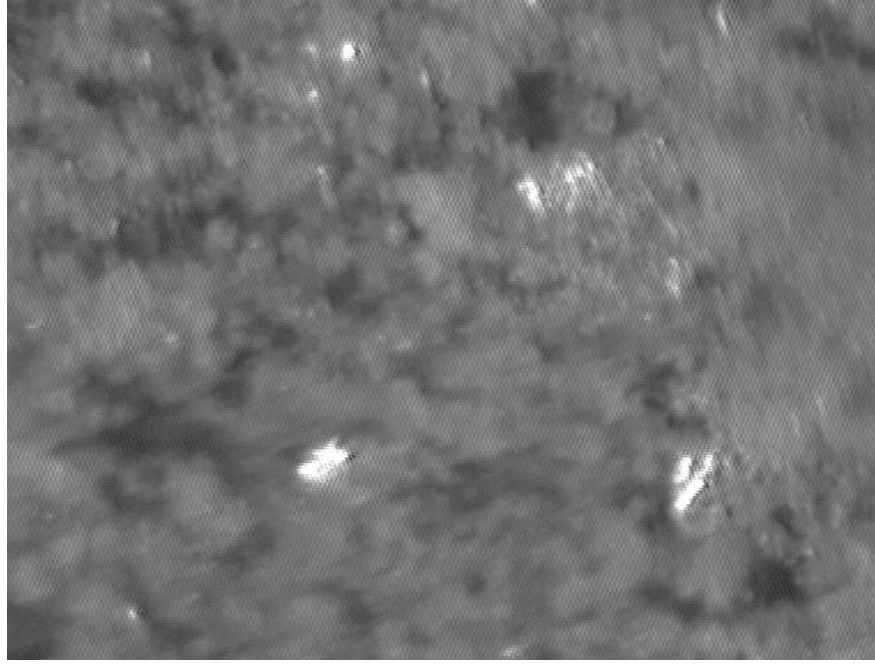
Böylece örselenmemiş zeminde kesme öncesi danelerin yaklaşık yuvarlak dağıldıkları söylenebilir. Şekil 5.28’de ise konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasındaki durum görülmektedir. Yuvarlağa yakın danelerin dağılımında biraz azalma görülürken uzun doğrultularında belirli bir yönlenmeye sahip oldukları söylenebilir. Yatay doğrultuda R oranı 1.5 civarında olan ince kum ve silt daneleri % 30 civarındadır. Düşey doğrultuda R oranı 1.5-2.0 arasında olan daneler toplanırken, Z doğrultusunda ise bu oran 1.0-1.5 arasındadır. Ancak tekrarlı yüklemede çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonuna uğrayan zeminde böyle bir dane şekli değişiminin olduğunu söylemek için daha fazla sayıda deneyden alınan blok ve ince kesit numunelere ve ilave elektron mikroskobu incelemesine ihtiyaç vardır. Örselenmemiş numuneden konsolidasyon ve dinamik deney sonrası alınan görüntüler Şekil 5.28, 5.29 ve 5.30’da görülmektedir. Birden fazla yapı özelliği mikrografiklerde yer almaktadır. Şekil 5.28’de sol tarafta, blok numunedeki topografik etkilerin yüzeyin stabilizesiyle en düşük seviyede tutulduğu gözönüne alınırsa, tahmini oriyantasyonu düşeye yakın olarak gözüken bölge yer almaktadır. Orta kısımda ise bu oriyantasyon sağ üst köşeye doğru yaklaşık 30^0 dir. Bu bölümde farklı çapta küçük boşluklar da görülmektedir. Silt daneleri ise yuvarlak şekilli ve yatay kesitte yassı olacak şekilde görüntünün orta kısmında belirgindir.



Şekil 5.28 Deney sonrası örselenmemiş siltli kil numunesi yatay kesit görüntüsü (X300)

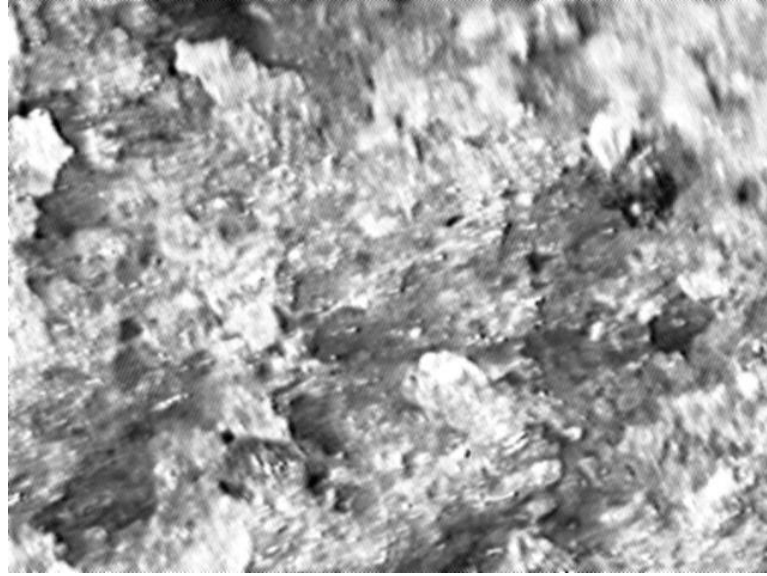
Görüntünün sağ orta tarafında ise ortası boşluklu yuvarlak dane toplulukları yer almaktadır. Diğer görüntülerdeki yapılardan farklı olan bu yapı, örselenmemiş siltli

kil için karakteristik olabilir. Şekil 5.29’da da aynı numuneden alınmış bir başka görüntü görülmektedir. Siyah bölgeler yer yer boşlukları gösterirken, çoğunlukla killi bölgeler yapıya hakimdir. Sol tarafta oriyantasyonu yatay referans eksenine göre görüntüde düşeye doğru olan farklı bir bölge vardır. Sağ tarafta ise dane şekli yuvarlağa yakın daha farklı bir yapı görülmektedir. Görüntü yatay kesitten alınmıştır ve zayıfta olsa yüklemeye birlikte olduğu tahmin edilen oriyantasyon yatay doğrultuda 20^0 ’dir. Yassı plakalar halinde bulunan kil tabletleri örselenmemiş killerdeki karakteristik bir özelliktir (Mitchell, 1976). Ancak bu görüntülerden beklenen oriyantasyonun ve kil tabletlerinin yapısının belirlenmesi mümkün değildir. İlave elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri gerekmektedir. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası alınan bu görüntülerde boşluklarda önemli ölçüde azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 5.29 Dinamik deney sonrası örselenmemiş numune yatay kesit görüntüsü (X300)

Şekil 5.30 ve 5.31’de Adapazarı’ndan gelen örselenmemiş numuneden, konsolidasyonun ardından, 0.33 gerilme oranında $\pm 2.5\%$ deformasyona ulaşıncaya kadar yapılan dinamik yükleme sonrası alınan görüntüler görülmektedir.



Şekil 5.30 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesi düşey kesit Y-düzlemi (X150 yatay: 1 mm, düşey 0.75 mm)

Farklı kesitlerden alınan görüntülerde, hacimsel deformasyon sonu boşluklarda önemli ölçüde azalmayla birlikte dane şekil ve boyutlarında da değişim görülmektedir. Yapılan deneylerde tekrarlı yükleme sonucu meydana gelen birim kaymalar göçme seviyesini aştığından zemin yapısında değişme meydana geldiği düşünülmektedir. Bunun yanında değişimin belli oranda dane dağılımlarında ve aralarındaki boşluklarda meydana geldiği belirlenmiştir. Buna göre, Şekil 5.31, tekrarlı yükleme sonrası numune yatay kesitinden alınan mikrografiğe aittir. İnce kum ve silt dane boyutları 0.05-0.1 mm arasında değişirken, şekilleri ise genellikle aynı görüntü içerisinde birbirine benzemektedir. Örselenmemiş numunelerde ise laboratuvarı hazırlanan numunelerdeki ince kum ve silt danelerinin matriks içerisinde birbirine dik her üç doğrultuda da daha rastgele bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Kum danelerinin dane çapı 0.01 mm ile 0.25 mm arasında değişmektedir. Tablo 5.11 ve 5.12’de, sırasıyla Şekil 5.30 ve 5.31’de görülen mikrografıklara ait ölçüm değerleri verilmiştir. Silt danelerinin şekil ve oriyantasyonlarında meydana gelebilecek değişimin sayısal ve sözel ifadelerle tam olarak belirlenmesi için bütün görüntülerin birarada ele alınıp istatistiksel hesaplamayla birleştirilmesi gereklidir.



Şekil 5.31 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası Adapazarı örselenmemiş numunesi yatay kesit X-düzleminde alınan görüntü (X150, yatay: 1 mm, dikey 0.75 mm)

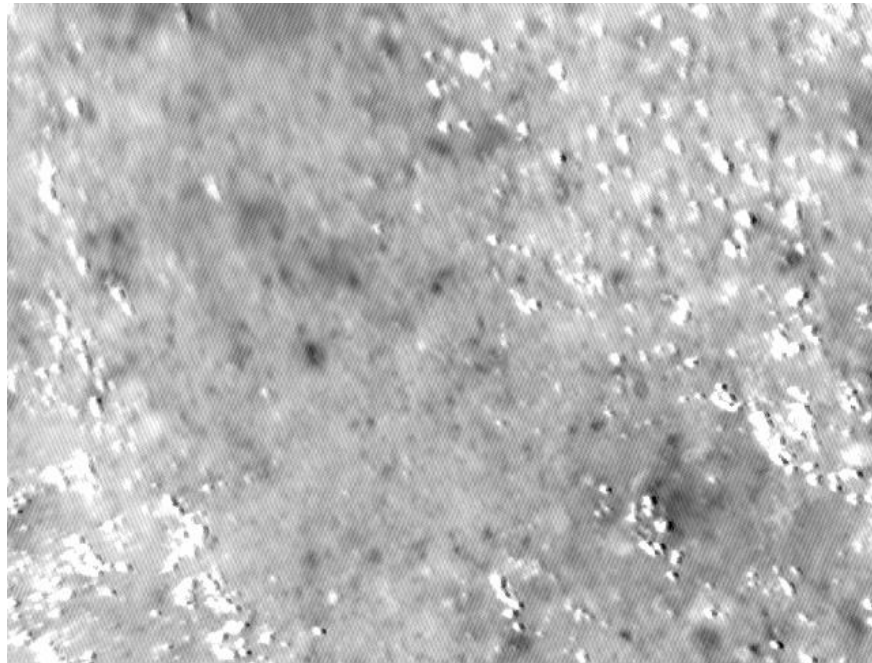
Tablo 5.11 Konsolidasyon ve yükleme sonrası örselenmemiş numune dikey kesit ölçüm değerleri

A (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	Ç (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	C _r	L _d (mm)
0.005	0.74	0.70	0.71	0.70	0.95	0.14	0.08	175.0	0.083	0.145
0.001	0.15	0.57	0.17	0.57	0.24	0.04	0.06	45.90	0.221	0.058
0.001	0.42	0.44	0.41	0.44	0.17	0.05	0.04	29.20	0.473	0.059
0.005	0.47	0.22	0.45	0.20	1.70	0.11	0.16	85.70	0.024	0.150
0.002	0.40	0.31	0.39	0.31	0.42	0.05	0.05	179.8	0.122	0.065
0.009	0.54	0.37	0.55	0.38	1.59	0.19	0.16	35.52	0.038	0.229
0.004	0.75	0.56	0.75	0.55	1.05	0.13	0.08	3.80	0.045	0.135
0.005	0.95	0.44	0.95	0.45	1.51	0.11	0.13	47.25	0.028	0.154
0.002	0.87	0.73	0.85	0.73	0.49	0.07	0.05	11.78	0.095	0.078
0.003	0.89	0.53	0.88	0.52	0.85	0.12	0.10	143.1	0.047	0.141
0.001	0.85	0.49	0.85	0.49	0.23	0.42	0.05	81.44	0.179	0.062
0.002	0.20	0.14	0.21	0.13	0.54	0.50	0.08	98.71	0.088	0.080
0.018	0.09	0.08	0.08	0.07	4.59	0.21	0.24	110.9	0.011	0.270
0.005	0.20	0.37	0.21	0.39	1.70	0.11	0.18	81.8	0.027	0.181
0.001	0.27	0.24	0.28	0.23	0.35	0.51	0.05	85.8	0.129	0.055
Top:0.055					15.50	2.895	1.605		1.612	1.852
Ort: 0.004					1.1	0.193	0.1		0.107	0.124

Tablo 5.12 Konsolidasyon ve deney sonrası örselenmemiş numune yatay kesite ait ölçümler

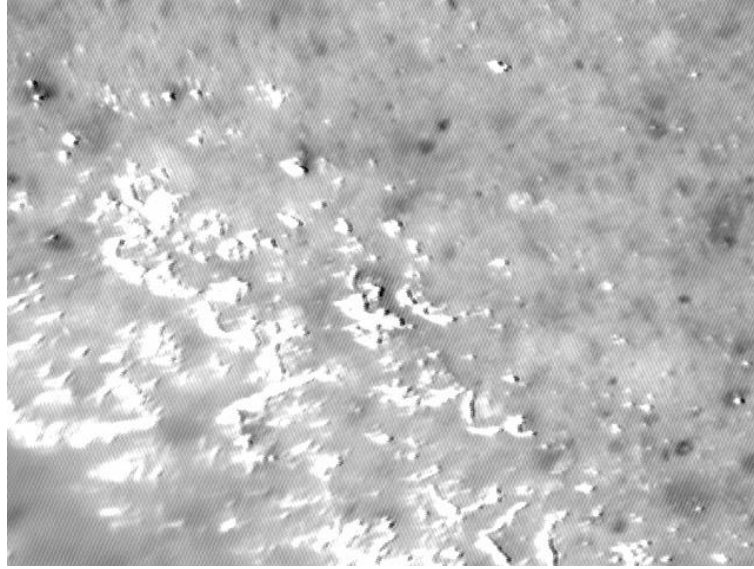
A (mm ²)	x (mm)	y (mm)	X _M (mm)	Y _M (mm)	Ç (mm)	W (mm)	L (mm)	α (°)	C _r	L _d (mm)
0.005	0.280	0.044	0.280	0.053	0.737	0.120	0.102	53.84	0.128	0.145
0.004	0.040	0.566	0.039	0.561	0.522	0.081	0.109	108.45	0.129	0.110
0.002	0.253	0.664	0.261	0.568	0.499	0.059	0.083	133.01	0.102	0.101
0.003	0.324	0.339	0.324	0.328	0.553	0.070	0.120	80.95	0.138	0.125
0.003	0.570	0.258	0.564	0.271	0.528	0.089	0.076	20.97	0.089	0.094
0.003	0.915	0.097	0.902	0.083	0.593	0.091	0.102	51.59	0.103	0.112
0.021	0.830	0.552	0.834	0.569	3.369	0.252	0.223	33.31	0.023	0.254
0.001	0.511	0.721	0.517	0.731	0.228	0.045	0.050	48.12	0.304	0.065
0.002	0.912	0.386	0.920	0.397	0.378	0.073	0.070	52.95	0.139	0.074
0.003	0.638	0.530	0.543	0.541	0.535	0.080	0.105	108.55	0.147	0.107
Top:0.048					8.14	0.97	1.04		1.302	1.178
Ort: 0.004					0.81	0.009	0.1		0.13	0.117

Şekil 5.32’de konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli laboratuvar numunesine ait yatay kesit görüntüsü görülmektedir. Silt daneleri parlak beyaz olarak görülmektedir ve tekrarlı yükleme sonrası belli bir yerde toplanmışlardır.



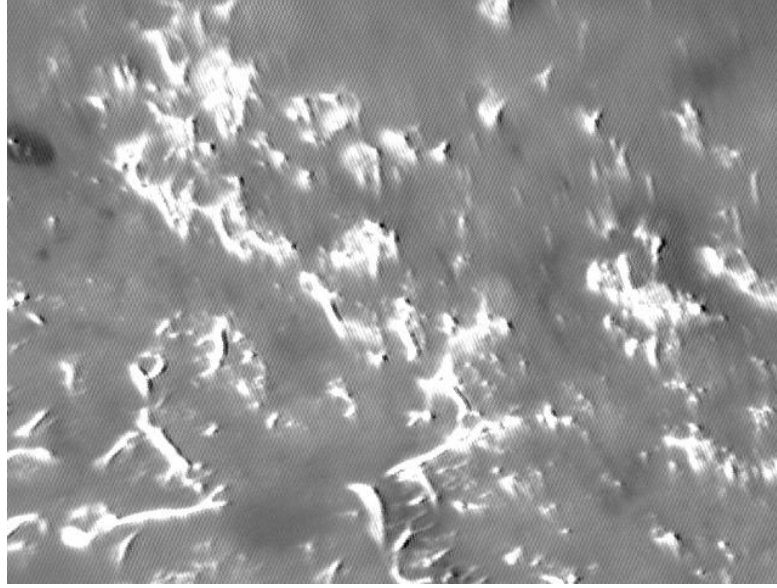
Şekil 5.32 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası I_p =%11 olan laboratuvar numunesi yatay kesitinden alınan görüntü, X150 (τ_d/σ'_c =0.185)

Şekil 5.33'te aynı numunenin düşey kesitinden alınan görüntü görülmektedir. Buna göre silt danelerinde yine belli bir bölgede toplanma ve uzun doğrultuda yönlenme söz konusudur. Şekil 5.34'te ise Z kesitinden alınan görüntü görülmektedir. Bu görüntüde silt daneleri rastgele doğrultularda oriyantasyona sahiptir.

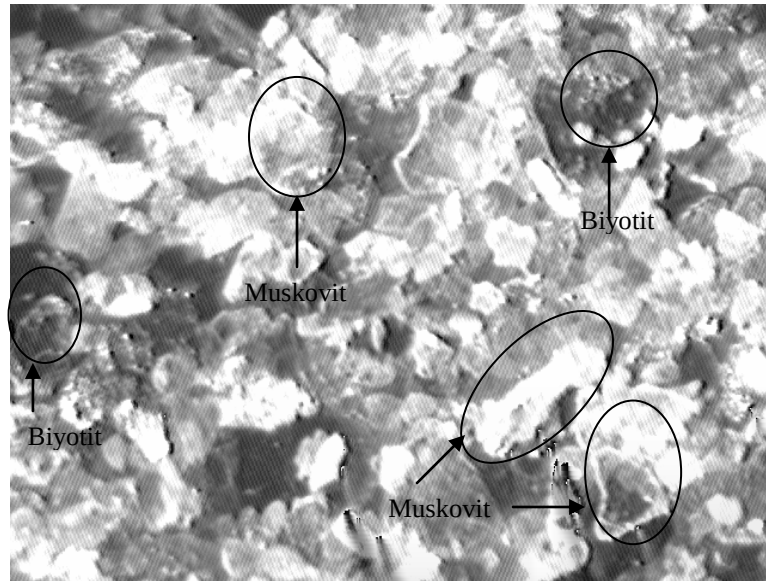


Şekil 5.33 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası $I_p=11\%$ olan laboratuvar numunesi düşey kesitinden alınan görüntü, X150 ($\tau_d/\sigma'_c=0.185$)

Şekil 5.38'de İzmir Çiğli A5 sondajı 9.00-9.50 m derinliğinden getirilen örselenmemiş yumuşak silt zeminden konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi yatay kesitten alınan dijital görüntü görülmektedir. Görüntüde parlak beyaz, koyu kahverenkli ve siyahla görülen bölgeler kum daneleri ile birlikte yer yer mikaya aittir. Dane sınırı parlak beyaz olan ve dane ortasına doğru gittikçe parlaklığı azalan daneler muskovit türü mikadır. Bunun yanında koyu kahverenkli ve kahverengi ile siyah karışımı renge sahip daneler ise biyotit türü mikadır. Genel olarak çıplak gözle de görülebilen mikanın beyaz ışık altında parlaması ve siyah ve beyaz türde siltli ve kumlu çökelti zemin içerisinde yerleşimi karakteristik özelliğidir. Oldukça agregalı bir yapısı olan bu örselenmemiş numunede killi bölgeler gri rengin koyudan açığa farklı tonlarda yer aldığı bölgelerde gözükmemektedir.

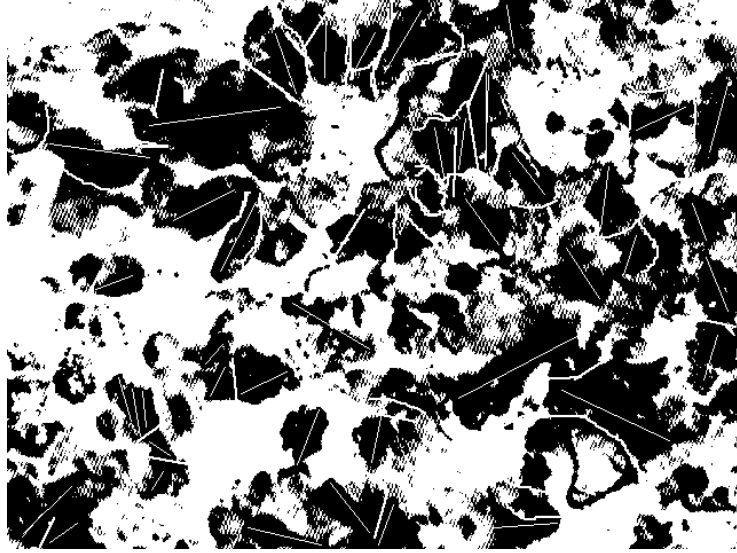


Şekil 5.34 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası $I_p=11\%$ olan laboratuvar numunesi Z kesitinden alınan görüntü, X150 ($\tau_d/\sigma'_c=0.185$)

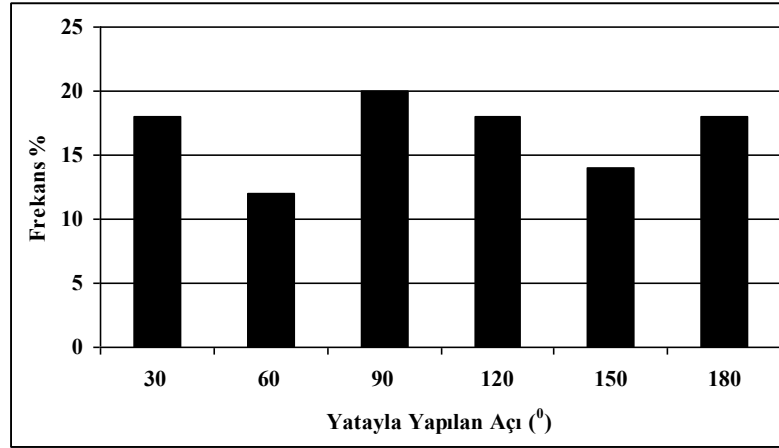


Şekil 5.35 Örselenmemiş numune yatay kesit konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü (X75, yatay: 2.0 mm, düşey: 1.5 mm)

Bu danelerarası boşluklar ise görüntüden kolay olarak seçilememekle birlikte yer yer farklı çaptadırlar. Şekil 5.36'da bu görüntüdeki agregaların oriyantasyonları görülmektedir. Şekil 5.37'de ise bu oriyantasyonlara ait açısıl histogram çizilmiştir. Agregaların uzanım doğrultularını gösteren frekansları yaklaşık olarak tüm doğrultularda aynıdır. Bu da heterojen bir dağılımla birlikte anizotropik bir yapıyı göstermektedir.

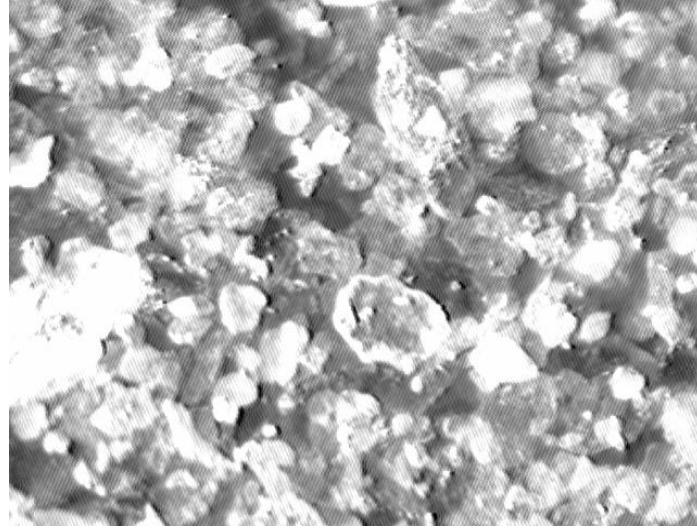


Şekil 5.36 Şekil 5.35'e ait dane oriyantasyonları

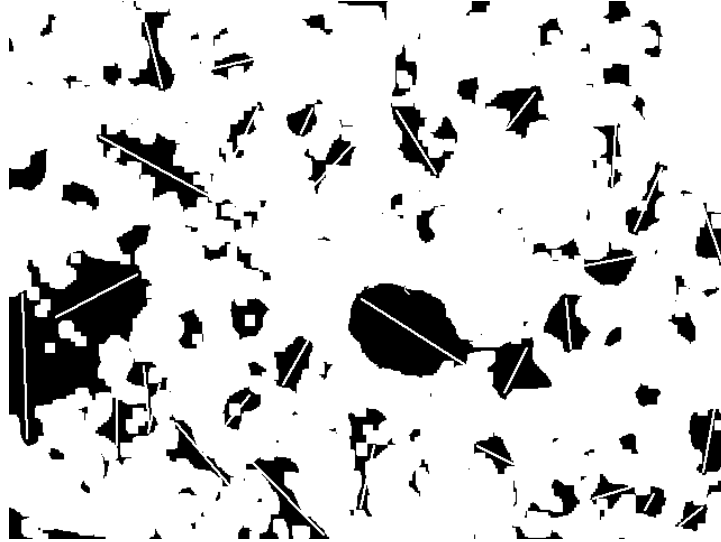


Şekil 5.37 İzmir örselenmemiş numunesi yatay kesit açısal histogram

Şekil 5.38'de aynı numunenin düşey kesitinin görüntüsü görülmektedir. Benzer özellikte mika ve kum daneleri bu kesitte de gözükürken, boşluklar daha belirgindir. Matriks içerisinde ise killi bölgeler, görüntüyü saran agregalardan dolayı belirsizdir. Ancak numunenin silt ve kum içeriğinin yüksek oluşu bu durumu açıklamaktadır.



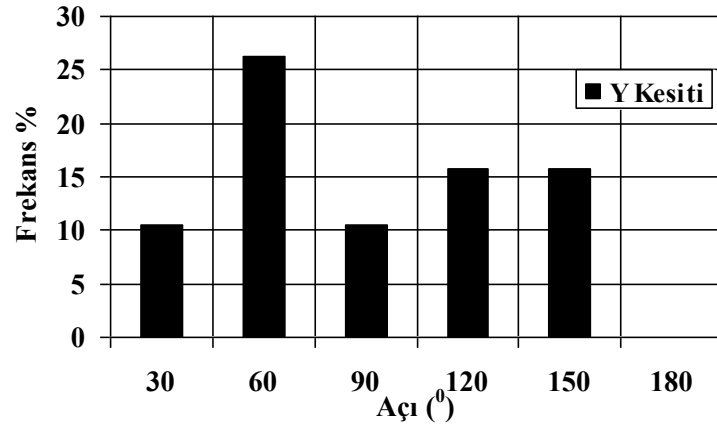
Şekil 5.38 Örselenmemiş numune düşey kesit konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü (X75, yatay: 2.0 mm, düşey: 1.5 mm)



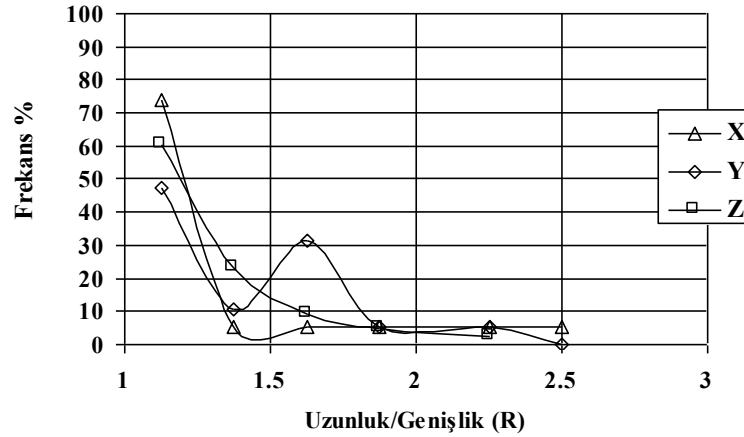
Şekil 5.39 Şekil 5.38'e ait dane oriyantasyonları

Şekil 5.39'da görülen dane oriyantasyonları tekrarlı yükleme öncesi numunenin düşey kesitine aittir. Şekil 5.40'ta ise aynı şekle ait açısal histogram görülmektedir. Yatay kesitteki oriyantasyondan farklı olarak danelerin yatay doğrultuyla $30-60^0$ arasında yaptığı açının frekansı diğer doğrultulardan daha fazladır. Analizi yapılan görüntüdeki danelerin yaklaşık % 25'i yatayla $30-60^0$ arasında bir açıya sahiptir. Danelerin diğer doğrultulardaki oriyantasyonları ise yaklaşık olarak aynı frekanstadır. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi örselenmemiş numunenin yatay kesitine ait agregaların dane şekilleri Şekil 5.41'de görülen frekans-R oranı ilişkisiyle belirlenmiştir. Buna göre, bu oranın 1'e yaklaştıkça danelerin yüzdesi de

artmaktadır. Bu da belli bir doğrultuda uzanıma sahip kum ve silt dane sayısındaki azlığı gösterirken, yuvarlaksı ve az köşeli danelerin olduğuna işaretir. Ayrıca her üç düzlemde de yuvarlağımsı daneler önemli ölçüde yer almaktadır. X düzleminde % 75 oranında yuvarlağımsı silt daneleri yer alırken bu oran Z düzleminde % 60, Y düzleminde % 48 dir. Y düzleminde R oranı 1.5-2.0 arasında olan daneler ise % 30 ile önemli bir frekansa sahiptir.

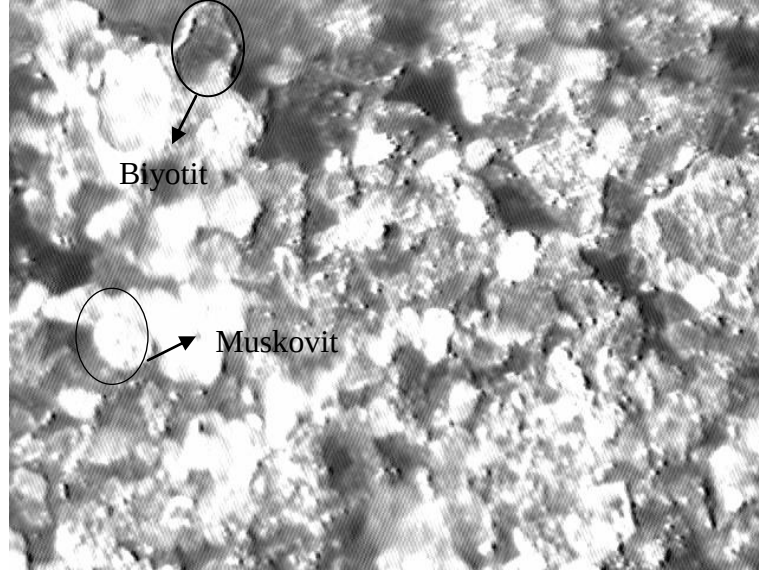


Şekil 5.40 Şekil 5.39'a ait açısal histogram



Şekil 5.41 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi dane şekli dağılımı ($D_{dane}=0.01-0.15$ mm)

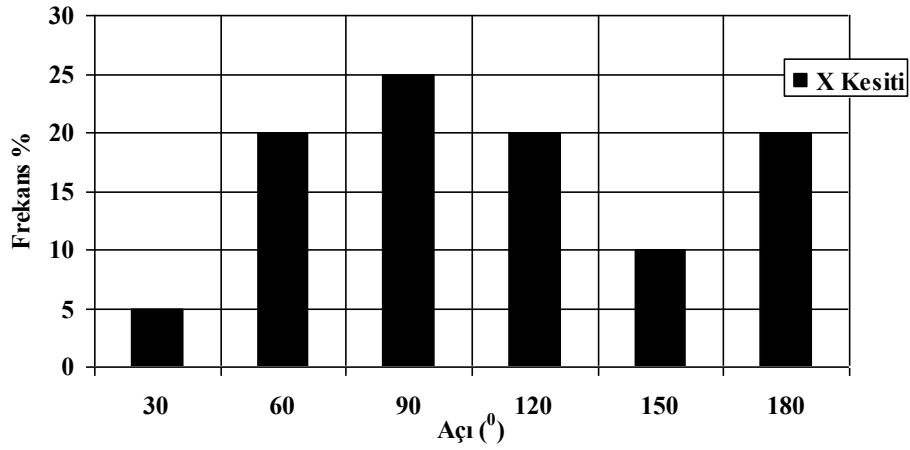
Şekil 5.42'de konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi yatay kesit görüntüsü görülmektedir. Görüntünün büyütmesi X 75 tir ve yatayda 2 mm düşeyde de 1.50 mm dir. Beyazla görülenler kum ve silt daneleridir.



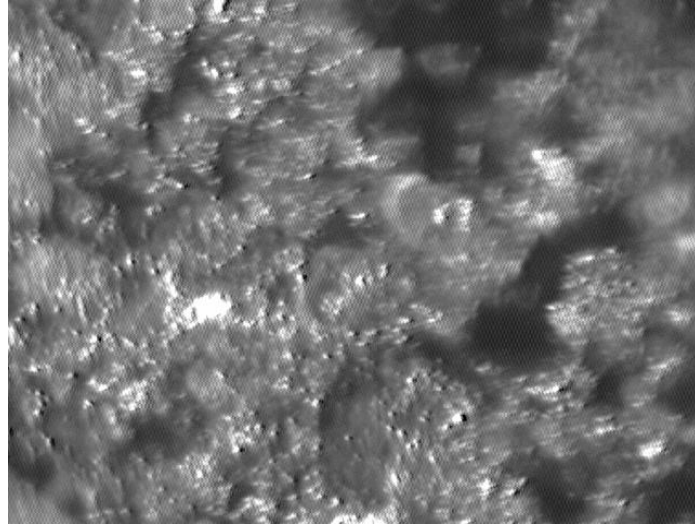
Şekil 5.42 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi yatay kesit görüntüsü (X75)

Gri renkli yerler killi bölgelerdir ve görüntüde yer yer siyahla görülen boşluklar da vardır. Mineral olarak mikanın da görülebildiği bu yatay kesit görüntüsünde agregaların önemli bir alanı kapladığı ve killi bölgelerin daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kum daneleri çoğunlukla yuvarlaksıdır. Saydam olan danelerin aralarında kuartz da rastlanmıştır. Şekil 5.43'te bu görüntüde dane çapı 0.02 mm'den büyük olan silt ve kum danelerine ait açısal histogram görülmektedir.

Buna göre danelerin yatayla yaptıkları açılar çoğunlukla $60-120^0$ arasındadır. Danelerin bu karışık dağılımları belirli bir doğrultuyla oriyente olan danelerin azlığını göstermektedir. Şekil 5.44'de örselenmemiş siltli numunenin tekrarlı yükleme sonrası düşey kesitine ait görüntüsü görülmektedir. Görüntüde büyük çaplı boşluklar ağırlıktadır ve yatay kesit görüntüsüne göre daha fazla sayıdadır. Diğer yandan killi bölgeler çoğunlukla bu kesittedir. Görüntünün yatay kenarı 0.5 mm düşey kenarı 0.37 mm dir. Üst tarafındaki silt danelerinin oriyantasyonlarının 30^0 civarında olduğu belirlenmiştir. Görüntünün sol alt tarafında ise yatayla 100^0 'den büyük bir açıyla oriyente olan silt daneleri görülmektedir. Agregaların görülmediği mikrografikte ayrıca uzunluk/genişlik oranı 1.0-1.5 arasında olan danelerin % 35 ile diğer silt danelerinden daha fazla yüzdeyle görüntüde yer aldıkları Şekil 5.45'teki açısal histogramdan belirlenmiştir.

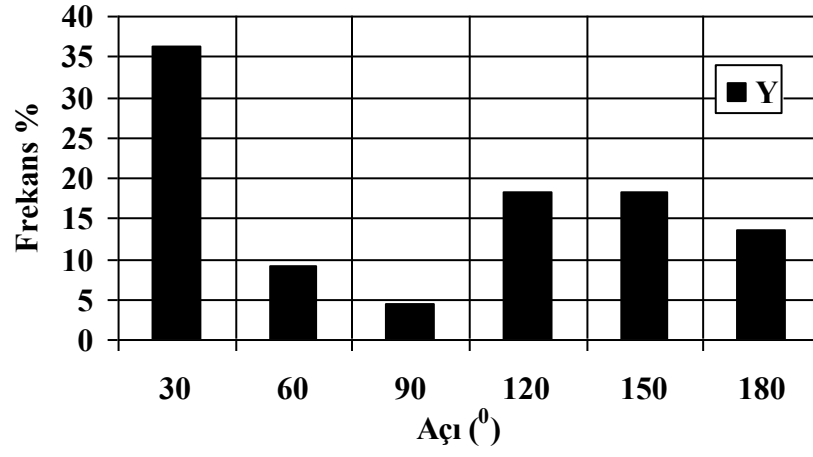


Şekil 5.43 Şekil 5.41'e ait açısal histogram

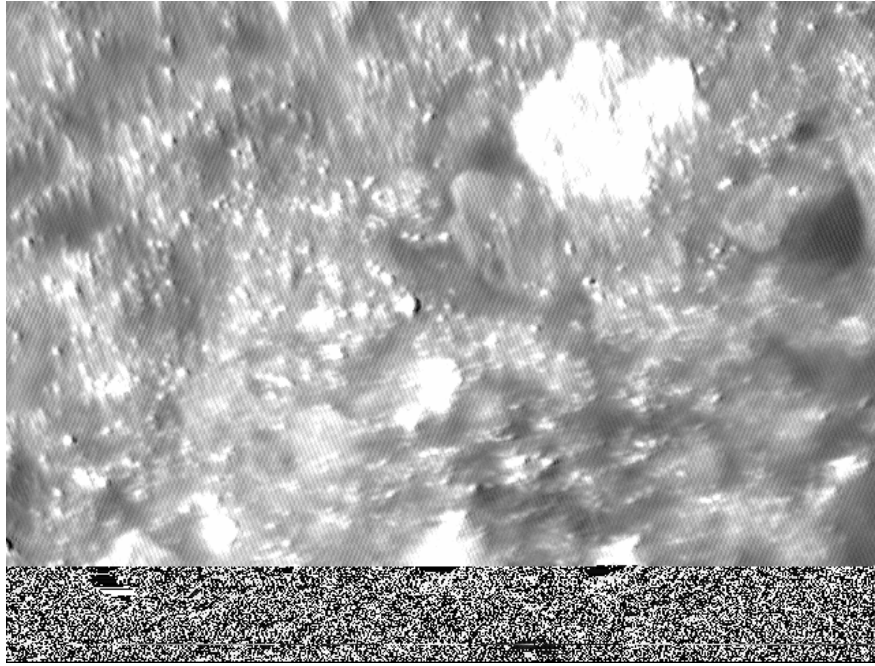


Şekil 5.44 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi düşey kesit görüntüsü (X300)

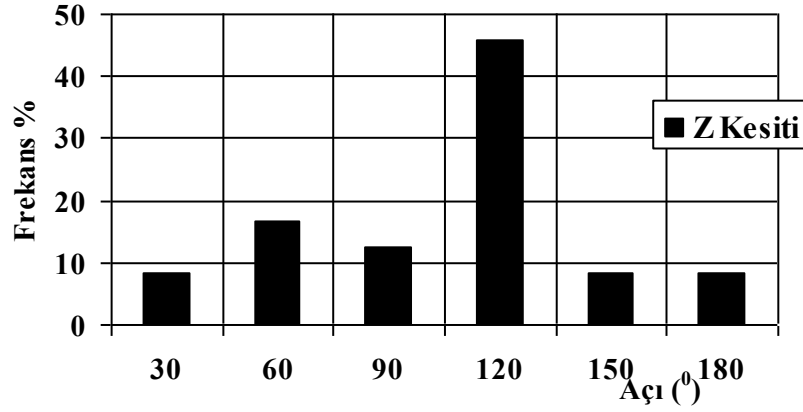
Şekil 5.46'da konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 sondaj kuyusu 9.00-9.50 m derinliğinden alınan örselenmemiş siltli numunenin Z kesiti görüntüsü (X300) görülmektedir. Görüntüde birden fazla yapı özelliği vardır. Sol tarafta oriyantasyonu yatayla 100^0 olan silt daneleri, alt tarafta yatayla yaptığı açı yaklaşık 40^0 olan silt daneleri ve görüntünün ortasında da ince kum daneleri biraradadır. Görüntünün sağ tarafında ise siyahla görülen boşluklar yer almaktadır. Matriks içerisinde killi bölgeler ise gri renk ile görülmektedir. Şekil 5.47'de bu görüntüye ait açısal histogram çizilmiştir. Buna göre silt daneleri çoğunlukla $90-120^0$ arasında bir açıyla oriyantasyona sahiptir.



Şekil 5.45 Şekil 5.44'e ait açısal histogram

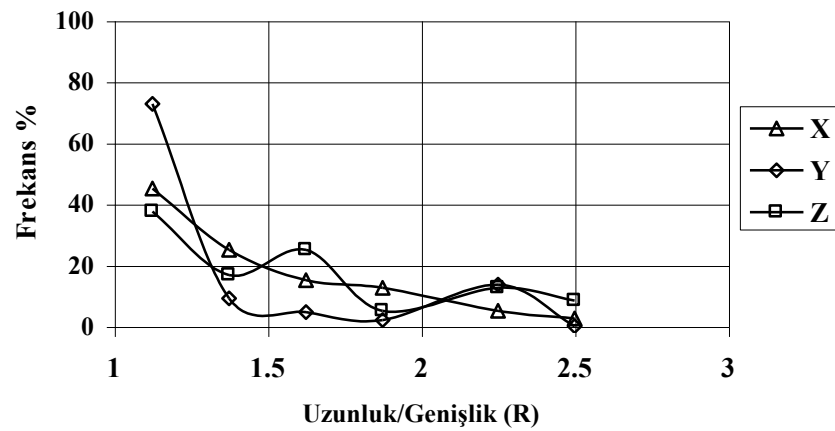


Şekil 5.46 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş siltli numune Z kesiti görüntüsü (X300)



Şekil 5.47 Şekil 5.46'a ait açısal histogram

Şekil 5.48'de konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası silt ve ince kum danelerinin şekillerine ait histogram görülmektedir. Buna göre R oranı 1.0-1.5 arasında olan danelerin frekansı en fazla düşey kesittedir. R oranı arttıkça her üç düzlemde de danelerin yüzdelерinde önemli ölçüde azalma söz konusudur. X ve Z düzlemlerinde dane şekilleri % 40 oranında yuvarlağımsıdır ancak Z düzleminde R oranı 1.5-2.0 arasında olan % 25 oranında dane bulunduğı da görülmektedir. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesindeki duruma göre örselenmemiş yumuşak silt zemine ait 0.02-0.25 mm çap aralığındaki dane şekillerinde her üç doğrultuda da değışme olduğı söylenebilir. Yuvarlağına yakın daneler, X ve Z doğrultularında azalırken, Y doğrultusunda artmaktadır.



Şekil 5.48 Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası A5 9.00-9.50 örselenmemiş numunesi dane şekli dağılımı ($D_{dane}=0.02-0.25$ mm)

Genel olarak çok sayıda danenin analiziyle belirlenen bu durum bize ancak tahmini bir fikir vermekte, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası çift genlikli % 5 birim kayma genliğine ulaşan zemin numunesinde danelerin şekil, boyut, dağılım ve oriyantasyonlarında meydana gelen değişimin belirlenmesi için kapsamlı ve detaylı bir araştırma gerekmektedir.

5.4.3 Deney Numunelerinde Konsolidasyon ve Tekrarlı Yükleme Sonrası Anizotropideki Değişimin Belirlenmesi

Zeminler arazide, uygulanan düşey yük ve kayma gerilmeleri altında danesel özelliklerine göre farklı türde yapı özelliği göstermektedirler. Jeolojik olarak çeşitli fiziksel ve kimyasal etkiler altında kalan doğal zeminler, önemli ölçüde anizotropik yapıya sahiptirler. Gerçekte doğadaki mevcut jeolojik yük ve gerilmeler altında kalan zeminlerin bu anizotropik özelliği, çeşitli dış etkenlerle değişmektedir. Bu değişim zeminin danesel özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmektedir.

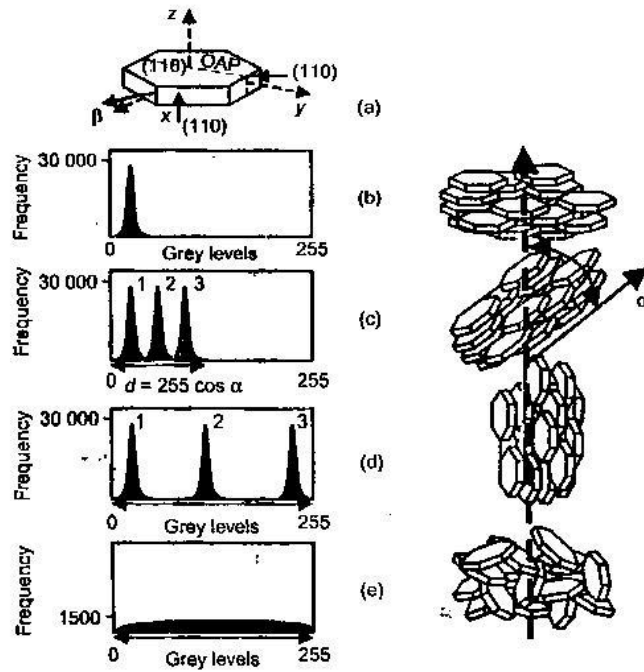
Örneğin normal konsolide bir zemin ile önceden yüklenmiş aşırı konsolide zemin arasında önemli ölçüde yapısal farklılıklar vardır. Efektif konsolidasyon basınçları arasındaki farklılık zeminleri anizotropik hale getiren başlıca etkidir. Arazide sabit efektif konsolidasyon basıncı altında tekrarlı ve/veya statik kayma gerilmelerine maruz kalan zeminlerde, asal gerilme eksenlerinin döngüsünden dolayı oluşan anizotropik yapı özelliğinden dolayı belli düzlemlerde süreksizlikler doğmaktadır. Devam eden yüklemeyle birlikte, bu süreksizlikler boyunca kayma mukavemeti devamlı surette azalmaktadır. Azalan kayma mukavemeti ise zeminde kayma ve göçmeye sebep olmaktadır. Killerde uygulanan kayma gerilmesine bağlı olarak oriyantasyon değişimi ve kırılma düzlemine doğru yeni bir oriyantasyon belirirken örselenmemiş numunede yatay dane oriyantasyonları ise bir ölçüde artmaktadır (Bai ve Smart, 1997). Sıkı kumlarda ise kayma gerilmesine karşı hacimsel olarak bir artışa eğilim söz konusudur. Gevşek durumda ise hacim azalmasına bağlı olarak sıkışma ve dolayısıyla boşluk suyu basıncında artış meydana gelir. Tekrarlı yükleme altında stabil olmayan boşluklar düşük deformasyon seviyelerinde azalırken, devam eden çevrim sayılarında meydana gelen büyük deformasyonlarda, dilatans nedeniyle oluşan küçük boşluklar, yükleme döngüsü nedeniyle tekrar azalmaktadır (Şekil 5.17).

Anizotropi, zeminlerin doğada sahip oldukları bir özelliktir. Laboratuvarda örselenmemiş numunelerde yapılan statik ve dinamik deneylerde bu özelliğin etkisi deney sonuçlarına yansımaktadır. Ancak laboratuvarda örselenerek hazırlanan numunelerde ise daha üniform bir yapı olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla izotropinin numune yüksekliği boyunca zemin yapısına hakim olduğu söylenebilir. Bunun yanında örselenmemiş numuneler doğada zeminin gerçek yapısını temsil ettiğinden anizotropik ve heterojen bir yapıya sahiptir.

Mikroskop incelemelerinde dane dağılımları alınan dijital mikrografiklerdeki gri rengin tonlarına göre ayırt edilmektedir. Gri renk tonları ise renk histogramında her piksel için değişebilmektedir. Buna göre 0-255 arasında değişen piksel sayıları mikrografik üzerinde her noktadaki görüntüye ait ışık şiddetinin sayısal bir göstergesidir. 255 en uç ve en parlak noktanın beyaz renk histogram değeridir. 0 ise en düşük histogram değeridir ve siyah renge karşılık gelir. Şekil 5.49’da gri renk histogramının şekline göre dane dağılımlarının ve dolayısıyla anizotropinin durumu görülmektedir (Dudoignon ve Pantet, 1998). Buna göre histogramda görülen pikler, görüntünün alındığı kesitteki dane yığılmalarını ve tek tip dane dağılımına olan eğilimi belirtmektedir. Dolayısıyla anizotropik bir yapı söz konusudur. Piklerin sayısı arttıkça oriyantasyonlar değişmektedir. Histogramda pik gözükmediği durumda ise izotropik bir yapı olduğu söylenebilir. Dudoignon ve diğ. (2001), kaolin kilinde yaptıkları incelemelerde zeminin anizotropisinde statik yüklemeye birlikte artış olduğunu belirtirken, aşırı konsolide durumda boşluk oranındaki değişimin az olmasından dolayı dane yerleşiminin de düşük olduğunu söylemişlerdir. Gri renk histogramında sivri ve dar tek bir pik gösteren kil numunesinde ise, paralel danelerin yer aldığı belirlenirken, normal konsolide olan numunedeki bu yüksek oriyantasyonun nedeni olarak, boşluk oranındaki daha büyük azalma gösterilmiştir (Dudoignon ve diğ. 2001). Anizotropi ayrıca (5.8) bağıntısıyla da belirlenebilmektedir. H_p , V_p , L_p ve R_p ile belirtilen parametreler, sırasıyla yatay, düşey, alt sol ve alt sağ doğrultularda oriyantasyona sahip danelere ait piksel sayılarıdır. Bu parametreler Bai ve Smart (1994), tarafından öne sürülen,

$$A_0 = \frac{(H_p + V_p) - (R_p + L_p)}{H_p + V_p + R_p + L_p} \quad (5.8)$$

anizotropi indisi bağıntısının hesaplanmasında kullanılmıştır. A_0 , 0 ile 1 arasında değişmektedir. Buna göre A_0 'ın 1 olduğu durumda tam anizotropik yapı söz konusudur ve bu durumda zeminde bütünüyle birbirine paralel partiküllerin oluşturduğu bir yapı hakimdir. Yatay, düşey, sağa çapraz (45^0 - 225^0) ve sola çapraz (135^0 - 315^0) doğrultularda yönlenmiş piksel sayıları Image J programı yardımıyla belirlenen dane sınırları ve bu sınırlara çizilen dışbükey kabuklara ait en uzun köşegenin yatayda, düşeyde, yatayla 45^0 açı yaptığı doğrultuda ve yatayla 135^0 açı yaptığı doğrultudaki bileşenlerinin toplanmasıyla elde edilmiştir. Smart, (1985) ve Smart ve Leng (1993)'te hesaplarla ilgili algoritma detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 5.49 Kaolin kristallerinden elde edilen teorik gri renk histogramı değişimi (Dudoignon ve Pantet, 1998)

Smart (1985), ince kesitin bir noktasına iletilen ışığın birim alana gelen şiddetini,

$$i = f + g \cos (4\theta) + h \sin (4\theta) \quad (5.9)$$

olarak tanımlamıştır. θ mikroskop düzeneğinin dönme açısına karşı gelmekte, f , g , h katsayıları ise mikroskop görüntüsünde noktadan noktaya değişebilmektedir. Bütün alandaki ışığın şiddeti ise,

$$I = F + G \cos (4\theta) + H \sin (4\theta) \quad (5.10)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. F, G, H katsayıları tüm kesit boyunca f, g ve h'nin integrasyonundan elde edilmektedir. Bu bağıntı,

$$I = F + K \cos 4(\theta - \phi) \quad (5.11)$$

biçiminde de yazılabilir. Buradan I'nın en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla,

$$M = F + K \quad (5.12a)$$

$$N = F - K \quad (5.12b)$$

şeklinde bulunur. Bu bağıntılar yardımıyla anizotropi indisi;

$$A_0 = \frac{M - N}{M + N} \quad (5.13)$$

oriyantasyon derecesi de

$$C = 1 - \frac{N}{M} \quad (5.14)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan optik mikroskop düzeneği numune eksenine göre sabit tutulduğundan kesitin yüzeyine yalnız bir doğrultudan ışık gelmektedir. Dolayısıyla mikroskobun dönmesiyle aynı numunede oluşan en mat ve en parlak görüntülerden ölçülen en büyük ve en küçük ışık şiddetinin belirlenmesi olanaksızdır. Bu yüzden bu çalışmada anizotropi, 5.8 bağıntısıyla ve dijital mikrografiklere ait gri renk histogramlarının değişiminden belirlenmiştir.

Tablo 5.13'te laboratuvar da hazırlanan ve örselenmemiş siltli zemine ait dane oriyantasyonlarından elde edilen piksel sayıları ve 5.8 bağıntısı kullanılarak elde edilen A_0 indisi görülmektedir. Mikrografiklerden elde edilen anizotropinin laboratuvar da hazırlanan numunede değişmediği görülürken, örselenmemiş zemin numunesinde konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası arttığı belirlenmiştir. Örselenmemiş numunedeki anizotropik yapı, doğada maruz kaldığı düşey ve yanal gerilmeler etkisiyle oluşurken, laboratuvar da hazırlanan örselenmiş siltli numunenin ise deneyde uygulanan izotropik konsolidasyon sonrasında üniform ve kısmen izotropik yapıya sahip olduğu düşünülebilir. Buna göre örselenmemiş numunede

hem konsolidasyon öncesi doğal yapıda hem de konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasında değişen yapıda, yatay ($\alpha'=0^0$) ve düşey ($\alpha'=90^0$) doğrultularda oriyantasyona sahip danelerin daha fazla sayıda olduğu ve bunun da zemin numunesinde anizotropiyi artırdığı görülmektedir.

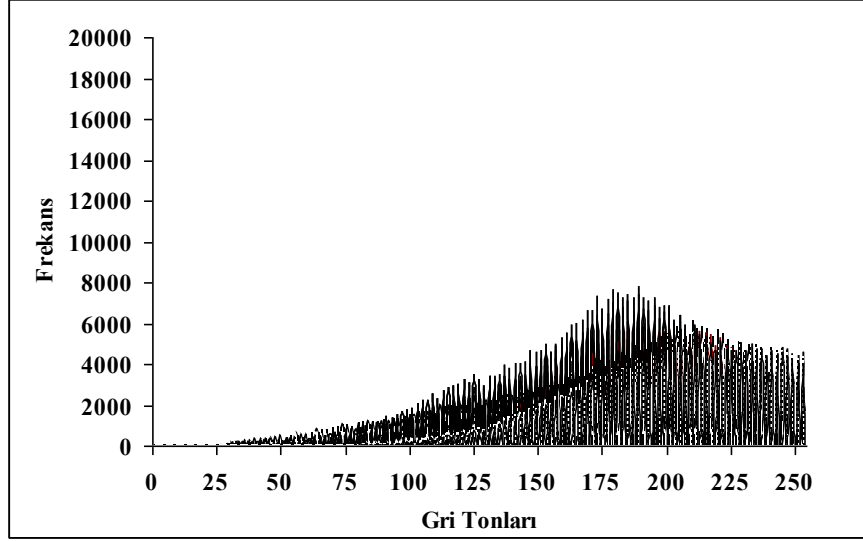
Tablo 5.13 Plastisite indisi % 18 olan laboratuvar numunesi ile PI=% 13 olan örselenmemiş numunede anizotropinin değişimi

Örselenmemiş Numune		
Parametre	Konsolidasyon Öncesi Piksel Sayısı	Konsolidasyon ve Yükleme Sonrası Piksel Sayısı
H_p	135722	154752
V_p	128470	126336
L_p	24082	15040
R_p	18926	11072
A_0	0.72	0.83
Örselenmiş Numune		
Parametre	Konsolidasyon Öncesi	Konsolidasyon ve Yükleme Sonrası
H_p	7571	1544
V_p	9103	1646
L_p	6909	1348
R_p	6418	1279
A_0	0.11	0.10

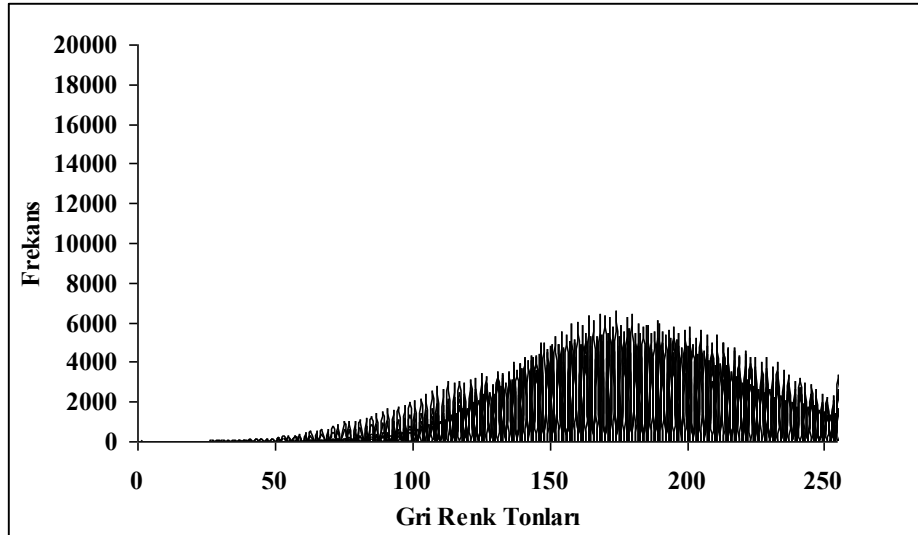
Şekil 5.50'de laboratuvar da hazırlanan, % 18 plastisite indisli silt zemin numunesinin tekrarlı yükleme öncesi alınan dijital görüntüsüne ait gri renk histogramları görülmektedir. İncelemesi yapılan numunelerde ışığın kesite geliş yönü ve şiddeti sabit tutulduğundan numunenin farklı yerinden alınmış dijital görüntülerin gri renk histogram eğrileri karşılaştırılabilmiştir. Histogramlar yatayda geniş bir dağılıma ve düşük bir pik değerine sahiptir. Buradan farklı dane dağılımlarının aynı kesitte yer aldığı ve farklı gri renk piksel sayılarının birarada bulunduğu sonucu çıkmaktadır. Böylece kısmen izotropik bir yapı bulunduğu söylenebilir. Tekrarlı yükleme sonrası bu yapıda fazla bir değişim görülmemektedir (Şekil 5.51). Histogramlar arası yatay mesafe sabit kalırken, pikler de artmamaktadır. Böylece tekrarlı yüklemeyle birlikte anizotropi % 7 değişmektedir.

Yumuşak, kumlu ve killi silt zeminden alınan örselenmemiş numuneye ait konsolidasyon öncesi ve konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası histogram

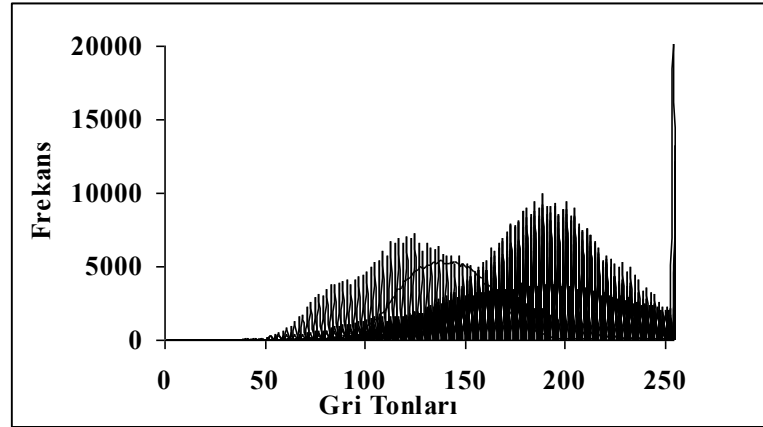
eğrileri ise Şekil 5.52 ve 5.53'te görülmektedir. Histogramlarda tekrarlı yükleme öncesi dar bir aralıkta dağılım görülürken, yükleme sonrası bu dağılım, yatayda daha geniş bir aralıkta olmaktadır. Tekrarlı yüklemeyle birlikte piklerde sivrileşme ve histogramın genişliğinde azalma meydana gelmektedir. Örselenmemiş siltli numuneden elde edilen anizotropi konsolidasyon ve tekrarlı yükleme ile birlikte %37 değişmektedir.



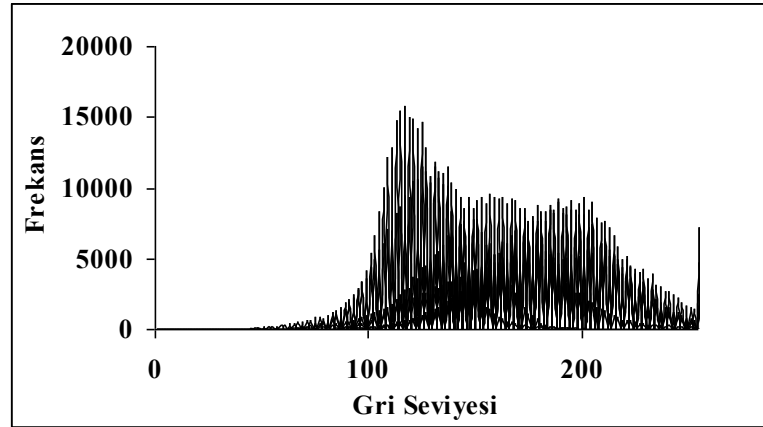
Şekil 5.50 Plastisite indisi % 18 olan siltli laboratuvar numunesinde konsolidasyon öncesi histogramlar



Şekil 5.51 Laboratuvar numunesinde konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası histogramlar



Şekil 5.52 Örselenmemiş Adapazarı numunesinde konsolidasyon öncesi histogramlar



Şekil 5.53 Örselenmemiş zeminde konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası histogramlar

Böylelikle 5.8 bağıntısıyla belirlenen anizotropi, gri renk histogram eğrilerinin durumundan belirlenen anizotropiyle uyum içerisinde. Sonuç olarak laboratuvarda hazırlanan siltli numune yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerde anizotropide değişim olmazken, örselenmemiş zemin numunesinde yapılan dinamik deney sonrasında anizotropik yapı artmaktadır. Bu bulgular, araştırmacıların yaptıkları gerilme ve deformasyon kontrollü deneylerle karşılaştırılmıştır. Buna göre Tablo 5.14’te kullanılan malzeme, uygulanan deney yöntemi ve anizotropideki değişim görülmektedir. Gerilme kontrollü deneylerde anizotropi önemli ölçüde azalırken, deformasyon kontrollü deneylerde her üç durum da olabilmektedir. Tabloda DKÜE, deformasyon kontrollü üç eksenli deneye, DKKK, deformasyon kontrollü kesme kutusuna, GKDD, gerilme kontrollü düzlem

deformasyona, DKDD, deformasyon kontrollü düzlem deformasyona, ÜEB, üç eksenli basınca, GÜEB, gerçek üç eksenli basınca ve SB'de serbest basınca karşı gelmektedir.

Tablo 5.14 Değişik deney koşullarında anizotropideki değişim, Smart (1985)

Yüklemeye Öncesi	Yüklemeye Sonrası	Malzeme	Deney Tekniği
0.09	0.12	Grangemouth kili	DKÜE
0.25	0.45	Spestone Kaolini	DKKK
0.37	0.27	İllit	GKDD
0.37	0.17	İllit	DKDD
0.49	0.49	Kaolin	DKÜE
0.57	0.35	Kaolin	GKDD
0.57	0.39	Kaolin	DKDD
0.50	0.11	Meotik Kil	ÜEB
0.51	0.32	Kaolin	GKDD
0.51	0.59	Kaolin	DKDD
Değişim Yok		Kaolin	GÜEB
Artış Var		Çeşitli Killer	SB

Zeminin konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeye birlikte iç yapısındaki değişim ve artan birim kayma deformasyonlarına da bağlı olarak oluşan yumuşama etkisiyle, daneler yeni bir yerleşime sahip olmaktadır. Bu yerleşim aynı zamanda zemin boşluklarındaki azalmaya da paralel olarak gerçekleşmektedir. O yüzden boşluk oranındaki büyük oranda azalma, özellikle kil danelerinin daha iyi ve paralel bir yerleşime sahip olmaları sonucunu doğurur.

5.5 Sonuç

Bu bölümde dinamik burulmalı kesme deney aletinde kullanılan örselenmemiş numunelerle laboratuvarında hazırlanan örselenmiş numunelerin konsolidasyon öncesinde ve tekrarlı yükleme sonrasında yapısal özelliklerinin, X 330 büyütmeyle olanak tanıyan optik mikroskop aracılığıyla belirlenmesine ilişkin çalışma anlatılmaktadır. Üç eksenli hücreden çıkartılan numunelerin yükseklik boyunca üç farklı yerinden örnekler alınmıştır. Bu örneklerden yaklaşık 1 cm³ hacminde blok alt örnekler hazırlanarak, optik mikroskopta incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemelerle alt örneklerin birbirine dik üç kesitinden farklı büyütmelelerde dijital mikrografikler

alınmıştır. Daha sonra bu görüntüler resim analiz programıyla taranmış ve önışlem tekniklerine tabi tutulmuştur.

Günümüzde araştırmacıların kullandığı bazı görüntü teknikleriyle, önışleme tabi tutulan mikrografiklerdeki danesel ve boşluklu yapılar ayırt edilmiştir. Sonrasında ince kum ve silt danelerinin sınırları ve oriyantasyonları “Dışbükey Kabuk” yöntemiyle belirlenmiştir. Görüntü analiz programı kullanılarak her bir mikrografiğe ait dane ve boşluk alanı, çevresi, merkez koordinatları, en uzun köşegeni, genişliği, yuvarlaklığı, dışbükey kabuğun köşegeninin yatayla yaptığı açı ölçülmüştür.

Genel olarak bu bölümde yapılan yapısal inceleme; kullanılan numunelerdeki konsolidasyon öncesi ve konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasındaki boşluklarda meydana gelen değışme, dane şekil ve oriyantasyonlarının durumu ve zeminin anizotropikliğinin belirlenmesini kapsamaktadır. Buna göre izotropik konsolidasyonla birlikte hem laboratuvarda hazırlanan örselenmiş ince kumlu ve killi silt numunelerde, hem de örselenmemiş killi silt numunelerde, kaba danelerarası büyük ve ince danelerarası küçük boşluklarda belirgin bir azalma sözkonusudur. Bu azalma, örselenmemiş zeminde daha fazladır. Laboratuvarda hazırlanan örselenmiş siltli numunede ise konsolidasyon öncesi porozite örselenmemiş numuneye göre daha büyüktür. Laboratuvarda nispeten daha üniform olarak hazırlanan toz numunelerin başlangıç boşluk oranlarının da daha fazla olması beklenir. Diğer yandan örselenmemiş numunede ise konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte heterojen boşluk çapı dağılımında artış belirlenmiştir.

Laboratuvar siltli numunelere ait görüntülerden çoğunlukla boşlukların birbiriyle bağlantılı olarak dağıldığı, örselenmemiş yumuşak siltli zeminde ise boşlukların, laboratuvarda hazırlanan siltli numuneye kıyasla daha rastgele bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çapları 0.1 mm’den büyük boşluklara rastlanmış, numune yüksekliği boyunca bu boşluklarda artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak yinede, plastisite indisi % 18 olan örselenmiş numunelerin konsolidasyon öncesi boşluk oranları, düşük frekanslı titreşimle sıkıştırmaya da bağılı olarak daha düşük hesaplanmıştır.

Bir başka sonuç ise tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli zeminden elde edilmiştir. Buna göre yükleme öncesinde her üç doğrultudan alınan görüntülerin

analizinden, büyük çaptaki boşlukların heterojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Tekrarlı yükleme de yeniden bir dane dağılımı ve yapısına sahip olan numunede, boşluk çaplarının da yeni yerleşime bağlı olarak değiştiği ve her üç düzlemde yapılan ölçümlerde bu çap değerlerinin birbirine yaklaştığı belirlenmiştir.

Aynı boşluk oranına sahip olan granüler zeminler, farklı yapıda olabilmektedirler. Bu yapı özelliği, bu tür zeminlerin dane şekline, dane dağılımına ve danelerarası temas noktalarına bağlı olmaktadır. Dolayısıyla danesel özelliklerin de belirtilmesi bu açıdan önem taşır. Danesel özelliklerin en yararlı ve kullanışlı biçimde belirlenmesi için çok sayıda görüntü ele alınmış, bu görüntülerden analizlerle belirli parametreler hesaplandıktan sonra bu parametrelerin çalışmada yapılan dinamik deneylerdeki değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu parametrelerin en önemlileri alan, yuvarlaklık, oriyantasyon açısı ve en uzun köşegen değerleridir.

Adapazarı örselenmemiş siltli numuneden alınan görüntülerde ortalama dane şeklinin birbirine dik üç kesitteki dağılımı birbirine yakındır. R oranı 1'e yakın olan dane sayısı % 50 dir. Böylece örselenmemiş zeminde kesme öncesi danelerin yaklaşık yuvarlak dağıldıkları söylenebilir. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasında yuvarlağa yakın danelerin dağılımında biraz azalma görülürken uzun doğrultularında belirli bir yönlenmeye sahip oldukları söylenebilir. Ancak tekrarlı yüklemede çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonuna uğrayan zeminde böyle bir dane şekli değişiminin olduğunu söylemek için daha fazla sayıda deneyden alınan blok ve ince kesitlere ve ilave elektron mikroskobu incelemesine ihtiyaç vardır.

Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli laboratuvar numunesine ait yatay ve düşey kesitte, silt daneleri belli bir bölgede toplanarak uzun doğrultuda yönlenmişlerdir. Z kesitinde ise silt danelerinin rastgele doğrultularda yönlendikleri belirlenmiştir.

Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesindeki duruma göre örselenmemiş yumuşak silt zemine ait 0.02-0.25 mm çap aralığındaki dane şekillerinde her üç doğrultuda da değişme olduğu söylenebilir. Yuvarlağa yakın daneler, X ve Z doğrultularında azalırken, Y doğrultusunda artmaktadır.

İzotropik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası laboratuvarda hazırlanan ve örselenmemiş zemin numunelerinde boşlukların çapı ve dağılımıyla, ince kum ve silt

dane oriyantasyonlarına ilave olarak anizotropik yapı özelliği de önem kazanmaktadır. Bu çalışmada anizotropi, öne sürülen bir bağıntıyla ve dijital mikrografiklere ait gri renk histogramlarının değişiminden belirlenmiştir. Buna göre laboratuvarında hazırlanan siltli zemin numunesinden alınan çok sayıda görüntüde anizotropinin değişmediği belirlenmiştir. Bunun yanında örselenmemiş numunelerde ise konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle anizotropide bir miktar artış olduğu söylenebilir.

Son olarak çok sayıda danenin analiziyle belirlenen bu sonuçlar bize ancak tahmini bir fikir vermekte, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası çift genlikli % 5 birim kayma genliğine ulaşan zemin numunesinde danelerin ve boşlukların şekil, boyut, dağılım ve oriyantasyonlarında meydana gelen değişimin belirlenmesi için kapsamlı ve detaylı bir araştırma gerekmektedir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada değişik plastisitelerdeki siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı, dinamik burulmalı kesme deney aletinde, farklı koşullarda yapılan dinamik ve statik deneylerle araştırılmıştır. Dinamik deneyler gerilme kontrollü, statik deneyler ise deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde içi boş silindirik zemin numuneleri kullanılmıştır. Laboratuvarında kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin iç yarıçapı $r_i = 3.0$ cm, dış yarıçapı $r_d = 5.0$ cm ve yüksekliği yaklaşık $H_i = 20.0$ cm dir. Örselenmemiş numunelerin ise iç yarıçapı $r_i = 1.5$ cm, dış yarıçapı $r_d = 3.5$ cm ve yüksekliği yaklaşık $H_i = 14.0$ cm dir. Deneylerde konsolidasyon basıncı olarak 100 kPa uygulanmıştır. İzotropik konsolidasyonun tamamlanmasının ardından dinamik deneylerde farklı kayma gerilmesi oranlarında zemin numuneleri göçmeye ulaşınca kadar yüklenmiş, numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncının değişimi deney boyunca izlenmiştir. Statik deneyler ise 0.35-0.50-0.75 mm/dk deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Bir doğrultuda sabit hızda uygulanan burulma momenti ile statik olarak yüklenen içi boş silindirik zemin numunelerinde akmanın meydana geldiği andaki kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında farklı türde deney serileri uygulanmıştır. Bunlar, laboratuvarında hazırlanan numunelerde ve araziden alınan örselenmemiş numunelerde yapılmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İstanbul Gümüşdere Köyü'nde açılan muayene çukurlarından alınan ve % 18 plastisite indisine sahip siltli kil numunesi kullanılarak yapılan statik ve dinamik deneyler ilk deney grubunu oluşturmaktadır.

Bu deney grubunun ilkinde, yükleme hızının statik mukavemetler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 0.35-0.50-0.75 mm/dk deformasyon hızlarında, laboratuvarında hazırlanan siltli kil numunelerde, zeminde göçme oluncaya kadar statik deneyler yapılmıştır. Sonuçlardan, artan deformasyon hızlarında yumuşak siltli kil zeminin drenajsız kayma mukavemetinin arttığı, boşluk suyu basınçlarının ise azaldığı belirlenmiştir.

Daha sonra seçilen bir yükleme hızında (0.50 mm/dk), statik deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, Gümüşdere numunesinin yanısıra, Adapazarı'ndaki muayene çukurlarından getirilen örselenmiş siltli zeminler de kullanılmıştır. Birim kayma deformasyonu seviyesi olarak % 10'u geçen deneylerde laboratuvar numunelerinin dinamik yükleme öncesi drenajsız statik mukavemetleri belirlenmiştir. Buna göre, plastisite indisi % 2 olan silt zeminin mukavemeti diğer numunelere göre belirgin bir biçimde daha büyüktür (42 kPa). Gümüşdere siltli kil numunesinin ise mukavemeti, % 33 ve % 11 plastisiteli siltli zemin numunelerine göre bir miktar daha fazla mukavemete sahiptir (28 kPa). Ayrıca diğer iki silt numunesinde ise % 33 plastisiteli plastik silt numunesinin mukavemeti (26 kPa), düşük plastisiteli silte göre daha fazla elde edilmiştir (20 kPa). Boşluk suyu basıncı oluşumları ise siltli zeminlerde plastisiteye de bağlı olarak azalmaktadır. Plastik silt zemin numunesinde kayma mukavemeti, siltli kile göre bir miktar daha düşük elde edilse de, boşluk suyu basınçları daha düşük seviyede kalmıştır. Genel olarak tüm laboratuvar numunelerinde, % 8 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar mukavemet eğrilerinde belli ölçüde değişim görülürken, % 10 birim kayma seviyesinden sonra boşluk suyu basınçları yaklaşık aynı nihai değere ulaşmaktadır (50 kPa).

Bir diğer deney serisinde konsolidasyon süresiyle birlikte numunelerde oluşması beklenen çimentolanmanın etkisi araştırılmıştır. Bu yüzden 3 gün ve 1 gün süreyle iki ayrı durumda, siltli kil numuneler izotropik konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolidasyonun ardından yapılan drenajsız dinamik deneylerde numunelerin dinamik mukavemetleri, tekrarlı gerilme oranı (τ_d/σ_c) ve çevrim sayısı (N) ilişkisi şeklinde belirlenmiştir. Buna göre, 3 gün süreyle konsolide edilen yumuşak siltli kil zeminin dinamik mukavemeti daha büyük elde edilmiştir. Böylelikle artan konsolidasyon süresiyle birlikte daha fazla miktarda sıkışan siltli kil zeminde suyun zemini terketmesiyle birlikte zamana bağlı olarak bir çimentolanma etkisi söz konusudur. Bu durum da dinamik mukavemeti artırmaktadır.

Yumuşak siltli kil zemin numunesi kullanılarak yapılan bir diğer deney serisinde ise dinamik yüklemeyi takiben numuneler statik olarak kesilmişlerdir. Göçme seviyesi olarak alınan çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine kadar yapılan deneylerde, zemin numunesinde N=20 çevrime karşı gelen tekrarlı gerilme oranı seviyesi belirlenmiştir (0.175). Sonra bu gerilme oranı sabit tutularak farklı çevrim sayılarında dinamik deneyler yapılmış, ardından drenajlar açılmadan 0.50 mm/dk hızında statik yüklemeye geçilmiştir. Kritik akma deformasyonu seviyesinden önceki düşük deformasyon mertebelerine kadar yapılan dinamik deneylerden

sonra zeminin statik mukavemetinde önemli bir değişme olmadığı görülmüştür. Ancak N=12 çevrimde çift genlikli % 1.5 kayma deformasyonu seviyesinden sonra, mukavemetlerin önemli ölçüde azaldığı göze çarpmıştır. Böylelikle yumuşak siltli kil zeminde kalıcı deformasyonların kritik akma deformasyonundan sonra oluştuğu belirlenmiş, statik mukavemetlerin ise zeminde göçme olmasa bile % 40 civarında azaldığı görülmüştür.

Laboratuvarda hazırlanan deney numunelerindeki diğer deneyler, Adapazarı'ndan getirilen siltli zeminler üzerinde yapılmıştır. Üç farklı plastisiteye sahip siltlerin dinamik mukavemetleri, farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan burulmalı kesme dinamik deneylerle belirlenmiştir. İzotropik olarak 100 kPa basınçta konsolide edilen siltli numunelere diğer tüm deneylerde olduğu gibi 0.1 Hz frekansında farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri uygulanmıştır. Deney sonuçları plastisitenin siltlerin dinamik mukavemetine etkisini ortaya koymaktadır. Buna göre plastisite arttıkça dinamik mukavemet artmaktadır. Ancak bu artış bu çalışmada yaklaşık % 10 plastisite indisi değerinden sonra gerçekleşmiştir. Plastisite indisi % 2 olan siltli numunenin dinamik mukavemeti, % 11 plastisiteli siltli numuneden az bir miktarla da olsa daha fazlayken, % 18 plastisiteli siltli kil zemine yakın elde edilmiştir. Bu durumun, kum miktarı da yüksek olan düşük plastisiteli silt zeminin danelerarası sürtünme mukavemetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca daha yüksek plastisiteli siltlere göre konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı da fazladır. Dolayısıyla başlangıç sıklığının deney sonuçları etkilediği de bir gerçektir.

Laboratuvarda hazırlanan numunelerde yapılan son deney serisinde ise % 2 ve % 11 plastisite indisine sahip silt numunelerine önce tekrarlı yükleme, numunede göçme seviyesi oluşuncaya kadar uygulanmış, ardından 0.50 mm/dk deformasyon hızında %10 birim kayma oluşuncaya kadar statik deney yapılmıştır. Sonuçlardan, dinamik deneylerde göçme seviyesine ulaşan siltli 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.

Bu çalışmada ikinci grup deneyler örselenmemiş numuneler kullanılarak yapılmıştır. Ortası dikkatlice oyulduktan sonra burulmalı kesme deneylerine tabi tutulan numunelerdeki ilk seri deneyde önce düşük deformasyonlarda belirli tekrarlı kayma gerilmesi oranında dinamik yükleme uygulanmış, numunenin kalıcı deformasyona uğramasına izin verilmeden ve drenajlar açılmadan 0.50 mm/dk hızında statik deneye geçilmiştir. Hem dinamik hem de statik

deneyde gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı-birim kayma deformasyonu ilişkileri elde edilmiştir. Sonuç olarak düşük deformasyolara uğrayan zeminde önemli bir mukavemet kaybı oluşmamaktadır.

İkinci deney serisinde ise içi boş, örselenmemiş numunelere göçme oluşuncaya kadar farklı gerilme genliklerinde tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Böylece doğal numunelerin mevcut yapısı bozulmadan ve örselenme olmadan tekrarlı yükler altındaki davranışları belirlenmiştir.

Örselenmemiş deneylerde dinamik mukavemetler, laboratuvar numunelerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Bunun yanında diğer deneylerde olduğu gibi sınırlı boşluk suyu basıncı artımlarında birim kaymalar hızla artarak zemin numunelerinde taşıma gücü kayıplarının oluşmasına neden olmuştur.

Deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler, tekrarlı gerilme seviyesi, birim kayma genliği, çevrim sayısı, kritik birim akma deformasyonu, plastisite indisi, ince dane miktarı, kuru birim hacim ağırlığı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı, deney sistemi, numune hazırlama yöntemi ve numune yapısı olarak belirlenmiştir.

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. Örselenmiş laboratuvar numunesinde ise plastisite indisi azaldıkça boşluk suyu basınçları artarken, efektif gerilmeler azalmaktadır. Böylelikle düşük plastisiteli siltte mukavemet kayıpları artan birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçlarına da bağlı olmaktadır.

Örselenmemiş zemin numunelerinde $\pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan dinamik deneylerde mukavemetin, laboratuvar numunelerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Boşluk suyu basınçları örselenmemiş numunelerde de çevrim sayıları arttıkça sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte birim kayma deformasyonları hızla artmakta, belirli bir kayma deformasyonundan sonra numunede kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, laboratuvarda hazırlanan örselenmiş siltli numunelerle, deney tüplerinden çıkarılan örselenmemiş yumuşak killi ve kumlu silt numunelerin izotropik konsolidasyon öncesi ve konsolidasyon ve yükleme sonrası yapısal değişimleri incelemiştir. İncelemede dijital kameralı yüzeysel ışık kaynağına sahip, X330'a kadar büyütme yapabilen

optik mikroskop kullanılmıştır. Görüntülerin alımı sırasında önceden hazırlanan blok numuneler mikroskop merceği altına yerleştirilip, odak uzaklığı mikroskop düzeneği aracılığıyla ayarlanmıştır. Dijital kamera aracılığıyla elde edilen görüntüler bilgisayara 640*480 piksel çözünürlükte iki boyutlu olarak aktararak, kamerada istenen netliğin sağlandığı bir anda dondurulup kaydedilmiştir.

Zemin yapısının belirlenmesi amacıyla tabii su muhtevasını koruyan örselenmemiş numunelerden hazırlanan farklı sayıdaki blok alt örneklerin temsili olarak incelemesi yapılan zeminin yapısal özelliklerini yansıttığı kabulüyle, araştırma farklı tekrarlı gerilme oranında yapılan deneylerle genişletilmiştir.

Mikrografik analizler neticesinde iki boyutlu görüntünün daneler ve boşluklu kısımları ayırt edilerek, her bir kısım için, alan, çevre, uzunluk, genişlik, çap, oriyantasyon, yuvarlaklık ölçümleri yapılmıştır.

Bu çalışmada, incelenen zeminlerin izotropik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası daneler ve boyutlarıyla, oriyantasyonlarında değişiklik olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Konsolidasyon sonrası zeminin boşluklarındaki azalma ve danelerin paralel ve yatay doğrultudaki oriyantasyonları araştırılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan siltli numunelerin oluşturduğu üniforma yakın izotropik yapı ile, örselenmemiş numunelerin doğada oluşturdukları anizotropik yapı karşılaştırılmıştır. Bu iki farklı zemine ait mikroyapının tekrarlı burulma momenti altında oluşan kayma deformasyonları etkisiyle uğradığı değişim belirlenmeye çalışılırken, özellikle silt ve ince kum boyutundaki danelerin, zeminin maruz kaldığı kayma deformasyonlarının bir göstergesi olup olmadığı araştırılmıştır.

Sonuçlarda, izotropik konsolidasyonla birlikte hem laboratuvarda hazırlanan örselenmiş ince kumlu ve killi silt numunelerde, hem de örselenmemiş killi silt numunelerde, kaba danelerarası büyük ve ince danelerarası küçük boşluklarda belirgin bir azalma olduğu belirlenmiştir. Bu azalma, örselenmemiş zeminde daha fazladır. Laboratuvarda hazırlanan örselenmiş siltli numunede ise konsolidasyon öncesi porozite, örselenmemiş numuneye göre daha büyüktür. Laboratuvar siltli numunelere ait görüntülerden çoğunlukla boşlukların birbiriyle bağlantılı olarak dağıldığı, örselenmemiş yumuşak siltli zeminde ise boşlukların, laboratuvarda hazırlanan siltli numuneye kıyasla daha rastgele bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çapları 0.1 mm'den büyük boşluklara rastlanmış, numune yüksekliği boyunca bu boşluklarda artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak yine de, plastisite indisi % 18

olan örselenmiş numunelerin konsolidasyon öncesi boşluk oranları, düşük frekanslı titreşimle sıkıştırmaya da bağlı olarak daha düşük hesaplanmıştır.

Bir başka sonuç ise tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli zeminden elde edilmiştir. Buna göre yükleme öncesinde her üç doğrultudan alınan görüntülerin analizinden, büyük çaptaki boşlukların heterojen bir dağılıma sahip olduğu g r lm şt r. Kum ve silt daneleri arasındaki bu boşluklarda tekrarlı yükleme de yeniden bir dane dağılımı ve yapısına sahip olan numunede, boşluk çaplarının da yeni yerleşime bağlı olarak değiştiği ve her üç düzlemde yapılan ölçümlerde bu çap değerlerinin birbirine yaklaştığı belirlenmiştir.

Adapazarı  rselenmemiş siltli numuneden alınan görüntülerde ortalama dane şeklinin birbirine dik üç kesitteki dağılımı birbirine yakındır. Böylece  rselenmemiş zeminde kesme öncesi danelerin yaklaşık yuvarlak dağıldıkları söylenebilir. Konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrasında yuvarlağa yakın danelerin dağılımında biraz azalma görülürken uzun doğrultularında belirli bir yönlenmeye sahip oldukları söylenebilir. Ancak tekrarlı yüklemede çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonuna uğrayan zeminde böyle bir dane şekli değişiminin olduğunu söylemek için daha fazla sayıda deneyden alınan blok ve ince kesitlere ve ilave elektron mikroskobu incelemesine ihtiyaç vardır.

 zotropik konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası laboratuvarda hazırlanan ve örselenmemiş zemin numunelerinde boşlukların çapı ve dağılımıyla, ince kum ve silt dane oriyantasyonlarına ilave olarak anizotropik yapı özelliği de önem kazanmaktadır. Bu çalışmada anizotropi,  ne sürülen bir bağıntı kullanılarak ve dijital mikrografiklere ait gri renk histogramlarının değişiminden belirlenmiştir. Buna göre laboratuvarda hazırlanan siltli zemin numunesinden alınan çok sayıda görüntüde anizotropinin değişmediği belirlenmiştir. Bunun yanında örselenmemiş numunelerde ise konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle anizotropide bir miktar artış olduğu söylenebilir.

Yapı incelemesinde çok sayıda görüntünün analiziyle belirlenen bu sonuçlar bize ancak tahmini bir fikir vermekte, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası çift genlikli % 5 birim kayma genliğine ulaşan zemin numunesinde danelerin ve boşlukların şekil, boyut, dağılım ve oriyantasyonlarında meydana gelen değişimin belirlenmesi için kapsamlı ve detaylı bir araştırma gerekmektedir.

Son olarak, bu çalışmada yapılan dinamik ve statik deneylerle siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranış özellikleri araştırılmış, numunelerin danesel ve boşluklu yapısı optik

mikroskop incelemeleri ve görüntü analizleriyle belirlenmeye çalışılmıştır. Bütün bu çalışmalar ileride yapılacak olan araştırmalarla ilerletilmeli, daha detaylı ve kapsamlı olarak ele alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Alhas, E.**, 1994. Siltli ve killi kumlarda sıvılaşma, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Altun, S.**, 2003. Burulmalı kesme deney aleti ile zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Amini, F. and Qi, G.Z.**, 2000. Liquefaction testing of stratified sity sands, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **126**, 208-217
- Ansal, A.M.**, 1981. Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1986. Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, *Deprem Araştırma Bülteni*, **50**, 10-53
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **115**, 968-983
- Anson, R.W.W. and Hawkins, A.B.**, 1999. Analysis of a sample containing a shear surface from a recent landslip, south Cotswolds, UK, *Geotechnique*, **49**, 33-41
- Bai, X. and Smart, P. and Leng, X.** 1994. Polarizing micro-photometric analysis, *Geotechnique*, **44**, 175-180
- Bai, X. and Smart, P.**, 1997. Change in microstructure of kaolin in consolidation and undrained shear, *Geotechnique*, **47**, 1009-1017
- Baykal, G.**, 2004. Kişisel görüşme.
- Bowman, E.T., Soga, K. and Drummond, W.**, 2001. Particle shape characterisation using Fourier descriptor analysis, *Geotechnique*, **51**, 545-554

- Bryant, R.G. and Davidson, D.A.,** 1996. The use of image analysis in the micromorphological study of old cultivated soils: an evaluation based on soils from the island of Papa Stour, Shetland, *Journal of Archaeological Science*, **23**, 811-822
- Casagrande, A.,** 1932. Research on the Atterberg limits of soils, *Public Roads*, **13**, 121-136
- Castro, G.,** 1969, Liquefaction of sands, *PhD Thesis*, Harvard University, Cambridge, Massachusettes.
- Castro, G., Keller, T.O. and Boynton, S.S.,** 1989, Re-evaluation of the lower San Fernando Dam-Report 1: Contract Report GL-89-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Castro, G., Poulos, S.J. France J.W. and Enos, J.L.,** 1982, Liquefaction induced by cyclic loading, Report By Geotechnical Engineers Inc. to the National Science Foundation, Washington D.C.
- Chang, N.Y.,** 1988. Liquefaction susceptibility of fine grained soils-preliminary study report, Misc. Paper, GL-87-24, *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS.
- Chang, N.Y.,** 1990. Influence of fines content and plasticity on earthquake induced soil liquefaction, Contract Report to *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS.
- Chaudhary, S.K., Kuwano J. Hashimoto S., Hayano Y. and Nakamura, Y.,** 2002. Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand, *Soils And Foundations*, **42**, 147-157
- Chen, Y.C., Ishibashi, I. and Jenkins, J.T.,** 1988. Dynamic shear modulus and fabric: part 1, depositional and induced anisotropy, *Geotechnique*, **38**, 25-32.
- Cotecchia, F., and Chandler, R.J,** 1997. The influence of structure on the pre-failure behavior of a natural clay, *Geotechnique*, **47**, 523-544
- Curray, J.R.,** 1956, Analysis of two dimensional orientation data, *J. Geol.*, **64**, 117-131.

- Czajkowski, R.L. and Vinson, T.S.,** 1980. Dynamic properties of frozen silt under cyclic loading, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **106**, 963-979
- Das, M.B.,** 1993. Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company. Boston.
- Das, M.B., Puri, V.K. and Prakash, S.** 1999, Liquefaction of silty soils, *Proceedings of Second Earthquake Geotechnical Eng. Int. Conf.* Lisbon, Portugal, 619-623
- Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F.,** 1996, Void ratio evolution inside shera bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Geotechnique*, **46**, 529-546.
- Dickson, J.W., Smart, P., Emerson, W.W. and Bond, R.D.,** 1978. Modification of soil structure, *Proc. Meet. Comm. Int. Soil Sci. Soc.*, Adelaide, 53-57.
- Dyvik, R.,** 1981. Strain and pore pressure behavior of fine grained soils subjected to cyclic shear loading, *PhD Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, UMI, Ann Arbor.
- Dudoignon, P., Pantet, A., Carrara, L. and Velde, B.,** 2001. Macro-micro measurement of particle arrangement in sheared kaolinitic matrices, *Geotechnique*, **51**, 493-499
- Dudoignon, P. and Pantet, A.,** 1998. Measurement and cartography of clay matrix orientations by image analysis and grey level diagram decomposition, *Clay Miner.* **33**, 629-642.
- El Hosri, M.S., Biarez, H. and Hicher, P.Y.,** 1984, Liquefaction characteristics of silty clay, *Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng.*, Prentice Hall, NJ, 277-284.
- Eriş, İ. ve Vardar, M.,** 2003. İstanbul Sarıyer Gümüşdere Köyü, Bağlar Mevkii 1 pafta, 58 parsel alanı jeolojik ve jeoteknik rapor, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul.
- Erken, A.,** 1982. Killerin dinamik özellikleri üzerine frekansın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

- Erken, A. and Ansal, A.M.**, 1994. Liquefaction characteristics of undisturbed sands, *Performance of Ground And Soil Structures, Thirteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Foundation Engineering*, 165-170.
- Erken, A.**, 2001. The role of geotechnical factors on observed damage in Adapazari, *Proceedings of Fifteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering Sat. Conf. On Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes*, İstanbul, Turkey, 29-32
- Erten, D. and Maher, M.H.**, 1995. Cyclic undrained behavior of silty sand, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering.*, **14**, 115-123
- Finn, W.D.L.**, 1982a, Dynamic analysis and liquefaction-emerging trends, *Proc. Third Int. Earth. Micr. Conf.*, Seattle, Washington, 909-929.
- Guo, T. and Prakash, S.**, 1999. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **125**, 706-710
- Hoeg, K. Dyvik R. and Sandbaekken, G.**, 2000. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **126**, 606-617
- Hong, W.P. and Lade, P.V.**, 1989. Elasto-plastic behavior of K_0 -Consolidated Clay in torsion shear tests, *Soils And Foundations*, **29**, 127-140
- Hong, W.P. and Lade, P.V.**, 1989. Strain increment and stress directions in torsion shear tests, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **115**, 1388-1401
- Hussein, A.K.**, 1995. Undrained cyclic behavior of nonplastic silt, *PhD Thesis*, Cornell University, UMI, Ann Arbor.
- Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Yamamoto, Y., and Teruhisa, F.**, 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils And Foundations*, **39**, 45-58
- Ishihara, K. and Yasuda, S.**, 1975. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, *Soils And Foundations*, **15**, 45-59.
- Ishihara, K., Sodekawa, M. ve Tanaka, Y.**, 1978. Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing fines, *Dynamic Geotechnical Testing*, **654**, 246-264.

- Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y., and Takahashi, Y.,** 1980. Cyclic strength characteristics of tailings materials, *Soils And Foundations*, **20**, 127-142.
- Ishihara, K., Yasuda, S., Yokota, K.,** 1981. Cyclic strength of undisturbed mine tailings, *Proc. Int. Conf. On Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, 53-58
- Ishihara, K.,** 1995. Earthquake Geotechnical Engineering. Proc. of IS-Tokyo'95 The First Int. Conf. On Earth. Geo. Eng., Rotterdam Balkema
- Ishihara, K.,** 1996. Soil Behavior of Earthquake Geotechnics. Clarendon Press, Oxford.
- Kaufman, L.P.,** 1981. Percentage silt content in sands and its effects on liquefaction potential, *M.S. Thesis*, University of Colorado, Denver
- Kaya, Z., Irisawa, T. ve Erken, A.,** 2002. Adapazarı zeminlerinin dinamik davranışı, *IX. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, AÜ, Eskişehir, 21-22 Ekim, s. 220-226.
- Khosla, V.,** 1985. Advances in the art of testing soils under cyclic conditions. ASCE Proceedings of A Session Sponsored By Geo. Eng. Div., Michigan
- Koester, J.P. ve Tsuchida, T.,** 1988. Earthquake induced liquefaction of fine grained soils: some considerations from Japanese research, *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS.
- Koester, J.P.,** 1992. Cyclic strength and pore pressure generation characteristics of fine-grained soils, *PhD Thesis*, University of Colorado at Boulder, UMI, Ann Arbor.
- Kondoh, M., Sasaki, Y. and Matsumoto, H.** 1987. Effects of fines contents on soil liquefaction strength, *Proceedings Annual Meeting of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tsukuba, Japan.
- Konrad, J.M. and Wagg, B.T.,** 1993. Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **119**, 929-947

- Kuganenthira, N. Zhao, D. and Anandarajah, A.,** 1996. Measurement of fabric anisotropy in triaxial shearing, *Geotechnique*, **46**, 657-670
- Kuo, C.Y., Frost, J.D., and Chameau, J.L.A.,** 1998. Image analysis determination of stereology based fabric tensors, *Geotechnique*, **48**, 515-525
- La Gatta, D.P,** 1970. Residual strength of clays and clay shales, for rotation shear tests, *PhD Thesis*, Harvard University, Cambridge, MA.
- Lade, P.V. and Yamamuro, J.A.,** 1997. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands, *Canadian Geotech. J.*, **34**, 918-928
- Lee, K.L. and Focht, J.A.,** 1975. Strength of clay subjected to cyclic loading, *Marine Geotechnology*, **1**, 165-185.
- Lee, X. and Dass, W.C.,** 1993. An experimental study of granular packing structure changes under load, *Powders And Grains*, **93**, 17-22.
- Lefebvre, G. and Pfendler P.,** 1996. Strain rate and preshear effects in cyclic resistance of soft clay, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **122**, 21-26
- Liu, H.C.,** 1992. Liquefaction resistance of soils containing fines, *PhD Thesis*, University of Colorado.
- Luo, D., Macleod, J.E.S, and Smart, P.,** 1992. Automatic orientation analysis of particles of soil microstructures, *Geotechnique*, **42**, 97-107
- Luo, D., Leng, X., Xue, X., Henderson, A.E., Cowan, J., Macleod, J.E.S. and Smart, P.** 1997. Recent studies in geotechnical image analysis *Proceedings of Second Int. Conf. On Imaging Technologies; Techniques and Applications in Civil Eng.*, Davos, 56-65
- Marcuson, W. F., Hynes, M.E. and Franklin, A.G.,** 1990. Evaluation and use of residual strength in seismic safety analysis of embankments, *Earthquake Spectra*, **6**, 529-572.
- Matsui, T. Ohara, H. and Ito, T.,** 1980. Cyclic stress strain history and shear characteristics of clay, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **106**, 1101-1120

- Mirghasemi, A.A., Rothenburg, L. and Matyas, E.L.**, 2002. Influence of particle shape on engineering properties of assemblies of two-dimensional polygon shaped particles, *Geotechnique*, **52**, 209-217
- Mitchell, J.**, 1976. Fundamentals of Soil Behavior. New York, Wiley.
- Mullilis, P.J., Seed, H.B., Chan, C., Mitchell, K.J. and Arulanandan, K.**, 1977, Effect of sample preparation on sand liquefaction, *Journal of the Geot. Eng. Div.*, **103**, 91-109.
- Nouguier-Lehon, C., Cambou, B. and Vincens, E.**, 2003. Influence of particle shape and angularity on the behavior of granular materials: a numerical analysis, *International Journal For Numerical And Analytical Methods in Geomechanics*, **27**, 1207-1226
- Oda, M., Nemat-Nasser, S. and Konish, J.**, 1985. Stress induced anisotropy in granular masses, *Soils and Foundations*, **25**, 85-97.
- Oda, M. and Kazama, H.**, 1998. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique*, **48**, 465-481
- Önalp, A., Sert, S. ve Bol, E.** 2000. Adapazarı zeminlerinin deprem performansı, *VIII. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, İ.T.Ü., İstanbul, 26-27 Ekim, s. 375-382.
- Özay, R. ve Erken, A.**, 2002. Killerde dinamik yüklemenin hacim değişimine etkisi, *IX. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, AÜ, Eskişehir, 21-22 Ekim, s. 342-348.
- Özay, R.**, 2002. Örselenmemiş killi zeminlerin statik mukavemetine deprem yüklerinin etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Pan, Y.W., and Dong, J.J.**, 1999. A micromechanics-based methodology for evaluating the fabric of granular material, *Geotechnique*, **49**, 761-775
- Poulos, S.J.**, 1981. The steady state of deformation, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **107**, 553-562.
- Poulos, S.J., Castro, G. and France, J.W.**, 1985. Liquefaction evaluation procedure, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **111**, 772-792.

- Polito, C.P. and Martin, J.R.,** 2001. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **127**, 408-415
- Prakash, S. and Sandoval, J.A.,** 1992. Liquefaction of low plasticity silts, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering.*, **11**, 373-379
- Puri, V.K.,** 1984. Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Ramanujam, N., Holish, L.L. and Chen, W.H.,** 1978. Post earthquake stability analysis of earth dams, *Proc. Earthquake Eng. And Soil Dynamics, ASCE Specialty Conf.*, Pasadena, USA, 762-776.
- Rothenburg, L. and Bathurst, R.J.,** 1992. Micromechanical features of granular assemblies with planar elliptical particles, *Geotechnique*, **42**, 79-95.
- Salgado, R., Bandini, P. and Karim, A.,** 2000. Shear strength and stiffness of silty sand, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **126**, 451-462
- Sandoval, S.J.A.,** 1989. Liquefaction an settlement characteristics of silt soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Santamarina, C. and Cascante, G.,** 1998, Effect of surface roughness on wave propogation parameters, *Geotechnique*, **48**, 129-136.
- Sayao, A. and Vaid, Y.P.,** 1999. A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens, *Soils And Foundations*, **31**, 60-72
- Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F. and Banerjee, N.,** 1975. Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses. Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Martin, P.P. and Lysmer J.,** 1976. Pore water pressure changes during liquefaction, *J. of Soil Mechanics And Foundation Eng. Div.*, ASCE, **102**, 323-347.
- Seed, H.B., Seed, R.B., Harder, L.F. and Jong, H.L.,** 1989, Re-evaluation of the lower San Fernando Dam, Report-2: Examination of the post

earthquake slide of Feb. 9, 1971, Contract Report GL-89-2, US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Shahnazari, H. and Towhata, I., 2002. Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationship of sand, *Soils And Foundations*, **42**, 105-119

Sherif, M.A., Tien, Y.B. and Pan, Y.W., 1983. Liquefaction potential of silty sand, Soil Engineering Research Report No. 26, University of Washington College of Engineering, Seattle, Washington.

Smart, P. and Dickson, J.W. and Easterling, K.E., 1979. Mechanisms of deformation and fracture, *Proceedings of Interdisciplinary Conf.* , Lulea, Oxford, 129-134

Smart, P., 1967. Particle arrangements in kaolin, *Proceedings of Fifteenth Conf. On Clays And Clay Minerals*, Pittsburgh, Pennsylvania, 241-254

Smart, P., 1985. Optical microscopy in geotechnical engineering, Presentation at Seventh Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Paris, pp.9.

Smart, P. and Leng, X. 1990. Image analysis by transputer. *Proceedings of Second Int. Conf. On Applications of Transputers*, Southampton. IOS Press, Amsterdam, 240-247

Smart, P. and Leng, X. 1993. Present developments in image analysis, *Scanning Microscopy*, **7**, 5-16.

Smart, P., Leng, X. and Bai, X., 1992. Image analysis of soil microstructure, *In Geotechnique et Informatique: Colloque Int..*

Smart, P., 1966. Optical microscopy and soil structure, *Nature*, **210**

Smart, P., 2004. Kişisel görüşme.

Tatsuoka, F., Muramatsu M. and Sasaki T., 1982. Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils And Foundations*, **22**, 55-70

Tatsuoka, F., Ochi K. Fujii S., and Okamoto, M., 1986. Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils And Foundations*, **26**, 23-41

- Tatsuoka, F., Sonoda S., Hara, K., Fukushima, S. and Pradhan T.B.S., 1986.** Failure and deformation of sand in torsional shear, *Soils And Foundations*, **26**, 79-97
- Terauchi, T., Altun, S., Erken, A. ve Yasuda, S., 1998.** Burulmalı dinamik deney sistemiyle sıvılaşma deneyleri, *VII. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, YTÜ, İstanbul, 22-23 Ekim, s. 584-590.
- Terzaghi, K, Peck, R.B., 1948.** Soil mechanics in engineering practice, John-Wiley And Sons.
- Thevanayagam, S. and Martin, G.R., 2002.** Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering.*, **22**, 1035-1042
- Tovey, N.K., Smart, P. and Hounslow, M.W., 1988.** *Proceedings Eight Int. Working Meeting. On Soil Micromorphology*, San Antonio, TExas, 82-89
- Troncoso, J.H. and Verdugo, R., 1985.** Silt content and dynamic behavior of tailing sands, *Proceedings of Twelfth Int. Conf. On Soil Mechanics And Foundation Engineering*, San Francisco, USA, pp.1311-1314.
- Troncoso, J.H., 1990.** Failure risks of abandoned tailings dams, *Proceedings Int. Sym. On Safety And Rehabilitation of Tailings Dams*, Int. Commision on Large Dams, Paris, 82-89
- Usaborisut, P., Koike, M., Bahalayodhin, B., Niyamapa, T. and Yoda, A., 2001.** Cyclic torsional shear loading test for an unsaturated, hollowed specimen using Bangkok clayey soil, *Journal of Terramechanics*, **38**, 71-87
- Ülker, R.A., 1973.** Buzul killerinin geoteknik özellikleri, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ülker, R.A., 2004.** Kişisel görüşme.
- Vaid, Y.P., Sivathayalan, S. and Stedman, D., 1999.** Influence of specimen reconstituting method on the undrained response of sand, *Geotechnical Testing Journal*, **22**, 187-195

- Vasquez-Herrera, A. and Dobry, R.,** 1989, Re-evaluation of the lower San Fernando Dam, Report-3: The behavior of undrained contractive sand and its effect on seismic liquefaction flow failures of earth structures, Contract Report GL-89-2, US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Vogel, H.J,** 1997. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections, *European Journal of Soil Science*, **48**, 365-377
- Vucetic, M.,** 1994. Cyclic threshold shear strains in soils, *Journal of The Geotechnical Engineering*, **120**, 2208-2227
- Wagg, B.T.,** 1990. Undrained behavior of clay-silt mixtures during cyclic loading, *PhD Thesis*, University of Waterloo, UMI, Ann Arbor.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.** 1997b. Static liquefaction of very loose sands, *Canadian Geotech. J.*, **34**, 905-917
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.** 1998. Steady state concept and static liquefaction of silty sands, *J. of Geot. And Geoenv. Eng.*, **124**, 868-877
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.** 1999. Experiments and modelling of silty sands susceptible to soil liquefaction, *Mech. of Cohesive-Frictional Mat.*, **4**, 545-564
- Yamamuro, J.A. and Covert, K.M.,** 2001. Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **127**, 314-324
- Yoshimine, M., Özay R., Sezen A. and Ansal, A.M.,** 1999. Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus, *Soils And Foundations*, **39**, 131-136
- Youd, T.L.,** 1977, Packing changes and liquefaction susceptibility, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **103**, 918-922
- Zhu, R. and Law, K.T.,** 1988, Liquefaction potential of silt, *Proceedings of Ninth Int. Conf. On Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, pp.237-242.

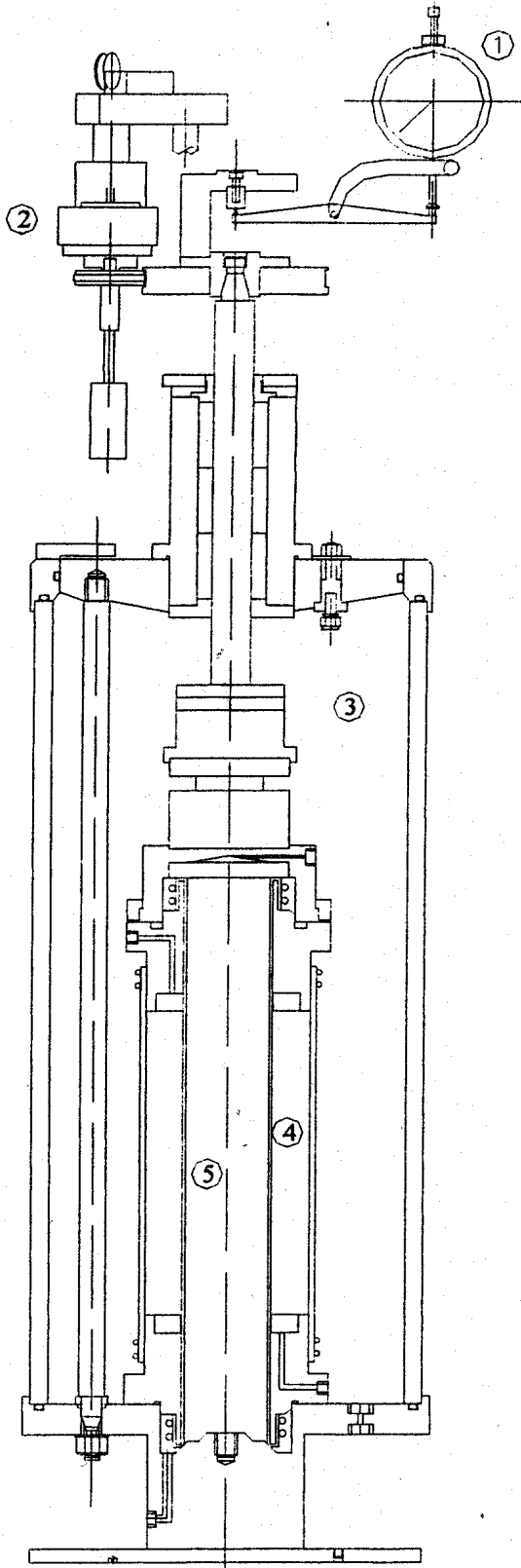
EKLER

EK A. KULLANILAN DENEY ALETİNİN BÖLÜMLERİ

EK B. YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ

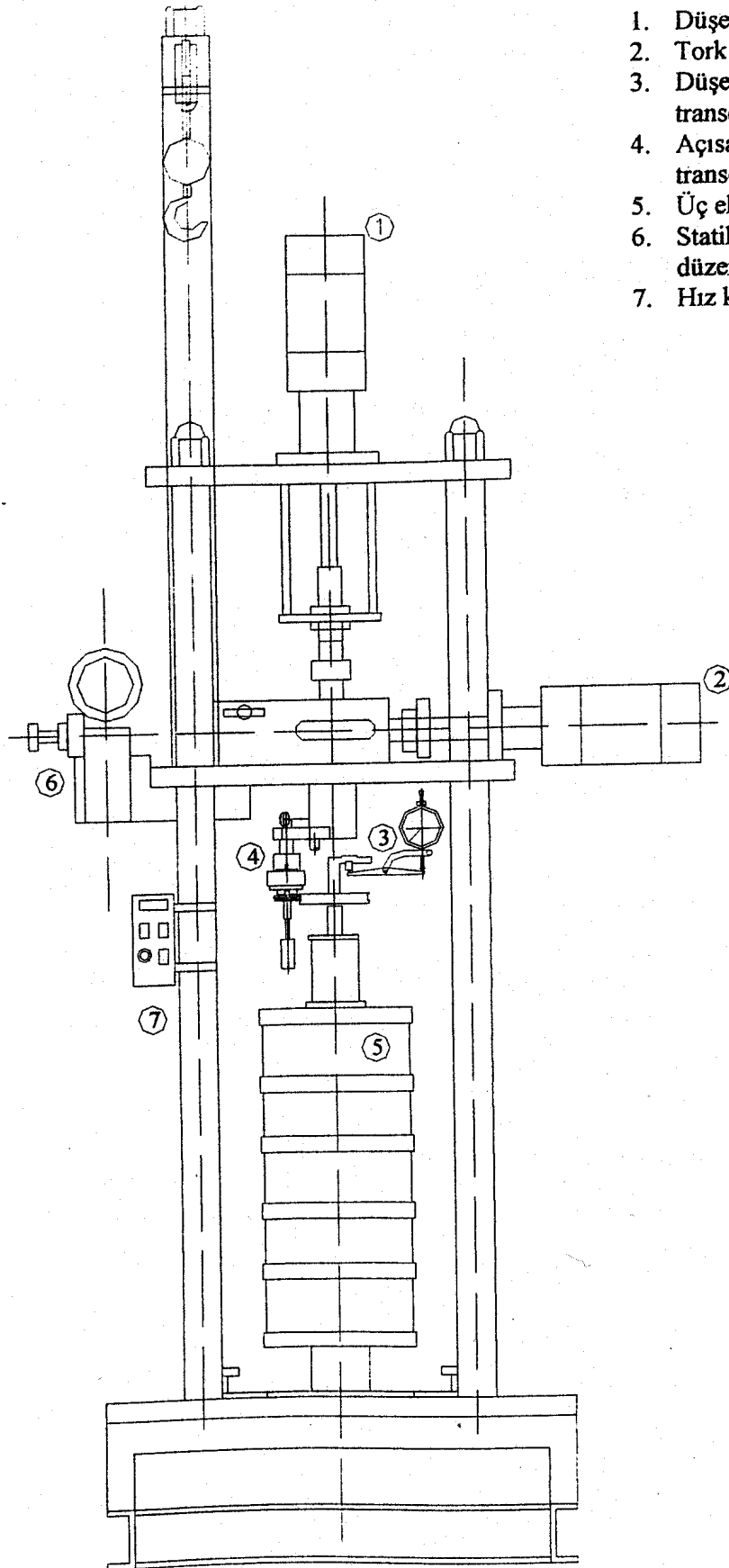
EK C. İNCELEMEDE KULLANILAN NUMUNELER VE OPTİK MİKROSKOP GÖRÜNTÜLERİ

EK A. KULLANILAN DENEY ALETİNİN BÖLÜMLERİ



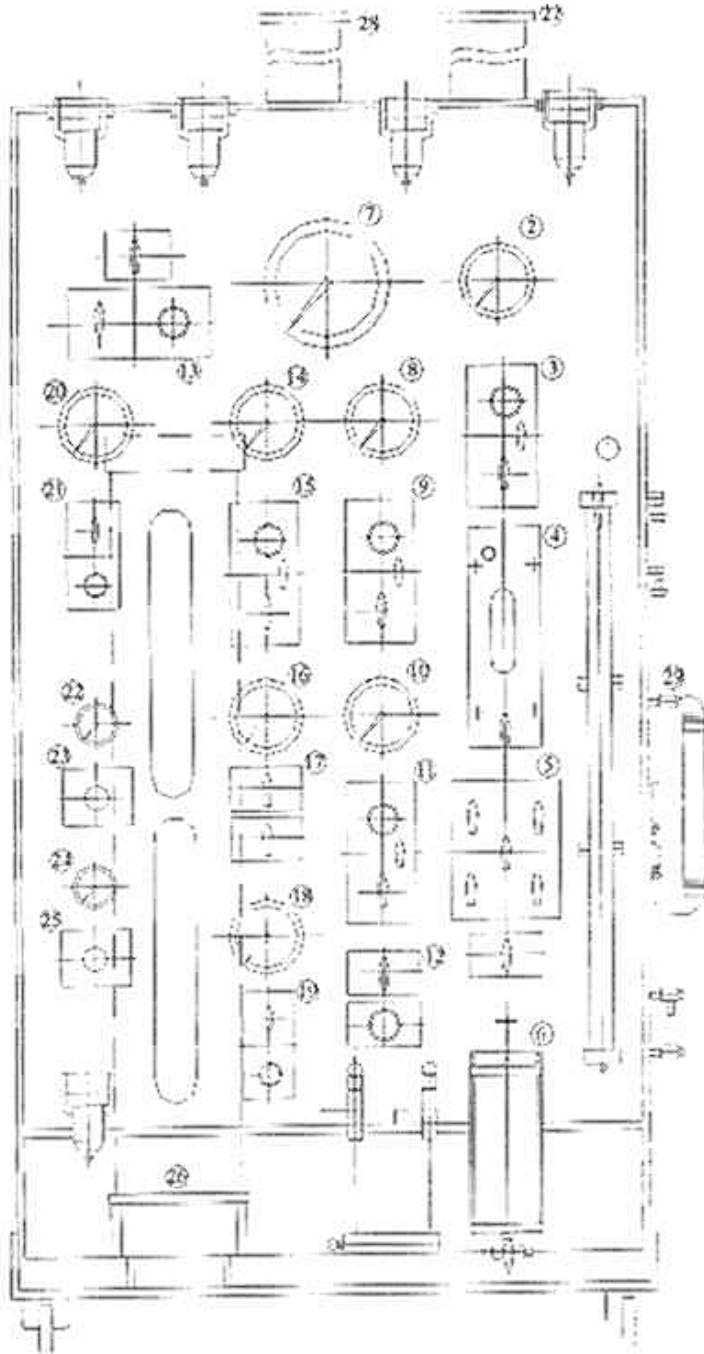
1. Düşey yer değiştirme transdüseri
2. Açısal yer değiştirme transdüseri
3. Hücre içi dış kısım
4. Numune
5. Numune içi boş kısım

Şekil A1 Burulmalı kesme deney aletinde numune düşey kesiti ve ölçüm saatleri



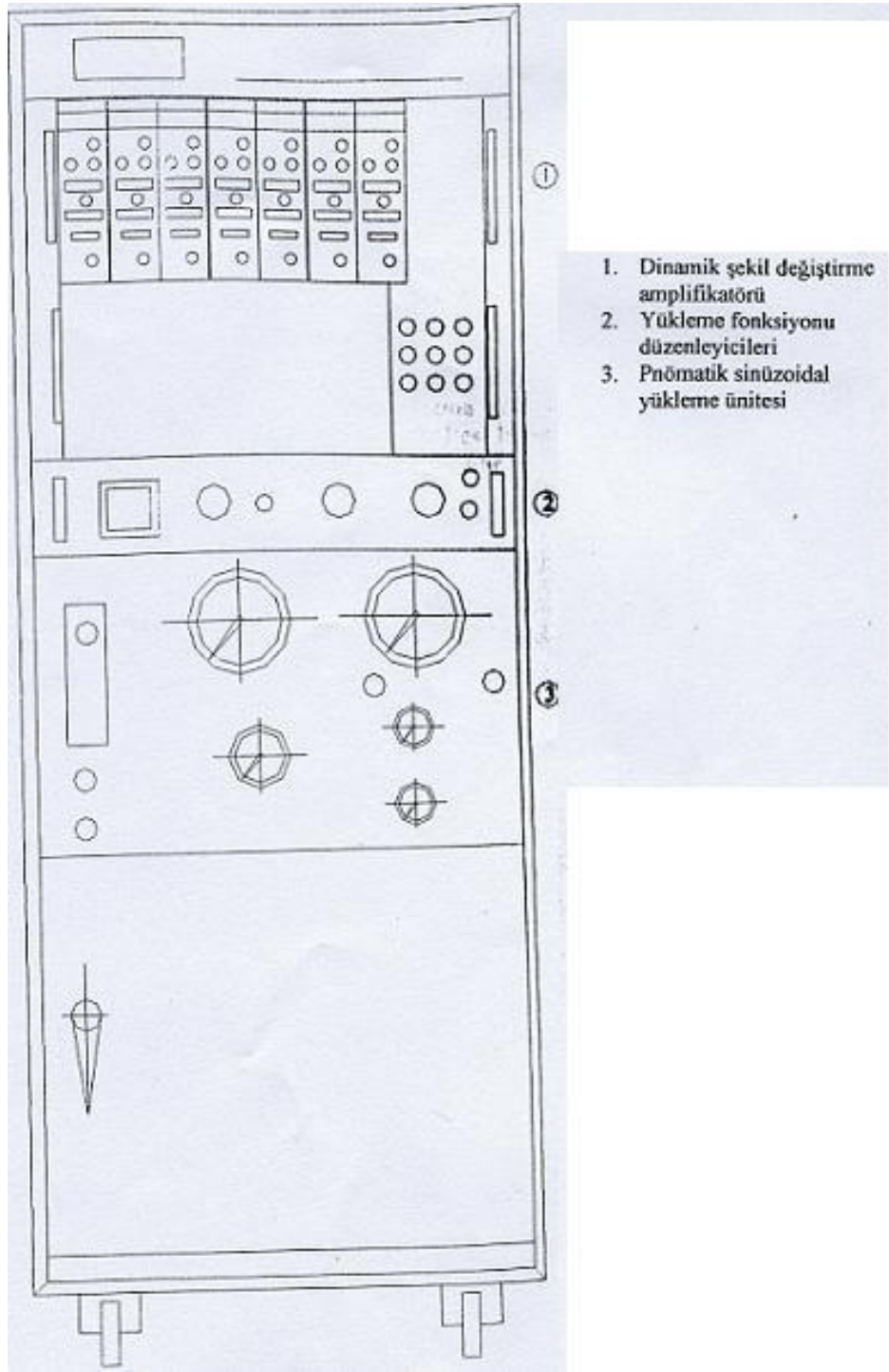
1. Düşey yükleme uygulayıcısı
2. Tork yükleme uygulayıcısı
3. Düşey yer değiştirme transdüseri
4. Açısal yer değiştirme transdüseri
5. Üç eksenli hücre
6. Statik yükleme için mekanik düzenek
7. Hız kontrol düzeneği

Şekil A2 Burulmalı kesme deney aletinde numunenin yerleştirildiği hücre ve yükleme düzenekleri



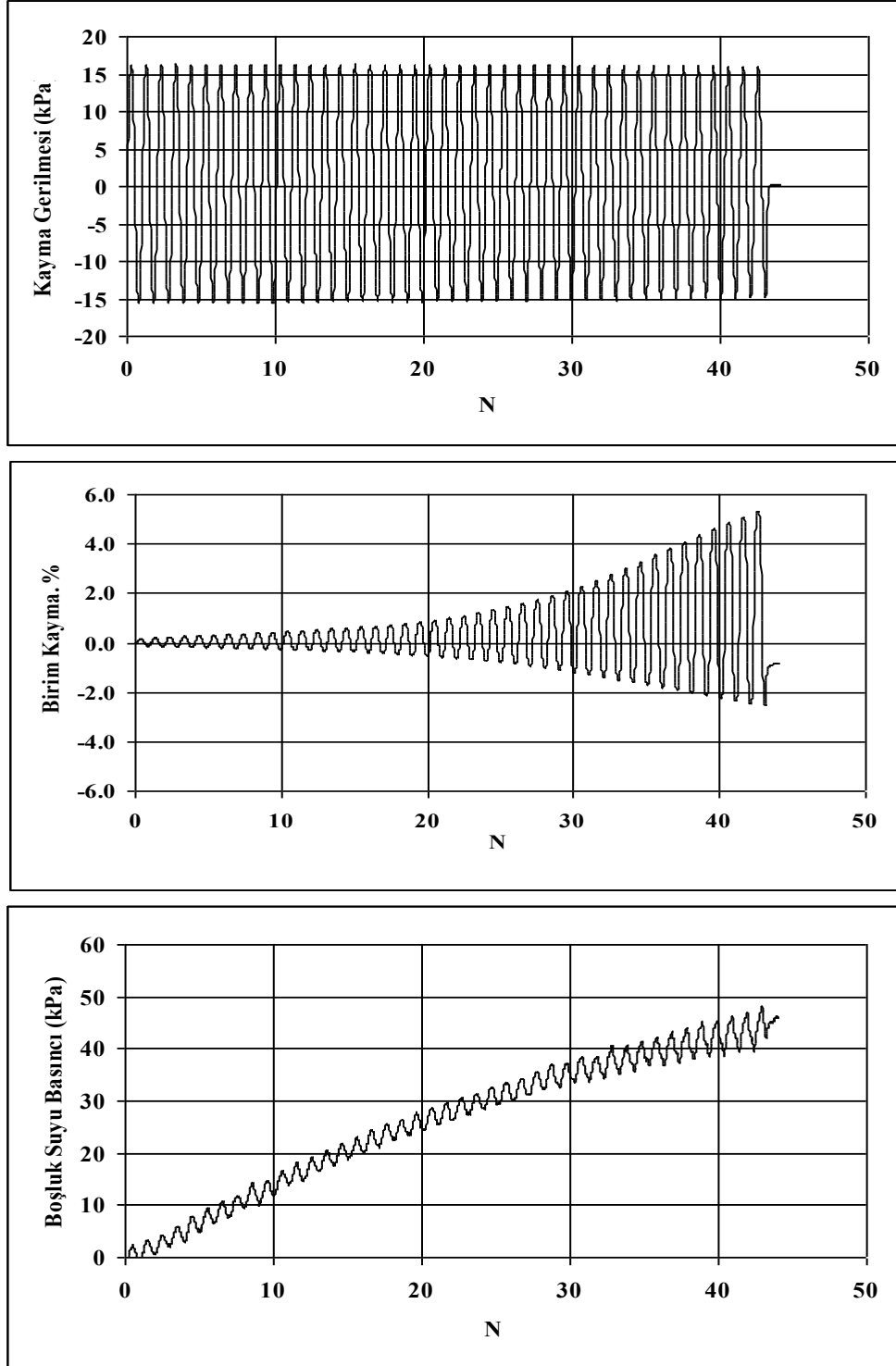
1. İki tüplü büret, 100 ml.
2. Ters basınç komperatörü
3. Ters basınç uygulama ünitesi
4. Ters basınç tankı, 1.5 l.
5. Numune basıncı düzenleme birimi
6. Düşük ters basınç tankı
7. Ana komperatör
8. Dış çevre basınç komperatörü
9. Dış çevre basınç uygulama ünitesi
10. İç çevre basınç komperatörü
11. İç çevre basınç uygulama ünitesi
12. Vakum regülatörü
13. Basınç oranı düzenleme ünitesi
14. Düşey basınç komperatörü
15. Düşey basınç uygulama ünitesi
16. Vakum komperatörü
17. Vakum düzenleme ünitesi
18. Su sağlama basınç komperatörü
19. Çevre basıncı için su sağlama düzenleme ünitesi
20. Denge basıncı komperatörü
21. Denge Basıncı düzenleme ünitesi
22. Hava kaydırma komperatörü
23. Hava kaydırma regülatörü
24. Ana basınç komperatörü
25. Ana basınç regülatörü
26. Su tankı, 10.0 l.
27. Havası alınmış su tankı, 5.0 l.
28. Vakum tankı, 5.0 l.
29. Hava tahancası

Şekil A3 Hava ve su basınçlarının ayarlandığı bölümdeki vana ve göstergeler

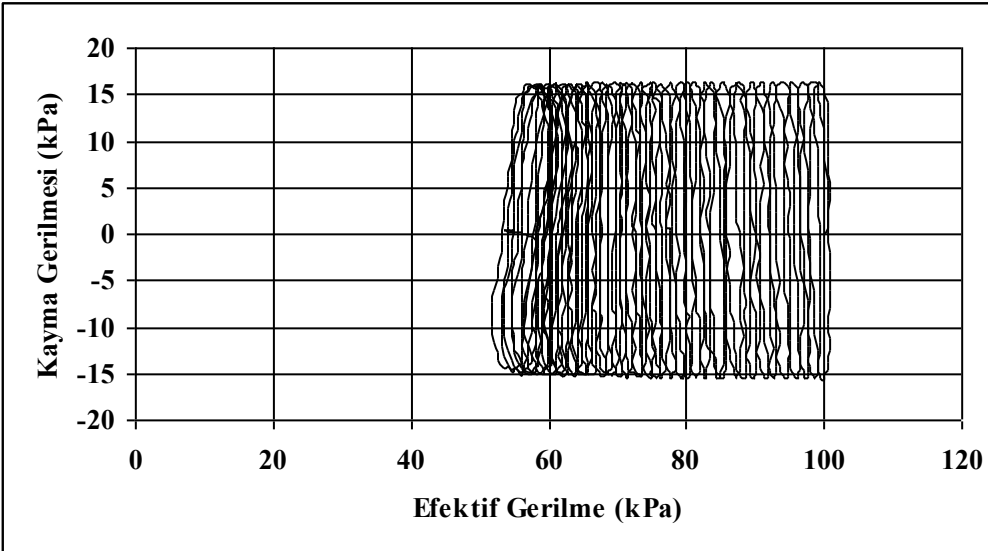
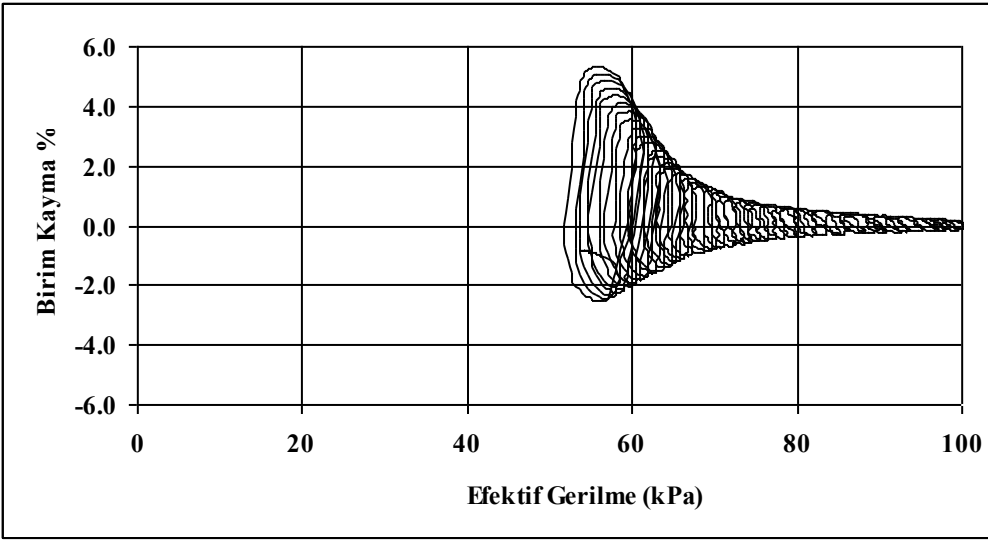
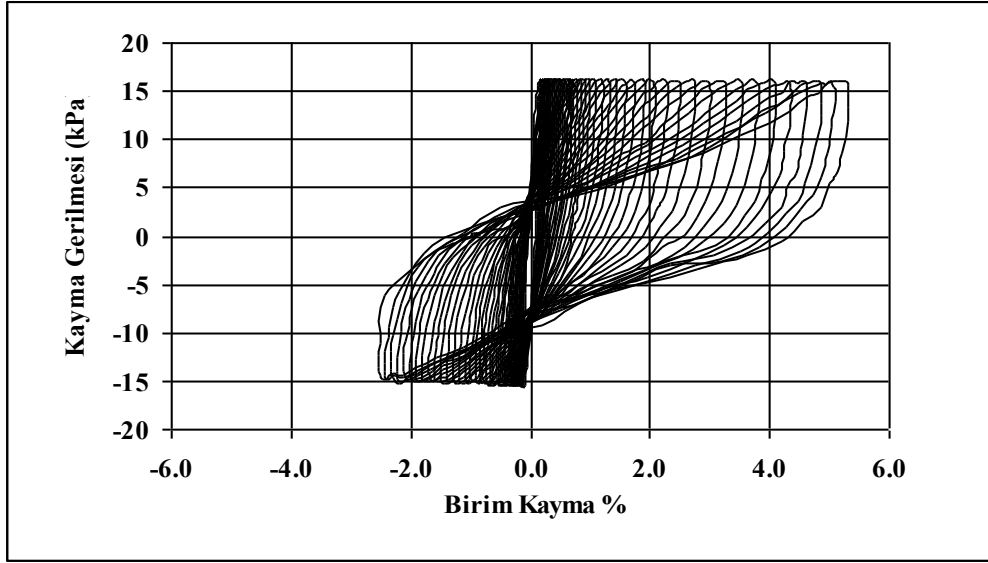


Şekil A4 Dinamik yüklemeye ait frekans ve genliklerin ayarlandığı ve deney parametrelerinin ölçüldüğü bölüm

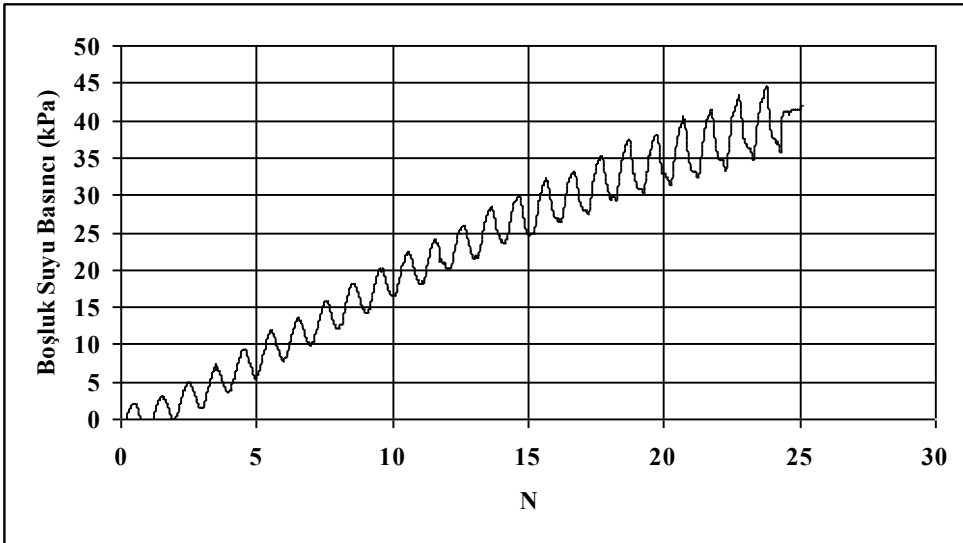
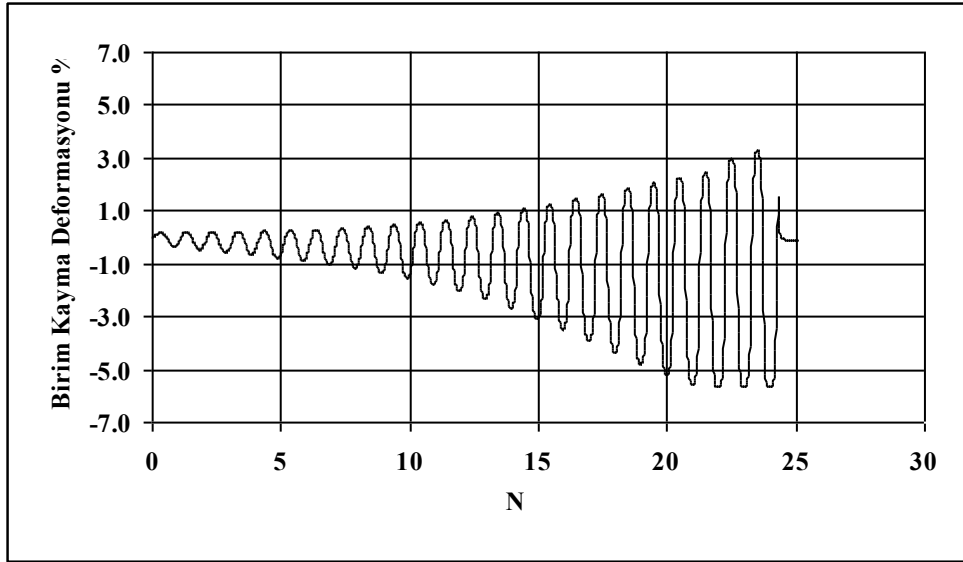
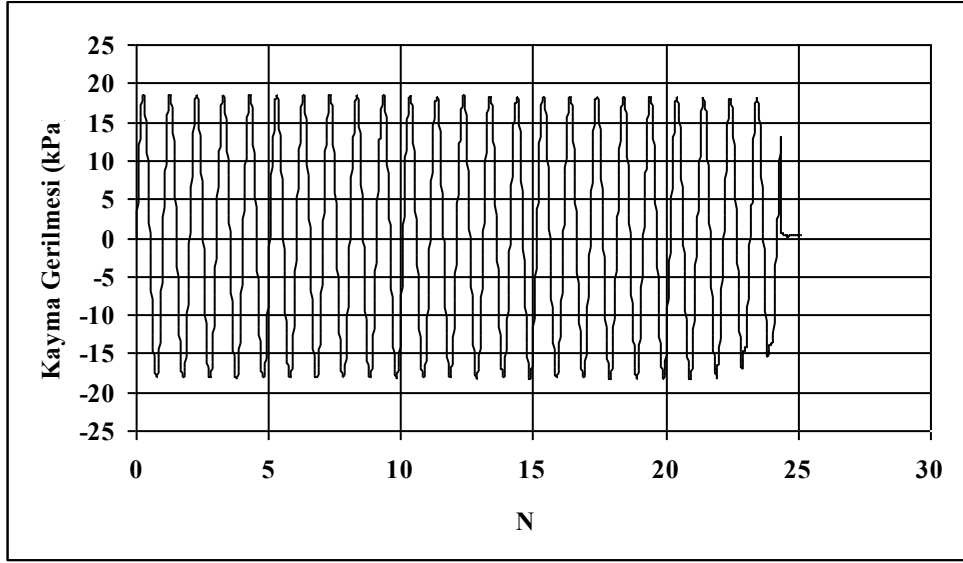
EK B. YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ



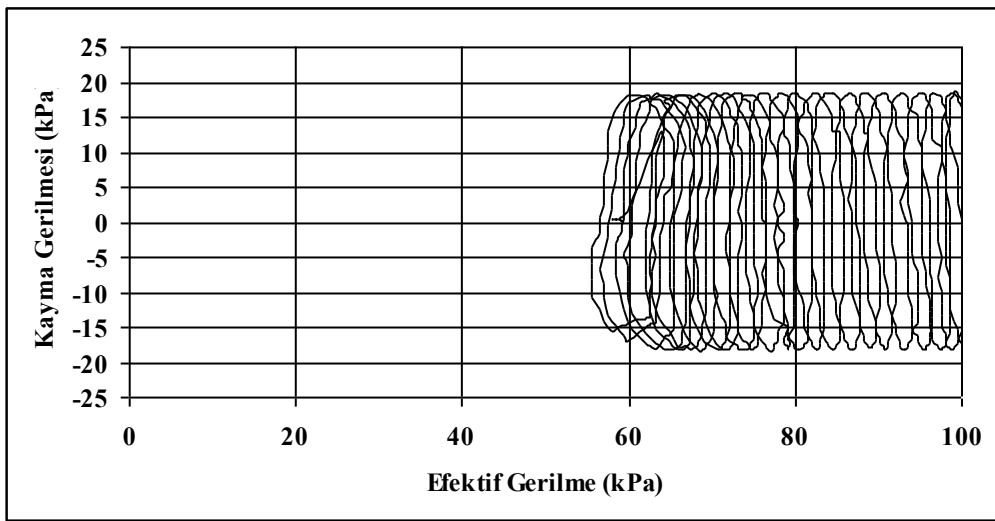
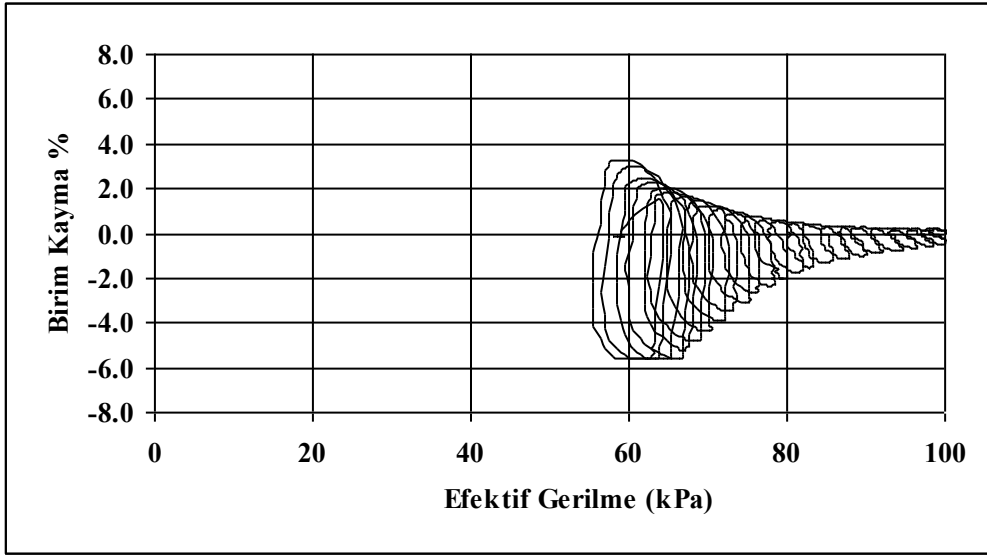
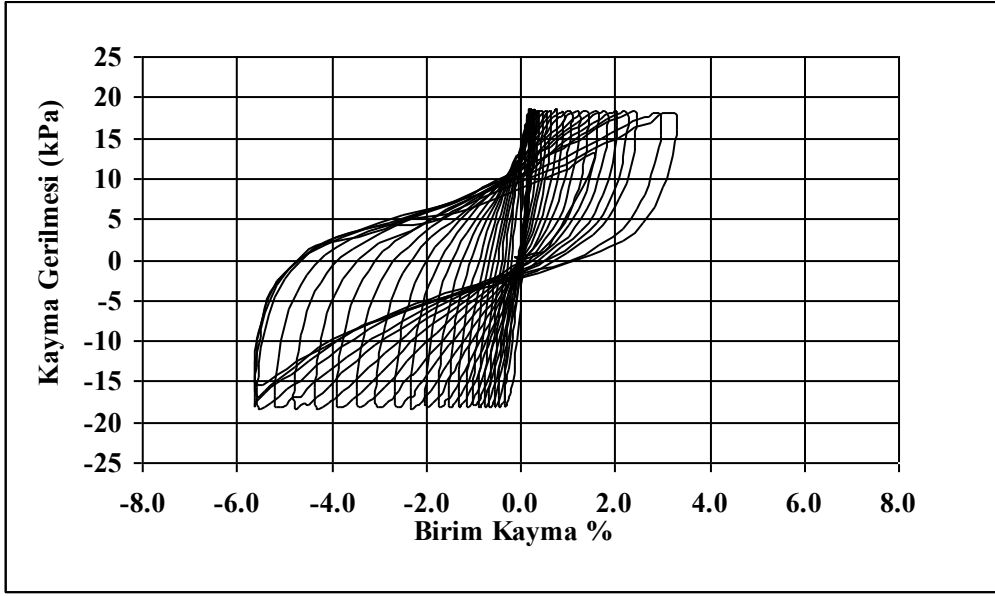
Şekil B1 DG1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



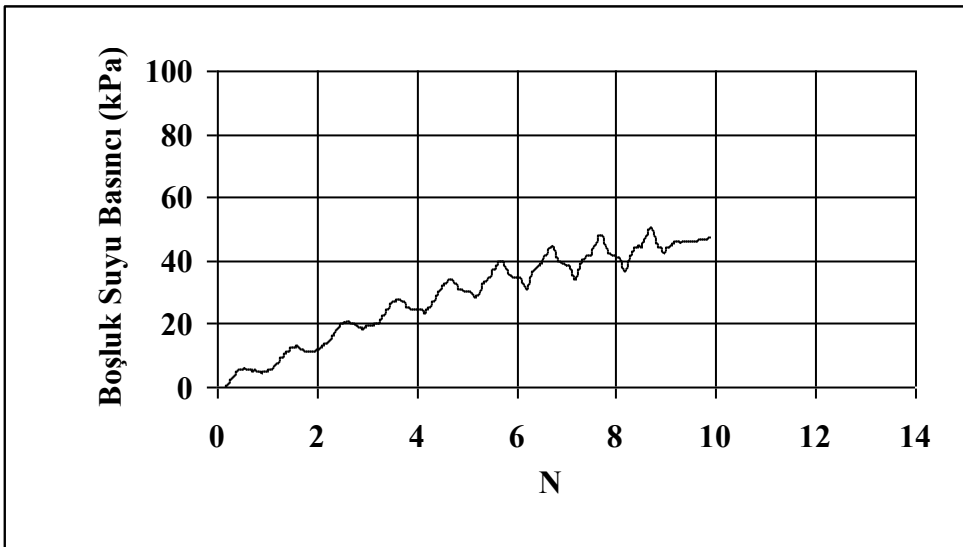
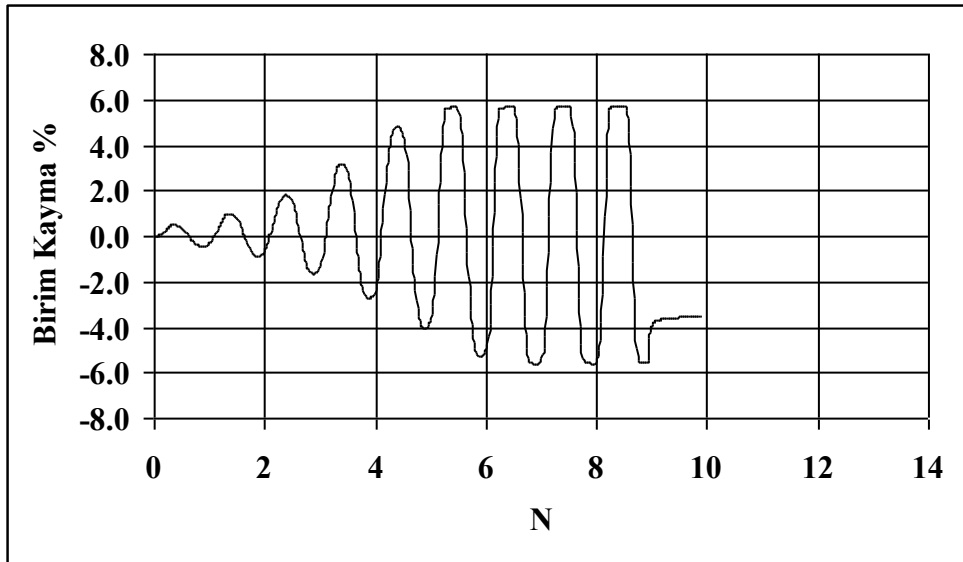
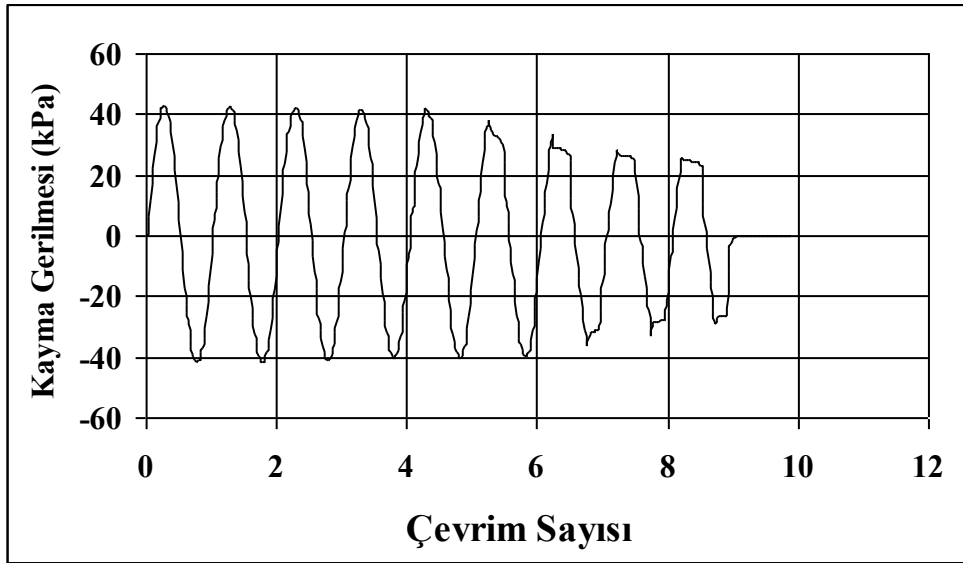
Şekil B2 DG1 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



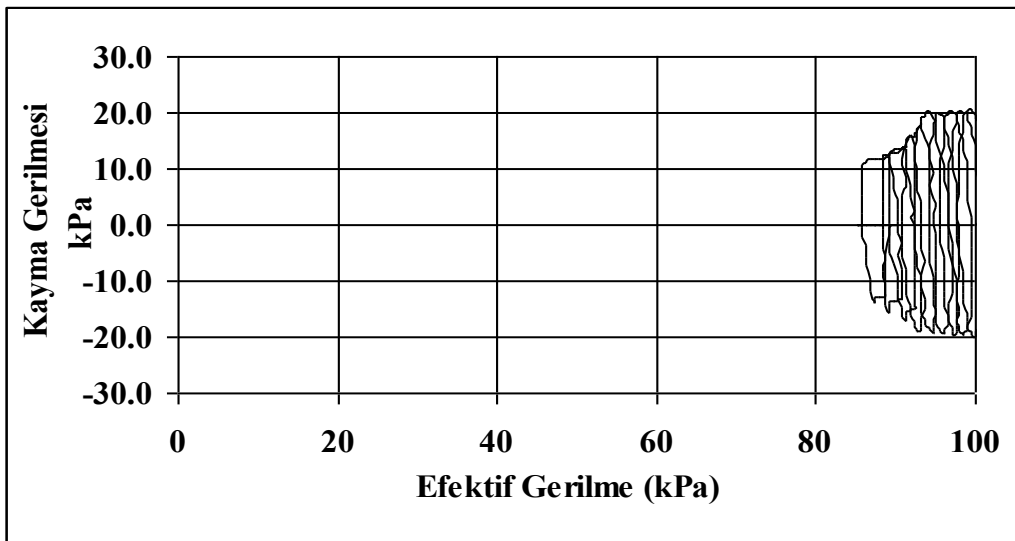
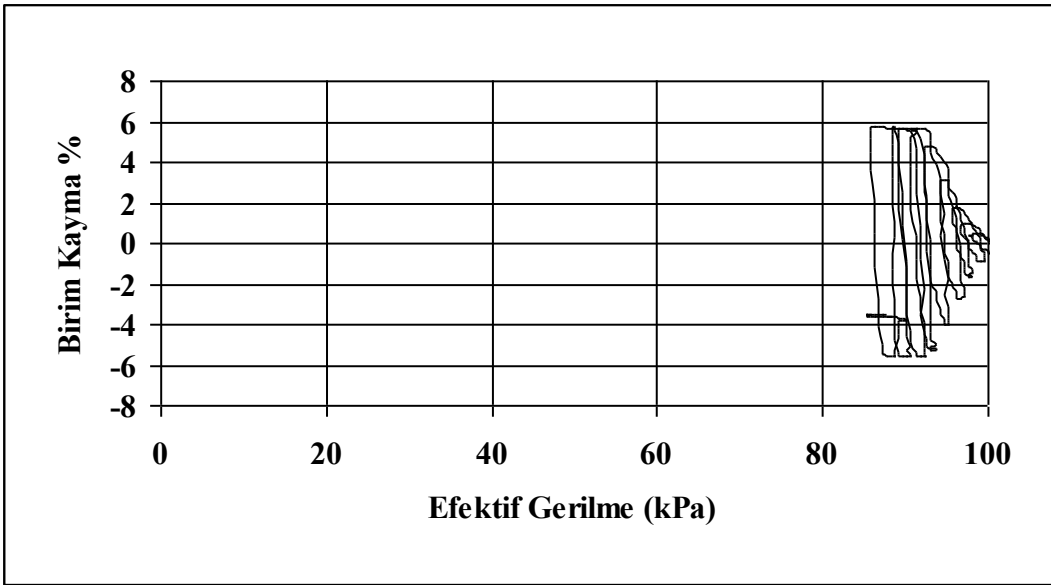
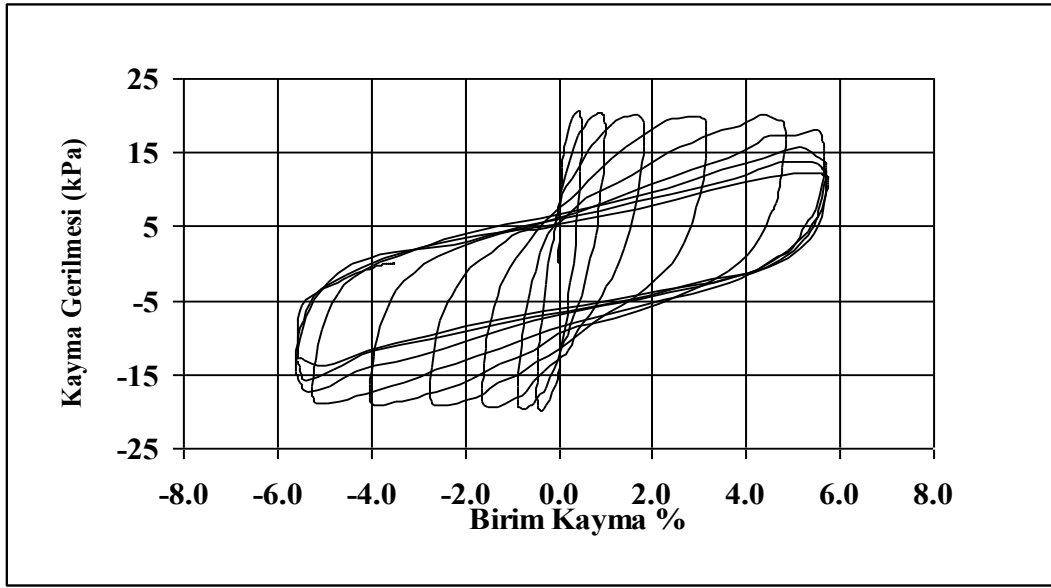
Şekil B3 DG2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



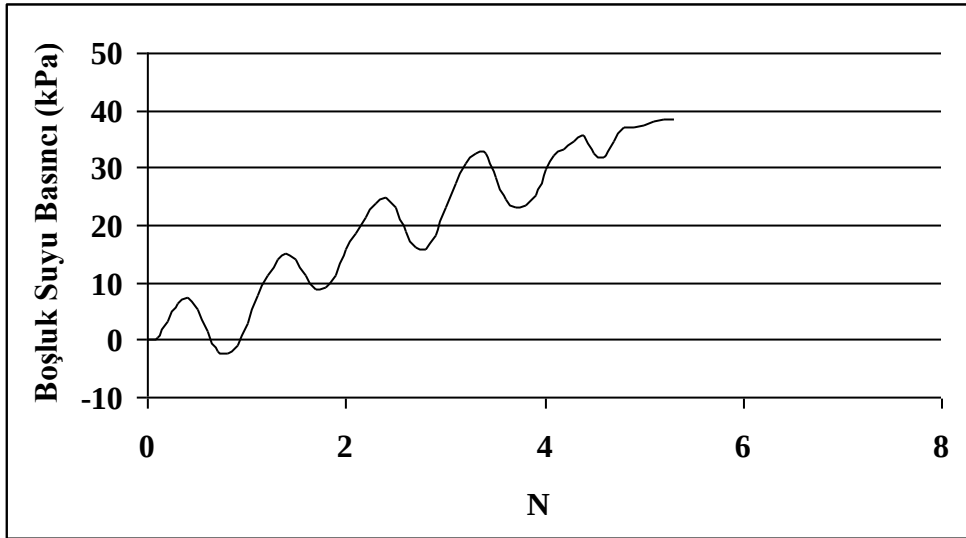
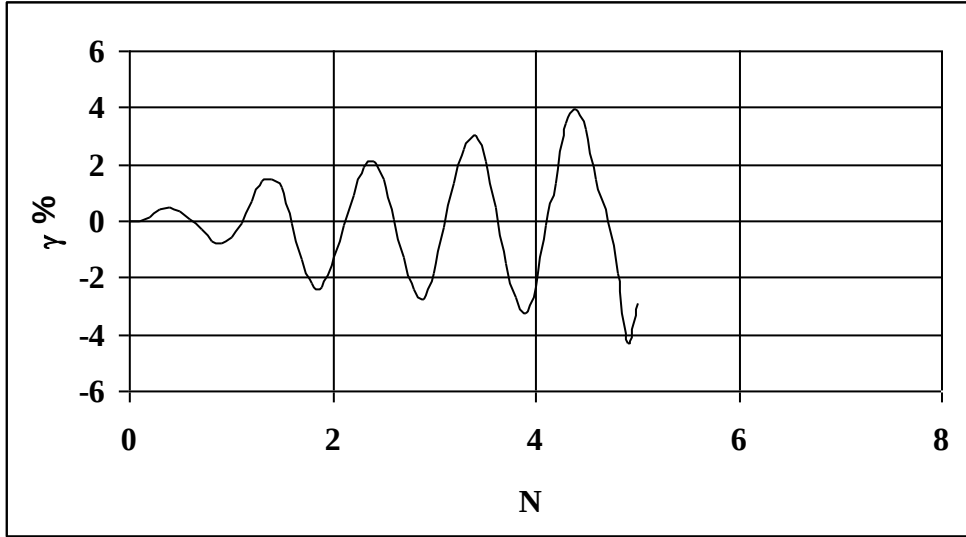
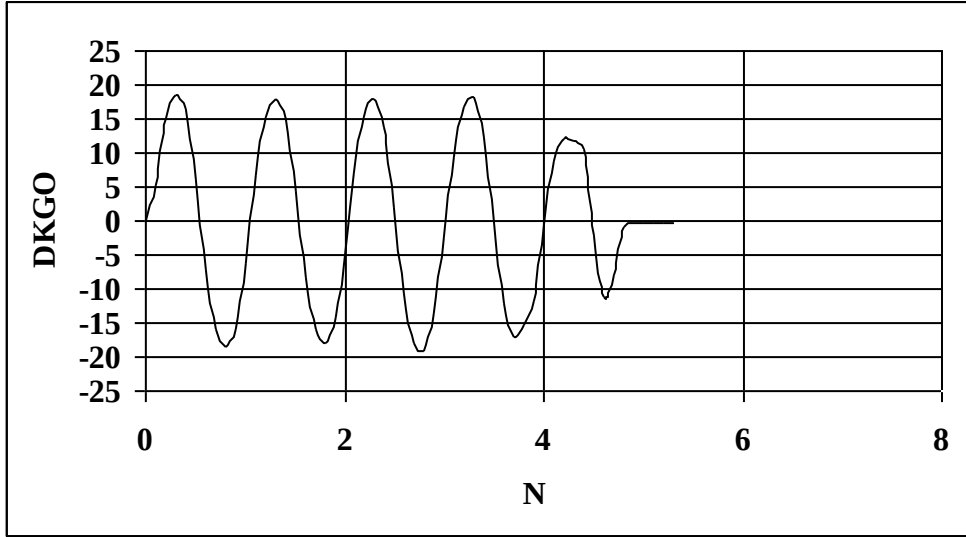
Şekil B4 DG2 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



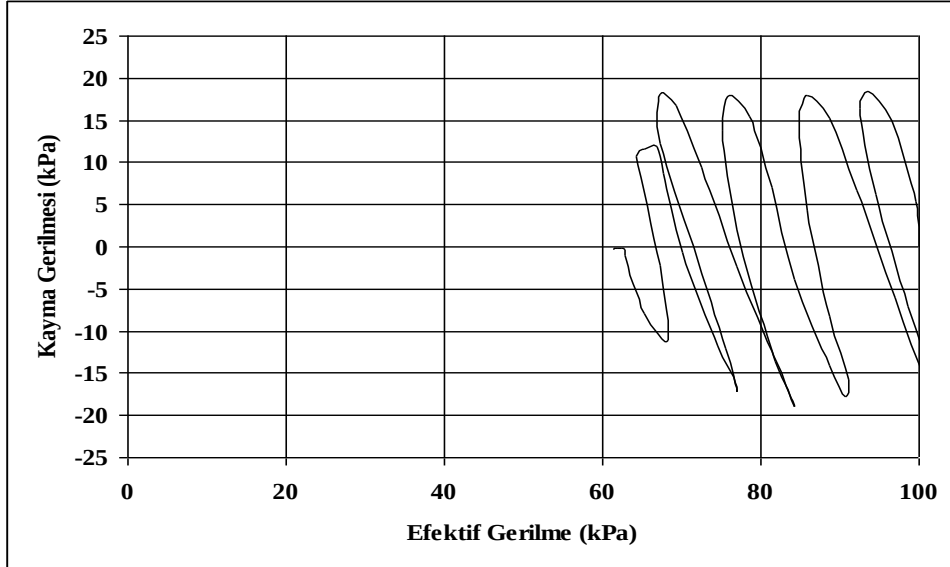
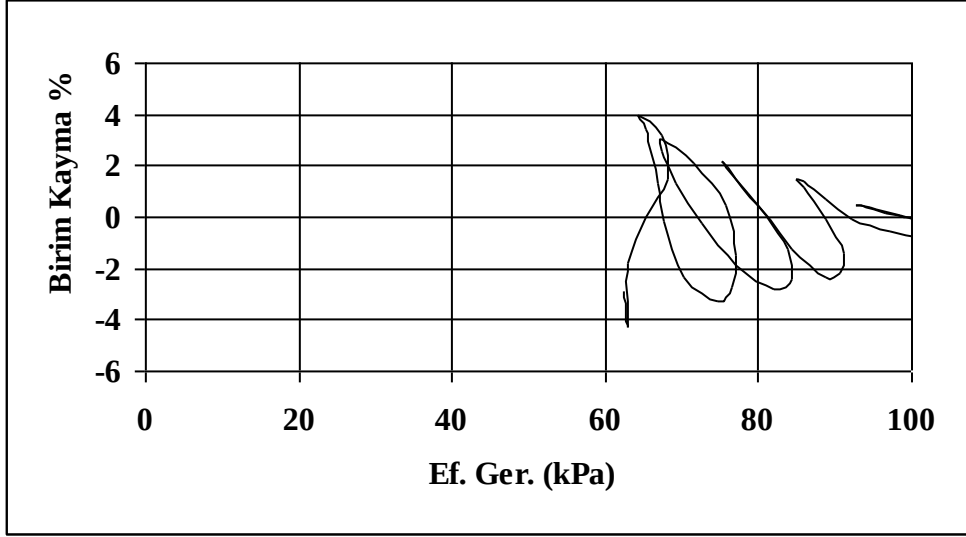
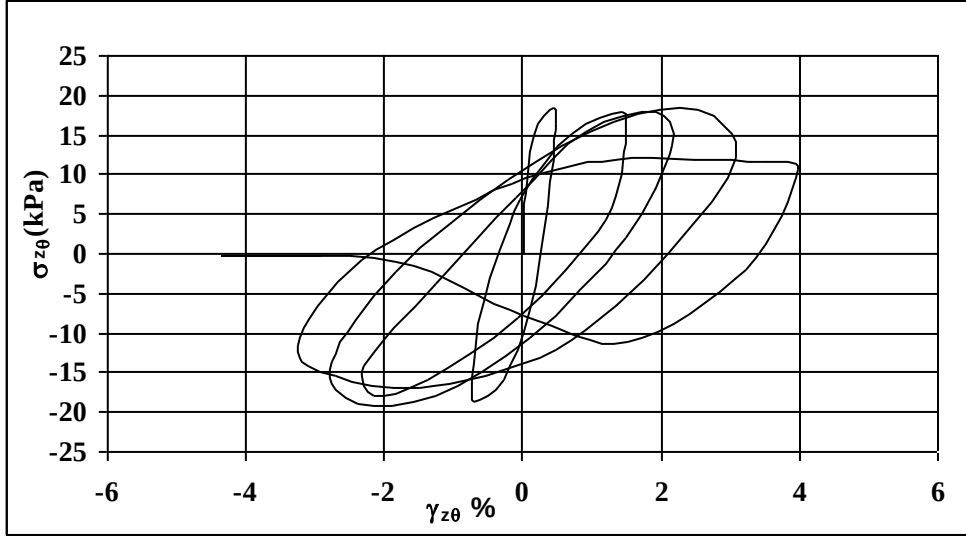
Şekil B5 DG3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



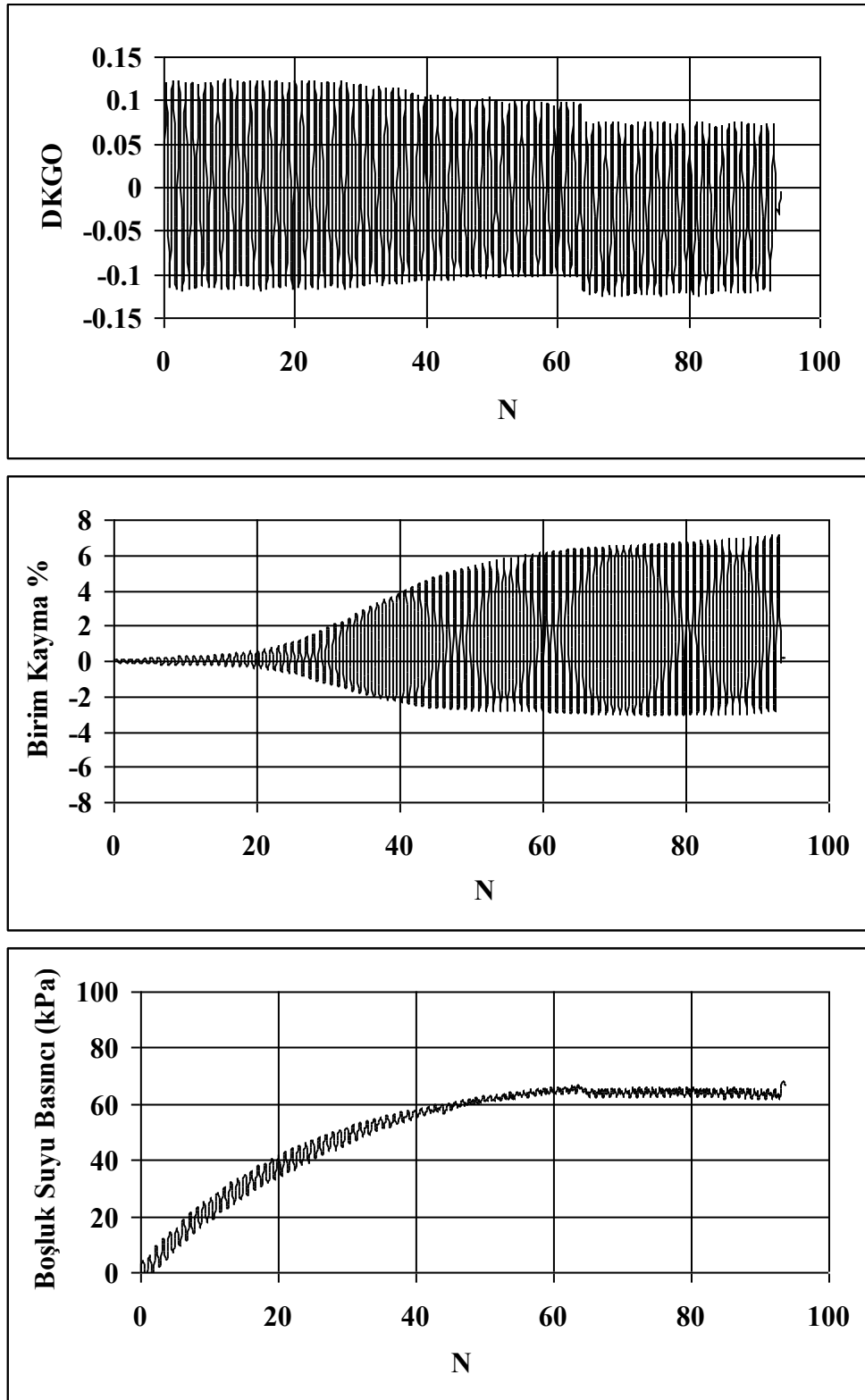
Şekil B6 DG3 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



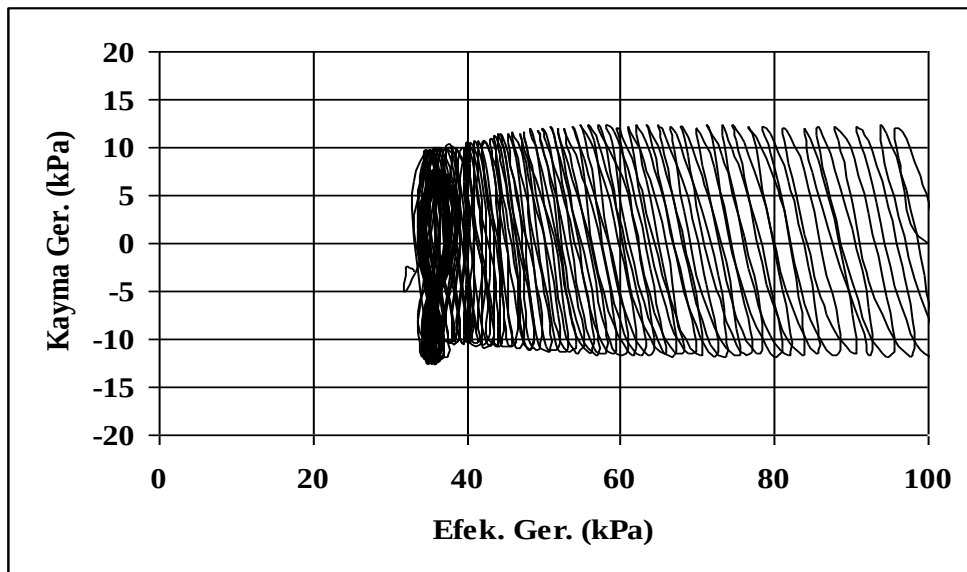
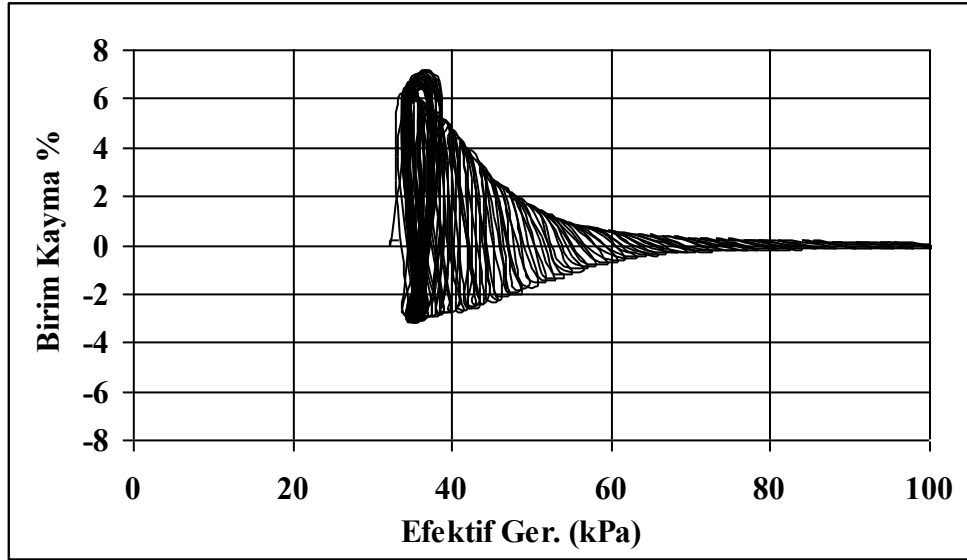
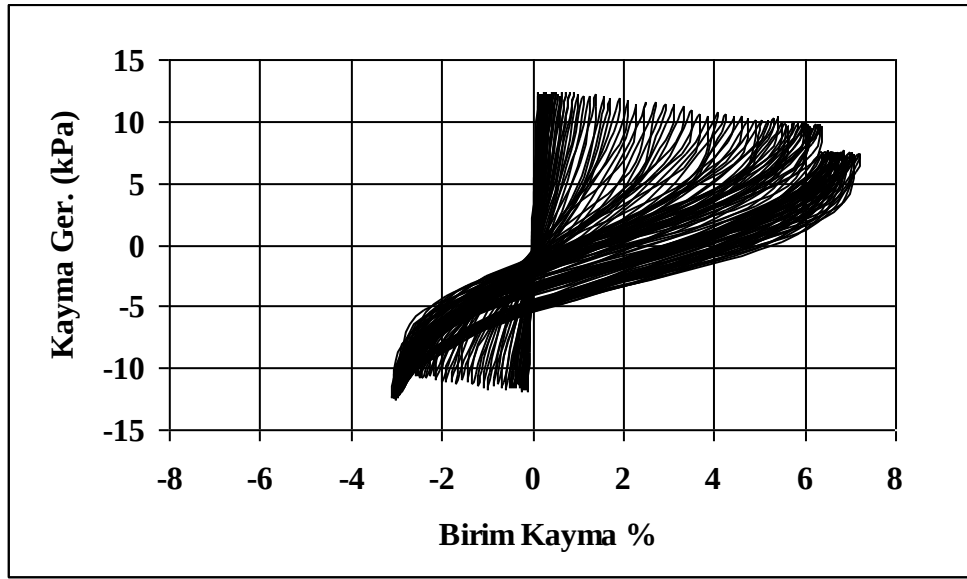
Şekil B7 DG4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



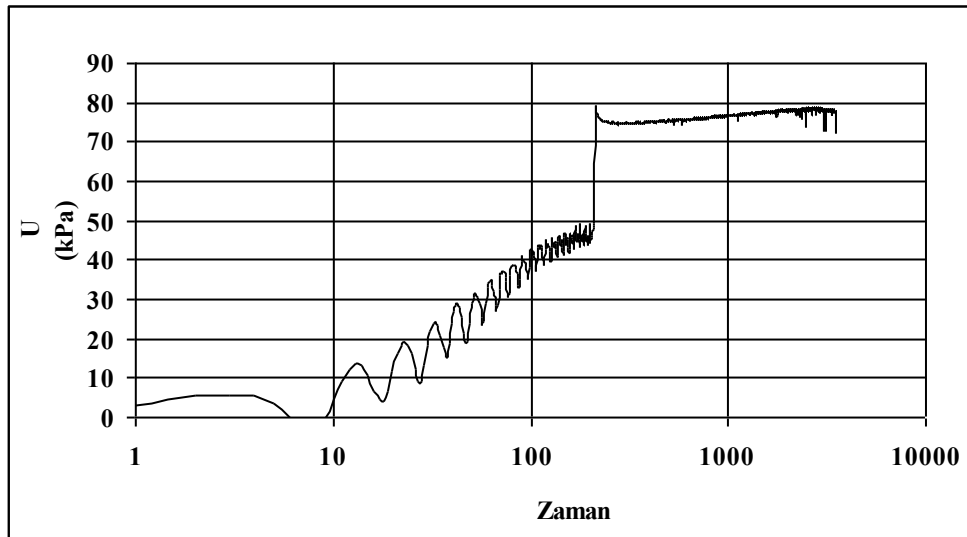
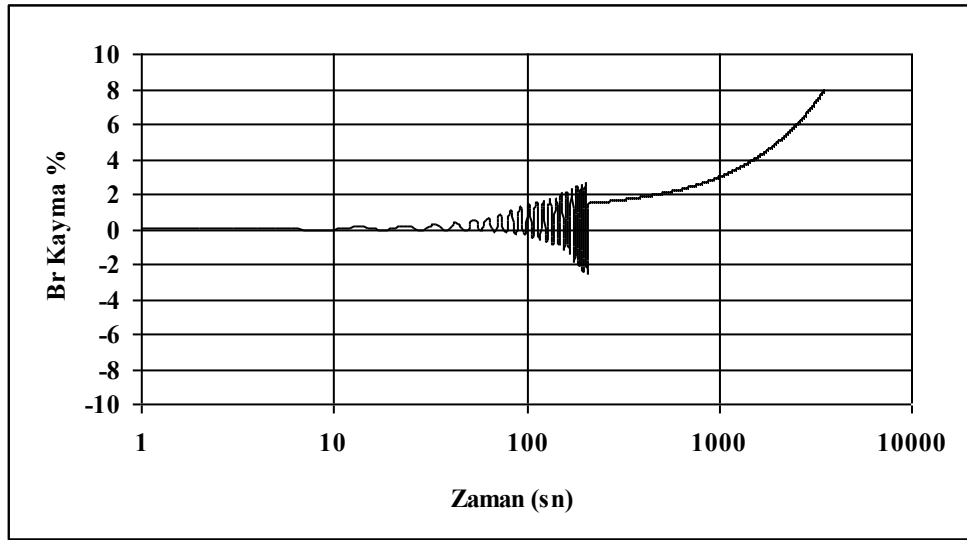
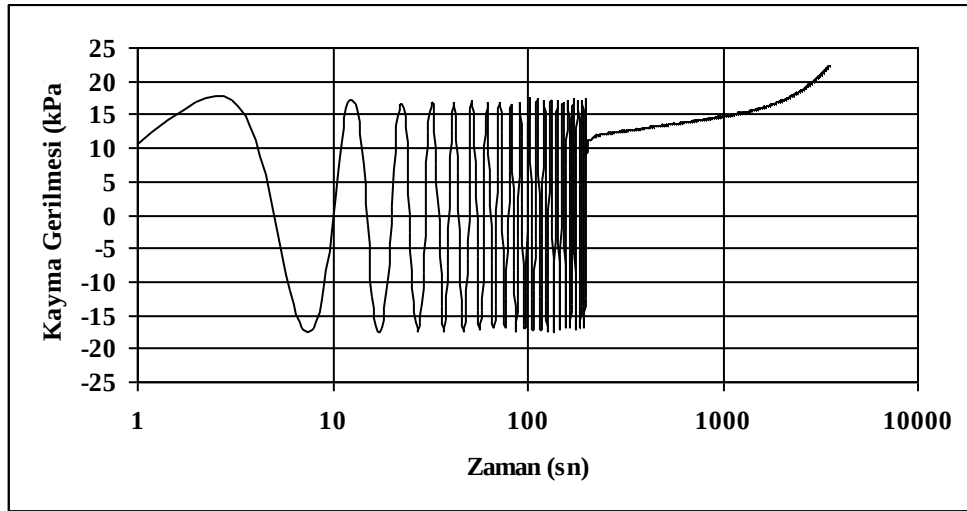
Şekil B8 DG4 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



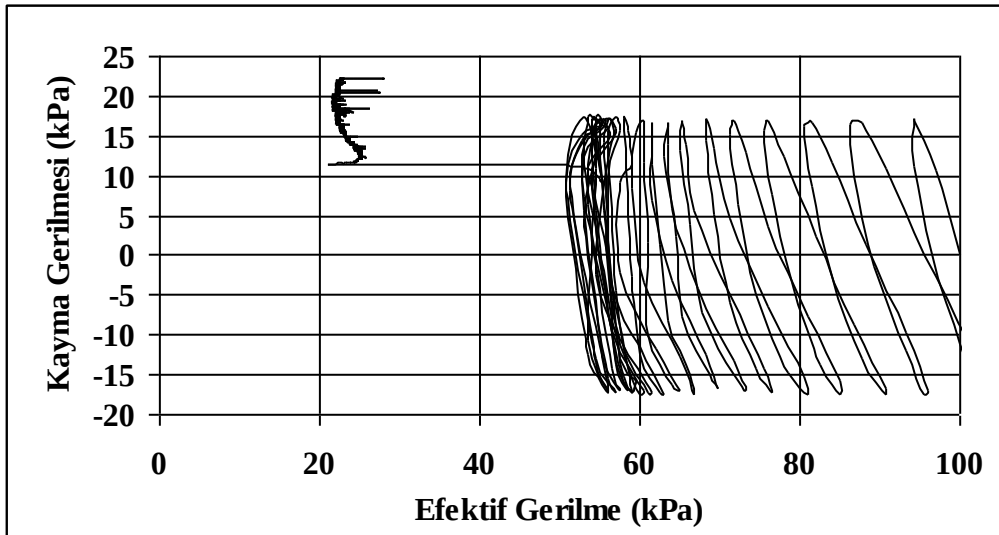
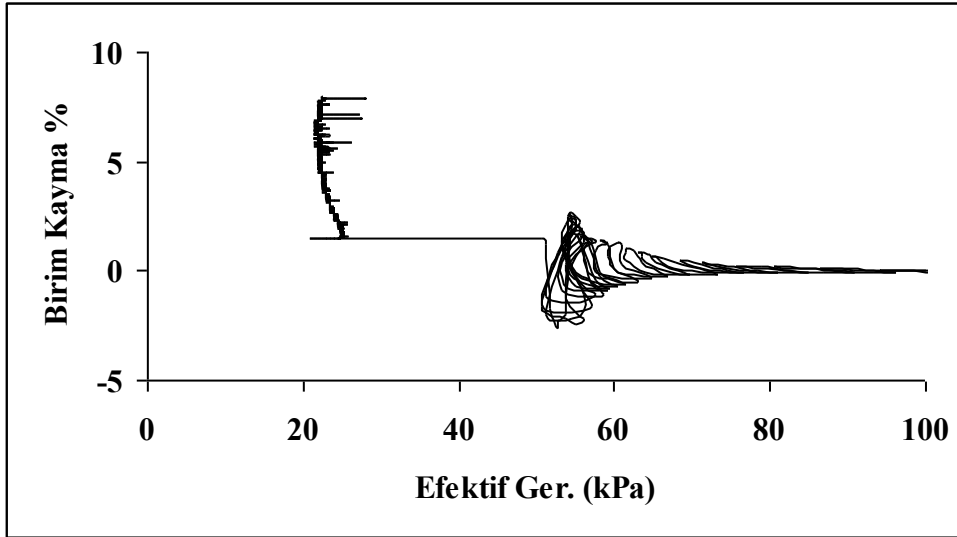
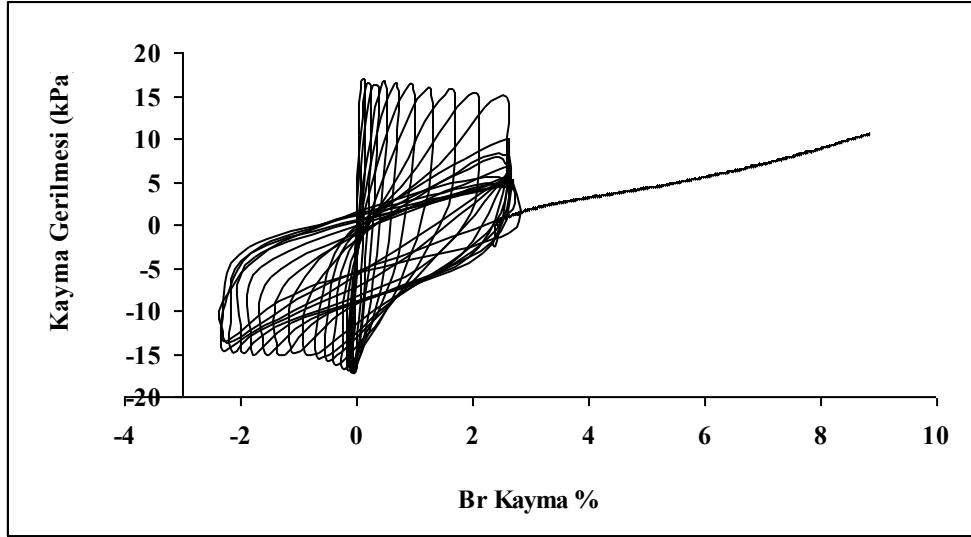
Şekil B9 DG5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



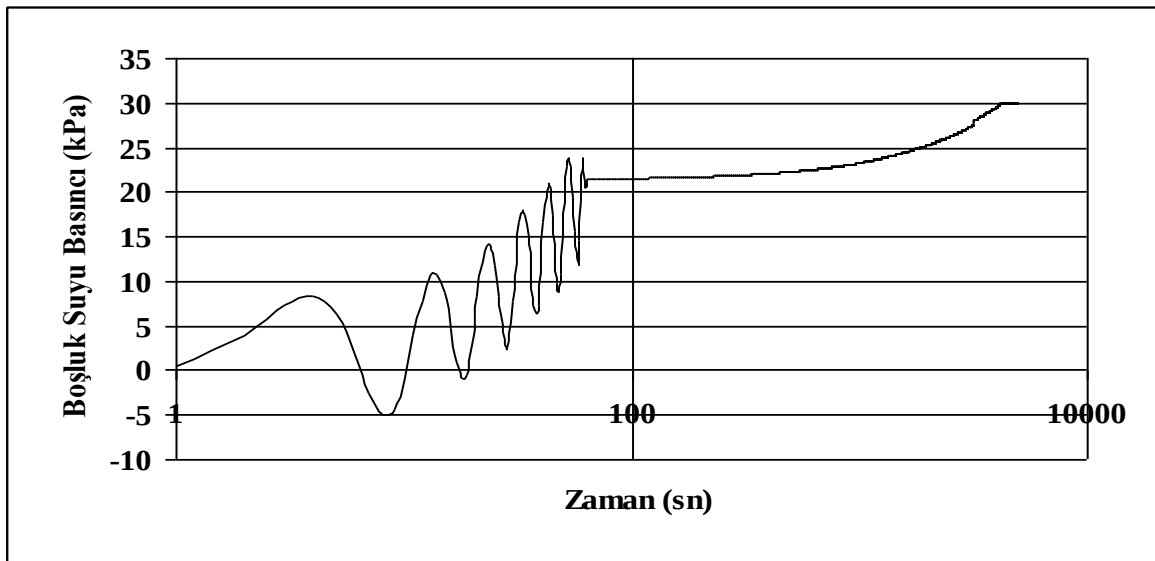
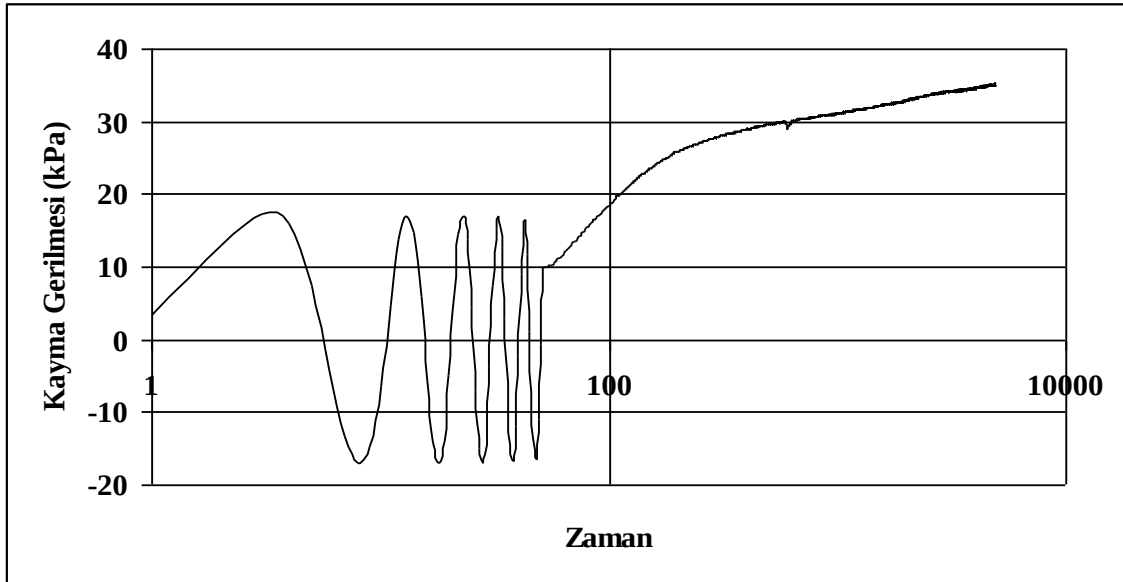
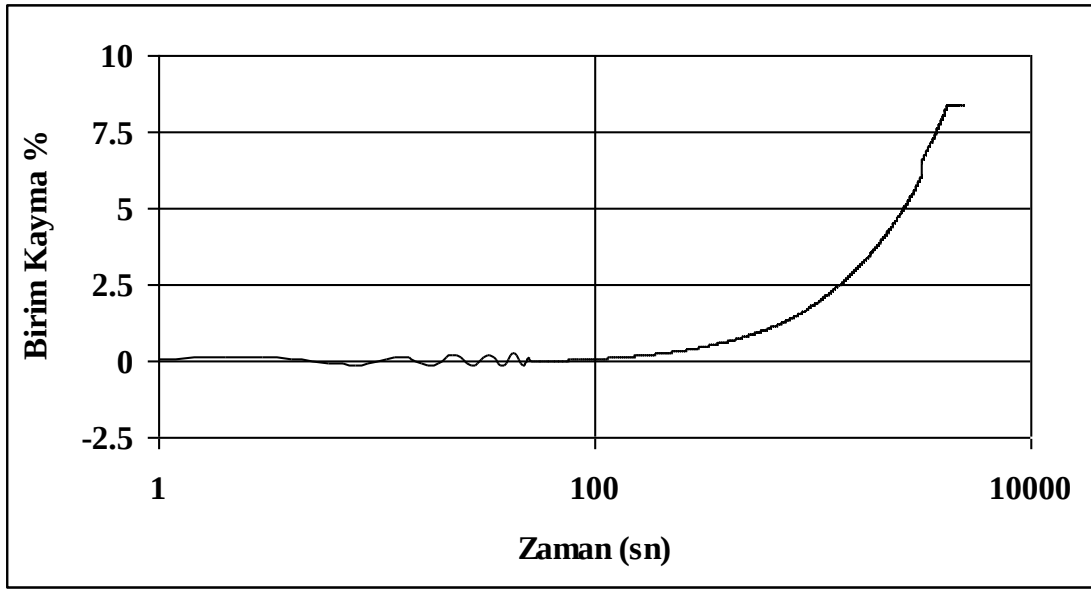
Şekil B10 DG5 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



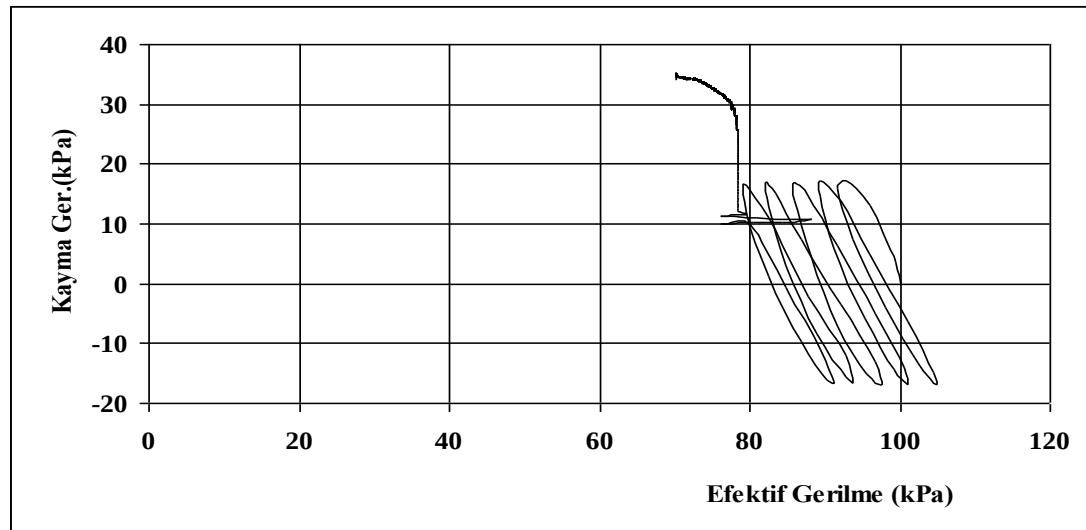
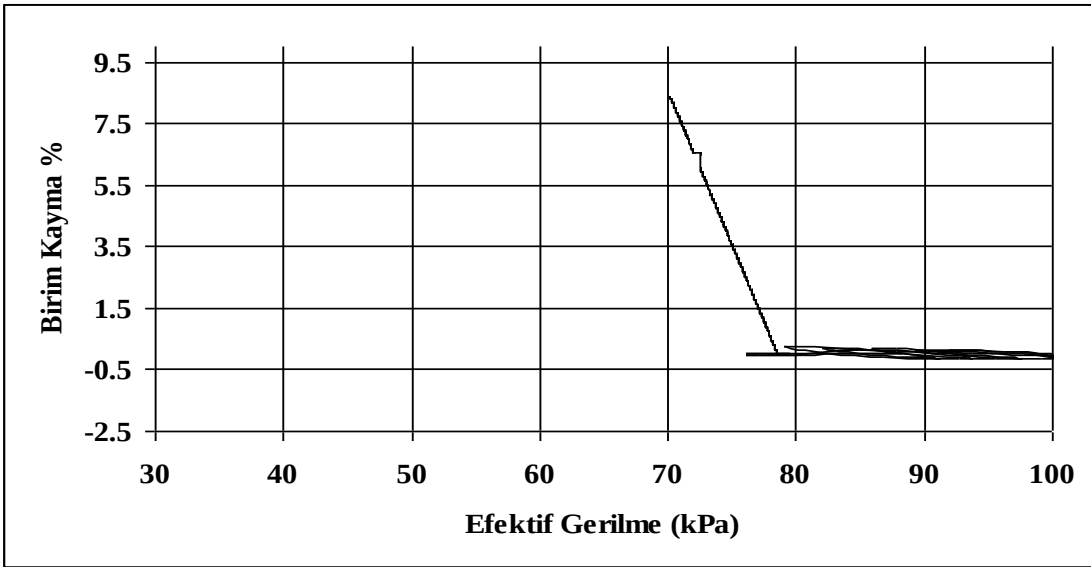
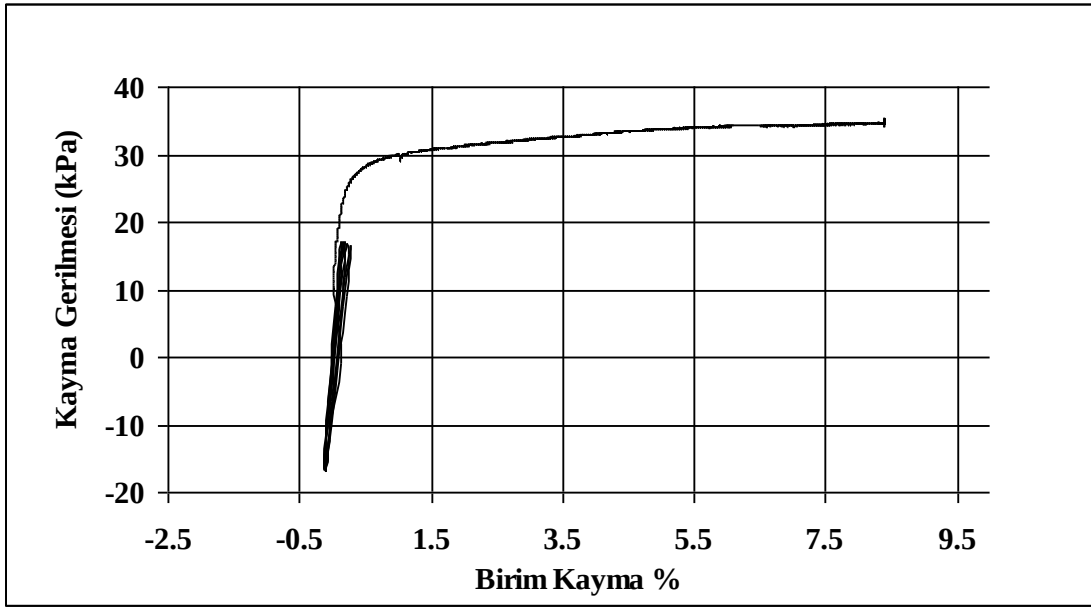
Şekil B11 DSG1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



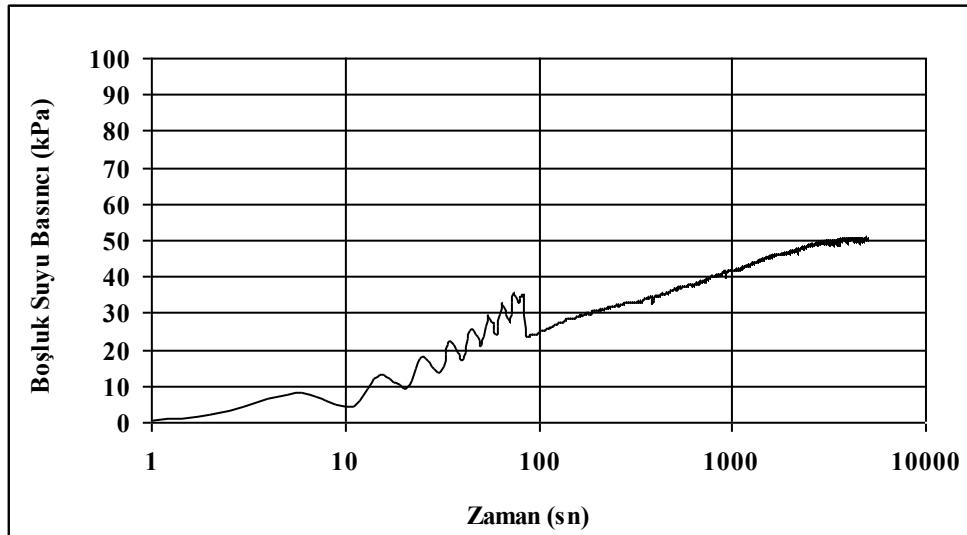
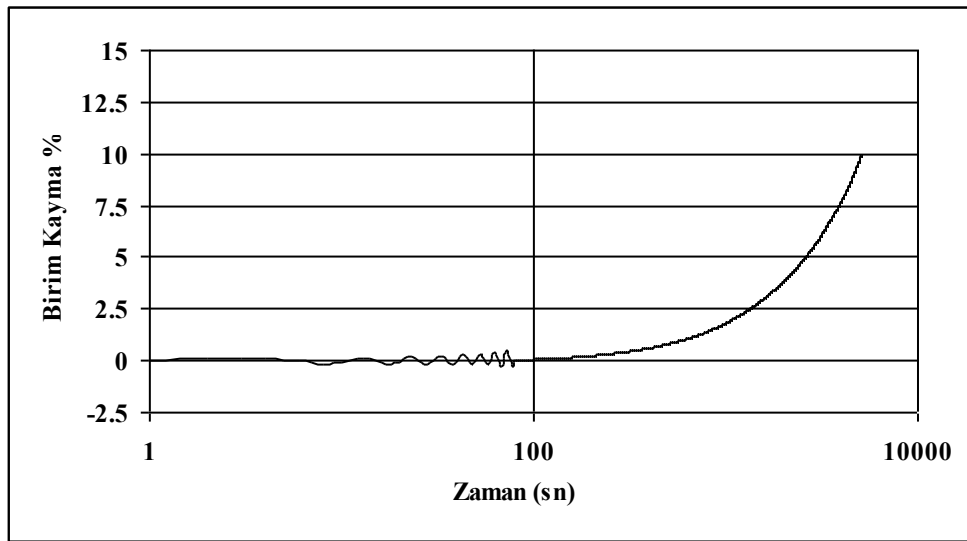
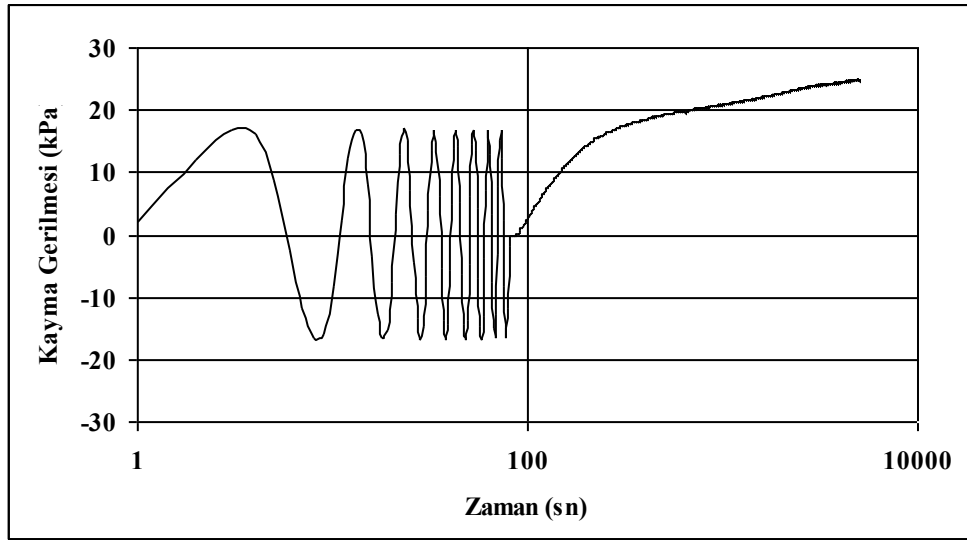
Şekil B12 DSG1 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



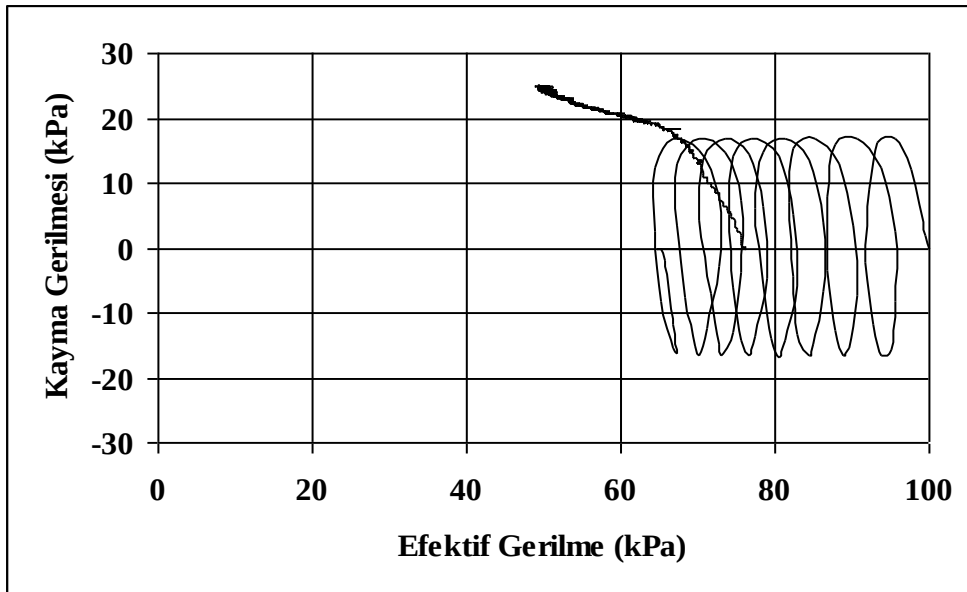
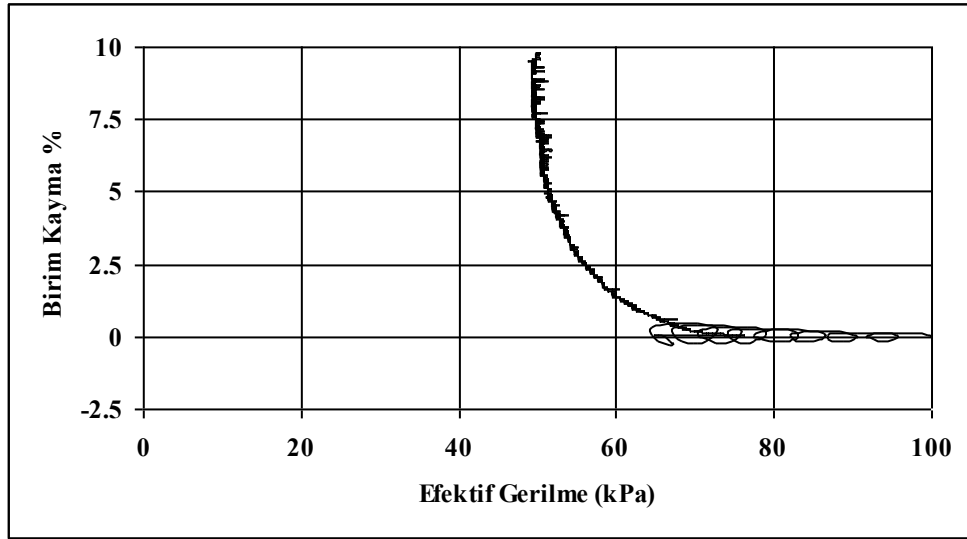
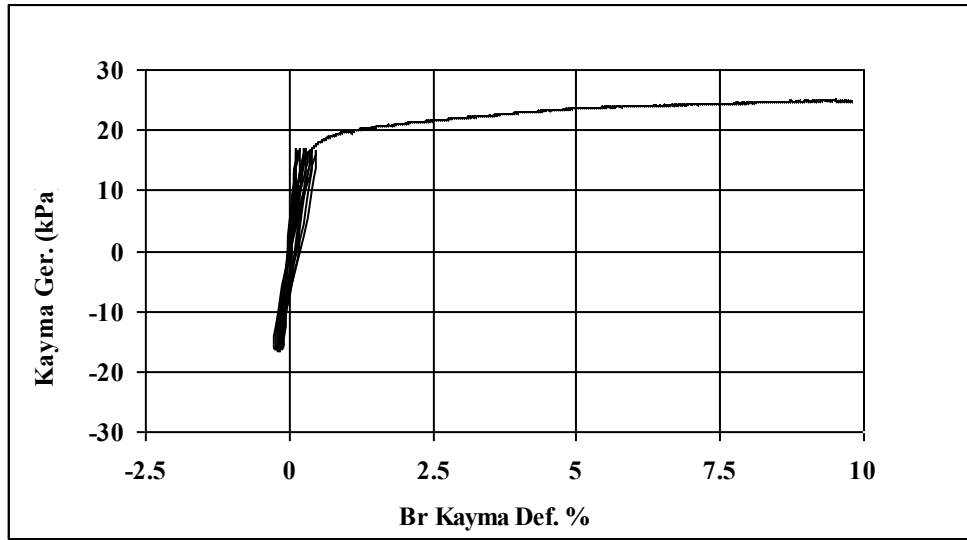
Şekil B13 DSG2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



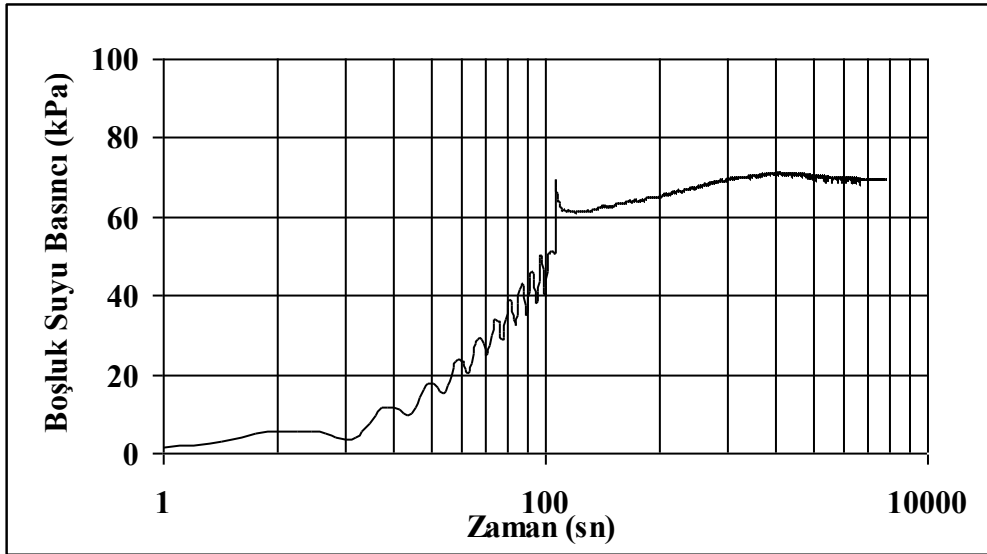
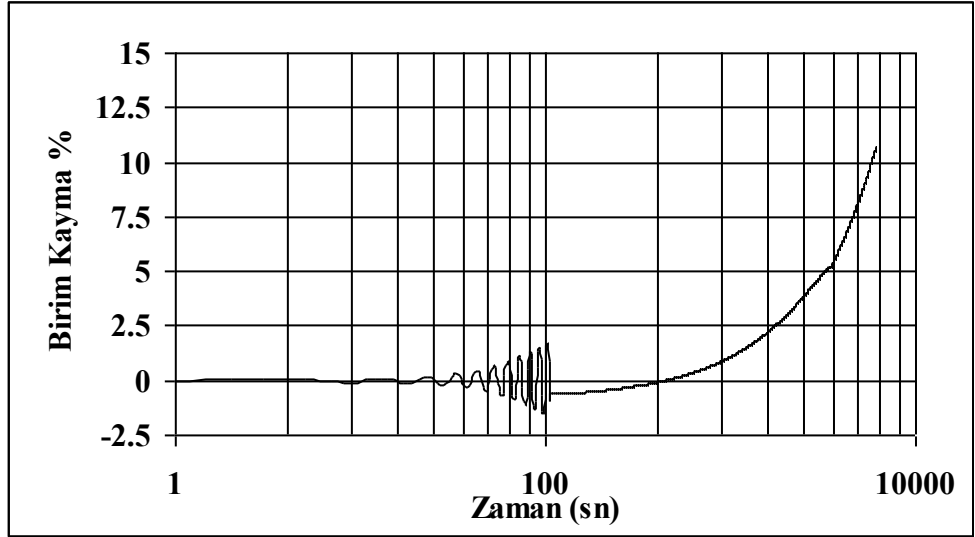
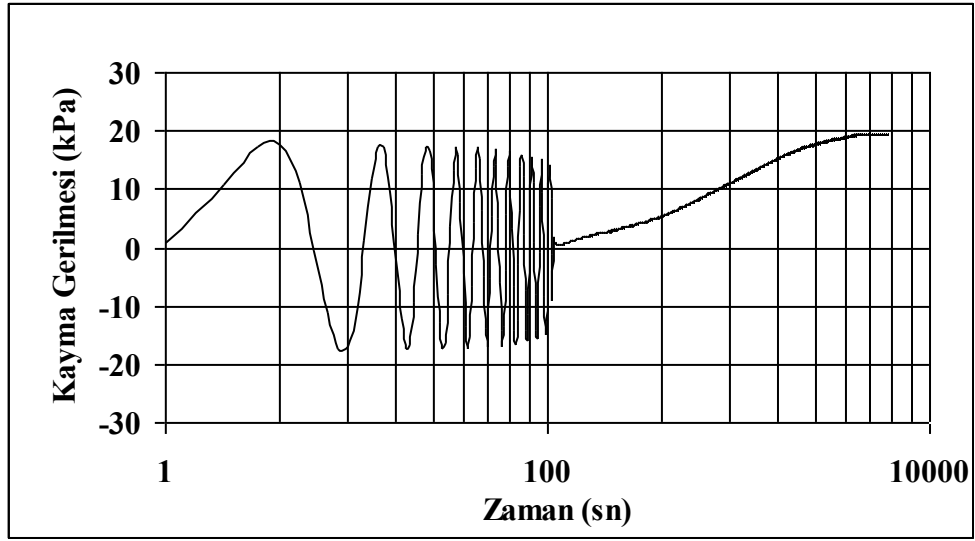
Şekil B14 DSG2 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



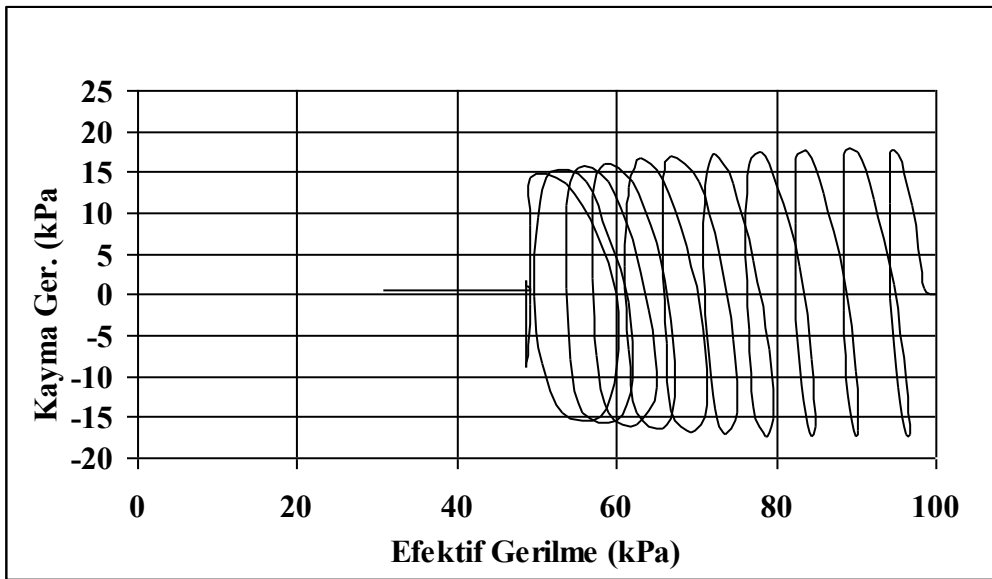
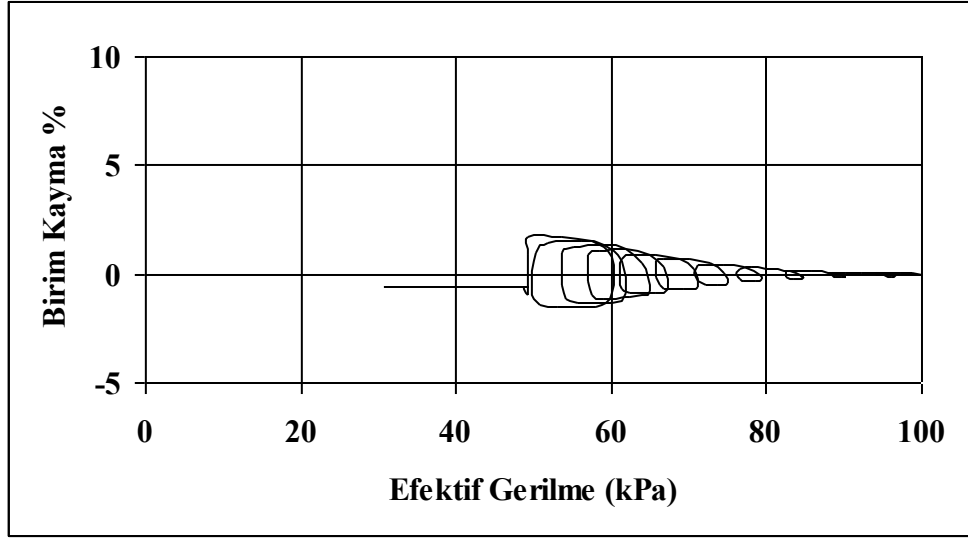
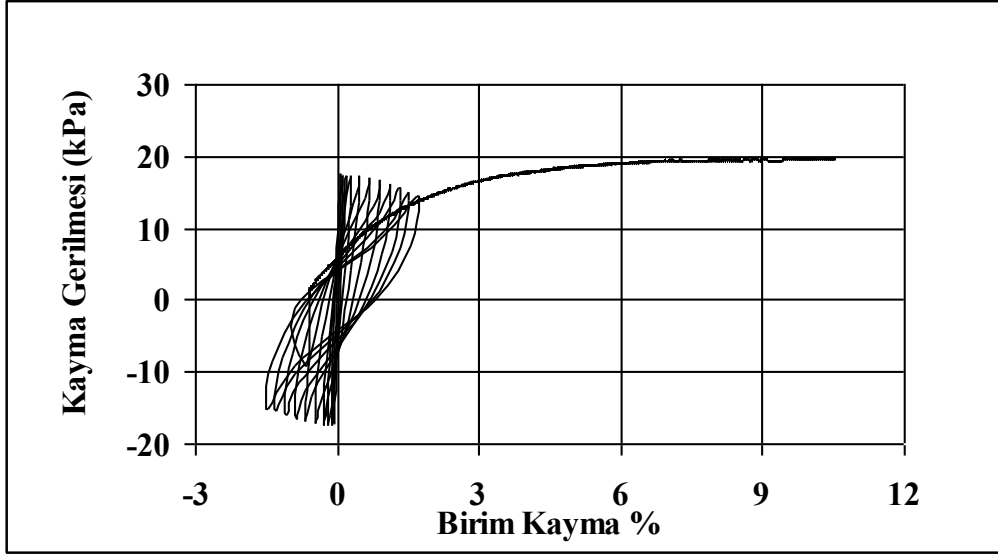
Şekil B15 DSG3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



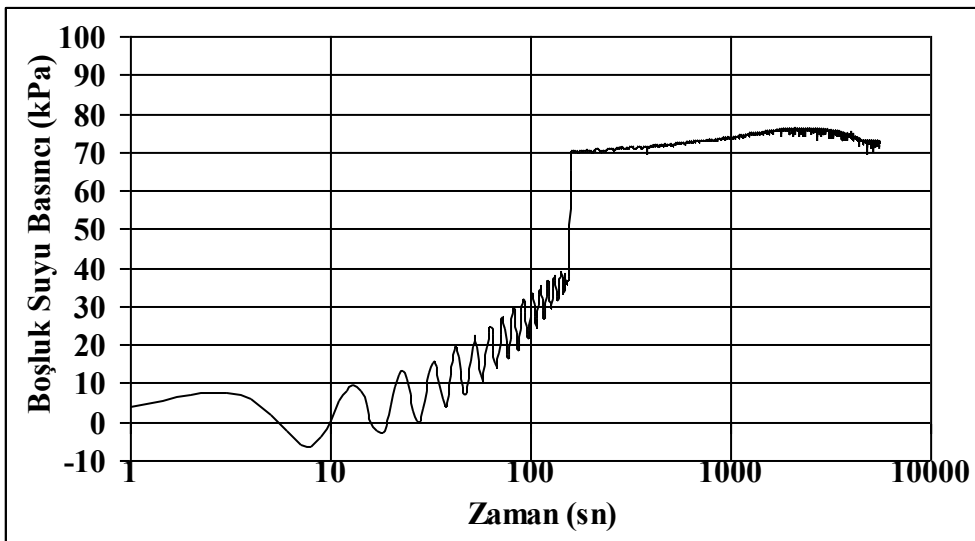
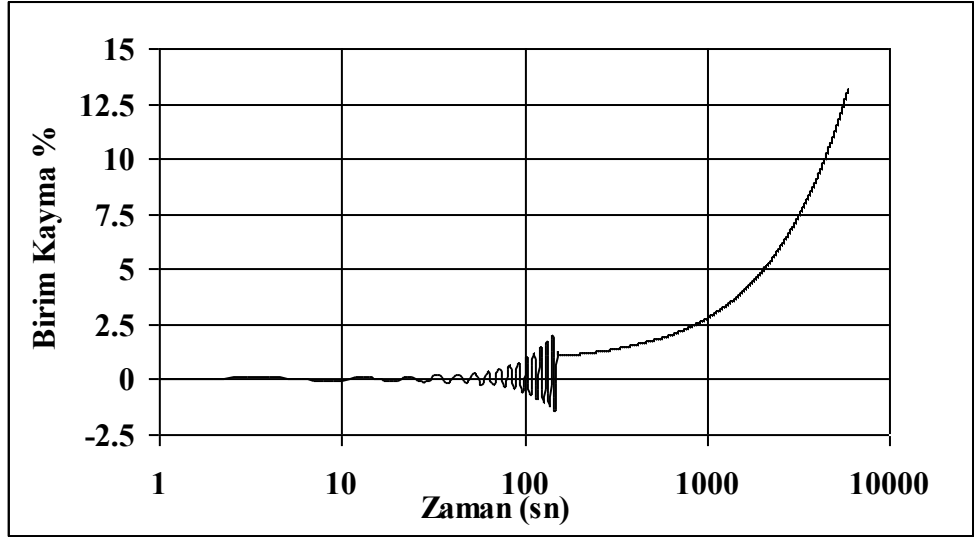
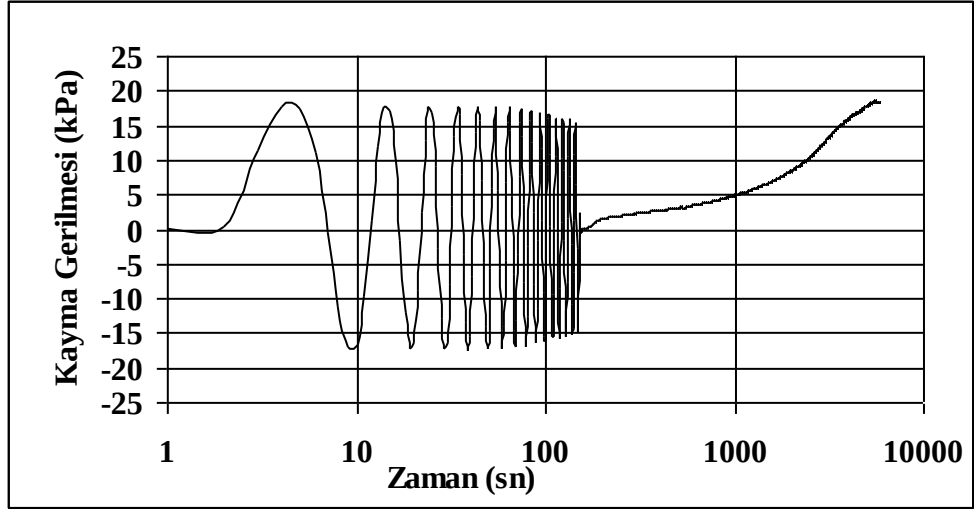
Şekil B16 DSG3 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



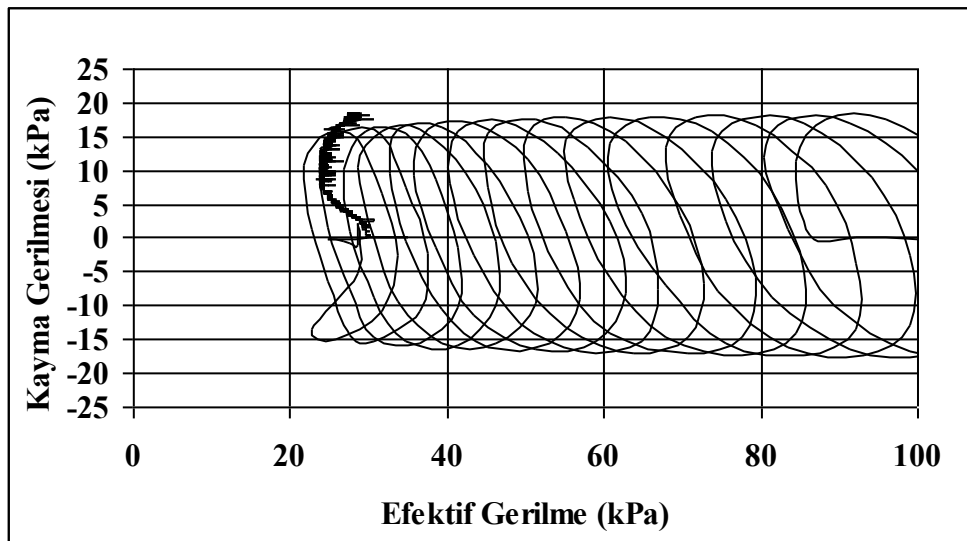
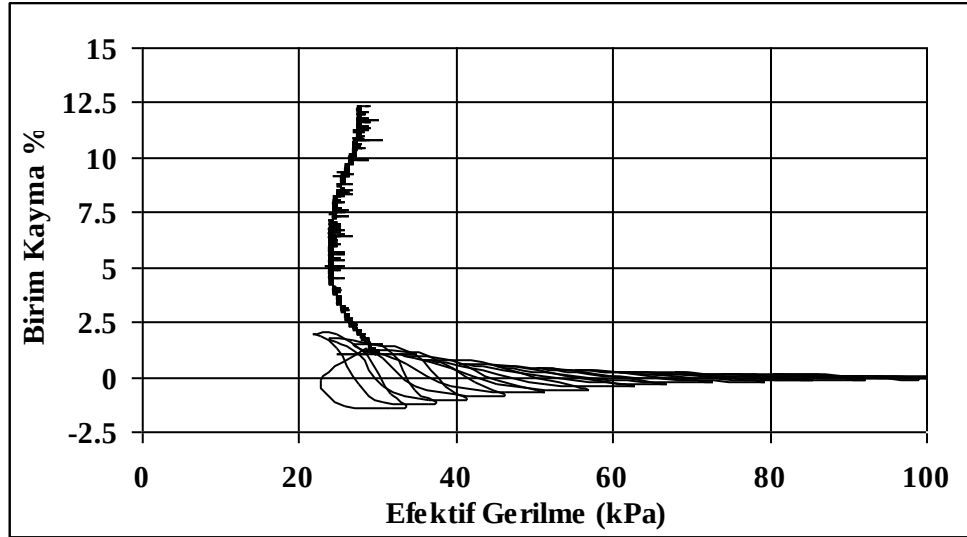
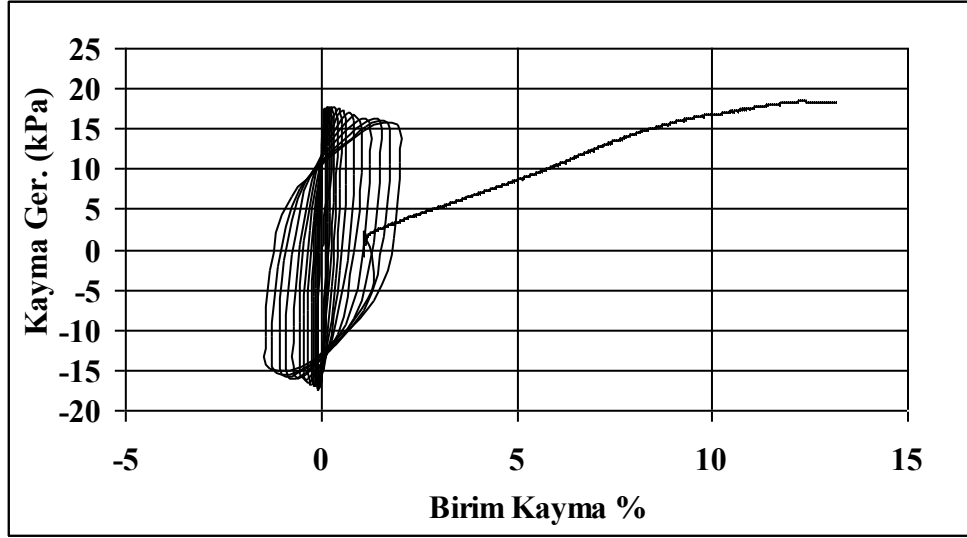
Şekil B17 DSG4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



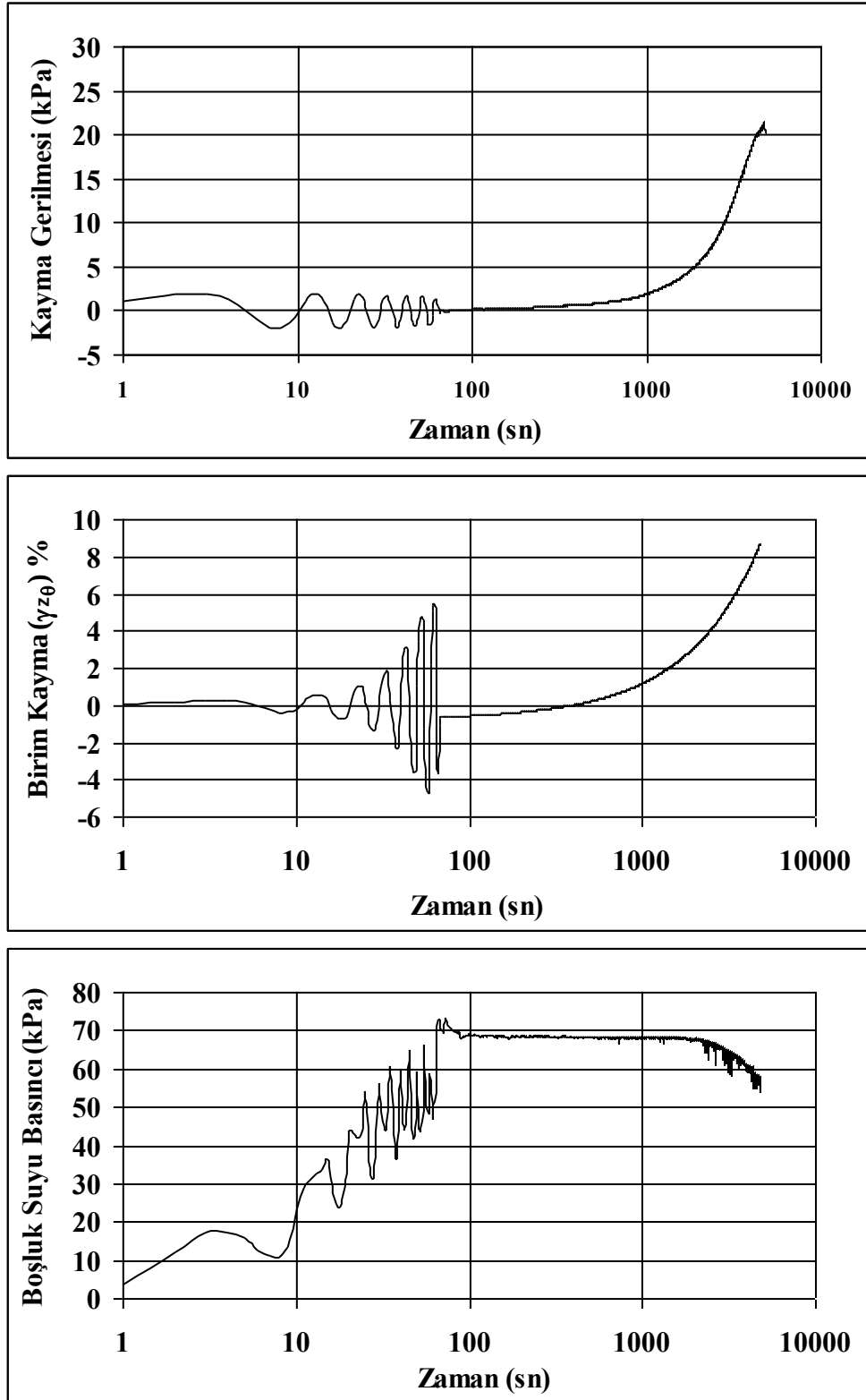
Şekil B18 DSG4 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



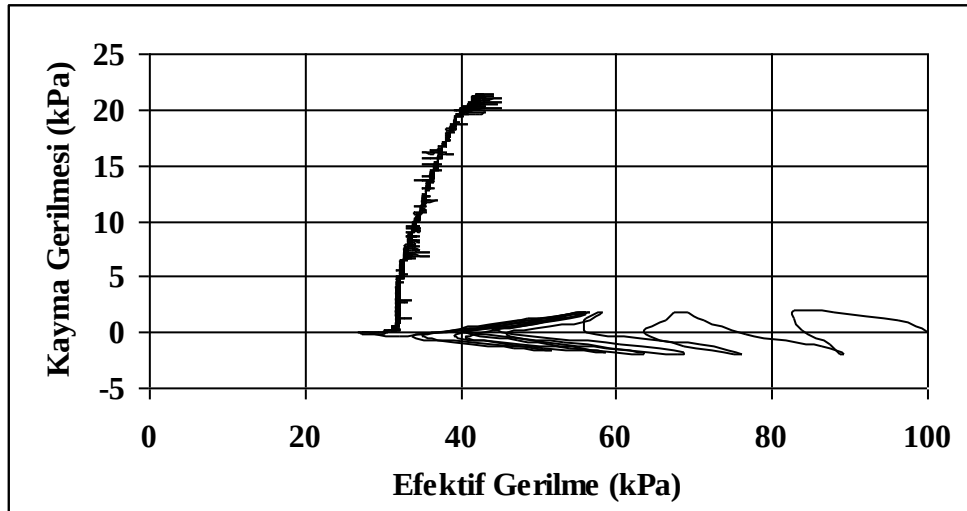
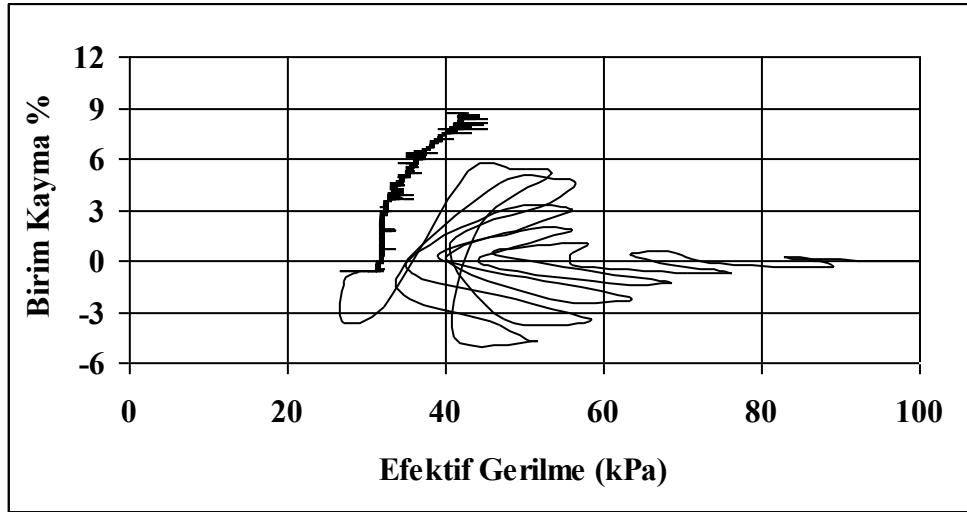
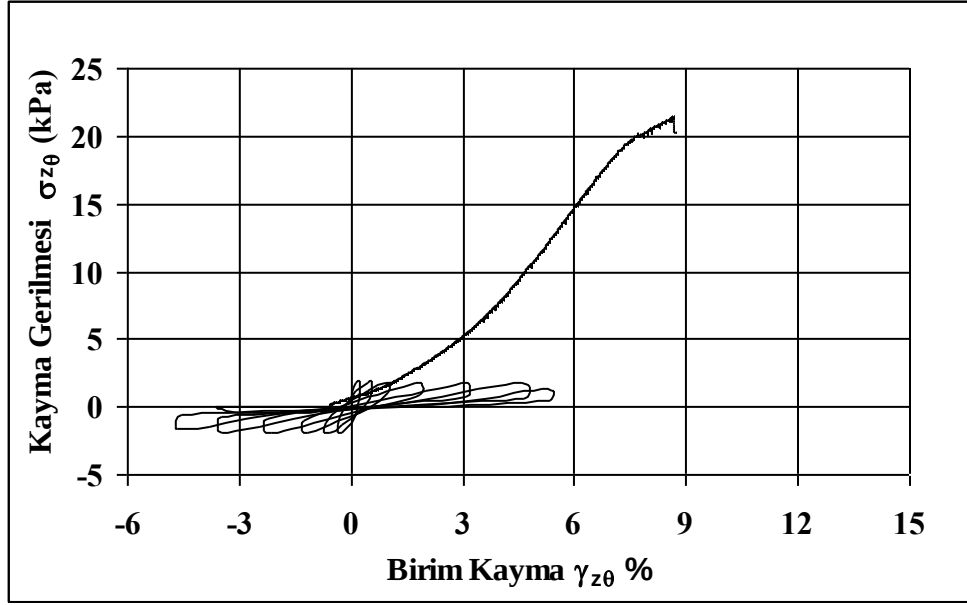
Şekil B19 DSG5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



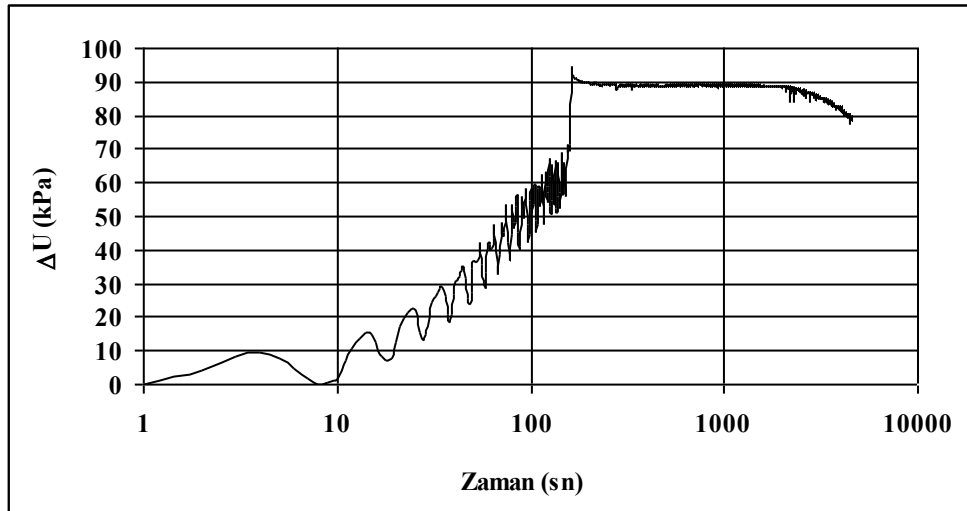
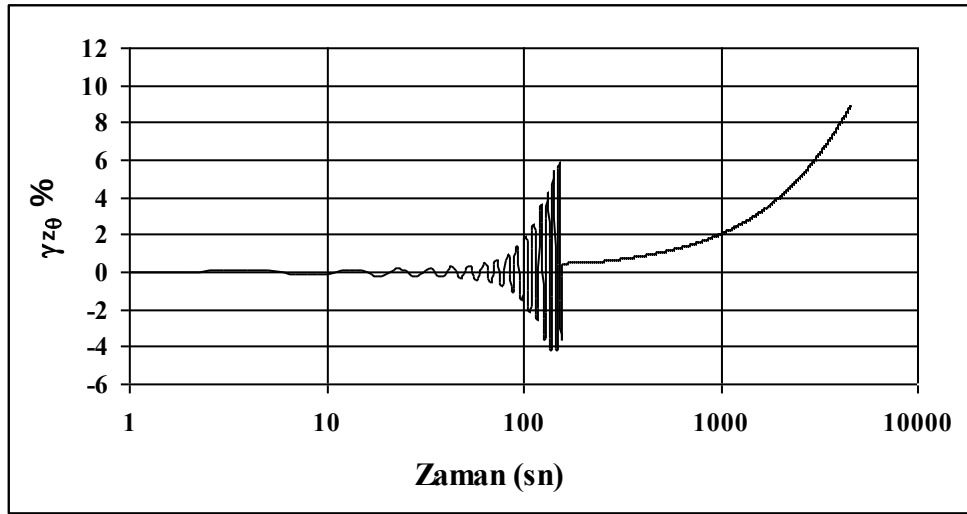
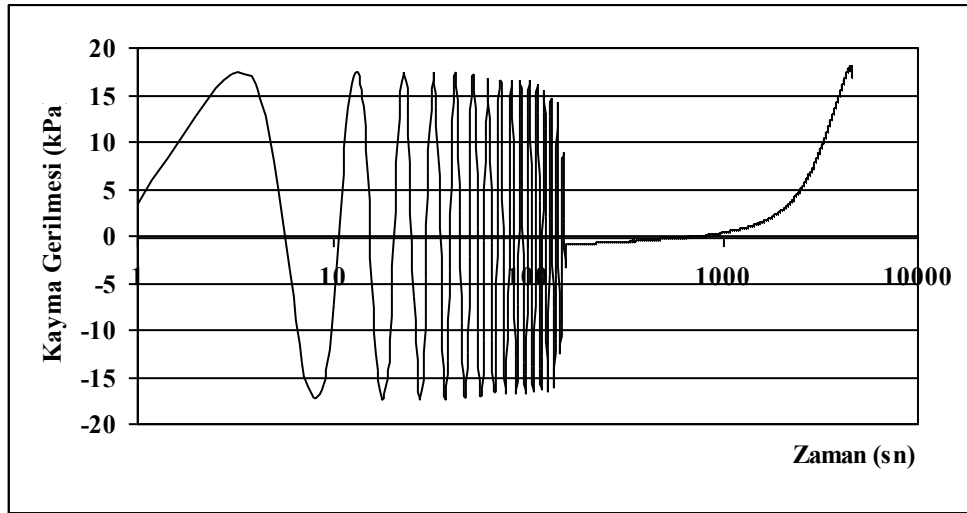
Şekil B20 DSG5 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



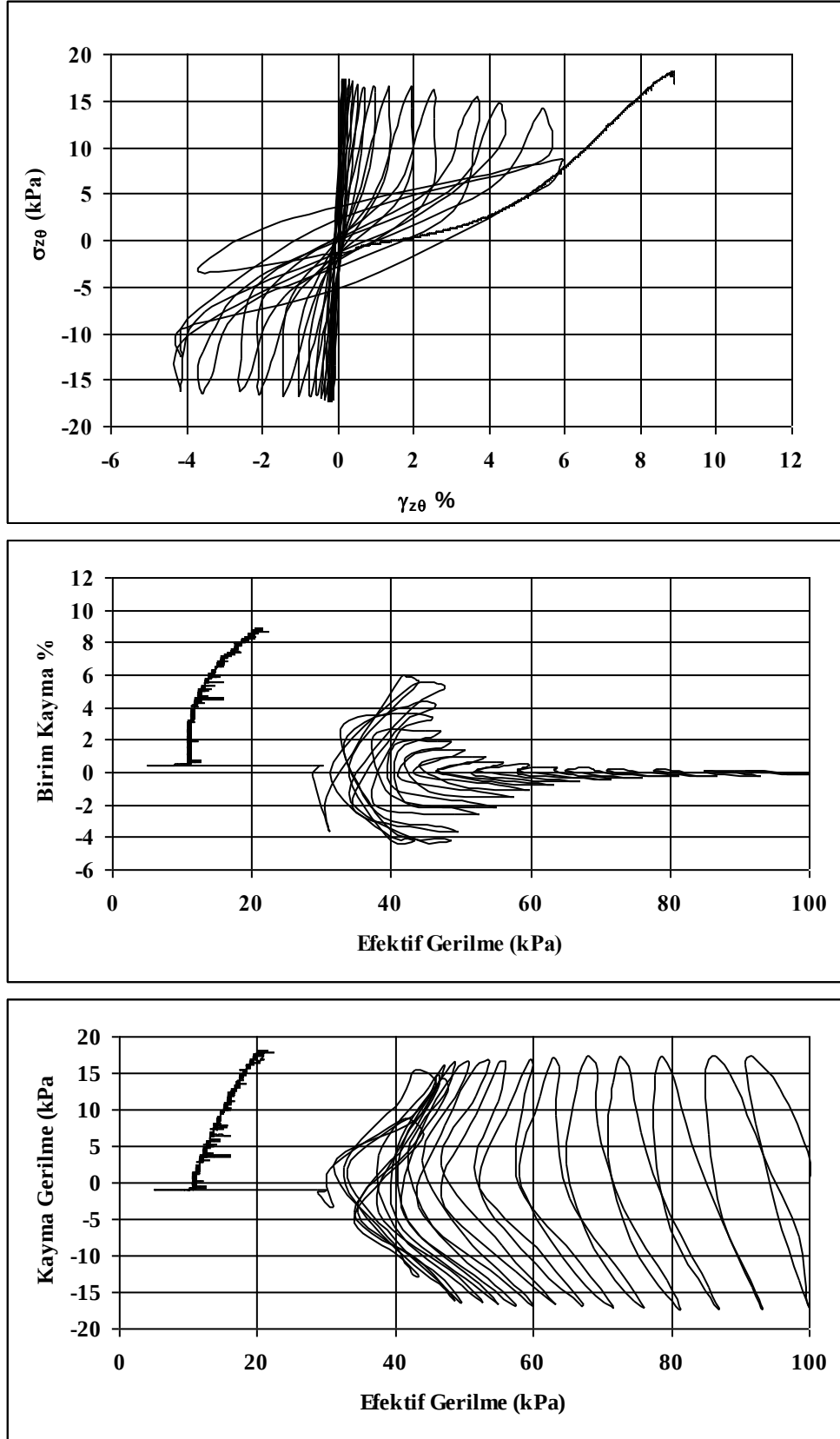
Şekil B21 DSA1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



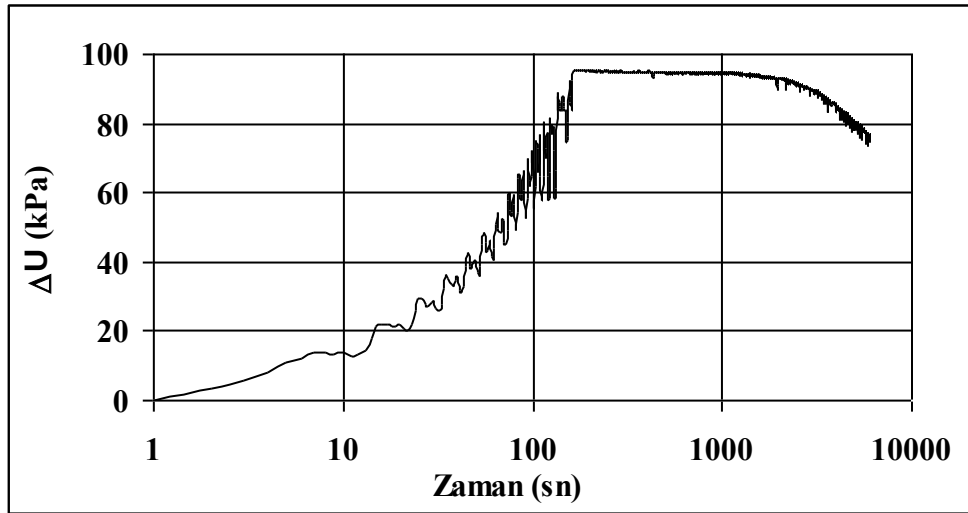
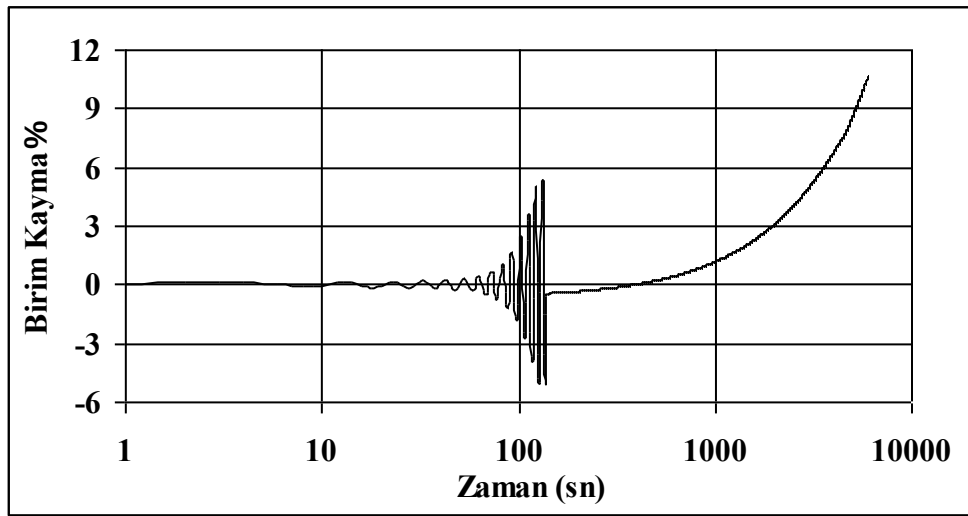
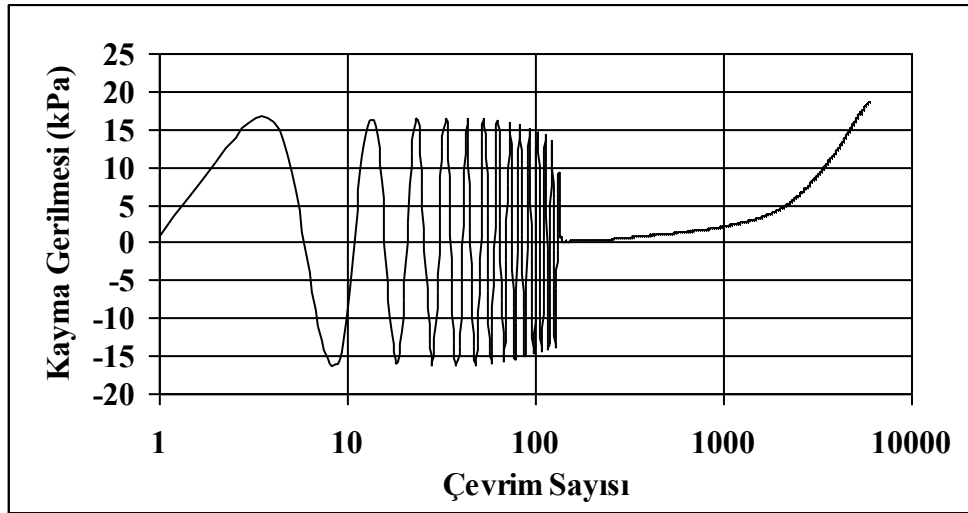
Şekil B22 DSA1 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



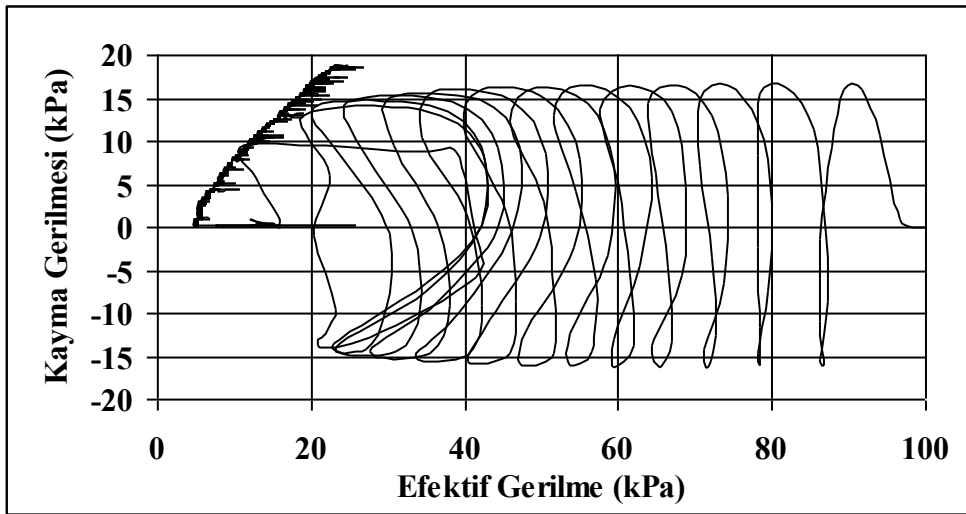
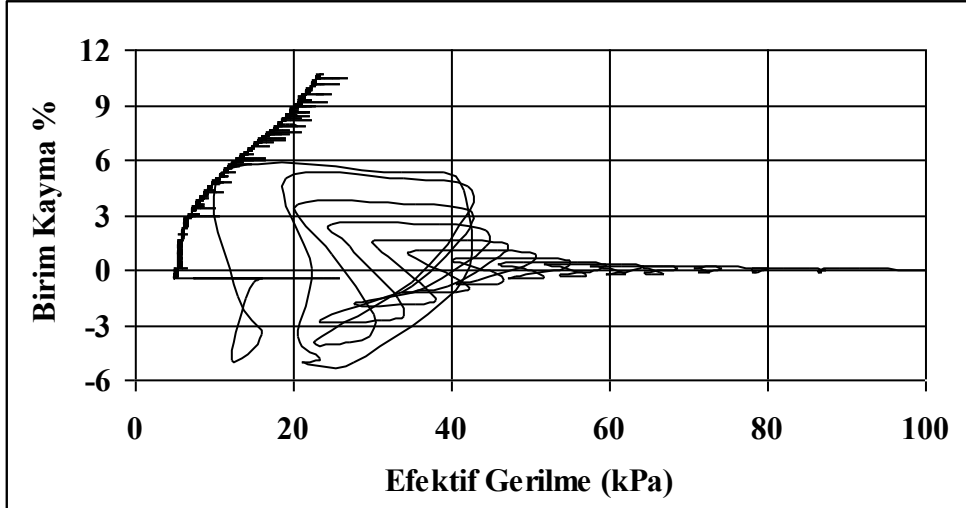
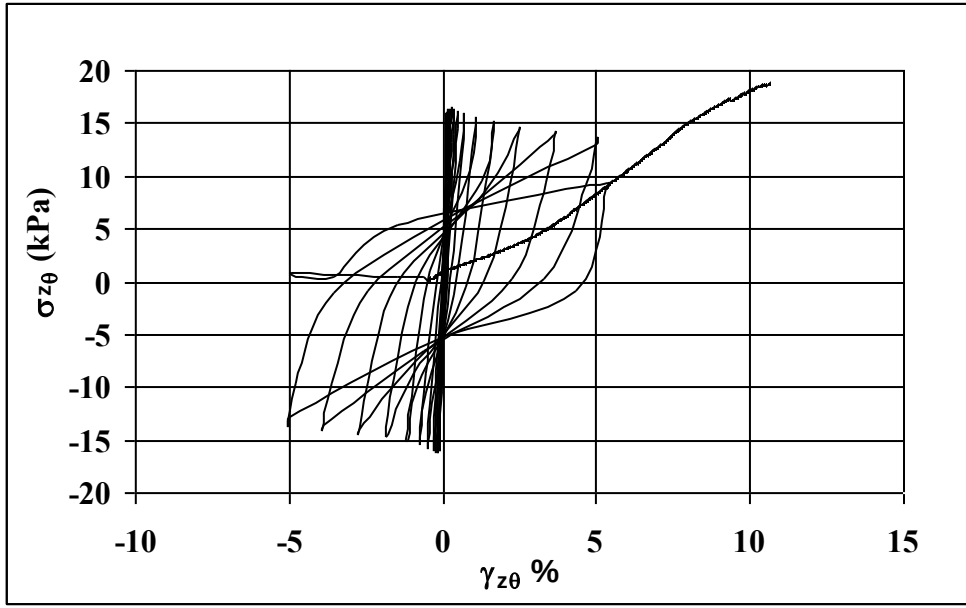
Şekil B23 DSA2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



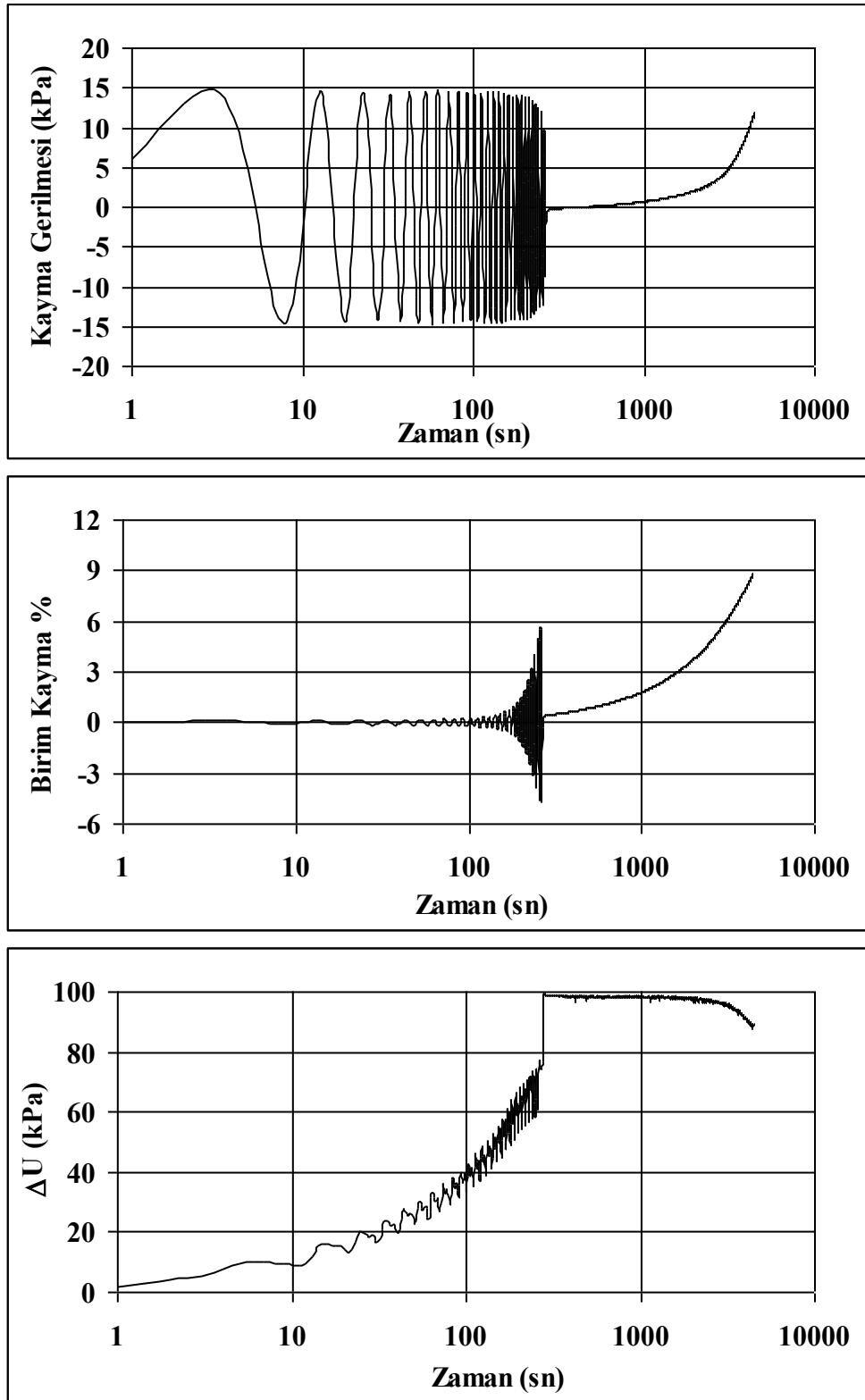
Şekil B24 DSA2 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



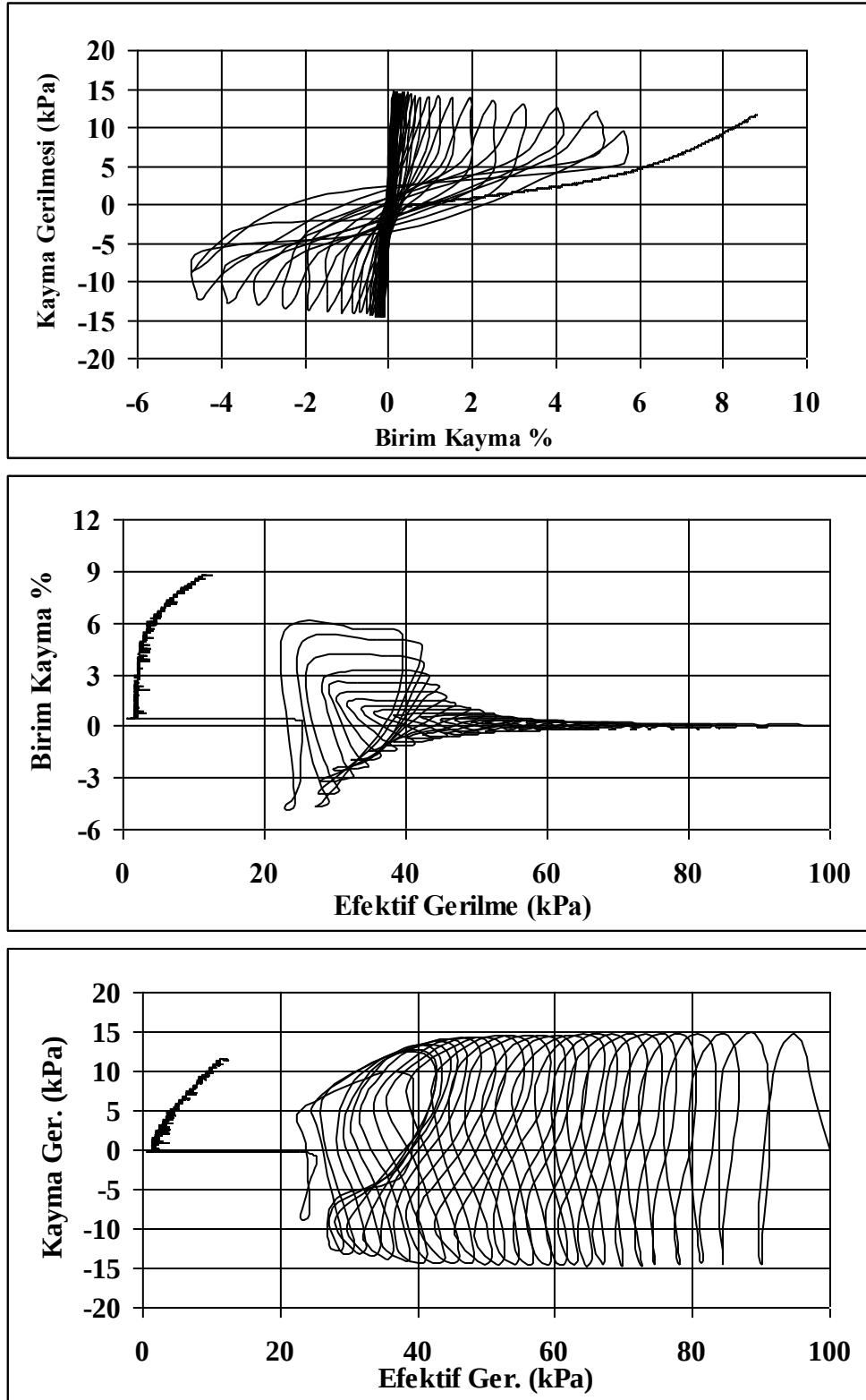
Şekil B25 DSA3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



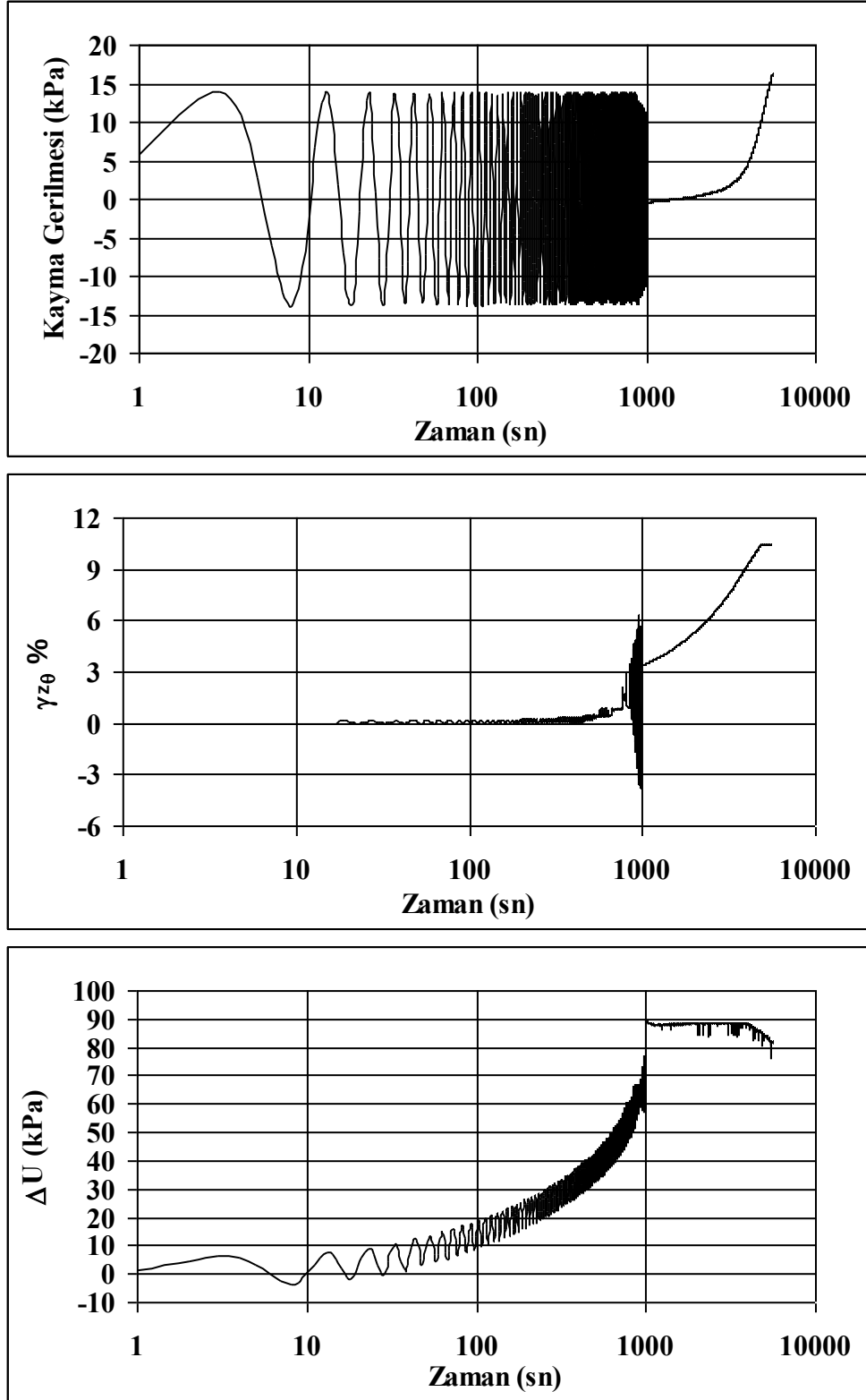
Şekil B26 DSA3 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



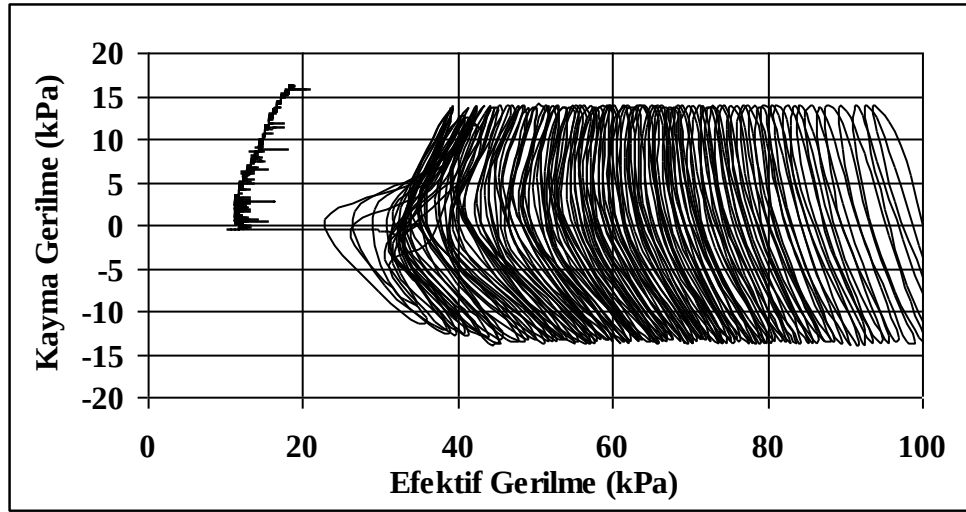
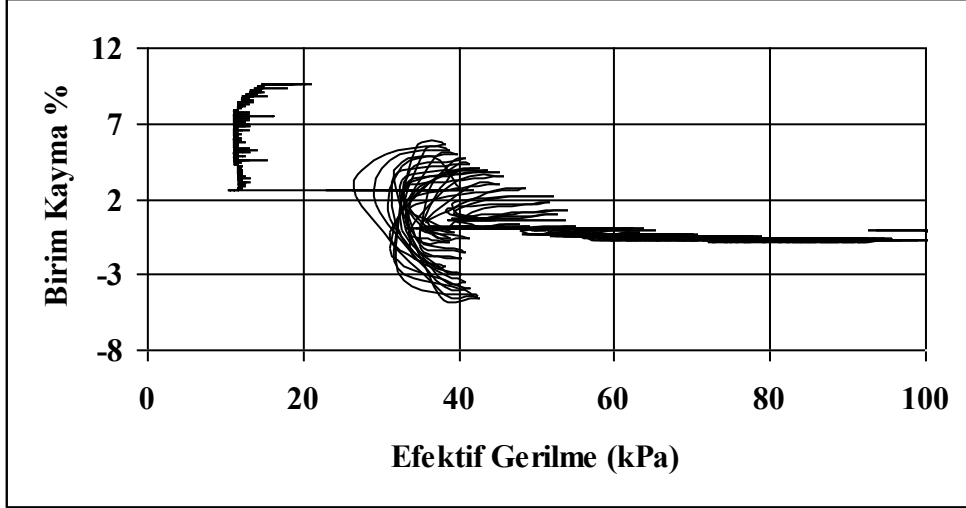
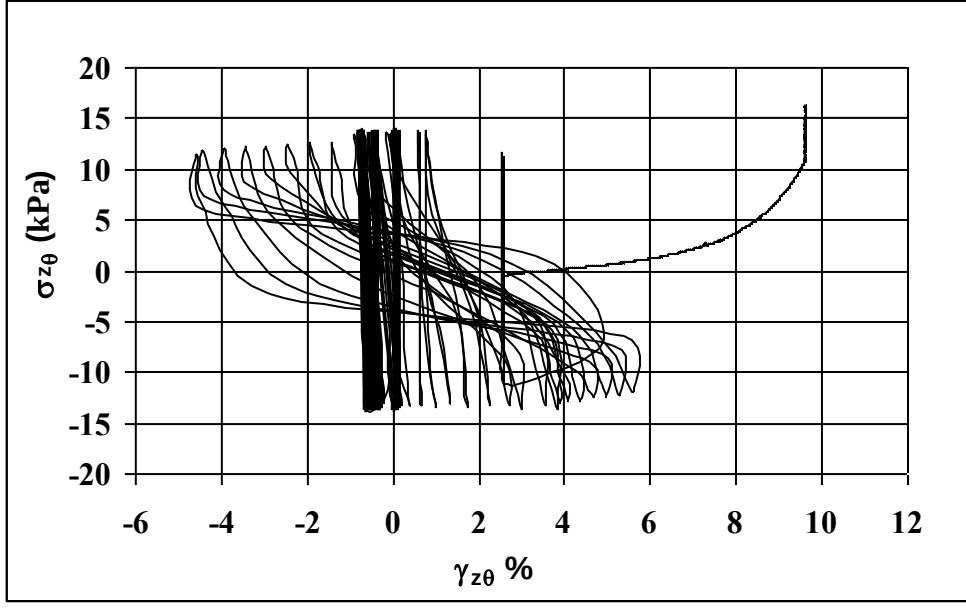
Şekil B27 DSA4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



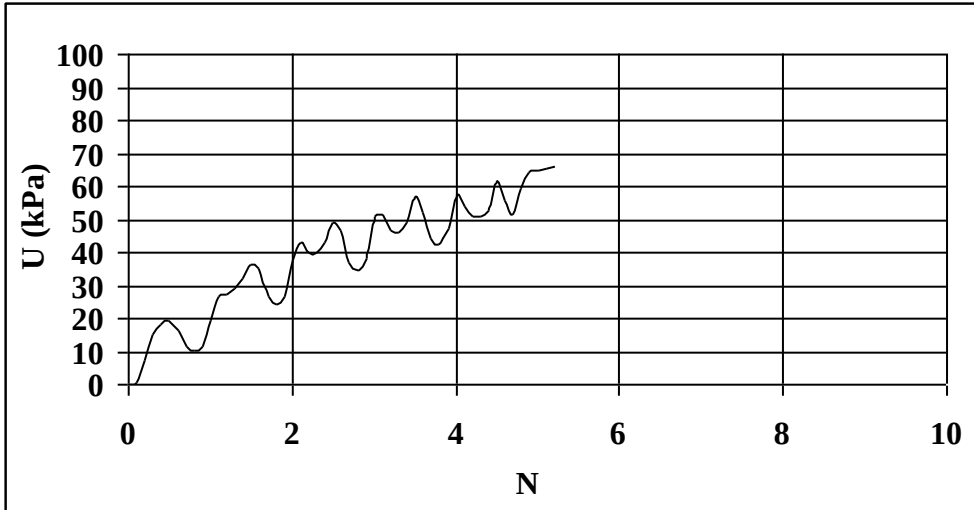
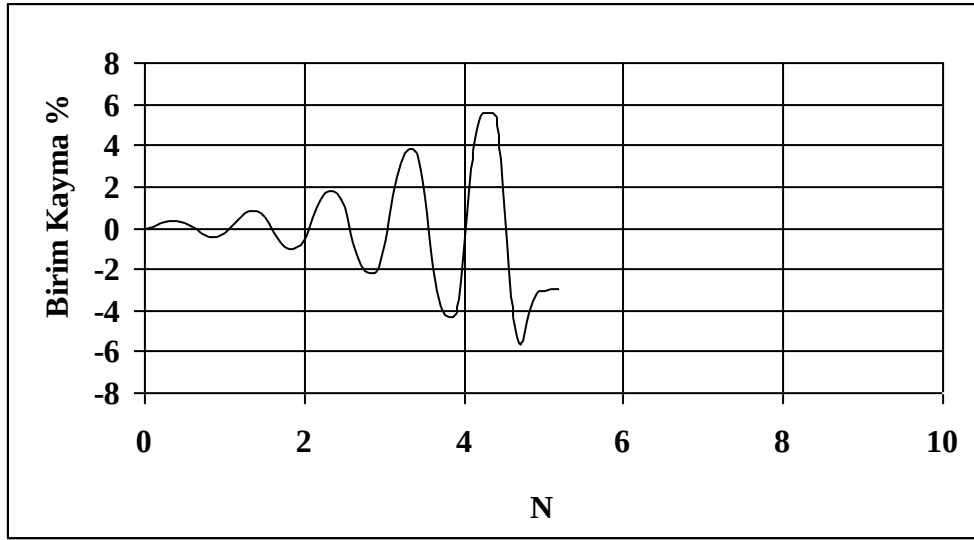
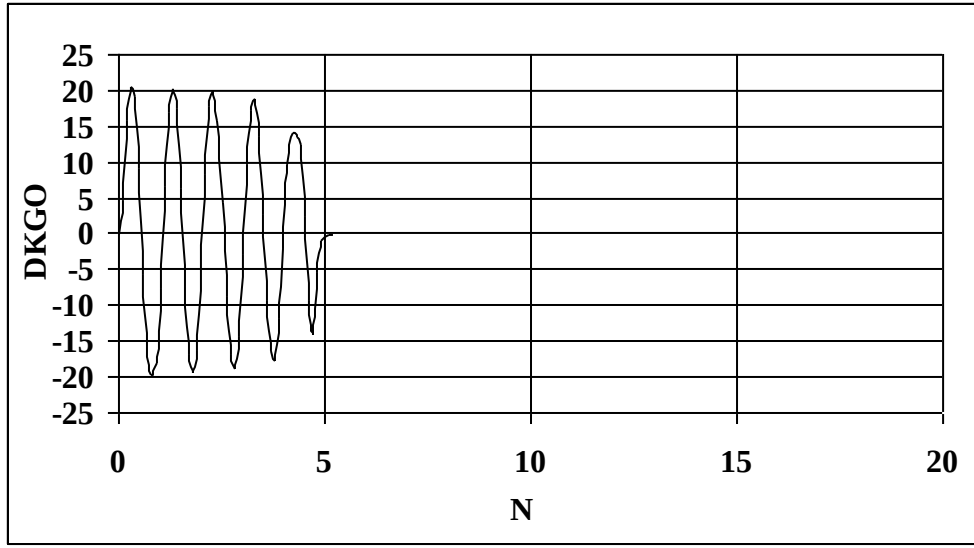
Şekil B28 DSA4 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



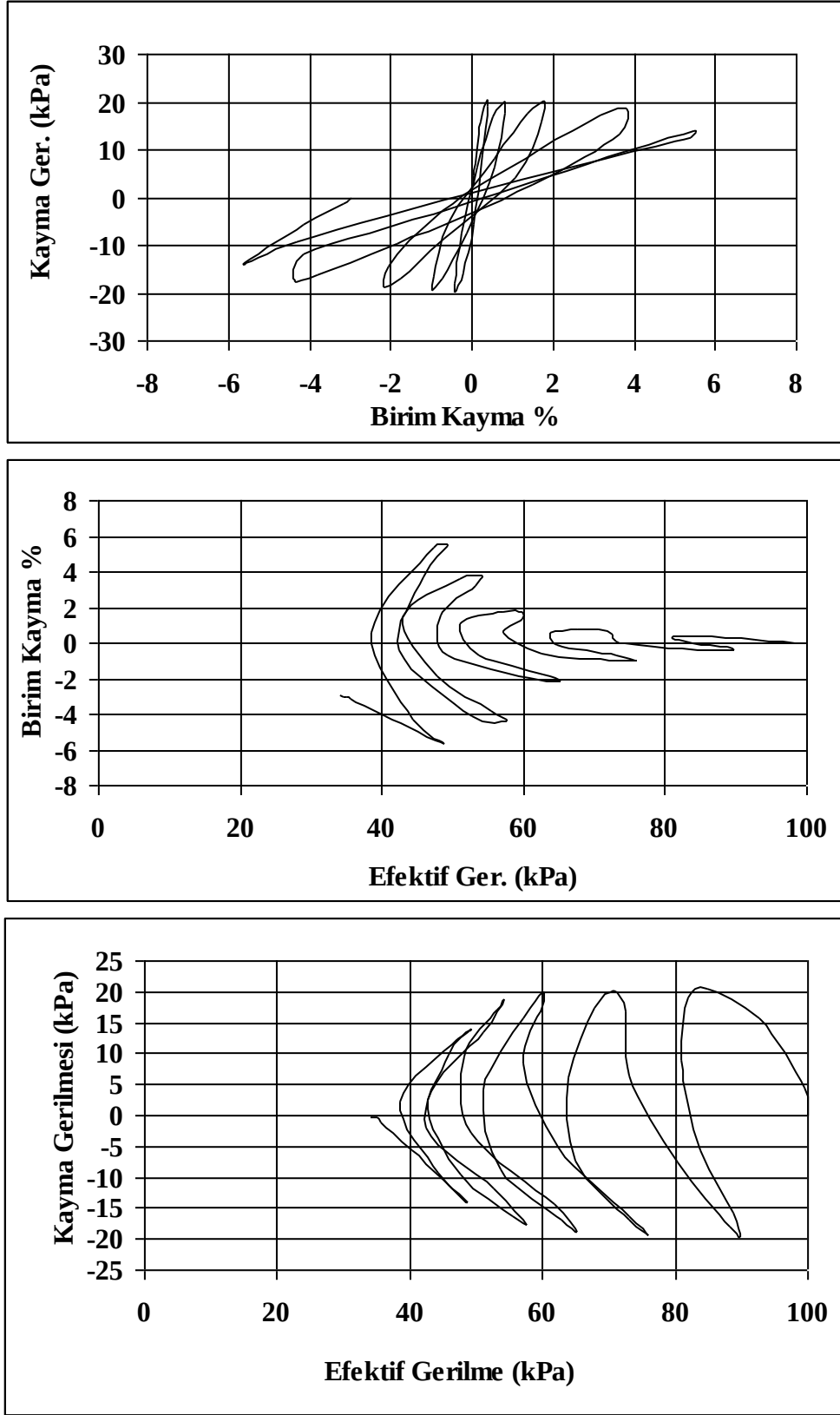
Şekil B29 DSA5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



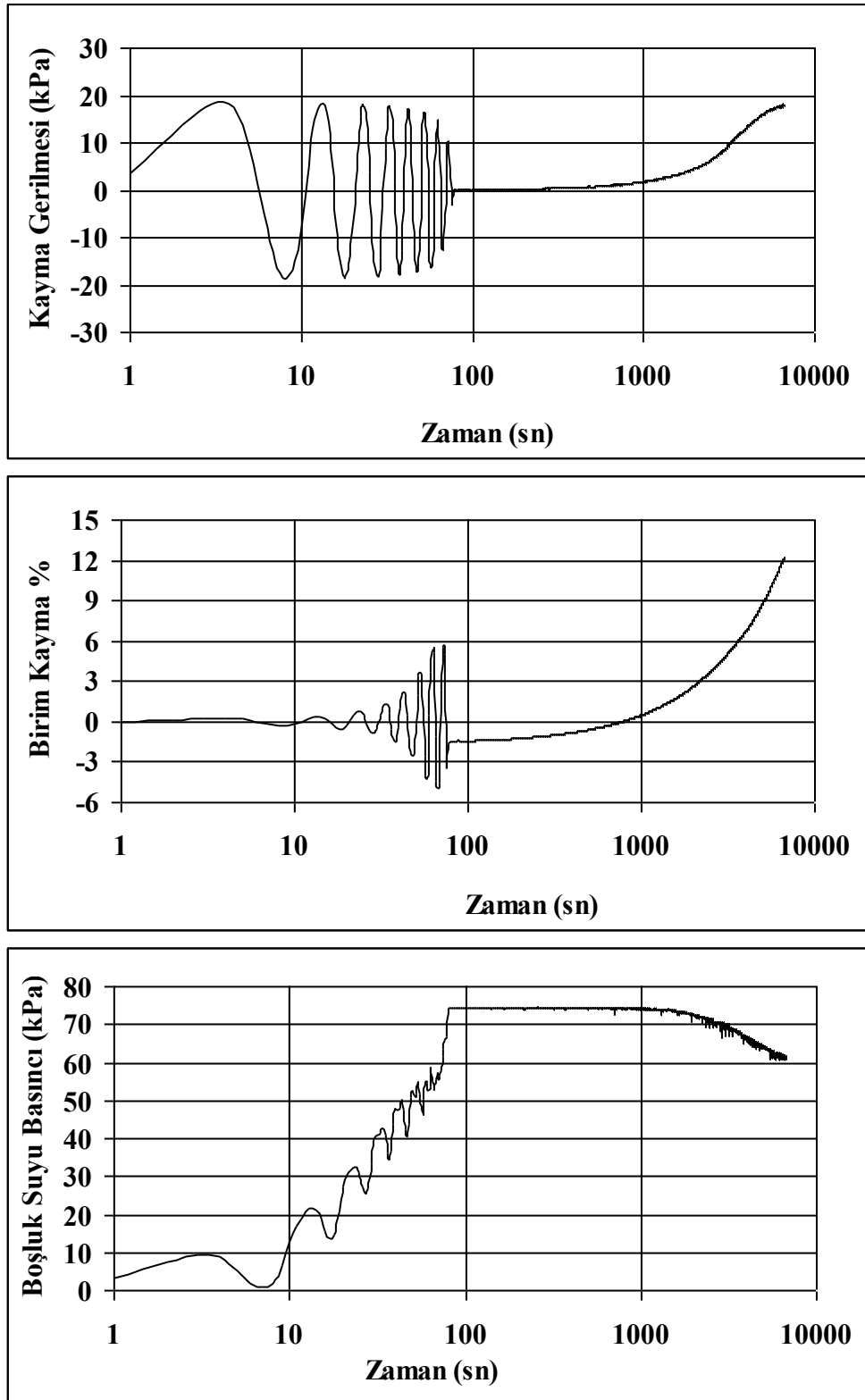
Şekil B30 DSA5 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



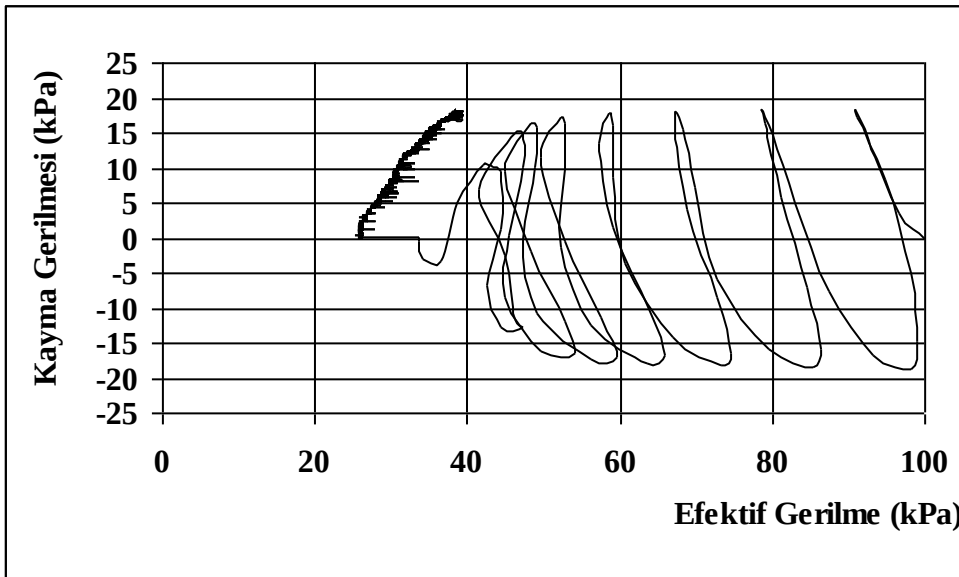
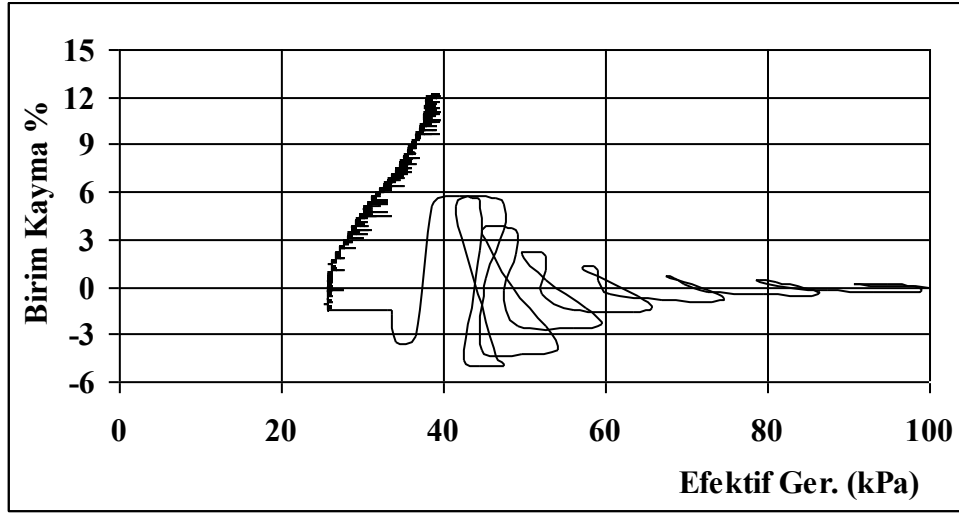
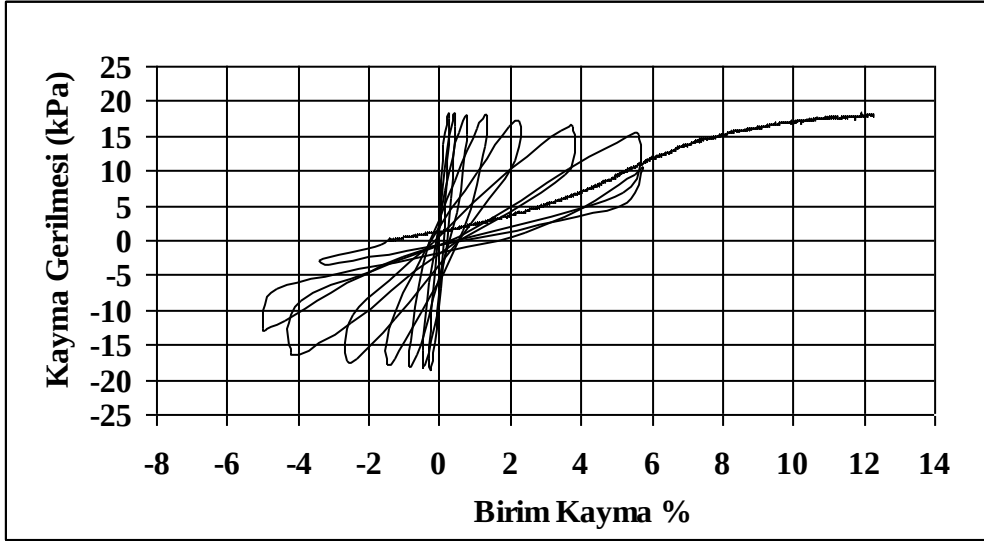
Şekil B31 DA1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



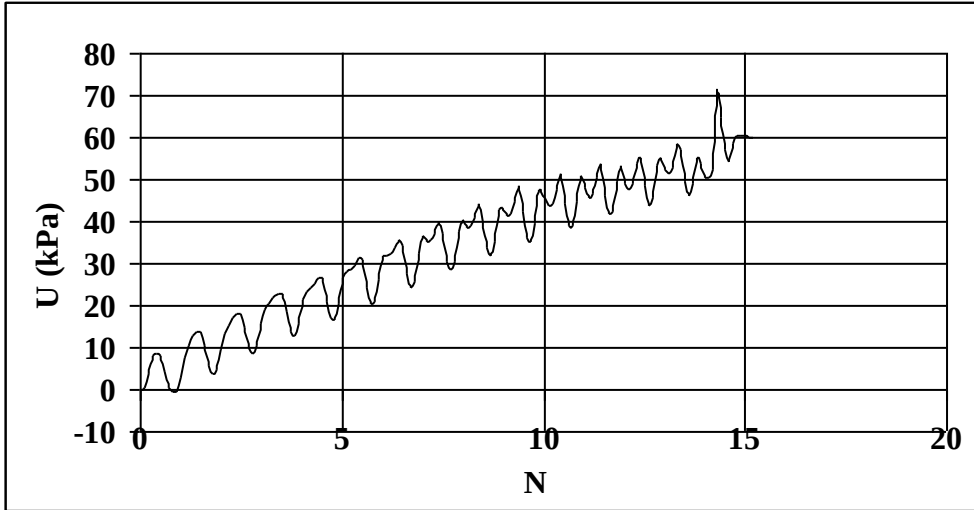
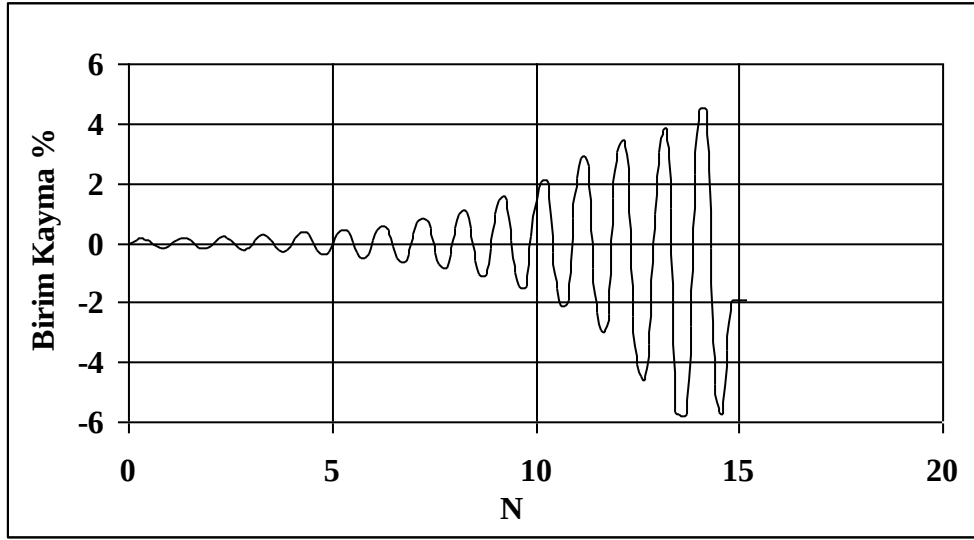
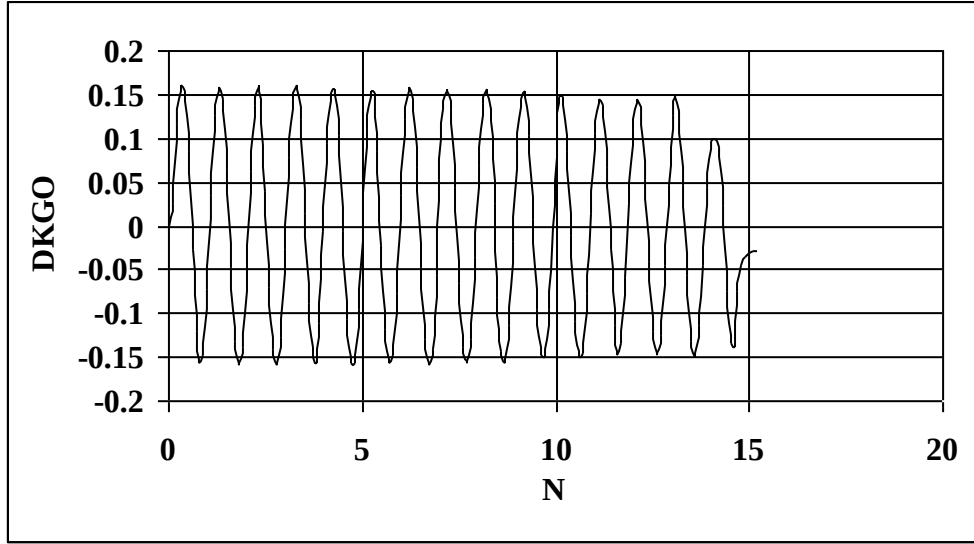
Şekil B32 DA1 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



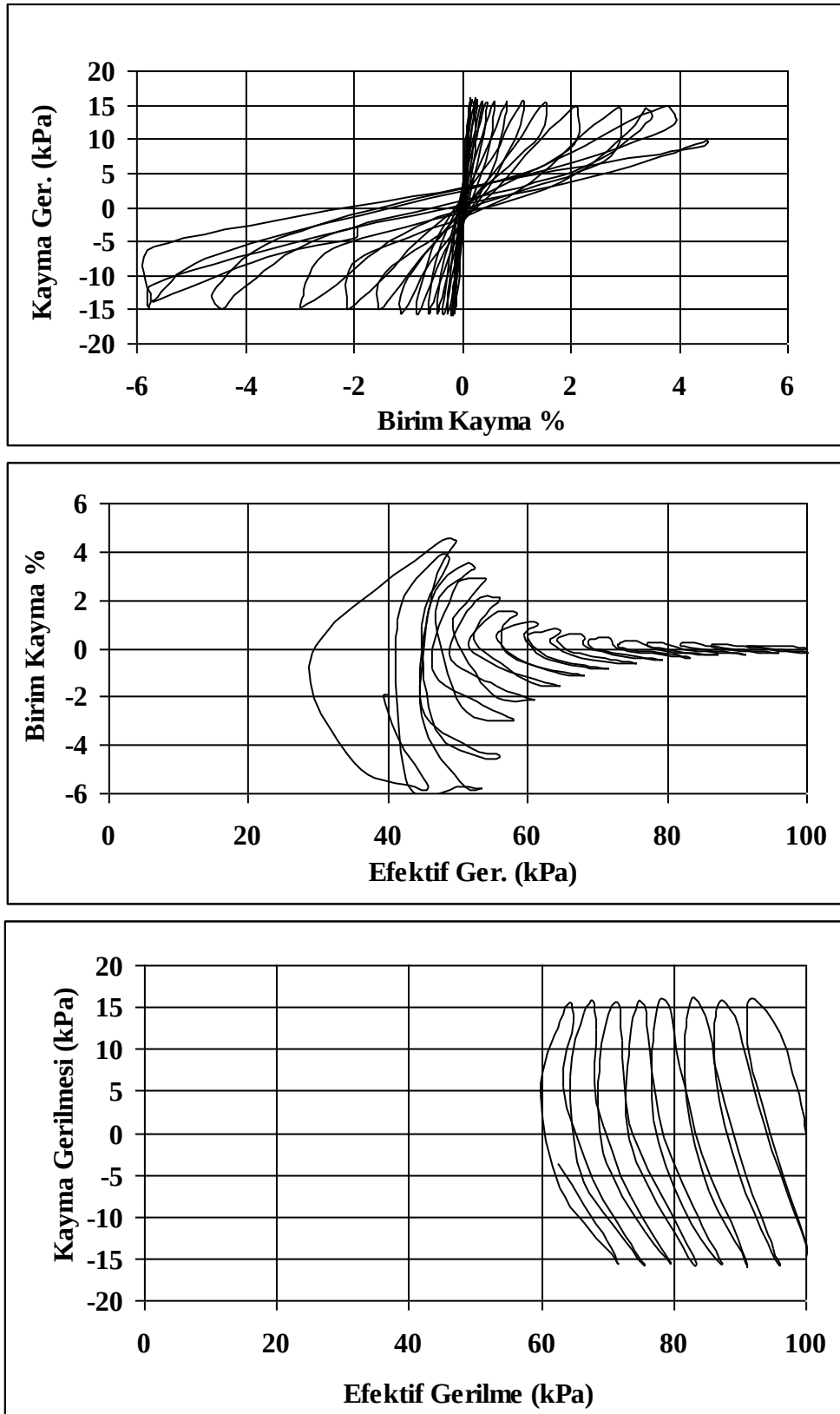
Şekil B33 DSA6 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimleri



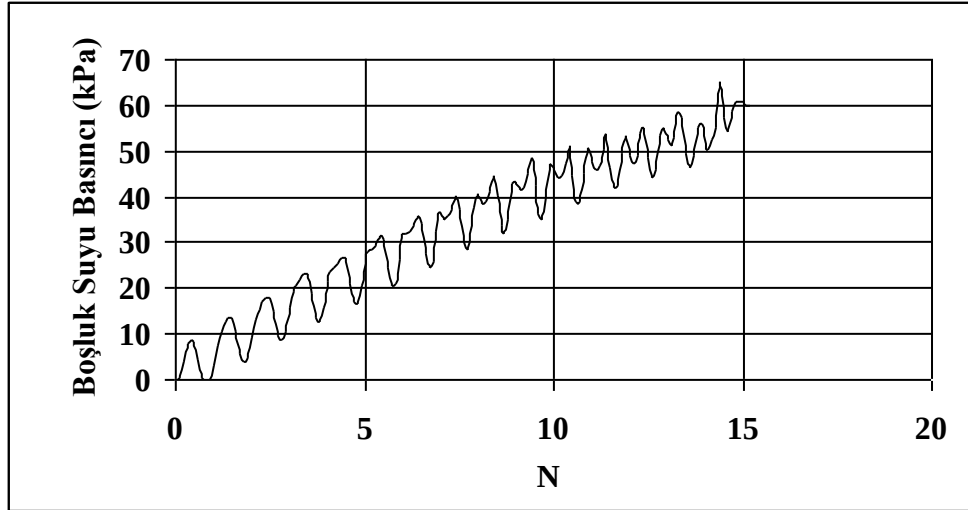
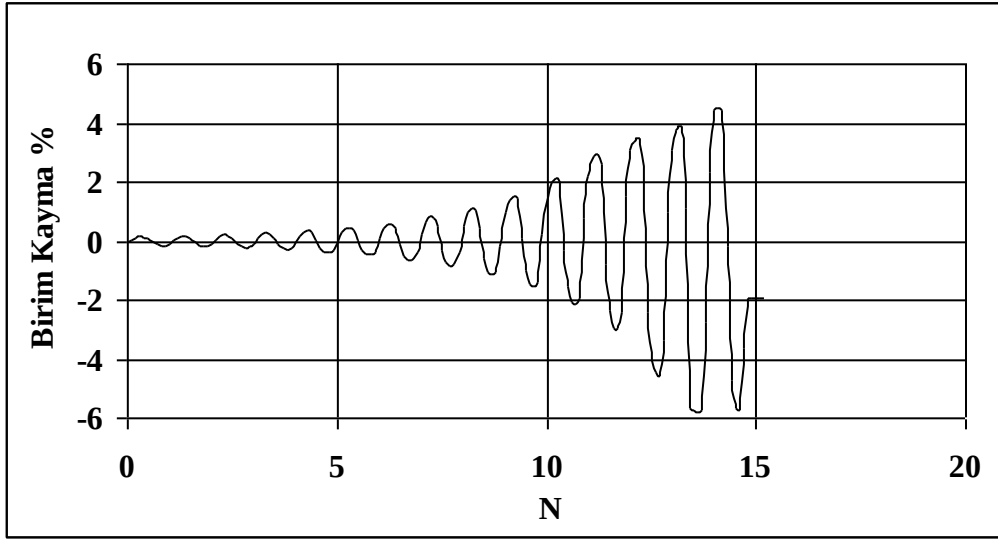
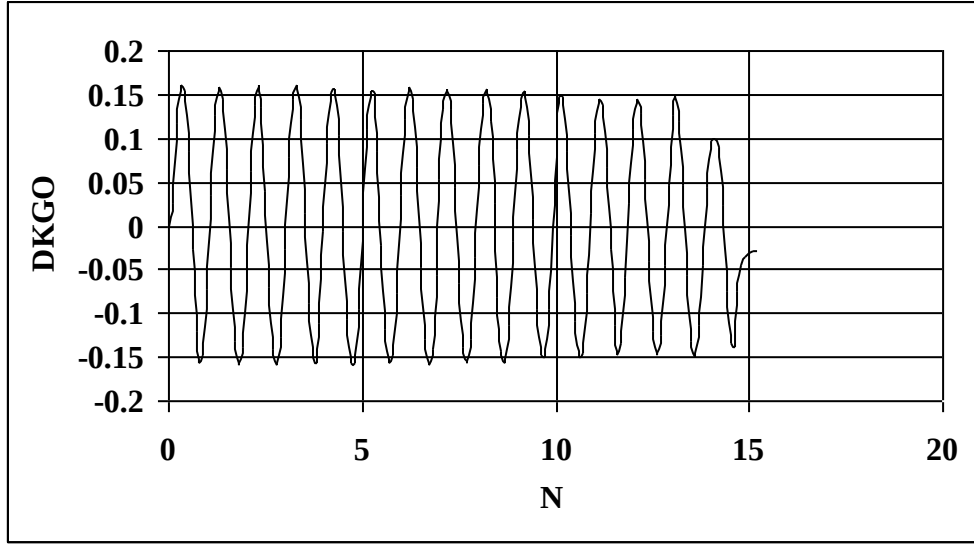
Şekil B34 DSA6 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



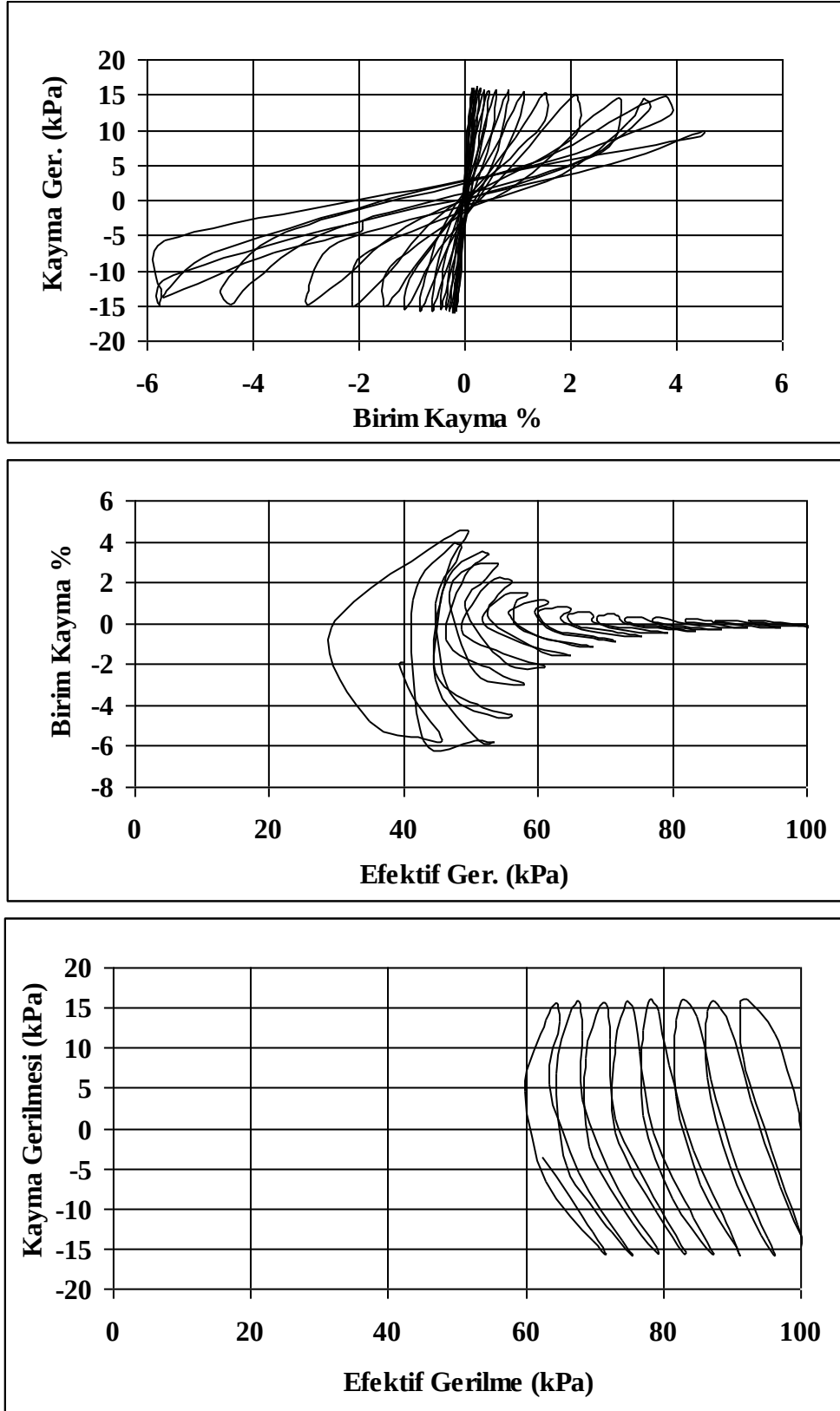
Şekil B35 DA2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



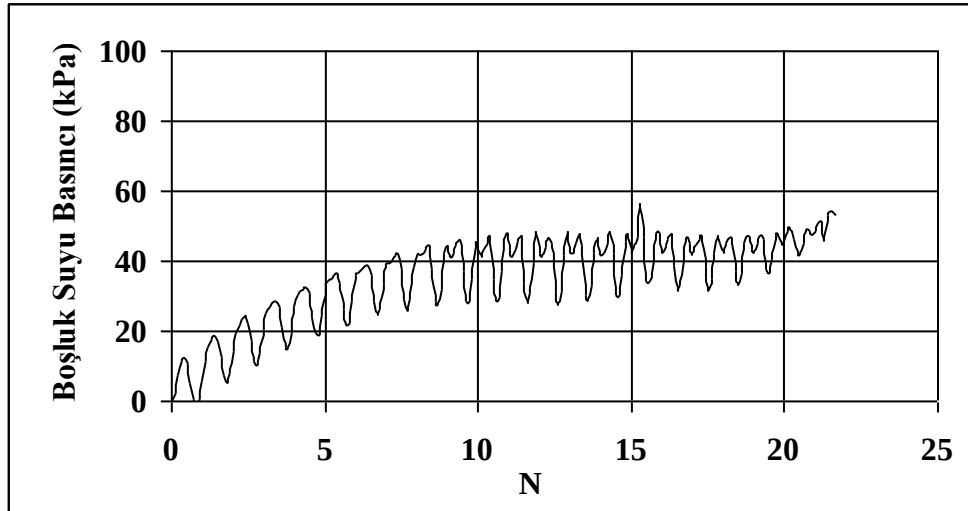
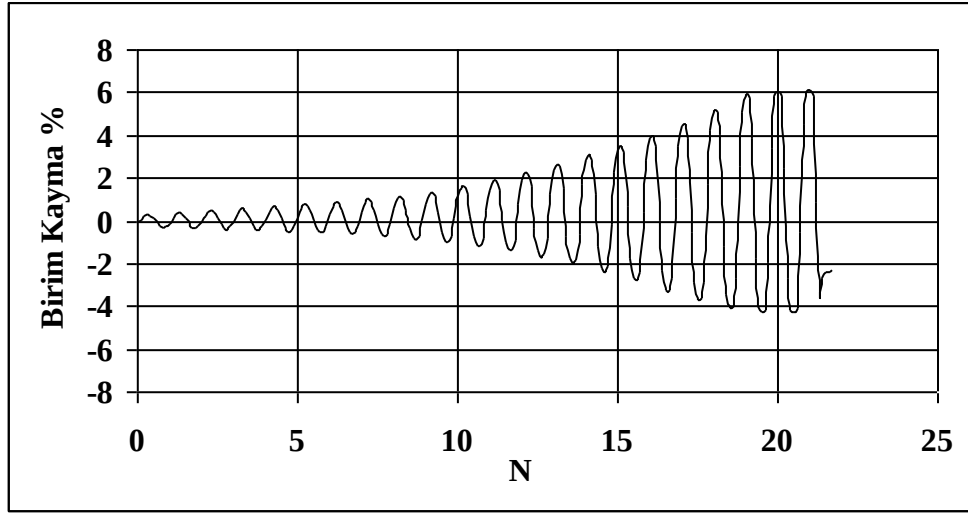
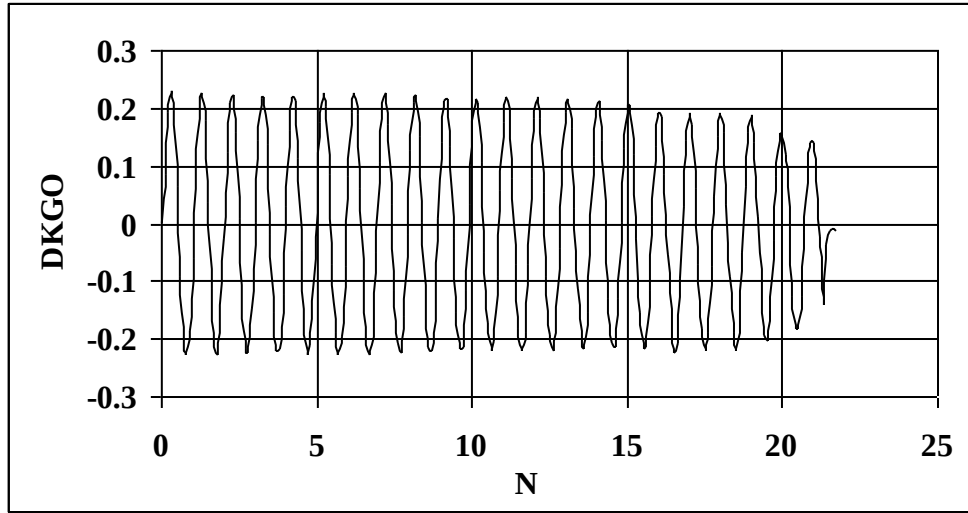
Şekil B36 DA2 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



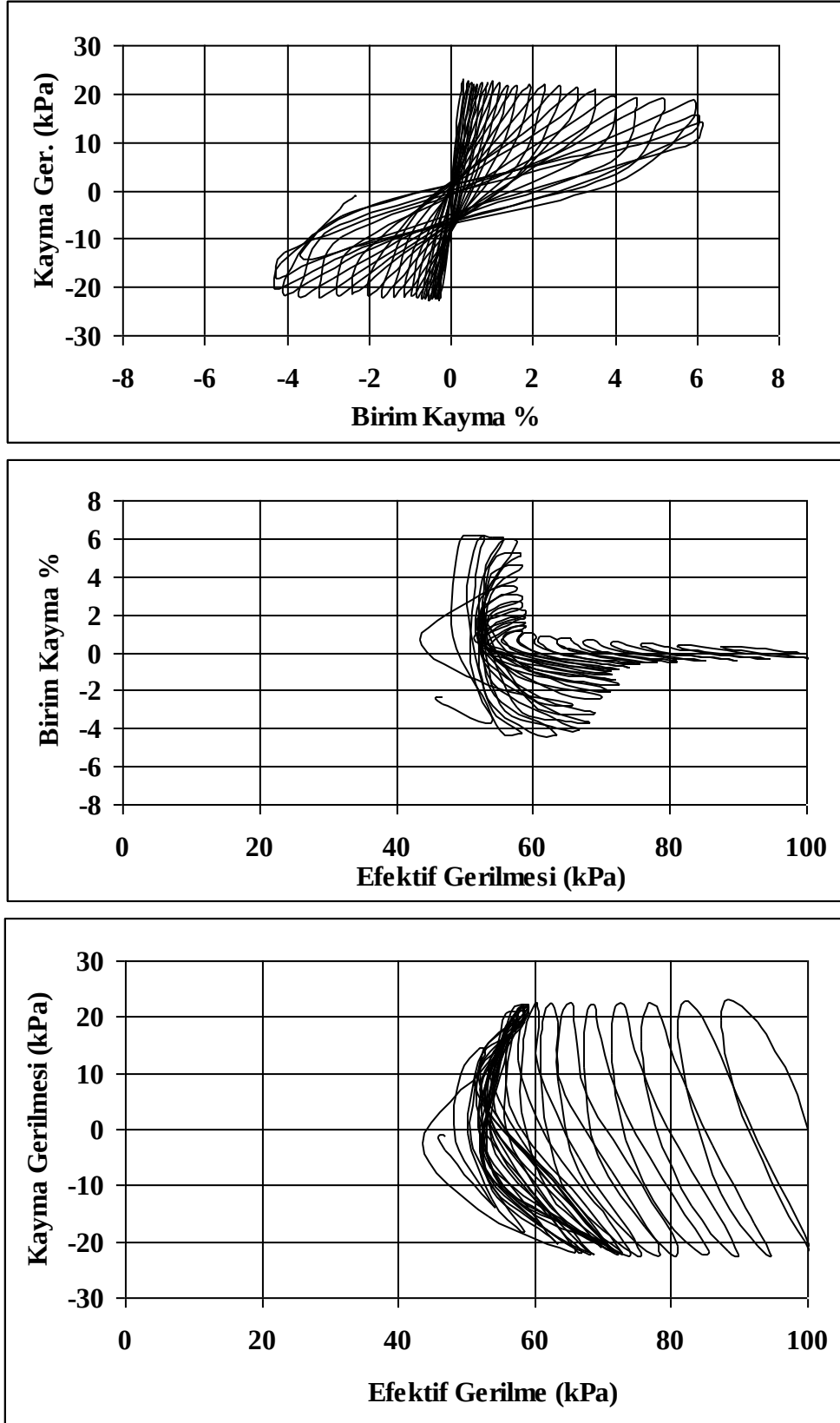
Şekil B37 DA3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



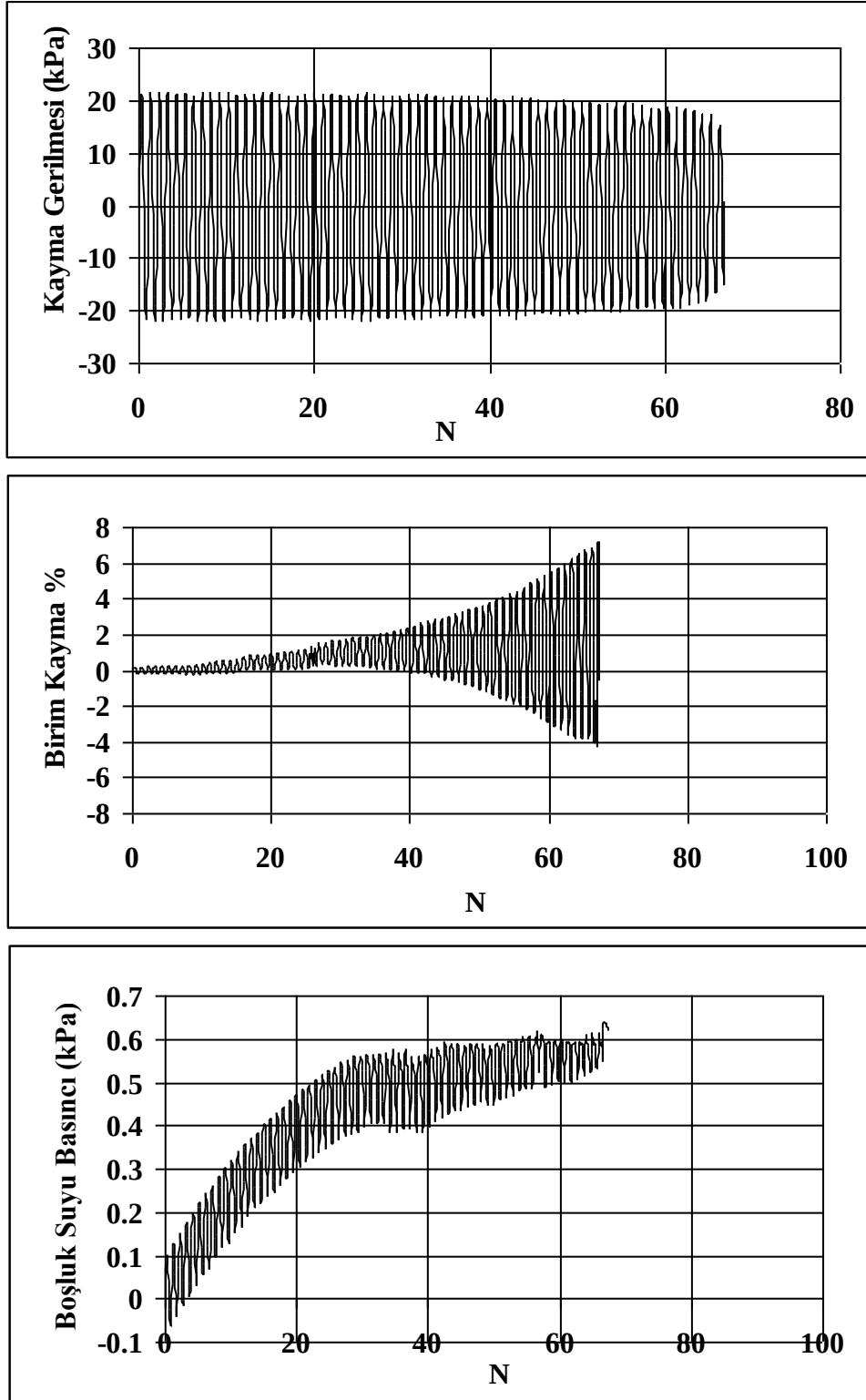
Şekil B38 DA3 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



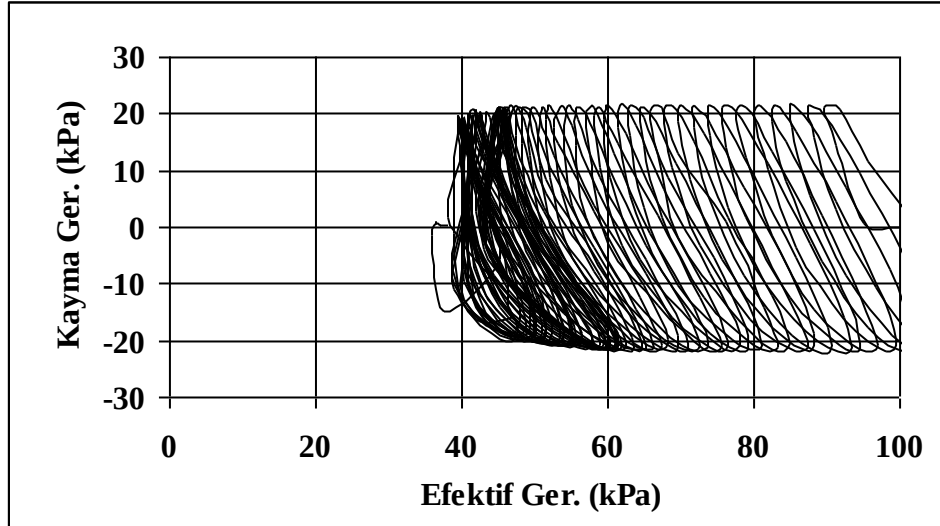
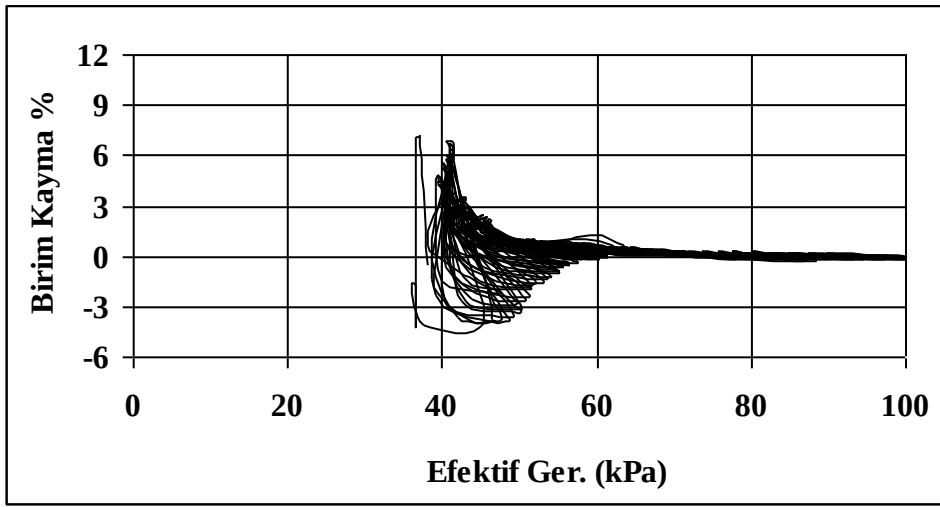
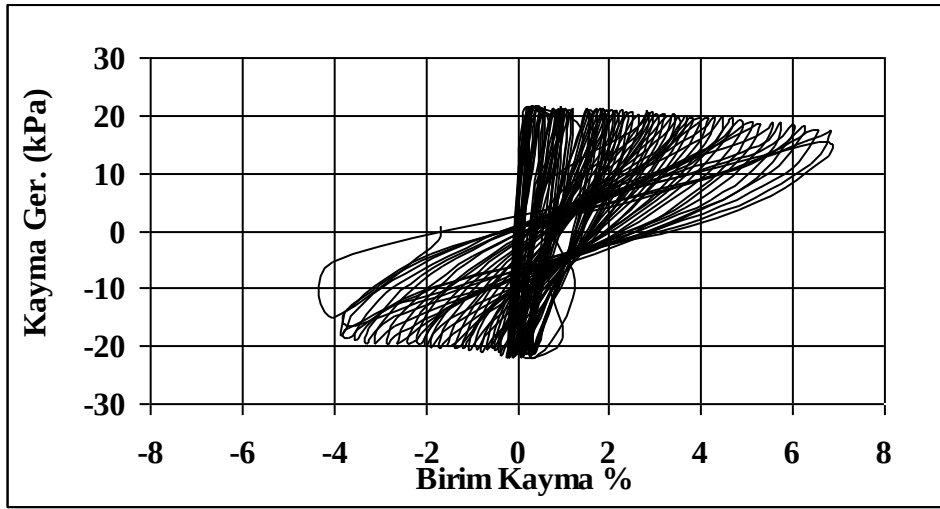
Şekil B39 DA4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



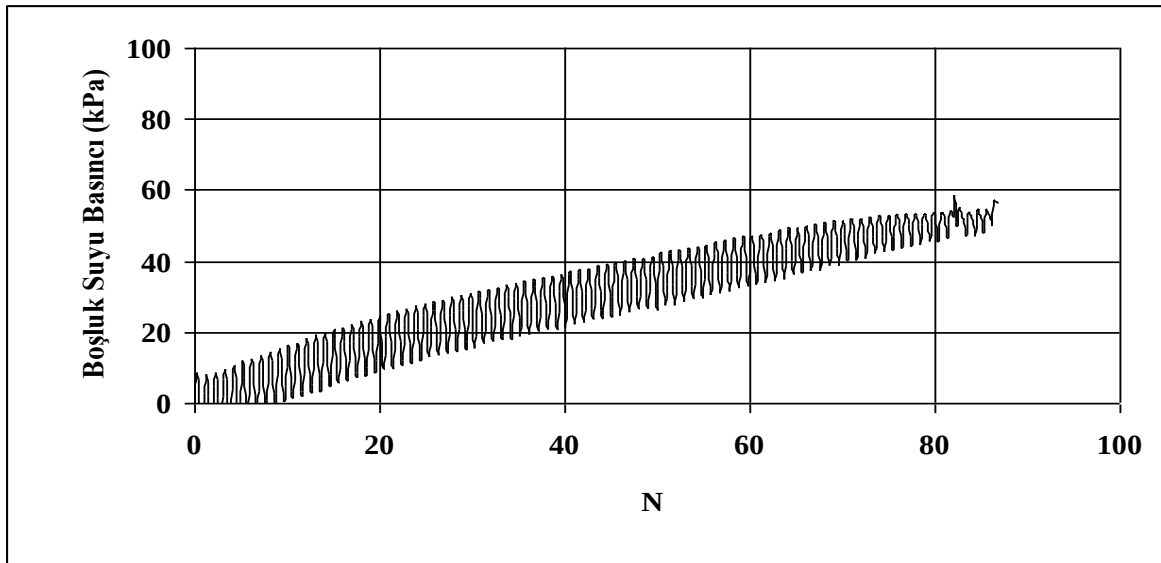
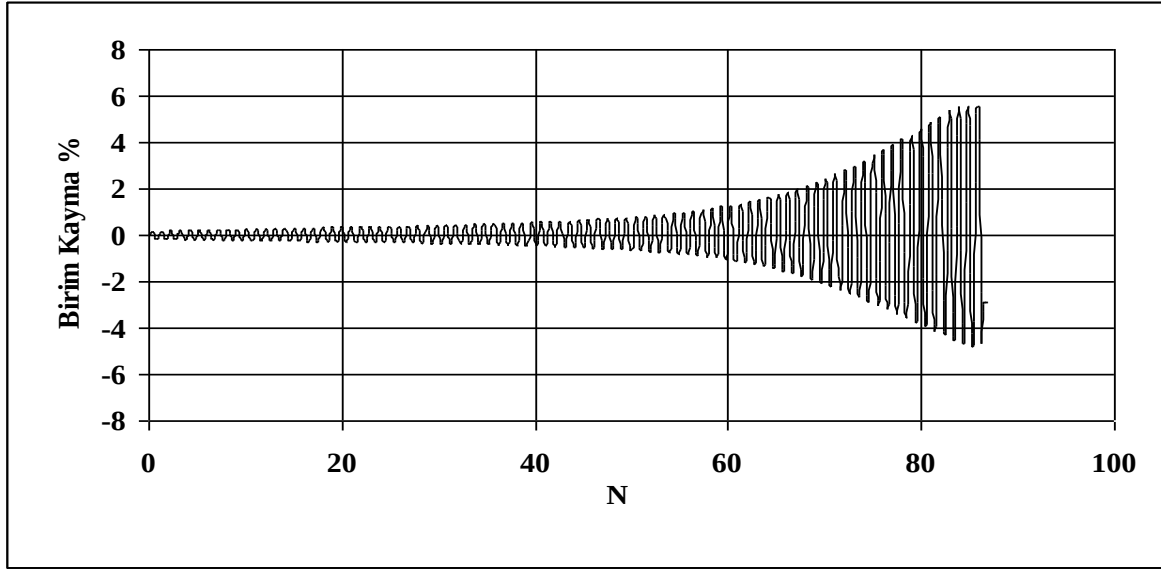
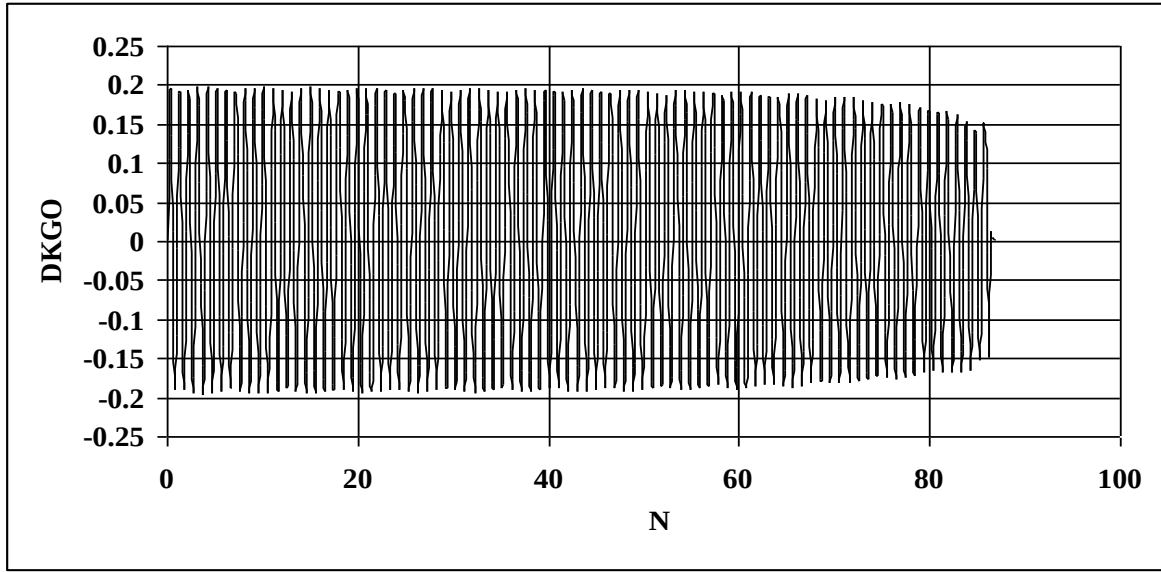
Şekil B40 DA4 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



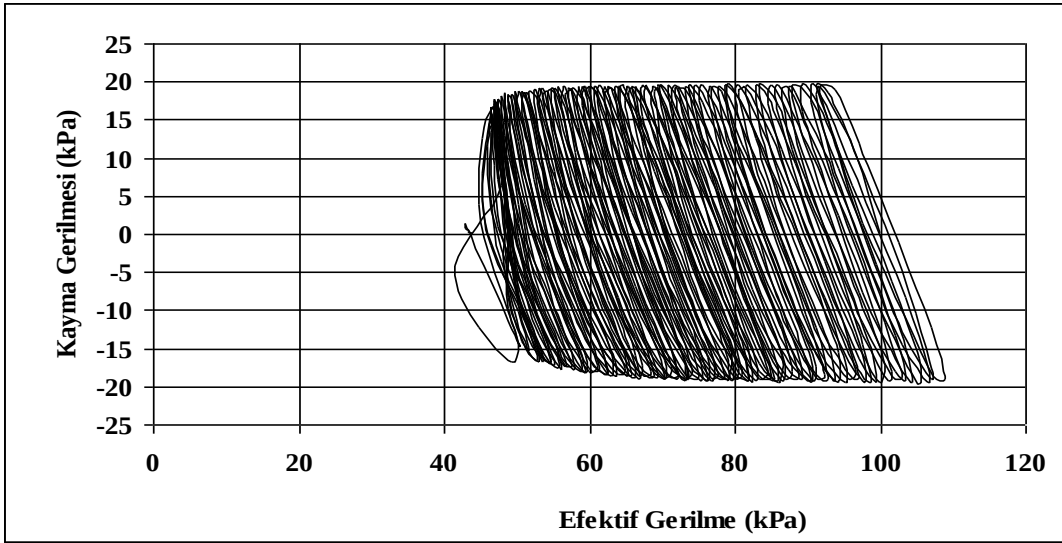
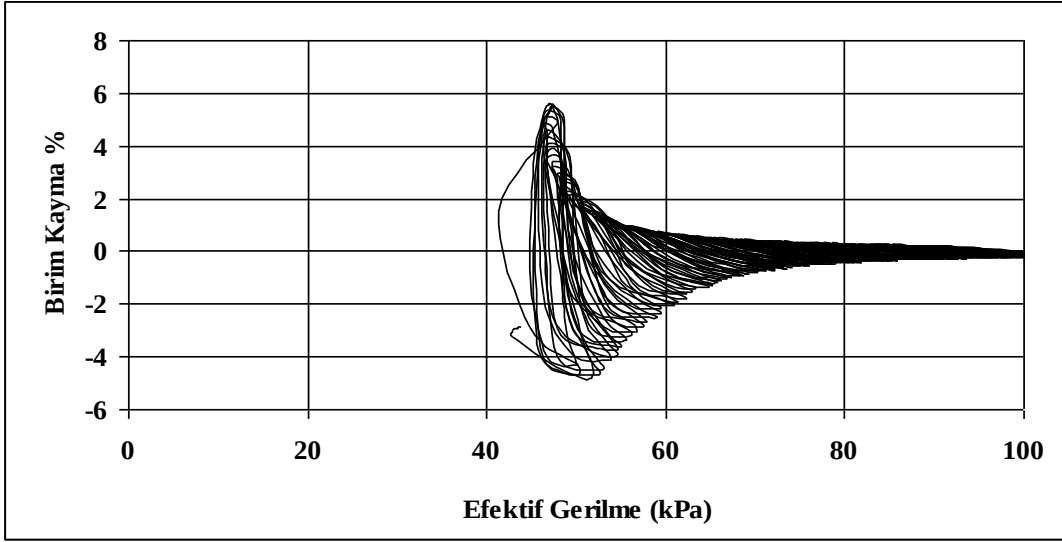
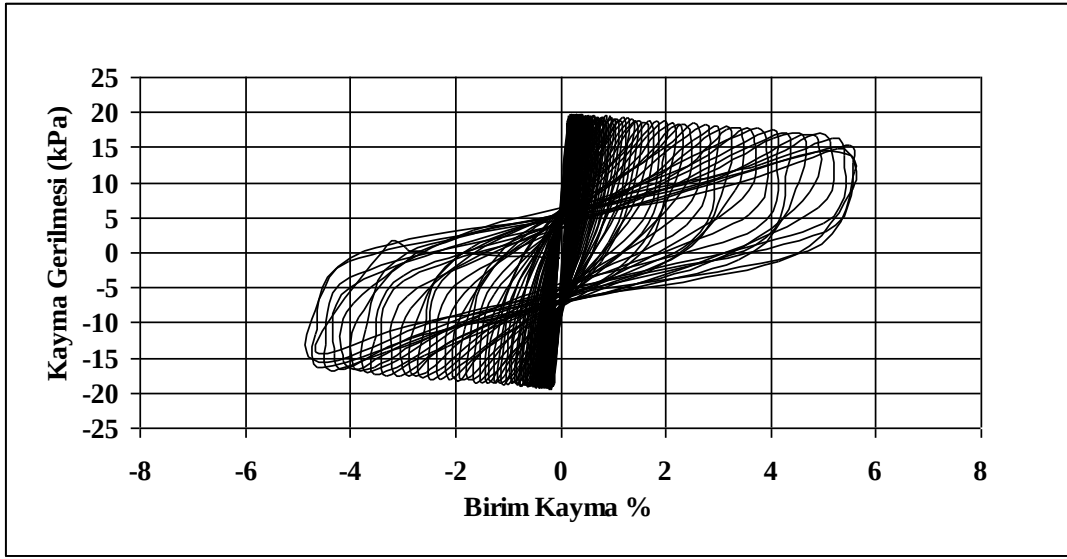
Şekil B41 DA5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimleri



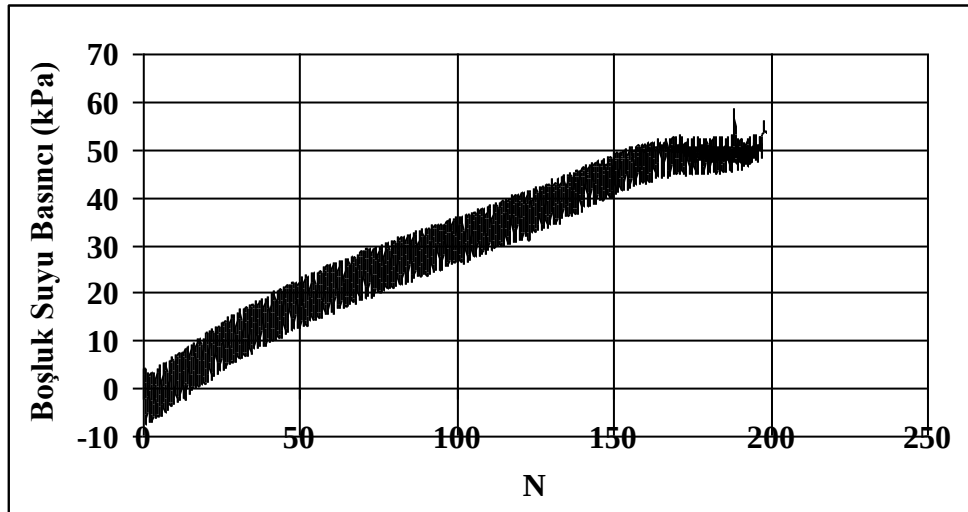
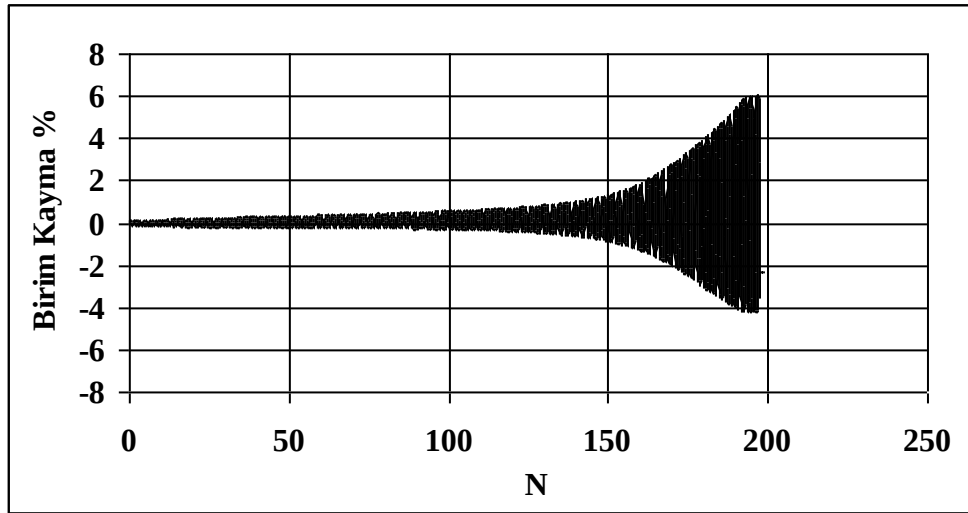
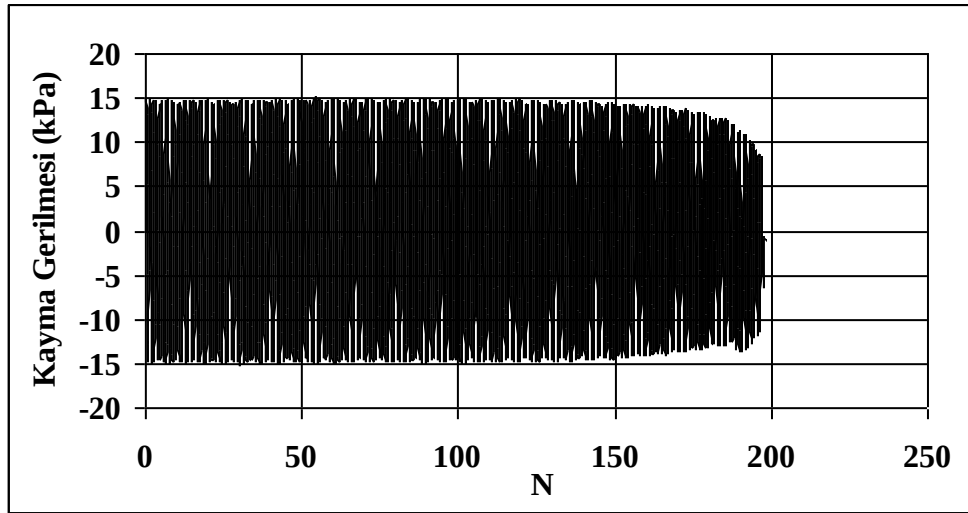
Şekil B42 DA5 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



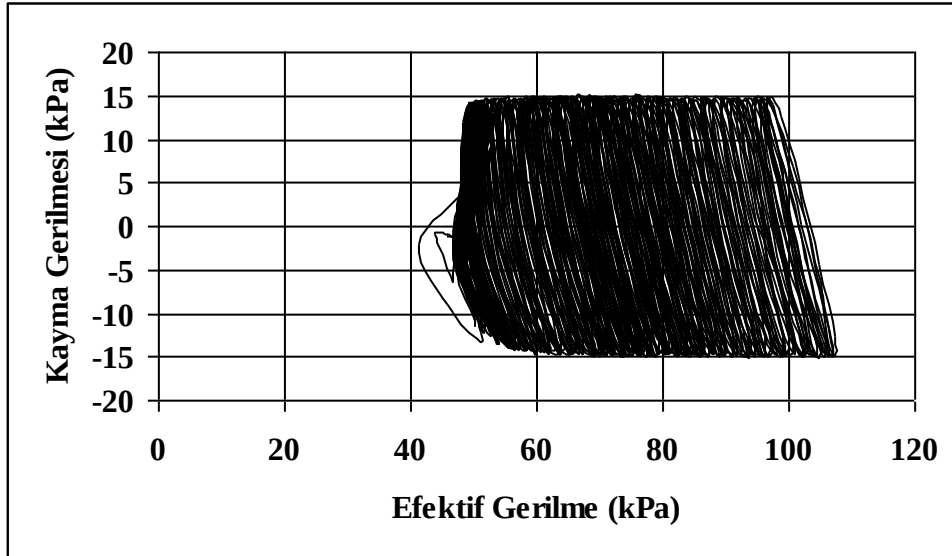
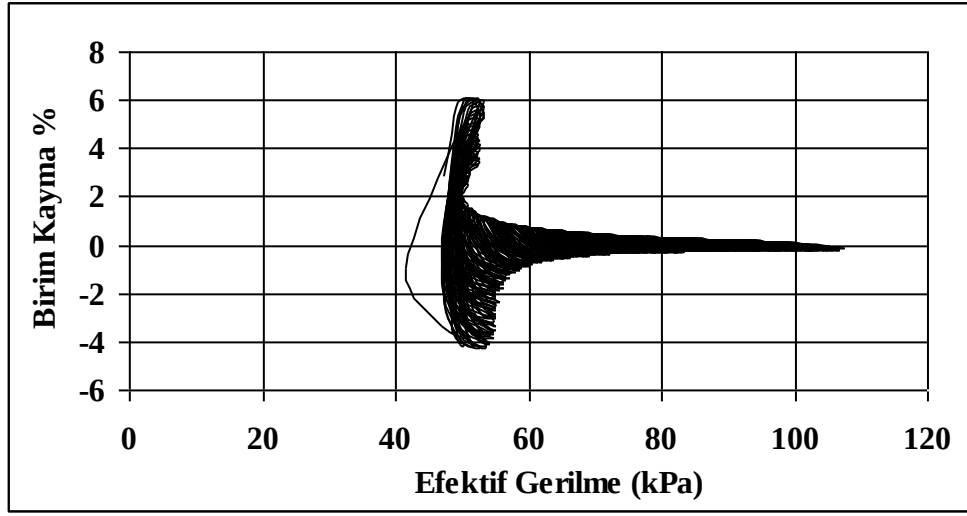
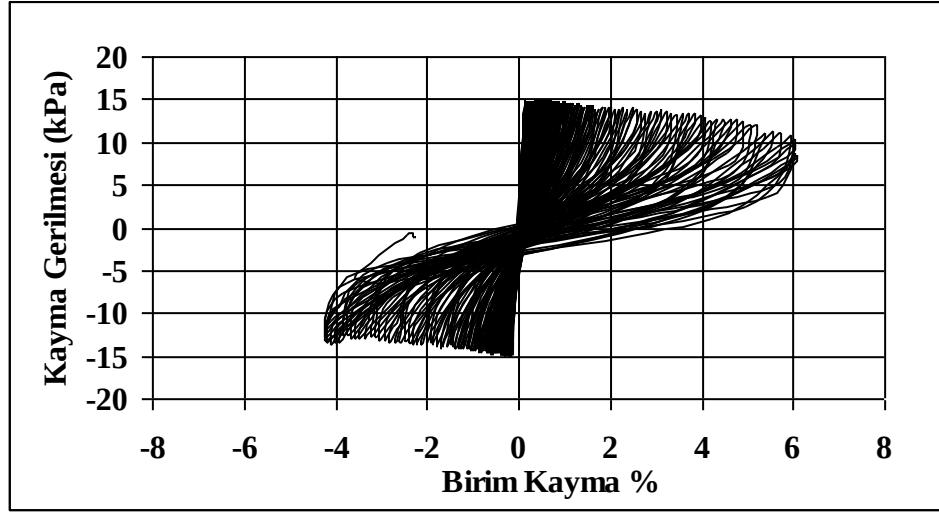
Şekil B43 DA6 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



Şekil B44 DA6 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi

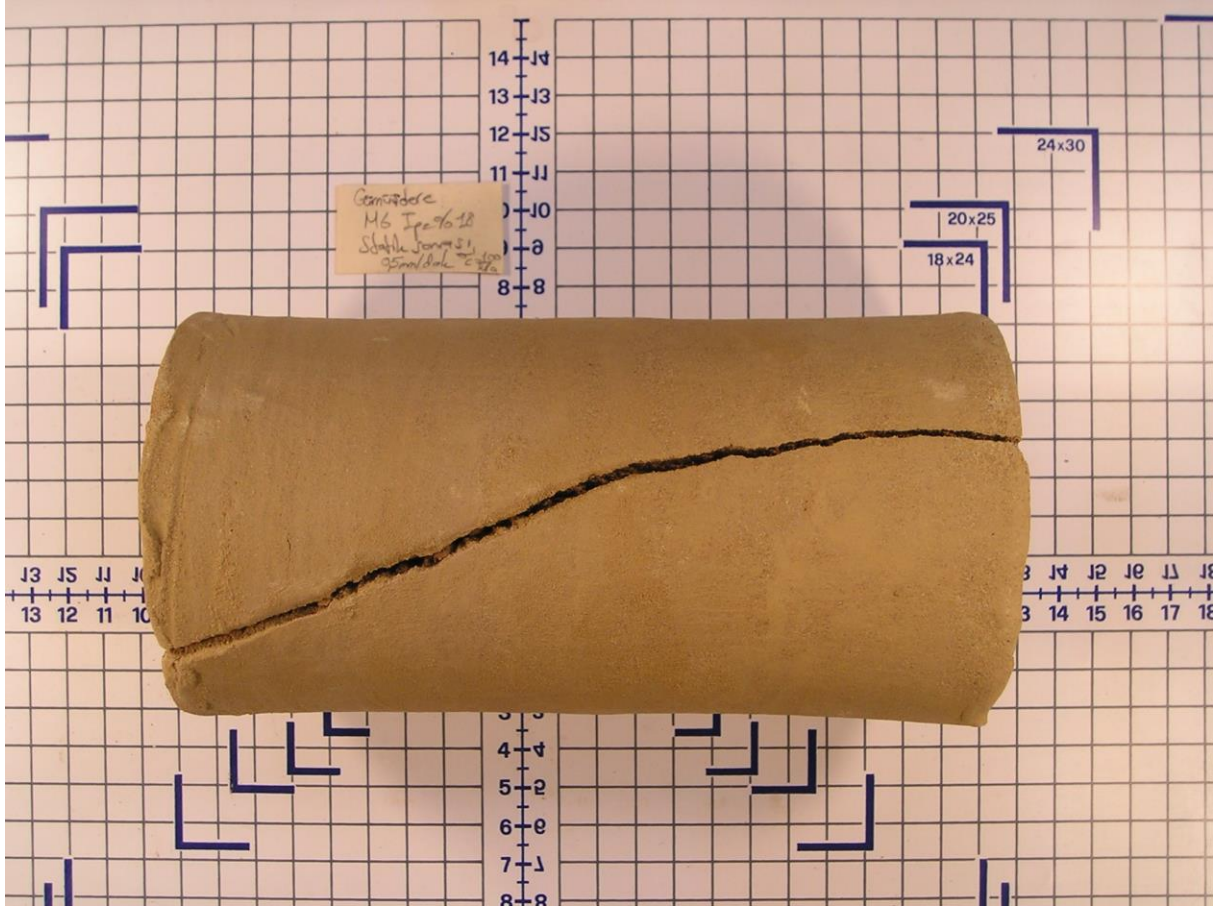


Şekil B45 DA7 nolu deneyde kayma gerilmesi- birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi

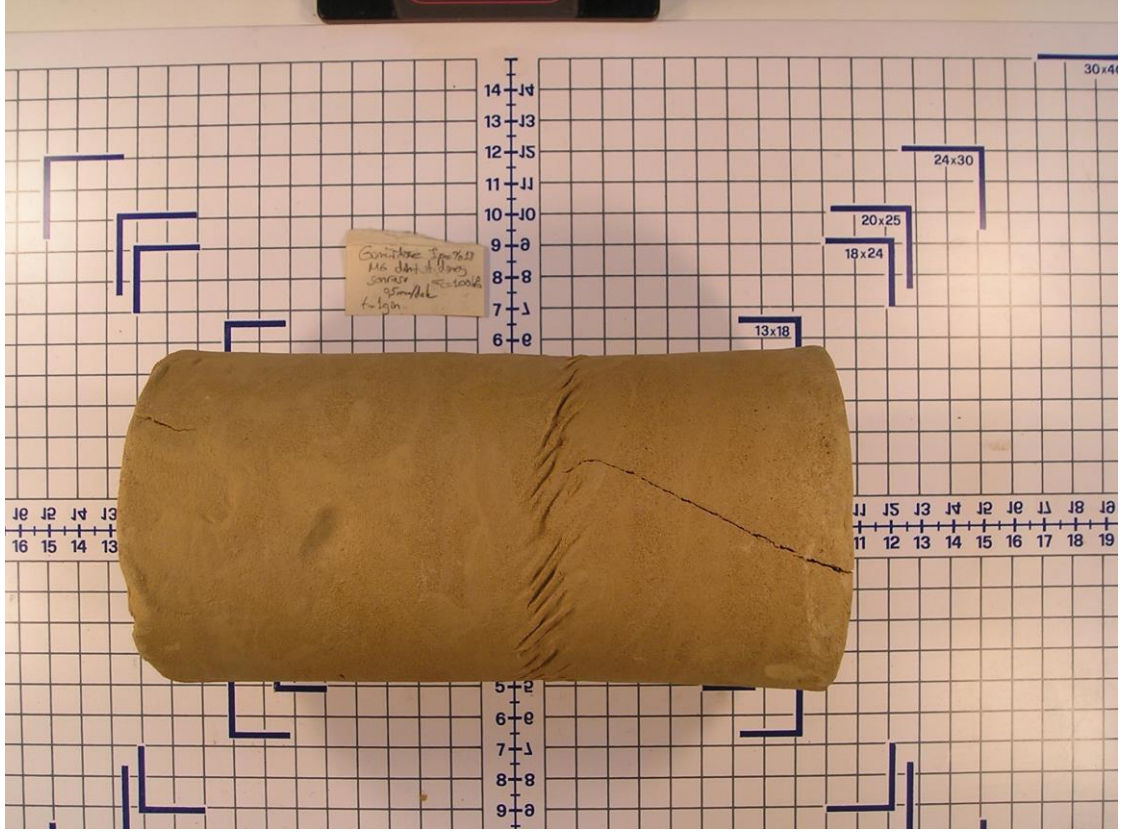


Şekil B46 DA7 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi

EK C. İNCELEMEDE KULLANILAN NUMUNELER VE OPTİK MİKROSKOP GÖRÜNTÜLERİ



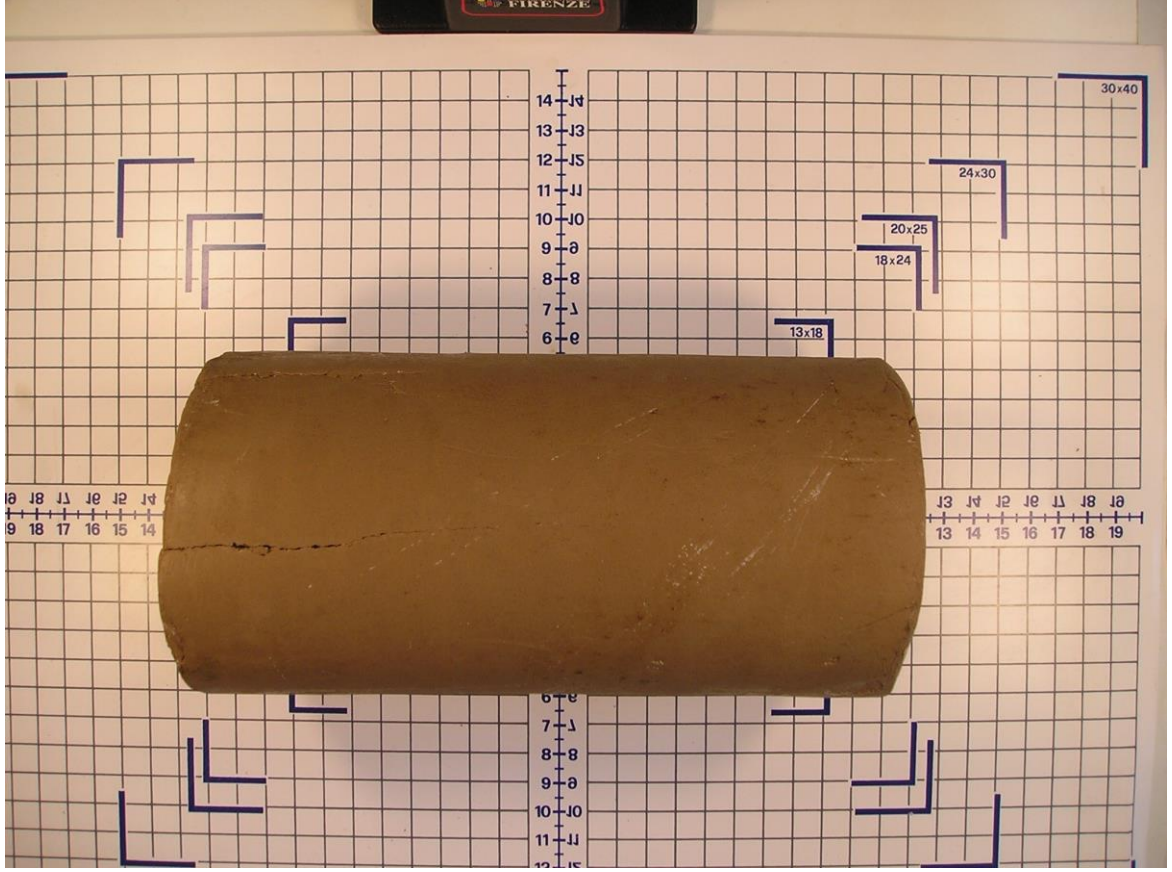
Şekil C1 SG1 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü



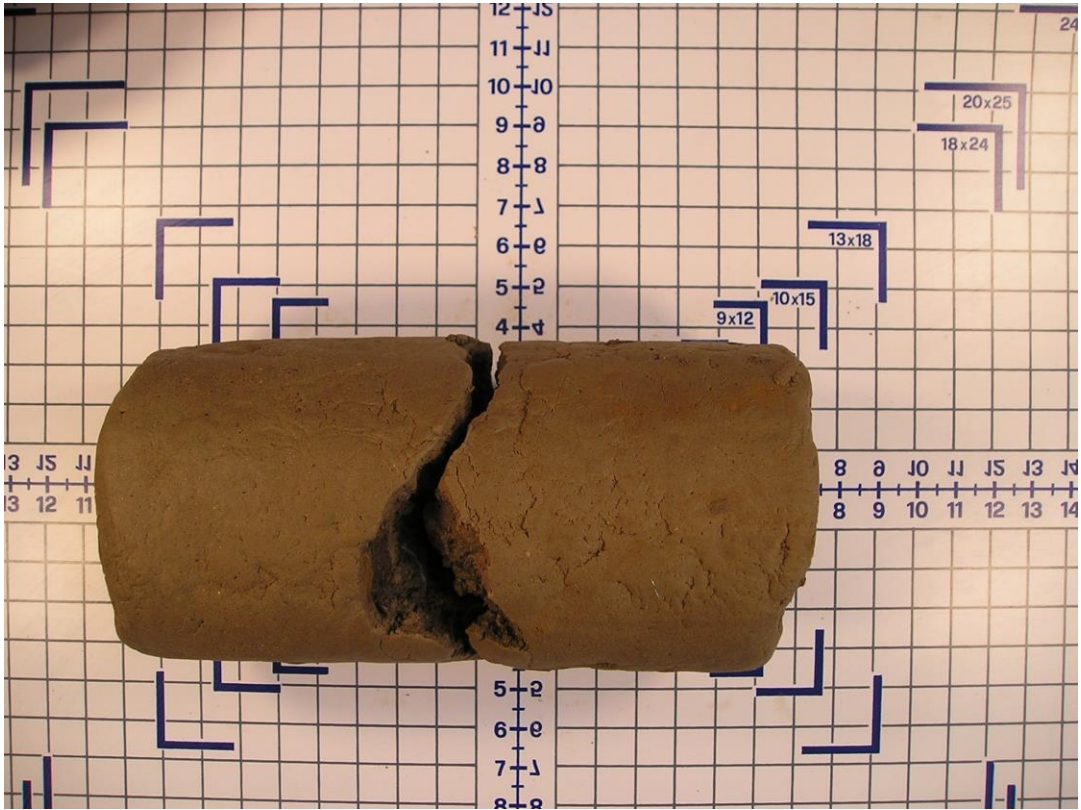
Şekil C2 DSG1 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü



Şekil C3 DÖ1 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü



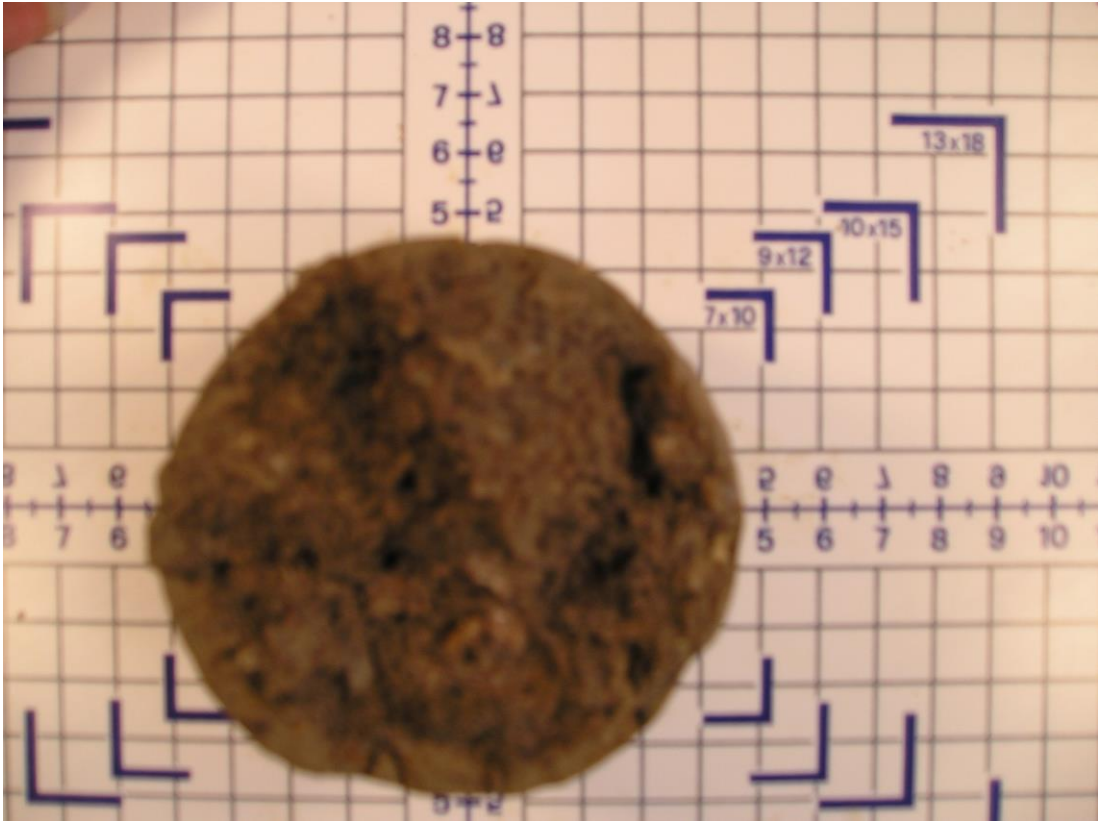
Şekil C4 DSG5 no'lu deneyden sonra Gümüşdere laboratuvar numunesinin görünümü



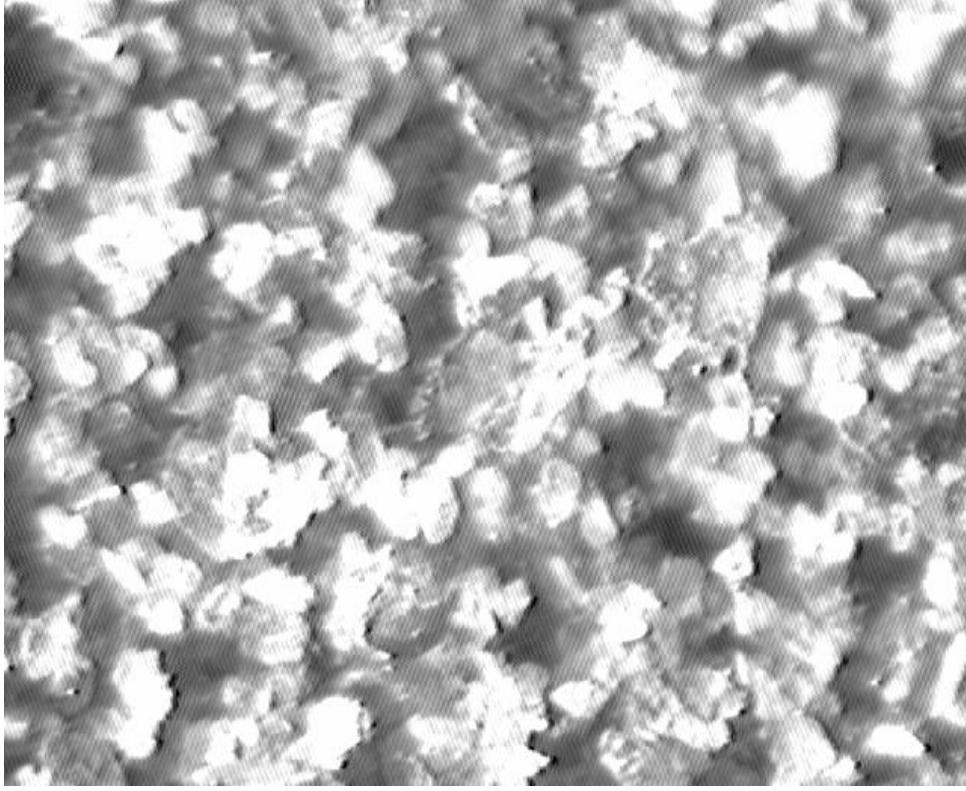
Şekil C5 DÖ2 no'lu deneyden sonra Adapazarı örselenmemiş numunesinin görünümü



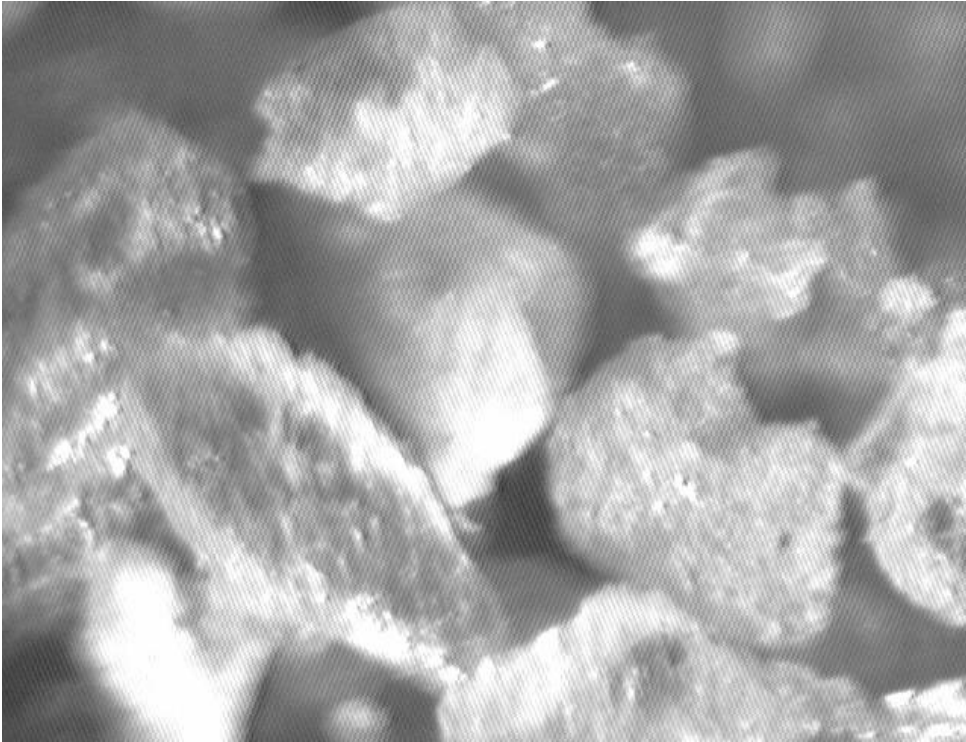
Şekil C6 DSÖ1 no'lu deneyden sonra İzmir-Çiğli örselenmemiş numunesinin görünümü



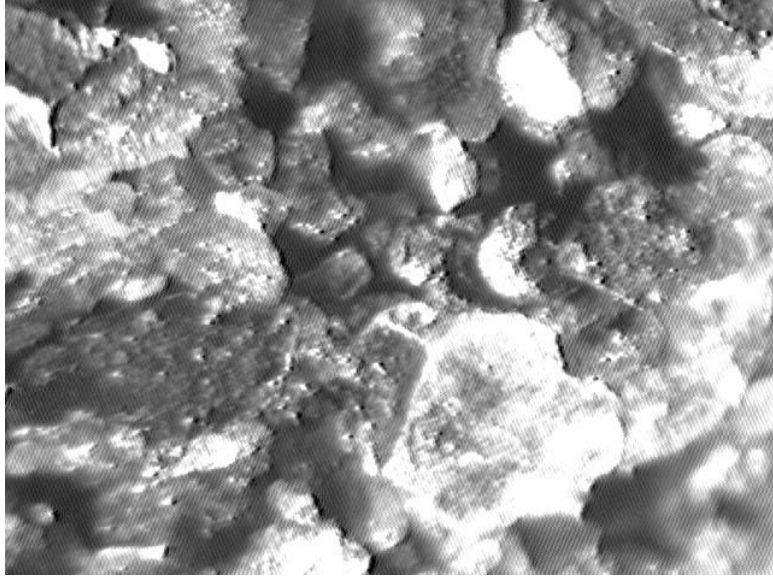
Şekil C7 DSÖ1 no'lu deneyden sonra İzmir-Çiğli örselenmemiş numunesinin görünümü



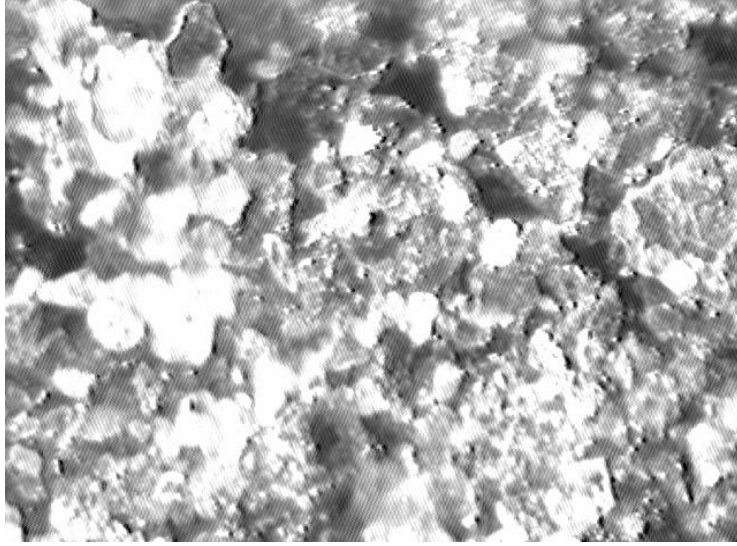
Şekil C8 A5 Sondajı 9.00-9.50 m ‘den alınan örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi yatay düzlem görüntüsü (X 75)



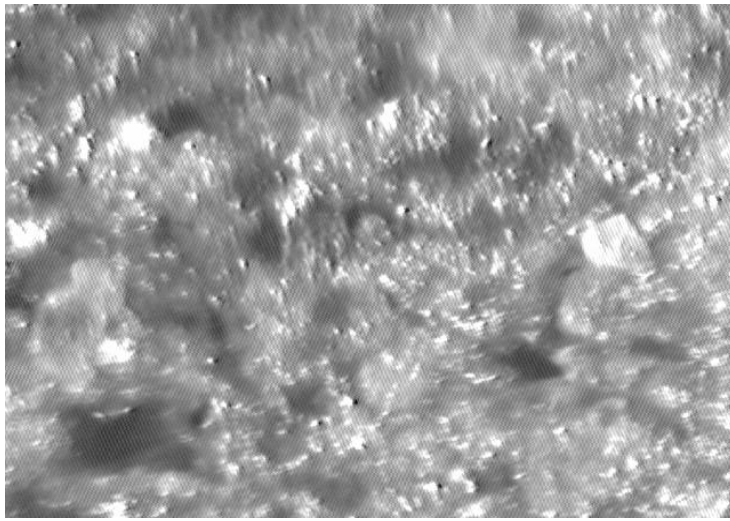
Şekil C9 A5 Sondajı 9.00-9.50 m ‘den alınan örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi düşey düzlem görüntüsü (X 300)



a)

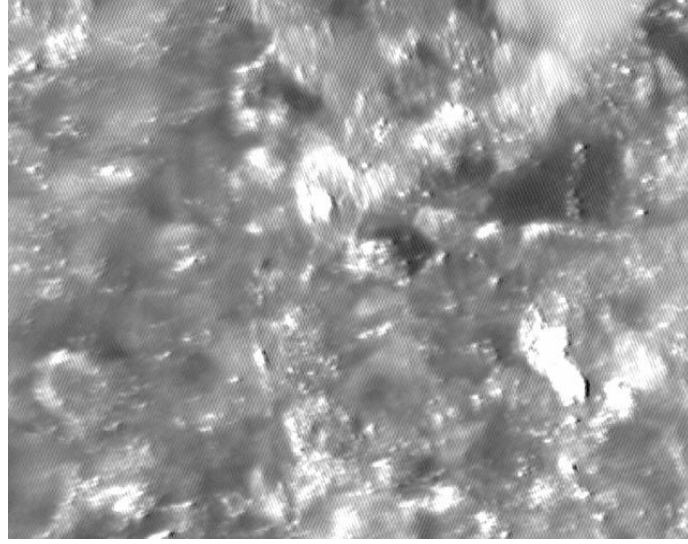


b)

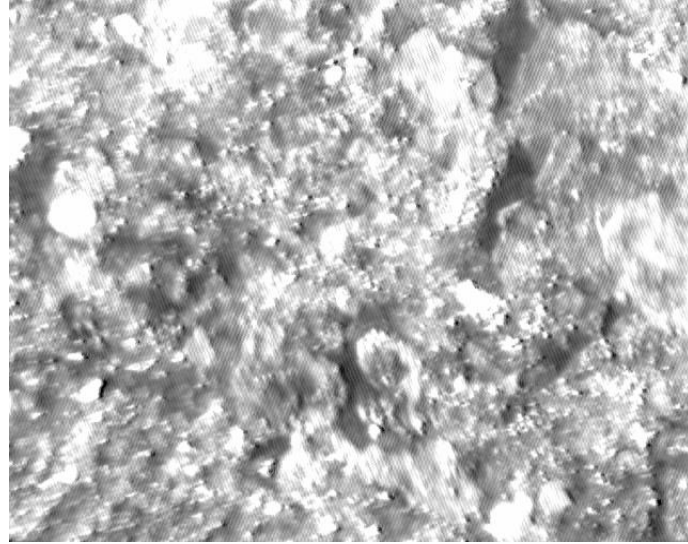


c)

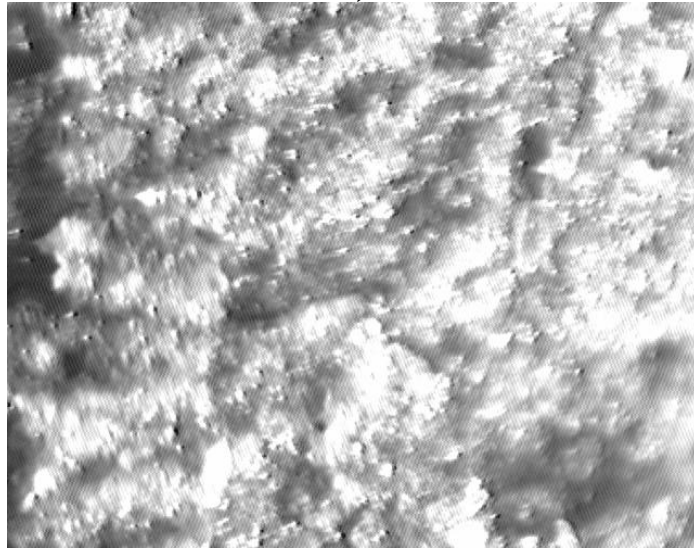
Şekil C10 A5 Sondajı örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X75) b) Düşey kesit (X 150) c) Z kesiti (X300)



a)

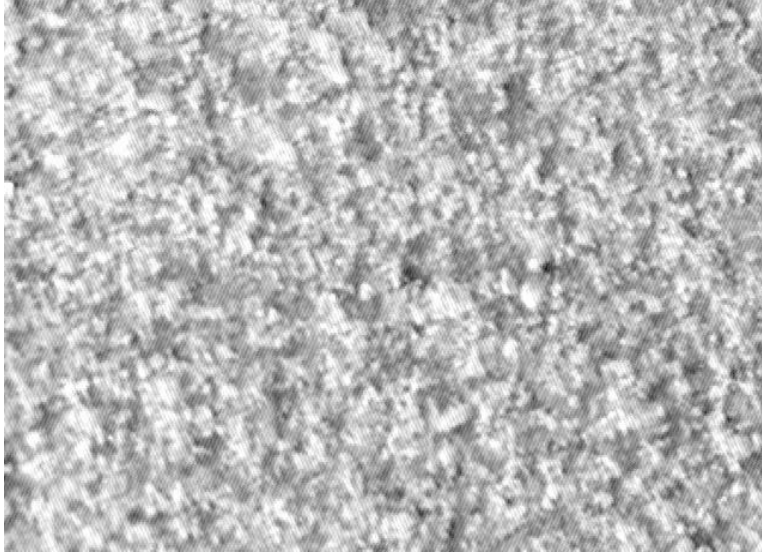


b)



c)

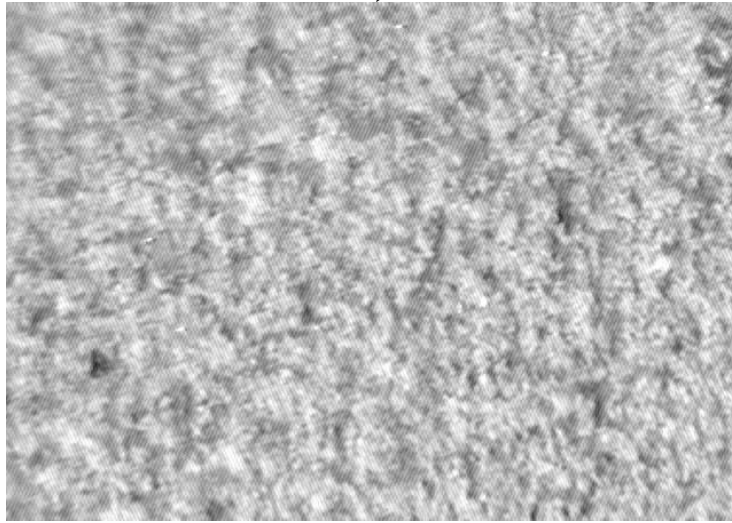
Şekil C11 A5 Sondajı örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X300) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X300)



a)

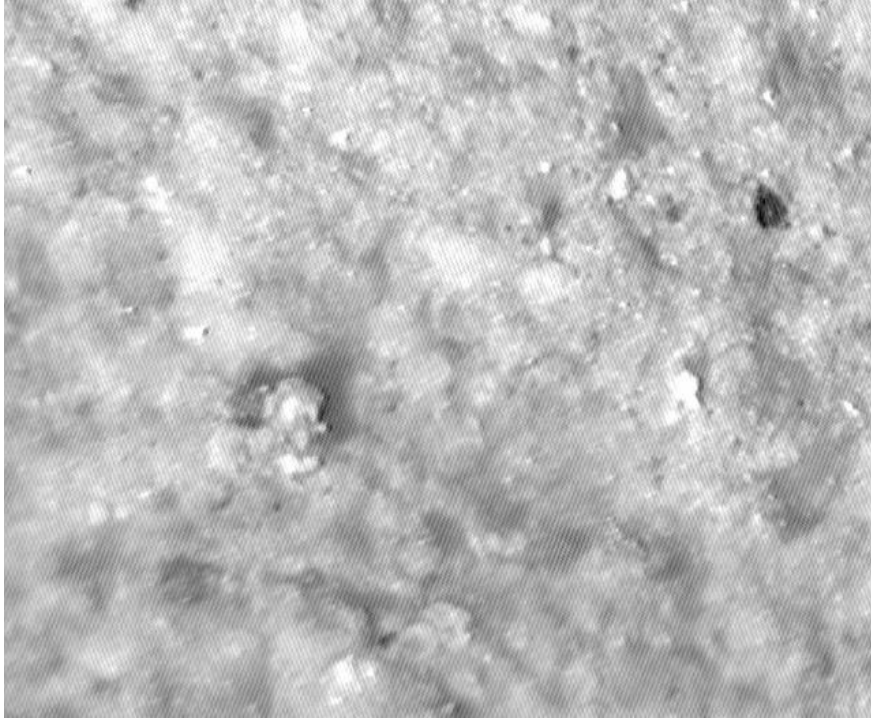


b)



c)

Şekil C12 Adapazarı örselenmiş laboratuvar (ML1) numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X75) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X750)

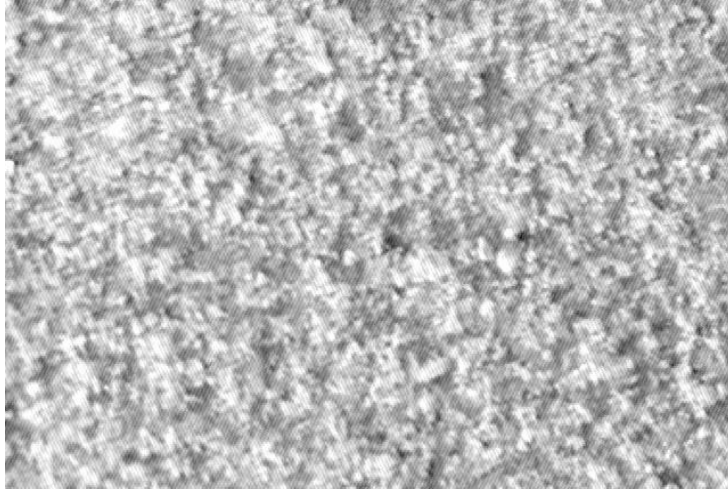


a)

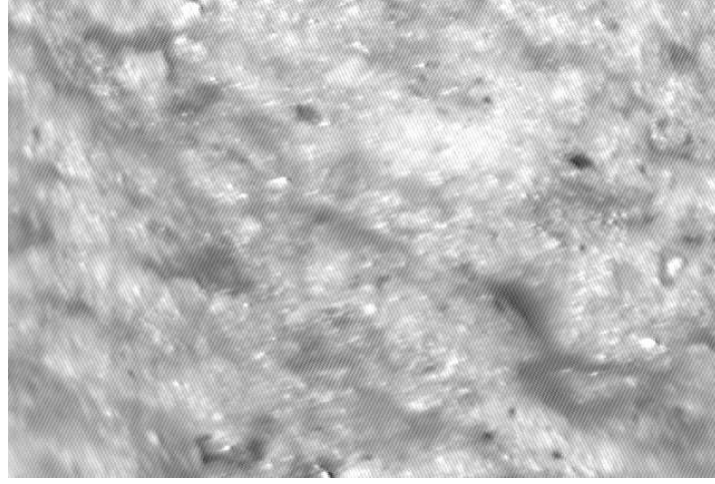


b)

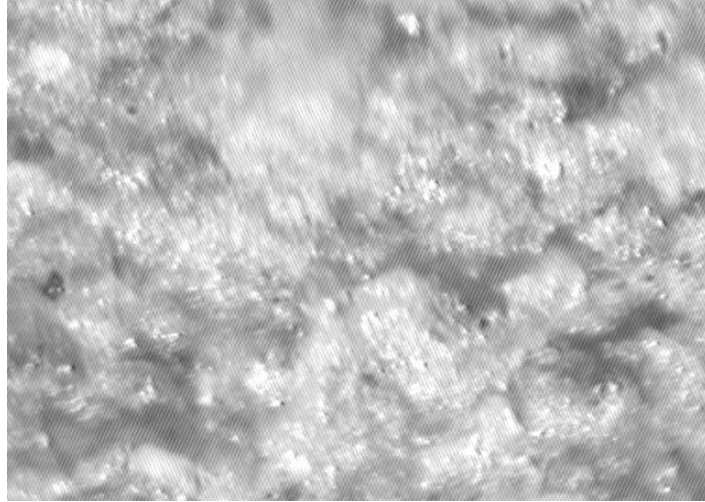
Şekil C13 Gümüşdere örselenmiş (CL) laboratuvar numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü a) Düşey kesit (X150) b) Yatay kesit (X 150)



a)

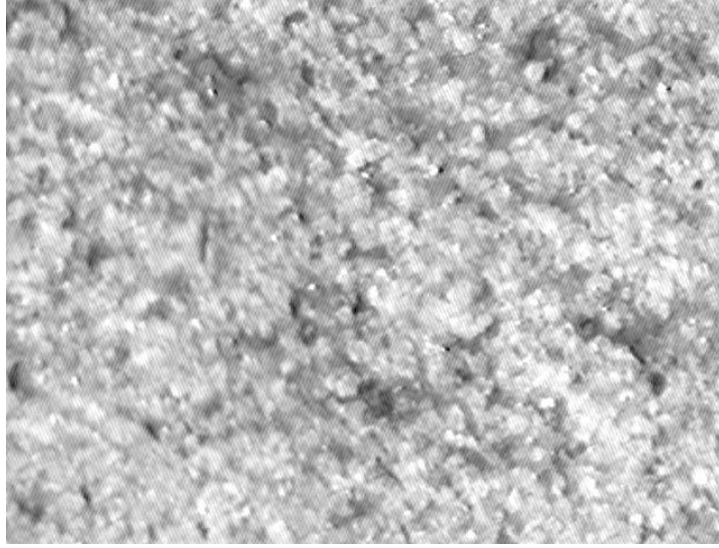


b)

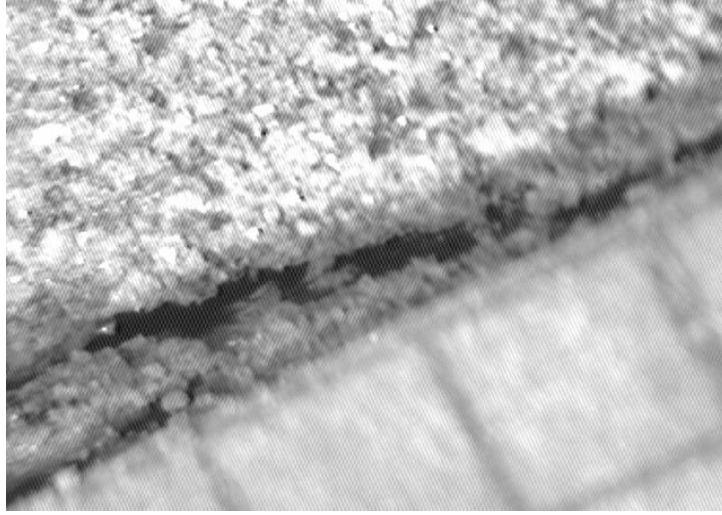


c)

Şekil C14 Gümüşdere örselenmiş laboratuvar numunesinin (CL) konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X 75) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X 150)



a)

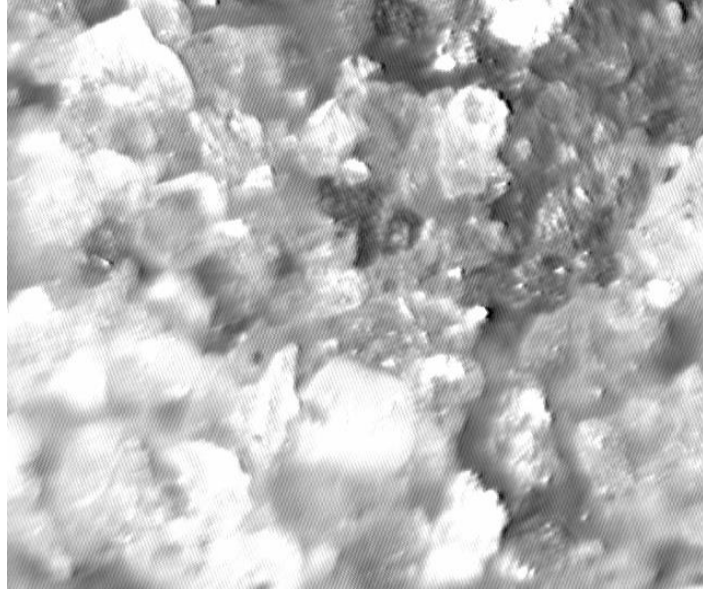


b)



c)

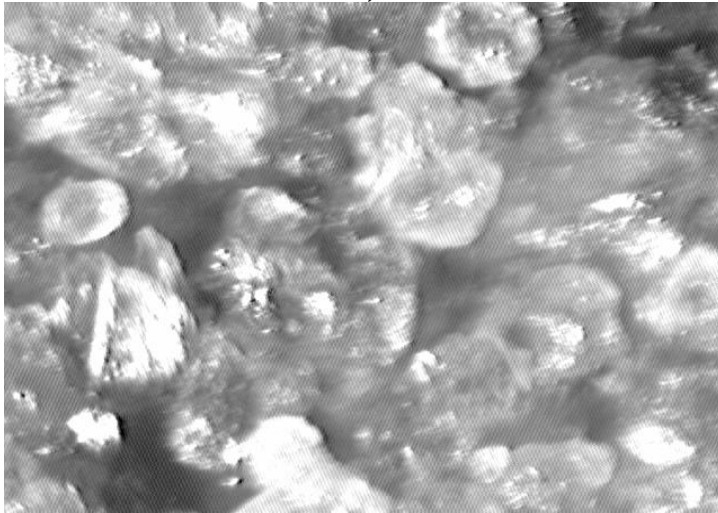
Şekil C15 İzmir Çiğli A5 7.50-8.00 m örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme öncesi görüntüsü a) Yatay kesit (X 75) b) Z kesiti (X 53) c) Düşey kesiti (X 150)



a)



b)



c)

Şekil C16 İzmir Çiğli A5 7.50-8.00 m örselenmemiş numunesinin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonrası görüntüsü a) Yatay kesit (X 150) b) Z kesiti (X 150) c) Düşey kesiti (X 300)

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Barış Can ÜLKER, 04.08.1980 tarihinde Ankara-Çankaya’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini T.E.D. Ankara Koleji Vakfı Özel Lisesi’nde tamamladı. 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazanarak yüksek öğrenimine başladı. 2001 yılında iyi dereceyle bu bölümden mezun oldu ve inşaat mühendisi olmaya hak kazandı. Aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Anabilimdalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu öğrenimini sürdürmekte olan yazar iyi derecede İngilizce ve orta derecede Almanca bilmektedir.