

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇÖP SIZINTI SUYUNUN KUMLARIN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Aytaç YAŞARGÜN

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

NİSAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇÖP SIZINTI SUYUNUN KUMLARIN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Aytaç YAŞARGÜN
(501082201)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayfer ERKEN

NİSAN 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

THE EFFECT OF LEACHATE ON THE BEHAVIOR OF SAND

Ph.D. THESIS

**Aytaç YAŞARGÜN
(501082201)**

Department of Earthquake Engineering

Earthquake Engineering Programme

Thesis Adviser: Prof. Dr. Ayfer ERKEN

APRIL 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501082201 numaralı Doktora Öğrencisi Aytaç YAŞARGÜN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇÖP SIZINTI SUYUNUN KUMLARIN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ayfer ERKEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail H. AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan BAYKAL
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Reşat Atalay OYGUÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Aralık 2022
Savunma Tarihi : 14 Nisan 2023





Babam Merhum Abdülkadir YAŞARGÜN anısına,



ÖNSÖZ

Doktora eğitim sürecinin tüm aşamalarında bilgi, birikim ve tecrübesi ile bana her zaman destek olmuş, bu çalışmanın ortaya çıkmasında çok büyük emek ve katkı sağlayan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ayfer ERKEN 'e, eleştirileri, fikirler ve destekleri ile bana zaman ayırarak çalışmanın gelişmesine katkıda bulunan tez izleme komitesi üyelerim sayın Prof. Dr. Gökhan BAYKAL ve Doç. Dr. İsmail H. AKSOY' a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bilimsel çalışma ve akademik faaliyetler konusunda beni teşvik eden annem sayın Sevim YAŞARGÜN ve babam sayın Abdülkadir YAŞARGÜN' e sonsuz teşekkür ederim.

Bu stresli uzun yolda beni destekleyen, zekâsı ve ileri görüşlülüğü sayesinde ufkumu açan, hayat arkadaşım ve biricik eşim sayın Duygu ÖZKAN YAŞARGÜN' e teşekkürlerimi sunarım.

Uzakta da olsa her zaman desteğini hissettiğim ablam Ayça Pınar DİNÇ'e ve sonradan aramıza katılan biricik oğlum Arın Çınar YAŞARGÜN' e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında bana gösterdikleri sabır ve destekten ötürü İstanbul Teknik Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarı hocaları ile çalışanlarına ve tez sürecinde yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Gözde SEZGİN TUNÇAY' a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2022

Aytaç YAŞARGÜN
(İnşaat Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY	xxxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı	2
2. ÇÖP SIZINTI SUYUNUN YAPISAL ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1 Çöp Sızıntı Suyunun Özellikleri	5
2.2 Genç ve Yaşlı Deponilerin Bileşenleri ile İlgili Çeşitli Veriler	5
2.3 Çöp Sızıntı Suyu Bileşenleri	6
2.4 Çöp Sızıntı Suyunun Kimyasal Süreçleri.....	7
2.4.1 Aerobik bozulma fazı.....	7
2.4.2 Geçiş fazı.....	7
2.4.3 Asit Üretimi fazı.....	7
2.4.4 Metan Üretim fazı	7
2.4.5 Olgunlaşma fazı	8
2.5 Çöp Sızıntı Suyunun Zeminlerin Yapısı Üzerine Etkileri.....	9
2.5.1 PH etkisi	9
2.5.2 Organik maddeler.....	10
2.5.3 Ağır metaller	11
3. KUMLU ZEMİNLER.....	13
3.1 Kumlu Zeminlerin Dinamik Yükler Etkisi Altındaki Davranışı	13
3.1.1 Dinamik zemin parametrelerinin deneylerle ölçülmesi	13
3.1.2 Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı	15
3.1.3 Elastisite modülü.....	20
3.1.4 Bulk modülü.....	21
3.1.5 Poisson oranı	21
3.1.6 Karakteristik zemin periyodu.....	21
3.1.7 Zemin yoğunluğu	21
3.2 Sıvılaşmanın Tanımı ve Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler.....	22
3.2.1 Sıvılaşmanın tanımı ve laboratuvar çalışmaları	22
3.2.2 Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi	28
3.2.3 Sıvılaşmayı etkileyen faktörler	31
3.3 Doygunluğun, Kumlu Zeminlerin Dinamik Yükler Altındaki Davranışına Etkisi.....	38

4. ÇEŞİTLİ KATKI VE KİRLETİCİ ETKİSİNDEKİ ZEMİNLER İLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	45
4.1 Çeşitli Kirleticiler Etkisindeki Zeminlerin Davranış Değişikliklerinin İncelenmesi	45
4.2 Katkı ve Kirleticilerin Zemin İyileştirmedeki Rolü	52
5. DENEY SİSTEMİ VE DENEY YAPILIŞ AŞAMALARI.....	61
5.1 Dinamik Üç Eksenli Deney Aleti ve Deneyde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması.....	61
5.1.1 Deneylerde kullanılan zemin ve özellikleri.....	61
5.1.2 Deneylerde kullanılan çöp sızıntı suyunun özellikleri	62
5.1.3 Temiz zemin numunelerinin hazırlanması	64
5.1.4 Kirlenmiş deney numunelerinin hazırlanması.....	65
5.1.5 Çöp sızıntı suyu ile kum deney numunelerinin kirlenmesi	66
5.2 Deney Sistemi.....	67
5.2.1 Dinamik üç eksenli basınç deney sistemi.....	67
5.2.2 Kalibrasyon	71
5.2.3 Data Aktarımı	73
5.3 Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi	74
5.3.1 Deneyin amacı.....	74
5.3.2 Deneyin yapılışı.....	75
5.3.2.1 Temiz zemin numunelerinde deney sistemi kurulumu ve konsolidasyon süreci.....	75
5.3.2.2 Numunede B kontrol	80
5.3.2.3 Çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş zemin numunelerinde deney sistemi kurulumu ve konsolidasyon süreci	80
5.3.3 Deney Aşaması.....	84
5.4 Sonuçlar	85
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	87
6.1 Giriş	87
6.2 Temiz Kum Zemin Deneyleri ve İncelenmesi.....	88
6.2.1. En büyük elastisite modülü:	90
6.2.2. Standart ve modifiye numune kalıpları ile hazırlanmış numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	92
6.2.3. Doygun durumdaki temiz kum numunelerinin dinamik davranışı.....	94
6.2.4. Farklı konsolidasyon basıncı altındaki doymuş durumdaki temiz kum numunelerinin karşılaştırılması	96
6.2.5. Doygunluğun dinamik davranışa etkisi.....	97
6.3. Çöp Sızıntı Suyu ile kirlenmiş Kumların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi.....	102
6.3.1. Doygunluğun çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kumlarını sıvılaşması üzerine etkisi	104
6.4. Kirlenmiş Zeminlerin Temiz Zeminler ile Karşılaştırılması	114
6.4.1. Kirlenmiş zeminlerde kritik deformasyon seviyesinin belirlenmesi ve temiz zeminler ile karşılaştırılması.....	123
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR.....	133
EKLER.....	141
ÖZGEÇMİŞ.....	247

KISALTMALAR

BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
TOK	: Toplam Organik Karbon
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
UYA	: Uçucu Yağ Asitleri
XOC	: Ksenobiyotik Organik Bileşikler
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
CPT	: Koni Penetrasyon Direnci
DA	: Çift Genlik
LS	: Linyosülfonat
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TKM	: Toplam Katı Madde
TUKM	: Toplam Uçucu Katı Madde
TÇM	: Toplam Çözünmüş Madde
TUÇM	: Toplam Uçucu Çözünmüş Madde
TP	: Toplam Fosfor
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
CU	: Konsolidasyonlu Drenajsız
CD	: Konsolidasyonlu Drenajlı
UU	: Konsolidasyonsuz Drenajsız
DGO	: Dinamik Gerilme Oranı



SEMBOLLER

ϕ	: Kayma Mukavemeti Açısı, Çap
G	: Kayma Modülü
V_p	: Basınç Dalgası Hızı
V_s	: Kayma Dalgası Hızı
G/G_0	: Kayma Modülü Oranı
γ	: Birim Kayma Genliği
K_2	: Kayma Deformasyonu Parametresi
D_r	: Relatif Sıkılık
D	: Sönüm Oranı
σ_d'	: Efektif Deviator Gerilme
γ_a	: Kayma Deformasyonu Genliği
e	: Boşluk Oranı
σ_0'	: Efektif Çevre Basıncı
σ_0, σ_3	: Çevre Basıncı
E	: Elastisite Modülü
ε	: Birim Şekil Değiştirme
ε_d	: Dinamik Birim Şekil Değiştirme
ν	: Poisson Oranı
ω_0	: Karakteristik Zemin Periyodu
H	: Tabaka Kalınlığı
T	: Periyot
f	: Frekans
π	: Pi
M_w	: Moment Büyüklüğü
τ_d / σ_0'	: Normalize Dinamik Kayma Gerilmesi
u_e / σ_0'	: Normalize Boşluk Suyu Basıncı
u_w	: Boşluk Suyu Basıncı
u_a	: Boşluk Hava Basıncı
χ	: Zemin Doygunluk Derecesi Parametresi
B	: Doygunluk Değeri

S_r	: Doygunluk Derecesi
K_b	: Zemin Sıkışmazlık Modülü
K_w	: Boşluk Suyu Sıkışmazlık Modülü
P_a	: Mutlak Akışkan Basıncı
n	: Porozite
N	: Çevrim Sayısı
ρ_{PF}	: Akışkan Yoğunluğu
μ_{PF}	: Dinamik Viskozite
ε_{PF}	: Dielektrik Sabiti
LL_{eq}	: Eşdeğer Likit Limit
LL'	: Normalize Likit Limit
σ_v'	: Düşey Gerilme
C_v	: Konsolidasyon Katsayısı
k	: Permeabilite Katsayısı
M_R	: Esneklik Modülü
V_s/V_{smaks}	: Maksimum Normalize Kayma Dalgası Hızı
t	: Zaman
D₅₀	: Ortalama Dane Çapı
D₁₀	: Efektif Dane Çapı
C_u	: Ünlformluk Katsayısı
C_c	: Eğrilik Katsayısı
F_c	: İnce Dane Oranı
CO₂	: Karbondioksit
σ_{dev}/2σ_c'	: Dinamik Gerilme Oranı
r_u	: Boşluk Suyu Basıncı Oranı
σ_c	: Konsolidasyon Basıncı
Ca	: Kalsiyum
Mg	: Magnezyum
K	: Potasyum
Fe	: Demir
Zn	: Çinko
Ni	: Nikel
Cr	: Krom
Cl	: Klor
SO₄²⁻	: Sülfat

NH₃	: Amonyak
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
NO₃-	: Nitrat
CO₂	: Karbondioksit
H₂	: Hidrojen
CH₄	: Metan
H₂S	: Hidrojen Sülfür
NOH	: Sodyum Hidroksit





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 : Genç ve yaşlı depolama alanlarından sızıntı suyu bileşen değerleri.	5
Çizelge 4. 1 : Boşluk sıvılarının 20°C'deki fiziksel ve kimyasal özellikleri ve deney sonuçlarının özetleri(Matteo ve diğ., 2011).	46
Çizelge 4. 2 Zeminlerin indeks özellikleri (Resmi ve diğ., 2011).	47
Çizelge 4. 3 : Geri dönüşüm bazanit numunelerinin özellikleri.	54
Çizelge 5. 1 : Akpınar kumunun özellikleri.	62
Çizelge 5. 2 : Kemerburgaz düzenli katı atık depo tesisinden getirilmiş olan genç depo sızıntı suyu özellikleri.	63
Çizelge 6. 1 : Temiz zemin numuneleri deney tablosu.	88
Çizelge 6. 2 : Doygun durumdaki temiz numelerin maksimum elastite modülleri.	91
Çizelge 6. 3 : Kirlenmiş zemin numuneleri deney tablosu.	103
Çizelge 6. 4 : Hesaplanan Sr ve B değerleri.	104



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 : Düzenli depolama sahasındaki sızıntı bileşenleri ve gazların değişimi (Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, 2012, Bölüm 2.1).....	8
Şekil 2. 2 : Kil parçalarının farklı pH seviyelerindeki şematik dağılımı (Gratchev ve diğ 2006).	10
Şekil 3. 1 : Dinamik zemin parametreleri ölçülmesinde kullanılan arazi ve laboratuvar deneyleri (Kramer, 1996).	14
Şekil 3. 2 : Dinamik zemin parametreleri ölçülmesinde kullanılan model deneyleri (Kramer, 1996).	14
Şekil 3. 3 : Dinamik kayma modülü (Verrujit, 2010).	15
Şekil 3. 4 : Kumların kayma modülü (Zeminin relatif sıkılığı, Dr, %75 olduğu durumda) (Seed ve Idriss, 1970).	16
Şekil 3. 5 : Kumların kayma modülü (Zeminin relatif sıkılığı, Dr, %40 olduğu durumda) (Seed ve Idriss, 1970).	17
Şekil 3. 6 : Farklı zemin relatif sıkılıklarında kumların kayma modülü (Seed ve Idriss, 1970).	17
Şekil 3. 7 : Tipik bir kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu ilişkisi (Kumar, 2008).	18
Şekil 3. 8 : Konsolidasyon basıncının kayma modülüne etkisi (Kokusho, 1980).	19
Şekil 3. 9 : Konsolidasyon basıncının sönüm oranına etkisi (Kokusho, 1980).	19
Şekil 3. 10 : Dinamik üç eksenli deney (Das ve Ramana, 2010).	20
Şekil 3. 11 : Sıvılaşma öncesi ve sonrası yanal yayılma (Youd, 1984).	23
Şekil 3. 12 : Sıvılaşma öncesi ve sonrası zemin salınımı (Youd, 1984).	23
Şekil 3. 13 : Orta sıkılığa sahip ($Dr=47\%$) Fuji Nehri Kumu üzerinde yapılan tekrarlı burulma deneylerinden elde edilen laboratuvar verileri (Ishihara 1985, Day, 2002).	26
Şekil 3. 14 : Sıkı duruma sahip ($Dr=75\%$) Fuji Nehri Kumu üzerinde yapılan tekrarlı burulma deneylerinden elde edilen laboratuvar verileri (Ishihara 1985, Day, 2002).	27
Şekil 3. 15 : Gevşek kumlar için drenajsız koşulda gerilme-deformasyon ilişkisi (Seed ve diğ., 1989).	30
Şekil 3. 16 : Sıkı kumlar için drenajsız koşulda gerilme-deformasyon ilişkisi (National Research Council, 1985).	30
Şekil 3. 17 : Sıvılaşabilen ve sıvılaşmayan zeminleri ayıran derecelendirme eğrilerindeki sınırlar (Tsuchida, 1970).	32
Şekil 3. 18 : Başlangıç relatif sıkılığının Sacramento Nehri Kumunun sıvılaştırılması üzerindeki etkisi (Lee ve Seed, 1967).	34
Şekil 3. 19 : Sıvılaşma kaynaklı hasarın saha tespiti için önerilen sınır eğrileri (Ishihara, 1985).	36
Şekil 3. 20 : a) Doygun zemin gerilme durum değişkenleri, b) Doygun olmayan zemin gerilme durum değişkenleri (Fredlund ve Rahardjo, 1993).	39

Şekil 3. 21 : Sr – B ilişkisi (Yoshimi ve diğ., 1989).	41
Şekil 3. 22 : Doygunluk derecesinin sıvılaşma karakterine etkisi (Yoshimi ve diğ., 1989).	42
Şekil 3. 23 : %5 deformasyon seviyesindeki çevrim sayısı ile tekrarlı gerilme arasındaki ilişki (Ishihara ve diğ., 2001).	43
Şekil 3. 24 : $0.00 \leq B \leq 1.00$ ve $DKGO=0.35$ olduğu durumda eksenel boy ve yükleme çevrimi değişim ilişkisi (Elibol ve Erken, 2005).	44
Şekil 3. 25 : $0.00 \leq B \leq 1.00$ ve $DKGO=0.35$ olduğu durumda $\Delta u/\sigma_c$ oranının yükleme çevrimi ile değişim ilişkisi (Elibol ve Erken, 2005).	44
Şekil 4. 1 : Boşluk sıvılarıyla yeniden oluşturulmuş olan kaoliniti zeminin bir boyutlu basınç eğrileri (Matteo ve diğ., 2011).	46
Şekil 4. 2 : Şekil 4.1 : A numunesi gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Resmi ve diğ., 2011).	48
Şekil 4. 3 : B numunesi gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Resmi ve diğ., 2011).	48
Şekil 4. 4 : Likit limit-kür süresi ilişkisi (Erken ve Yaşargün, 2010).	49
Şekil 4. 5 : Plastisite indisi-kür süresi ilişkisi (Erken ve Yaşargün, 2010).	50
Şekil 4. 6 : Dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Erken ve Yaşargün, 2010).	50
Şekil 4. 7 : Kayma deformasyonu-pH ilişkisi (Gratchev ve Sassa, 2013).	51
Şekil 4. 8 : Kayma deformasyonu-NaCl konsantrasyonu ilişkisi (Gratchev ve Sassa, 2013).	51
Şekil 4. 9 : Esneklik modülü-çevrim sayısı ilişkisi (Chen ve Indraratna, 2014).	53
Şekil 4. 10 : Farklı kür oranlarında bazanit içeren zemin B numunesinin Kür oranı ile düzeltme katsayısı ilişkisi grafiği.	55
Şekil 4. 11 : %10 kür oranı içeren zemin A ve B numunesi gerilme-şekil değiştirme ilişkisi grafiği.	55
Şekil 4. 12 : Farklı kür oranlarındaki zemin B numunelerinin farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı grafiği.	56
Şekil 4. 13 : Kayma dalgası açısından alçı ile ve mikroorganizma ile bağlanmış kumun davranışları (DeJong ve diğ., 2006).	57
Şekil 4. 14 : Büyüyen Hücreli karışımında normal gerilmenin gerilme-şekildeğiştirme davranışına etkisi a) gevşek kum, b) Sıkı kum.	58
Şekil 4. 15 : CBR testi gerilme penetrasyon eğrisi.	59
Şekil 4. 16 : Cbr sistemindeki $107cfu/mL$ başlangıç bakteri aşılmasındaki hidrolik geçirgenlik.	60
Şekil 5. 1 : Elek analizi sonucu Akpınar kumunun granülometri eğrisi.	62
Şekil 5. 2 : Genç ve yaşlı sızıntı suyu numuneleri.	64
Şekil 5. 3 : Modifiye Çelik Kalıp 3-D görünümü.	65
Şekil 5. 4 : Kirlenmiş numunelerin hazırlanma aşamaları.	66
Şekil 5. 5 : Sızıntı suyu tankı şeması.	67
Şekil 5. 6 : Yükleme birimi ve üç eksenli hücre.	70
Şekil 5. 7 : Elektrik ölçüm ünitesi.	71
Şekil 5. 8 : Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri.	72
Şekil 5. 9 : Üç eksenli deney sistemi (CU) tipi diyagramı.	74
Şekil 5. 10 : Dinamik üç eksenli deney aletine membranın yerleştirilmesi ve kalıbın kurulması.	76
Şekil 5. 11 : Dinamik üç eksenli deney aletinde kum numunenin vakum yardımıyla ayakta tutulması.	77
Şekil 5. 12 : Dinamik üç eksenli deney aletinde kum numunenin çevre basıncı yardımıyla ayakta tutulması.	78

Şekil 5. 13 :	Sızıntı suyu havuzundan çıkarılan çelik kalıptaki kum numuneleri.	82
Şekil 5. 14 :	Numunenin vakum vasıtasıyla ayakta durması.	83
Şekil 6. 1 :	DN39 numunesine ait elastisite modülünün eksenel birim deformasyona bağlı değişim grafiği.....	92
Şekil 6. 2 :	DN39 numunesine ait $N=1$ Çevrim ve $N=\pm\% 2.5$ deformasyon seviyesindeki gerilme- şekil değiştirme grafiği.	92
Şekil 6. 3 :	DN18 ve DN38 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.	93
Şekil 6. 4 :	DN18 ve DN38 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.	93
Şekil 6. 5 :	Doygun durumdaki temiz kum numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.....	95
Şekil 6. 6 :	Doygun durumdaki temiz kum numunelerine ait eksenel birim deformasyon yüzdesi – çevrim sayısı grafiği.	95
Şekil 6. 7 :	Doygunluk - çevrim sayısı ilişkisi, $B \geq 95$	96
Şekil 6. 8 :	100 kPa ve 30 kPa basınç altındaki doymuş numunelerin dinamik mukavemet eğrisi.	97
Şekil 6. 9:	Farklı doymuşluk değerindeki temiz kum numunelerin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği, 100 kPa.	98
Şekil 6. 10 :	Farklı doymuşluk değerindeki temiz kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği, 100 kPa.	99
Şekil 6. 11 :	Farklı doymuşluk değerindeki temiz kum numunelerin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği, 30 kPa.....	100
Şekil 6. 12 :	Farklı doymuşluk değerindeki temiz kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği, 30 kPa.	100
Şekil 6. 13 :	Doygun ve kısmi doymuş temiz kum numunelerine ait dinamik mukavemet eğrisi.	101
Şekil 6. 14 :	Doygun ve kısmi doymuş durumdaki Akpınar kumunun, Niigata ve Toyura kumu ile karşılaştırılması.	102
Şekil 6. 15 :	Kirlenmiş numunelerde S_r - Skempton-B ilişkisi	105
Şekil 6. 16 :	Farklı doymuşluk değerindeki kısa kür süreli kum numunelerin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.	106
Şekil 6. 17 :	Farklı doymuşluk değerindeki kısa kür süreli kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği.	107
Şekil 6. 18 :	Farklı doymuşluk değerindeki uzun kür süreli kum numunelerin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.	108
Şekil 6. 19 :	Farklı doymuşluk değerindeki uzun kür süreli kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği.	108
Şekil 6. 20 :	Kısmi doymuş kısa ve uzun süreli kumların doymuşluk - çevrim sayısı ilişkisi.....	109
Şekil 6. 21 :	DN77 ve DN78 numunesine ait boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.....	111
Şekil 6. 22:	DN77 ve DN78 numunesine ait eksenel birim deformasyon - çevrim sayısı grafiği.....	111
Şekil 6. 23 :	DN81 ve DN82 numunesine ait boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.....	112
Şekil 6. 24 :	DN81 ve DN82 numunesine ait eksenel birim deformasyon - çevrim sayısı grafiği.....	112
Şekil 6. 25 :	DN77 ve DN 78 numunelerine ait $N=1$ ve $N_{c=\pm\% 2.5}$ çevrimdeki deviator gerilme – eksenel birim deformasyon davranışları.	113

Şekil 6. 26 : DN81 ve DN 82 numunelerine ait $N=1$ ve $N_{\varepsilon=\pm\%2.5}$ çevrimdeki deviator gerilme – eksenel birim deformasyon davranışları.	114
Şekil 6. 27 : DN72 ve DN16 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı grafiği.	115
Şekil 6. 28 : DN72 ve DN16 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı grafiği.	115
Şekil 6. 29 : DN64 ve DN52 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı grafiği.	116
Şekil 6. 30 : DN64 ve DN52 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı grafiği.	117
Şekil 6. 31 : DN69 - DN87 – DN13 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.	118
Şekil 6. 32 : DN69 - DN87 – DN13 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.	118
Şekil 6. 33 : DN58 – DN31 – DN38 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.	119
Şekil 6. 34 : DN58 – DN31 – DN38 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.	120
Şekil 6. 35 : DN60 – DN80 – DN68 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.	121
Şekil 6. 36 : DN60 – DN80 – DN68 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.	121
Şekil 6. 37 : Kür süresinin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısına etkisi.	122
Şekil 6. 38 : Kür süresinin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısına etkisi	123
Şekil 6. 39 : DN45 numunesine ait eksenel birim deformasyon - ortalama efektif gerilme davranışı.	124
Şekil 6. 40 : DN69 numunesine ait eksenel birim deformasyon - ortalama efektif gerilme davranışı.	124
Şekil 6. 41 : DN29 numunesine ait eksenel birim deformasyon - ortalama efektif gerilme davranışı.	125
Şekil 6. 42 : DN61 numunesine ait eksenel birim deformasyon- ortalama efektif gerilme davranışı.	125
Şekil 6. 43 : Temiz ve kirlenmiş numunelerin skempton-B - $N_{\varepsilon=\pm\%0.5}$ ile ilişkisi. ..	127
Şekil 6. 44 : Temiz ve kirlenmiş numunelerin skempton-B - $N_{\varepsilon=\pm\%2.5}$ ile ilişkisi. ..	127
Şekil A. 1 : DN1 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	142
Şekil A. 2 : DN2 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	143
Şekil A. 3 : DN3 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	144
Şekil A. 4 : DN4 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	145
Şekil A. 5 : DN5 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	146
Şekil A. 6 : DN6 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	147
Şekil A. 7 : DN7 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	148
Şekil A. 8 : DN8 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	149
Şekil A. 9 : DN9 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	150
Şekil A. 10 : DN10 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	151
Şekil A. 11: DN11 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	152
Şekil A. 12 : DN13 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	153
Şekil A. 13 : DN14 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	154
Şekil A. 14 : DN15 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	155
Şekil A. 15 : DN16 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	156
Şekil A. 16 : DN17 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	157

Şekil A. 17 : DN18 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	158
Şekil A. 18 : DN19 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	159
Şekil A. 19 : DN20 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	160
Şekil A. 20 : DN21 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	161
Şekil A. 21: DN22 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	162
Şekil A. 22 : DN23 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	163
Şekil A. 23 : DN24 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	164
Şekil A. 24 : DN26 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	165
Şekil A. 25 : DN35 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	166
Şekil A. 26 : DN36 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	167
Şekil A. 27 : DN37 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	168
Şekil A. 28 : DN38 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	169
Şekil A. 29 : DN39 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	170
Şekil A. 30 : DN40 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	171
Şekil A. 31 : DN41 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	172
Şekil A. 32 : DN42 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	173
Şekil A. 33 : DN43 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	174
Şekil A. 34 : DN44 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	175
Şekil A. 35 : DN45 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	176
Şekil A. 36 : DN46 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	177
Şekil A. 37 : DN47 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	178
Şekil A. 38 : DN48 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	179
Şekil A. 39 : DN49 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	180
Şekil A. 40 : DN50 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	181
Şekil A. 41 : DN51 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	182
Şekil A. 42 : DN52 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	183
Şekil A. 43 : DN53 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	184
Şekil A. 44 : DN54 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	185
Şekil A. 45 : DN55 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	186
Şekil A. 46 : DN56 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	187
Şekil A. 47 : DN57 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	188
Şekil A. 48 : DN59 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	189
Şekil A. 49 : DN66 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	190
Şekil A. 50 : DN67 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	191
Şekil A. 51 : DN68 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	192
Şekil A. 52 : DN88 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	193
Şekil A. 53 : DN92 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	194
Şekil A. 54 : DN93 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	195
Şekil A. 55 : DN94 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	196
Şekil A. 56 : DN95 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	197
Şekil A. 57 : DN96 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	198
Şekil A. 58 : DN97 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	199
Şekil B. 1 : DN12 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	200
Şekil B. 2 : DN25 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	201
Şekil B. 3 : DN27 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	202
Şekil B. 4 : DN28 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	203
Şekil B. 5 : DN29 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	204
Şekil B. 6 : DN30 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	205
Şekil B. 7 : DN31 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	206
Şekil B. 8 : DN32 dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	207

Şekil B. 9 : DN33 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	208
Şekil B. 10 : DN34 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	209
Şekil B. 11 : DN58 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	210
Şekil B. 12 : DN60 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	211
Şekil B. 13 : DN61 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	212
Şekil B. 14 : DN62 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	213
Şekil B. 15 : DN63 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	214
Şekil B. 16 : DN64 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	215
Şekil B. 17 : DN65 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	216
Şekil B. 18 : DN69 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	217
Şekil B. 19 : DN70 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	218
Şekil B. 20 : DN71 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	219
Şekil B. 21: DN72 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	220
Şekil B. 22 : DN73 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	221
Şekil B. 23 : DN74 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	222
Şekil B. 24 : DN75 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	223
Şekil B. 25 : DN76 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	224
Şekil B. 26 : DN77 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	225
Şekil B. 27 : DN78 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	226
Şekil B. 28 : DN79 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	227
Şekil B. 29 : DN80 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	228
Şekil B. 30 : DN81 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	229
Şekil B. 31: DN82 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	230
Şekil B. 32 : DN83 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	231
Şekil B. 33 : DN84 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	232
Şekil B. 34 : DN85 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	233
Şekil B. 35 : DN86 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	234
Şekil B. 36 : DN87 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	235
Şekil B. 37 : DN89 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	236
Şekil B. 38 : DN90 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	237
Şekil B. 39 : DN91 dinamik üç eksenli deney sonuçları.	238
Şekil C. 1 : Temiz zemin numunesi 20X dijital mikroskop görüntüsü.	239
Şekil C. 2 : Temiz zemin numunesi 200X dijital mikroskop görüntüsü.	239
Şekil C. 3 : Kirlenmiş DN72 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü.....	240
Şekil C. 4 : Kirlenmiş DN72 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü...	240
Şekil C. 5 : Kirlenmiş DN62 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü.....	241
Şekil C. 6 : Kirlenmiş DN62 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü...	241
Şekil C. 7 : Kirlenmiş DN33 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü.....	242
Şekil C. 8 : Kirlenmiş DN33 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü...	242
Şekil C. 9 : Kirlenmiş DN31 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü.....	243
Şekil C. 10 : Kirlenmiş DN31 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü.	243
Şekil C. 11 : Kirlenmiş DN29 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü...	244
Şekil C. 12 : Kirlenmiş DN29 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü.	244
Şekil C. 13 : Kirlenmiş DN70 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü...	245
Şekil C. 14 : Kirlenmiş DN70 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü.	245

ÇÖP SIZINTI SUYUNUN KUMLARIN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

ÖZET

Ekonomik sebeplerden ötürü katı atıkların depolanması ülkemizde halen en çok tercih edilen atık depolama yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Düzenli katı atık depolama tesislerinde özensiz yapılan kil bariyerlerden sızan veya vahşi depolama şeklinde kontrolsüz depolanan evsel katı atıklar çevre ve insan sağlığı gibi problemlerin yanı sıra zemin tabakalarında da bazı değişikliklere neden olmaktadır. Depolanan evsel atıklar yağmur suları ile beraber çöp sızıntı suyu halini alarak zemin tabakalarına sızar. Farklı zemin tabakalarına ve yeraltı sularına karışan çöp sızıntı suyu içerdiği organik, inorganik maddeler ve ağır metaller ile birlikte zeminlerin endeks özelliklerinde değişikliklere neden olabilir. Bu davranış değişiklikleri kohezyonlu zeminler ile yapılan önceki çalışmalarda plastisitenin değişmesi, taşıma gücü kayıpları, düşük permeabilite vb. gibi birçok geoteknik özellikte farklılığa neden olmaktadır.

Bu araştırmada özensiz kil bariyerlerden sızan veya tamamen kontrolsüz olarak depolamadan kaynaklı farklı zemin tabakalarına ulaşan çöp sızıntı suyunun zaman içerisinde kumlu zeminlerin dinamik davranışı üzerine yapmış olduğu etkiler incelenmiştir. Bu çalışmada İstanbul ili Akpınar köyünden getirilmiş olan kum zemin kullanılmış olup, çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kum zeminin dinamik davranışları temiz kum numunelerle karşılaştırmıştır.

Bu çalışmada 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde bir kalıp içerisinde hem temiz hem de kirlenmiş kum numuneler kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Üç eksenli basınç deney sistemine yerleştirilen temiz kum numunelerden doymun olması istenenlerden vakum altında numunelerin içerisinde CO₂ gazı ve daha sonra da damıtık su geçirilerek numuneler doymun hale getirilmiştir. Doymun olmayan temiz numuneler ve çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numunelerde ise vakum altında CO₂ gazı ve damıtık su geçirme uygulaması yapılmamıştır. Bunun nedeni kirlenmiş zeminlerin yapısının bozmamak ve temiz zeminlerle kirlenmiş bu zeminleri karşılaştıracak eşdeğerde doymunluk elde etmektir. Daha sonra kuru yağmurlama yöntemi ile daha önceden hazırlanarak modifiye kalıplara yerleştirilen numuneler %100 kür oranındaki çöp sızıntı suyu havuzuna batırılarak kirletme işlemi başlatılmıştır. Bu aşamadan sonra farklı kür sürelerindeki numuneler çöp sızıntı suyu havuzundan çıkarılıp deney sistemine yerleştirilerek dinamik deneylere başlanmıştır.

Çalışma kapsamında başlangıçta kirlenmiş numune kurulumunda kullanılan modifiye kalıp ve standart kalıpta hazırlanmış numunelerin dinamik durumdaki davranışı karşılaştırılmıştır.

Araştırmada dinamik üç eksenli deney sisteminde yapılan deneyler üç gruba ayrılmıştır. İlk olarak doymun numuneler oluşturularak kullanılan Akpınar kumunun sıvılaşma davranışı belirlenmiştir. En büyük elastisite modülü hesaplamaları

yapıldıktan sonra 100 kPa ve 30 kPa olmak üzere iki farklı basınç altında konsolidasyona bırakılan numunelere farklı gerilme seviyeleri uygulanarak kullanılan kum zeminin dinamik mukavemet eğrisi oluşturulmuştur. Oluşan bu eğri sonucunda 100 kPa konsolidasyon basıncı altındaki temiz kum numunelerde gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ ve üzerine çıktığında, 30 kPa konsolidasyon basıncı altındaki temiz kum numunelerde ise gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.48$ ve üzerine çıktığında yüksek risk taşımakta ve zemin küçük çevrim sayılarında sıvılaşmaktadır.

İkinci aşamaya geçtiğimizde farklı doygunluk değerlerinde hesaplanan temiz numunelerde doygunluğun dinamik davranışa etkileri araştırılmıştır. Laboratuvar ortamında hazırlanan numunelerde daha düşük seviyelerde doygunluk oluşturmak için bu aşamada vakum altında CO₂ gazı ve damıtık su geçirme işlemleri yapılmamıştır. Farklı doygunlukta hesaplanan kısmi doymuş temiz numunelerle dinamik üç eksenli deney aletinde $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ ve 0.30 gerilme aralığında yapılan deneyler sonucunda doygunluğun gerilme – şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı üzerinde etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelerde skempton-B değerinin azalmasının sıvılaşmayı etkilediği görülmüştür. Benzer sıklıkta hazırlanmış temiz kumlarda doygunluk değeri $B=0.37$ değerine düştüğünde ise sıvılaşma gözlenmemiştir. $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ gerilme oranında $N=28$ çevrimde sıvılaşan doymuş kum numunesinin, kısmi doymuş $B= 0.49$ ile 0.52 arasında olması durumunda yakın çevrim sayılarında ($N=30$) sıvılaşması için uygulanması gereken dinamik gerilme oranının $\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.33$ olduğu görülmüştür.

Çöp sızıntı suyu ile kirlenmenin araştırıldığı son bölümde ise dinamik üç eksenli deney aletinde tekrarlı yük uygulanan yapısı itibari ile kısmi doymuş olan numuneler kullanılmıştır. Çöp sızıntı suyu ile kür havuzunda kirlenmeye bırakılan numuneler belli zaman aralıklarında alınarak dinamik deneyler yapılmıştır. Bu numunelerin kür süresi 1 gün ile 718 gün arasında değişmektedir. Farklı kür sürelerinde beklemiş numuneler benzer sıklık oranlarına ve farklı doygunluk değerlerine sahiptir. 100 kPa konsolidasyon basıncı altında dinamik deneyler yapılan bu numunelerde çöp sızıntı suyunun neden olduğu zemin yapısı değişikliğini etkilememek için suya doygunluğu sağlayan vakum altında karbondioksit gazı ve damıtık su geçirme işlemleri uygulanmamıştır.

Bu çalışmada kısmi doymuş kirlenmiş kum numunelerin farklı doygunluk değerlerinde yapılan dinamik deneyler sonucu davranışları incelenerek doygunluğun kirlenmiş numuneler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda doygunluk değerinin düşmesinin temiz kum numunelerde olduğu gibi çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numunelerde de sıvılaşmaya karşı direnci artırdığı gözlenmiştir. Doygunluk değerinin $B=0.25$ değerine düştüğünde ise sıvılaşmanın oluşmadığı görülmüştür.

Kirlenmiş numunelerde kür süresinin etkisinin incelendiği çalışmanın devamında kısa kür sürelerindeki numuneler ile daha uzun kirlenmeye maruz kalmış numuneler kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde farklı kür sürelerinde kirlenmiş numunelerle yapılan çalışmalarda kür süresinin gerilme - şekil değiştirme davranışına etkileri incelenmiş ve benzer özellikteki temiz kum numuneleri ile davranışları karşılaştırılmıştır. Buna göre kısa kür süreli numunelerde ($t=1-10$ gün) düşük doygunluk değerlerinde temiz zemine benzer davranış sergilediği görülmüştür. Kür süresinin uzamasıyla birlikte numunelerde boşluk suyu basıncı ve dinamik eksenel deformasyon oluşumları daha erken sürelerde meydana gelmektedir. Doygunluk değerinin düşmesi numunelerde kirlenme ile sıvılaşma etkisinin azalmasına neden olmakta ve doygunluk $B=0.50$ değerinin altına düştüğünde ise kirlenme etkisi

görülmemektedir. Hem temiz hem de çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kumlarda yaklaşık olarak kritik deformasyon seviyesi $\varepsilon_{\text{kritik}} = \pm 0.50$ olarak hesaplanmış ve davranış biçimlerinin benzer olduğu gösterilmiştir.





THE EFFECT OF LEACHATE ON THE BEHAVIOR OF SAND

SUMMARY

The most important problem for the solid waste landfill foundations is leachate wastewater which affects the quality of groundwater and underlying soil stratum. The organic and inorganic components of the leachate generated by the uncontrolled and haphazardly stored solid waste landfill through the rain mix with into the groundwater and soil layers and affect the geotechnical properties and dynamic behavior of the soil. Leachate mix with different soil layers and groundwater in the index characteristics of soils together with the organic, inorganic, and heavy metals it contains. The physical and chemical reactions of leachate can cause behavioral changes on the soils over time under the effect of cyclic loading. These behavioral changes have been reported in previous studies with cohesive soils, such as changes in plasticity, bearing capacity losses, low permeability, etc. causes differences in many geotechnical properties. The organic substances contained in leachate water, pH, and ion exchange generally have an effect on the geotechnical properties of cohesive floors.

In this research, the dynamic behavior change made by leachate over time, which leaks from sloppy clay barriers or reaches different ground layers caused by uncontrolled storage, was examined. Sands used in this study have been obtained from Akpınar district in İstanbul, Turkey and compared the dynamic behavior of the cohesionless sand samples polluted with leachate with clean sand samples. The samples used in the study were prepared both clean and polluted, with a diameter of 50 mm and a height of 100 mm, by dry pluviation method. Cyclic vertical loads at different stress levels were applied to the samples with various relative density from at the cyclic triaxial test system. During the saturation process from the clean samples desired to be saturated soils, firstly carbon dioxide (CO₂) gas and then distilled water were applied under the vacuum at the cyclic triaxial test system but not to the sand samples including %100 to avoid change of its characteristics and also partly saturated sand samples to compare with the polluted samples at similar saturation level.

To minimize the effect of preparation methods on structure of sand samples, reconstitute sand samples were prepared by dry pluviation in the modified splitted mold. The mold is covered by membrane and with a cap in the bottom. The mold has bottom and upper caps with small draining holes. After preparation of the sample, upper cap was put on the mold. A group of sand sample in the mold was put in the wastewater tank to keep for different cure time. Due to the chemical reactions that occur over time at the leachate tank, methane gas is discharged to the environment by opening the gas outlet valve at regular periods.

The pollution process has been started by soaking the samples placed in the previously prepared modified molds with the dry pluviation method in the leachate tank at 100% cure ratio. It was observed that some of the air in the samples came out as a result of the leachate entering through the drainage holes during the pollution process.

Within the scope of this study firstly, the maximum elasticity modules of saturated soils were calculated and the dynamic behavior of the samples prepared in the standard mold and modified splitted mold used in polluted sample installation was examined.

In the research, experiments in the triaxial test system were divided into three groups. First, saturated clean samples were prepared and the liquefaction behavior of Akpınar sand was observed. Experiments in these samples, which were prepared and saturated with similar relative density, were kept the range of $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ and 0.30 stress ratio. At this stress range, all of the samples with a skempton - B value of 0.95 and above show a tendency to liquefy at $N = 30$ cycles and earlier, which shows that they pose a serious risk for earthquakes with $M_w = 7.5$ and above. Then, different stress levels were applied to the samples left to consolidate under two different pressures, 100 kPa and 30 kPa, creating the dynamic strength curve of Akpınar sand. According to this curve, there is a high risk when the stress ratio rises $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ and above at clean sand samples under 100 kPa consolidation pressure, and the stress ratio is $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.48$ and above at clean sand samples under 30 kPa consolidation pressure. With the rapidly increasing in pore water pressure at saturated sand samples above these stress levels, strain are increases and the soil tends to liquefy.

At the second stage, the effects of saturation on dynamic behavior were investigated in clean samples calculated at different saturation levels. In order to create a low saturation degree prepared at the laboratory samples, carbon dioxide gas and distilled water passing processes under vacuum were skipped at this stage. As a result of the experiments carried out, the effects of saturation with partially saturated clean samples calculated at different saturation degree on stress-strain behavior at $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ and 0.30 stress ratio were examined. As a result of the experiments, it was seen that the decreasing in the skempton-B value affected liquefaction potential at clean samples. Liquefaction was not observed when the saturation value in clean sands decreased to $B=0.37$.

In the last part of the study, in which polluted with leachate was investigated, partially saturated samples were used due to the cyclic load applied in the dynamic triaxial test instrument. The samples to be put into the leachate tank were taken at certain time periods and dynamic tests were carried out. The samples, which were kept in different pollution period from 1 day to 718 days, which is called curing time, have similar relative density and different saturation levels. In these samples, where dynamic tests were performed under 100 kPa consolidation pressure, carbon dioxide gas and distilled water processes were not applied under vacuum during the saturation process to avoid to change of its characteristics.

The dynamic behavior of partially saturated polluted sand samples at different saturation values was investigated, and the effect of saturation on polluted samples was examined. As a result of the experiments, it was observed that the decreasing the saturation level increased the resistance of liquefaction both polluted and clean sand samples. When the saturation level decreased to $B=0.25$, it was seen that liquefaction did not occur.

As a result of the experiments, it was observed that the decrease in the saturation value increased resistance to liquefaction in samples polluted with leachate as well as in clean sand samples.

In the proceeding stage of the study, in which the effect of curing time was examined in polluted samples, samples with short curing times and longer polluted sand samples were used. Leachate disrupts the structure of soils over time due to its organic,

inorganic, and heavy metal content. While the effect of organic substances was high in the content of leachate in the early period, the organic contents decreased as time passed and were placed to the effect of inorganic substances and heavy metal contents. In this part of the study, the effects of curing time on stress-strain behavior were examined carried out with samples polluted at different curing times, and their behavior was compared with the clean sand samples of similar properties. Accordingly, it is seen that at low saturation degree on short curing sand samples shows similar behavior with clean soil samples ($t = 1-10$ days). With the longer curing time, pore water pressure and dynamic axial deformation occur at the samples earlier. In other words, with the increasing of curing time, increases the liquefaction potential on polluted sand samples. The decrease in saturation value at polluted sand samples causes a decrease in the liquefaction potential of samples. and when saturation drops below $B=0.50$, there is no pollution effect. When the saturation degree is under the value of $B=0.50$, the effect of pollution is not observed. Approximately, the critical level of deformation was calculated as $C_{critical} = \pm 0.50\%$ at sand samples polluted with both clean and leachate, and their behavior has been shown to be similar.



1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Ülkemizde en fazla can ve mal kaybı yaşadığımız doğal afetlerin başında deprem gelmektedir. Plansız yapılaşma, hızlı nüfus artışı, engellenemeyen göç dalgaları, hızla sanayileşen kentler gelişi güzel ve kontrolsüz yapı stokunun çoğaltmakta, bunun sonucu olarak da depremlerle gerçekleşen kayıpları artırmaktadır. Depremler nedeniyle son yıllarda yaşanan bu kayıplar, yapı- zemin ilişkilerinin ve beraberinde dinamik zemin mühendisliğinin önemini daha fazla artırmaktadır.

Nüfus artışıyla doğru orantılı artan insan ihtiyaçları sonucunda ortaya çıkan evsel katı atıkların düzenli depolanması, günümüzün başlıca sorunlarından birisi olmaktadır. Gelişen teknoloji ile beraber çeşitli bertaraf şekilleri olsa da ülkemiz için halen en ekonomik ve kolay olan yöntem düzenli katı atık depolamadır.

Türkiye İstatistik Kurumu Belediye Atık İstatistikleri, Aralık 2021 verilerine göre Türkiye’de 2020 yılı itibarı ile oluşan katı atık miktarı 104.8 milyon ton/yıl olup bu atıkların 30.9 milyon tonu tehlikeli atık sınıfına girmektedir. Belediyelerde toplanan kentsel katı atık miktarı 32.3 milyon ton/yıl olup toplanan bu atıkların % 69.4 ’ü düzenli depolama ve kompostlaştırma gibi atık yönetimi mevzuatına uygun yöntemlerle bertaraf edilmekte olup, %13.2 si geri kazanım tesislerinde ve geri kalanı ise kontrolsüz şekilde depolanmaktadır. Belediyeler tarafından toplanan günlük katı atık miktarı 1.13 kg/kişi dir (TÜİK, 2020).

Kontrolsüz ve gelişigüzel yapılan depolamalar birçok problemi de beraberinde getirmekte olup, katı atıkların yağmur suyu beraberinde oluşturdukları sızıntı suları, yer altı sularına ve zemin tabakalarına karışarak insan sağlığını ve güvenliğini ciddi şekilde etkilemektedir.

Depo sahalarının zeminden tecridini sağlamak için permeabilitesi düşük killerden faydalanılmaktadır. Bu kil şilteler tabakalar halinde depo sahalarına serilerek kilin geçirimsizliğinden faydalanılmış, böylelikle çöp sızıntı sularının daha alt zemin tabakalarına ve zemin sularına karışmasının önüne geçilmiştir. Erken ve Yaşargün

(2015) tarafından çöp sızıntı suyunun örselenmemiş kil zeminler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında çamur konsolidasyon aletinde bir ay süre ile konsolidasyona bırakılan sızıntı suyu katkılı kil numuneleri farklı kür oranında hazırlanarak değişik kür sürelerinde dinamik üç eksenli deneylere tabi tutulmuştur. Bu deneyler neticesinde örselenmemiş kil numunelerin dinamik yükler altındaki davranışları araştırılmış, atterberg limitleri ile likit limit ve plastisite indisi değerleri değişimi, ödometre deneyleri ile sızıntı suyunun konsolidasyon katsayısı ve permeabilite katsayısı üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Araştırmalar neticesinde gerek zemin endeks özellikleri gerekse dinamik yükler altındaki değişimlerini göz önüne alındığında çöp sızıntı suyunun killi zeminlerin kimyasal yapısını bozarak, zamanla davranış değişikliklerine sebep olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada önceki çalışma kapsamı genişletilerek çöp sızıntı suyuna maruz kalan kum zeminlerin dinamik durumdaki davranış değişiklikleri incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında genel olarak özensiz yapılan kil bariyerlerden sızan veya tamamen kontrolsüz depolama sonucu kum zemin tabakalarına ulaşan atıkların oluşturduğu çöp sızıntı sularının, bu zeminlerin yapılarında meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sızıntı suyuna maruz kalan kum zeminlerin dinamik üç eksenli deney aletinde tekrarlı yükler altındaki davranışları incelenmiş olup, doygunluk durumunun değişimine bağlı olarak sıvılaşma potansiyelleri araştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda hedeflenen, yer altı suları vasıtası ile kohezyonsuz kum zemin tabakalarına ulaşan çöp sızıntı sularının içeriğinde bulunan organik ve inorganik kirleticiler ile beraber ağır metallerin, süre etkisi ile birlikte meydana getirdiği değişikliklerin incelenmesidir. Kimyasal süreçler ile birlikte ortaya çıkan bu değişikliğin, tekrarlı yüke maruz kalan kum zemin tabakalarında meydana getirdiği sıvılaşmaya olumlu veya olumsuz etkileri araştırılmıştır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Giriş kısmı ile beraber altı ana bölümden oluşan bu tez çalışmasının ilk bölümünde çalışmanın kapsamı ve hedeflediği amaç hakkında bilgiler verilmektedir.

İkinci bölümde çöp sızıntı sularının özellikleri incelenmiş olup, içerdiği kirleticiler ve bu kirleticinin zaman içerisinde oluşturduğu biyolojik ve kimyasal süreçler hakkında bilgi yer almaktadır.

Üçüncü bölümde dinamik zemin parametreleri hakkında bilgiler verilerek özellikle bu çalışmanın da konusu olan sıvılaşma kavramı ve kum zeminlerin sıvılaşma mekanizmaları hakkında bilgilere yer verilmektedir. Temiz kum zeminlerde doygunluk kavramına değinilerek, tam doygun ve kısmi doygun kumlar üzerinde yapılan geçmiş çalışmalara yer almaktadır.

Dördüncü bölümde çeşitli katkı ve kirletici etkisindeki zeminlerin endeks özelliklerindeki değişimleri ve dinamik davranış değişiklikleri ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiş olup, bu katkı ve kirleticilerin zemin iyileştirmedeki rolünden bahsedilmektedir.

Beşinci bölümde çalışmada kullanılan temiz ve kirlenmiş kum numunelerin hazırlanması ve çöp sızıntı suyunda kirletilmesi hakkında bilgiler verilerek, dinamik üç eksenli deney sistemine değinilmektedir. Dinamik üç eksenli deney sisteminin çalışma prensibi ve deney numunelerinin kuruluşundan teste kadar olan aşamalar ayrıntılı olarak maddeler halinde anlatılmaktadır.

Deney sonuçlarının değerlendirmelerini oluşturan altıncı bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan dinamik deneylere ve bu deneylerin karşılaştırılmalarına yer verilmiştir.

Tezin son bölümünde ise sonuç ve önerilerden bahsedilmektedir.



2. ÇÖP SIZINTI SUYUNUN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

2.1 Çöp Sızıntı Suyunun Özellikleri

Çöp sızıntı suları, evsel nitelikteki katı atıkların içindeki nemin ve yağan yağmur sularının katı atık partiküllerinin aralarında süzülmesi ile oluşan; içinde organik, inorganik ve ağır metaller barındıran atık sulardır.

Sızıntı sularının özellikleri; üzerindeki evsel atıkların muhtevasına, stabilizasyon durumuna ve depo sahasının yaşına göre değişiklikler taşır. Özellikle bir depo sahasının yaşı sızıntı suyunun karakteristiği açısından önem arz etmektedir. Genç ve yaşlı depolama alanları olarak ikiye ayrılan bu depo sahalarında sızıntı suyu özellikleri değişiklikler gösterir. Genç depo sahalarında organik içerik yüksek iken, depo sahasının yaşı ilerledikçe kolay ayrılan organik madde içeriği düşerek, inert madde miktarı artış gösterir. Yani genç depo sahaları daha aktif organik maddeler içerirken, yaşlı depo sahalarında inorganik madde miktarları ve ağır metaller fazladır.

2.2 Genç ve Yaşlı Deponilerin Bileşenleri ile İlgili Çeşitli Veriler

Genç ve yaşlı depolama alanlarından sızıntı suyu bileşenlerinin tipik değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Tchobanoglous ve diğ., 1993).

Çizelge 2. 1 : Genç ve yaşlı depolama alanlarından sızıntı suyu bileşen değerleri.

Değer, mg/L			
Bileşen	Genç Deponi (İki Yıldan Küçük)		Yaşlı Deponi (10 Yıldan Büyük)
	Değer Aralığı	Tipik Değerler	
BOİ ₅	2.000-30.000	10.000	100-200
TOK	1.500-20.000	6.000	80-16
KOİ	3.000-60.000	18.000	100-500
Toplam Askıdaki Katı Maddeler	200-2.000	500	100-400

Çizelge 2. 2 (devam): Genç ve yaşlı depolama alanlarından sızıntı suyu bileşen değerleri.

Organik Azot	10-800	200	80-120
NH ₃	10-800	200	20-40
NO ₃ -	5-40	25	5-10
Toplam Fosfor	5-100	30	5-10
Orto Fosfor	4-80	20	4-8
Baziklik CaCO ₃	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH (birimsiz)	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Toplam Sertlik CaCO ₃	300-10.000	3.500	200-500
Ca	200-3.000	1.000	100-400
Mg	50-1.500	250	50-200
K	200-1.000	300	50-400
Na	200-2.500	500	100-200
Cl	200-3.000	500	100-400
SO ₄ ²⁻	50-1.000	300	20-50
Toplam Demir	50-1.200	60	20-200

2.3 Çöp Sızıntı Suyu Bileşenleri

Çöp sızıntı suları yapısı itibariyle birçok bileşenden oluşur. (Christensen ve diğ., 2001)

Bu bileşenleri dört ana başlık altında incelemiştir. Bunlar;

- Kimyasal oksijen ihtiyacına bağlı olan çözülmüş organik maddeler veya CH₄ içeren toplam organik karbon, fulvik ve hümik asitleri gibi ısıya dayanıklı bileşikler ile uçucu yağ asitleri
- İnorganik büyük bileşikler: Sodyum, Magnezyum, Potasyum, Kalsiyum, NH₄⁺, Klor, Manganez, Demir, Sülfat, Bikarbonat
- Ağır Metaller: Kurşun, Çinko, Nikel, Kadmiyum, Bakır, Krom
- Düşük konsantrasyondaki evsel ve endüstriyel kimyasal ksenobiyotik organik bileşikler (XOClar) (genellikle 1 mg/l den az bulunan tekil bileşikler): Bu bileşikler çeşitli aromatik hidrokarbonlar, fenoller ve klorlu alifatikler gibi içeriklerdir.

Çöp sızıntı suları yapısında bulundurduğu organik, inorganik, ağır metal ve mikro kirleticiler sebebiyle çeşitli kimyasal proseslere sebep olur. Zemin tabakalarına nüfus eden sızıntı suları yıllar içerisinde bu tabakalarda reaksiyon göstererek bulunduğu zeminin yapı ve davranışını değiştirmektedir.

2.4 Çöp Sızıntı Suyunun Kimyasal Süreçleri

Herhangi bir katı atık depo sahasının kullanım süresi boyunca geçireceği kimyasal süreçler beş fazda incelenmektedir (Landfilling of Waste: Leachate, 1992, Bölüm 2.4).

2.4.1 Aerobik bozulma fazı

Bu aşamada atığın oksijen ihtiyacı fazladır. Ortamdaki oksijen ile organik maddeler aerobik şekilde parçalanır. Su, Karbondioksit, Nitratlar ve Sülfatlar oluşur. Bu tepkimeler sırasında ortamdaki ısı artar ve pH düşer.

2.4.2 Geçiş fazı

Bu fazda çözünmüş oksijen seviyesinde azalma hızlıdır. Koşullar aerob ortamdan anaerobik ortama doğru kayar ve çözünmüş oksijen seviyesinde hızla azalma olur. Serbest oksijendeki azalma ile beraber elektron alıcılar O_2 'den CO_2 ve nitrat ile sülfatlara kayar. Fermantasyon ve asit üreten bakterilerin faaliyeti sonucu uçucu yağ asitleri, amonyum azotu (NH_3-N), CO_2 ve H_2 üretilir. Bu fazın sonunda asidik sızıntı suyunda önemli miktarda KOI ve uçucu yağ asitleri oluşur ve yüksek derişimlerde yağ asitleri, Ca, Fe, ağır metaller ve amonyak içerir.

2.4.3 Asit Üretimi fazı

İlk iki fazda hidroliz sonucu oluşan ürünler anaerobik mikrobiyolojik süreçlerle bozunarak uçucu yağ asitlerine dönüşürler ve pH seviyesi düşer (<5), ağır metal iyon seviyesi yükselir. Depo gazındaki CO_2 oranı ve sızıntı suyundaki uçucu yağ asidi seviyesi yüksektir. Anaerobik ayrışmanın göstergesi olarak, SO_4^{2-}/Cl^- oranında hızlı azalma meydana gelir.

2.4.4 Metan Üretim fazı

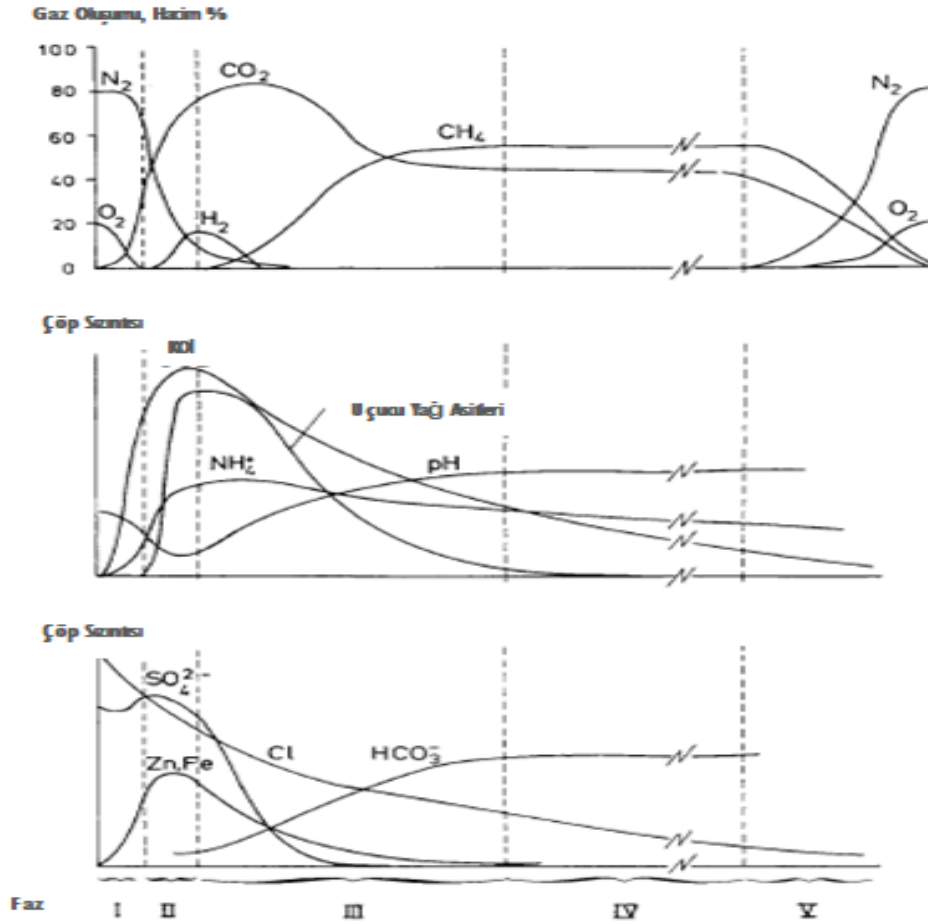
Üçüncü faz sonunda, asetat, H_2 ve CO_2 'ye kadar parçalanmış uçucu yağ asitleri gibi son ürünler, iki farklı metan yapıcı mikroorganizma tarafından CH_4 ve CO_2 'ye dönüştürülür.

Birinci grup asetat kullanan metanojenler asetatın parçalanmasıyla CH_4 ve CO_2 verir. Diğer grup H_2 ve CO_2 sentezleyerek CH_4 üretirler. Bu aşamada, ortamdaki SO_4^{2-} ve

NO_3^- sırası ile H_2S , HS^- ile NH_4^+ ve NH_3 'e indirgenirler. Yükselen pH (6-8 seviyeleri) metan yapıcılar için uygun ortam sağlar ve ağır metallerde kompleks oluşturarak çöktürür ve sızıntı suyundan uzaklaştırılır. Bu evre, biyogazdaki yüksek CH_4 oranı ve sızıntı suyunda düşük uçucu yağlar ve ağır metal iyonları seviyesi ile anılır.

2.4.5 Olgunlaşma fazı

Bu aşamada oldukça azalan gaz üretimi sonrasında kirlilik seviyesi oldukça düşer ve oksitlenmiş azot bileşikleri (NO_3^-) oluşmaya başlar. Bu fazda, yavaş ayrışma ile birlikte kararlı yapıdaki organik maddeler ayrıştırılarak hümik maddeler üretilir. Bu dönem faaliyetsiz yaşlı depo sahalarında gözlemlenir (Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, 2012, Bölüm 2.1). Şekil 2.1'de düzenli depolama sahasındaki sızıntı bileşenleri ve gazların değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Düzenli depolama sahasındaki sızıntı bileşenleri ve gazların değişimi (Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, 2012, Bölüm 2.1).

2.5 Çöp Sızıntı Suyunun Zeminlerin Yapısı Üzerine Etkileri

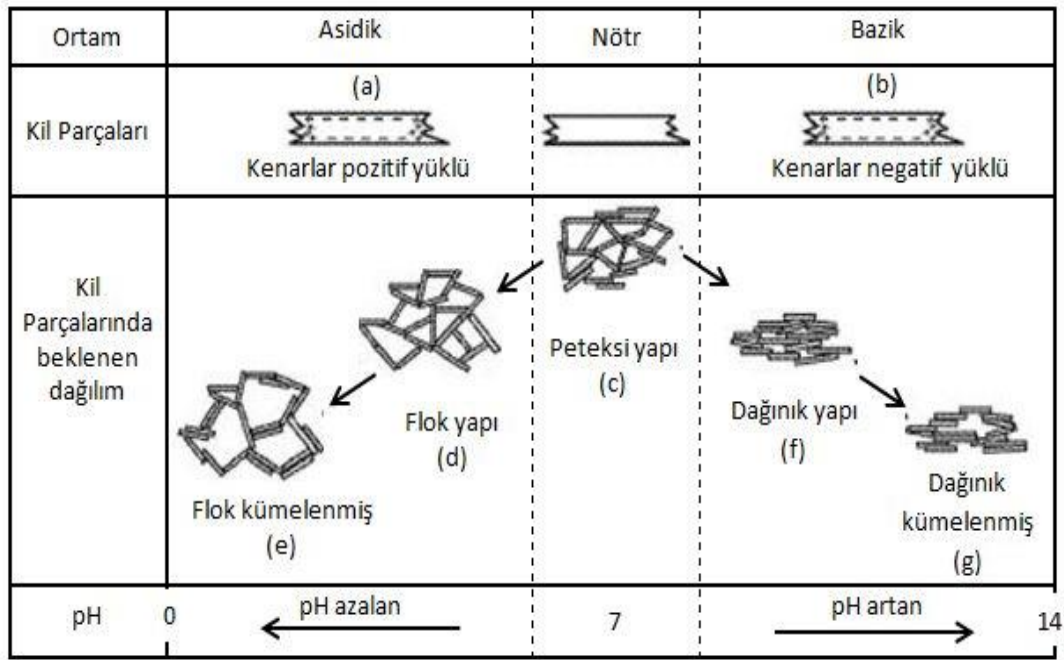
Katı atık depolama tesislerindeki sızıntı suları kil bariyerlere ulaşarak kilin yapısına nüfuz eder. Burada kimyasal ve biyolojik aktivitelere sebep olan sızıntı suları zeminlerin yapıları ve davranışları üzerinde değişikliklere sebep olur.

Bu bölümde sızıntı sularına maruz kalan zeminlerin organik madde ve inorganik maddeler ile ağır metal bileşenlerinin içine nüfuz ettiği zeminin yapısında meydana getirdiği değişimler incelenmiş olup, bununla ilgili çalışmalar ve bu çalışmalar neticesinde varılan sonuçlara yer verilmiştir.

2.5.1 PH etkisi

Zeminlerde geoteknik özellikler üzerinde önemli etkiye sahip olan pH değeri sızıntı suyunun niteliğine göre farklılıklar gösterir. Depo bölgesinin yeri, buradaki mevsim geçişleri ve yağış rejimi gibi etkenler çöp sızıntı suyundaki pH değerini değiştirir. Genel olarak genç sızıntı sularında asidik seviyelerde bulunan pH değeri metan üretim fazında yükselmeye başlayarak depo sahası yaşlandıkça bazik seviyelere çıkar. Yükselen pH, sızıntı suyunda ağır metallerin çökmesini sağlar.

Yapılan birçok araştırma neticesinde kil ağırlıklı zeminlerde düşük pH ortamında zemin parçacıklarının kenarları pozitif yük ile yüklenerek (Şekil 2.2-a), baştan uca ve uçtan uca bağlanarak flok yapılar oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 2.2-d). PH seviyesi nötr iken peteksi yapıya dönen danelerin (Şekil 2.2-c), yüksek pH seviyelerinde paralel dizilim (Şekil 2.2-f) sergilediği belirlenmiştir. Kil parçaları üzerinde bulunan OH⁻ iyonları ayrışarak tepkimeye girer ve bu da kil içeriğindeki pH değeri üzerinde değişikliğe sebep olur. pH artışı ile pozitif H iyonunun tepkimeye girmesi ile birlikte negatif H yükü artar. Yani başka bir deyişle asidik durumda kenarlar pozitif iyon yükü ile yüklenmiş, bazik durumda ise kenarlar negatif iyon yükü ile yüklenmiş durumdadır.



Şekil 2. 2 : Kil parçalarının farklı pH seviyelerindeki şematik dağılımı (Gratchev ve diğ. 2006).

pH’ daki değişikliğin etkisinin incelendiği bir çok çalışmada pH seviyesindeki değişimin zemin parçacıklarının yapısını değiştirerek sıvılaşma potansiyelini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Gratchev ve diğ. (2006), yaptıkları çalışmalarda pH değişiminin sıvılaşma duyarlılığına etkisinin büyük ölçüde kil tabakalarının mineralojik bileşenlerine göre değişiklik gösterdiğini savunmuşlardır. Asidik fazda yaptıkları çalışmalarda kaolin-kum karışımı numunelerin sıvılaşma potansiyelinde küçük artışlar gözlemlenirken, illit ve bentonit kum karışımının sıvılaşma potansiyelinde azalmalar gözlemlenmiştir.

2.5.2 Organik maddeler

Sızıntı sularının bileşenleri arasında çok miktarda çözünmüş organik madde bulunmaktadır. Bu organik maddeler zemin katmanları içine karışarak kimyasal yapının değişmesine sebep olmaktadır. Organik madde içeriğinin zeminler açısından zararlı etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Zemin içeriğinde bulunabilecek protein, aromatik hidrokarbonlar, fenoller ve klorlu alifatikler gibi bileşenler, zeminlerde permeabilitenin düşmesine, mukavemette azalmalara, yüksek plastisiteye ve rötreye sebep olabilmektedir. Birçok araştırmacı organik içerikli zeminlerin su muhtevası, likit limit, spesifik gravite gibi fiziksel özellikleri araştırmıştır. Huat (2004) ve

Zainorabidin ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmalarda zemin içindeki organik maddelerin yüksek derecede sıkışabilirliğe, düşük kayma dayanımına, yüksek su tutma kapasitesine ve taşıma gücü kayıplarına neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

2.5.3 Ağır metaller

Çöp sızıntı sularındaki ağır metal miktarları depolama alanlarındaki atıkların cinsine ve sıklığına göre değişiklik göstermektedir. Genç deponi sahasındaki organik içerik yüksekliği deponi sahası yaşlandıkça azalarak yerini inorganik içeriklere ve ağır metallere bırakır.

Yer altı sularına sızan sızıntı suları içerdiği ağır metaller ve bunların oluşturduğu toksik maddeler nedeniyle birçok çevresel tehdide neden olduğu gibi, zemin yapılarında da kimyasal bozulmalara sebep olarak doğrudan tabakaların performansını etkilemektedir.

Resmi ve diğ. (2011) kirletici olarak kurşun seçerek yapmış olduğu yapay solüsyonu kil numunesine karıştırarak, kirlenmenin mühendislik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kurşunun killi zeminde emilimi sonucunda H^+ iyonları yer değiştirdiğini ve flok yapılar oluşturduğunu, oluşan bu yapısal değişimin ise dayanımın düşmesini sağladığını ve permeabilite katsayısını artırdığını gözlemlemiştir. Bir diğer araştırmada Turer (2007) alkali ve ağır metal kirlenmesinin killerdeki şişme etkisini incelemiştir. Çalışmasında çinko ve kurşun gibi ağır metallerin yanı sıra sodyum hidroksit kirleticisini de kullanmıştır. Çalışma sonucunda kirlenmenin şişme kapasitesini önemli bir şekilde değiştirdiği sonucuna varılmış olup, en çok şişme değişimi %13.9 ile sodyum hidroksit ($NaOH$ -) kirleticisinde gözlemlenmiştir.



3. KUMLU ZEMİNLER

Kumlu zeminler kohezyonsuz ve drenaj oranı yüksek zeminlerdir. Bu tür zeminlerde daneler arası çekim gücü çok zayıftır. Kumlu zeminlerde yapı yüklerinden kaynaklanan oturmaların büyük bir kısmının hızlı gerçekleşmesi nedeniyle, oturmanın sınırlandırılması büyük önem arz eder. Bu zeminlerde taşıma gücü kapasitesi içeriğindeki silt ve derecelendirme oranına bağlı ve içsel sürtünme açısıyla doğru orantılı, bu açı ise 30-450 (ϕ) arasında değişmektedir. Kumlu zeminlerin su sızdırması çok hızlı olup, suyu kendi bünyelerine almazlar. Bu nedenle bu zeminlerde genleşme ve emniyet gerilmeleri su muhtevasına göre değişmez. Kumlu zeminler deprem etkisi altında sıvılaşabilen zeminler olduğu için boşluk suyu basıncının değişimine oldukça dikkat etmek gerekir.

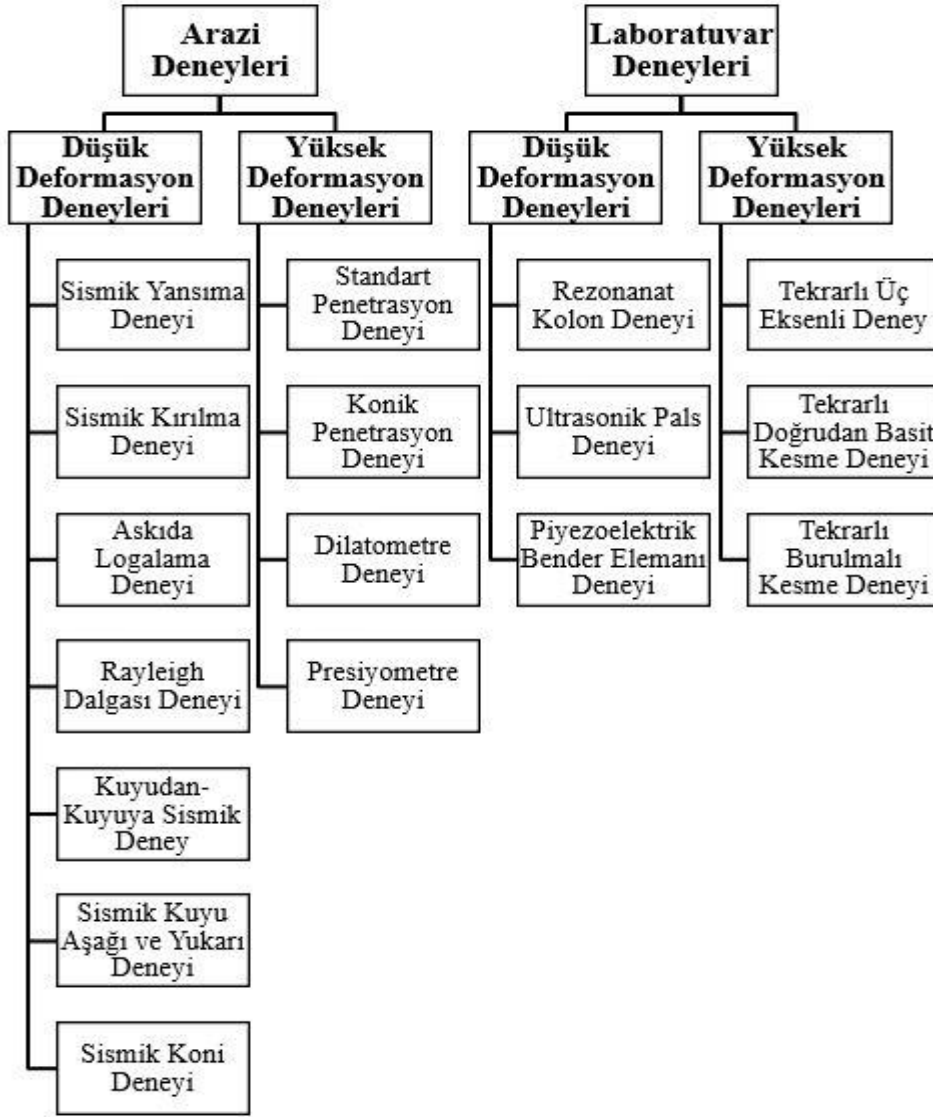
3.1 Kumlu Zeminlerin Dinamik Yükler Etkisi Altındaki Davranışı

Deprem dalgalarının neden olduğu tekrarlı yükler, tüm zemin tabakalarında olduğu gibi kum zeminlerin davranışlarında da değişikliğe neden olur. Genel göçme davranışı kil benzeri ince daneli zeminlerde taşıma gücü kayıpları şeklinde oluşurken, bu durum kum benzeri kohezyonsuz zeminler için sıvılaşma olarak tanımlanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde dinamik zemin parametrelerine değinilerek sıvılaşma mekanizmasından bahsedilmiş, sıvılaşmaya etki eden faktörlerle birlikte doygun ve doygun olmayan kumların dinamik yükler altındaki sıvılaşma davranışlarının incelenmesine yer verilmiştir.

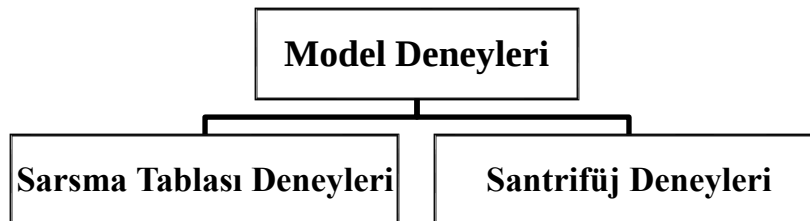
3.1.1 Dinamik zemin parametrelerinin deneylerle ölçülmesi

Dinamik yüklere maruz kalan zeminin davranışı dinamik zemin özellikleri ile açıklanmaktadır. Dinamik zemin özelliklerini dinamik zemin parametreleri vasıtasıyla ölçerek karşılaştırmaktayız. Bu ölçümler saha ölçümleri ve laboratuvar ölçümleri olduğu gibi, bazen her ikisinin kombini şeklinde de olabilir.

Dinamik zemin özelliklerinin ölçülmesinde en yaygın olarak kullanılan arazi ve laboratuvar deneyleri Şekil 3.1’de, model deneyler Şekil 3.2’de gösterilmiştir (Kramer, 1996).



Şekil 3. 1 : Dinamik zemin parametreleri ölçülmesinde kullanılan arazi ve laboratuvar deneyleri (Kramer, 1996).



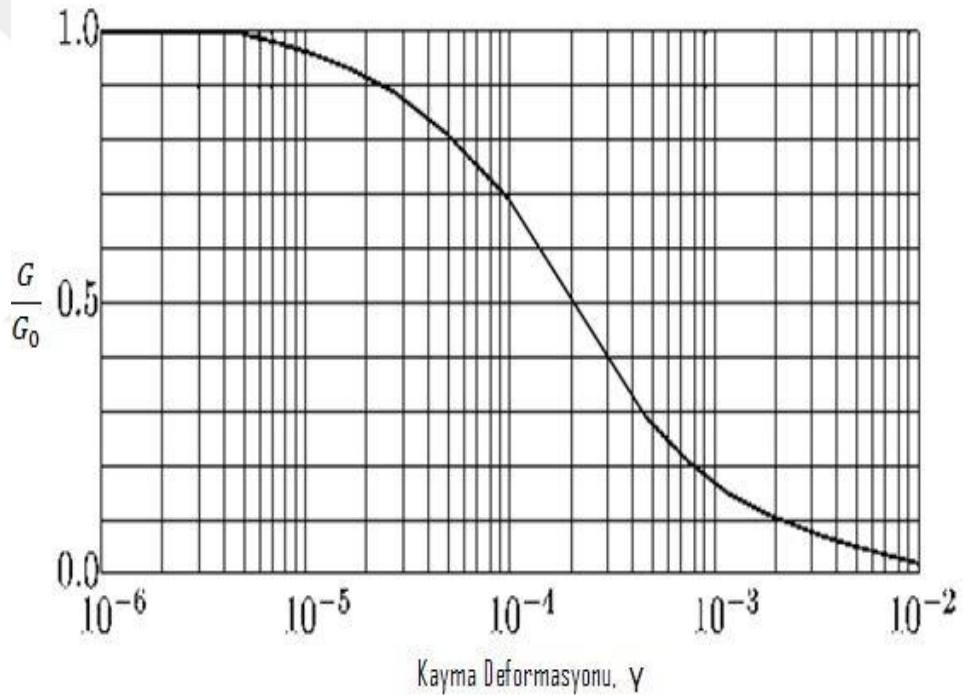
Şekil 3. 2 : Dinamik zemin parametreleri ölçülmesinde kullanılan model deneyleri (Kramer, 1996).

3.1.2 Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı

Bir zeminin dinamik etkilere tepkisinin belirlenebilmesi için zemin yoğunluğu, kayma modülü ve Poisson oranına ihtiyaç vardır. Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ise dinamik zemin özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerdir. Cisim dalgaları olan P dalgası ve S dalgasının yayılma hızı, zemin dinamiğinde önemli bir rol oynar. Dinamik kayma modülü, arazi deneyleri veya laboratuvar deneyleri yardımıyla, S kayma dalgasına bağlı olarak hesaplanır.

$$G = \rho V_s^2 \quad (3.1)$$

Kayma modülünün değeri büyük ölçüde kayma deformasyonlarının büyüklüğüne bağlıdır. Tipik bir örnek Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

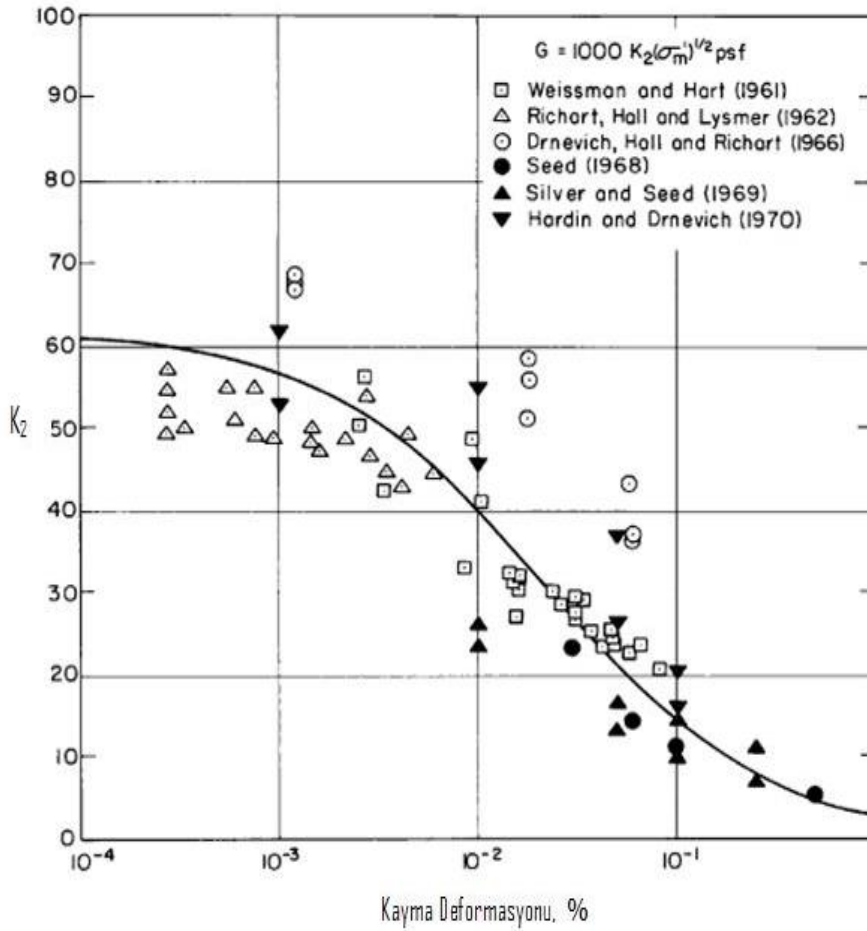


Şekil 3. 3 : Dinamik kayma modülü (Verrujit, 2010).

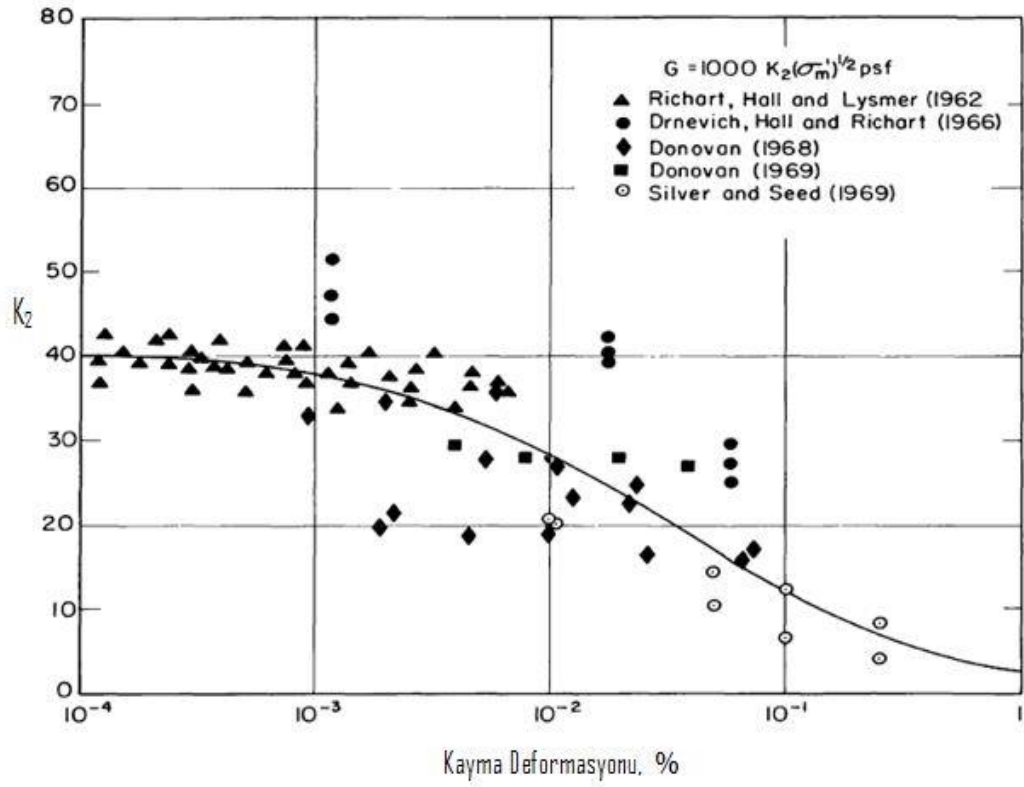
Tüm araştırmalar, kumlar için dinamik kayma modülü değerlerinin çevre basıncı, kayma deformasyonu ve boşluk oranından güçlü bir şekilde etkilendiğini, ancak dane büyüklüğü özelliklerindeki değişikliklerden önemli ölçüde etkilenmediğini göstermiştir. Dinamik kayma modülünün, çevre basıncı ile ilişkili olduğu denklem bulunmuş ve bu denklemde, Boşluk oranı ve kayma deformasyonu etkisi K_2 parametresi ile ifade edilmiştir (Seed ve Idriss, 1970).

$$G = 100K_2(\sigma'_m)^{1/2} \quad (3.2)$$

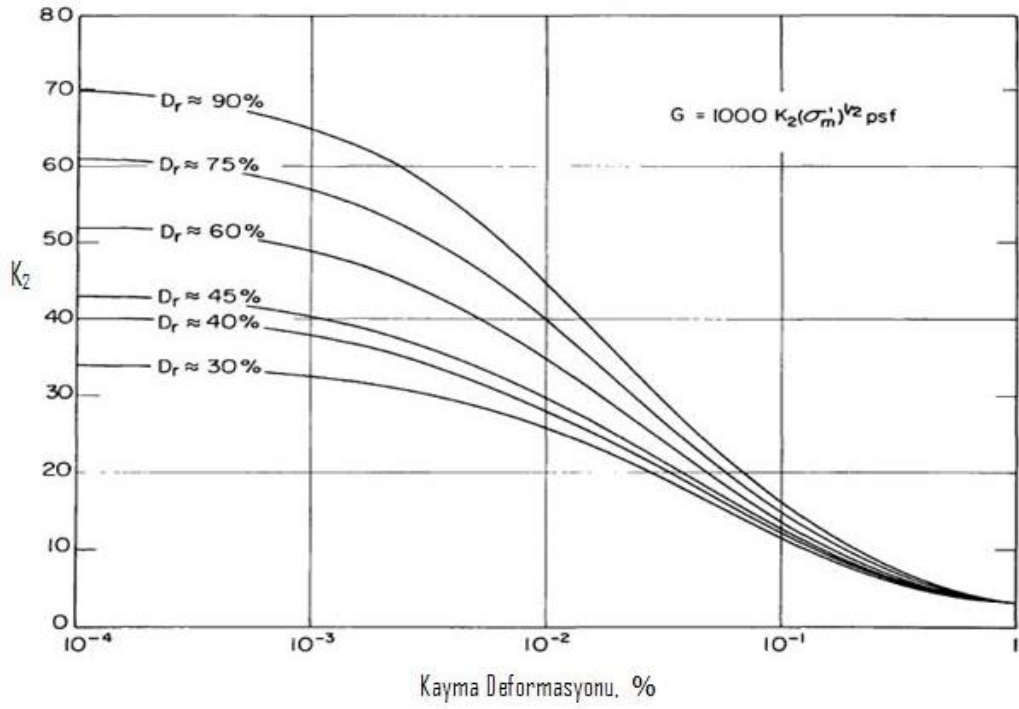
Farklı laboratuvar deney prosedürleri kullanan bazı araştırmacılar, bu faktörler arasındaki ilişkiler hakkında veri sunmuşlardır. Bu araştırmalara göre sonuçlar, yüzde 75'lik bir zemin relatif sıkılığına sahip numuneler için Şekil 3.4'te, yüzde 40'lık bir zemin relatif sıkılığına sahip numuneler için Şekil 3.5'te sunulmuştur. Diğer zemin relatif sıkılığındaki K_2 değerleri, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi enterpolasyon ile tahmin edilebilir (Seed ve Idriss, 1970).



Şekil 3. 4 : Kumların kayma modülü (Zeminin relatif sıkılığı, D_r , %75 olduğu durumda) (Seed ve Idriss, 1970).



Şekil 3. 5 : Kumların kayma modülü (Zeminin relatif sıkılığı, D_r , %40 olduğu durumda) (Seed ve Idriss, 1970).



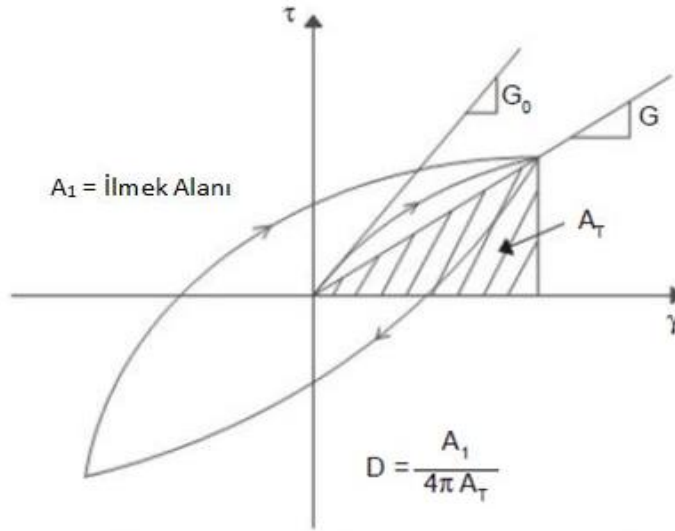
Şekil 3. 6 : Farklı zemin relatif sıkılıklarında kumların kayma modülü (Seed ve Idriss, 1970).

Belirli bir gerilme-deformasyon döngüsü için bir zeminin sönüm oranı, harcanan enerjinin döngü başına depolanan maksimum (yani elastik) enerjiye bölünmesiyle ilişkilidir. Şekil 3.7 tipik gerilme ve şekil değiştirme modelini göstermektedir. Kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu olarak ifade edilir. Kayma modülü, Şekil 3.7'deki döngü içindeki sekant çizgisinin eğimidir. Kritik sönüm oranı ise aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$D = \frac{A_i}{4\pi A_T} \quad (3.3)$$

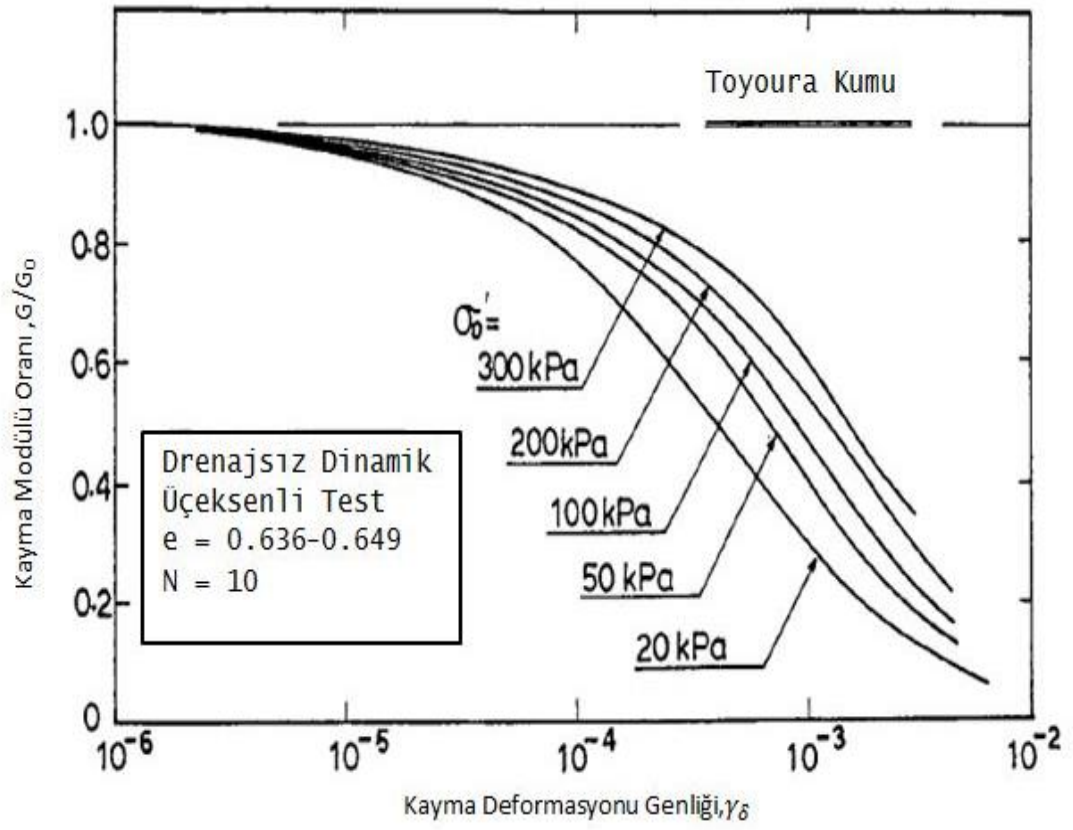
A_i = Döngünün alanı

A_T = Taralı üçgenin alanı

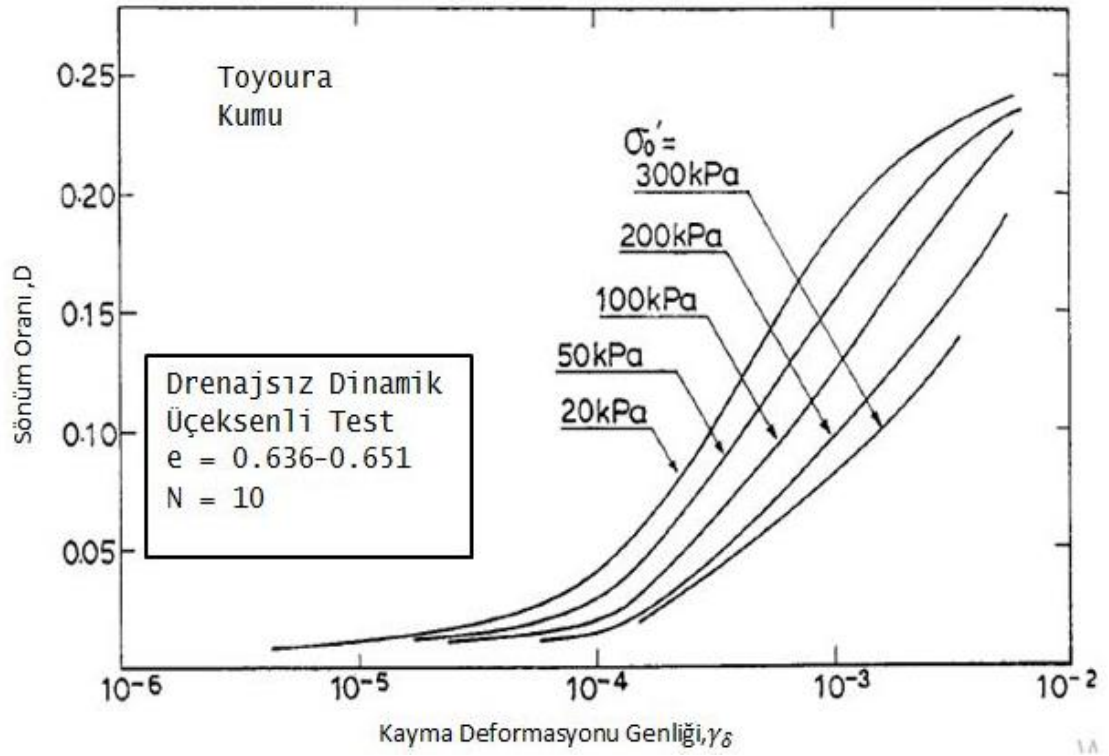


Şekil 3. 7 : Tipik bir kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu ilişkisi (Kumar, 2008).

Konsolidasyon basıncın gerilmeye bağlı dinamik özellikleri, Toyura kumu için Iwasaki ve diğerleri (1978), Tatsuoka and Iwasaki (1978) ve Kokusho (1980) tarafından incelenmiştir. Şekil 3.8'de dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak Kokusho (1980) tarafından yapılan deneylerin sonuçlarının bir özetini gösterilmektedir. Bu deney serisinde suya doygun numuneler, 20 ila 300 kPa'a kadar değişen çevre basıncına konsolide edilmiş ve drenajsız tekrarlı eksenel gerilme uygulanmıştır. Grafik, kayma deformasyonuna bağlı kayma modülündeki azalma oranının, konsolidasyon basıncı azaldıkça daha büyük olduğunu göstermektedir. Toyoura kumunun yukarıdaki ile aynı deney serisinden elde edilen sönümleme özellikleri Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Sönümleme oranının, azalan konsolidasyon basıncı ile artma eğiliminde olduğu görülmektedir (Ishihara, 1996).



Şekil 3. 8 : Konsolidasyon basıncının kayma modülüne etkisi (Kokusho, 1980).

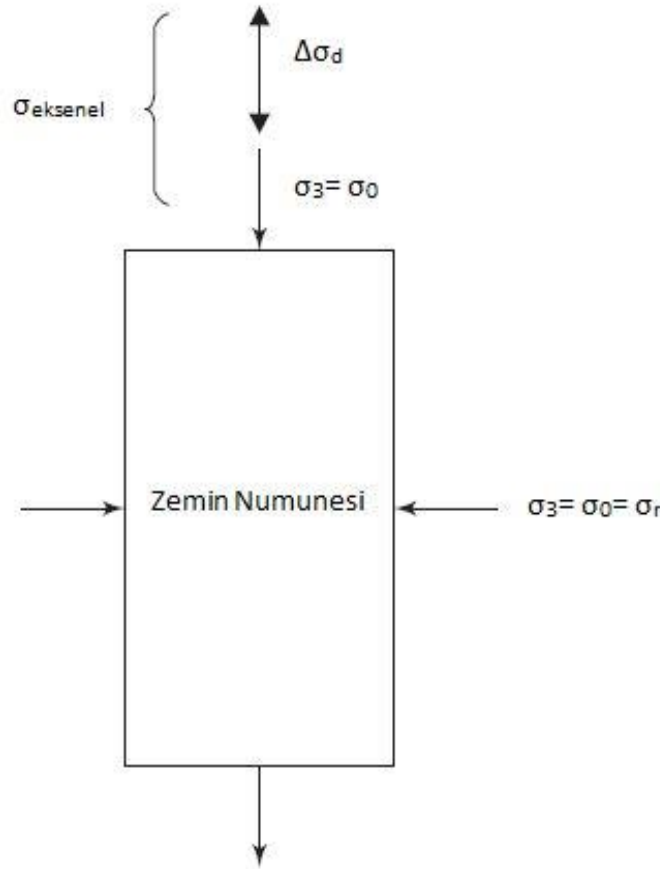


Şekil 3. 9 : Konsolidasyon basıncının sönüm oranına etkisi (Kokusho, 1980).

3.1.3 Elastisite modülü

Elastisite modülü bir cismin elastik özelliklerini tanımlamak amacıyla kullanılır. Dinamik zemin parametrelerinden birisi olan elastisite modülünü belirlemek için dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapılabilir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bu deneylerde zemin numunesine, çevre basıncı $\sigma_0 = \sigma_3$ ve tekrarlı düşey gerilme $\Delta\sigma_d$, uygulanır. Elastisite modülünün ve sönüm oranının değerlendirilmesi için yapılan deneyler gerilme kontrollü deneylerdir. Kontrollü deformasyon çevrimlerini uygulamak için bir otomatik sistem kullanılır (Das ve Ramana, 2010).

$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon} \quad (3.4)$$



Şekil 3. 10 : Dinamik üç eksenli deney (Das ve Ramana, 2010).

Elastisite modülü hesaplandıktan sonra, kayma modülü Poisson oranına bağlı olarak hesaplanabilir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3.5)$$

3.1.4 Bulk modülü

Sıkışma modülü olarak da bilinen Bulk modülü hem basınç dalgalarından hem de kayma dalgalarından elde edilebilir. Bulk modülü, basınca dayanıklılığın ölçüsüdür. Bir kuvvetin bir cisme basınç ile her yönden uygulanması sonucu direncinin ölçülmesidir. Basınç artışının hacmin azalmasına oranı olarak da tanımlanabilir.

3.1.5 Poisson oranı

Zemin dinamik parametrelerinden önemli bir parametre olan Poisson oranı, 2 ve 3 boyutlu zemin dinamik tepkilerini hesaplamada kullanılır. Poisson oranı birim genişlikteki değişimin, birim uzunluktaki değişime oranı olarak tanımlanır. Birimsizdir ve hacmi değişmeyen malzemelerde 0.5 sıkıştırılabilen malzemelerde 0'dır. Dinamik çözümlerde, Poisson oranı basınç dalgası ve kayma dalgası hızına bağlı olarak hesaplanabilir.

$$\nu = \frac{1/2 - (V_s / V_p)^2}{1 - (V_s / V_p)^2} \quad (3.6)$$

3.1.6 Karakteristik zemin periyodu

Zemin tepki analizlerinde, yapı-zemin etkileşiminde, bina ve zemin rezonansı çözümlerinde sıklıkla karşılaştığımız dinamik zemin parametresi olan karakteristik zemin periyodu, zeminin tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızına bağlı olarak hesaplanır ve en düşük doğal frekans olan esas frekansa bağlıdır (Kramer, 1996).

$$\omega_0 = \frac{\pi V_s}{2H} \quad (3.7)$$

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (3.8)$$

$$f = \frac{V_s}{4H} \quad (3.9)$$

3.1.7 Zemin yoğunluğu

Zemin yoğunluğu ise hem statik hem dinamik zemin çözümlerinde kullandığımız en önemli zemin parametrelerinden biridir. Zemin yoğunluğu kolay şekilde belirlenebilir

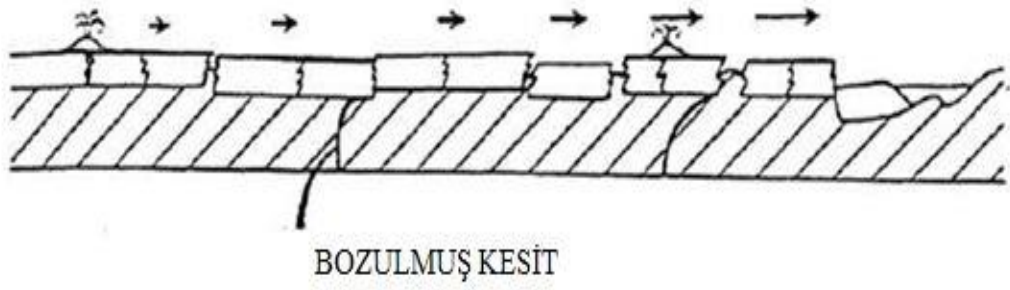
veya tahmin edilebilir. Dahası, değişkenliği oldukça kısıtlıdır. Çoğu zeminin yoğunluğu yaklaşık 1600 kg/m^3 , kuru ve tamamen doymuş zeminde yaklaşık olarak $1800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ civarındadır. Kohezyonlu zeminlerde $1400\text{-}2100 \text{ kg/m}^3$, kayada 2300 kg/m^3 olarak alınabilir. Zemin yoğunluğu, aynı zemin için, doygunluk derecesine bağlı olarak değişmektedir.

3.2 Sıvılaşımanın Tanımı ve Sıvılaşımayı Etkileyen Faktörler

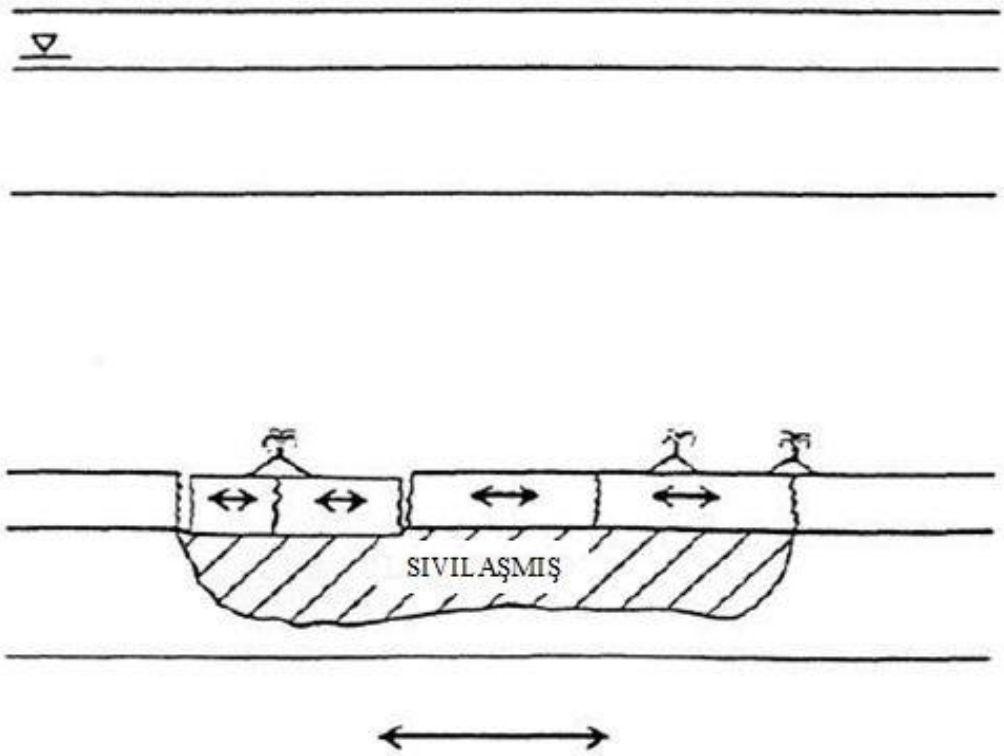
3.2.1 Sıvılaşımanın tanımı ve laboratuvar çalışmaları

Sıvılaşma bazı depremlerde meydana gelen, zemin göçmesine yol açabilen fiziksel bir süreçtir. Kumun gevşek olması ve yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın bulunması sıvılaşmaya neden olan en belirgin unsurlardır. Sıvılaşmanın bir sonucu olarak, yumuşak, genç, suya doymuş, iyi sınıflandırılmış, ince taneli kumlar ve siltler viskoz sıvılar gibi davranır. Bu davranış katı davranışından çok farklıdır. Sıvılaşma, sismik kayma dalgalarının doymuş taneli bir zemin tabakasından geçtiğinde gerçekleşir. Sismik salınım çok hızlı gerçekleştiği için, bu kayma dalgaları zeminin granüler yapısını bozar ve bazı gözenek boşluklarının çökmesine neden olur. Daneli yapının çökmesi gözenek boşluğundaki boşluk su basıncını artırır. Ayrıca, zeminin kayma mukavemetini de azaltır. Eğer boşluk suyu basıncı, zemin kayma mukavemetinin artık üstteki zeminin, binaların, yolların, evlerin vb. ağırlığını taşıyamayacağı noktaya gelirse, zemin bu durumda bir sıvı gibi akmaya başlar. Sonuç olarak geniş yüzey hasarları ortaya çıkar (Kumar, 2008). Sıvılaşma durumunda efektif gerilme sıfırdır ve zemin parçacıkları suda yüzerler (Ishihara 1985).

Geoteknik deprem mühendisliği alanında çalışan araştırmacıların sıvılaşma ile ilgili çalışmaları özellikle 1964 yılında Alaska'daki Good Friday ile Japonya'daki Niigata depremiyle önem kazanmıştır. Bu depremler neticesinde yamaçlarda, köprü temellerinde, yapılarda büyük göçmeler meydana gelmiş, gömülü yapıların yüzeye yüzmesi gibi sıvılaşmadan kaynaklanan çok büyük hasarlar gerçekleşmiştir (Kramer, 1996).



Şekil 3. 11 : Sıvılaşma öncesi ve sonrası yanıl yayılma (Youd, 1984).



Şekil 3. 12 : Sıvılaşma öncesi ve sonrası zemin salınımı (Youd, 1984).

Sıvılaşma olayı drenajsız yükleme sonucu oluşan aşırı boşluk suyu basıncı olarak da tanımlanabilir. Doygun olan kohezyonsuz zeminlerin drenajsız yüklemesi çok hızlı gelişir ve zeminin boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde artmasına ve efektif gerilmenin hızla azalmasına neden olur. Sıvılaşma, akma sıvılaşması ve döngüsel hareketlilik olarak ikiye ayrılır. Akma sıvılaşması, döngüsel hareketliliğe oranla daha yıkıcı ancak daha nadir gerçekleşen bir sıvılaşma türüdür (Kramer, 1996).

Youd (1984) göstermiş olduğu sıvılaşma öncesi ve sonrası yanıl yayılma Şekil 3.11’de, sıvılaşma öncesi ve sonrası zemin salınımı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Akma sıvılaşması çok ani bir şekilde ortaya çıkan, hızlı gelişen bir sıvılaşma çeşidi olup, zeminin statik kayma gerilmesinin zeminin sıvılaşmış haldeki tekrarlı kayma mukavemetinden büyük olduğu durumda gelişir. Akma sıvılaşmasındaki büyük deformasyonların sebebi statik kayma gerilmeleridir (Kramer, 1996).

Döngüsel hareketlilik, zeminin statik kayma gerilmesinin zeminin sıvılaşmış haldeki tekrarlı kayma mukavemetinden küçük olduğu durumda gelişir. Döngüsel hareketliliğin sebep olduğu göçme neden olduğu deformasyonları kademeli olarak gerçekleşir ve deformasyonların sebebi hem tekrarlı kayma gerilmeleri hem de statik kayma gerilmeleridir (Kramer, 1996).

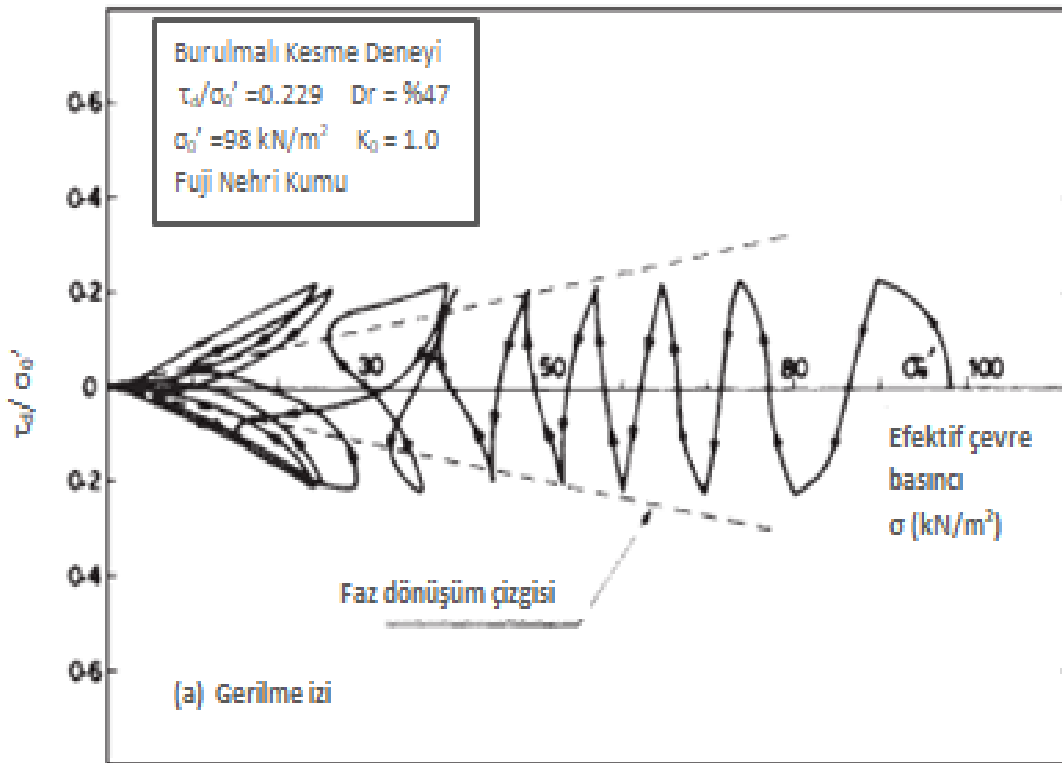
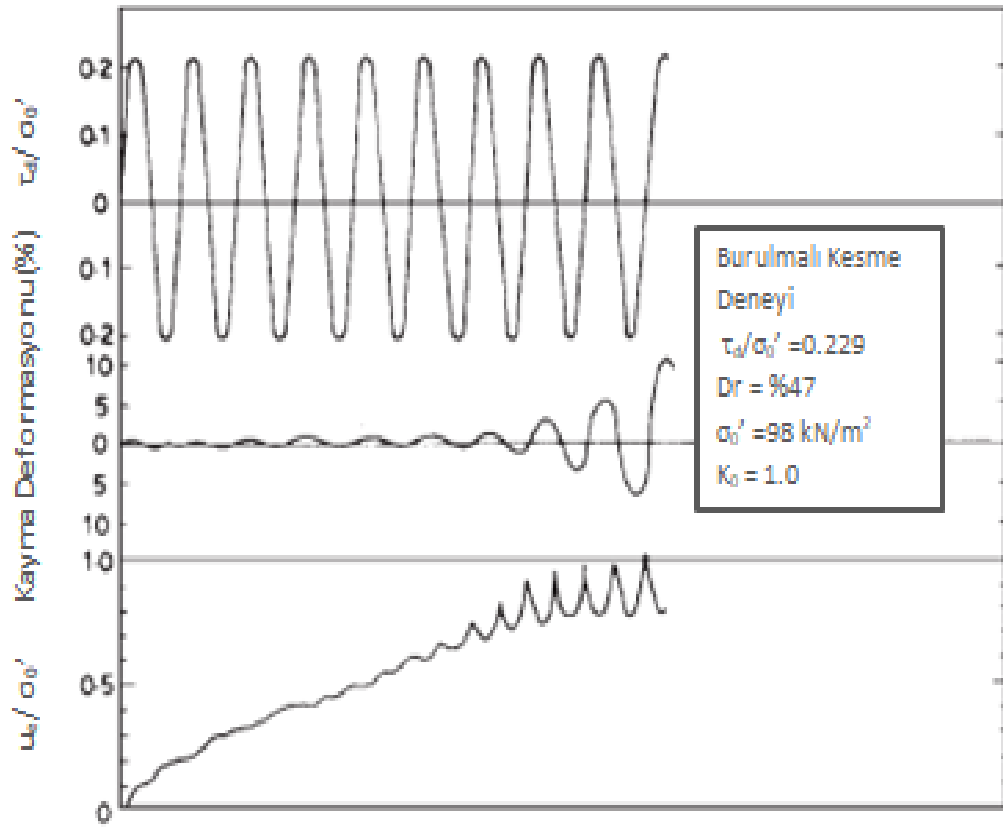
Zeminlerde sıvılaşma konusunda çok kapsamlı laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te burulmalı deney aletinde suya doymun Fuji Nehri kum numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları gösterilmiştir (Ishihara, 1985). Şekil 3.13, orta sıkı ($D_r=47\%$) ve suya doymun bir kum üzerindeki laboratuvar testlerinin sonuçlarını göstermekte, Şekil 3.14 ise sıkı ($D_r=75\%$) ve suya doymun bir kum üzerindeki laboratuvar testlerinin sonuçlarını göstermekte. Tekrarlı kayma deneyinden önce her iki zemin numunesi de 98 kN/m^2 ’lik bir çevre basıncında konsolide edilmiş ve drenajsız koşullar altında deney yapılmıştır (Day, 2002).

Normalize edilmiş tekrarlı kayma gerilmesi (τ_d/σ'_0): Sabit genlikli, sinüzoidal tekrarlı kayma gerilmesi uygulanmış ve bu tekrarlı kayma gerilmesi başlangıçtaki efektif çevre basıncına bölünerek normalize edilmiştir. $D_r=47\%$ için bu oran 0.229, $D_r=75\%$ için bu oran 0.717 olarak uygulanmıştır (Day, 2002).

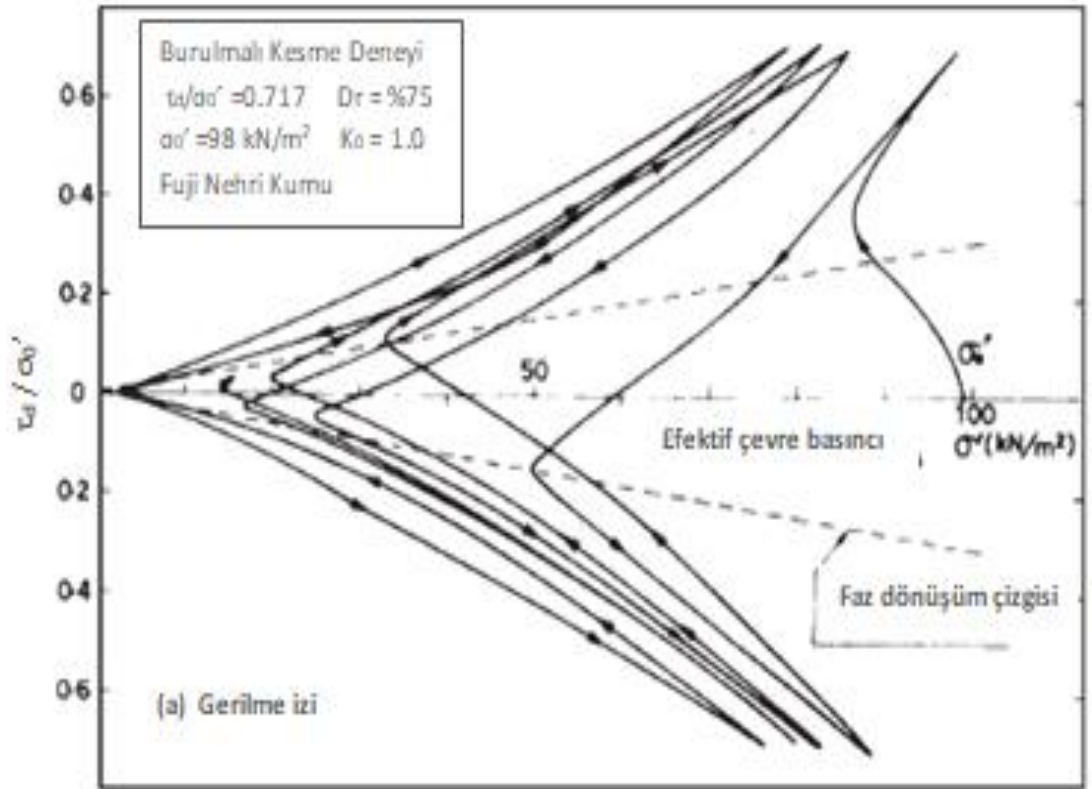
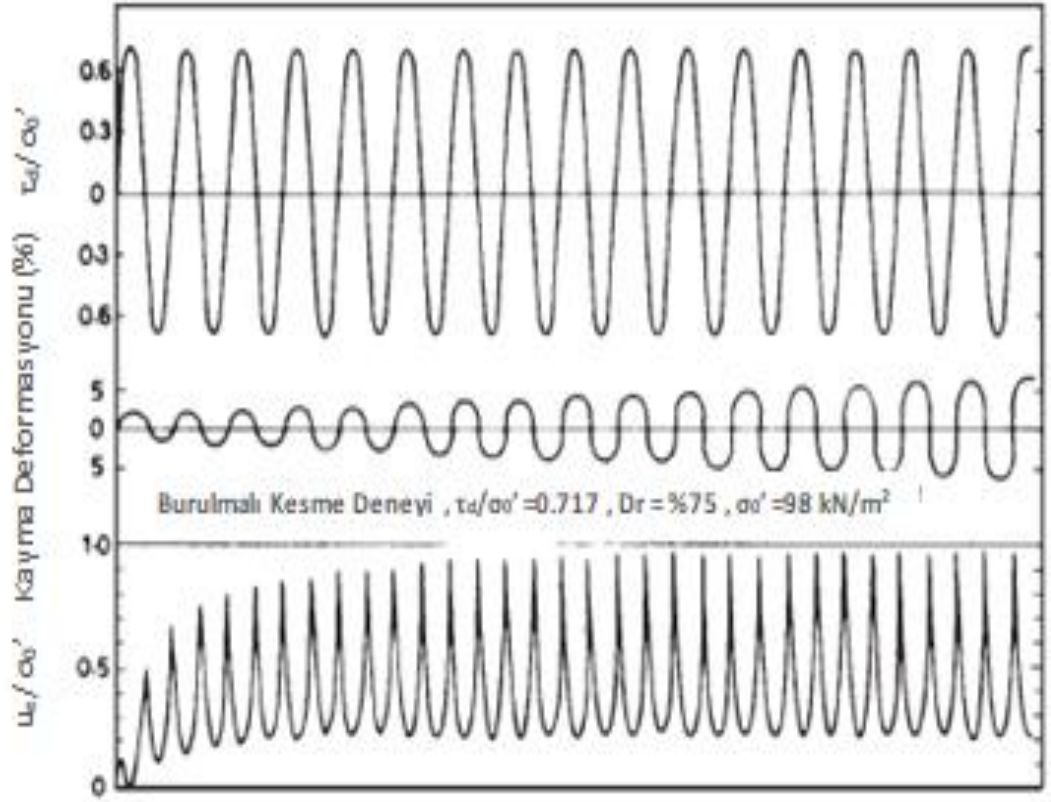
Kayma deformasyonu yüzdesi grafiği: Bu grafikte sabit genlikli tekrarlı kayma gerilmesinin kayma deformasyonunun yüzdesi ile ilişkisi gösterilmektedir. Orta sıkı

kumda, kayma deformasyonunda %20 kadar yüksek ve hızlı bir artış gözlenirken, sıkı kumda ani bir artış olmadığı yavaş yavaş artış olduğu gözlenmektedir (Day, 2002).

Normalize edilmiş aşırı boşluk suyu basıncı çizimi (u_e/σ_0'): Tekrarlı boşluk suyu basıncı oranı olarak da bilinir. Zemin numunelerinin drenajsız şartlara maruz kalmasından dolayı, sabit genlikli tekrarlı kayma gerilmesi zemin numunesine uygulanırken aşırı boşluk suyu basıncı u_e gelişecektir. Boşluk suyu basıncı, başlangıç efektif çevre basıncına bölünerek normalize edilmiştir. Boşluk suyu basıncının çevre basıncına eşit olduğu durumda efektif gerilme sıfır olur ve sıvılaşma meydana gelir. Şekil 3.13'te efektif gerilmenin sıfır olduğu durumda kayma deformasyonunun anormal olarak arttığı görülmektedir. Orta sıkı kum sıvılaştığı zaman kayma deformasyonunda önemli bir artış olduğu gözlemlenirken, sıkı kum için tekrarlı kayma gerilmesi uygulandığında normalize edilmiş boşluk suyu basıncı 1'e eşit olur. Ancak sıkı kumda tekrarlı kayma gerilmesinin tersine çevrildiği durumda, sıkı kum drenajsız kayma gerilmesinin artması sonucu hacimsel büyüme eğiliminde olur ve bu nedenle büyük kayma deformasyonları oluşmaz. Sıkı kum, sıvılaşma durumuna yani $u_e = \sigma_0'$ ulaşmamasına rağmen sıvılaşma anlık bir durum olarak gerçekleşir. Bu durum, *"sınırlı deformasyonu potansiyeli ile yüzde yüz maksimum tekrarlı boşluk suyu basıncı oranı"* olarak adlandırılır (Seed, 1979). Bu durumdan çoğunlukla tekrarlı hareketlilik olarak adlandırılan durumdur (Casagrande, 1975; Castro, 1975). Tekrarlı hareketlilik kavramı, drenajsız deformasyon süresince zeminin sınırlı bir potansiyel ile anlık sıvılaşabilirlik durumunu tanımlamak için kullanılabilir (Day, 2002).



Şekil 3. 13 : Orta sıkılığa sahip ($D_r=\%47$) Fuji Nehri Kumu üzerinde yapılan tekrarlı burulma deneylerinden elde edilen laboratuvar verileri (Ishihara 1985, Day, 2002).



Şekil 3. 14 : Sıkı duruma sahip ($Dr=\%75$) Fuji Nehri Kumu üzerinde yapılan tekrarlı burulma deneylerinden elde edilen laboratuvar verileri (Ishihara 1985, Day, 2002).

3.2.2 Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi

Doygun zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi kapsamında son yıllarda yapılan çalışmalarda çeşitli prosedürler önerilmiştir. Çeşitli laboratuvar deneyleri ve yerinde uygulanan test gerektiren bu prosedürler aşağıdaki kategorilerde sınıflandırılabilir (GDP-9 Report, 2015).

Jeolojik Kriterlere Dayalı Haritalama: Sıvılaşma potansiyeli haritaları oluşturmak için jeolojik yaş, çökeltilerin kökeni ve potansiyel deprem merkez üssüne olan alan mesafesi ile ilgili Youd ve Perkins (1978) tarafından bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen kriterler, bölgesel sıvılaşma tehlikelerinin genel değerlendirmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Youd ve diğ., 1978; Anderson ve diğ. 1982; Tinsley ve diğ. 1985).

Arazi Özellikleri ile Gözlenen Performans Arasındaki Ampirik İlişkiler: Arazi performansı ile belirlenen zemin sıvılaşma özellikleri, çeşitli zemin parametreleri ile ilişkilendirilmiştir.

- Standart Penetrasyon Testi (SPT) Direnci (Seed and Idriss, 1971; Seed, 1979; Seed ve diğ., 1983, 1985; Ishihara, 1985).
- Koni Penetrasyon Direnci (Douglas ve diğ., 1981; Robertson ve diğ., 1983; Kovacs ve diğ., 1984; Robertson ve Campanella, 1985; Seed ve diğ., 1985; Baldi ve diğ., 1985;).
- Kayma Dalgası Hızı (Dobry ve diğ., 1981; Bierschwale ve Stokoe, 1984; Campanella ve Robertson, 1984;).
- Zeminin Özdirenci ve Kapasitansı (Arulanandan, 1977; Arulmoli ve diğ., 1985).

Eşik Kayma Deformasyonu Kavramı: Kohezyonsuz bir zemin için tipik olarak yaklaşık yüzde 0.01 olan bir kayma deformasyonu eşiği vardır. Bir depremin neden olduğu maksimum kayma deformasyonu bu deformasyonu aşmazsa yükleme döngülerinin sayısından bağımsız olarak deprem sarsıntısı boşluk suyu basıncında bir artışa neden olmaz ve bu nedenle sıvılaşma meydana gelemez (Dobry ve diğ. 1980). Bir deprem yer hareketinden kaynaklanan maksimum kayma deformasyonu aşağıdaki denklem kullanılarak yaklaşık bir şekilde tahmin edilebilir:

$$r = 1.2aZ / V_s^2 \quad (3.10)$$

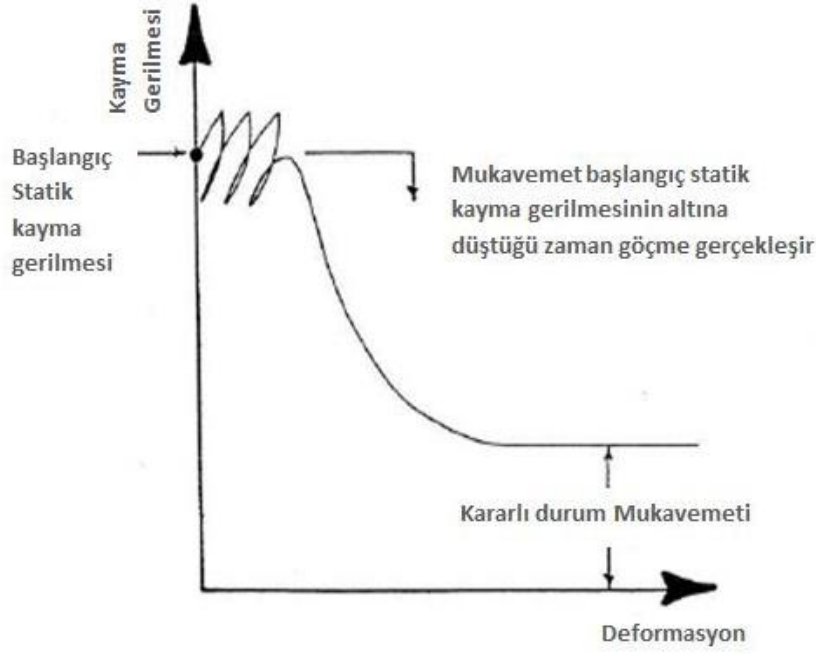
burada r , deformasyona eşit olup; a , zemin yüzeyindeki maksimum ivmeye; Z , derinliğe ve V_s , kayma dalgası hızına eşittir.

Sıvılaşma Olasılığı Modeli: Sıvılaşma analizlerine olasılıksal yaklaşımlar birçok araştırmacı tarafından önerilmiştir (Yegian ve Whitman, 1978; Haldar ve Tang, 1979; Fardis ve Veneziano, 1982; Chameau ve Clough, 1983; Liao ve diğ. 1988). Bununla birlikte bu yaklaşımın kullanışlılığı varsayılan mekanik modellerin sağlamlığına ve model parametreleri için belirsizliğin nicelendirilmesinin fizibilitesine bağlıdır.

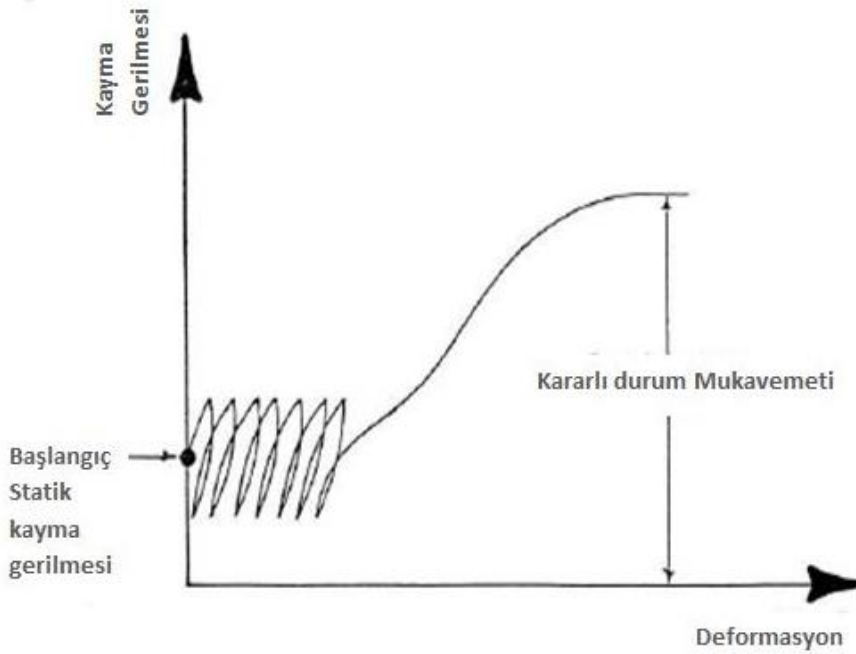
Dolguların ve Eğimlerin Akma Göçmelerine Karşı Stabilesini Analiz Etmek için Kararlı Durum Gücü Kavramı: Casagrande'ın "Kritik Boşluk Oranı Teorisi" üzerine kurulu kararlı durum güç kavramı (Casagrande, 1940), bir dolgunun veya şevin akma sıvılaşması göçmesine karşı duyarlılığını değerlendirmek için geliştirilmiştir (Castro, 1969; Poulos, 1981; Castro ve diğerleri, 1982; Poulos ve diğerleri, 1985). Castro (1969) ve Poulos (1981), sıvılaşmadan sonra bile, birçok kumun kayda değer oranda mukavemetini koruduğunu göstermiştir. Seed ve arkadaşları, sıvılaşmış malzemelerin mukavemetini ifade etmek için yeni bir terim olarak "residual (kalan, artık) mukavemet" terimini kullanırlar.

Bir dolgunun veya şevin altındaki kum çok gevşekse ve Şekil 3.15'te gösterilen tipte gerilme-şekil değiştirme davranışına sahipse sismik yükleme zemin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin maksimum değerini zorlayabilir ve ilk sıvılaşmayı tetikleyebilir. Bu duruma ulaşıldığında kademeli göçme zeminin kayma direncinin kararlı duruma veya residual (artan) mukavemete ulaşılan kadar sürekli olarak azalmasına neden olacaktır. Drenajsız kararlı durum mukavemeti statik denge için gereken başlangıç kayma gerilmesinden daha küçükse, eğim dengesizleşecek ve bir akma sıvılaşması göçmesi meydana gelecektir. Bu nedenle bir akma sıvılaşması meydana geldiğinde azaltılmış mukavemetin sıfır olması gerekmez, tam tersi zemin çok düşük bir mukavemet sahip olsa bile potansiyel göçme yüzeyi boyunca yer alan diğer zeminler stabilite kaybını önleyecek kadar güçlü ise bir akma sıvılaşmasına yol açmayabilir. Deprem sarsıntısı sırasında sıkı kumların genişleme ve negatif gözenekli su basıncı oluşturma eğilimi vardır. Sonuç olarak zemin kayma direnci Şekil 3.16'da gösterildiği gibi bir maksimum değere ulaşılan kadar artar. Sarsıntının sonunda başlangıç statik kayma gerilmesi yine de maksimum kayma dayanımından daha azdır. Bu nedenle deprem yükü altındaki sıkı kumlarda şev kaymasının oluşma olasılığı düşüktür.

Sıvılaşma değerlendirme prosedürü, laboratuvar kararlı durum mukavemet testi ve ardından tüm ilgili faktörleri göz önünde bulundurarak yerinde boşluk oranı koşuluna uygun konservatif düzeltmeleri içerir.



Şekil 3. 15 : Gevşek kumlar için drenajsız koşulda gerilme-deformasyon ilişkisi (Seed ve diğ., 1989).



Şekil 3. 16 : Sıkı kumlar için drenajsız koşulda gerilme-deformasyon ilişkisi (National Research Council, 1985).

3.2.3 Sıvılaşmayı etkileyen faktörler

Zeminde sıvılaşma sürecini yöneten birçok faktör vardır. Laboratuvar testlerine, saha gözlemlerine ve çalışmalarına dayanarak deprem hareketlerine, zemin özelliklerine, zemine etki eden başlangıç gerilmelerine ve depremin özelliklerine bağlı olarak zemin sıvılaşmasını yöneten en önemli faktörler şunlardır (Day, 2002; Kumar, 2008; Seed and Idriss, 1971; Das, 2010):

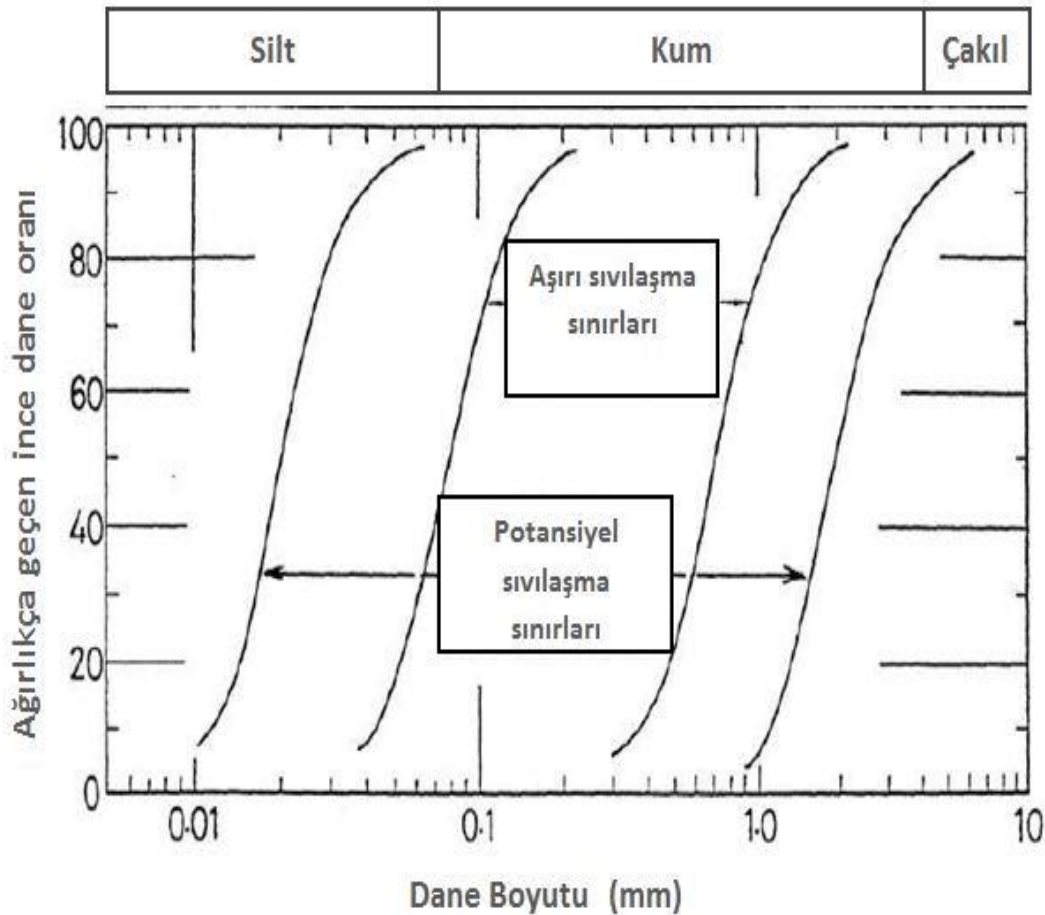
Depremin Şiddeti ve Deprem Sarsıntısının Süresi: Sıvılaşmanın olması için zeminde sarsıntı olması gerekir. Deprem sırasında açığa çıkan sismik enerji sıvılaşma için önemli faktördür. Oluşan depremin süresi ve şiddetindeki artış sıvılaşma potansiyelini artırır. Sıvılaşma için gerekli olan sarsıntı eşiğinin 0,1 g pik yer ivmesi ve yaklaşık 5 yerel deprem büyüklüğü olduğu bildirilmiştir. Pik yer ivmesi 0,1 g'dan az ve yerel deprem büyüklüğü 5'ten az olan yerlerde sıvılaşma analizi gerekli değildir.

Yeraltı Su Seviyesi: Yer altı su seviyesi sıvılaşma için önemli bir parametredir. Yüzeye yakın oldukça sıvılaşma için elverişli durum oluşur. Yeraltı su seviyesinin altında bulunan kuru ve gevşek kum veya bazı silt zeminler sıvılaşır. Belirli bir bölgedeki yeraltı suyu seviyesi tablosu önemli ölçüde dalgalanırsa, sıvılaşma potansiyeli de dalgalanır. Sıvılaşma analizinde genel olarak en yakın tarihli yeraltı suyu seviyesi kullanılmalıdır.

Zemin Tipi ve Dane Büyüklüğü Dağılımı: Sıvılaşmaya en duyarlı zemin türü, deformasyona karşı direncin parçacıklar arasındaki sürtünme ile harekete geçirildiği zemin türüdür. Tsuchida (1970), depremler sırasında sıvılaştığı veya sıvılaşmadığı bilinen bir dizi alüvyal ve alüvyal olan zemin üzerinde yapılan elek analizlerinin sonuçlarını özetlemiş ve Şekil 3.17'de gösterildiği gibi sıvılaşabilen ve sıvılaşmayan zeminleri ayıran tane büyüklüğü eğrileri aralığını önermiştir. Şekildeki iki iç eğri içindeki alan, sıvılaşma direnci en düşük olan kumları ve siltli kumları temsil etmektedir. Dış ve iç eğriler arasındaki bölgelere düşen kısımlarda zeminin sıvılaşması daha az olasıdır. Daha yüksek çakıl yüzdesine sahip zeminler fazla boşluk suyu basınçlarını kumlardan daha hızlı dağıtma eğilimindedir. Bununla birlikte şiddetli zemin sarsıntısı sırasında gevşek çakıllı zeminlerde veya çakıl tabakası geçirimsiz bir tabaka ile sarıldığında sıvılaşmanın ortaya çıktığını gösteren vaka geçmişleri vardır (Seed, 1968; Ishihara, 1985; Andrus ve diğerleri, 1991). Ishihara (1985) düşük bir plastisite endeks değerine sahip kil veya silt boyutlu malzemelerin kohezyonsuz

zeminlere benzeyen fiziksel özellikler sergileyeceğini ve bu nedenle yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip olacağını belirtmiştir. Walker ve Steward (1989), siltler üzerindeki kapsamlı dinamik testlerine dayanarak tane büyüklüğü dağılım eğrilerinin Tsuchida'nın sıvılaşmaya yatkın zeminler için sınırlarının dışında olmasına rağmen plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltlerin de benzer şekilde sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu ve bu plastisitenin artmasının siltlerdeki boşluk basıncı tepki seviyesini azaltacağı sonucuna varmışlardır. Ancak bu azalma plastiklik indeksi 5 veya daha az olan zeminler için sıvılaşmaya direnç gösterecek kadar önemli değildir.

Her ne kadar kil yataklarında depremler sırasında büyük kayma hareketleri meydana gelmiş olsa da, geniş bir kil zemin bölgesinin viskoz bir sıvı durumuna dönüşmediği depremler sırasında sıvılaşmadıkları düşünülmektedir. Bununla birlikte hızlı killerin şiddetli sarsıntılardan sonra mukavemetlerinin çoğunu kaybedebileceğine ve diğer kil türlerinin de mukavemetlerinin bir kısmını kaybedebileceğine inanılmaktadır.



Şekil 3. 17 : Sıvılaşabilen ve sıvılaşmayan zeminleri ayıran derecelendirme eğrilerindeki sınırlar (Tsuchida, 1970).

Deprem Yükleme Durumu: Herhangi bir zeminin bir deprem sırasında sıvılaşmaya karşı savunmasızlığı deprem sarsıntısı ile indüklenen stres veya gerilme döngülerinin büyüklüğüne ve sayısına bağlıdır. Bunlar sırayla şiddeti, baskın frekans ve zemin sarsıntı süresi ile ilişkilidir.

Dikey Etkili Stres ve Aşırı Konsolidasyon: Efektif dikey gerilmedeki artışın zeminin taşıma kapasitesini ve kayma mukavemetini arttırdığı ve böylece sıvılaşmaya neden olacak kayma gerilmesini arttırdığı ve sıvılaşma potansiyelini azalttığı bilinmektedir. Saha gözlemlerinden birkaç araştırmacı tarafından 15 ila 18 mt'den daha derindeki doymuş kumların sıvılaşma olasılığının olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu derinlikler genel olarak, etkili aşırı yük basıncının değeri 190 kN/m^2 'yi aşarsa doymuş bir kumlu toprağın sıvılaşmayacağını belirten Kishida (1969) ile uyumludur.

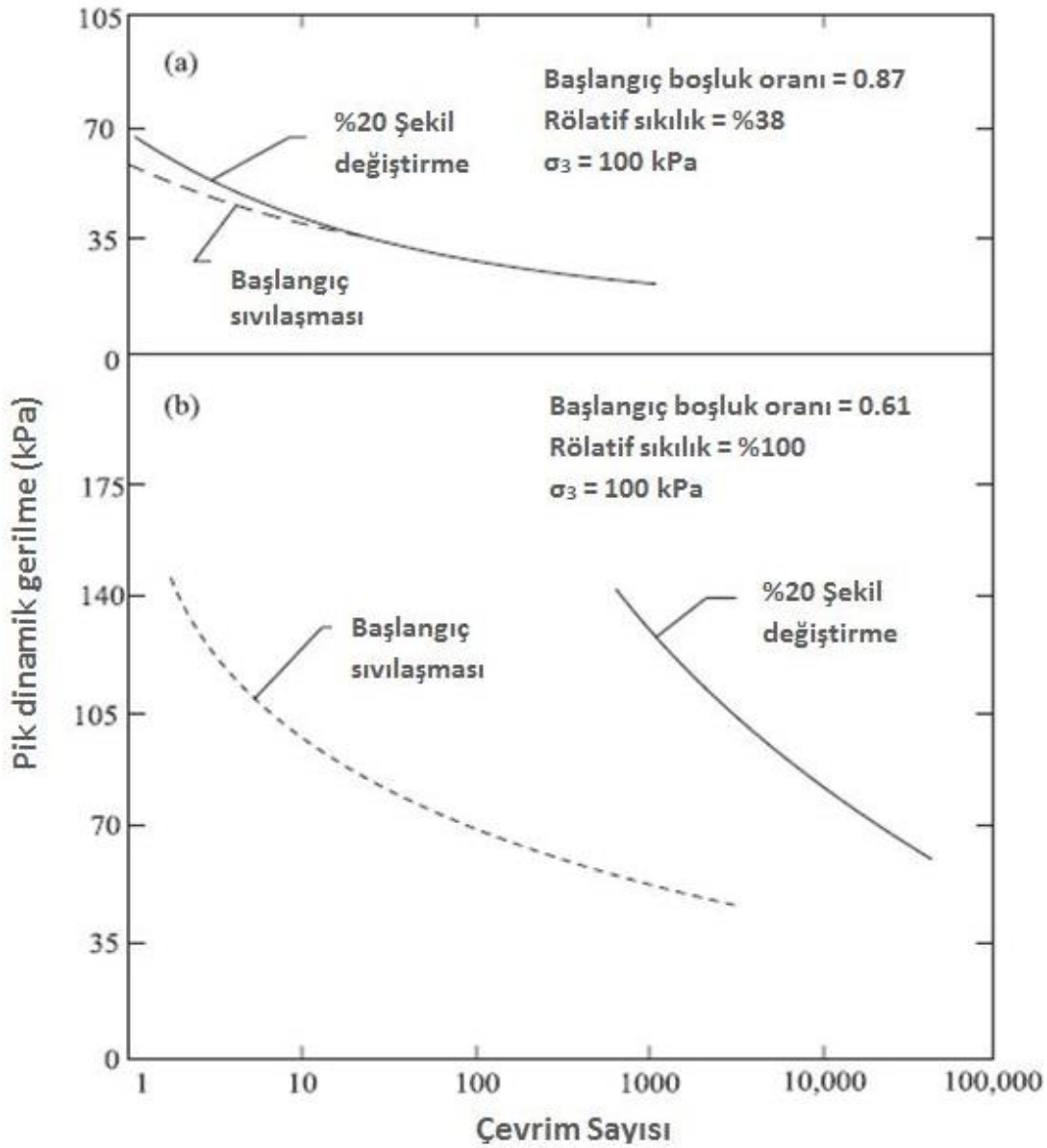
Hem teori hem de deneysel veriler belirli bir zemin için daha yüksek bir aşırı konsolidasyon oranının hareketsiz durumda daha yüksek yanal toprak basıncına yol açtığını ve bu nedenle sıvılaşmaya neden olan kayma gerilme oranını arttırdığını göstermektedir.

Toprakların Yaşı ve Kökeni: Alüvyon ve akarsu kökenli doğal birikintiler genellikle gevşek zemin tanelerine sahiptir. Youd ve Hoose (1977), temel kural olarak geç Pleistosen'den (10,000- 130,000 yıl) daha eski alüvyon çökeltilerinin şiddetli deprem yükleme koşulları dışında sıvılaşma olasılığı düşükken, geç Holosen çökeltilerinin (1.000 yıl veya daha az) sıvılaşması muhtemeldir ve daha önceki Holosen (1.000- 10.000 yıl) çökeltileri orta derecede sıvılaşabilir.

Relatif Sıklık: Laboratuvar test sonuçları ve saha vaka geçmişleri belirli bir zemin için başlangıç boşluk oranının veya relatif sıklığın sıvılaşmayı kontrol eden en önemli faktörlerden biri olduğunu göstermektedir. Sıvılaşma esas olarak doymuş temiz kumlarda ve relatif sıklığı %50'den az olan siltli kumlarda meydana gelir. Sıvılaşmanın olmayacağı relatif sıklık alt limiti yaklaşık %75'tir. Gevşek durumundaki kohezyonsuz zeminler sıvılaşmaya karşı hassastır. Sismik sarsıntı sırasında gevşek plastik olmayan zeminler büzülecektir. Bu, aşırı gözenekli su basıncının gelişmesine neden olur. Sıvılaşmaya ulaşıldığında bu zeminler için kayma yer değiştirmesinde ani ve dramatik bir artış olacaktır. Sıkı kumlarda ise sıvılaşmanın başlangıcı büyük deformasyonlar gerçekleşmez. Bu, tekrarlı kayma gerilmesinin tersine çevrilmesinden sonra kumun dilatasyon eğiliminden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak dilatatif zeminler sıvılaşmaya karşı duyarlı olmadıkları için sıvılaşma açısından değerlendirilmesi gerekmez.

Bir zeminin başlangıç relatif sıkılığı sıvılaşma üzerindeki etkisi Şekil 3.18’de verilmiştir. Buna göre tüm testler $\sigma_3 = 100$ kPa çevre basıncına tabidir. İlk sıvılaşma, boşluk suyu basıncının çevre basıncına (σ_3) eşit olduğu duruma karşılık gelir. Çoğu durumda, % 20 çift genlikli gerilim göçme olarak kabul edilir. Belirli bir σ_d değeri için başlangıçtaki sıvılaşmanın gevşek kum için eşzamanlı olarak meydana geldiği görülebilir (Şekil 3.18a).



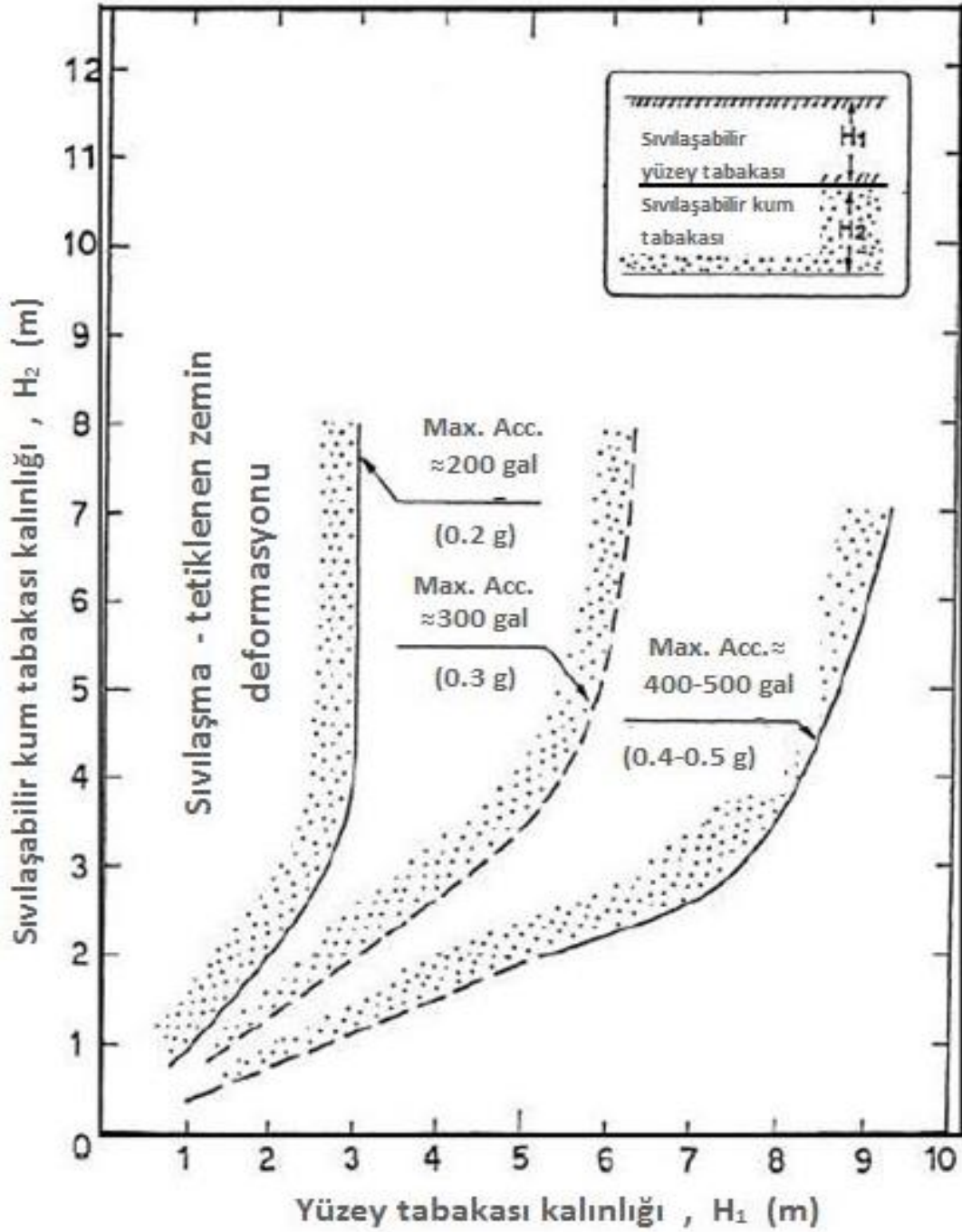
Şekil 3. 18 : Başlangıç relatif sıkılığının Sacramento Nehri Kumunun sıvılaştırılması üzerindeki etkisi (Lee ve Seed, 1967).

Sismik Gerilme Geçmişi: Daha önceki sismik gerinim geçmişin laboratuvar çalışmalarına göre, zeminlerde sıvılaşmaya karşı direnci etkileyebileceği gösterilmiştir (Finn ve diğ., 1970; Seed ve diğ., 1977; Singh ve diğ., 1980). Düşük seviyelerde aşırı boşluk suyu basıncı üreten, önceki sarsıntıların bir sonucu olarak oluşan düşük seviyelerde önceki sismik gerinim geçmişi sonraki tekrarlı yükleme sırasında boşluk suyu basıncı oluşumuna karşı zemin direncini önemli ölçüde artırabilir.

Doymunluk Derecesi: Kuru zeminler sıvılaşmaz. Sarsıntı sırasındaki sıkışmanın bir sonucu olarak oluşan oturma olabilir. Kısmen doymuş kumların sıvılaşma potansiyeli hakkında çok az şey bilinmektedir. Mevcut laboratuvar test sonuçları (Sherif ve diğ., 1977) zeminler için sıvılaşma direncinin azalan doymunluk derecesi ile arttığını ve doymunluğu düşük olan kum numunelerinin sıvılaşması için şiddetli ve uzun süreli depremlerin sonucunda oluşabileceğini göstermişlerdir.

Boşluk Suyu Basıncı: Eğer boşluk suyu basıncı hızla yok olursa zemin sıvılaşmayabilir. Sonuç olarak, yüksek geçirgenlikteki çakıl drenleri veya çakıl tabakaları bitişik zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltabileceğinden boşluk suyu basıncının hızla yok olmasına yardımcı olurlar.

Kum Tabakasının Kalınlığı: Sıvılaşma nedeniyle yeryüzünde büyük hasar meydana gelmemesi için sıvılaştırılmış zemin tabakası yeterince kalın olmalıdır ki böylece ortaya çıkan kaldırma basıncı ve sıvılaştırılmış tabakadan atılan su miktarı kum kaynaması ve çatlama gibi zemin kırılmalarına neden olmasın (Ishihara, 1985; Dobry, 1989). Sıvılaştırılmış kum tabakası ince bir zemin profili içinde gömülürse sıvılaştırılamaz. Bir yüzey tabakasının varlığı daha derindeki sıvılaşmanın etkilerinin yüzeye ulaşmasını engelleyebilir. Ishihara (1985), Şekil 3.19'da gösterildiği gibi sıvılaşmaya bağlı zemin hasarını önlemek için sıvılaştırılamayan bir yüzey tabakasının kalınlığı için bir eşik değeri öngörmek üzere bir kriter belirlemiştir. Bu şekilde gösterilen rakamların spekülatif olduğuna ve tasarım amaçları için kullanılmaması gerektiğine inanılmakla birlikte standart penetrasyon direnci ayak başına 10 vuruştan (0.3 mt) daha az gömülü sıvılaştırılabilir kum tabakasına sahip sahalar için bu konuda rehberlik sağlar. Sıvılaşmayan bir yüzey tabakasının kalınlığı şekilde gösterilen eşik kalınlığını aşsa bile zemin yüzeyinin yine de belirli oturmaya duyarlı yapılar için istenmeyen bazı oturmalar yapabileceği de belirtilmektedir.



Şekil 3. 19 : Sıvılaşma kaynaklı hasarın saha tespiti için önerilen sınır eğrileri (Ishihara, 1985).

Hidrolik Dolgu: Gevşek ve ayrılmış zemin yapısı nedeniyle sıvılaşmaya daha yatkındır. Bu tür yapı suya düşen zemin parçacıkları tarafından oluşturulur. Göllerde, nehirlerde veya okyanuslarda oluşan doğal toprak birikintileri de aynı nedenden dolayı sıvılaşmaya karşı hassastır. Zeminler özellikle sıvılaşmaya duyarlı gölsel, alüvyal ve denizel çökeltme ortamlarında oluşur.

Çevre Basıncı: Çevre basıncı arttıkça zeminin sıvılaşma eğilimi azalır. Daha derin yeraltı suyu tablası konumu, zemin yüzeyinin altında daha derin derinlikte bulunan toprak ve zemin yüzeyine uygulanan ek basınç daha yüksek bir çevre basıncı yaratan koşullardır. Olası sıvılaşma bölgesinin zemin yüzeyinden maksimum 20 m derinliğe kadar uzandığı bilinmektedir. Daha derin zeminler genellikle daha yüksek çevre basıncı nedeniyle sıvılaşmazlar. Ancak bu sıvılaşma analizinin 20 m derinliğin altında bulunan bir zemin tabakası için yapılmaması gerektiği anlamına gelmez. Örneğin eğimli zeminlerde, su ön yapısı şeklinde eğimli yapılarda sıvılaşma analizi yapılmalıdır. Benzer şekilde toprak barajının eğimli kabuğu sıvılaşma için 20 m derinliğin altındaki zemin tabakasının analiz edilmesi gereken yerlerdir. Sıvılaşma analizi 20 m kalınlığı aşsa bile suya gevşek bir şekilde dökülen toprak birikintisinin tüm kalınlığı için yapılmalıdır.

Zemin Şekli: Yuvarlak şekle sahip olan zeminler açısız şekilli zemin parçacıklarından daha kolay sıkılaşma eğilimindedir. Sonuç olarak yuvarlak zemin parçacıkları, deprem sırasında açısız köşeli parçacıklar içeren zemine göre sıvılaşmaya daha duyarlıdır.

Tarihsel Ortam ve Zemin Kalıntıları: Yeni toprak kalıntıları sıvılaşmaya karşı eski kalıntılara oranla daha duyarlıdır. Bir zemin ne kadar uzun süre çevre basıncına maruz kalırsa sıvılaşma direnci o kadar fazla olur. Sonuç olarak daha eski birikintilerin sıvılaşma direnci daha yüksektir. Sıvılaşma direncinin zamanla artması zemin partiküllerinin deformasyonundan veya daha kararlı düzenlemelere sıkıştırılmasından kaynaklanır. Ayrıca zamanla parçacık bağlarında çimentolaşmaya bağlı bağların gelişimi de olabilir.

Ağır Bina: Kum birikintisi üzerine inşa edilen ağır bina inşaatı zeminin sıvılaşma direncini azaltır. Zemin bina yükünün neden olduğu kayma gerilimine maruz kalır. Yapı yükü varlığında zeminin sıvılaşmaya karşı direnci azalır.

3.3 Doygunluğun, Kumlu Zeminlerin Dinamik Yükler Altındaki Davranışına Etkisi

Sıvılaşmayı etkileyen esas faktörlerden bir tanesi de zeminlerin doygunluğu kavramıdır. Kısmi doygun zeminleri doygun zeminlerden ayıran en önemli özellik kısmi doygun zeminde bulunan üç fazdan birisi olan havanın doygun zeminlerde önemszenmeyecek derecede az bulunmasıdır. Fredlund ve Rahardjo (1993), yaptığı çalışmalarda, doygun olmayan zeminlerde bir fazın daha bulunduğunu ve dört fazdan oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu fazı hava-su ara yüzeyi (contractile skin) olarak adlandırmışlardır.

Suya doygun olmayan zeminin hacim değiştirme ve konsolidasyon ilişkileri doygun zeminlerde iki boyutlu iken, doygun olmayanlarda üç boyutlu bir durum arz etmektedir. Doygun bir zeminin deformasyon- zaman ilişkisi lineer bir diferansiyel denklemlerle ifade edilirken, doymamış zeminde lineer olmayan kısmi türevli diferansiyel denklem söz konusudur (Tekinsoy, 2005).

Zeminlerde sıvılaşma potansiyelini etkileyen birçok faktör olmakla birlikte doygunluk parametresi bunların başında gelmektedir. Terzaghi (1936) yaptığı çalışmalar neticesinde doygun zeminlerdeki efektif gerilme boşluk suyu basıncı ilişkisini aşağıdaki bağıntısı ile göstermiştir.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (3.11)$$

σ' = efektif gerilme

σ = toplam gerilme

u_w = boşluk suyu basıncı

Terzaghi (1936)'nin ortaya koyduğu bu bağıntının daha sonraki çalışmalar ile birlikte doğruluğu fazlasıyla ispatlanmıştır. Suya doygun zeminler için geçerli olan bu bağıntı daha sonraki yıllarda daha karmaşık yapıya sahip olan üç fazlı doygun olmayan zeminler için ilk defa Bishop (1959) yayınlanan bir makalede deneysel kanıtlarıyla beraber efektif gerilmeyi daha genel bir tanım yaparak aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$\sigma' = \sigma - \left[u_a - \chi (u_a - u_w) \right] \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} (\sigma_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Sıvılaştırılabilir alt tabaka zeminlerin suya doymun olduğu düşünöldüğünden bu yana, laboratuvarda yapılan sıvılaştırma deneylerinde numunenin doymunluk değerinölçölmesi önceden kolay olmaktadır. Skempton'ın 1954 yılında yayımladığı “The Pore Pressure Coefficients A and B” adındaki makalesinde uyarılan boşluk suyu basıncının drenajsız durum altındaki gerilme yükünün değışimine oranı B katsayısı olarak tanımlanmış ve literatüre “Skempton-B” katsayısı olarak geçmiştir. Doymunluğun durumu Skempton-B katsayısı ile ölçölmlenerek doymunluk derecesinin, (S_r) yerini almıştır. Skempton (1954) zeminlerdeki boşluk suyu basıncı artışını, Δu boşluk suyu basıncı artışı, $\Delta\sigma_1$ ve $\Delta\sigma_3$ sırasıyla büyük ve küçük asal gerilmelere bağılı olarak (efektif gerilmelere değil) devam eden drenajsız gerilme artışını aşğıdaki formöldeki gibi tanımladı.

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (3.16)$$

B = 1.0 yani kum ideal ve tam doymun olduğunda;

$$\Delta u = \Delta\sigma_3 \quad (3.17)$$

Dolayısıyla gerilme artışı izotropiktir. ($\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3$)

Birçok araştırmacı tarafından üç eksenli deneyler sırasında doymunluğun ölçölmesinde yaygın olarak kullanılan Skempton-B parametresi ile doymunluk oranı (S_r) arasındaki ilişki incelenmiştir. Farklı araştırmacılar B parametresi ve doymunluk oranı (S_r) arasındaki ilişkiyi boşluklardaki havanın sıkışabilirliğini hipotezine dayandırmıştır. Skempton-B değeri bir diğeri adıyla boşluk basıncı katsayısı ile S_r ilişkisi aşğıdaki formölle belirtilmiştir.

$$B = \frac{1}{1 + n \frac{K_b}{K_w} + n \frac{K_b}{P_a} (1 - S_r)} \quad (3.18)$$

Buna göre ;

S_r = doygunluk derecesi

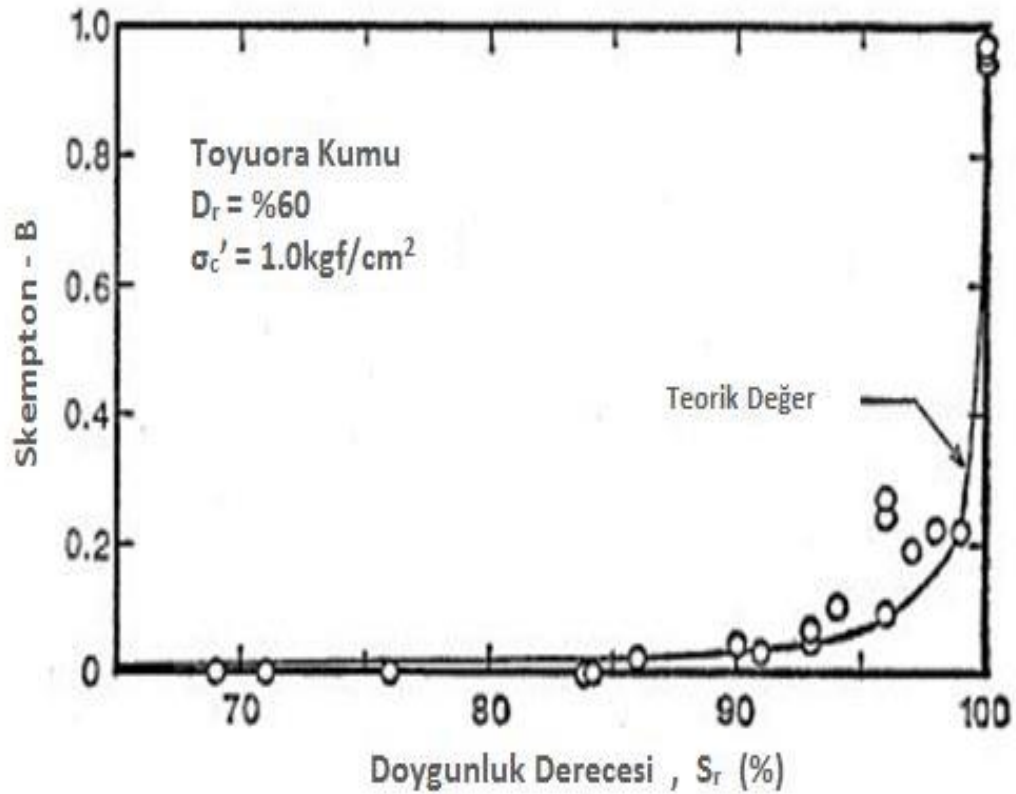
n = porozite

P_a = Mutlak akışkan basıncı

K_b = Zeminin sıkışmazlık modülü

K_w = Boşluk suyunun sıkışmazlık modülü

Lade ve Hernandez (1977) tarafından membran penetrasyon etkisi ihmal edilerek yapılmış çalışmada B değeri ve S_r arasındaki ilişkiyi teorik olarak bir eğri üzerinde göstermiştir (Şekil 3.21). Yoshimi ve diğ. (1989) sıklık oranı % 60 olan doygun olmayan Toyoura kumu ile yapmış olduğu laboratuvar çalışmaları neticesinde Lade ve Hernandez (1977) teorik eğrisine yakın deneysel sonuçlar elde etmiştir.



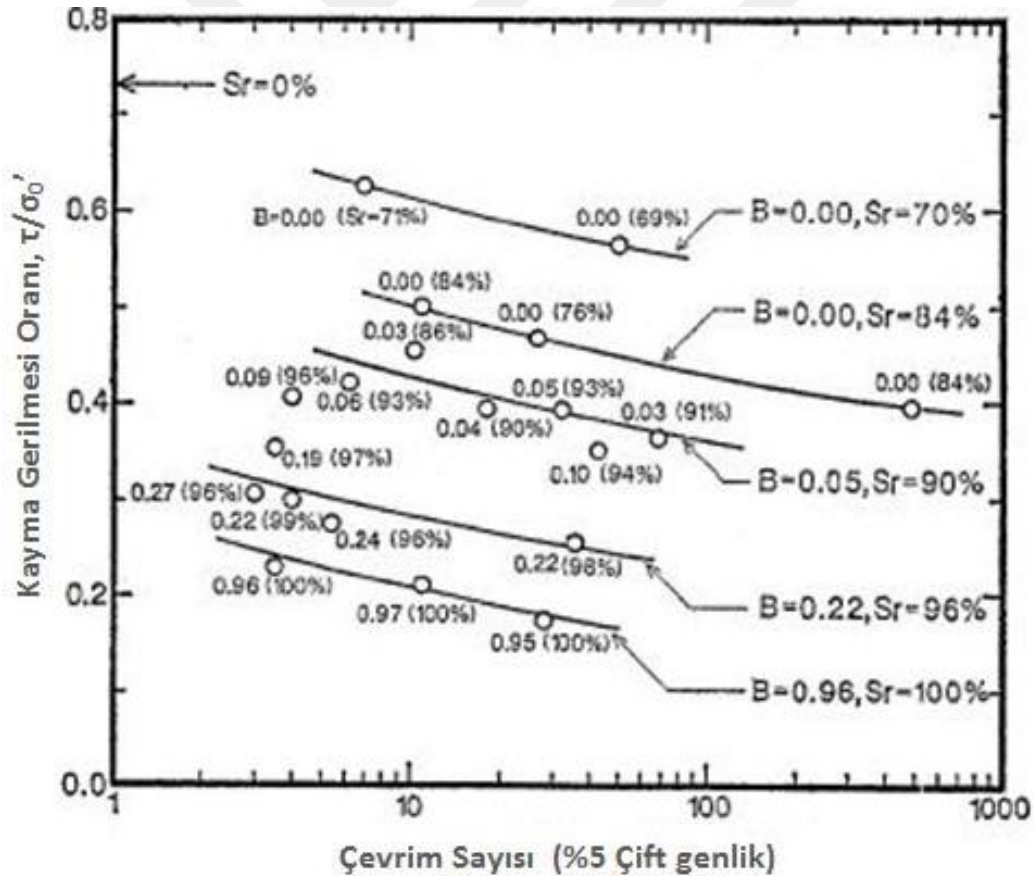
Şekil 3. 21 : $S_r - B$ ilişkisi (Yoshimi ve diğ, 1989).

Birçok araştırmacı doygunluğun $S_r = \%100$, Skempton-B >95 olduğu tam doygun kabul edilen durumlarda kumların sıvılaşmasını araştırırsa da son zamanlarda yapılan

birçok araştırmada tam doymun olmayan durumlarda da kumların sıvılaşılabildiği belirtilmiştir. Kurak ve yağış rejimi düzensiz bölgelerde yer altı su seviyesi altında bulunmayan zeminlerde kısmi doymunluk durumu görülebilir.

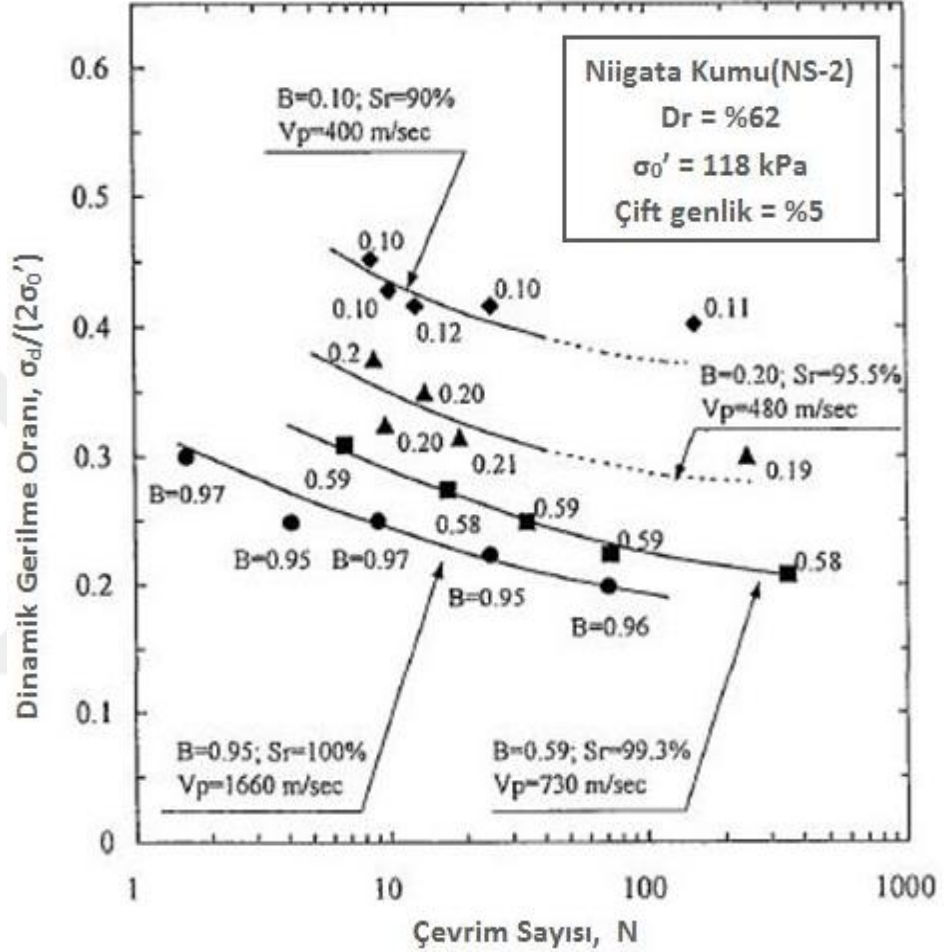
Yoshimi ve diğ. (1989) dinamik burulmalı deney sisteminde Toyoura kumu ile yapmış oldukları kısmi doymun deneyler sonucunda relatif sıkılığı %60 olan tam doymun durumdaki kumların, %70 doymunluk (S_r) oranına sahip kumlara göre üç kat daha sıvılaşma potansiyeli olduğunu vurgulamıştır. Yine aynı kum numunelerinde B değerinin düşmesinin özellikle sıfıra yaklaştıkça sıvılaşma direncini oldukça arttırdığını belirtmiştir.

Ayrıca numunelerin farklı B ve doymunluk derecesinde (S_r) $\pm$ %2.5 eksenel deformasyona ulaştığı çevrim sayılarına karşılık gelen dinamik kayma gerilmesi oranlarını belirleyerek kumlarda doymunluğun sıvılaşma karakterine etkisini göstermiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3. 22 : Doygunluk derecesinin sıvılaşma karakterine etkisi (Yoshimi ve diğ., 1989).

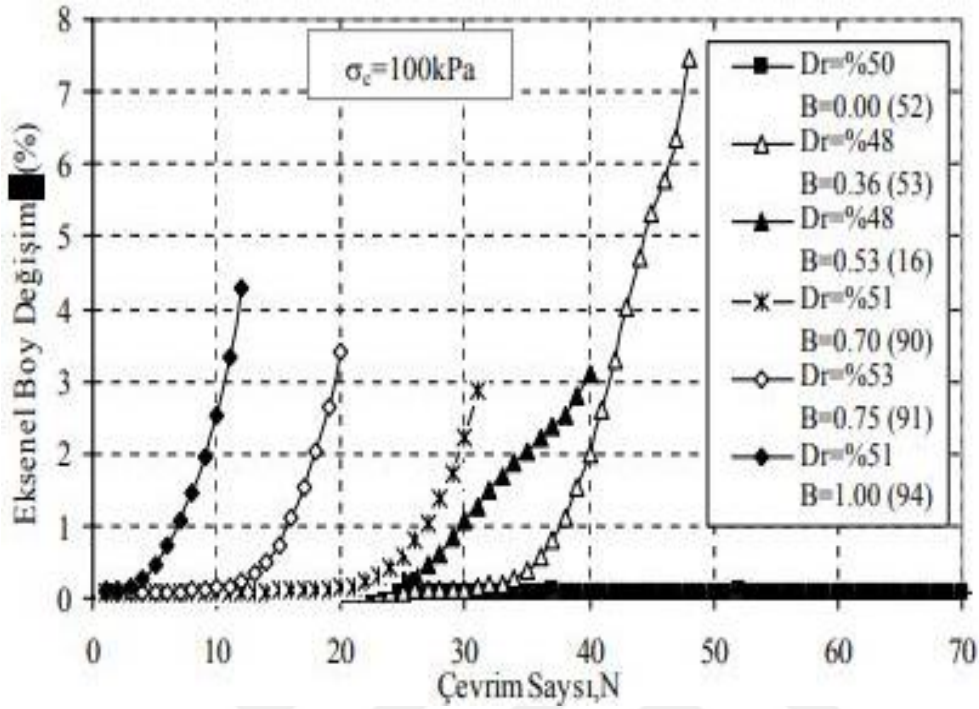
Örselenmemiş Niigata kumu ile %62 sıklık oranında yapılan diğer bir çalışmada Ishihara ve diğ. (2001) ise farklı doygunluk değerlerindeki %5 eksenel deformasyon çift genlikteki (D.A.) çevrim sayısı dinamik gerilme oranı ilişkisi incelemiştir. Yapılan testler sonucunda B değerinin düşmesi ile dinamik mukavemetin artmış olduğu gözlemlenmiş olup, P dalgası yayılımında azalma olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.23).



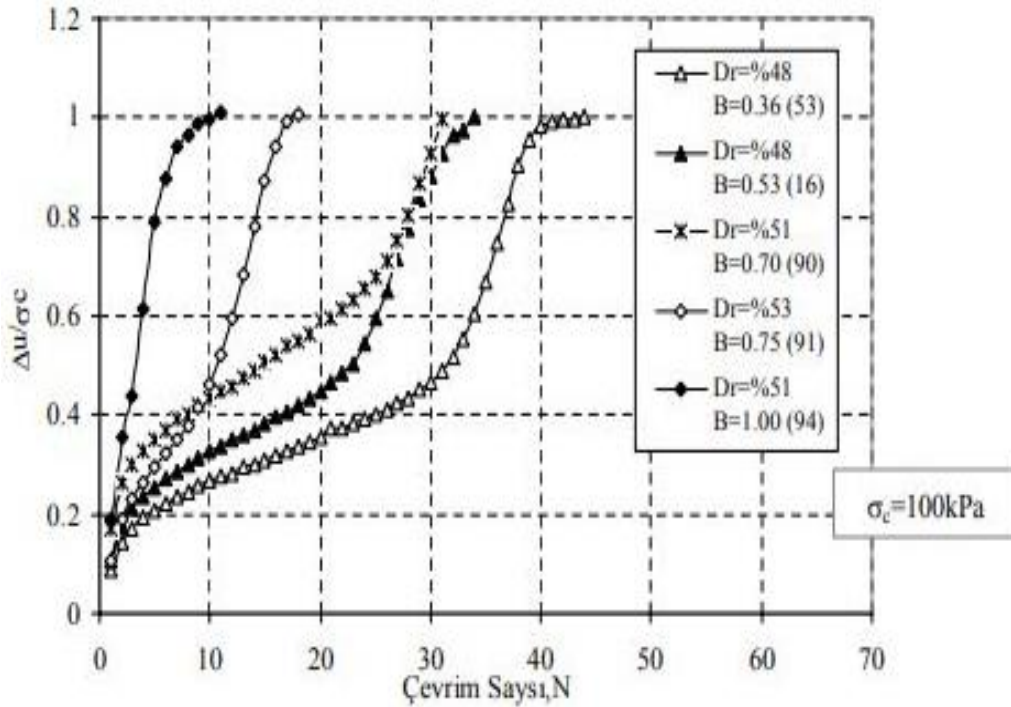
Şekil 3.23 : %5 deformasyon seviyesindeki çevrim sayısı ile tekrarlı gerilme arasındaki ilişki (Ishihara ve diğ., 2001).

Elibol ve Erken (2005) orta ince daneli temiz kumlar ile dinamik üç eksenli deney aletinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Gerilme deformasyon ve boşluk suyu basıncı değişimlerini inceledikleri tekrarlı yükler altındaki temiz kumlarda, doygunluğun dinamik mukavemete etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre Elibol ve Erken (2005) N = 40 dinamik çevrim sayısında sıvılaştığı gözlemlenen numune, tam doygun durumda (B=1.00) iken N= 10 çevrim sayısı sonunda sıvılaşma davranışı göstermiştir. Aynı numunelerdeki göçme davranışı incelendiğinde, tam doygun numuneye göre

skempton-B= %36 doygunluk değerine sahip numuneler dört kat daha fazla sıvılaşma direnci gözlemlenmiştir (Şekil 3.24 ve Şekil 3.25).



Şekil 3. 24 : $0.00 \leq B \leq 1.00$ ve $DKGO = 0.35$ olduğu durumda eksenel boy ve yükleme çevrimi değişim ilişkisi (Elibol ve Erken, 2005).



Şekil 3. 25 : $0.00 \leq B \leq 1.00$ ve $DKGO = 0.35$ olduğu durumda $\Delta u / \sigma_c$ oranının yükleme çevrimi ile değişim ilişkisi (Elibol ve Erken, 2005).

4. ÇEŞİTLİ KATKI VE KİRLETİCİ ETKİSİNDEKİ ZEMİNLER İLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Hızla sanayileşen kentlerde çevre kirliliği nedeniyle zemin tabakaları birçok kirleticiye maruz kalmaktadır. Bu kirleticiler insan sağlığına zarar vermekle beraber, zemin tabakalarına ve yeraltı sularına karışarak zeminlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde de değişikliklere neden olmaktadır. Bilim insanları gerek kirlenmenin bulunduğu ortamdan örselenmemiş numuneler alarak gerekse laboratuvar ortamında sonradan kirleticiler ekleyerek çeşitli araştırmalarda bulunmuşlardır. Bu araştırmalar atık maddelerinin zeminlerde neden olduğu olumsuz etkileri araştırmanın yanı sıra bazen de zemin iyileştirme yöntemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Disiplinler arası çalışma gerektiren bu araştırmalara, hızlı nüfus artışı ve gelişen teknoloji ile birlikte artık sıkça rastlamak mümkündür.

Çalışmanın bu bölümünde çeşitli katkı ve kirleticiler karıştırılarak elde edilen zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları hakkında yapılan araştırmalara yer verilmiştir.

4.1 Çeşitli Kirletici Etkisindeki Zeminlerin Davranış Değişikliklerinin İncelenmesi

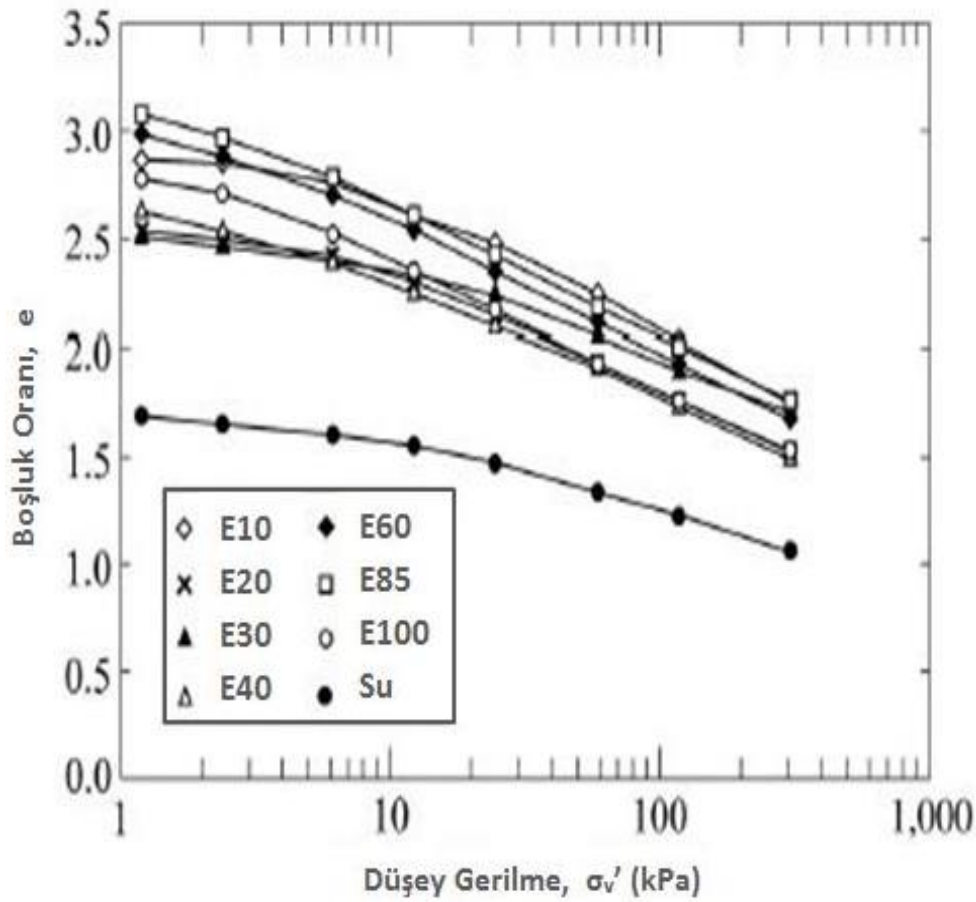
Kaba daneli zeminlere nazaran ince daneli zeminlerde, kohezyon ve organik madde içeriğinden dolayı katkı kirleticilerin etkisi daha fazla görülmektedir. Bu nedenle araştırmacılar çalışmalarını ağırlıklı olarak ince daneli zeminler üzerinde yoğunlaştırmışlardır.

Petrokimyasal ve taşıt yakıtlarının kirliliğini araştıran Matteo ve diğ. (2011) etil alkol benzin karışımının kaolin killerinin yapısına etkisini araştırdıkları çalışmalarında, boşluk viskozitesinin polaritesinin kaolinitin sıkışabilirliği üzerinde etkisine dikkat çekmiştir. Yapmış oldukları çalışmada kaolinit kilini saf etil alkol (E100) 'e kadar altı ayrı oranda (0.1'den 0.85'e) ve kurşunsuz benzin ile karıştırarak kirlenilmiş numuneler

hazırlamışlardır. Çizelge 4.1’de hazırladıkları bu farklı karışımlardaki numuneler üzerinde yaptıkları ödometre deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Şekil 4.1).

Çizelge 4. 1 : Boşluk sıvılarının 20°C’deki fiziksel ve kimyasal özellikleri ve deney sonuçlarının özetleri (Matteo ve diğ., 2011).

Boşluk Sıvısı	$\rho_{PF}(\text{kg/m}^3)$	μ_{PF} (cp)	ε_{PF}^a	LL_{eq} (%)	LL'	C_c	C_c'
E10	744	0.48	2.8	80.0	1.40	0.60	1.76
E20	750	0.55	3.9	79.0	1.39	0.54	1.59
E30	754	0.61	6.7	78.0	1.37	0.50	1.47
E40	762	0.70	9.2	77.0	1.35	0.52	1.53
E60	773	0.85	14.2	76.0	1.33	0.55	1.62
E85	792	1.03	20.5	75.0	1.32	0.54	1.59
E100	797	1.20	24.3	73.0	1.28	0.56	1.65
Su	998	1.00	78.0	57.0	1.00	0.34	1.00



Şekil 4. 1 : Boşluk sıvılarıyla yeniden oluşturulmuş olan kaoliniti zeminin bir boyutlu basınç eğrileri (Matteo ve diğ., 2011).

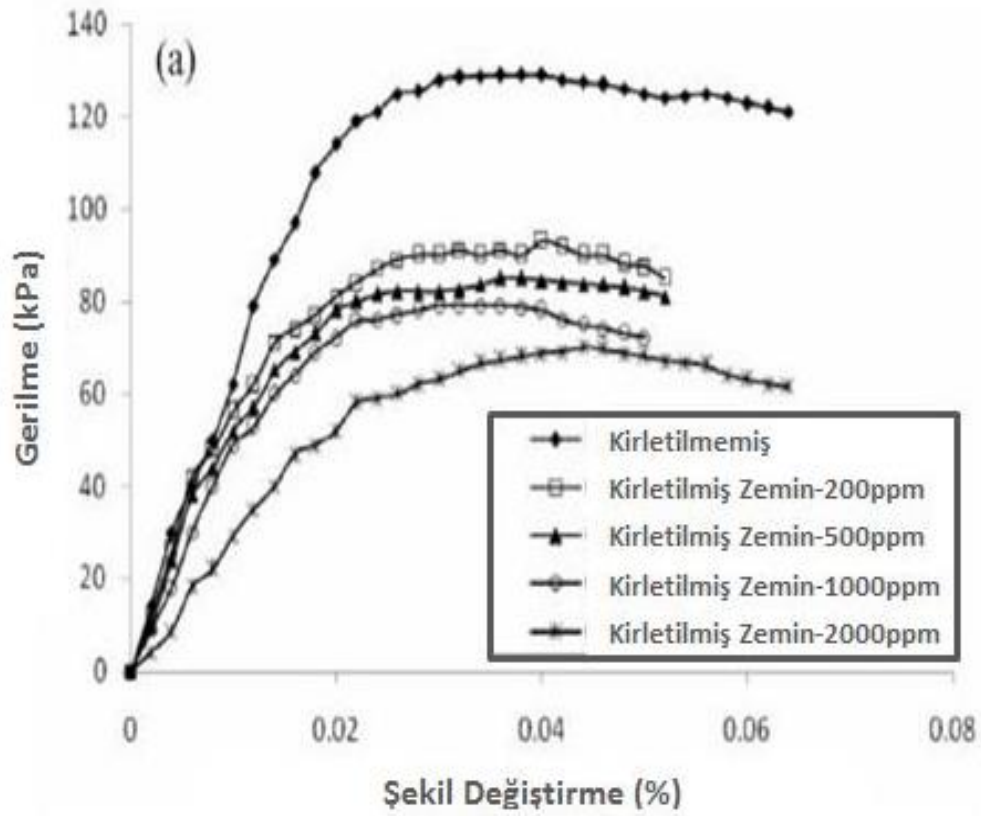
Matteo ve diğ. (2011) bu deneyler sonucunda etil alkol ve benzin karışımı ile kontamine olmuş kaolinit zeminlerin sıkışma indisinin ön tahmini için bir yaklaşım oluşturmuştur.

Resmi ve diğ. (2011) yapmış oldukları bir diğer çalışmada da kurşun kirliliğinin killi zeminlerin mühendislik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Kirleticiler ve zemin tabakaları arasında bariyer olarak kullanılan kil tabakalarında kurşun birikmesinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada Çizelge 4.2’de özellikleri verilen iki çeşit kil bariyeri laboratuvar ortamında yapay olarak kurşun nitrat ($Pb(NO_3)_2$) solüsyonu ile 200ppm , 500 ppm, 1000ppm ve 2000ppm oranında olacak şekilde kirletilmiştir.

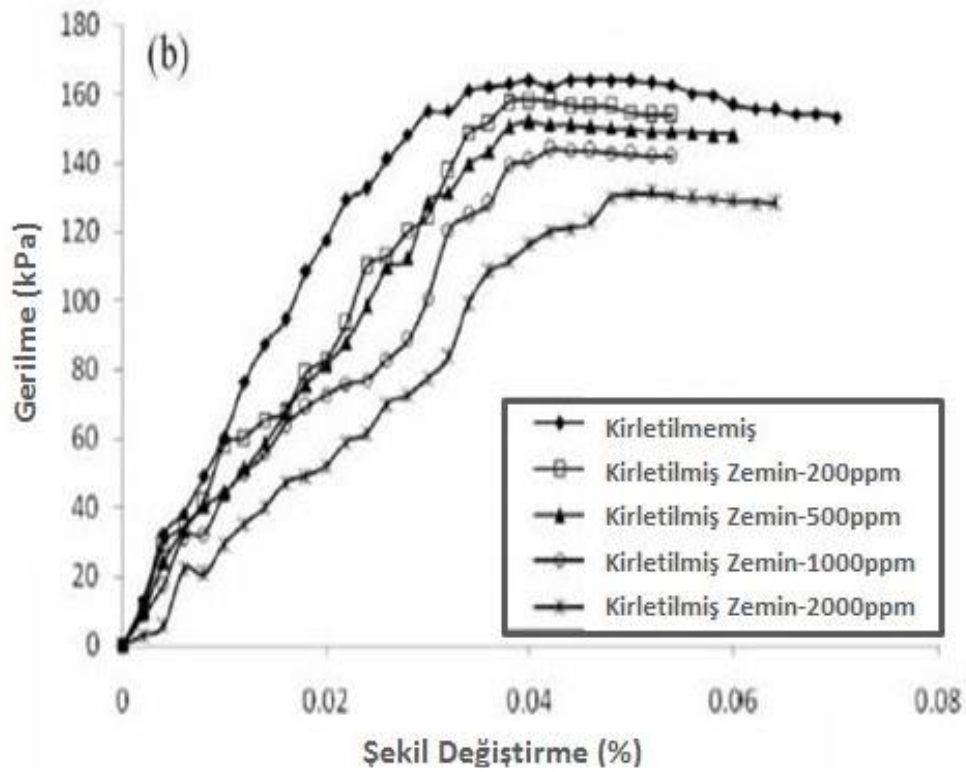
Yapmış oldukları araştırmalar sonucunda kil zeminin mühendislik özelliklerinin kurşun emilimi ile etkilendiği, kil bariyerin kurşun emiliminin H^+ iyonlarında yer değiştirmesi ile birlikte kilde flokülasyon yapıya geçildiğini ve bunun neticesinde Şekil 4.2’de ve Şekil 4.3’te görüldüğü gibi dayanımın düştüğünü ve permeabilite katsayısında artış olduğunu not etmişlerdir.

Çizelge 4. 2 Zeminlerin indeks özellikleri (Resmi ve diğ., 2011).

Özellik	A Numunesi Değerleri	B Numunesi Değerleri
Dane büyüklüğü dağılımı		
Çakıl (%)	3	0
Kum(%)	19	22
Silt (%)	48	37
Kil (%)	30	41
Kıvam limitleri		
Likit limit (%)	44	95
Plastik Limit (%)	23	27
Rötre Limiti (%)	9	18
Plastisite İndisi (%)	21	68
Zeminin Sınıflandırması	IS CI	CH



Şekil 4. 2 : A numunesi gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Resmi ve diğ., 2011).

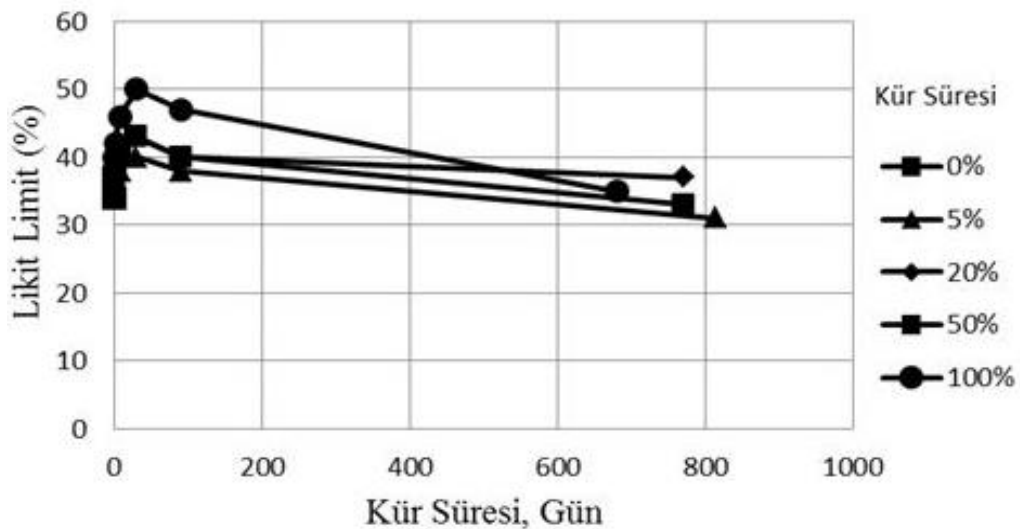


Şekil 4. 3 : B numunesi gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Resmi ve diğ., 2011).

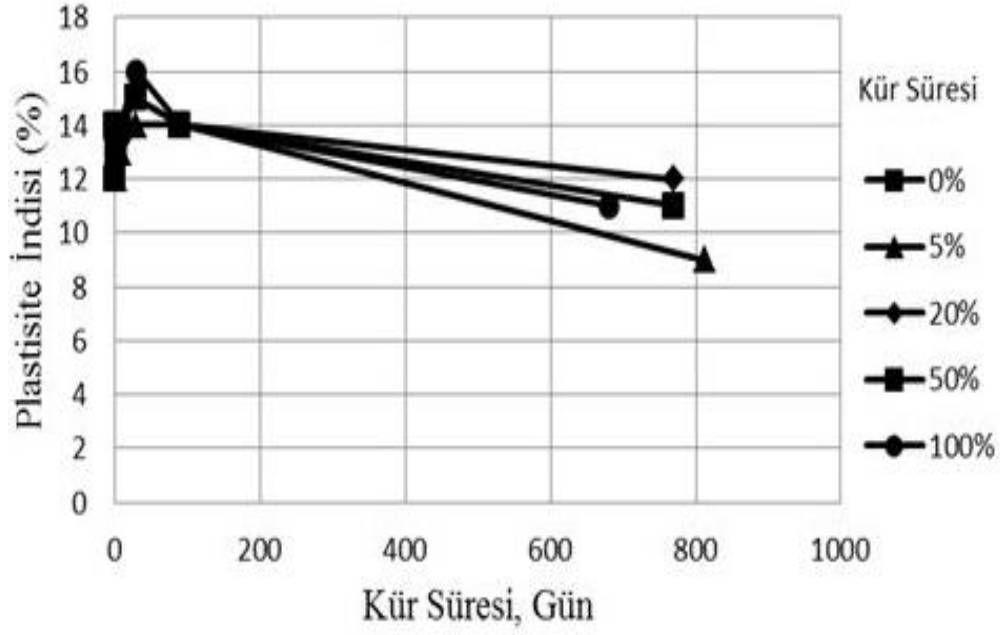
Erken ve diğ. (2009) tarafından yapılmış daha kapsamlı araştırmada ise içeriğinde kurşun ile beraber çinko, kadmiyum, nikel vb. gibi ağır metalleri ve kirleticileri içeren çöp sızıntı suyunun düşük plastisiteli killere olan dinamik etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar farklı kür oranlarında (%5, %20, %50 ve %100) çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış kil numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde bir dizi deneyler yaparak, düşük plastisiteli killeri farklı kür oranlarında çöp sızıntı suyu kontaminasyonuna maruz bırakarak dinamik etkilerini incelemiş, temiz zemin davranışları ile karşılaştırmışlardır.

Bu araştırmalar neticesinde kür oranı arttıkça daha fazla kirlenmeye maruz kalan kil zeminlerde kimyasal reaksiyonlar sonucunda flok yapı oluşması sebebiyle başlangıç elastisite modülünde artış gözlemlenmiştir. Çöp sızıntı suyu kontaminasyonunun Erken ve Yaşargün (2010) tarafından atterberg limitlerine etkileri incelendiğinde ise % 5, %20, %50 ve %100 kür oranında çöp sızıntı suyu kullanılan numunelerde 30 gün kür süresi sonunda likit ve plastik limit artışı maksimum değerlere ulaşarak daha sonra azalmalar gözlemlenmişlerdir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).

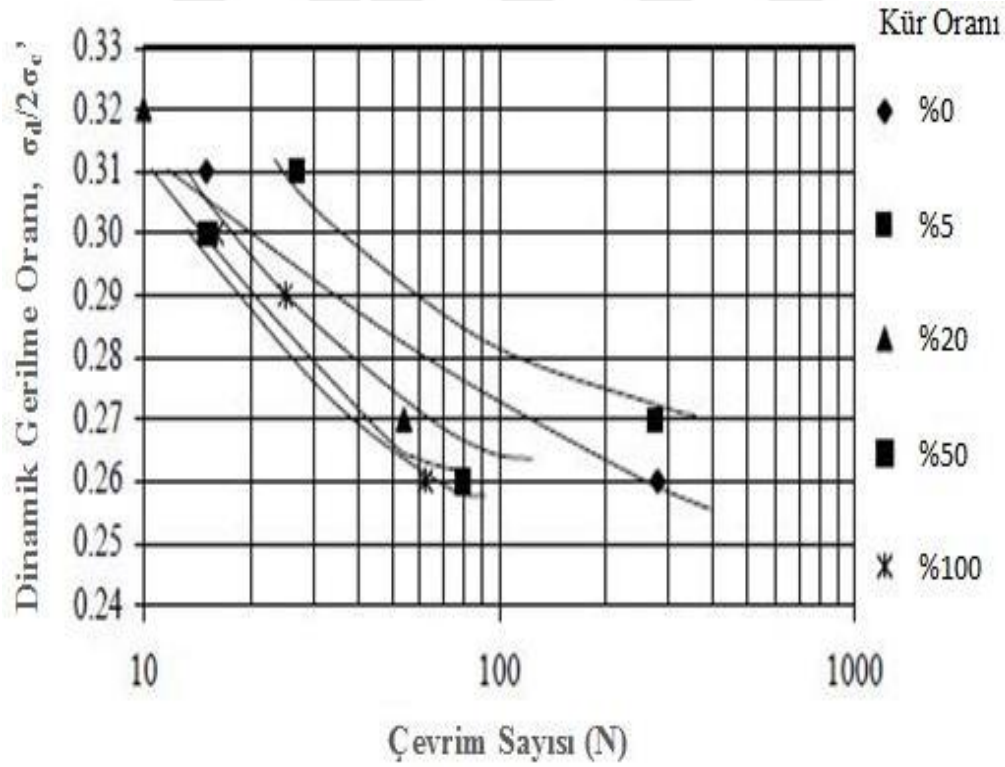
Dinamik üç eksenli deney aletinde farklı dinamik gerilme seviyelerinde $\epsilon = \pm \% 2.5$ eksenel deformasyon seviyesi baz alınarak yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında ise % 5 kür oranındaki deney numuneleri temiz zemin numunelerine göre daha fazla tekrarlı yüke dayanıklı olmakla birlikte kür oranı daha arttıkça tekrarlı dayanımda azalma meydana geldiğini ortaya koymuşlardır (Şekil 4.6).



Şekil 4. 4 : Likit limit-kür süresi ilişkisi (Erken ve Yaşargün, 2010).



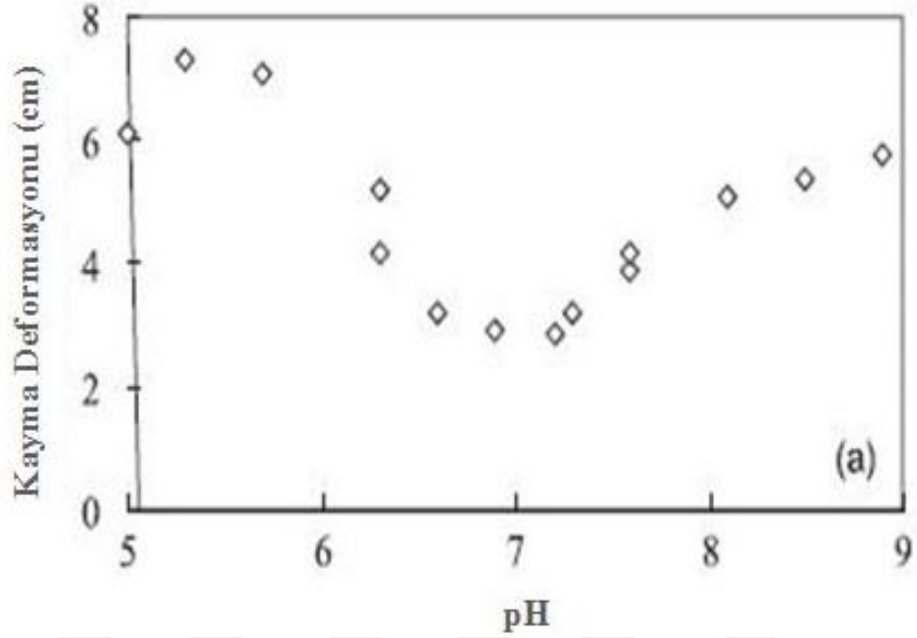
Şekil 4. 5 : Plastisite indisi-kür süresi ilişkisi(Erken ve Yaşargün, 2010).



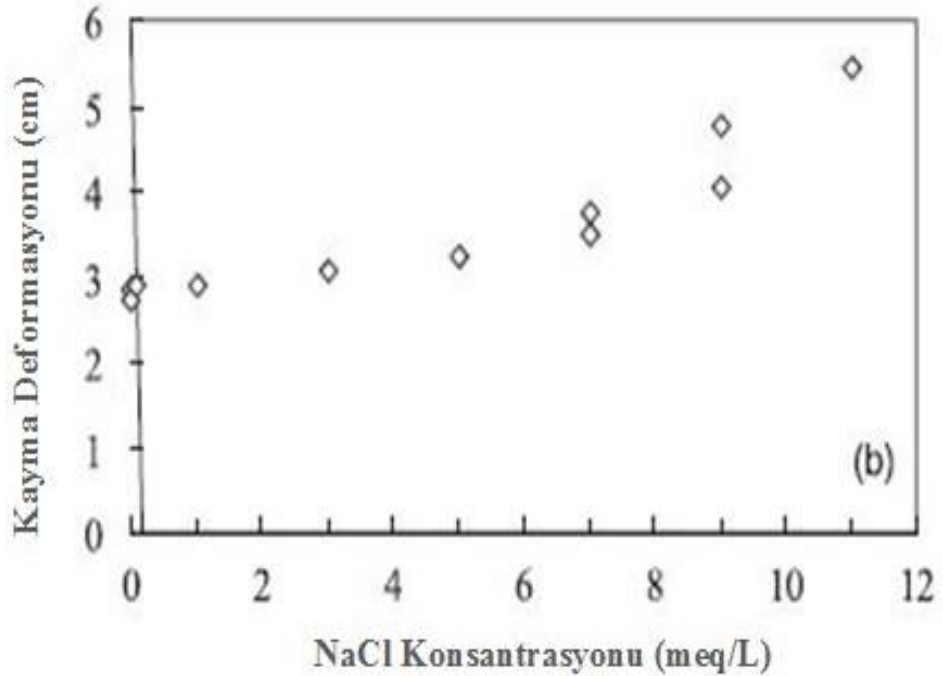
Şekil 4. 6 : Dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Erken ve Yaşargün, 2010).

Gratchev ve Sassa (2013) ince daneli zeminlerin kirlenme etkisini araştırmak için yapmış oldukları çalışmada zeminleri ayrı ayrı sülfirik asit (H₂SO₄), sodyum hidroksit ve sodyum klorür solüsyonları ile kirleterek dinamik kesme deneyleri yaparak incelemişlerdir. Numunelerin dinamik kayma mukavemetinin incelendiği bu deneyler neticesinde sodyum klorür konsantrasyonundaki artışın (1 meq/L den 11 meq/L)

numunelerin dinamik yükleme esnasında kayma direncinde azalmaya sebep olduğu (Şekil 4.7), asidik ve alkali ortamlarda damıtık su kullanılan numuneye göre tekrarlı kayma deneylerinde deformasyonların pH ve NaCl konsantrasyonlarından etkilendiği gözlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4. 7 : Kayma deformasyonu-pH ilişkisi (Gratchev ve Sassa, 2013).

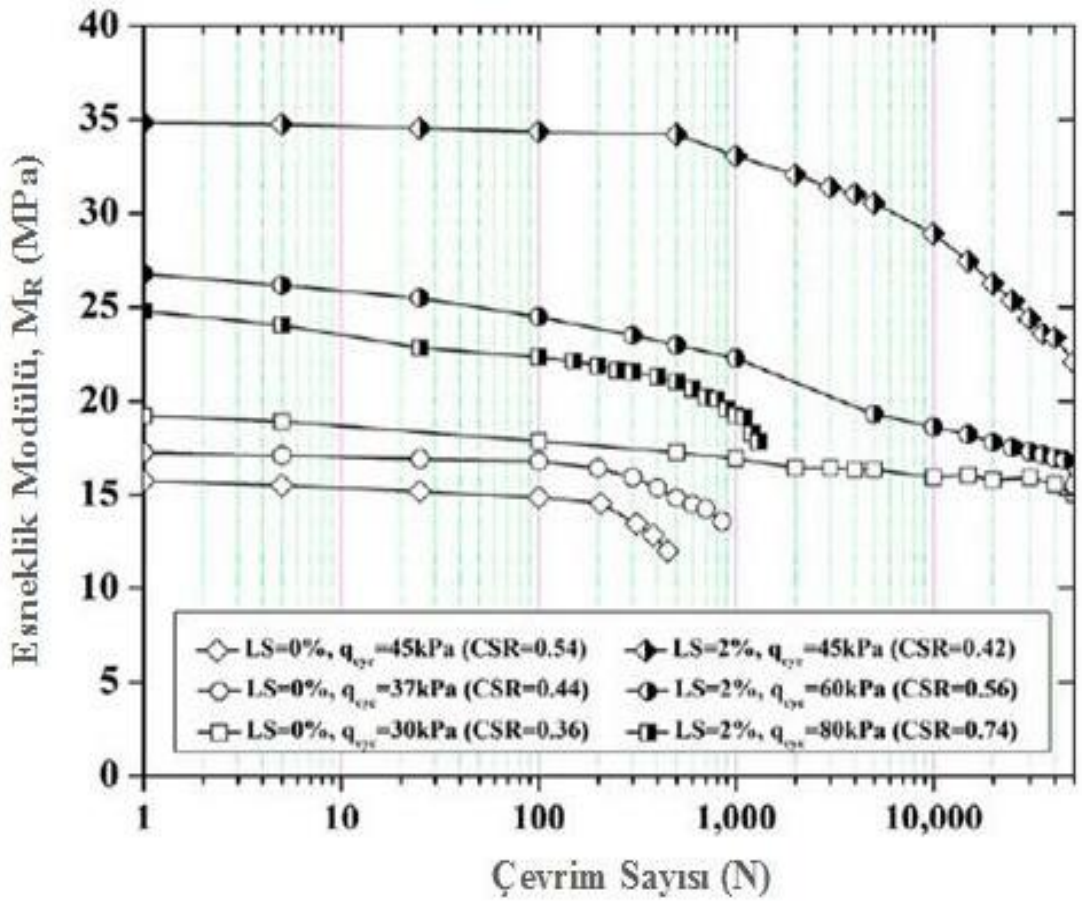


Şekil 4. 8 : Kayma deformasyonu-NaCl konsantrasyonu ilişkisi (Gratchev ve Sassa, 2013).

4.2 Katkı ve Kirleticilerin Zemin İyileştirmedeki Rolü

Katkı ve kirleticilerin zeminlere olan etkilerinin araştırıldığı birçok çalışmadan yola çıkan araştırmacılar bu katkı ve kirleticilerin zemin iyileştirme ve stabilitesi için de kullanılması durumunda zemin davranışına etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda ana amaç hem zemin iyileştirme yöntemleri geliştirmek hem de atık maddelerin bertarafı için gerekli maliyetleri düşürerek, geri dönüşme kazandırmaktır. Böylece ülke ekonomileri büyük ekonomik yüklerden kurtulup çevre kirliliği kontrol altına alınmış olacaktır.

Geçmişte katkılar ile yapılan çalışmalarda genellikle kireç, çimento, uçucu kül, cüruf v.b. gibi geleneksel malzemeler karıştırılarak yapılmaktaydı. Bu katkı ve kirleticiler yüksek pH içerdiği için yer altı suyu kalitesini olumsuz etkilemekteydi ve zeminin su tutma kapasitesini düşürerek beslenmesini engellemekteydi. Zemin stabilizasyonu için kullanılan bu maddeler aynı zamanda tren yolu güzergahı ve havaalanı pisti gibi sürekli tekrarlı yüke maruz kalan zemin tabakalarında zayıf kalmaktaydı. Chen ve Indraratna (2014) yapmış oldukları çalışmalarda bu geleneksel katkıların dışında zemin stabilizasyonuna uygun ve aynı zamanda çevre dostu olan linyosülfonat (LS)'ı önermişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda %50 silt, %40 ince kum ve %10 kil içeren zemin numunesine linyosülfonat (LS) %0, %0.5, %1, %2, %3 ve %4 oranında olacak şekilde karıştırarak dinamik üç eksenli deney aletinde deneylere tabi tutulmuştur. Skempton $B > 0.98$ ve çevre basıncı 15 kPa seviyesinde yapılan deneyler sonucunda temiz zemin ve %2 linyosülfonat katkılı zeminin eksenel deformasyon çevrim sayısı ilişkisi incelendiğinde uzun çevrimlerde dinamik yük arttıkça katkı maddeli zeminin performansının daha iyi olduğu saptanmıştır. Bu çalışmalarda esnek yol kaplaması hesabında kullanılan esneklik modülleri (MR) hesaplanarak temiz zemin numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda Chen ve Indraratna (2014), temiz ve katkılı her zemin numunesinde esneklik modülünün özellikle 1000 çevrim üzerinde ($N > 1000$) daha fazla olmak üzere düştüğünü, esneklik modülleri karşılaştırıldığında (MR) temiz zeminlere göre linyosülfonat (LS) katkılı zeminlerde önemli derecede arttığını bildirmişlerdir (Şekil 4.9).



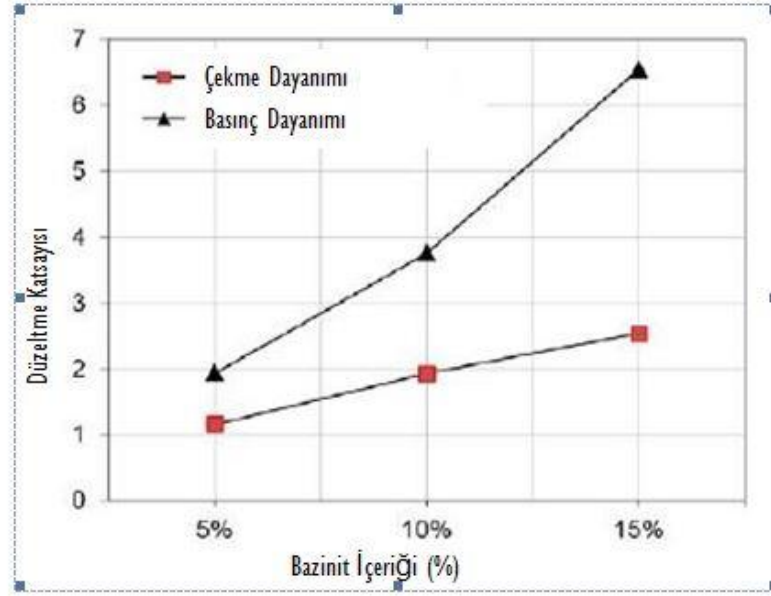
Şekil 4. 9 : Esneklik modülü-çevrim sayısı ilişkisi (Chen ve Indraratna, 2014).

Bir diğer çalışmada Kobayashi ve diğ. (2013) yapmış olduğu bazanitin geri dönüşümde ve zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılması araştırmalarıdır. Karşımıza inşai atık olarak çıkan ve çevre kirliliği açısından problem yaratan alçıpan atıklarından elde edilen bazanit araştırmacılar tarafından iki farklı kohezyonsuz zemin cinsi ile birlikte karıştırılarak kullanılmıştır. Dünya’da yılda yaklaşık 80 milyon ton üretilen ve inşaat atıklarında zayıf fazlası olarak çıkan alçıpan parçaları düzenli depolama sahalarında belirli koşullar altında insan ve hayvan sağlığına zararı bilinen hidrojen sülfür gazlarına neden olmaktadır. Çizelge 4.3’ te özellikleri verilen A ve B olmak üzere iki farklı kumlu zemin numunesi kullanılan çalışmada %0, %5, %10 ve %15 karışım oranlarında olmak üzere 4 farklı geri dönüşüm bazaniti kullanılmıştır.

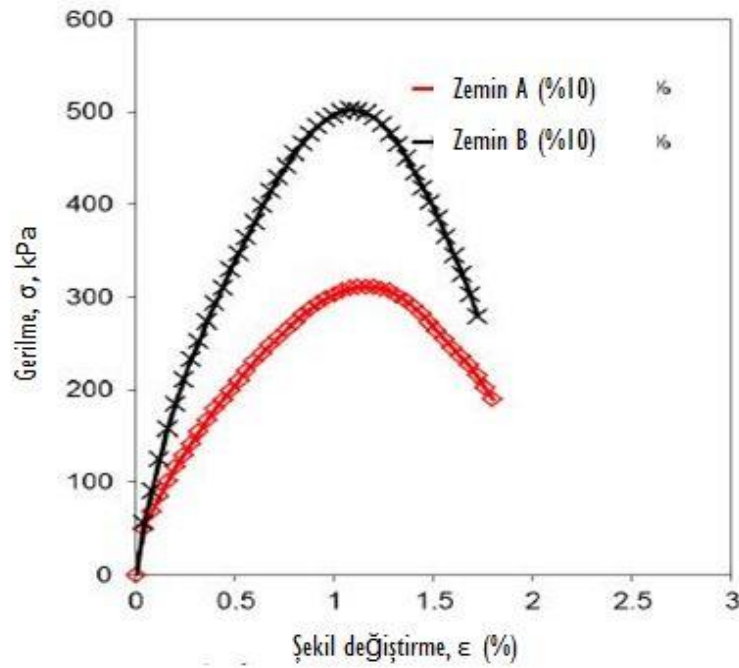
Çizelge 4. 3 : Geri dönüşüm bazanit numunelerinin özellikleri.

Numune Özellikleri	Zemin A	Zemin B
Özgül ağırlık	2.60	2.67
Maksimum boşluk oranı	0.85	1.28
Minimum boşluk oranı	0.60	0.79
D50 (mm)	0.21	0.15
D10 (mm)	0.15	0.06
Üniformluk katsayısı, Cu	1.53	2.72
Eğrilik katsayısı, Cc	0.94	1.02
İnce dane oranı, FC	0.40	11.30
Optimum su içeriği (%)	13.20	20.40
Zemin Sınıfı (USGS)	SP A-3	SP A-2-4
Zemin Sınıfı (AASHTO)	İnce kum	Siltli kum

Geri dönüşüm bazaniti oluşturulurken önce alçıpan parçalarını toz haline getirilmekte, sonra kâğıt boya gibi parçalardan ayrıştırılmakta daha sonra bu parçalar yüksek ısıda ısıtılarak (130 °C – 160 °C) dörtte üç su molekülü ayrıştırılarak kalsiyum sülfat hem hidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) halini almaktadır. Araştırmacılar 50mm çapında ve 100mm yüksekliğindeki 3, 7, 14, 28 ve 56 kür gün süreli 5 farklı silindir kalıplar içerisinde hazırlanan numunelerde incelemelerde bulunmuşlardır. Bu incelemelerde kür oranının gerilme - şekil değiştirme davranışına etkisi, basınç ve çekme dayanımı etkisini ve kür sürelerinin basınç dayanımına etkilerine bakılmıştır. Araştırmalar neticesinde Kobayashi ve diğ. (2013) kür oranı artışı ile birlikte basınç ve çekme dayanımında artışı Şekil 4.10 'da gözlemlemişlerdir. Buna göre farklı kür oranı içeren zemin B numunelerinde kür oranı arttıkça basınç ve çekme gerilmelerinde artış meydana gelmiştir. Araştırmacılar diğer bir deneyde ise %10 kür oranı içeren A ve B numunelerinin gerilme-şekil değiştirme performanslarını karşılaştırdıklarında A zemin numunesi olan kumlu zeminin performansının siltli B zemin numunesine göre daha fazla artış gösterdiğini ve bunun nedeni olarak bazanitin kum ile kohezyon bağıını siltli zemine göre daha kuvvetli kurduğu ve kum parçacıkları arası sürtünme kuvvetinin siltli zeminden yüzey alanı bakımından daha fazla olduğu belirtmişlerdir (Şekil 4.11).

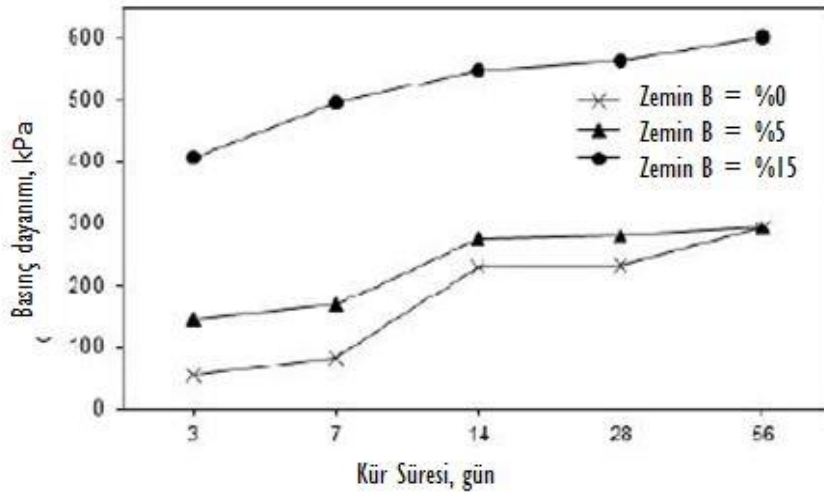


Şekil 4. 10 : Farklı kür oranlarında bazanit içeren zemin B numunesinin Kür oranı ile düzeltme katsayısı ilişkisi grafiği.



Şekil 4. 11 : %10 kür oranı içeren zemin A ve B numunesi gerilme-şekil değiştirme ilişkisi grafiği.

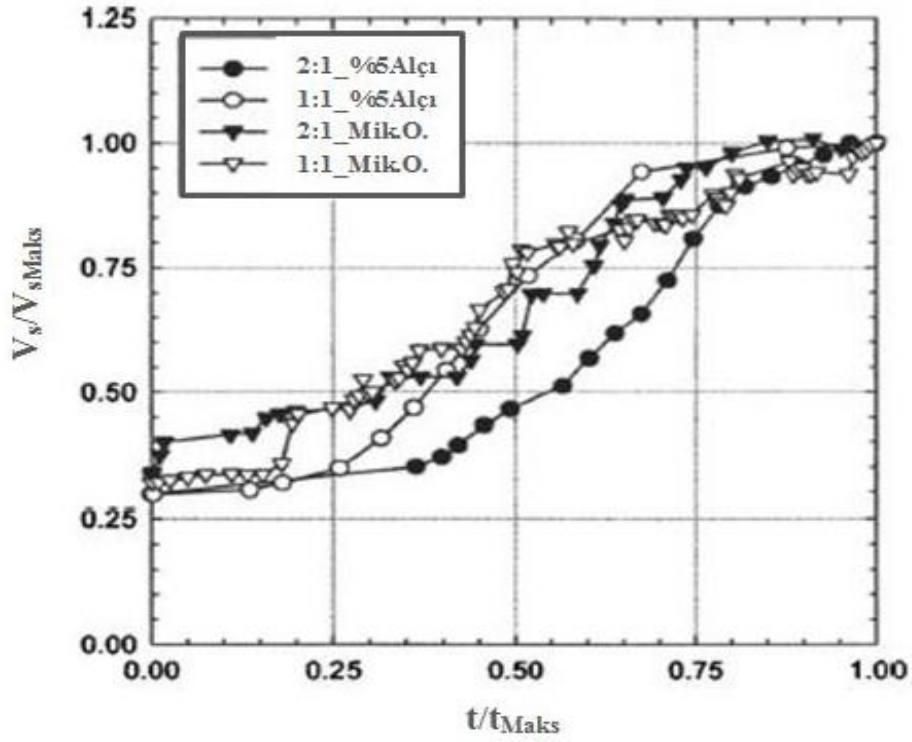
Ayrıca kür süresi etkilerini inceledikleri çalışmalar sonucunda, geri dönüşüm bazaniti ile kirletilmiş numunelerde özellikle kür süresinin ilk zamanlarında önemli etki gösterdiğini ve kür süresi 14 gün üzerine çıktığında bu etkinin önemini kaybettiğini bildirmişlerdir (Şekil 4.12).



Şekil 4. 12 : Farklı kür oranlarındaki zemin B numunelerinin farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı grafiği.

Daha önceki çalışmalar kapsamındaki geleneksel metotlara nazaran mikroorganizma, bakteriler ve biyolojik süreçlerin birlikte kullanılması şeklinde yenilikçi çalışmalarda bu alanda karşımıza çıkmaktadır. Biyolojik iyileştirme yöntemleri olarak kavramlaştırılan bu metotlarda araştırmacılar bakteri ve mikroorganizmaları kullanarak kohezyonsuz zeminlerde çimentolaşma etkilerine odaklanmışlar ve geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Fritzges (2005) biyolojik etki ile iyileştirilmiş kumların davranışlarını monotonik drenajsız üç eksenli deneyler yaparak incelemiştir. Bir kısmını Fritzgez (2005)' in tez çalışmasının oluşturduğu DeJong ve diğ. (2006) *Bacillus pasteurii* mikroorganizması kullanarak hazırladığı relatif sıklığı %35 olan Ottawa kumlarıyla yapmış olduğu bu çalışmalarda, örselenmemiş gevşek numunelere göre daha yüksek başlangıç kayma rijitliği ve nihai kayma kapasitesi ile çökmeye neden olmayan gevşek gerilme kayma davranışı sergilediğini ortaya koymuştur.

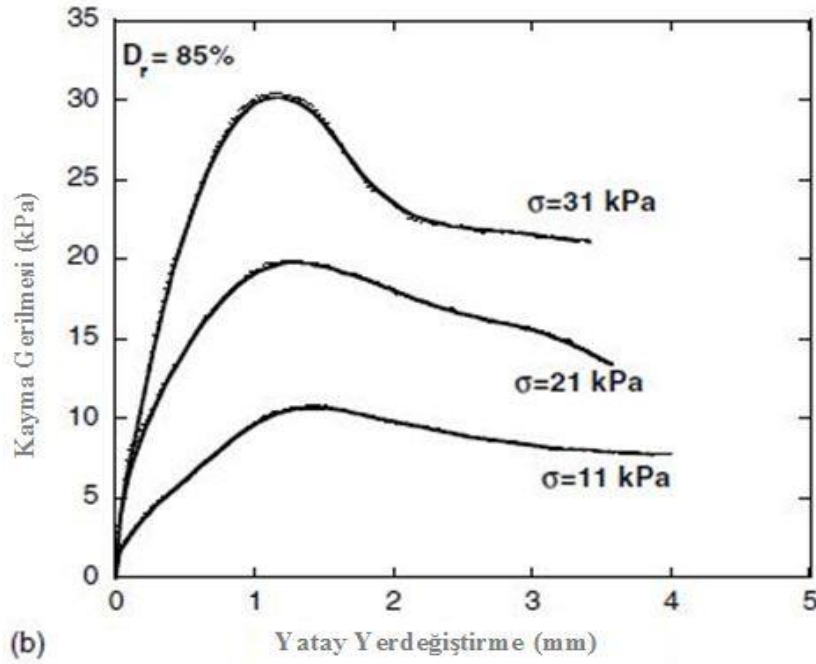
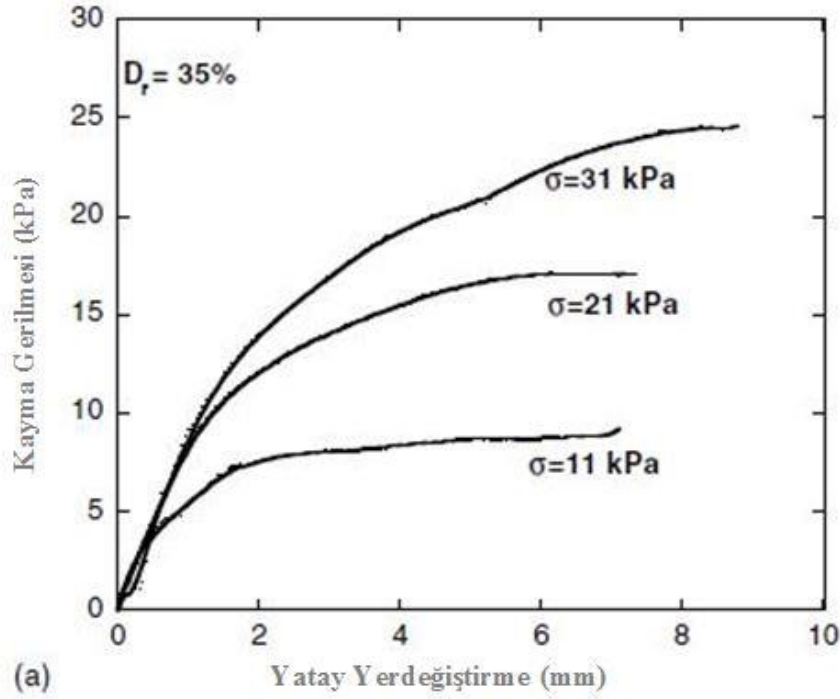
Çalışma sonucunda temiz kum, alçı ile bağlanmış kum ve *Bacillus pasteurii* mikroorganizması ile bağlanmış kumlar karşılaştırılmış ve elektron mikroskobu (SEM) görüntülemesi yapılmıştır. Normalize kayma dalgası hızı (Vs) açısından bakıldığında alçı ile bağlanmış kum ve mikroorganizma ile bağlanmış kumun davranışları yakın çıktığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.13). Mikroorganizma ile bağlanmış kumlarda eksenel kapasitede artış görülmüş, numunelerin tepkisine bakıldığında göçme davranışı görülmemiştir.



Şekil 4. 13 : Kayma dalgası açısından alçı ile ve mikroorganizma ile bağlanmış kumun davranışları (DeJong ve diğ., 2006).

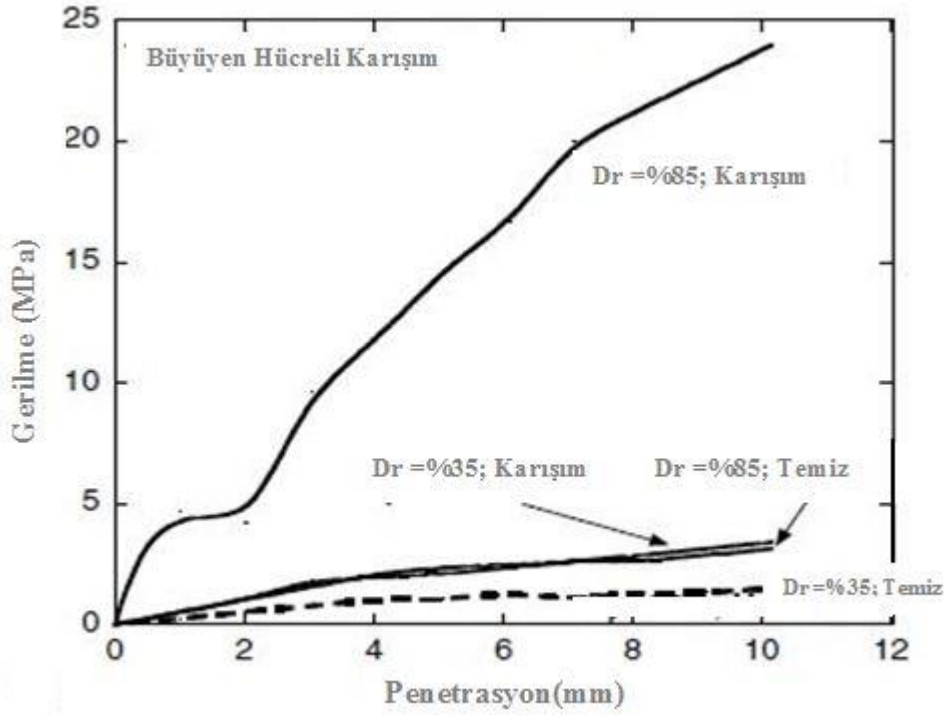
Chou ve diğ. (2011) yapmış olduğu bir diğer çalışmada ise kumun jeomekanik özelliklerindeki değişiklikleri incelemek için gram pozitif bakterisi *Sporosarcina pasteurii* (*S. pasteurii*) den faydalanmışlardır. Üroliz yolu ile uyarılan kalsiyum çökeltileri oluşturarak kumu katılaştırma yeteneğine sahip bu bakterileri büyüme, dinlenme ve ölü *S. Pasteurii* hücreleri ile karıştırarak oluşturdukları kum numunelerini direkt kesme ve Kaliforniya Taşıma Gücü (CBR) deneylerine tabi tutarak incelemişlerdir. %99.7 quartz kumu içeren numunenin uniformluk katsayısı $C_u = 1.1$ olup, ortalama dane çapı $D_{50} = 0.46$ mm olarak belirlenmiştir. Spesifik gravitesi ve pH ı sırasıyla 2.65 ile 6.5 dir. *S. Pasteurii* ile önce tamamen karıştırılmış tank reaktörlerde (CSTRs) sonra da hidrolik olarak tamamen karıştırılmış biyofilm reaktörlerde (CMBRs) hazırlanmıştır. Araştırmacılar tarafından bu iki reaktör sisteminde de ilk olarak büyüme, dinlenme ve ölü *S. Pasteurii* hücreleri olacak şekilde farklı hücre tipleriyle, ikincisi değişik konsantrasyon oranlarında ve son olarakta farklı sıklık oranlarında direkt kesme ve Kaliforniya Taşıma Gücü (CBR) deneyleri uygulanarak karşılaştırılmıştır. Chou ve diğ. (2011) tarafından numunelere uygulanan direkt kesme deneyi ve CBR testi sonucunda, direkt kesme deneyi sırasında Şekil 4.14 (a) ve Şekil

4.14 (b)' de görüldüğü gibi gevşek kumlarda diğer karışım şekillerine nazaran büyüyen hücreli karışımın pik dayanımının daha yüksek çıktığı görülmüştür.



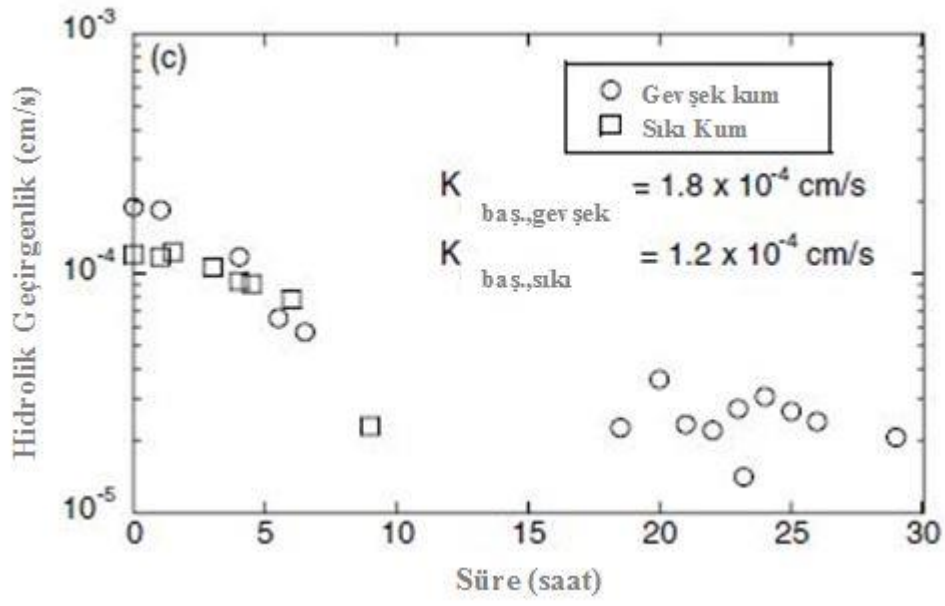
Şekil 4. 14 : Büyüyen Hücreli karışımın normal gerilmenin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi a) gevşek kum, b) Sıkı kum.

Ayrıca tüm karışımlarda kırılma açısı temiz kum numuneleri ile kıyaslandığında genelde artmıştır. Bu artışın en fazla büyüyen hücreli karışımda, kohezyon artışı ise az olmakla birlikte hemen hemen tüm karışımlarda gözlemlenmiştir. Araştırmacılar büyüyen hücreli karışımda özellikle sıkı kumda CBR da artış gösterdiğini, diğer dinlenmiş ve ölü *S. Pasteurii* hücrelerinde ise CBR da önemli bir değişim olmadığını belirtmişlerdir (Şekil 4.15).



Şekil 4. 15 : CBR testi gerilme penetrasyon eğrisi.

Chou ve diğ. (2011) çalışmasında Cbr Sisteminde hidrolik geçirgenliği incelediklerinde, büyüyen hücreli karışımda sıkı ve gevşek kum numunelerinde hidrolik geçirgenliğin düştüğünü hem deneysel hem de SEM görüntüleriyle ortaya koymuşlardır. Şekil 4.16 'da hidrolik geçirgenliğin kumun sıkılığından bağımsız olarak zamanla değişimi göstermiştir.



Şekil 4. 16 : Cbr sistemindeki 107cfu=mL başlangıç bakteri aşılamaındaki hidrolik geçirgenlik.

5. DENEY SİSTEMİ VE DENEY YAPILIŞ AŞAMALARI

5.1 Dinamik Üç Eksenli Deney Aleti ve Deneyde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması

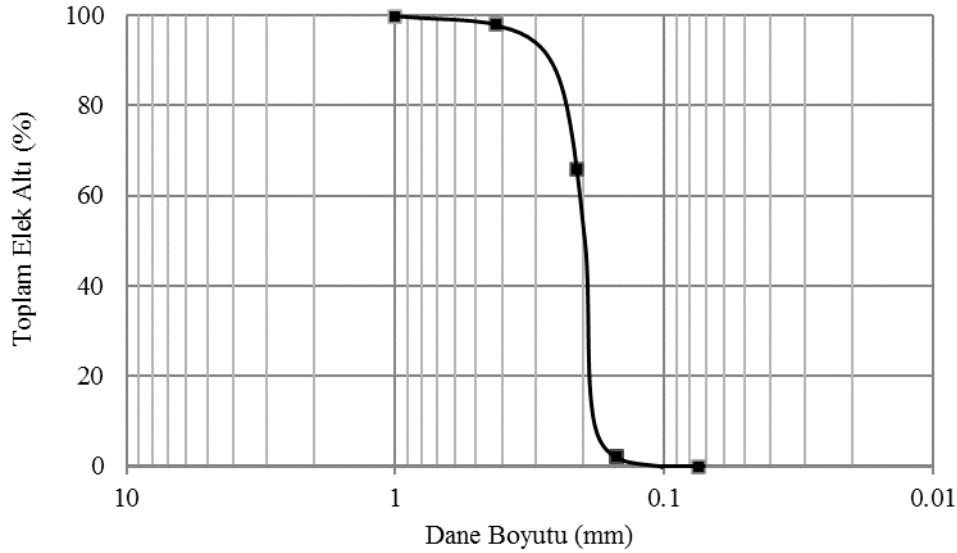
Deneysel çalışma bilimdeki nedensellik ilişkisinin en iyi karşılayan araştırma biçimidir. Deneysel çalışma doğadaki şartların laboratuvar ortamında modellenmesi ile birlikte, sebep sonuç ilişkisini ortaya koyar. Bir deneysel çalışmada simule edilen koşullar o deneysel çalışmanın başarısı için çok önemlidir. Bu sebepten ötürü deney aletlerinin kalibrasyonu, deneyde kullanılacak malzemelerin seçimi, deney şartları deneysel çalışmalar için birebir önem taşır. Bu bölümde deney numunesinin hazırlanması, kür süreci ve deney aleti hakkında bilgiler verilerek laboratuvar ortamında hazırlanan zemin numunesinden deney sürecine kadar olan kısım hakkında bilgiler bulunmaktadır.

5.1.1 Deneylerde kullanılan zemin ve özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan zemin Akpınar köyü, sülün ocağından temin edilmiş olan kum zemin numunesidir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre numune SP olarak belirlenmiştir. Kullanılan kum numunesi ASTM:E11-1961'e göre #10 nolu elekten elendikten sonra, #200 nolu elekte su ile yıkanarak ince danelerden arındırılmıştır. Bu işlemden sonra 105 °C etüvde bir gün süreyle bekletilip kurutularak elek analizi yapılmıştır. Daha önce İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, Yapı Mühendisliği bölümünde mikroskobik incelemesi yapılan Akpınar kumunun yarı üçgen, yarı dairesel şekilli temiz parçacıklardan oluştuğu, karışımın genel olarak kuartz ve küçük parçacıklı demir cevheri içerdiği belirlenmiştir. Çizelge 5.1'de özellikleri verilen kumun özgül ağırlığı 2.69, minimum boşluk oranı $e_{min}=0.558$ maksimum boşluk oranı $e_{maks}=0.874$ olarak elde edilmiştir. Granülometri eğrisi ise Şekil 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5. 1 : Akpınar kumunun özellikleri.

Kum numune özellikleri	Değer
Özgöl ağırlık	2.69
Maksimum boşluk oranı	0.874
Minimum boşluk oranı	0.558
D50 (mm)	0.30
D10 (mm)	0.23
Üniformluk katsayısı, Cu	1.434
Derecelenme katsayısı, Cc	0.96
İnce dane oranı, FC	0



Şekil 5. 1 : Elek analizi sonucu Akpınar kumunun granülometri eğrisi.

5.1.2 Deneylerde kullanılan çöp sızıntı suyunun özellikleri

Deneylerde kullanılan çöp sızıntı suyu Kemerburgaz Düzenli Katı Atık Depo tesisinden getirilmiş olan genç depo sızıntı suyu kullanılmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarında sızıntı suyunun 1 haftalık ve 22 aylık analiz sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 2 : Kemerburgaz düzenli katı atık depo tesisinden getirilmiş olan genç depo sızıntı suyu özellikleri.

Parametre	Birim	1 Haftalık (Genç)	22 aylık (Yaşlı)
pH	-	7.30	9.25
TKM	mg/l	29710	15350
TUKM	mg/l	13055	2670
TÇM	mg/l	27950	12320
TUÇM	mg/l	13510	1385
Alkalinite	mg/l CaCO ₃	14300	7740
KOİ	mg/l	37665	3595
Çöz. KOİ	mg/l	30000	1570
BOİ	mg/l	24450	400
T.P	mg/l	30	10
TKN	mg/l	2780	1120
NH ₃ -N	mg/l	2550	820
Klorür	mg/l	3266	4190
Sülfat	mg/l	120	356
Ca Sertliği	mg/l CaCO ₃	6919	110
Toplam Sertlik	mg/l CaCO ₃	8595	1808
Ca	mg/l	2773	44
Mg	mg/l	409	468
Na	mg/l	2590	2853
K	mg/l	1700	1700
Fe	mg/l	41.2	184
Ni	mg/l	0.82	1.16
Cr	mg/l	0.64	0.76
Zn	mg/l	1.27	3.04

Şekil 5.2’ deki genç depo numunesi Kemerburgaz katı atık depolama tesisinden getirilen yaklaşık bir haftalık genç sızıntı suyu olup, eski sızıntı suyu, kür havuzun beklemiş 22 ay sonra alınan örnek numunedir. Zamana bağlı özellikleri değişiklik gösteren numunelerden 1 haftalık genç numunede pH=7.30 iken 22 aylık numunede

pH=9.25 değerine yükselmiştir. Toplam çözünmüş katı madde miktarı 1 haftalık numunede 27950 mg/l iken 22 aylık numunede 12320 mg/l 'ye, Kimyasal oksijen ihtiyacı ise 1 haftalık numunede 37665 mg/l iken 22 ay sonra 3595 mg/l' ye düştüğü görülmektedir.



Şekil 5. 2 : Genç ve yaşlı sızıntı suyu numuneleri.

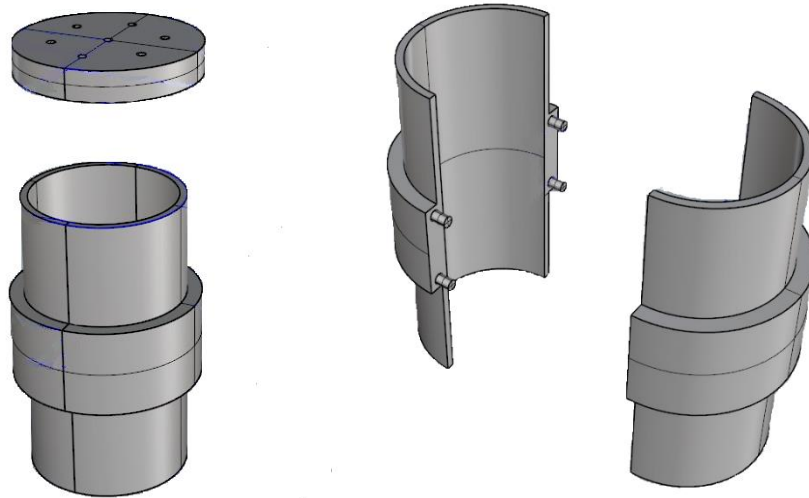
5.1.3 Temiz zemin numunelerinin hazırlanması

Etüvde 105 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilen kum zemin numuneleri her biri belirli ağırlıkta olacak şekilde tartılarak ayrılır. Hazırlanan bu numunelerin konsolidasyon sonrası, deneye başlamadan önce relatif sıkılıkları %45 ile %65 arasında değişmektedir. Doygun ve doymayan temiz zemin numuneleri üç eksenli basınç deney aletinin standart kalıbında hazırlanmış kuru yağmurlama yöntemiyle huni yardımıyla üç tabaka halinde koyularak hazırlanmış olup, doymayan numuneler elde etmek için konsolidasyon öncesi CO₂ gazı ve damıtık suyu geçirme işlemi yapılmıştır.

Doygun olmayan temiz kum numunelerinin kirlenmiş deney numuneleri ile aynı şartlar altında karşılaştırılması için CO₂ gazı ve damıtık suyu geçirme aşamaları uygulanmamıştır.

5.1.4 Kirlenmiş deney numunelerinin hazırlanması

Kum numunelerin muhafazası için daha önceden dinamik üç eksenli deney aletine uygun şekilde hazırlanmış olan 50 mm çapında ve 100 mm boyunda modifiye edilmiş çelik kalıplar kullanılmaktadır (Şekil 5.3). Bu kalıplar deney aletine numunenin örselenmeden konulması için ortadan dikey olarak iki parçaya ayrılabilen şekilde üretilmiştir. Bir adet altta ve bir adet üstte olmak üzere iki adet kapağı bulunmaktadır. Kapakların üzerinde suyun drenajına izin veren 1 mm çapında delikler bulunmaktadır. Bu kapaklara kendi çapında kesilen poroz kağıtlar yerleştirilerek numune hazırlama işlemi başlamaktadır.



Şekil 5. 3 : Modifiye Çelik Kalıp 3-D görünümü.

İlk önce çelik kalıplara iki üstte iki altta olmak üzere O-ringler geçirilir, ardından lateks membran gergin bir şekilde kalıbın içine yerleştirilir bu yerleştirme işleminde membranın gergin olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Daha sonra alt kapağa poroz kağıt yerleştirilerek membranı ve o-ringi geçirilmiş olan kalıp, kapağa oturtulur. Daha önceden hazırlanmış ve tartılmış olan kum numunesi aynı temiz zemin

numunelerinde olduğu gibi JGS 0520-2000 standardına uygun bir şekilde huni yardımı ile üç tabaka halinde kuru yağmurlama yöntemiyle kalıp içine yerleştirilir ve poroz kağıt konularak üst kapak kapatılır. Taşıma sırasında çelik kalıbın kapaklardan ayrılmaması için üstten alta lastikler geçirilerek kapaklar sağlamlaştırılır. Bu aşamadan sonra numuneleri kürlleme işlemine geçilir (Şekil 5.4).

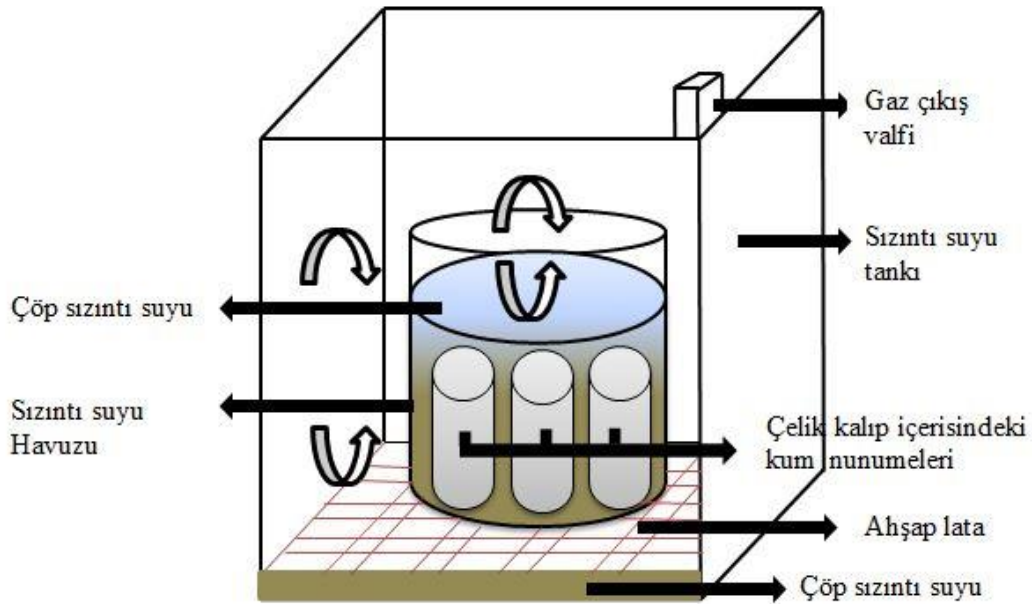


Şekil 5. 4 : Kirlenmiş numunelerin hazırlanma aşamaları.

5.1.5 Çöp sızıntı suyu ile kum deney numunelerinin kirlenmesi

Deney numunelerine Kemberburgaz-Odayeri düzenli katı atık tesisinden getirilen genç depo sızıntı suyu karıştırılarak kirlenme işlemi yapılmıştır. Numuneler hazırlanırken

çöp sızıntı suyu herhangi bir sıvı karıştırılmayarak %100 kür oranı korunmuştur. Zemin numuneleri şekil 5.5 teki şemada görüldüğü gibi kalıp üst seviyesini kapatacak şekilde üstü açık olan sızıntı suyu havuzuna batırılarak kürleme işlemi yapılmıştır. Bu şekilde numune içerisine drenaj deliklerinden giren sızıntı suyu, numunedeki hava boşlukları ile yer değiştirerek kum tanelerinin aralarından girerek kimyasal reaksiyonu başlatmaktadır. Sızıntı suyu tankı içerisinde bulunan sızıntı suyu havuzundan kürleme işleminin başlangıcı ile birlikte ortamdaki gaz oluşumu artışı gözlemlenmektedir. Özellikle oluşan metan gazının sıkışmaması için belli zaman aralıklarında gaz çıkış valfi açılarak ortamdaki sıkışan hava alınmaktadır. Ayrıca tankın üst kapağında yoğunlaşan sızıntı suları tekrar süzülerek ahşap latanın altında toplanmaktadır. Numuneler değişik kür sürelerine göre çöp sızıntı suyu içerisinde tutulduktan sonra dinamik üç eksenli deney sisteminde deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5. 5: Sızıntı suyu tankı şeması.

5.2 Deney Sistemi

5.2.1 Dinamik üç eksenli basınç deney sistemi

Deneyisel çalışmalarımda kullandığım dinamik üç eksenli deney sistemi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Zemin mekaniği Laboratuvarı içinde bulunan Japon “Seiken Inc” şirketi tarafından geliştirilmiş DTC 311 – 0094 modeli olup, İ.T.Ü-JICA projesi

(Japonya Uluslararası İş birliği Kuruluşu) kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi zemin dinamiği laboratuvarına getirilerek kullanılmak üzere bırakılmıştır.

Ölçüm ve yükleme birimi olarak iki ayrı parçadan oluşan deney sistemi aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır.

Bu bölümler üç eksenli deney aletinin üzerine entegre edilmiş hücre, aparatlar ve ölçüm sistemlerinden oluşmaktadır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de bu bölümler şematik olarak da gösterilmiştir.

- Üç eksenli hücre 2 ünite

Düşey yük kapasitesi : 500 kgf
Yanal yük kapasitesi : 10 kgf/cm²
Numune ebatları : ϕ 50 x 100 mmH , ϕ 60 x 120 mmH , ϕ 75 x 150 mmH (3 çeşit)

- Yatay yükleme aparatı 2 ünite

Dinamik yük kapasitesi : 200 kgf

Statik üç eksenli basınç sistemi

Elektrik gerilme kontrolü : 0.002 ~ 2 mm/dk

Yükleme kapasitesi : 500 kgf

Güç Kaynağı : 100 V AC (Dönüştürücülü)

- Hava-su ölçüm aparatı 2 ünite

Yanal yük ölçümü : 0 - 10 kgf/cm² (Hava basınç regülatörlü)

Ters basınç yük ölçümü : 0 - 10 kgf/cm² (Hava basınç regülatörlü)

Hacim değişim aparatı, Çift tüp tipli büret 25 ml

Havası alınmış su tankı, havası alınmış tip vakum 5 l

- Havalı sinüs yükleme aparatı DTC-161 kaset çalar kayıtcılı 1 ünite

Frekans aralığı : 0.001 ~ 2 Hz

Güç kaynağı : 100 V AC (Dönüştürücülü)

- Elektrik ölçüm aparatu

Dönüştürücüler

Düşey yükleme yük hücresi 200 kgf 2 adet

Düşey deplasman dönüştürücü $\pm 25\text{mm}$ 2 adet

Boşluk basıncı ölçümü 10 kgf/cm^2 2 adet

Küçük deplasman dönüştürücü $\pm 1\text{mm}$ 2 adet

Hacim aparatu 25 ml 2 adet

Değişken basınç dönüştürücülü çeşiti

Amplifikatör

Dijital voltmetreli dinamik gerilme yükseltici
12 ünite

- Kayıtçı

Termal kayıtçı

1 ünite

Güç kaynağı: 100 V tek fazlı

- Elektrikli kompresör 1 ünite

$8 \sim 9.9\text{ kgf/cm}^2$

380 V, 1.5 kw, 3 fazlı

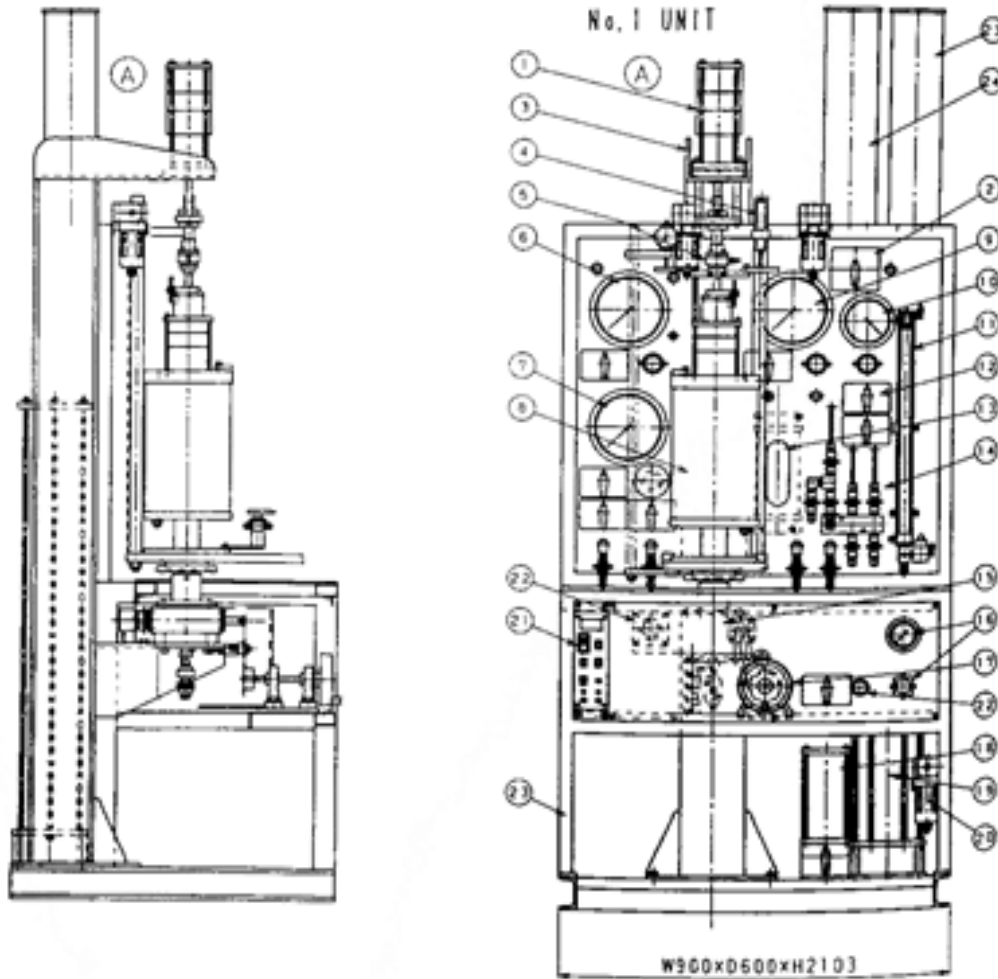
- Elektrikli vakum pompası 1 ünite

220 V, 0.4 kw, tek fazlı

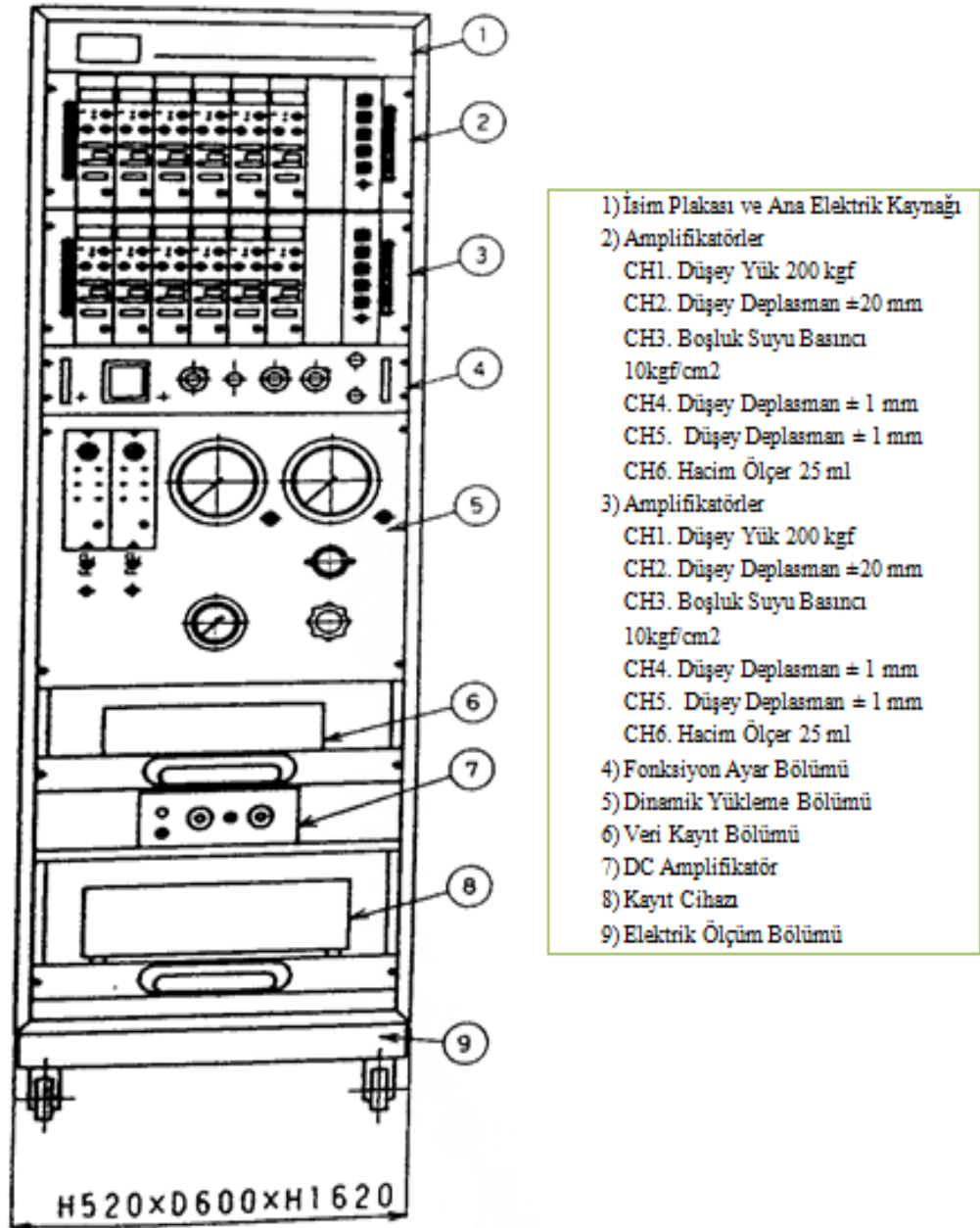
- Deney hazırlık aparatları

Kum ve kil zemin için kalıp, kesme kutusu, membran.

- | | |
|--|---|
| 1) Hava Yükleyci | 13) Üst Ters Basınç Tankı 1.5 lt |
| 2) Ana Gösterge Değişim Vanası | 14) Numune Su Giriş Sistemi |
| 3) Yükleme Çerçevesi | 15) Mekanik Kol 500 kgf Kapasite |
| 4) Düşey Deplasman Ölçer $\pm 20\text{mm}$ | 16) Ana Basınç Göstergesi & Basınç Regülatörü |
| 5) Yük Hücresi | 17) Manuel Kol |
| 6) Düşey Basınç Göstergesi $\phi 150.10\text{kgf/cm}^2$ | 18) Alt Ters Basınç Tankı 1.5 lt |
| 7) Çevre Basıncı Göstergesi $\phi 150.10\text{kgf/cm}^2$ | 19) Su Tankı 10 lt |
| 8) Üç Eksenli Hücre | 20) Hava Filtresi |
| 9) Ters Basınç Göstergesi $\phi 150.10\text{kgf/cm}^2$ | 21) Hız Kontrol Ünitesi |
| 10) Vakum Göstergesi $\phi 100.1\text{kgf/cm}^2$ | 22) Hava Kaydırma Regülatörü |
| 11) Çift Tüplü Büret 25ml | 23) Vakum Tankı 5 lt |
| 12) Açma-Kapama Vanası | 24) Havası Alınmış Su Tankı 5 lt |



Şekil 5. 6 : Yükleme birimi ve üç eksenli hücre.



Şekil 5. 7 : Elektrik ölçüm ünitesi.

5.2.2 Kalibrasyon

Deneysel çalışmalar yapıldığında ölçülen verilerin doğruluk derecesinin belirlenmesi için sistemlerin düzgün çalışmasının yanında alınan verilerin kontrol edilerek çalışmalarda kullanılması, çalışmanın sağlıklı şekilde yürümesi ve geçerlilik kazanması için gerekli bir işlemdir. Bu kontroller çeşitli veri alma tekniklerinin birbiri ile karşılaştırılmasıyla ve ölçüm cihazlarının çeşitli yollardan kontrolü ile sağlanabilir.

Dinamik üç eksenli deney aletinde kalibrasyonlar dijital panodaki deformasyon verilerinin karşılaştırılması ve panodaki değerlerin kontrolleri ile sağlanmaktadır. Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5. 8 : Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri.

Ölçüm ünitesindeki Power on düğmesi kaldırıldığında başlangıçta Att ve CAL.µε tuşlarında ışık yanar. Gain tuşu dijital voltmetre kalibrasyonu için kullanılır. Att tuşu 5 , 2 ve 1 olmak üzere üç kademedен oluşmaktadır. Kalibrasyonda hassaslık düzeyini gösterir. Ölçümü 2 ye basıldığında 2 kat hassas, 5’e basıldığında ise 5 kat hassaslaştırır. CAL.µε düğmesi giriş kalibrasyon anahtarıdır. Öncelikle Call on tuşuna basarak Gain ayar bölümünden ince tornavida yardımı ile saat yönüne ve saat yönünün tersine çevirerek voltmetredeki dijital saat “5.00” değerini gösterecek şekilde ayarlanır. Gain ayar bölümünü saat yönüne çevirdikçe dijital değer artmakta, saat yönünün tersine çevirdikçe azalmaktadır. Gain düğmesine eşlik eden Att değeri yapılan deneyin hassasiyetine göre 5 , 2 veya 1 den herhangi biri seçilir. Hangi değer seçilir ise ölçüm panosu üzerinde o değerın ışığı yanar. Ölçüm panosu üzerinde bir kat hassaslık için kırmızı renk, 2 kat hassaslık için sarı renk, 5 kat hassaslık için ise yeşil renk kullanılmıştır. Call on tuşundan “5.00” V değeri ayarlandıktan sonra, Call on tuşuna

tekrar basılarak tuş geri bırakılır ve daha sonra Auto tuşuna basılarak voltmetre ekranındaki değer otomatik olarak “0.00” değeri olacak şekilde sıfırlanır. Daha sonra Zero C ball düğmesi kullanılarak zero controller ayarı ile birlikte köprü direnci sıfır olacak şekilde sıfırlanır. Sıfırlama işlemi Zero C ball değeri yukarı ve aşağı konumda olmak üzere her iki konumda da sıfırlanarak tamamlanır. Son olarak ise Meas ayar bölümü kullanılarak başlangıç yük değerleri ayarlaması yapılır. Call on tuşundan “5.00” V ayarlanan yük hücresine karşılık gelen 200 kgf değeri atanmış ise Meas çıkış değeri de 200 kgf ye ayarlanmalıdır. Bunun için Meas ayar bölümünün altındaki referans tuşuna basılarak yine saat yönüne ve tersine olacak şekilde Meas hareket ettirilerek 200 değerine getirilir. Bu değere getirildikten sonra Meas ayar bölümünün altında bulunan referans tuşu tekrar kapatılır ve eğer dijital saat “0.00” değerinde değilse Auto tuşuna tekrar basılarak sıfırlama yapılır. Kalibrasyon bittikten sonra Call on tuşuna basılarak “5.00” değeri, Zero C ball tuşu hareket ettirilerek “0.00” değerleri ve Meas referans tuşuna basılarak 200 değerinin kontrolleri yapılarak kapatılır ve tekrar Auto tuşu ile sıfırlama yapılarak deney için kalibrasyon hazır hale gelir. Aynı işlemler deneyde kayıt alınması için kullanılacak kanalların tamamı için tekrarlanarak deneye başlanır.

5.2.3 Data Aktarımı

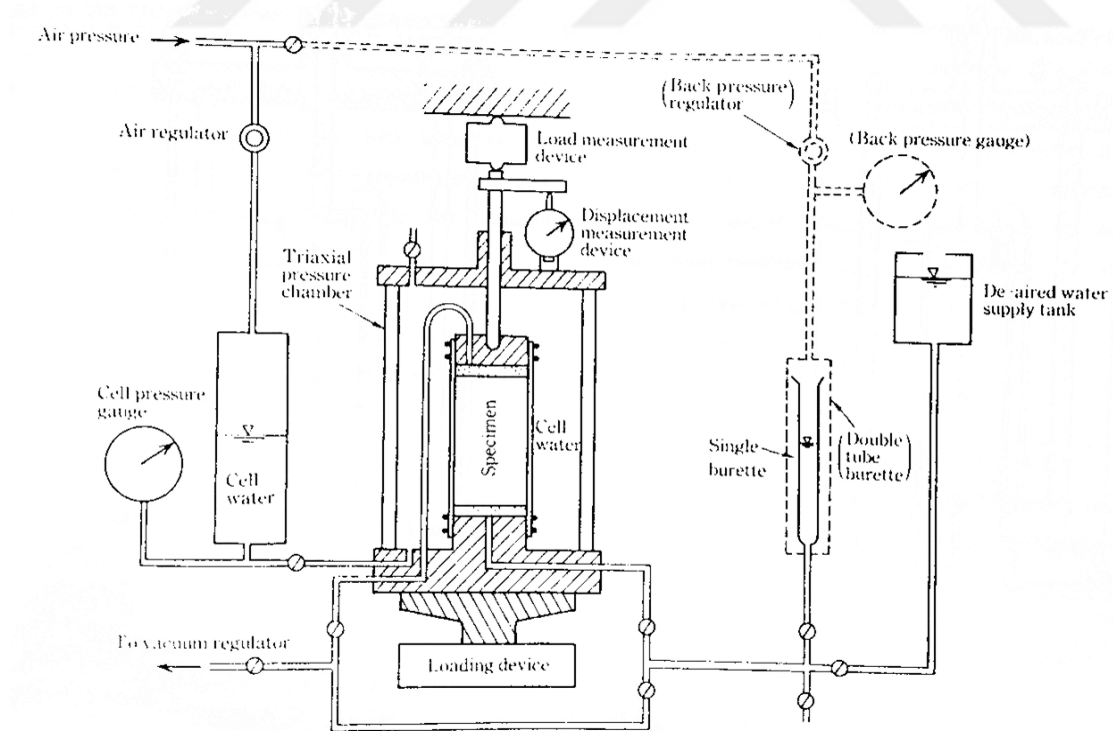
Dinamik ve statik deneylerin datalarının bilgisayara aktarımında Virtual bench yazılımı kullanılmaktadır. Bilgisayara data aktarımı dinamik üç eksenli deney aletinin veri çıkış ünitesinden çıkan kablolar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Program log dosyası olarak maksimum 6 kanal olacak şekilde kayıt tutmaktadır. Bu kanallar düşey yük ölçer, büyük düşey deplasman ölçer, boşluk suyu basıncı, hacim değişimi ve küçük düşey deplasman ölçerlerdir. Program dataların aktarımı yaparken saniyede kaç veri alınacağı ayarı yapmaya imkan vermektedir. Kısa süreli deneylerde daha fazla data almak adına veri aralığı küçültülebilir. Ayrıca yazılımın düşük deformasyon seviyelerinde deney yaparken kullanılmak için tasarlanmış olan filtrasyon ayarı da mevcuttur. Aktarılan log formatındaki dataların bilgisayarlarda ofis programları vasıtasıyla gerekli düzeltmeleri yapılır. Bu datalardan daha sonra istenilen grafik çizimleri elde edilir.

5.3 Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi

5.3.1 Deneyin amacı

Dinamik üç eksenli basınç deneyi, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarını sinüs dalgası şeklinde tekrarlı yükler vererek belirlenmesini sağlayan deney sistemidir (Şekil 5.9). Konsolidasyonsuz drenajsız (UU), konsolidasyonlu drenajsız (CU) ve konsolidasyonlu drenajlı (CD) olarak stres seviyeleri ve drenaj durumlarına göre üç farklı şekilde yapılmaktadır.

Konsolidasyonlu drenajsız (CU) olarak gerçekleştirilen deneylerde numuneler izotropik olarak 100 kPa çevre basıncında konsolide edildikten sonra drenajlar kapalı şekilde yük kontrollü deneylere tabi tutulmuştur. Drenajsız olarak yapılan bu deneylerdeki amaç deprem veya diğer dinamik yükleme durumunda zeminlerin sıvılaşma davranışlarının incelenmesidir. Dinamik yükler altında drene olamayan gevşek suya doymun durumdaki zeminde boşluk suyu basınçları hızla artmaya başlayarak, efektif gerilme azalmakta bunun sonucu olarak da sıvılaşma davranışları görülmektedir.



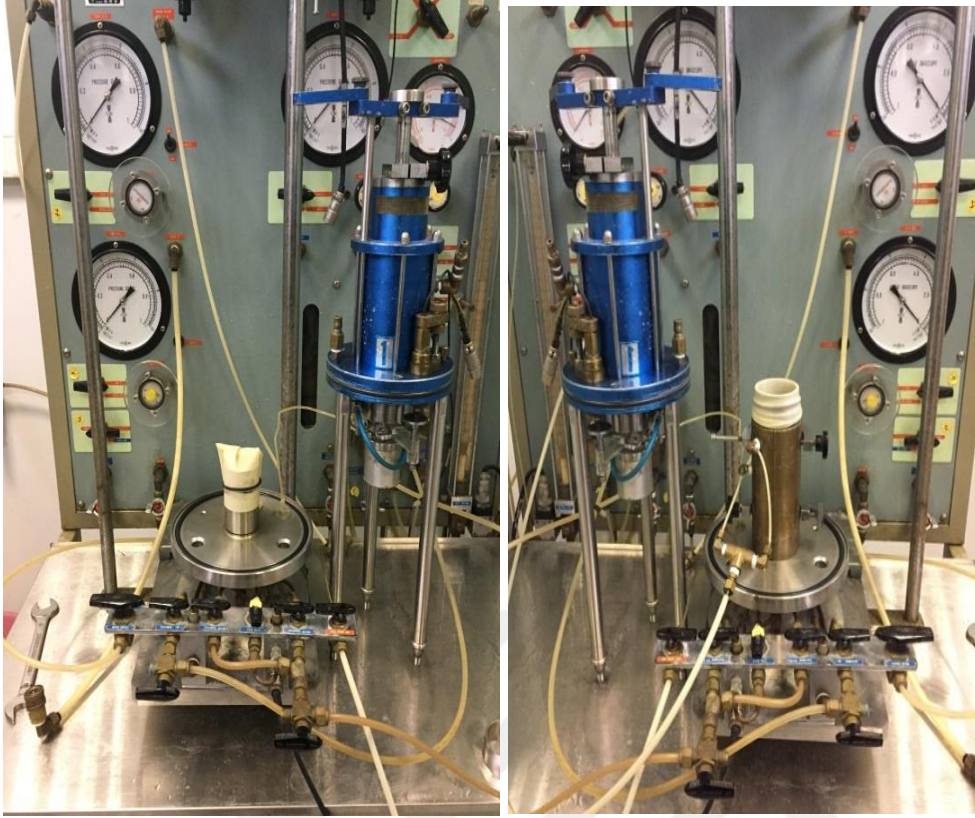
Şekil 5. 9 : Üç eksenli deney sistemi (CU) tipi diyagramı.

5.3.2 Deneyin yapılışı

5.3.2.1 Temiz zemin numunelerinde deney sistemi kurulumu ve konsolidasyon süreci

Önceden belirlenmiş sıklıktaki kum numunesi 24 saat etüvde bekletildikten sonra deney hazırlık işlemlerine başlanır.

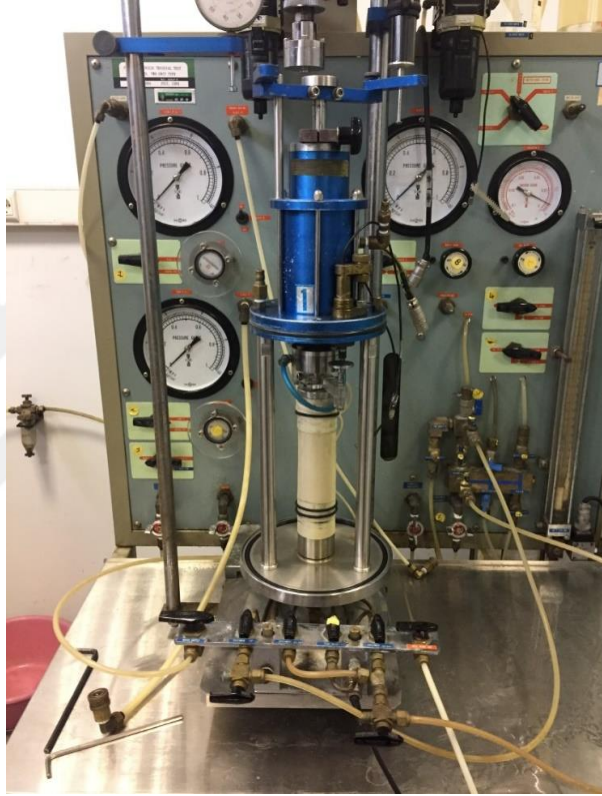
1. Kum zemin numuneleri ile deneyler yapılırken kalıbın alt başlığı takılabilmesi için deney aletinin üç eksenli hücre kısmı vidalar yardımı ile sökülerek alt kısmından ayrılır. Bu işlem ayakta kalabilen kohezyonlu zemin numunelerinde yapılmamaktadır.
2. Üç eksenli deney aletinin, üzerinde poroz taşların bulunduğu alt ve üst başlıklar ve su kanalları su ile doyurularak içindeki hava kabarcıklarından arındırılması sağlanır. Bu işlem bütetin içine su almak koşuluyla numunenin ters basınç vanaları olan alt ve üst başlık vanalarının açılması ile gerçekleştirilir. Bundan sonra ilk işlem olarak 50 mm çapındaki Ele marka 25-5441 model lateks membran özel aparat yardımıyla alt başlığa takılır ve o-ring geçirilir. Dinamik üç eksenli deney sistemine ait olan özel pirinç kalıp lateks membranın dışından takılır ve alt ve üst kısmından işkence yardımıyla sıkıtılır. Pirinç kalıbın üzerinde iki adet delik bulunmaktadır. Bu deliklerden vakum verilerek membran gerdirilir. Böylelikle içerisine konulacak numunenin kalıbın içine tam olarak yerleşmesi sağlanır. 50 mm çapında kesilmiş olan poroz kağıt alt başlığa yerleştirildikten sonra numune koyma işlemine geçilir (Şekil 5.10).



Şekil 5. 10 : Dinamik üç eksenli deney aletine membranın yerleştirilmesi ve kalıbın kurulması.

3. Daha önceden hazırlanmış ve tartılmış olan kum numunesi etüvde 24 saat kurutulduktan sonra numune birkaç yöntemden biri olan ASTM D5311 ve JGS 0520-200 standartlarında da tanımlanan kuru yağmurlama yöntemiyle kalıp içine yerleştirilir. Numune yerleştirildikten sonra en başında sökülen üç eksenli hücre üst kısmı tekrar yerine takılarak vida yardımı ile sıkılır. Üst başlığa poroz kağıt yerleştirildikten sonra gevşetme mandalı yardımı ile gevşetilen üst başlık numunenin üzerine degecek şekilde konumlandırılarak gevşetme mandalı tekrar sıkılır. Burada önemli olan üst başlığın ve beraberinde bulunan yük hücresinin numuneye ağırlık vermeden degecek bir şekilde bırakılmasını sağlamak ve numunenin gerilme oluşumuna maruz kalmamasıdır. Membranın hazırlama kalıbında bulunan üst kısmı yaklaştırma işlemi bitiminde üst başlığa geçirilerek o-ring yardımı ile sıkılır. Bu aşamada son olarak pirinç kalıp sökülmeden önce kalıp içerisine verilen vakumun numunenin içerisinden geçirilerek kohezyonsuz kum numunesinin vakum yardımı ile ayakta kalması sağlanır. Vakum seviyesi ayarlanarak alt ve üst başlık vanaları açılır ve ardından vakum vanasının açılması ile birlikte numunenin içerisine çok düşük

seviyede ($\sim 10\text{kPa}$) vakum verilir. İşkence yardımı ile sıkıştırılan pirinç kalıp gevşetilerek kalıp sökülür. Vakum yardımı ile ayakta kalan 50 mm çapında 100 mm boyundaki numune membran içerisinde deneye hazır hale gelmiştir (Şekil 5.11). Numunenin içerisine vakum uygulaması yapılması ile temiz suya doymun kum numunelerin içerisinde CO_2 gazı ve arkasından damıtık su geçirilerek $B=\%95$ civarında doymunluk sağlanır. Bu aşamada hücre kapatılmadan önce numunenin üç ayrı yerinden çap ve boy ölçümleri yapılır.



Şekil 5. 11 : Dinamik üç eksenli deney aletinde kum numunenin vakum yardımıyla ayakta tutulması.

4. Numunenin yerleştirme işlemi bittikten sonra silindir üç eksenli basınç hücresi kapatılarak hazneye su alma işlemine geçilir. Silindir hücre konulur hücreyi tutan paslanmaz çelik kapak kapatılır ve vanalar yardımı ile sıkıca sıkılır. Çevre basıncı vanaları vasıtası ile arkada bulunan hücre depo suyuna basınç verilerek depodaki suyun üç eksenli haznenin içine alınması sağlanır. Bu aşamada 10 kPa lık bir basınç uygulanması suyun hazneye girmesi için yeterli olmaktadır. Su hazne üzerindeki su seviye göstergesine geldiğinde basınç vanası kapatılarak işlem tamamlanır (Şekil 5.12).



Şekil 5. 12 : Dinamik üç eksenli deney aletinde kum numunenin çevre basıncı yardımıyla ayakta tutulması.

5. Hücreye su alma işlemi bittikten sonra bu aşamaya kadar vakum ile dik duran kum numunesinin üzerindeki vakum yavaş bir şekilde kapatılırken aynı anda çevre basınç vanası açılarak numunenin çevre basıncı ile ayakta kalması sağlanır. Bu işleme başlamadan önce 5.2.2 Kalibrasyon bölümünde anlatılan kalibrasyon ayarları yapılır. Daha sonra çevre basıncı vanası 0.10 kg/cm^2 konumuna doğru yavaşça arttırılırken vakum vanası aynı hızda yavaş bir şekilde kapatılır. Böylelikle serbest konumdaki numunemiz artık 0.10 kg/cm^2 çevre basıncı etkisinde ayakta durmaktadır.
6. Bu aşamada numune doyurma işlemine geçilmektedir. Değişik doyurma metotlarının olduğu üç eksenli deney sisteminde kullandığımız kum numunelerini tam doyurmak için kuru haldeki numuneden önce vakum yardımıyla karbondioksit (CO_2) gazı geçiriyoruz. Bu işlem bittikten sonra ise su geçirme işlemi yaptıktan sonra numune doyurma işlemini tamamlamış oluyoruz.

Katı sıvı ve gaz olarak üç fazın bir arada bulunduğu kum numunelerimizi boşluk basıncı değeri olan $B \geq 95$ olacak duruma geldiği zaman doygunluk işlemi tamamlanmış olmaktadır. Bu durumda numune yukarıda belirttiğim gibi üç fazlı durumdan, katı ve sıvı fazı olmak üzere iki fazlı duruma geçiş yapar ve böylelikle konsolidasyon işlemi tamamlanmış olur. Bu nedenle konsolidasyon işleminin önemli bir parçası olan doyurma işlemi B değerinin $B \geq 95$ olması için önemlidir.

Karbondioksit gazı numunelerin hızlı doygunluğa ulaşması için önemlidir. Numunenin içerisine vakum vasıtası ile alınan karbondioksit gazı numunede bulunan havayı sürükleyerek havanın dışarı atılmasını sağlamaktadır. Bu işlemi yaparken numuneye verilen karbondioksit gazının düşük basınçta geçirilmesi gerekmektedir. Hassas şekilde karbondioksit geçirme işlemi tamamlandıktan sonra numuneden damıtık su geçirme işlemine geçilir. Bu işlemde üstte bulunan havası alınmış tankta bulunan damıtık su numunenin alt başlığından girerek içinden geçer ve sonra üst başlıktan çıkarak atmosfere açılan vana sayesinde dışarı atılır. Yükseklik farkından dolayı kendi cazibesi ile veya vakum yoluyla yaptığımız bu aşamada büretteki su seviyesi azaldıkça bürete su eklenerek su geçişinin devamlılığı sağlanır. Su geçirme işlemi yeterli süre tamamlandıktan sonra konsolidasyon aşamasına geçilir.

7. Konsolidasyon işlemine başlamadan önce büretteki su miktarına bakılır ve seviyesi not edilir. Analog deformasyon saati de not edildikten sonra ters basınç vanası yavaş bir şekilde ve kademeli olarak artırılarak 3 kg/cm^2 geldiğinde durulur. Bu durumda ters basınç göstergesinde takip edilen basınç durumu daha hassas bir şekilde ana gösterge değişim vanası ters basınca getirilerek ana göstergedeki de bakılarak teyit edilir. Ters basınç verme işlemi sırasında denge (bias) konumunda olan deney sisteminde eş zamanlı olarak çevre basıncıda artar. Ters basınç verme işlemi bitirildiğinde üç eksenli deney aletinin içerisinde bulunan numunede ters basınç 3 kg/cm^2 , çevre basıncı ise 3.3 kg/cm^2 seviyesine ulaşmıştır ve böylelikle başlangıçtaki efektif basınç aynı şekilde korunmuştur. Numune denge durumuna geldikten sonra çevre basıncı istenilen konsolidasyon seviyesine getirilerek drenaj açık şekilde konsolidasyon işlemine başlanır. Bu çalışma kapsamında numuneler 100 kPa

basınçta konsolidasyona bırakılmış numunelerde çevre basınç vanası yavaş yavaş 4 kg/cm² getirilerek efektif basıncın 1 kg/cm² olması sağlanmıştır.

5.3.2.2 Numunede B kontrol

Boşluk suyu basıncı parametresi Skempton-B değeri ile ifade edilmekte olup, bu parametre aşağıdaki 5.1. bağıntısı ile bulunmaktadır.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (5.1)$$

Bu bağıntıda;

Δu : Drenajlar kapalı iken numunenin hücre basıncı değişimine karşılık gelen boşluk suyu basıncındaki değişim.

$\Delta \sigma_3$: Hücre basıncı değişimi.

Dinamik üç eksenli deney sisteminde kurduğumuz kum numunelerinde B kontrolüne başlamak için ilk olarak gösterge panelinde boşluk suyu basıncı değerini gösteren CH3 kanalı sıfırlanır. Daha sonra alt ve üst başlık vanaları kapalı konuma getirilerek çevre ve ters basınç simultane olarak 1 kg/cm² artırılır. Uygulanan çevre basıncı belirli bir süre bekledikten sonra boşluk suyu basıncının artması izlenir ve ulaştığı değer not edilir. Daha sonra drenajlar açılır ve açıldıktan sonra verilen basınç değeri CH3 kanalında okunur. Elektronik olarak okunan boşluk suyu basıncı değeri uygulanan basınca bölünerek B değeri elde edilir. Bu değer 0.95 ve üzeri ise numune doygundur. Numunelerde B kontrol aşaması tamamlandıktan sonra elektronik ölçüm değerleri tekrar not edildikten sonra dinamik deney aşamasına geçilir.

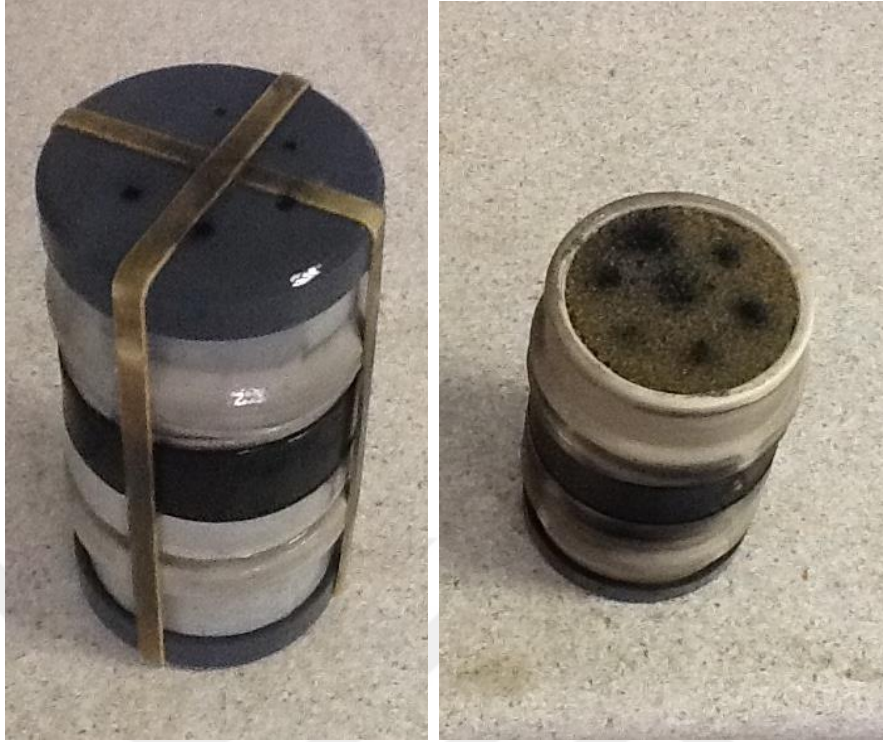
5.3.2.3 Çöp sızıntı suyu ile kirletilmiş zemin numunelerinde deney sistemi

kurulumu ve konsolidasyon süreci

Çöp sızıntı suyu ile kirletilmiş zemin numunelerinin hazırlanması aşamasında standart pirinç kalıp modifiye edilerek yeni geliştirilen çelik kalıp kullanılmıştır. Standart kalıp ile aynı ölçülere sahip olan ve ikiye ayrılabilen modifiye kalıp sayesinde numuneler

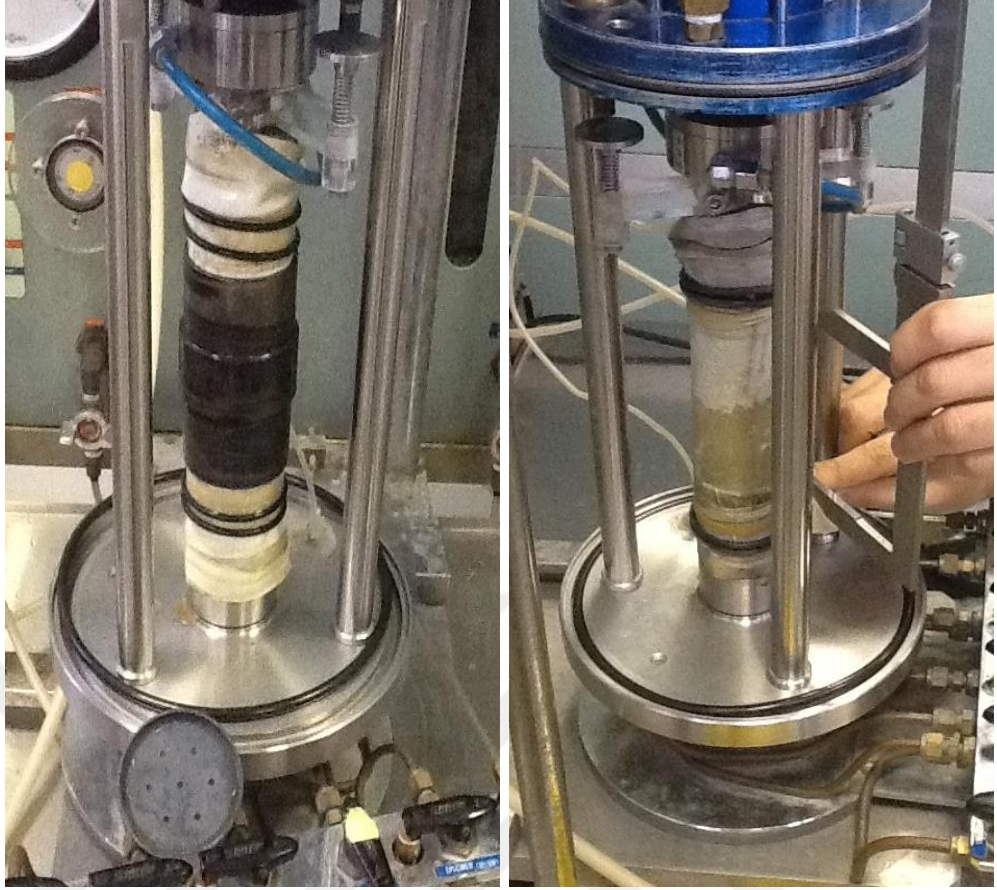
deney aletine üst başlık sökülmeden yerleştirebilmektedir. Çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numuneler ile deney yaparken aşağıdaki aşamalardan geçmektedir.

1. Numuneler kolayca ikiye ayrılan modifiye edilmiş çelik kalıpların içinde membranlı bir şekilde numune hazırlama bölümünde anlatıldığı şekilde kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış ve çöp sızıntı suyu ile dolu kür havuzuna daldırılarak seçilen kür süreleri sonunda kür havuzundan çıkarılmıştır (Şekil 5.13). Bu sayede dinamik üç eksenli deney sistemine konulan numunelerde herhangi bir örselenme olmamaktadır. Belirlenen sürelerde sızıntı suyunda bekletilmiş olan numuneler deney aletine konulmadan önce modifiye çelik kalıbın üzerinde delikleri bulunan plastik üst başlığı çıkarılır ve numune dinamik üç eksenli deney aletine kalıp ile birlikte yerleştirilir. Deney aletine yerleştirildikten sonra gevşetme mandalı yardımı ile üst başlık gevşetilerek numunenin üzerine degecek şekilde konumlandırılır ve gevşetme mandalı tekrar sıkılır. Kalıbın üzerine kıvrılmış şekilde duran membran üç eksenli deney aletinin alt ve üst başlığına geçirildikten sonra çelik kalıbın üst başlığında ve alt başlığında numune hazırlanırken konulmuş olan o-ringler alete geçirilir. Burada o-ringlerin elastikiyet kaybına dikkat edilir. Eğer uzun süre çöp sızıntı suyu içerisinde kalan o- ringlerde elastikiyet kaybı olmuş ise numune alt ve üst kısımlarından lastik veya plastik kelepçe yardımıyla ekstra sıkılır. Bu işlem sonucunda kirlenmiş numuneler dinamik üç eksenli deney aletine yerleştirilerek deneyler yapılmıştır.



Şekil 5. 13 : Sızıntı suyu havuzundan çıkarılan çelik kalıptaki kum numuneleri.

2. Bu aşamada artık temiz kum zemin numunelere uygulandığı gibi numuneye vakum verilir. Düşük vakum seviyesi (~ 10 kPa) ayarlanarak alt ve üst başlık vanaları açılır ve vakum ile birlikte numune dik durur. Vakum ile dik duran numune modifiye çelik kalıp sökölerek serbest bırakılır. İki parçadan oluşan çelik kalıp birleşim yerinden ayrılarak dikkatlice çıkartılır. Şekil 5.14 de kirlenmiş kum numune görölmektedir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken husus vakumun mümkün olduğu kadar en düşük seviyede ve kısa süreli verilerek kirlenmiş numune içerisindeki çöp suyunun oluşturduğu kimyasal değişim yanında organik malzemelerin ve atıkların yerleşim durumunu ve boşluklardaki metan gazını koruyarak yapının bozulmamasını sağlamaktır.
3. Çelik kalıptan çıkarılan numunenin çap ve boy ölçümleri üç ayrı yerinden yapılarak silindir hücre konulur. Hücreyi tutan paslanmaz çelik kapak kapatılır ve vanalar yardımı ile sıkıca sıkılır. Çevre basıncı vanaları vasıtası ile arkada bulunan hücre depo suyuna basınç verilerek depodaki suyun üç eksenli haznenin içene alınması sağlanır. Su hazne üzerindeki su seviye göstergesine geldiğinde basınç vanası kapatılarak işlem tamamlanır.



Şekil 5. 14 : Numunenin vakum vasıtasıyla ayakta durması.

4. Hücreye su alma işlemi bittikten sonra bu aşamaya kadar vakum ile ayakta duran kum numunesinin vakum kapatılarak çevre basıncı ile ayakta kalması sağlanır. Bu işleme başlamadan kalibrasyon ayarları yapılır. Kalibrasyon ayarlar bittikten sonra 0.10 kg/cm^2 çevre basıncı verilerek numunenin üzerindeki vakum yavaş yavaş alınarak numune çevre basıncı ile ayakta tutulur.
5. Kirlenmiş kum numunelerde yapılarının bozulmaması için karbondioksit (CO_2) gazı verme ve damıtık su ile doyurma işlemleri yapılmamıştır. Bunun nedeni ise numunemizin çöp sızıntı suyu içeren numunemizdeki yapı etkisinin bozulmamasıdır. Üç eksenli deney aletinin kanallarında kalabilecek havanın çıkarılması için kanallardan çok kısa süreliğine su geçirilmiştir.

Bu aşamadan sonra deney sistemi kurulumu ve konsolidasyon süreci temiz kum zemin numunelerinde olduğu şekilde devam etmektedir. Bir gün konsolidasyonda bekletilen

kirlenmiş numunelerde ertesi gün büret değerleri not alınarak B kontrol yapıp deney aşamasına geçilir.

5.3.3 Deney Aşaması

Deney aşamasına geçildiğinde daha önceden kalibrasyonu yapılan 1, 2, 3, 4 no' lu data hatları üzerindeki auto tuşuna basarak kanallardaki ölçüm değerleri sıfırlanır. Sol el ile deney aletinin yükleme birimi panelinde bulunan düşey basınç vanası yavaşça dışarı atma (egzoz) konumuna, aynı anda sağ el ile güç panosundaki statik dial düğmesi saat yönünde çevrilerek düşey yükleme pistonunun numune üzerine yavaşça değmesi sağlanır. Böylece düşey yük pistonu aktarılır. Bu işlem eğer hassas bir şekilde yapılamaz ise düşey yük pistonu hızla numuneye düşey yük uygulayarak numuneyi örseler. Bu durumda kurulum aşamasının tekrarlanması gerekmektedir. Bu nedenle bu aşamada dikkatli davranmak ve numunede gap sensörler tarafından ölçülen boy değişiminin olmamasını özen göstermek gereklidir. Bu işlemlerin ardından önce en büyük elastisite modülünün ölçüleceği E_{maks} değeri için güç panosundaki yük değeri ve frekans değeri belirlenir. Daha sonra bilgisayarda bulunan data kaydedici program açılarak veri alma sıklığı ve hassasiyeti gibi ayarlar yapılır. Bu çalışmada E_{maks} değeri ölçümü yaparken numunelere çok düşük gerilme seviyeleri uygulanır. Burada önemli olan nokta numunede boşluk suyu basıncı oluşturmada elastik seviyelerde kalarak deneyi tamamlamaktır. Düşük gerilme altında oluşan yükler gap sensörler yardımıyla kaydedilerek en büyük elastisite modülü hesaplanır. Bu değer elastik deformasyonların olduğu $\epsilon=10^{-6}$ - 10^{-5} seviyesinde kalmaktadır.

En büyük elastisite modülü hesaplaması bitirildikten sonra dinamik deneye geçilir. Önce numunenin denge konumuna gelmesi için bir süre beklenir. Bu arada Virtual Bench Programından data kaydedici Logger açılır. Yine en büyük elastisite modülü hesabının başlangıcında olduğu gibi veri alma sıklığı ve hassasiyet ayarları yapılır, dosya adı oluşturulur ve dinamik deneye geçilir.

Bu çalışmada Konsolidasyonlu Drenajsız (CU) dinamik deneyler yapıldığı için ilk olarak alt ve üst başlık drenaj vanaları kapatılır. Deneyde hedeflenen gerilme seviye belirlenerek güç panelindeki dinamik çevrim butonu ayarlanır. Bu çalışmada gerilme kontrollü (sabit gerilme genlikli), göçme deformasyon seviyesi ($\epsilon=\pm\%2.5$) olacak şekilde hedeflenen deneyler yapılmıştır. Virtual Bench Programındaki kayıtçı

saniyede beş adet data olacak şekilde 0.2 sn'de bir data kayıt etmeye ayarlanmıştır. Virtual Bench programı ile aynı anda dinamik üç eksenli deney aletinin güç panosundaki start tuşuna basılarak deneye başlanır. Deney dataları hem yazılım programından hem de deney aletinin elektriksel ölçüm ünitesindeki 1, 2, 3, 4 no' lu data hatlarında takip edilerek hedeflenen deformasyon seviyesine geldiği zaman manuel olarak bitirilir. Deney bitirildikten sonra drenajlar açılmadan büret seviyeleri ve 1, 2, 3, 4 no' lu data hatlarındaki değerler not edilir. Aynı zamanda düşey deformasyon değeri düşey yük ölçerdeki manuel saat okunarak teyit edilerek deney sonlandırılır. Deney bitirildikten sonra önce kapalı olan alt ve üst başlık drenaj vanaları açılır. Ters basınç yavaş bir şekilde düşürülerek sıfır konumuna getirilir. Daha sonra çevre basıncı tekrar 0.30 kg/cm^2 değerine getirilerek hücre içindeki su basınç yardımı ile boşaltılır. Çevre basıncı sıfırlanarak üç eksenli deney hücresindeki hava boşaltılır. Data hatları bağlantıları ve son olarak ise hücre, vida yerlerinden sökülerek içerisindeki numune çıkartılır.

5.4 Sonuçlar

Bu bölümde Akpınar köyü sülün ocağından temin edilen kum numunesi ile Kemberburgaz düzenli katı atık depo tesisinden getirilen çöp sızıntı suyu numunelerinin özelliklerine yer verilmiştir. Temiz kum numuneleri ile kirlenmiş kum numunelerin deney öncesi hazırlık aşamaları ve kirlenmiş numunelerin kürlenmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Dinamik üç eksenli deney sisteminin çalışma prensibi maddeler halinde anlatılmış olup, yine bu deney aletinde kurulan temiz ve çöp sızıntı suyu ile kirlenilmiş kum numunelerinin kuruluş aşamasından dinamik deneylere kadar geçen süreçten bahsedilmiştir.



6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1 Giriş

Kumların dinamik davranışları ile ilgili çalışmalar geçmişte birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır. Doygun ve kısmi doymuş kum zeminler ile ilgili yapılan bu çalışmalarda laboratuvar ortamında hazırlanan veya araziden alınan temiz kum zeminler kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında İTÜ inşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında bulunan ve Japon “Seiken Inc” şirketi tarafından geliştirilen DTC 311 – 0094 model dinamik üç eksenli deney sistemi ile temiz ve Kemerburgaz katı atık depolama tesisinden temin edilen çöp sızıntı suyu ile kirletilmiş kum zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır.

İlk grup deneyler temiz kum zeminler üzerinde doymuş ve kısmi doymuş olarak iki farklı şekilde yapılmıştır. İlk olarak doymuş kabul edilen doymuşluk değeri $B \geq 95$ olan temiz kum zemin numuneleri incelenmiştir. Bu numunelerden kurulum aşamasında vakum vasıtasıyla önce CO₂ gazı geçirilmiş ve daha sonra damıtık su geçirilerek doyurma işlemleri yapıldıktan sonra konsolidasyon basıncı uygulanmıştır.

Konsolidasyon sonrası doymuş hale getirilen temiz kum numunelerine farklı gerilme seviyelerinde gerilme kontrollü olarak dinamik yükler uygulanmıştır. Bu deneylerde göçme kriteri olarak eksenel birim deformasyon $\epsilon = \pm 2.5\%$ olarak belirlenmiştir.

Daha sonra doymuşluk seviyesi daha düşük olan kısmi doymuş temiz zeminlerin deneylerine geçilmiştir. Farklı dinamik gerilme oranları seçilerek yapılan deneylerde doymuş zeminlerdeki gibi aynı göçme kriteri esas alınmıştır. Yapılan dinamik üç eksenli deneylerde en büyük elastisite modülü, gerilme-şekil değiştirme davranışları, boşluksuyu basıncı değişimleri ve sıvılaşma potansiyelleri incelenmiştir.

İkinci grup deneyler çöp sızıntı suyunda bekletilmiş kirletilmiş kum zeminler üzerinde yapılmıştır. %100 oranında çöp sızıntı suyunda bekletilen numuneler kür süresi (gün)

sonunda sızıntı havuzundan çıkarılarak deneylere tabi tutulmuştur. Kür süresinin etkisinin incelenmesi için farklı sürelerde kirlenmeye bırakılan numuneler kullanılmış ve kirliliğin kum numuneler üzerindeki dinamik davranışa etkisi incelenmiştir. Çöp sızıntı suyu ile kirlenilmiş numuneler zemin yapısının bozulmaması vakum altında CO₂ gazı ve damıtık su geçirilmediği için kısmi doymun numuneler elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde dinamik üç eksenli basınç deney aletinde yapılan gerilme kontrollü deneyler sonunda, sızıntı suyuna maruz kalan numunelerin dinamik yükler altındaki davranışları, gerilme-şekil değiştirme davranışları, boşluk suyu basıncı değişimleri, sıvılaşma dirençleri gibi parametreler incelenmiştir. Deney öncesi sıklık ve doymunluk değerleri hesaplanan bu deneyler değişik kür sürelerinde yapılarak hem kendi aralarındaki ilişkileri hem de temiz zeminlerle olan ilişkileri incelenerek grafikler yorumlanmıştır.

6.2 Temiz Kum Zemin Deneyleri ve İncelenmesi

Temiz zemin numuneleri ile yapılan deneyler Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi doymunluk (skempton-B) değerleri büyükten küçüğe olacak şekilde gösterilmiştir.

Numunelerimizin konsolidasyon sonrası relatif sıklıkları hesaplandıktan sonra, dinamik üç eksenli deney aletinde değişik B değerlerindeki doymunluklarda farklı dinamik gerilme oranlarında deneylere tabi tutulmuştur. 30 kPa ve genel olarak 100 kPa olmak üzere iki farklı konsolidasyon basıncı uygulanmıştır. Deney aşamasına geçildiğinde ilk olarak doymunluğun tekrarlı yükler altındaki temiz zeminlerin davranışlarına etkisi incelenmiştir.

Çizelge 6. 1 : Temiz zemin numuneleri deney tablosu.

Deney No	Kür Oranı	D.G.O. $\pm\sigma_d/2\sigma_c$	N $\varepsilon=\pm 2.5$	N $\varepsilon=\pm 0.5$	r_u $\varepsilon=\pm 2.5$	Kür Süresi	Dr (%)	B	σ_c
1	0	0.34	-	-	-	0	57	0.97	30
2	0	0.34	-	-	-	0	51	0.97	30
3	0	0.55	10	4	0.30	0	56	0.97	30
5	0	0.48	28	23	0.29	0	55	0.97	30
6	0	0.44	-	-	-	0	65	0.97	30
4	0	0.48	43	37	0.30	0	60	0.95	30
24	0	0.46	73	71	1.00	0	60	0.95	30
7	0	0.44	-	-	-	0	52	0.94	30
10	0	0.50	54	48	0.30	0	53	0.84	30

Çizelge 6.1 (devam) Temiz zemin numuneleri deney tablosu.

9	0	0.50	94	88	0.28	0	58	0.60	30
8	0	0.47	-	-	-	0	58	0.56	30
39	0	0.31	6	3	0.96	0	55	1.00	100
48	0	0.30	13	10	0.92	0	55	0.98	100
56	0	0.28	31	26	1.00	0	52	0.97	100
95	0	0.23	-	-	-	0	51	0.97	100
97	0	0.33	4	2	1.00	0	50	0.96	100
41	0	0.31	19	12	0.99	0	58	0.96	100
47	0	0.30	16	11	0.98	0	50	0.96	100
54	0	0.30	17	12	1.00	0	51	0.96	100
37	0	0.28	28	23	0.94	0	50	0.96	100
94	0	0.28	31	28	1.00	0	51	0.96	100
49	0	0.25	68	61	0.97	0	55	0.96	100
45	0	0.30	19	13	0.99	0	55	0.95	100
43	0	0.30	20	13	0.99	0	55	0.95	100
93	0	0.26	109	100	1.00	0	51	0.95	100
26	0	0.31	28	24	1.00	0	58	0.94	100
17	0	0.28	-	-	-	0	74	0.93	100
40	0	0.28	32	24	0.93	0	57	0.93	100
44	0	0.30	18	10	0.99	0	55	0.92	100
14	0	0.28	31	26	1.00	0	55	0.92	100
57	0	0.30	39	34	1.00	0	51	0.84	100
46	0	0.30	20	13	0.98	0	61	0.80	100
67	0	0.30	19	12	0.98	0	47	0.78	100
55	0	0.28	43	38	1.00	0	51	0.76	100
36	0	0.28	43	37	0.95	0	50	0.76	100
35	0	0.30	29	21	1.00	0	50	0.74	100
52	0	0.30	52	42	0.99	0	50	0.72	100
19	0	0.28	190	175	1.00	0	65	0.70	100
50	0	0.25	93	86	1.00	0	61	0.70	100
68	0	0.30	43	37	1.00	0	51	0.68	100
16	0	0.28	63	55	1.00	0	57	0.64	100
20	0	0.28	-	-	-	0	73	0.61	100
21	0	0.32	31	13	1.00	0	73	0.60	100
38	0	0.28	77	68	0.93	0	57	0.60	100
59	0	0.30	18	8	0.92	0	54	0.58	100
42	0	0.30	17	11	0.99	0	58	0.58	100
18	0	0.28	82	76	1.00	0	57	0.58	100
53	0	0.30	92	82	1.00	0	57	0.52	100
13	0	0.28	98	91	1.00	0	60	0.52	100
92	0	0.34	16	11	1.00	0	60	0.50	100
22	0	0.28	94	85	1.00	0	51	0.50	100
15	0	0.26	304	293	1.00	0	55	0.50	100
11	0	0.14	-	-	-	0	49	0.50	100
96	0	0.33	30	23	1.00	0	48	0.49	100
66	0	0.30	212	196	1.00	0	57	0.47	100

Çizelge 6.1 (devam) Temiz zemin numuneleri deney tablosu.

51	0	0.28	222	215	1.00	0	55	0.45	100
88	0	0.30	-	-	-	0	57	0.37	100
23	0	0.22	-	-	-	0	54	0.25	100

6.2.1. En büyük elastisite modülü:

En büyük elastisite modülü bir cismin elastik özelliklerini tanımlamak amacıyla kullanılır. Dinamik zemin parametrelerinden birisi olan en büyük elastisite modülünü belirlemek için dinamik üç eksenli deney aletinde elastik deformasyon seviyelerinde deneyler yapılabilir. En büyük elastisite modülü dinamik üç eksenli deney aletinin gap sensörleri vasıtasıyla hassas ölçüm yapılarak 10^{-6} - 10^{-5} seviyelerindeki çok küçük elastik deformasyonlar ölçülerek bulunur. En büyük elastisite modülü dinamik gerilme - eksenel birim deformasyon eğrisi grafiğindeki eğrinin eğimi olarak tanımlanmakta olup, aşağıda verilen 6.1 bağıntısı ile hesaplanabilir.

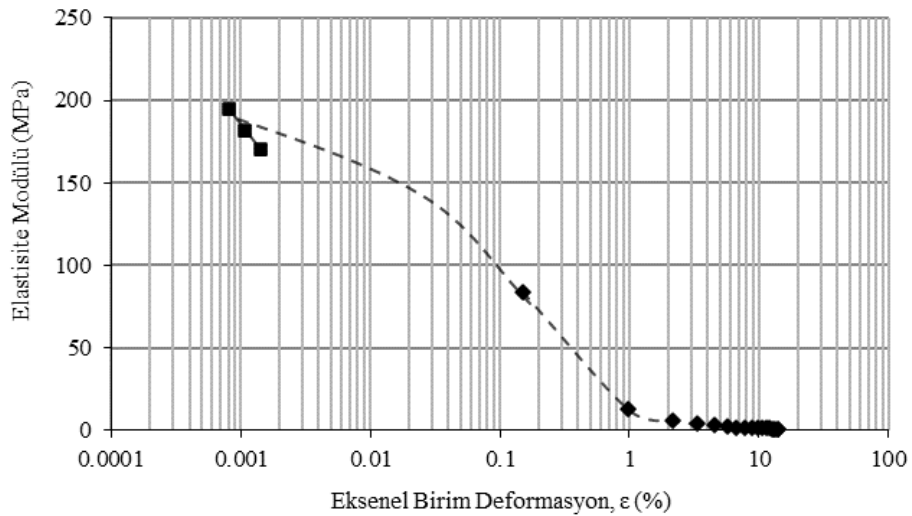
$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon} \quad (6.1)$$

Bir grup temiz kum zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde önce elastisite modülü deneyleri yapılmış ve arkasından dinamik deneyler uygulanmıştır. Numunelere öncelikle elastik deformasyon seviyelerinde gerilme verilerek maksimum elastisite modüllerine bakılıp daha sonra dinamik yük düşmesi yardımıyla hedeflenen $\pm\sigma_{dev}/2\sigma_c$ ayarlanarak deneyler yapılmıştır. Çizelge 6.2’de görüldüğü üzere doymuş durumdaki temiz kum numunelerinde elastisite modülleri yer almaktadır. Elastisite modülü deneyleri neticesinde doymuş temiz kum zemin numunelerine ait elastisite modülleri 168 ile 195 MPa arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Çizelge 6. 2 : Doygun durumdaki temiz numelerin maksimum elastisite modülleri.

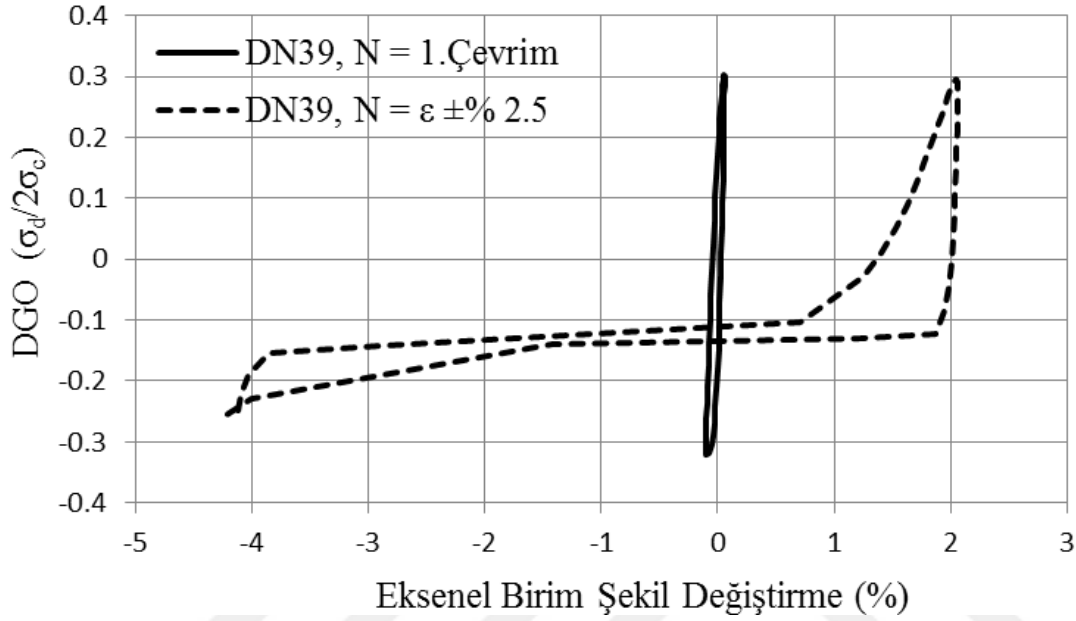
Deney No	B (%)	Kons.Sonrası Dr (%)	E _{maks} (MPa)
DN 39	100	55	190
DN 56	97	52	180
DN 54	96	51	177
DN 37	96	50	195
DN 94	96	51	170
DN 45	95	55	168

En küçük gerilme seviyesinde yapılan en büyük elastisite modülü tayininden sonra numuneye dinamik tekrarlı yükleme yapılarak deney bitirilmiştir. DN39 numunesine ait elastisite modülünün eksenel birim deformasyon ile değişim grafiği Şekil 6.1’de görülmektedir. Buna göre 10^{-6} - 10^{-5} çift genlik ($\epsilon \geq 0.01$) deformasyon seviyesi olan deformasyon seviyelerinde başlangıç elastisite modülü $E_{maks} = 190$ Mpa civarında bulunan bu numunede elastisite modülü deneyi bitirilerek dinamik deneye geçilmiştir. En büyük elastisite modülünün tayininden itibaren dinamik deneyin göçme kriterine ulaşınca kadar olan kısım Şekil 6.1’de kesik çizgi ile gösterilmiştir. DGO ($\pm\sigma_{dev}/2\sigma_c = 0.30$) olarak verilen DN39 numunesi 6 çevrim sonunda göçme deformasyon seviyesini geçerek sıvılaşmıştır. Dinamik deneyin ilk çevriminden itibaren ($\epsilon = 0.1$) numune hızla eksenel birim deformasyona uğrayarak plastik deformasyon seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 6. 1 : DN39 numunesine ait elastisite modülünün aksel birim deformasyona bağlı değişim grafiği.

Dinamik deney başlangıcında Şekil 6.2’de görüldüğü gibi ilk çevrimde elastik durumda dikey bir grafik çizen histerisi ilmiği, 6 çevrim sonunda aksel birim deformasyonları $\varepsilon=\pm\% 2.5$ mertebelerinin üzerine çıkarak yatık konuma geçmiştir.

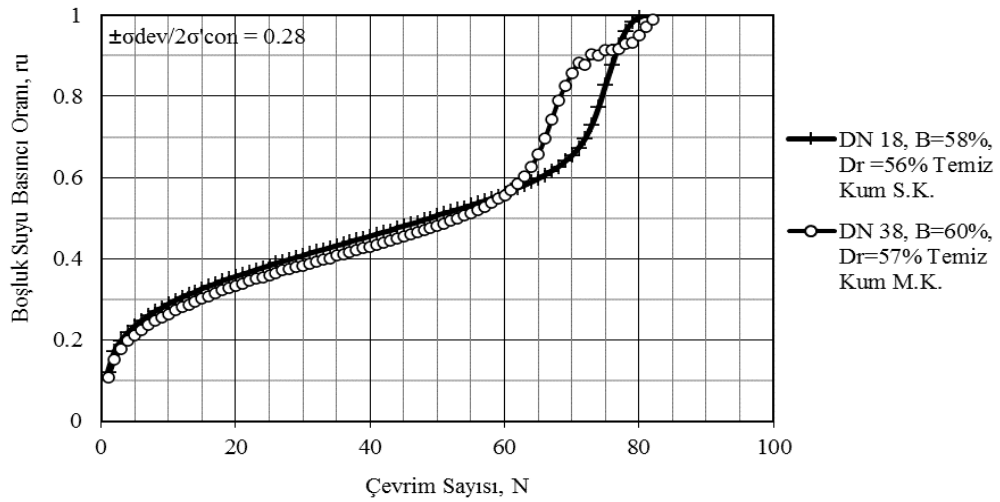


Şekil 6. 2 : DN39 numunesine ait N=1.Çevrim ve N= $\varepsilon \pm \% 2.5$ deformasyon seviyesindeki gerilme-şekil değiştirme grafiği.

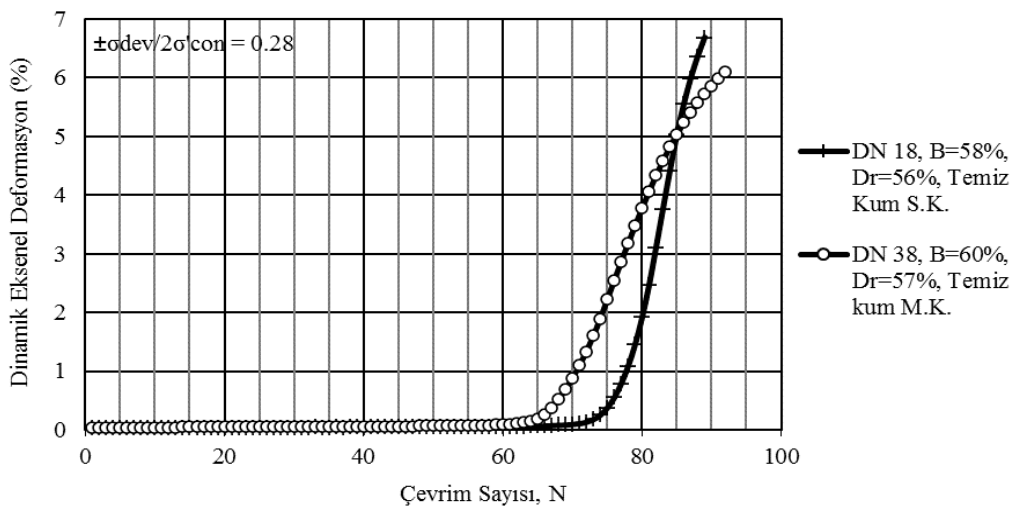
6.2.2. Standart ve modifiye numune kalıpları ile hazırlanmış numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması

Numune hazırlama kalıbının yapı üzerindeki etkisini incelemek için aynı şartlarda standart kalıp ile modifiye kalıpta hazırlanan temiz kum numunelerine $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c=0.28$ gerilme seviyesinde dinamik yük uygulanarak, boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı ve dinamik aksel deformasyon – çevrim sayısı grafikleri karşılaştırılmıştır. DN18 numunesi standart kalıpta hazırlanmış olup $Dr=\%56$ sıkılıkta ve B değeri 0.58 elde edilmiştir. DN38 numunesi modifiye numune hazırlama kalıbında hazırlanmış olup, kirlenmiş numunelerde benzer koşulda olması için 1 gün temiz su tankına daldırılarak bekletilmiş ve tanktan çıkarılıp dinamik üç eksenli deney hücresine yerleştirilmiştir. DN38 numunesi, DN18 numunesinde olduğu gibi aynı şartlar altında 100 kPa’ basınçta konsolide edilerek $Dr = \%57$ bulunmuştur ve B değeri 0.60 olarak

ölçülmüştür. Skempton–B değeri 0.58 olan standart kalıpta hazırlanan DN18 numunesi ile Skempton–B değeri 0.60 olan modifiye kalıpta hazırlanan Şekil 6.3’te boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki verilmektedir. İkisi de $N=60$ çevrime kadar benzer davranış göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 6.4’teki dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiğinde göçme kriteri olarak tanımlanan $\varepsilon=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesine DN38 numunesi $N=77$ çevrimde ulaşılırken boşluksuyu basıncı oranı $r_u = 0.95$, DN18 numunesi ise $N=82$ çevrimde ulaşılırken boşluksuyu basıncı oranı $r_u = 1.00$ dir. Davranışlar genel olarak benzerdir.



Şekil 6. 3 : DN18 ve DN38 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.

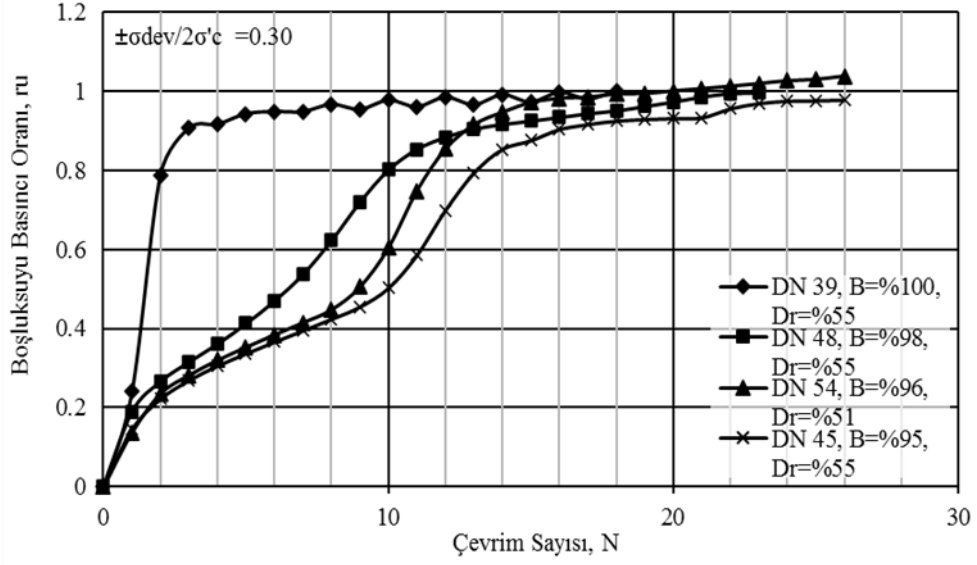


Şekil 6. 4 : DN18 ve DN38 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.

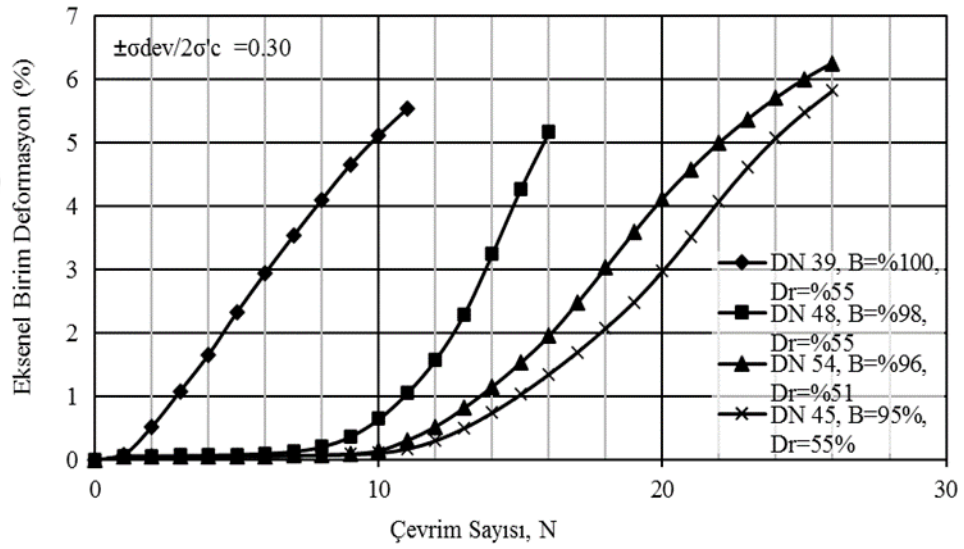
6.2.3. Doygun durumdaki temiz kum numunelerinin dinamik davranışı

Doygun durumdaki kum numunelerin Skempton-B değerleri $B \geq 95$ ve üzeri olan 100 kPa çevre basıncı altında yapılan dinamik deneylerde, doymuş durumdaki davranışını incelemek için $\pm\sigma_{dev}/2\sigma_c = 0.30$ oranında tekrarlı yükler verilerek boşluk suyu basıncı ve eksenel birim deformasyonların çevrim sayısı ile olan ilişkisine bakılmıştır. Göçme kriteri olarak eksenel birim deformasyon $\varepsilon = \pm 2.5\%$ belirlenmiştir. Numunelerde relatif sıkılık $D_r = 51\%-55\%$, doymuşluk değerleri $B = 100\%-95\%$ aralığında hesaplanmıştır.

$\pm\sigma_{dev}/2\sigma_c = 0.30$ deformasyon seviyesinde yapılan dinamik deneyler sonucunda doymuşluk değeri $B = 1.00$ olan tam doymuş DN39 numunesi dinamik eksenel yük verildiği andan itibaren boşluk suyu basıncındaki ani artış ile birlikte hızlı bir şekilde deformasyona uğrayarak $N = 6$ çevrim gibi kısa bir sürede göçme kriterimize ulaşmıştır. Doymuşluk değeri $B = 0.98$ olan DN48 numunesi $N = 13$ çevrim sonunda $\varepsilon = \pm 2.5\%$ deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Daha sonra sırasıyla DN54 numunesi ($B = 0.96$) ve DN45 numunesi ($B = 0.95$) $N = 18$ ve $N = 19$ çevrim sonunda $\varepsilon = \pm 2.5\%$ eksenel birim deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Seed ve Idriss (1971) yapmış oldukları çalışmalarda $M_w = 7.5$ büyüklüğündeki depreme tekabül eden çevrim sayısının $N = 20$ olarak hesaplamışlardır. Bu deneydeki doymuş durumdaki kum numunelerimizin tamamı 20 çevrim sayısına gelmeden göçme kriteri olan $\varepsilon = \pm 2.5\%$ eksenel birim deformasyon değerine ulaşmıştır (Şekil 6.6). Bu deformasyon değerlerindeki boşluk suyu basıncı oranları DN39 için $r_u = 0.96$, DN48 için $r_u = 0.93$, DN54 için $r_u = 1.00$ ve DN45 için $r_u = 0.99$ olarak bulunmuştur (Şekil 6.5).



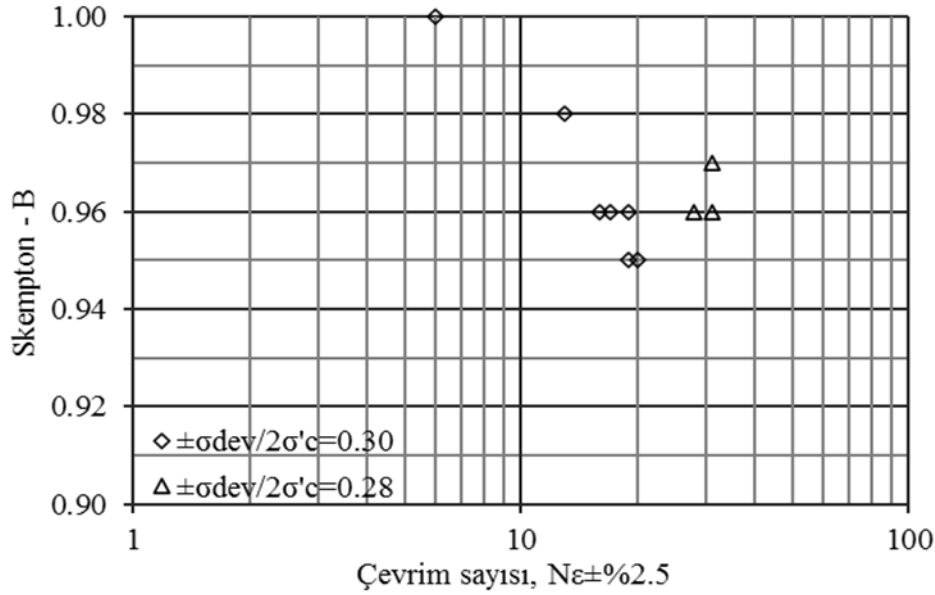
Şekil 6. 5 : Doygun durumdaki temiz kum numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.



Şekil 6. 6 : Doygun durumdaki temiz kum numunelerine ait eksenel birim deformasyon yüzdesi – çevrim sayısı grafiği.

100 kPa konsolidasyon basıncı altında doymuş temiz numuneler üzerinde yapılan yapılan $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28-0.30$ gerilme aralığındaki deneylerin doymuşluk (B) değeri ile $\varepsilon=\pm\% 2.5$ eksenel birim deformasyon değerindeki çevrim sayıları (N) ile olan ilişkisi Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Relatif sıkılığı $Dr= \%50$ ile $\%56$ arasında değişen doymuşluğu $B\geq 0.95$ ve üzeri hesaplanan temiz kum numunelerden tamamı $\varepsilon=\pm\% 2.5$ eksenel birim deformasyon değerine ulaşarak sıvılaştı. Doymuşluk değeri $B=0.96$

olarak hesaplanan temiz numunelerden $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ gerilme oranı uygulanan numuneler N=28 ve N=31 çevrim sayılarında göçme kriterine ulaşırken, $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.30$ gerilme oranı uygulanan temiz numuneler bu değere N=16, N=17 ve N=19 çevrimlerinde ulaşmıştır. Doygun numunelerde doygunluk oranı arttıkça sıvılaşma daha erken çevrim sayılarında gözlenmiştir. Ayrıca gerilme oranının azalması az daha olsa göçme çevrim sayılarının artmasına neden olmuştur.

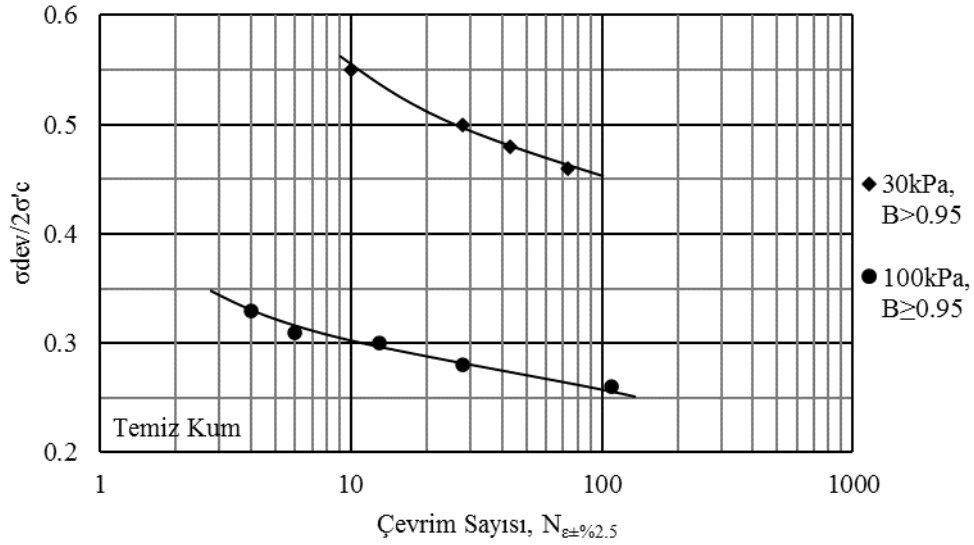


Şekil 6. 7 : Doygunluk - çevrim sayısı ilişkisi, B ≥ 95

6.2.4. Farklı konsolidasyon basıncı altındaki doygun durumdaki temiz kum numunelerinin karşılaştırılması

Doygun numunelere gerilme oranı değiştirilerek uygulanan dinamik deneylerde bu gerilme oranlarında $\epsilon = \pm \% 2.5$ deformasyon değerine ulaştığı çevrim sayıları Şekil 6.8' de gösterilmiştir. Doygun $B \geq 0.95$ hesaplanan bu numuneler 30 ve 100 kPa olmak üzere iki farklı konsolidasyon basıncı altında 1 gün bekletilmiştir. 100 kPa numunelere uygulanan en yüksek dinamik gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.33$ ve en düşük dinamik gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.26$ dır. 30 kPa basınç altındaki numunelere uygulanan en yüksek dinamik gerilme oranı ve en düşük gerilme oranı ise sırasıyla $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.55$ ile $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.46$ dır. Şekil 6.8'de göçme deformasyon değeri olan $\epsilon = \pm \% 2.5$ değerine N= 28 çevrim sayısında ulaşması için 100 kPa basınç altındaki doygun temiz

kum numunesi için gerekli gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$, 30 kPa basınç altında ise $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.50$ olduğu görülmektedir.

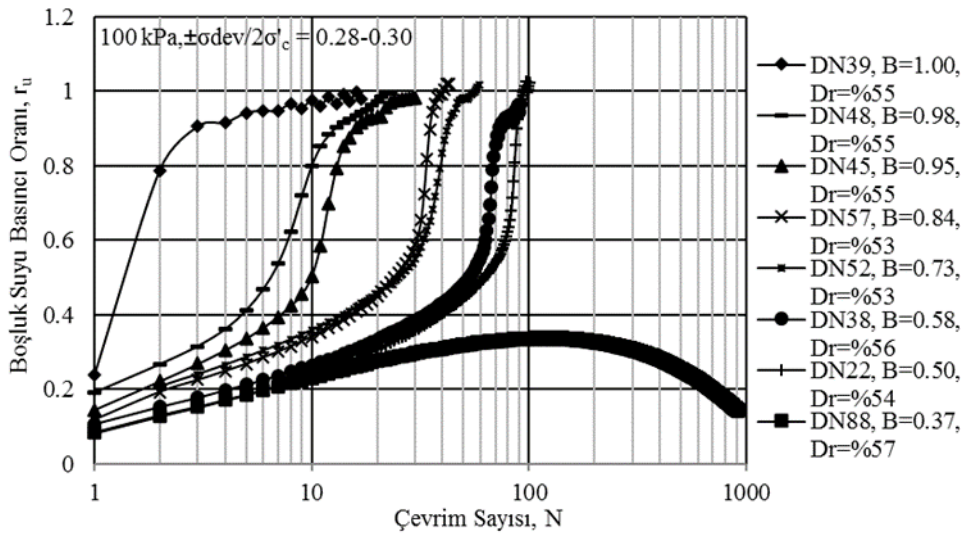


Şekil 6.8 : 100 kPa ve 30 kPa basınç altındaki doymuş numunelerin dinamik mukavemet eğrisi.

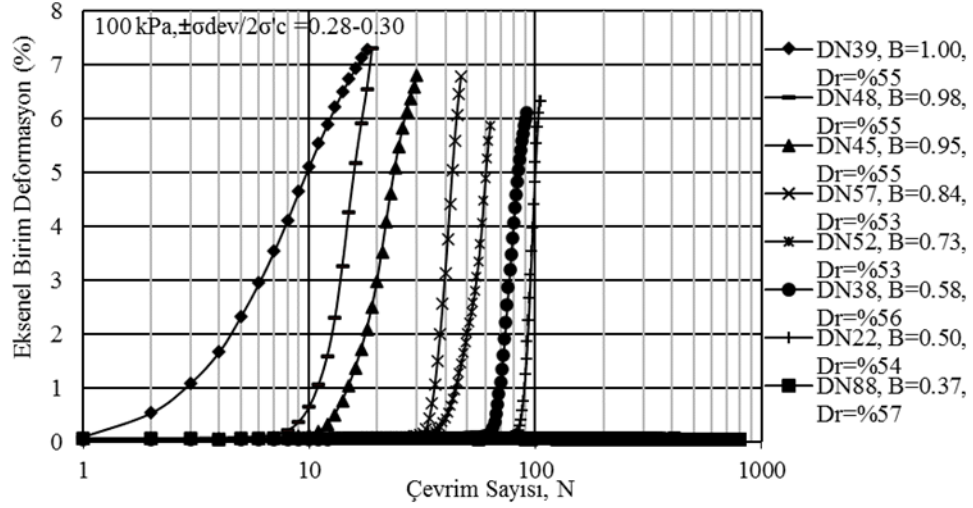
6.2.5. Doymunluğun dinamik davranışa etkisi

Doymunluğun temiz kumlarda dinamik davranışa olan etkini araştırmak için farklı doymunluktaki sekiz adet numune 100 kPa çevre basıncı altında $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28-0.30$ gerilme seviyesinde dinamik deneylere tabi tutulmuştur. Relatif sıkılıkları $Dr = \%53$ ile $Dr = \%57$ arasında değişmekte olan bu numunelerden en yüksek doymunluğa sahip numunede doymunluk değeri $B = 1.00$, en düşük doymunluk değerine sahip numunede doymunluk değeri $B = 0.37$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.9' da boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki ve Şekil 6.10' da dinamik deformasyon oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki verilmektedir. Doymun durumda bulunan numuneler $B \geq 0.95$ hızlı boşluk suyu basıncı artışları ile birlikte $N = 20$ çevrime ulaşmadan $\epsilon = \pm \%2.5$ dinamik deformasyon değerine ulaşmıştır. Bu deformasyon değerindeki DN39'daki boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 0.96$, DN48 için $r_u = 0.94$ ve DN45 için $r_u = 0.99$ olarak ölçülmüştür. $B = 0.84$ ve $B = 0.73$ doymunluk değerine sahip DN57 ve DN52 numuneleri ise $N = 39$ ve $N = 52$ çevrim sonunda $\epsilon = \pm \%2.5$ dinamik deformasyon değerine ulaşmıştır. Ulaştıkları bu çevrim sayılarında boşluk suyu basıncı oranları $r_u = 1.00$ dir. Doymunluk değeri $B = 0.58$ değerine düştüğünde DN38 numunesi $N = 77$

çevrim sonunda, doygunluk değeri $B=0.50$ olan DN22 numunesi $N=94$ çevrim sonunda göçme deformasyon seviyesi olan $\varepsilon=\pm\% 2.5$ dinamik deformasyon seviyesine ulaşmıştır ve bu seviyedeki boşluksuyu basıncı oranları sırasıyla $r_u=0.94$ ve $r_u=1.00$ dir. Doygunluğu $B=0.37$ olarak ölçülen DN88 numunesi ise doygunluk değerinin daha düşük olması sebebiyle göçme deformasyon seviyesine ulaşamamıştır. Artan boşluk suyu basıncı tekrarlı yüklemeler sonucunda pik değere ulaştıktan sonra tekrar kumun genişlemeye başlamasıyla boşluk suyu basıncı bir miktar azalmıştır. Doygun ve kısmi doygun kum numuneler tekrarlı yük altında benzer davranış gösterirken doygunluk değerinin düşmesi sıvılaşmanın daha geç çevrim sayılarında oluşmasına neden olmuştur. Yalnızca DN88 numunesinde dinamik eksenel deformasyonlar çok düşük kalarak sıvılaşma oluşmamıştır.



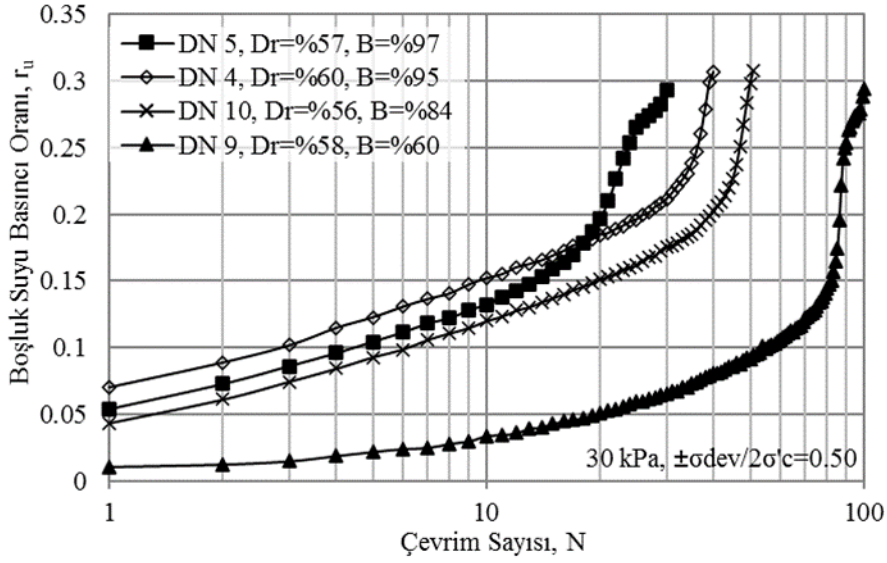
Şekil 6. 9: Farklı doygunluk değerindeki temiz kum numunelerinin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği, 100 kPa.



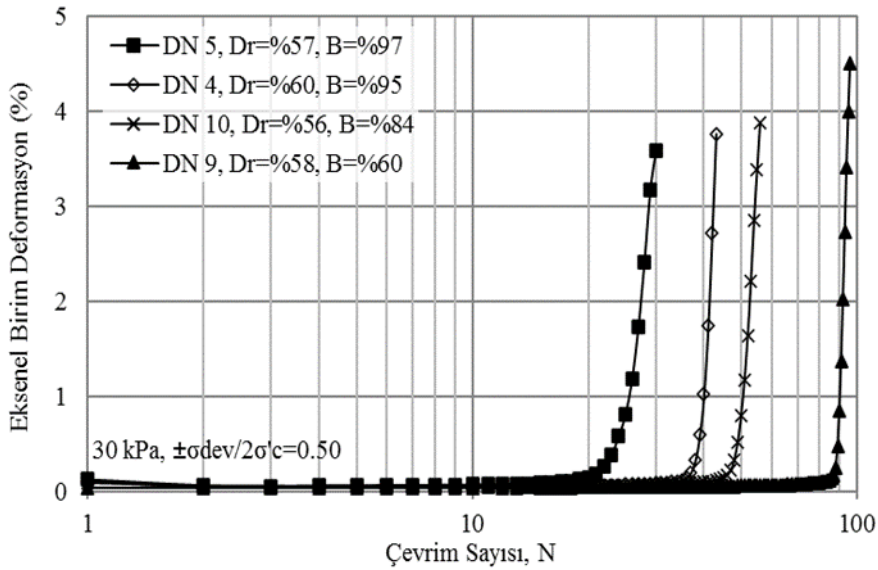
Şekil 6. 10 : Farklı doygunluk değerindeki temiz kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği, 100 kPa.

30 kPa konsolidasyon basıncı altında doygunluğun temiz zeminlerde etkisinin araştırıldığı deneyler sonucunda Şekil 6.11' de boşluksuyu basıncı oranı çevrim sayısı ve Şekil 6.12'de eksenel birim deformasyon çevrim sayısı grafikleri aşağıdaki paylaşılmıştır. $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28-0.30$ gerilme seviyesinde yapılan deneyler öncesi numunelerin relatif sıkılık değerleri $Dr=\%56-\%60$ olarak ölçülmüştür.

Aynı grafik üzerinde karşılaştırılan temiz numunelerden ilk olarak doygunluk seviyesi $B=0.98$ olan DN5 numunesi 28 çevrimde, daha ise sonra doygunluk değeri $B=0.95$ olan DN4 numunesi 43 çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ eksenel birim deformasyon değerine ulaşmıştır. Kısmi doygun durumda bulunan doygunluk değeri $B=0.84$ olan DN10 ve doygunluk değeri $B=0.60$ olan DN9 numuneleri sırası ile 84 ve 94 çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ eksenel birim deformasyon değerine ulaşmıştır. Göçme deformasyon değerine ulaştığındaki boşluksuyu basınç oranı (r_u) DN4 ile DN10 için $r_u = 0.30$ ve DN5 ile DN9 için $r_u= 0.28$ olarak ölçülmüştür. Numunelerde doygunluk değerlerinin düşmesiyle sıvılaşmaya karşı direnç artmıştır.



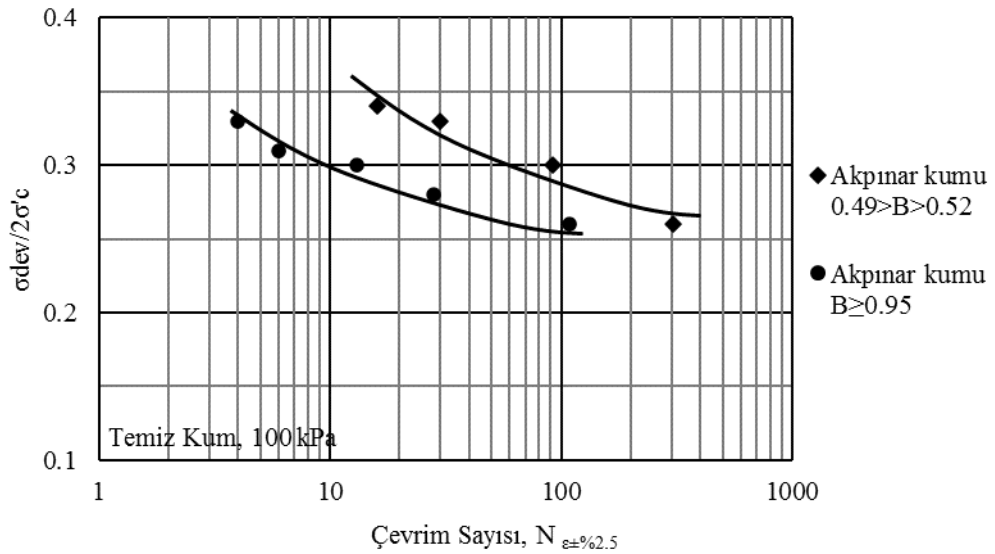
Şekil 6. 11 : Farklı doygunluk değerindeki temiz kum numunelerinin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği, 30 kPa.



Şekil 6. 12 : Farklı doygunluk değerindeki temiz kum numunelerinin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği, 30 kPa.

Şekil 6.13’de relatif sıkılıkları $Dr = 55\%-60\%$ arasında değişen temiz doygunluk değeri $B \geq 0.95$ olan numunelerle, B değerleri 0.49 ile 0.52 arasında değişen kısmi doygun numunelerin farklı dinamik gerilme oranlarındaki $\varepsilon = \pm 2.5\%$ deformasyon değerindeki çevrim sayıları grafiği paylaşılmıştır. Buna göre $\pm \sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.33$ seviyesinde

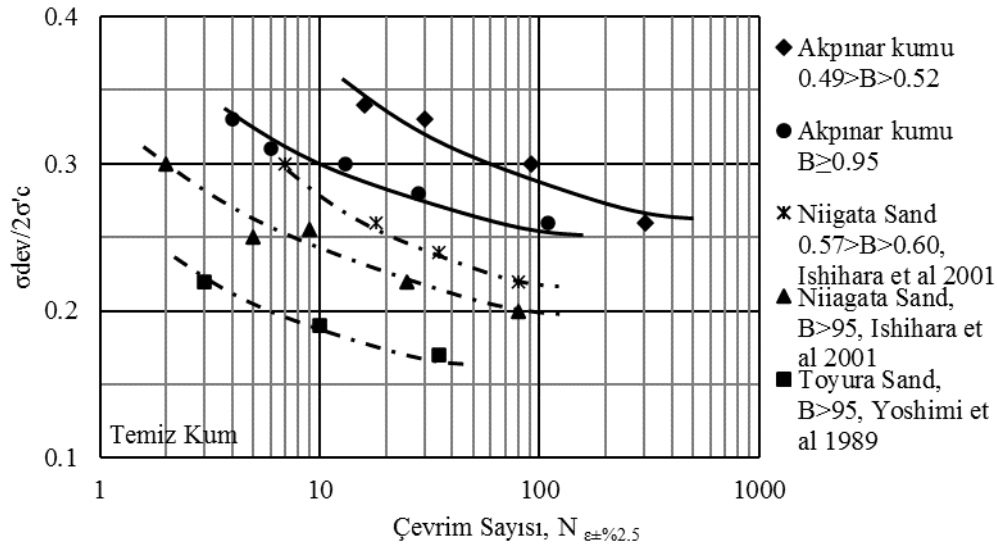
doygunluk değeri $B \geq 0.95$ olan temiz numune $N=4$ çevrimde göçme deformasyon seviyesine ulaşırken, aynı gerilme oranı uygulanan kısmi doygun numune bu seviyeye $N=16$ çevrimde ulaşmaktadır. Gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.30$ seviyesine düştüğünde ise temiz doygun kum numunesi $N=13$ çevrimde $\varepsilon = \pm\% 2.5$ deformasyon değerine ulaşmışken kısmi doygun numune bu değere $N=92$ çevrim sayısında ulaşmıştır. Aynı gerilme seviyelerinde doygunluk değerinin düşmesi numunelerde büyük deformasyonların daha geç çevrim sayılarında meydana gelmesine sebep olmuştur. $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ gerilme oranında $N=28$ çevrimde sıvılaştıran doygun kum numunesinin, kısmi doygun $B=0.49$ ile 0.52 arasında olması durumunda yakın çevrim sayılarında ($N=30$) sıvılaşması için uygulanması gereken dinamik gerilme oranının $\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.33$ olduğu görülmektedir. Dinamik gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.26$ değerinin altına düştüğünde ise her iki numunede $N=1000$ çevrime kadar verilen tekrarlı yük sonunda $\varepsilon = \pm\%2.5$ deformasyon değerine ulaşamamıştır.



Şekil 6.13 : Doygun ve kısmi doygun temiz kum numunelerine ait dinamik mukavemet eğrisi.

Kum zeminlerin doygunluk derecesinin sıvılaşma karakterine etkisi farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yoshimi ve diğ. (1989) dinamik burulmalı kesme deney sisteminde Toyoura kumu ile relatif sıkılığı $Dr = \%60$ olan tam doygun durumdaki kumlarla, Ishihara ve diğ. (2001) ise dinamik üç eksenli deney sisteminde farklı doygunluk değerlerindeki relative sıkılığı $Dr = \%62$ olan Niigata kumu ile yapmış

olduğu çalışmada $\varepsilon = \pm 2.5\%$ çevrim sayısı dinamik gerilme oranı ilişkisi incelemiştir. Şekil 6.13’ teki doymun ve kısmi doymun Akpınar kumu numunelerinin Şekil 6.14 ‘te dinamik mukavemet eğrileri verilen Niigata kumu ve Toyura kumu ile karşılaştırılmıştır. Buna göre doymun Toyura kumuna göre kısmi doymun ve doymun durumdaki Niigata kumuna göre sıvılaşma potansiyelinin daha yüksek olduğu görülmekte olup, Akpınar kumunun ise hem doymun hemde kısmi doymun durumdaki her iki kuma göre sıvılaşma potansiyeli yüksektir.



Şekil 6. 14 : Doymun ve kısmi doymun durumdaki Akpınar kumunun, Niigata ve Toyura kumu ile karşılaştırılması.

6.3. Çöp Sızıntı Suyu ile kirletilmiş Kumların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi

Bu bölümde ikinci grup deneyler olan kirlenmiş kum zemin numunelerinin tekrarlı yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Bu kısımda yapılan deneyler ile çöp sızıntı suyu katkılı kumların davranış değişiklikleri araştırılmıştır. Kirlenmiş numunelerle yapılan çalışmaların başlangıcında doymunluğun sıvılaşma davranışına etkisine bakılmıştır. Daha sonra benzer özellikteki kirlenmiş numuneler değişken kür sürelerindeki gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı davranışları incelenerek temiz kum numuneler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Skempton-B değerleri $B=0.78$ ile 0.21 arasında değişen farklı relatif sıkılıktaki en az 1 gün en fazla 718 günlük kür süresine sahip numunelerin özellikleri çizelge 6.3’te paylaşılmıştır.

Çizelge 6. 3 : Kirlenmiş zemin numuneleri deney tablosu.

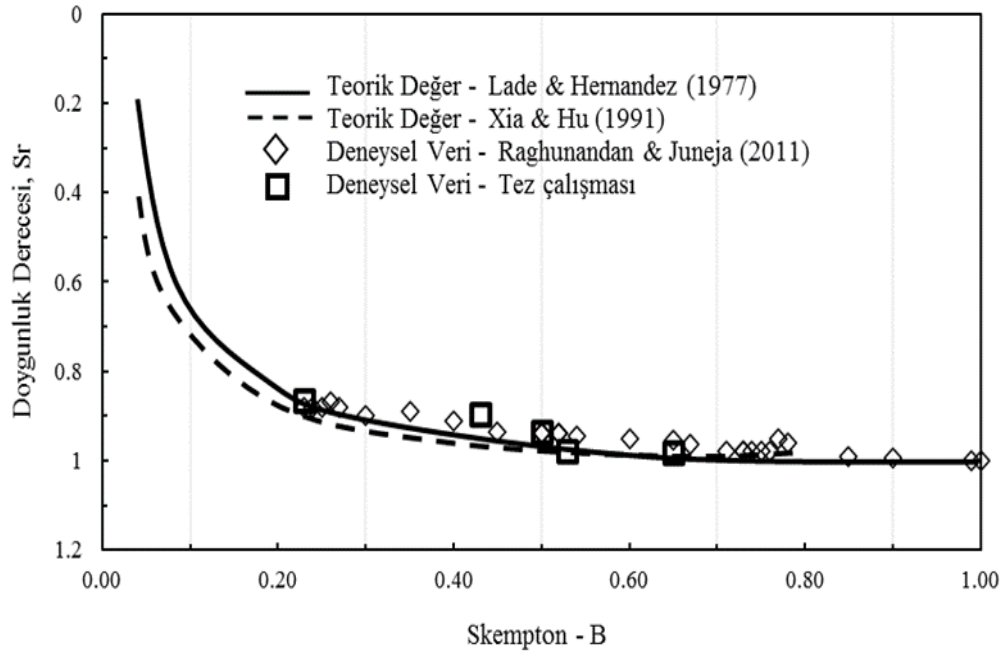
Deney No	Kür Oranı	D.G.O. $\pm\sigma_d/2\sigma_c$	N $\varepsilon=\pm 2.5$	N $\varepsilon=\pm 0.5$	r_u $\varepsilon=\pm 2.5$	Kür Süresi	Dr (%)	B	σ_c
25	100	0.51	29	18	0.30	169	65	0.73	30
75	100	0.28	-	-	-	1	54	0.23	100
77	100	0.28	-	-	-	1	54	0.25	100
78	100	0.36	274	256	0.80	1	55	0.25	100
72	100	0.28	59	50	0.97	3	50	0.65	100
79	100	0.28	54	42	0.98	7	50	0.46	100
76	100	0.28	596	593	0.97	7	54	0.43	100
62	100	0.30	75	68	1.00	7	51	0.60	100
63	100	0.30	29	24	0.99	8	50	0.78	100
83	100	0.28	101	90	1.00	9	56	0.51	100
87	100	0.28	90	82	1.00	10	60	0.53	100
73	100	0.28	53	45	1.00	10	55	0.53	100
64	100	0.30	38	33	1.00	15	57	0.70	100
65	100	0.30	81	73	1.00	16	50	0.58	100
74	100	0.28	100	89	0.88	27	45	0.50	100
85	100	0.34	5	2	1.00	30	60	0.78	100
82	100	0.36	94	83	0.80	30	56	0.35	100
81	100	0.28	-	-	-	30	55	0.35	100
80	100	0.28	33	23	1.00	30	55	0.70	100
33	100	0.3	36	29	1.00	40	54	0.76	100
84	100	0.28	788	765	1.00	45	57	0.40	100
69	100	0.30	69	60	0.98	45	57	0.51	100
90	100	0.37	2	1	1.00	58	60	0.34	100
91	100	0.34	170	157	1.00	60	59	0.23	100
86	100	0.28	37	29	1.00	60	62	0.35	100
34	100	0.30	40	29	0.98	62	53	0.61	100
89	100	0.30	343	327	1.00	90	60	0.42	100
30	100	0.3	26	17	0.94	102	52	0.65	100
31	100	0.3	35	23	0.99	103	57	0.60	100
32	100	0.3	18	12	0.93	109	50	0.70	100
27	100	0.31	102	91	1.00	133	56	0.59	100
12	100	0.21	-	-	1.00	134	55	0.66	100
28	100	0.31	-	-	-	145	65	0.35	100
29	100	0.3	248	238	0.98	146	56	0.45	100
58	100	0.3	34	17	0.95	299	55	0.57	100
60	100	0.3	24	11	0.97	343	57	0.68	100
61	100	0.28	47	36	0.99	344	56	0.53	100
70	100	0.30	19	13	1.00	717	52	0.62	100
71	100	0.30	-	-	-	718	60	0.21	100

6.3.1. Doygunluğun çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kumlarını sıvılaşması üzerine etkisi

Doygunluğun kirlenmiş zeminlerin dinamik davranışına olan etkisi araştırılmadan önce, bir grup kirlenmiş numunenin doygunluk derecesi (S_r) ile Skempton-B parametresi ilişkisi incelenmiştir. Farklı doygunluk değerindeki 5 adet numunenin doygunluk derecesi ve skempton-B hesap değerleri çizelge 6.4' te verilmektedir. Buna göre en yüksek skempton-B değeri $B=0.65$ olan kirlenmiş DN72 numunesinin doygunluk derecesi $S_r=0.982$ olarak, en düşük skempton-B değeri $B=0.23$ olan DN75 numunesinin doygunluk derecesi $S_r=0.865$ olarak hesaplanmıştır. Lade ve Hernandez (1977) ile Xia ve Hu (1991) yapmış oldukları çalışmalar neticesinde çıkarmış oldukları teorik eğriye ilave olarak Raghunandan and Juneja (2011) tarafından yapılan laboratuvar deneyleri sonucu doygunluk derecesi ile skempton-B parametresi ilişkisi belirlenmiştir. Doygunluk derecesi ile skempton-B değeri ilişkisi verilen Şekil 6.15' de çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numunelerin dinamik üç eksenli deney aletinde ölçülen skemton-B değeri ile hesaplanan doygunluk derecesi (S_r) arasındaki ilişki hesaplanan teorik çizgiler ile çakışmaktadır. Buna göre kirlenmiş numunelerimizde en düşük skempton B değerine (0.23) karşılık gelen doygunluk derecesi $S_r = 0.865$ olduğu görülmektedir.

Çizelge 6. 4 : Hesaplanan S_r ve B değerleri.

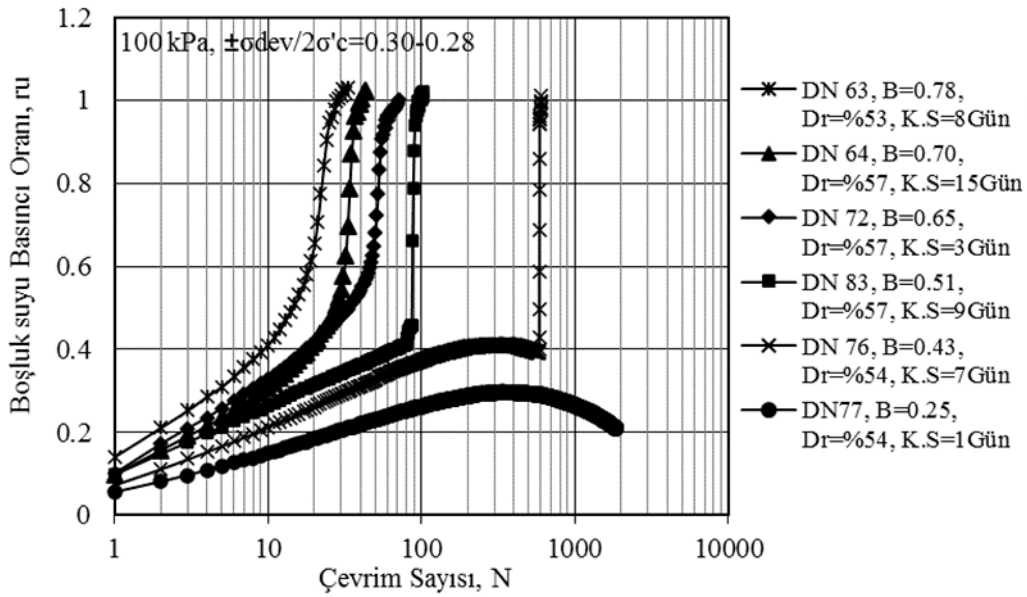
Deney No	Doygunluk Derecesi, S_r	Skempton-B
DN72	0.982	0.65
DN73	0.979	0.53
DN74	0.935	0.50
DN75	0.865	0.23
DN76	0.897	0.43



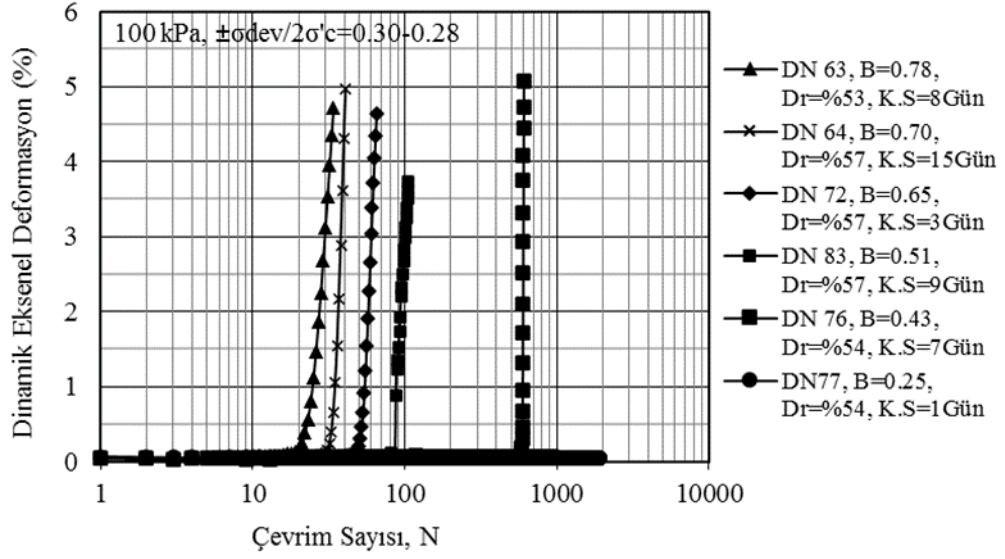
Şekil 6.15 : Kirlenmiş numunelerde Sr - Skempton-B ilişkisi

Doygunluğun kirlenmiş kum numunelerde sıvılaşmaya etkisini incelemek için ilk olarak kür süresi 1 ile 15 gün arasında olan kum numuneler kullanılmıştır. Kemerburgaz katı atık depolama tesisinden temin edilen genç depo sızıntı suyu bu dönemde aerobik bozunma fazındadır. Organik içeriği yüksek olan sızıntı suyu bu süreçte fazla oksijene ihtiyaç duyar. Ortamdaki oksijenin etkisi ile organik maddeler parçalanmaya başlar. Bu dönemde çöp sızıntı suyunda kimyasal reaksiyonlar fazla ve tepkimeler hızlı gerçekleşir. Bu süreçte genç depo sızıntı suyu ile kirlenilen kum numunelerin tekrarlı yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Deney sistemine yerleştirilen kür süresi 1-15 gün arasındaki numunelere basınçlar uygulandıktan sonra doyum için bir gün beklenmiştir. Relatif sıkılığı $D_r = \%53$ ile $\%57$ arasında değişen sıkılıktaki numunelerin değişken doyum değerleri $B = 0.78$ ile $B=0.25$ arasında hesaplanmıştır. Şekil 6.16' de boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ve Şekil 6.17' de dinamik eksenel deformasyon yüzdesinin çevrim sayısı ile olan ilişkilerinin yer aldığı grafikler incelendiğinde en yüksek doyum değerine sahip ($B=0.78$) 8 günlük DN63 numunesi $N=29$ çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşırken, doyum değeri $B=0.70$ olan 15 gün kür süresine sahip DN 64 numunesi $N=38$ çevrimde, daha düşük kür süresine sahip 3 günlük DN72 numunesi ise $N=59$ çevrimde göçme deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Bu numunelerin göçme

deformasyon seviyelerine ulaştıklarındaki boşluk suyu basıncı oranları ise sırasıyla $r_u = 0.99$, 1.00 ve 0.97 olarak ölçülmüştür. Diğer numunelerden doygunluk değerinin %51 olarak ölçüldüğü 9 günlük DN83 numunesi $N=101$ çevrimde ve doygunluk değeri %43 olarak hesaplanan 7 günlük DN 76 numunesi $N=596$ çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Kür süresi 1 gün olan DN77 numunesi ise doygunluk değerinin %25 olması nedeniyle boşluk suyu basıncı oranı maksimum $r_u = 0.30$ değerlerine çıkarak tekrar azalmaya başlamış ve dinamik eksenel deformasyonlar küçük seviyelerde kalarak sıvılaşma gözlemlenmemiştir. Boşluk suyu basıncı oranı ile dinamik eksenel deformasyonların çevrim sayısı ile olan ilişkisi genel olarak incelendiğinde kısa kür sürelerindeki kirlenmiş numunelerde doygunluk değeri düştükçe boşluk suyu basıncı oluşum süreleri uzamakta ve sıvılaşmaya karşı direnç artmaktadır. Grafiklerden B doygunluk değeri %43 olarak ölçülen DN76 numunesinin sıvılaşması için çok uzun çevrim sayıları gerektiği ve diğer bir numune olan DN77 numunesinde ise doygunluğun %25 değerine düşmesi ile sıvılaşma oluşmadığı gözlemlenmektedir. Düşen B değeri ile birlikte sıvılaşabilirlik azalmıştır.



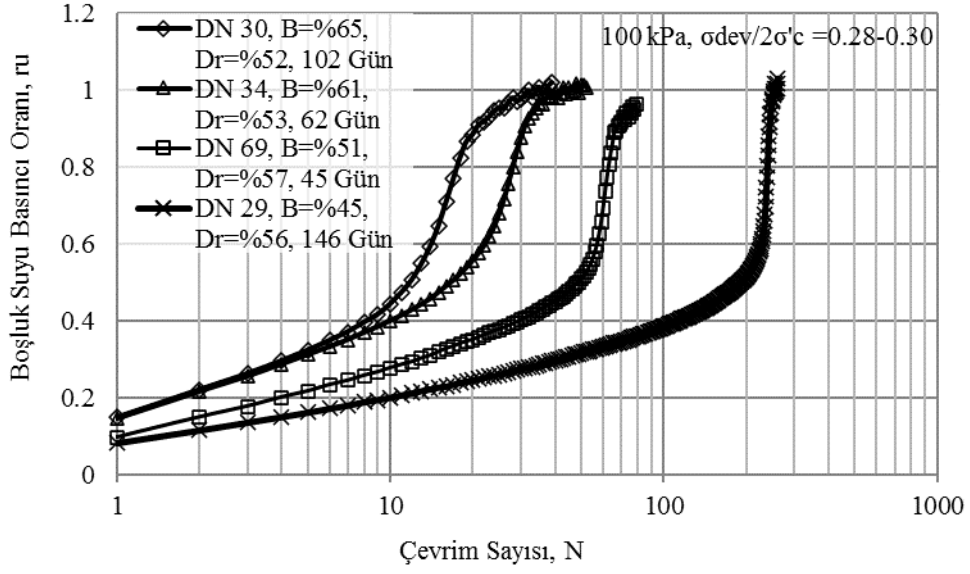
Şekil 6. 16 : Farklı doygunluk değerindeki kısa kür süreli kum numunelerin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.



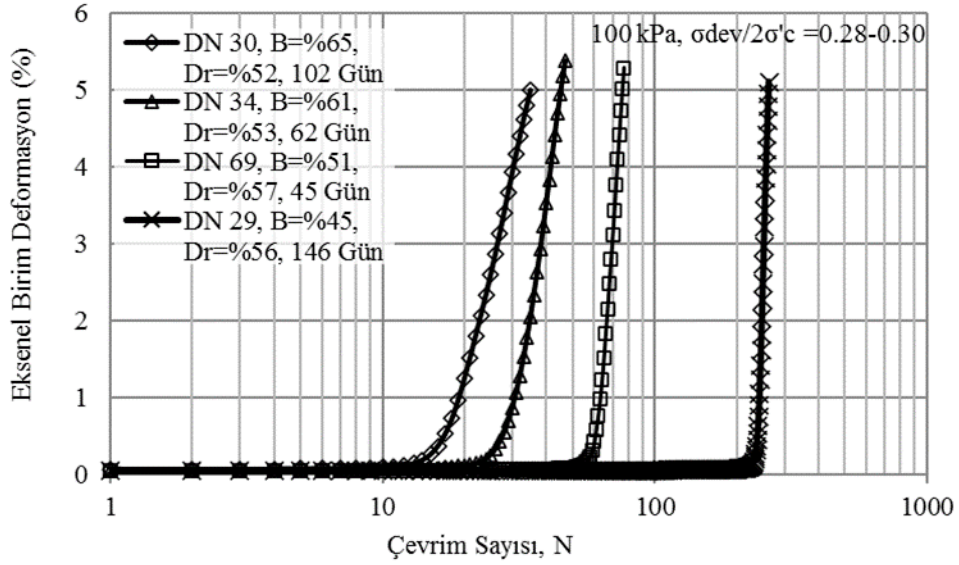
Şekil 6.17 : Farklı doygunluk değerindeki kısa kür süreli kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği.

Benzer şekilde aynı gerilme seviyelerinde kür süreleri en az 45 gün ile en fazla 146 gün arasında değişen daha uzun süre çöp sızıntı suyuna bırakılan numunelerinin eksenel birim deformasyon - çevrim sayısı ile boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ilişkisi sırasıyla Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’de gösterilmektedir. Numunelerin relatif sıklık değerleri $Dr = \%52 - \%57$ olarak ölçülmüş olup, doygunluk değerleri $B = 0.65$ ile 0.45 arasında değişmektedir.

Şekil 17’ de eksenel birim deformasyon - çevrim sayısı ilişkisi grafiğine baktığımızda doygunluk değeri $B = 0.65$ olan kısmi doygun 102 gün kür süreli DN30 numunesi $N = 26$ çevrimde $\epsilon = \pm \% 2.5$ deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Aynı değere doygunluk değeri $B = 0.61$ ve kür süresi $t = 62$ günlük DN34 numunesi $N = 40$ çevrim sonunda ulaşırken, doygunluk değeri $B = 0.51$ ve $t = 45$ günlük kür süresine sahip DN69 numunesi $N = 69$ çevrimde ulaşmıştır. En düşük B değeri $B = 0.45$ olan 146 günlük DN 29 numunesi ise $N = 248$ çevrim sonunda göçme deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Kirlenmiş numunelerin doygunluk değeri daha uzun kür sürelerinde de numunelerin sıvılaşma direncine etkisi olmuştur. Yani Skempton-B değeri düştükçe sıvılaşma geç çevrim sayılarında oluşmaktadır.



Şekil 6. 18 : Farklı doygunluk değerindeki uzun kür süreli kum numunelerin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.

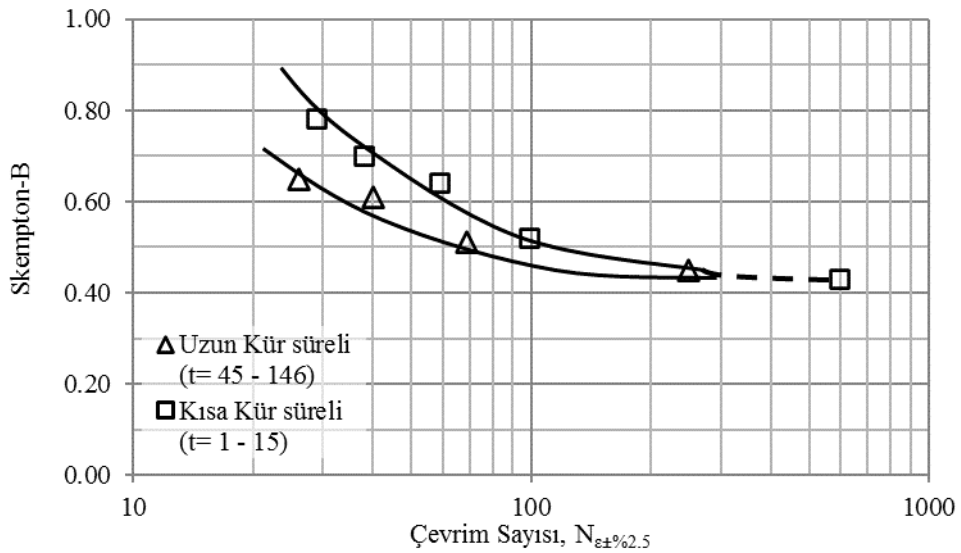


Şekil 6. 19 : Farklı doygunluk değerindeki uzun kür süreli kum numunelerin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafiği.

Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’ da kür süresi kısa olan $t=1-15$ gün arasındaki kirlenmiş numunelerin, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’de ise kür süresi daha uzun olan $t=45-146$ gün kirlenmiş numunelerin eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının, çevrim sayısı ile değişimin davranışlarını incelediğimiz kısmi doygun kirlenmiş zeminlerin

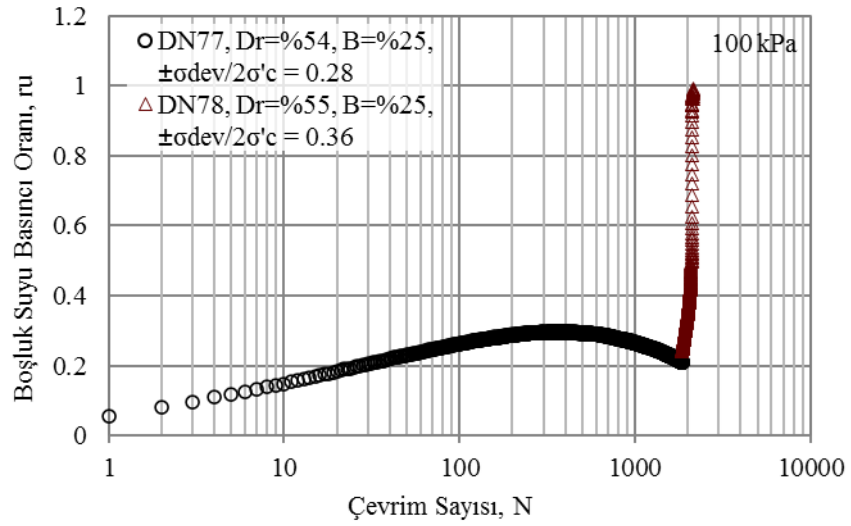
Şekil 6.20’ de aynı grafik üzerinde Skempton-B - Çevrim Sayısı ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Grafikte x eksenini, kirlenmiş numunelerin göçme deformasyon seviyesi olan $\epsilon=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesine ulaştığı zamandaki çevrim sayıları, Y ekseninde ise doygunluk değerleri bulunmaktadır.

Grafiği incelediğinde çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numunelerin her ikisinde de kür süresinden bağımsız olarak doygunluk değerinin düşmesi sıvılaşmanın geç çevrim sayılarında oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Doymunluk değeri $B=0.50$ ve üzeri olan kirlenmiş numunelerde $N=100$ çevrimde tüm numuneler göçme deformasyon değerine ulaşırken, doymunluk değeri $B=0.45$ olan $t=146$ günlük numune ve doymunluk değeri $B=0.43$ olan $t=7$ günlük numune doymunluk değerlerinin daha düşük olması sebebiyle sırasıyla $N=248$ ve $N=596$ çevrim sonunda $\epsilon=\pm\% 2.5$ deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Numunelerde kirlenme etkisini göz önünde bulundurduğunda aynı doymunluk değerleri kıyaslandığında $t=45$ ile 146 gün arasında sızıntı suyunda bekletilmiş numunelerde, $t= 1-15$ günlük kısa kür süreli numunelere göre deformasyonlar daha erken çevrim sayılarında oluşmuştur. Kür süresi $t=45-146$ gün arasında olan numunelerde sıvılaşma potansiyelleri artmıştır. Doymunluk değeri $B=0.45$ in altına düştüğünde ise kirlilik etkisinden bağımsız güçlü sıvılaşma direnci oluşmaktadır.

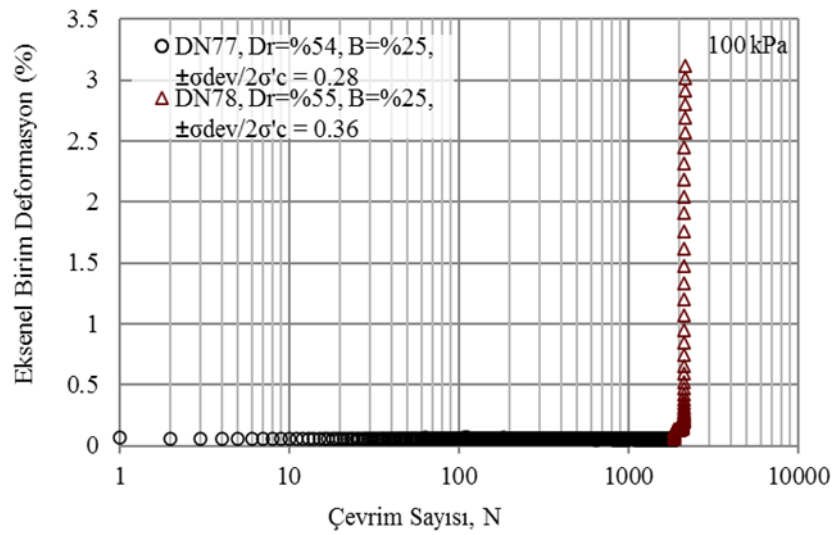


Şekil 6. 20 : Kısmi doymun kısa ve uzun süreli kumların doymunluk - çevrim sayısı ilişkisi.

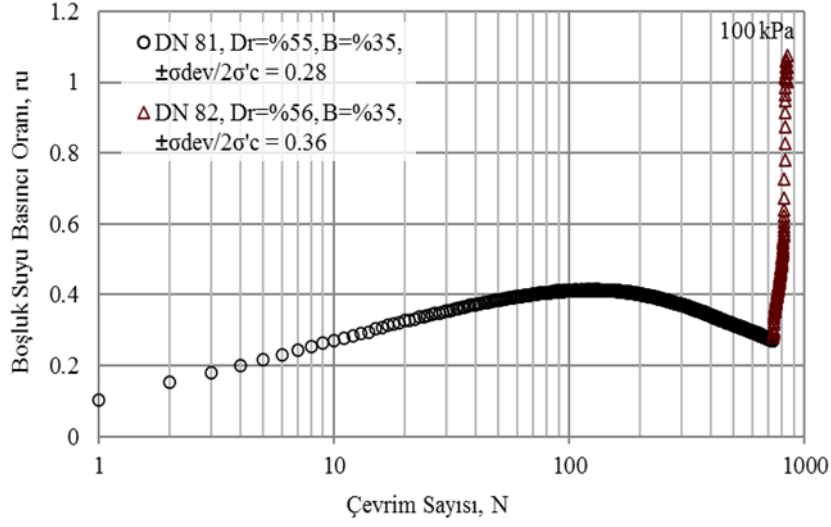
Kirlenmiş numunelerin daha düşük doygunluktaki davranış biçimlerini incelemek için Skempton-B değeri 0.40 ın altında olan $B=0.25$ değerlerine sahip 1 günlük kür süreli DN77 numunesi ile B değeri 0.35 olan 30 gün kür süreli DN81 numuneleri tekrarlı yükler altında teste tabi tutulmuştur. Konsolidasyon sonrası relatif sıkılık oranı %54 olan DN77 numunesi ve konsolidasyon sonrası relatif sıkılık oranı %55 olan DN81 numunesi üzerinde dinamik gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ seviyesinde dinamik deneylere başlanmıştır. Uzun çevrim süreleri sonunda çok küçük deformasyon seviyelerinde kalan iki numunede de deney sonlandırılarak dinamik gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.36$ seviyesine çıkartılmıştır. DN77 numunesinin devamı olan relatif sıkılık oranı $D_r = 55\%$ olan DN78 ve DN81 numunesinin devamı olarak relatif sıkılık oranı $D_r = 56\%$ olan DN 82 numune isimleri kullanılmıştır. 1 günlük kür süresine sahip DN77 numunesinde boşluk suyu basıncı 300 çevrim civarında $r_u = 0.30$ seviyelerine gelerek pik yapmış ve tekrar azalmaya başlamıştır (Şekil 6.21). Aynı şekilde 30 gün kür süresine sahip olan DN81 numunesinde yaklaşık 150 çevrim sonunda boşluk suyu basıncı $r_u = 0.41$ değerine ulaşarak azalmaya başlamıştır. DN 77 numunesinde dinamik deformasyon seviyesi 1904 çevrim sonunda $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.36$ seviyesine arttırıldığında boşluk suyu basıncı hızla artmaya başlayarak 274 çevrim daha devam ettikten sonra Şekil 6.22’ de görüldüğü üzere $\varepsilon = \pm 2.5\%$ deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Şekil 6.23’te ve Şekil 6.24’te görüldüğü üzere DN81 numunesi 753 çevrimin sonunda eksenel deformasyon değeri $\varepsilon = \pm 0.06\%$ ve boşluk suyu basıncı değeri $B=0.28$ mertebelerinde iken deney sonlandırılarak DN82 ye başlanmıştır. Yine dinamik deformasyon oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.36$ seviyesine arttırılarak yapılan bu deney sonucunda DN82 numunesi 94 çevrim sonunda $\varepsilon = \pm 2.5\%$ deformasyon seviyesine ulaşmıştır. DN82 numunesinin DN78 numunesine göre daha erken sıvılaşma davranışı göstermesinin nedeni doygunluğunun diğerine nazaran DN82 numunesinde daha fazla olmasıdır. Çok düşük doygunluk değerlerinde numunelerde 0.28 gerilme seviyesinde sıvılaşma gözlemlenmemiş ve deformasyonlar çok düşük kalmış olup, deformasyon seviyeleri 0.36 değerine geldiğinde iki numunede uzun çevrim sayıları sonunda sıvılaşarak göçmüştür.



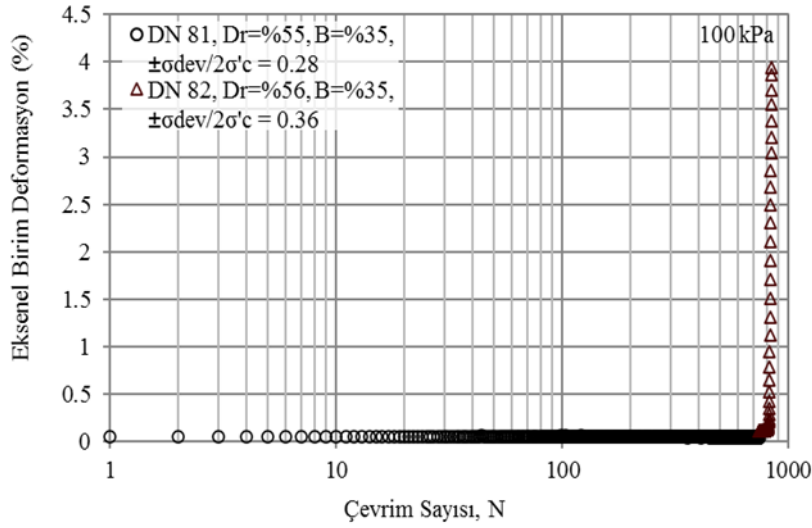
Şekil 6. 21 : DN77 ve DN78 numunesine ait boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.



Şekil 6. 22: DN77 ve DN78 numunesine ait eksenel birim deformasyon - çevrim sayısı grafiği.



Şekil 6. 23 : DN81 ve DN82 numunesine ait boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı grafiği.

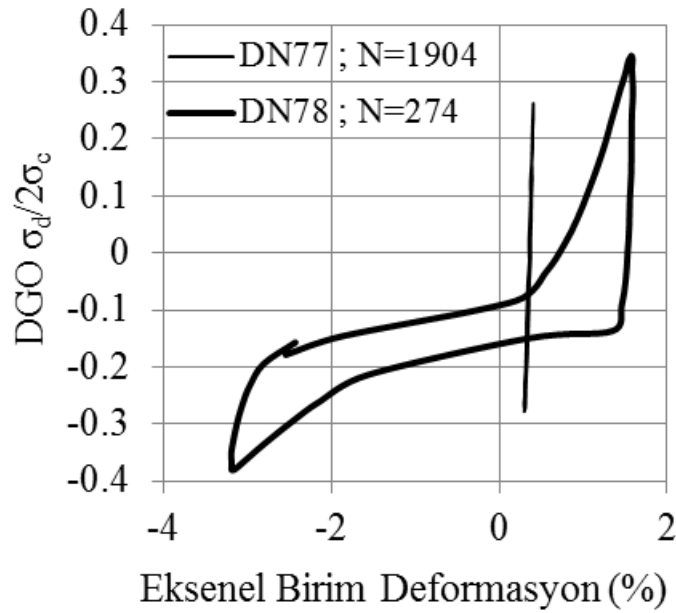


Şekil 6. 24 : DN81 ve DN82 numunesine ait eksenel birim deformasyon - çevrim sayısı grafiği.

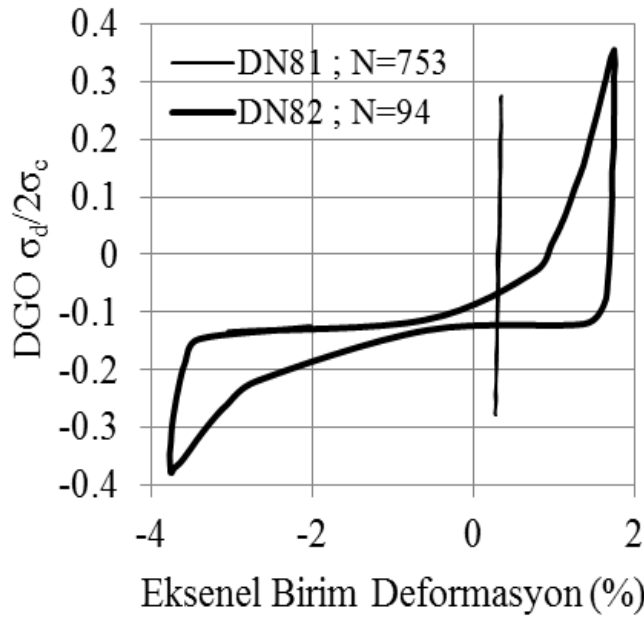
DN77 numunesinde dinamik gerilme oranı ($\pm\sigma_{dev}/2\sigma'c = 0.28$) ile deneye başlanmış $N=1904$ çevrim sonunda deney sonlandırılarak dinamik gerilme oranı ($\pm\sigma_{dev}/2\sigma'c = 0.36$) yükselttilerek devam etmiştir ve $N= 274$ çevrim sonunda DN78 numunesi $\varepsilon=\pm\%$ 2.5 deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Şekil 6.25’de aynı gerilme - şekil değiştirme grafiği üzerinde verilen 1 gün kür süresine sahip skempton-B değeri 0.25 olan DN77-DN78 çiftlerine bakıldığında B değeri 0.25 iken $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'c = 0.28$ deformasyon

seviyesinde çok küçük deformasyonlarda kalınmıştır. Numunenin dinamik gerilme oranı arttırıldığında ise ancak 274 çevrim sonunda göçme deformasyon seviyesine ulaşmıştır.

Aynı şekilde B değeri 0.35 olan 30 gün kür süresine sahip DN81 ve DN82 çifti de gerilme oranı $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.36$ olduğunda $N=94$ çevrimin sonunda $\varepsilon=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesine ulaşmıştır (Şekil 6.26). Her iki numune çifti de düşük gerilme oranlarında basınç bölgelerinde eksenel birim deformasyon yapmış olup, dinamik gerilme oranı artırıldığında ($\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c=0.36$) $\varepsilon=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesinde çekme bölgesindeki eksenel birim deformasyonlar daha fazla olmuştur. Ayrıca skempton - B değeri daha düşük olmasından dolayı 1 günlük DN78 numunesinin enerji sönümlemesi DN82 numunesine göre daha fazla olup daha uzun çevrim sayılarında göçme davranışı göstermiştir.



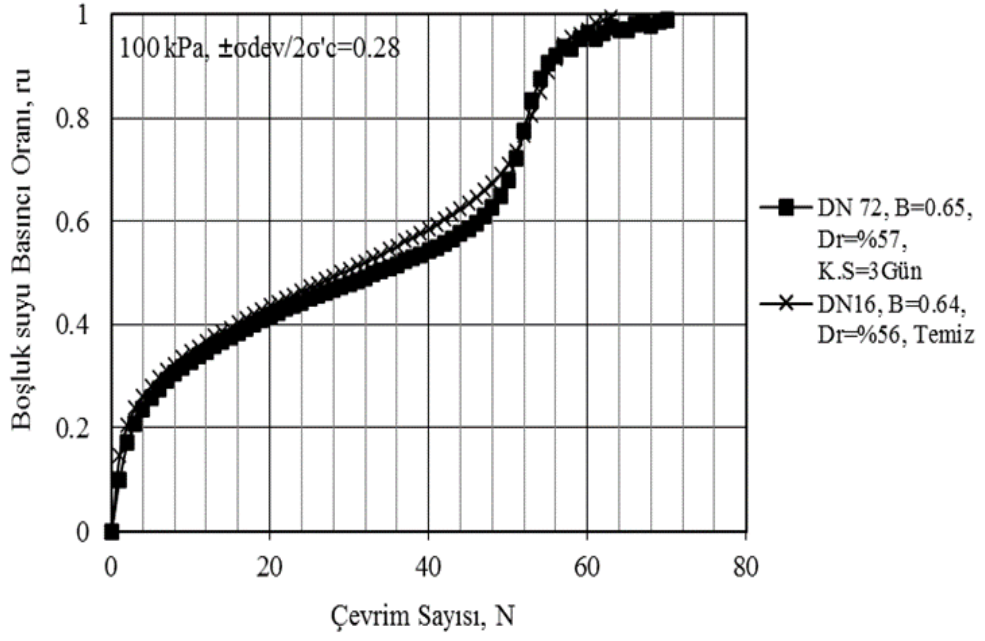
Şekil 6. 25 : DN77 ve DN 78 numunelerine ait $N=1$ ve $N_{\varepsilon=\pm\%2.5}$ çevrimdeki deviator gerilme – eksenel birim deformasyon davranışları.



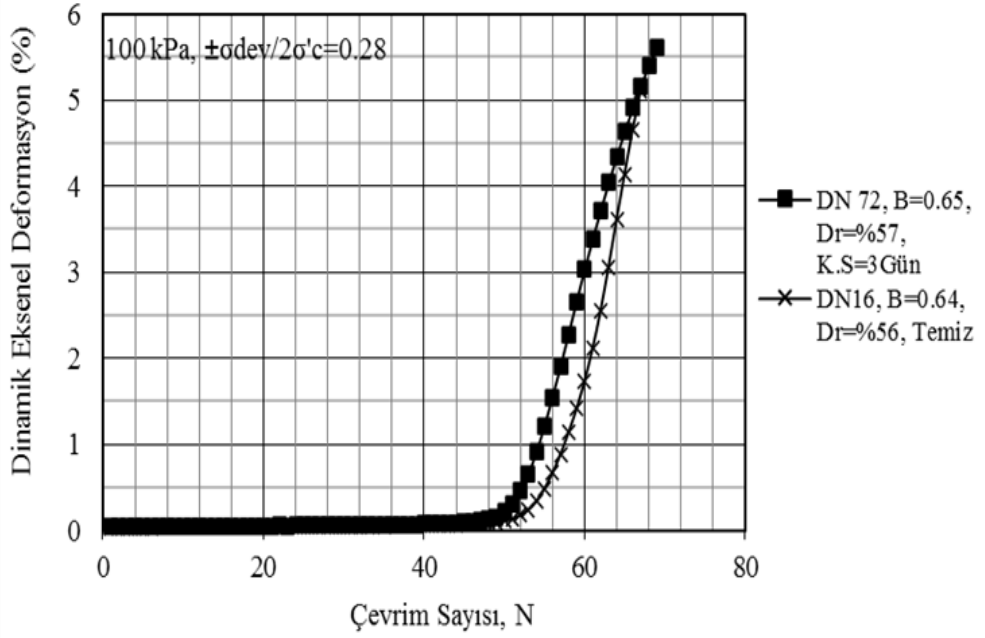
Şekil 6. 26 : DN81 ve DN 82 numunelerine ait $N=1$ ve $N_{\varepsilon=\pm\%2.5}$ çevrimdeki deviator gerilme – eksenel birim deformasyon davranışları.

6.4. Kirlenmiş Zeminlerin Temiz Zeminler ile Karşılaştırılması

Gerilme oranı sabit tutularak ($\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c=0.28$) kirlenme etkisinin araştırıldığı Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’ deki grafiklerde boşluksuyu basıncı oranı – çevrim sayısı ve dinamik eksenel deformasyon oranı - çevrim sayısı ilişkileri gösterilmektedir. Kür süresi 3 gün olan DN 72 numunesinin, doygunluk değeri $B=0.65$, relatif sıkılığı $Dr=\%57$ ve temiz olan DN16 numunesinin doygunluk değeri $B=0.64$ ve relatif sıkılık $Dr=\%56$ dır. Aynı gerilme oranında dinamik yük uygulanan deneyler sonucunda her iki numunede $N=48$ çevrim sonrasında dinamik eksenel deformasyon değerlerinde artışlar hızlanmış olup, bu çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 0.60$ değerini aşmıştır. Kirlenmiş DN72 numunesi $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine $N=58$ çevrimde ulaşırken, temiz DN16 numunesi ise bu değere $N=62$ çevrimde ulaşmıştır. Göçme deformasyon çevrim sayılarındaki boşluk suyu basıncı oranı değerleri ise DN72 numunesinde $r_u = 0.97$ ve DN16 numunesinde $r_u = 0.99$ olarak ölçülmüştür. 3 günlük kirlenmenin dinamik deformasyon ve boşluksuyu basıncı oluşumu bakımından temiz kum numunesine yakın davranış gösterdiği görülmüştür. Kür süresi az olduğu zaman sızıntı suyunun kuma etkisi de az olmaktadır.



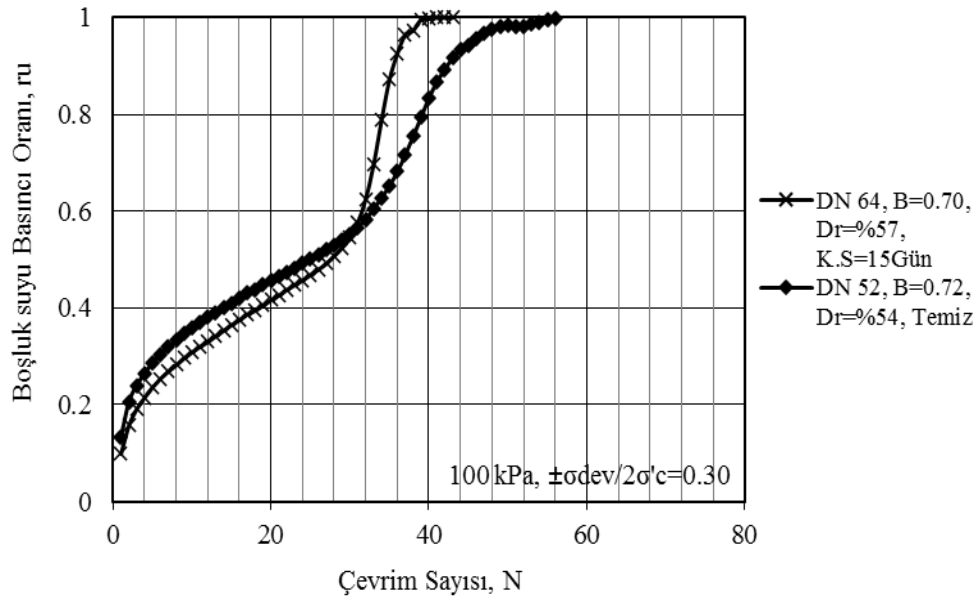
Şekil 6. 27 : DN72 ve DN16 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı grafiği.



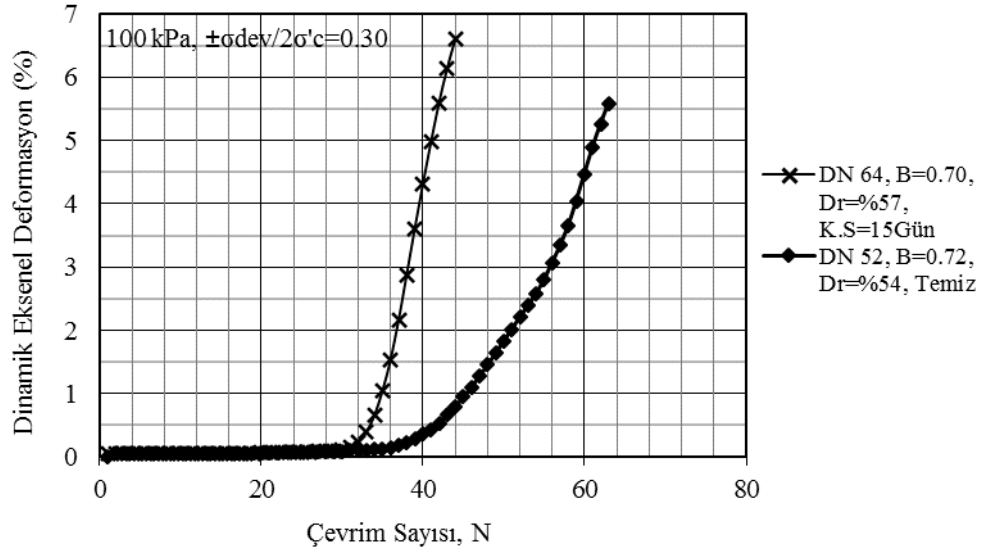
Şekil 6. 28 : DN72 ve DN16 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı grafiği.

Benzer şekilde kirlenme etkisinin araştırıldığı doygunluk değeri $B=0.70$ ve relatif sıkılığı $Dr=\%57$ olan 15 günlük DN64 numunesi ile $B=0.72$ ve relatif sıkılığı $Dr=\%54$ hesaplanan temiz DN52 numunesine $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'c=0.30$ gerime seviyesinde dinamik eksenel yük uygulanmıştır. Boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ilişkisi verilen Şekil 6.29' de her iki numunede boşluk suyu basıncı oranı benzer hızla artarak devam ederken $N=30$ çevrimde $ru=0.55$ değerinde eşitlenmiştir. $N=30$ çevrim sonrasında 15 günlük kirlenmiş DN64 numunesinde, temiz DN52 numunesine göre boşluk suyu basıncı artışı hız kazanmıştır. Artan boşluk suyu basıncı ile birlikte $N=31$ çevrim sonrasında DN64 numunesinde deformasyon değerleri büyüyerek $N=38$ çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Bu seviyeye temiz DN52 numunesi ise $N=52$ çevrim sonunda ulaşmıştır (Şekil 6.30).

15 gün sızıntı suyunda beklemiş numunede, temiz kum numunesine göre boşluk suyu basıncı ile birlikte deformasyonlar hızlanmış ve sıvılaşma davranışı daha erken çevrim sayılarında gözlenmiştir.



Şekil 6. 29 : DN64 ve DN52 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı grafiği.

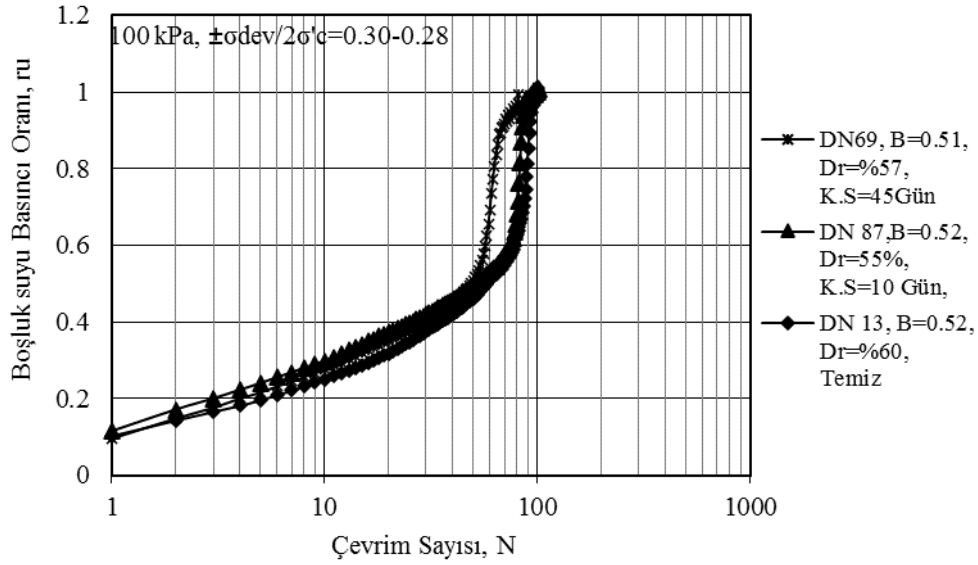


Şekil 6.30 : DN64 ve DN52 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı grafiği.

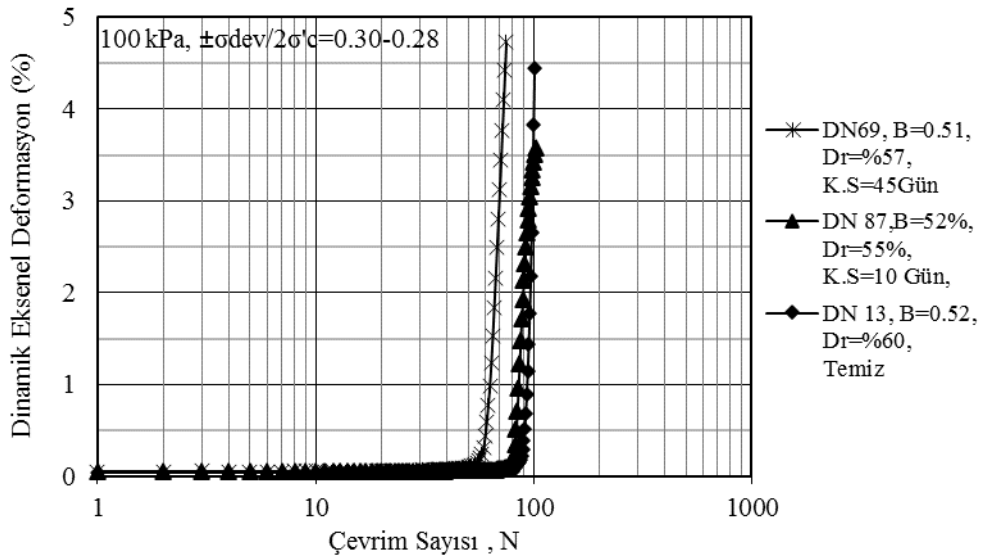
Çöp sızıntı suyunda beklemiş $t=45$ gün kür süresine sahip DN69 numunesi ile $t=10$ gün kür süresine sahip DN87 numunesinin temiz zemin numunesi ile boşluk suyu basıncı – çevrim sayısı ve dinamik deformasyon çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırıldığı Şekil 6.31 ve Şekil 6.32 aşağıda verilmiştir.

1 gün süre ile dinamik üç eksenli deney aletinde 100 kPa konsolidasyon basıncında bekleyen numunelerde $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'c=0.30-0.28$ gerilme aralığı kullanılarak deneyler yapılmıştır. DN69 numunesinin relatif sıkılığı $Dr=\%57$ ve doygunluk değeri $B=0.51$, DN87 numunesinin relatif sıkılığı $Dr=\%55$ ve doygunluk değeri $B=0.52$, DN 13 numunesinin relatif sıkılığı $Dr=\%60$ ve doygunluk değeri $B=0.52$ olarak hesaplanmıştır. $t=10$ gün kür süresine sahip kirlenmiş DN87 numunesi ile aynı doygunluk değerine sahip temiz DN13 numunesi benzer hareket ile sırasıyla $N=90$ ve $N=98$ çevrim sayılarında göçme deformasyon seviyelerine ulaşmıştır. Şekil 6.30' da görüldüğü gibi bu seviyede her iki numunede de boşluksuyu basıncı oranı $r_u=1.00$ dir. $T=45$ gün kür süresine sahip doygunluk değeri $B=0.51$ olan kirlenmiş DN69 numunesi ise $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine $N=69$ çevrimde ulaşmıştır. Bu çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı $r_u=0.98$ olarak ölçülmüştür. Benzer özellikte olan numunelerden ilk olarak $t=45$ gün kür süresine sahip olan DN69 numunesi sıvılaşırken, daha sonra $t=10$ gün kür süresine sahip DN87 numunesi ve en son ise temiz DN13 numunesi sıvılaşma davranışı göstermiştir. Kısa süreli kirlenmedeki

temiz zemin benzeri davranış, 45 gün kirlenmiş numunede farklılaşarak göçme deformasyon çevrim sayısını daha erkene çekmiştir.



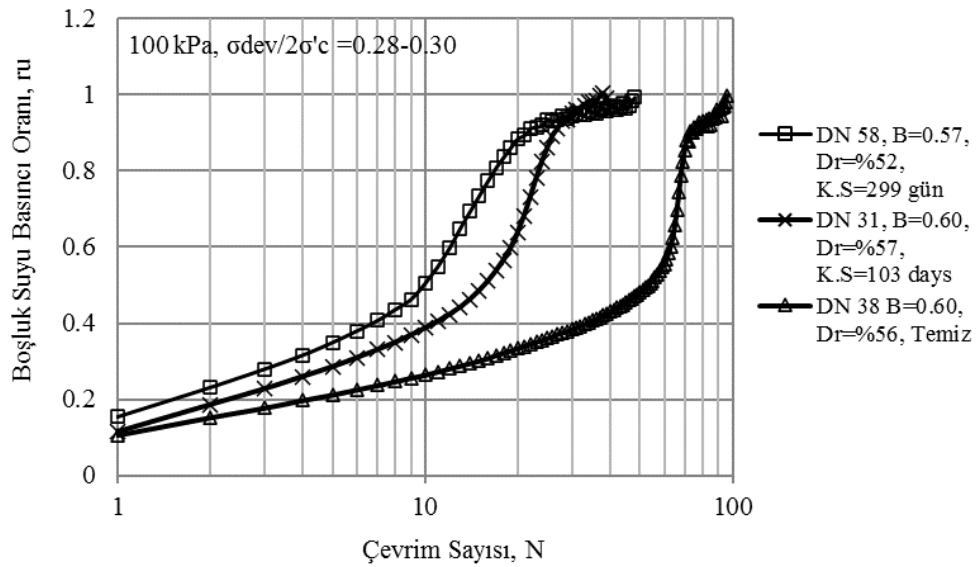
Şekil 6. 31 : DN69 - DN87 – DN13 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.



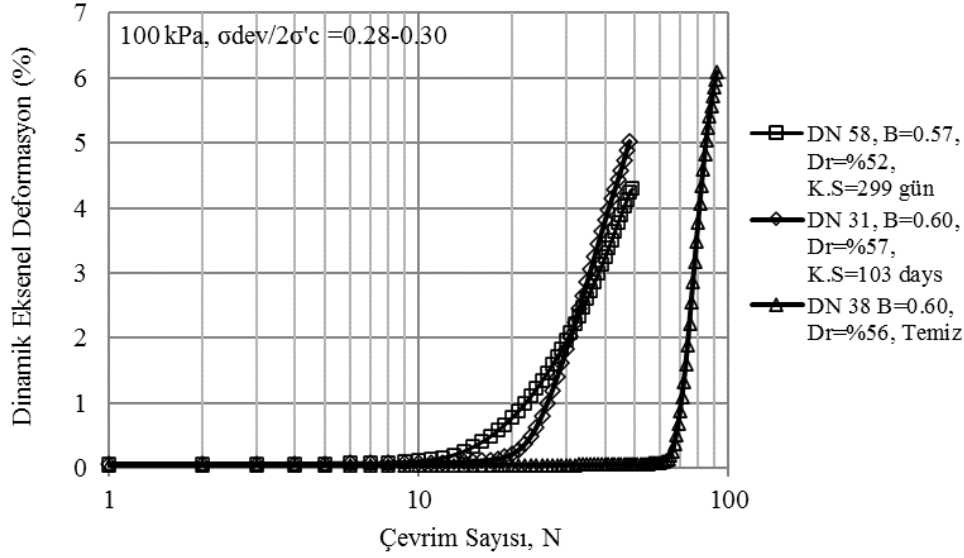
Şekil 6. 32 : DN69 - DN87 – DN13 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.

Farklı kür süreleri kullanılarak $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c=0.30-0.28$ gerilme aralığında yapılan deney setlerinin Şekil 6.33' te boşluksuyu basıncı oranı çevrim sayısı ile Şekil 6.34' te dinamik eksenel deformasyon çevrim sayısı karşılaştırmaları verilmiştir. Temiz DN38

numunesi doygunluk değeri $B=0.60$ ve relatif sıkılığı $Dr = \%56$, $t=103$ gün beklemiş olan kirlenmiş DN31 numunesinin doygunluk değeri $B=0.60$ ve relatif sıkılığı $Dr=\%57$ ve $t=299$ gün kür süresine sahip DN58 numunesinin doygunluk değeri $B=0.57$ ve relatif sıkılığı $Dr=\%52$ olarak hesaplanmıştır. Benzer doygunluk değerlerine sahip üç numuneden $B=0.57$ doygunluk değerine sahip kür süresi $t=299$ gün olan DN58 numunesi ile $B=0.60$ olan DN31 numunesi hızlı boşluk suyu basıncı artışları ile birlikte $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine $N=34$ çevrimde ulaşmıştır. Doymunluk değeri $B=0.60$ olan temiz DN38 numunesi ise boşluk suyu basıncı artışının daha yavaş olmasıyla beraber $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine $N=77$ çevrimde ulaşmıştır. Kirlilik süresinin uzaması tekrarlı yük altındaki kirlenmiş numunelerde boşluk suyu basıncının daha hızlı artmasına ve sıvılaştırmanın daha erken oluşmasına sebep olmaktadır.

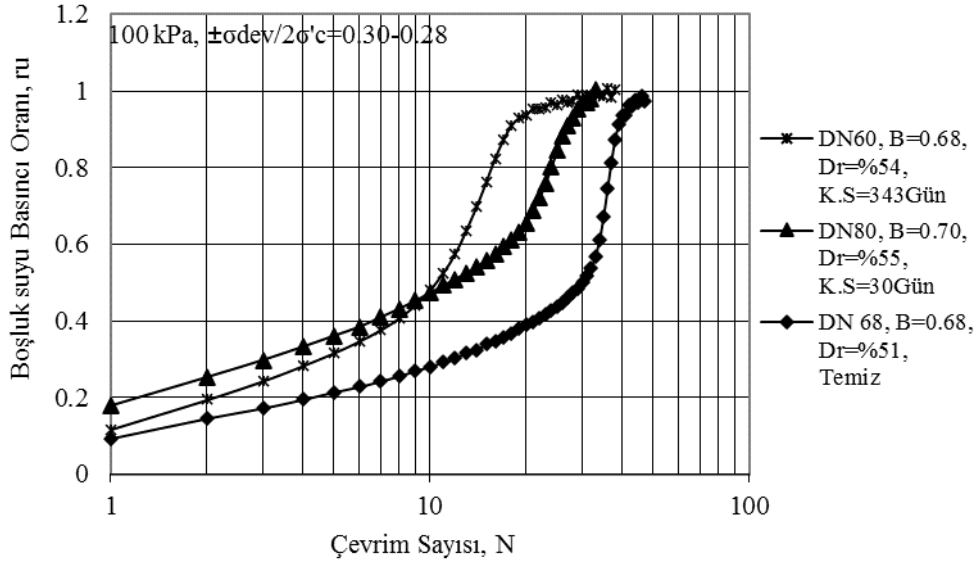


Şekil 6. 33 : DN58 – DN31 – DN38 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.

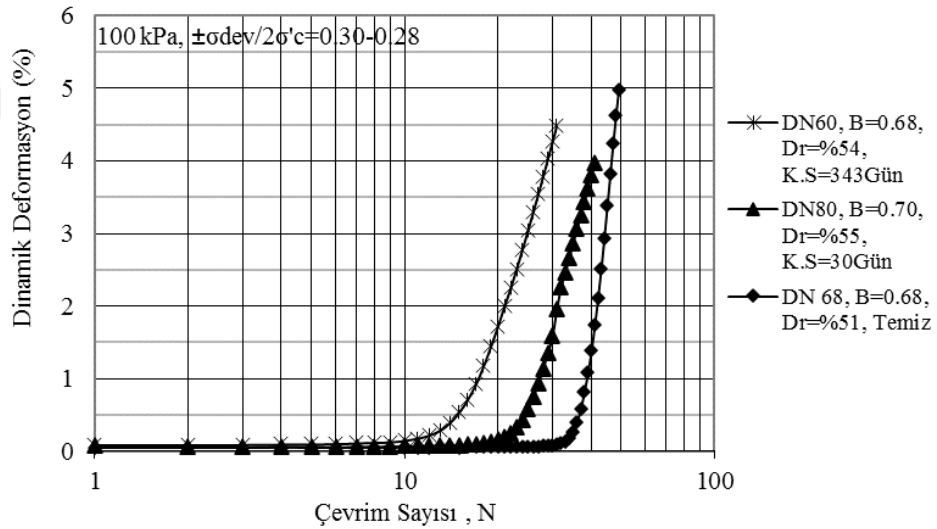


Şekil 6.34 : DN58 – DN31 – DN38 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.

Temiz kum numunesi ile daha uzun kirlenme sürelerine sahip numunelerin boşluk suyu basıncı oranı ile dinamik eksenel deformasyonların çevrim sayıları ile olan değişim grafikleri Şekil 6.35 ve Şekil 6.36’te paylaşılmıştır. T= 343 gün kür süresine sahip kirlenmiş DN60 numunesinin relatif sıkılığı $Dr=\%54$ ve skempton-B değeri 0.68 olarak hesaplanmıştır. Diğer bir kirlenmiş numune olan t=30 gün kür süresine sahip DN80 numunesinin skempton-B değeri 0.70 ve relatif sıkılığı $Dr=\%55$ dir. DN60 numunesi ile aynı skempton-B değerine sahip (0.68) temiz DN68 numunesinin ise relatif sıkılığı $Dr=\%51$ dir. Aynı şartlarda dinamik üç eksenli deney sisteminde tekrarlı eksenel yük verilerek yapılan deneyler sonucunda t=343 gün kür süresine sahip DN60 numunesi N=24 çevrim sonunda $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 0.97$ olarak ölçülmüştür. T=30 gün kür süresine sahip kirlenmiş DN80 numunesi N=33 çevrim sonunda göçme deformasyon seviyesi olan $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır ve bu seviyedeki boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 1.00$ dir. Son olarak ise temiz DN68 numunesi bu deformasyon değerine ulaştığındaki çevrim sayısı N=43 olduğu görülmektedir. Kirlenme süresinin uzaması numunelerde sıvılaşma davranışının daha erken çevrim sayılarında meydana gelmesine sebep olmaktadır.



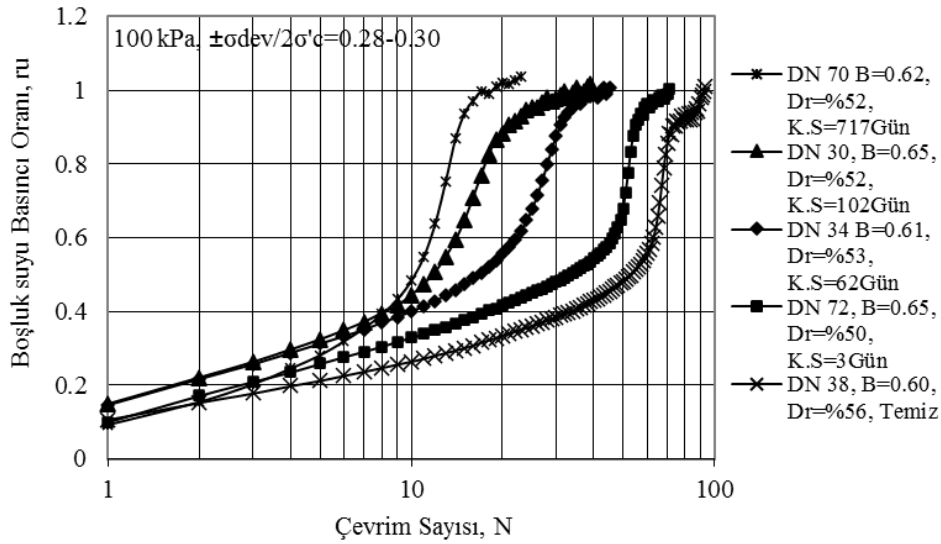
Şekil 6. 35 : DN60 – DN80 – DN68 numunelerine ait boşluk suyu basıncı oranı – çevrim sayısı grafiği.



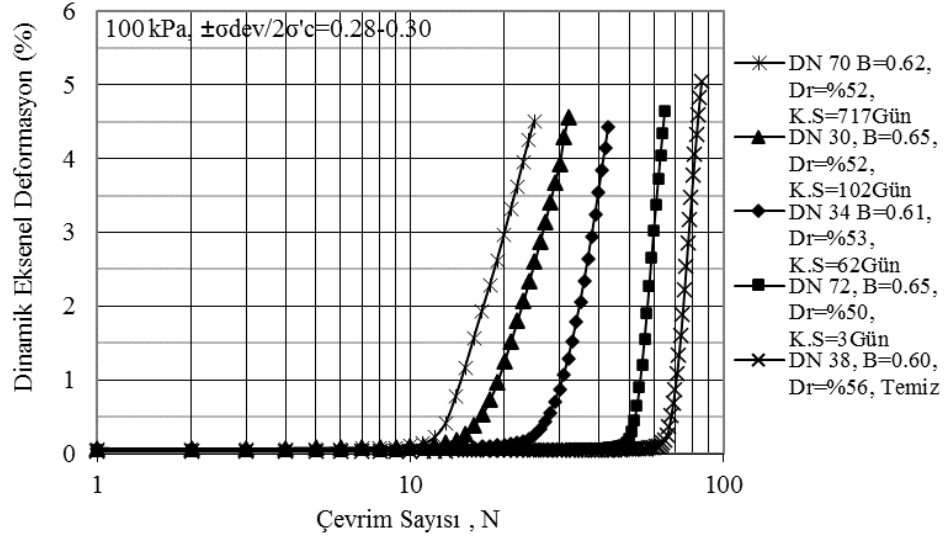
Şekil 6. 36 : DN60 – DN80 – DN68 numunelerine ait dinamik eksenel deformasyon – çevrim sayısı grafiği.

Çöp sızıntı suyunda değişik sürelerde beklemiş relatif sıkılıkları $Dr = \%50$ ile $\%56$ ve doygunluk değerleri $B = 0.60$ ile 0.65 arasında değişen kirlenmiş 4 numune ile benzer özelliklere sahip temiz zemin numunesinin dinamik davranışı Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’ de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.38’de kür süresinin dinamik eksenel deformasyon ve çevrim sayısı ile olan ilişkisi verilen numunelerden ilk olarak doygunluk değeri

B=0.62 olan t=717 gün kür süresine sahip DN70 numunesi N=19 çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşırken, sonrasında t=102 günlük doygunluk değeri B=0.65 olan DN30 numunesi N=26 çevrimde bu değere ulaşmıştır. Doygunluk değeri B=0.61 olan T=62 günlük DN34 numunesi ise N= 40 çevrimde göçme deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Doygunluk değeri B=0.65 olan t=3 günlük kirlenmiş DN72 numunesi ile doygunluk değeri B=0.60 olan temiz DN38 numunesi ise sırasıyla N=59 ve N=77 çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Numunelerde artan kür sayısı beraberinde sıvılaşma davranışını da artırmıştır. Aynı şartlardaki numunelerde kür süresi artışı ile sıvılaşma hızı doğru orantılı olarak artmıştır.



Şekil 6. 37 : Kür süresinin boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısına etkisi



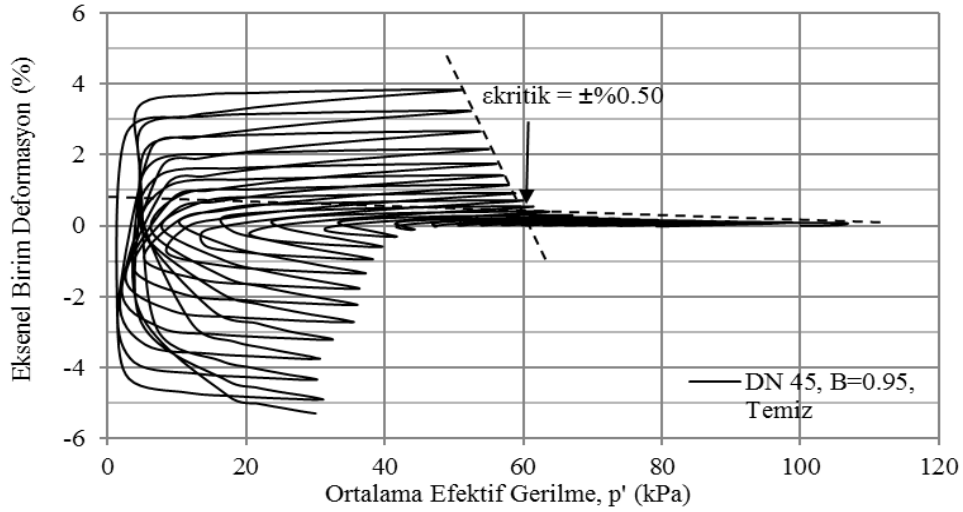
Şekil 6.38 : Kür süresinin dinamik eksenel deformasyon - çevrim sayısına etkisi

6.4.1. Kirlenmiş zeminlerde kritik deformasyon seviyesinin belirlenmesi ve temiz zeminler ile karşılaştırılması

Zeminlerde kayma gerilmeleri eksenel birim deformasyonlar ve boşluk suyu basınçları oluşturacak kadar yeterli büyüklüğe sahip olduğu zaman zemindeki eksenel birim deformasyonlar zeminin yumuşamasından ve sıvılaşmanın aniden başlamasından dolayı artar (Kaya Z., 2008). Eksenel birim deformasyonların, efektif gerilmenin azalmasıyla birlikte hızla artmaya başladığı bir deformasyon seviyesi vardır. Göçme deformasyonu öncesi oluşan bu seviye kritik deformasyon seviyesi olarak tanımlanır. Çalışmanın bu kısmında temiz zemin ve farklı kür sürelerindeki çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş zeminlerin kritik deformasyon seviyesi belirlenerek karşılaştırılmıştır. Bu deformasyon seviyesi belirlenirken önce ortalama efektif gerilme (p') aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

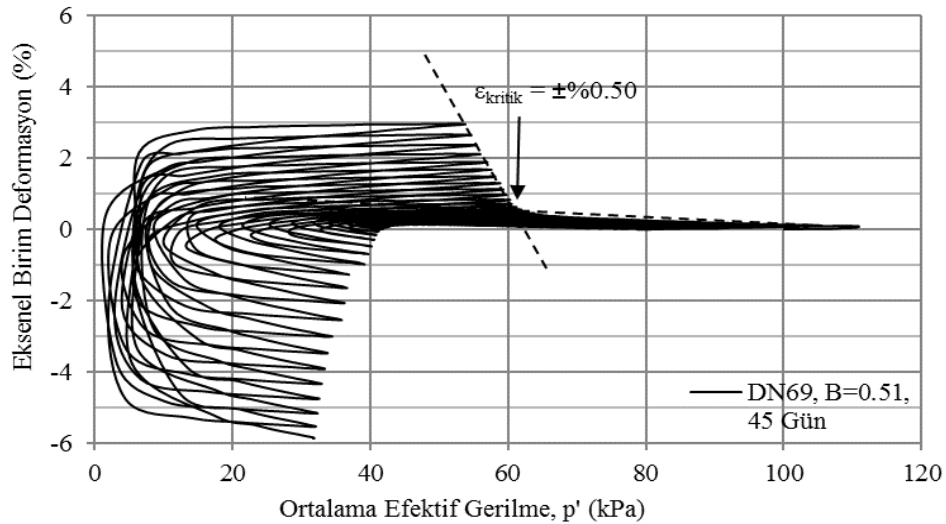
$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (6.2)$$

Şekil 6.39' de ortalama efektif gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği verilen doymun durumdaki DN45 temiz zemin numunesinde x ve y eksenli teğetlerinin kesiştiği nokta kritik deformasyon seviyesi olarak belirlenmiştir.

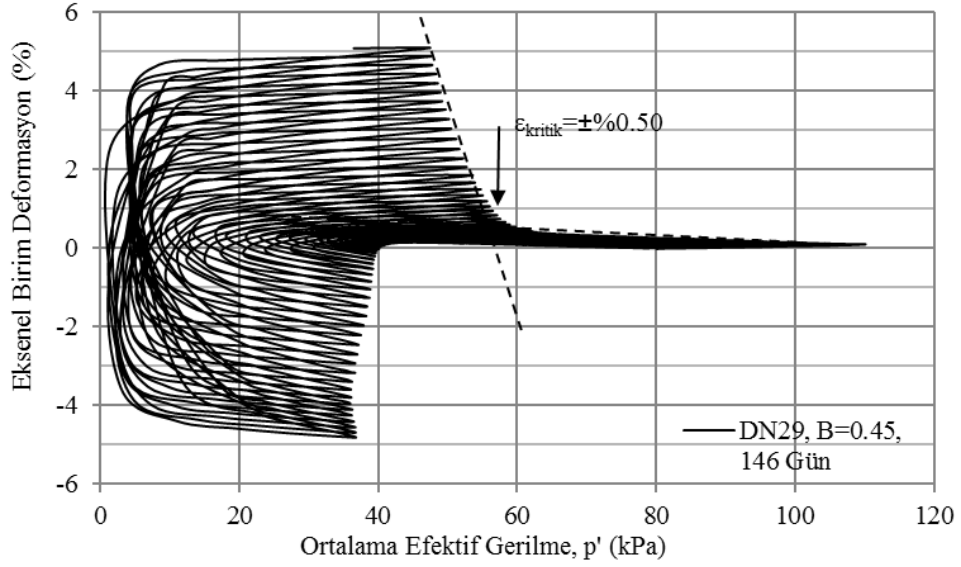


Şekil 6. 39 : DN45 numunesine ait eksenel birim deformasyon - ortalama efektif gerilme davranışı.

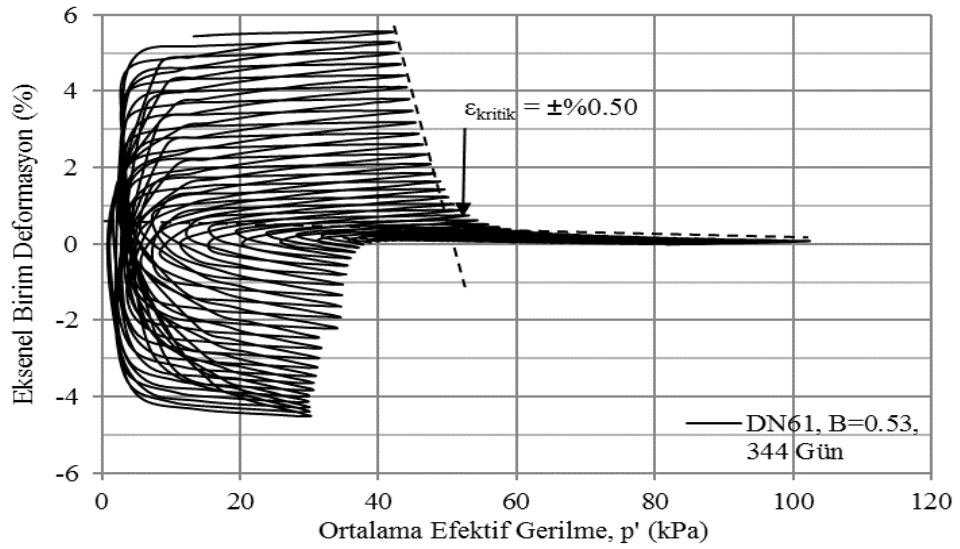
Temiz zemin numunesinde kritik deformasyon seviyesi $\epsilon_{\text{kritik}} = \pm\%0.50$ olarak bulunmuştur. Aynı şekilde farklı kür sürelerinde çöp sızıntı suyunda bekletilen numunelerin eksenel birim deformasyon ile ortalama efektif gerilme grafiği Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42’ de gösterilmiştir. Kirlenmiş farklı kür sürelerindeki kısmi doymun durumdaki numunelerde kritik deformasyon seviyesi $\epsilon_{\text{kritik}} = \pm\%0.50$ olarak belirlenmiştir. Temiz zemin numunesi ile farklı kür sürelerindeki kirlenmiş numuneler benzer davranış göstermiş olup kritik deformasyon seviyeleri aynı bulunmuştur.



Şekil 6. 40 : DN69 numunesine ait eksenel birim deformasyon - ortalama efektif gerilme davranışı.



Şekil 6. 41 : DN29 numunesine ait eksenel birim deformasyon - ortalama efektif gerilme davranışı.

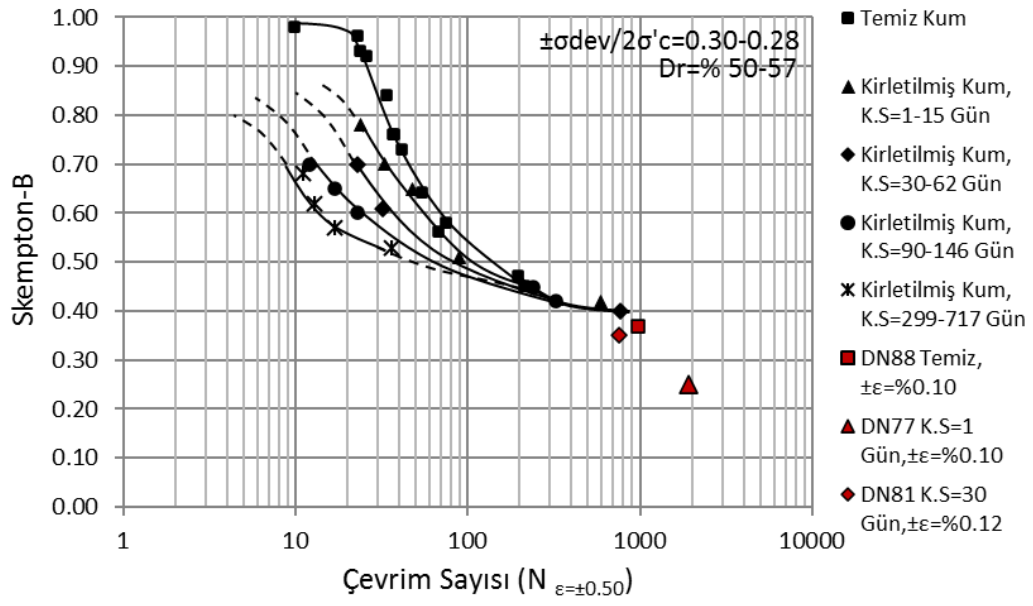


Şekil 6. 42 : DN61 numunesine ait eksenel birim deformasyon- ortalama efektif gerilme davranışı.

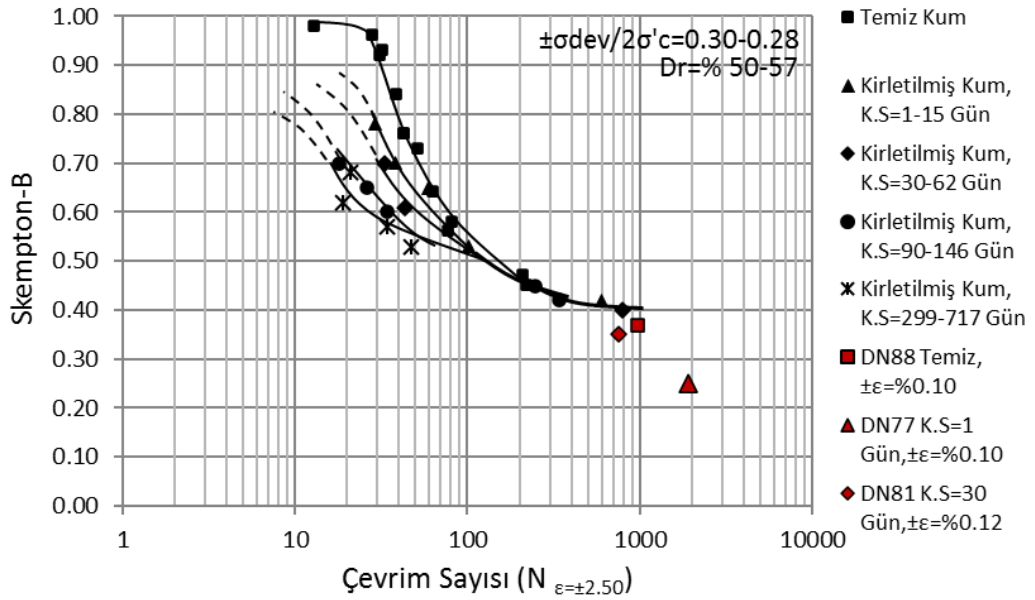
Doygunluğun kritik deformasyon seviyesindeki çevrim sayısı ($N_{\epsilon=\pm\%0.5}$) ile olan ilişkisinin gösterildiği Şekil 6.43 ve doygunluğun göçme deformasyon seviyesindeki çevrim sayısı ($N_{\epsilon=\pm\%2.5}$) ile olan ilişkisinin gösterildiği Şekil 6.44 grafikleri aşağıda verilmiştir. Farklı kür sürelerindeki numuneler ile $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_c=0.30-0.28$ gerilme aralığında yapılan deneylerde numunelerin relatif sıkılıkları $D_r = \%50$ ile $\%57$ aralığında hesaplanmıştır. Çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numuneler 1-15 gün, 30-62

gün, 90-146, 299-717 günlük süreler olmak üzere farklı kür sürelerine göre gruplandırılarak grafiklerde gösterilmiştir. Ayrıca kritik deformasyon ve göçme deformasyon seviyesine ulaşmamış temiz ve kirlenmiş numunelerde grafik üzerinde kırmızı ile gösterilerek bu deformasyon seviyelerindeki şekil-değiştirme değerleri yanlarına yazılmıştır.

Şekil 6.43’de doygunluğun azalması tüm numunelerde sıvılaşma direncini artırmıştır. Artan doygunlukla beraber kirlenme etkisi nedeniyle kirlenmiş numunelerde kür süresi ile doğru orantılı bir şekilde sıvılaşma potansiyeli artmaktadır. Özellikle uzun kür sürelerine sahip doygunluk değeri daha yüksek olan kısmi doygun kirlenmiş numuneler $N=20$ çevrime kadar doygun temiz zemin numunelerine benzer davranış sergilemişlerdir. Doygunluk değeri $B=0.50$ ’ nin altına düştüğünde ise kirlenmenin dinamik davranışa etkisi olmadığı görülmektedir. Daha düşük doygunluk değerlerinde ($B \leq 0.35$) ise deformasyonlar küçük seviyelerde kalmaktadır. Aynı grup numunelerin Şekil 6.44’de göçme deformasyon seviyelerindeki davranışını incelediğimizde ise kritik deformasyon seviyesindeki benzer davranış göçme deformasyon seviyesinde de görülmektedir. Bununla birlikte $t= 90$ gün üzeri kirlenmiş numunelerin göçme deformasyon çevrim sayıları birbirine yaklaşırken, daha düşük kür süreli numunelerin ise temiz zemine yaklaştığı gözlenmiştir. Doygunluk değerinin $B=0.50$ ’ nin altına düştüğünde ise kirlenme etkisinin benzer şekilde kalmadığı gözlenmiştir. Doygunluk değeri ($B \leq 0.35$) olan numunelerde ise geçen süre zarfında tekrarlı yük devam etmesine rağmen deformasyonlarda değişiklik olmamıştır.



Şekil 6. 43 : Temiz ve kirlenmiş numunelerin skempton-B - $N_{\varepsilon=\pm 0.5}$ ile ilişkisi.



Şekil 6. 44 : Temiz ve kirlenmiş numunelerin skempton-B - $N_{\varepsilon=\pm 2.5}$ ile ilişkisi.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında dinamik üç eksenli deney sisteminde kirlenmiş ve temiz kum zeminler üzerinde dinamik deneyler yapılarak numunelerin doymuş ve kısmi doymuş durumdaki gerilme, şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı değişimleri incelenmiştir. Başlangıçta doymuş durumdaki kum numune davranış biçimi çıkarılarak en büyük elastisite modülü hesaplanmıştır. Daha sonra farklı doymuşluk değerine sahip temiz numuneler, yapısı itibari ile doymuş olmayan kirlenmiş kum numuneler ile karşılaştırılmıştır. Modifiye edilmiş çelik kalıpta hazırlanarak kür havuzuna bırakılan en az 1 ve en fazla 717 gün kür süresine sahip bu numuneler dinamik üç eksenli deney aletinde bir gün süre ile 100 kPa konsolidasyon basıncında bekledikten sonra ertesi gün dinamik deneyleri yapılmıştır.

İlk grup deneylerle doymuş temiz kum numunelerin ($B \geq 95$) gerilme-şekil değiştirme davranışı incelenerek dinamik mukavemet eğrisi çıkarılmıştır. Seed ve Idriss (1971) yapmış oldukları basitleştirilmiş yöntem yaklaşımına göre $M_w=7.5$ büyüklüğündeki depreme tekabül eden tekrarlı gerilme oranının $N=20-30$ çevrim sayısına ulaştığında sıvılaşmanın gözlemlendiğini hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında yapılan doymuş temiz kum deneyleri sonucunda bu çevrim sayılarına tekabül eden dinamik gerilme oranı $\pm \sigma_{dev}/2\sigma'_c=0.30-0.28$ aralığında bulunmuştur.

İkinci grup deneylerde düşük doymuşluk değerlerinde hazırlanan kısmi doymuş temiz kum numuneleri dinamik üç eksenli deney aletine yerleştirilerek 1 gün süre ile 100 kPa basınç altında konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolidasyon sonrası boy ve hacim değişimleri ölçülen numunelere dinamik eksenel yük verilerek gerilme - şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı değişimleri gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi büyük gerilme altında hızlı artan boşluk suyu basıncı ve dinamik eksenel şekil değiştirmeler ile birlikte numuneler göçme deformasyonuna daha hızlı ulaşmaktadır. Gerilme seviyesi düşürüldüğünde ise boşluk suyu basıncı oluşumları ve eksenel şekil değiştirmeler yavaşlamaktadır. Aynı şekilde doymuşluk değerinin düşmesi de eksenel

deformasyonları ve boşluk suyu basıncı oluşumlarını yavaşlatmaktadır. Düşen doygunluk değeri ile beraber göçme deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli çevrim sayısı artmıştır. Relatif sıkılık oranı $D_r = \%50 - \%57$ aralığındaki kısmi doygun temiz numunelerde $\pm \sigma_{dev} / 2\sigma'c = 0.30 - 0.28$ aralığında doygunluk değeri $B = 0.45$ altına düştüğünde ise sıvılaşma gözlenmemiştir.

Çalışmanın konusunu oluşturan son grup deneyler ise çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş olan kum numuneler üzerinde yapılmıştır. Çöp sızıntı suyu içeriğindeki organik, inorganik madde ve ağır metaller ile zeminlerin kimyasal ve fiziksel olarak etkileyerek yapısını bozmaktadır. Kohezyonlu zeminlerin çöp sızıntı suları vasıtasıyla kirlenmesi çoğu araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Çöp sızıntı suyu bu tür zeminlere organik olarak etki ederek zeminin kayma mukavemetini, kıvam limitlerini ve permeabilitesini değiştirmektedir. Bu çalışmada 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde modifiye çelik kalıplarda hazırlanan kum numuneler sızıntı suyu havuzuna bırakılarak kür süreleri başlatılmıştır. Değişik kür sürelerine sahip numuneler dinamik üç eksenli deney aletine yerleştirilerek 1 gün süre ile 100 kPa konsolidasyon basıncı altında konsolide edildikten sonra relatif sıkılık ve doygunluk değerleri ölçülerek dinamik deneyler yapılmıştır. Deneylerde doygunluğun ve kür süresinin (kirlenmenin) kum numuneleri etkileri araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında çöp sızıntı suyuyla kirlenmiş numunelerin ilk olarak doygunluk değeri ile olan davranış değişiklikleri araştırılmıştır. Farklı doygunluk değerindeki numunelerin doygunluk dereceleri hesaplanarak teorik eğri üzerinde gösterilmiştir. Bu hesaplar neticesinde kirlenmiş numunelerin skempton-B ile doygunluk derecesi (S_r) arasındaki ilişkinin teorik eğri üzerinde çakıştığı görülmüştür.

Relatif sıkılığı $D_r = \%53$ ile $\%57$ arasında değişen kısa kür süresine sahip 1-15 günlük farklı doygunluk değerlerindeki numunelerin aynı gerilme seviyesinde yapılan deneyleri sonucunda kirlenmiş kum numunelerin temiz zemin numuneleri gibi benzer davranış sergilediği görülmüştür. Düşen doygunluk değeri ile birlikte çöp sızıntı suyuyla kirlenmiş numunelerde sıvılaşma direnci gözlenmiştir. Doygunluk değeri $B = 0.25$ değerinde ise sıvılaşma oluşmamıştır.

Kirlenmenin dinamik davranışa etkisinin gözlemlemek amacıyla değişik kür sürelerinde yapılan dinamik çalışmalarda farklı kür sürelerinde benzer özellikteki kirlenmiş numuneler kullanılmıştır. Bu numunelerle yapılan deneyler temiz zemin numuneleri ile kıyaslanarak kirlilik etkisi incelenmiştir. Kısa kür süreli numuneler kirlenmenin düşük doygunlukta dinamik davranışa etkisi olmadığı ancak kür süresi $t=10-15$ gün süreli numunelerde doygunluk değerinin artması ile sıvılaşma potansiyelinin az olsa da arttığı görülmüştür. Kür süresinin uzaması ile birlikte benzer relatif sıkılıktaki ve benzer doygunluk değerine sahip numunelerde, temiz ve daha kısa kür süreli numunelere göre eksenel şekil değiştirmelerin ve boşluk suyu basıncı artışlarının hızlandığı ve göçme deformasyon çevrim sayısına daha erken ulaştığı gözlenmiştir. Sızıntı suyu ile kirlenmiş zeminlerde kür süresi arttıkça sıvılaşma aynı şartlardaki kirlenmiş ve temiz zemin numunelerine göre daha erken çevrim sayılarında oluşmaktadır. Doygunluk değerinin artması kirlenmiş kumların sıvılaşma potansiyelini daha fazla artırırken, düşen doygunluk değeri ile birlikte sıvılaşma direnci de artmaktadır. Doygunluk değeri $B=0.50$ 'nin altına düştüğünde kirlenmenin dinamik davranışa etkisi kalmamış olup, $\pm\sigma_{dev}/2\sigma'c=0.30-0.28$ gerilme aralığında doygunluk değeri $B=0.40$ değerinin altında sıvılaşma oluşmamaktadır.

Son olarak ise temiz zemin ve farklı kür sürelerindeki çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş zeminlerin kritik deformasyon seviyesi belirlenerek karşılaştırılmıştır. Efektif gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği üzerinde belirlenen kritik deformasyon seviyesi hem temiz hem de farklı kür sürelerindeki kirlenmiş numuneler için $\epsilon_{kritik} = \pm\%0.50$ olarak bulunmuş ve davranış bakımında benzer olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca temiz ve farklı kür sürelerindeki numuneler üzerinde dijital mikroskop altında yapılan incelemeler sonucunda kür süresi arttıkça kirlenmenin arttığı görülmekte olup, çöp sızıntı suyunun kimyasal ve biyolojik reaksiyonundan ziyade; içerdiği organik ve inorganik malzemelerin çökmesinden dolayı fiziksel etkiyle kum numunelerinin sıvılaşma davranışını etkilemektedir.



KAYNAKLAR

- Andreottola, G. & Cannas, P.** (1992). *Chemical and Biological Characteristics of Landfill Leachate*, E&FN Spon, and Imprint of Chapman&Hall, Row, London.
- Anderson, L. R., Keaton, J. R., Aubry, K. & Ellis, S. J.** (1982). *Liquefaction Potential Map for Davis County*, Utah. Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah, Retrieved from <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/imap/5a78750be4b00f54eb1e4228>
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H. & Roesset, J. M.** (1991). Liquefaction of Gravelly Soil at Pence Ranch During the 1983 Borah Peak, Idaho Earthquake. *First International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering V*, Karlsruhe, Germany, September 23-26.
- Arab, A., Belkhatir, M. & Sadek, M.** (2015). Saturation Effect on Behavior of Sandy Soil Under Monotonic and Cyclic Loading: A Laboratory Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering* 34 (1), 347-358.
- Arulanandan, K.** (1977). Method and Apparatus for Measuring In-Situ Density and Fabric Soils. *Patent Application*, Regents of the University of California, Berkeley, California.
- Arulmoli, K., Arulanandan, K. & Seed, H. B.** (1985). New Method for Evaluating Liquefaction Potential," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. GT1.
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. & Pasqualini, E.** (1985). Penetration Resistance and Liquefaction of Sands. Proceedings of the *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, U.S, August 12-16.
- Bierschwale, J. G. & Stokoe, K. H., II**, (1984). Analytical Evaluation of Liquefaction Potential of Sands Subjected to the 1981 Westmoreland *Earthquake*. *Geotechnical Engineering Report GR-84-15*, Civil Engineering Department, University of Texas, Austin, Texas.
- Bishop, A. W.** (1959). The Principle of Effective Stress. *Teknisk Ukeblad* 106(39):859–863.
- Campanella, R. G. & Robertson, P. K.** (1984). A Seismic Cone Penetrometer to Measure Engineering Properties of Soil. *Proceedings of the Fifty-fourth Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists*, Atlanta, Georgia. January 1984.

- Casagrande, A.** (1940). Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 1936, reprinted in *Contributions to Soil Mechanics*, 1925 to 1940, Boston Society of Civil Engineers, Oct.
- Casagrande, A.** (1975). Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands, A Critical Review. Proceedings of the *5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (vol. 5, pp. 79-133), Buenos Aires, Argentina.
- Castro, G.** (1969). *Liquefaction of Sands*. Thesis Presented to Harvard University in Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Castro, G.** (1975). Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, (vol. 101, pp. 551-569), New York, US.
- Castro, G., Poulos, S. J., France, J. W. & Enos, J. L.** (1982). Liquefaction Induced by Cyclic Loading. *Report to National Science Foundation, Geotechnical Engineers, Inc.*, Winchester, Massachusetts.
- Chameau, J. L. & Clough, G. W.** (1983). Probabilistic Pore Pressure Analysis for Seismic Loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 109, No. GT4.
- Chen, Q. & Indraratna, B. F.** (2014). Deformation Behavior of Lignosulfonate-Treated Sandy Silt under *Cyclic Loading*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, ISSN 1090-0241/ 06014015.
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Bjerg, P. L., Jensen, D. L., Christensen, J. B., Baun, A., Albrechtsen, H. J., Heron, G.** (2001). Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes, *Applied Geochemistry*, (Vol:16, No:7-8, pp. 659-718).
- Christensen, T. H. & Cossu, R., Stegmann, R.** (1992). *Landfilling of Waste: Leachate*. CRC press, Florida.
- Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R.** (1989). *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Academic Press Inc, San Diego.
- Das, B. M. & Ramana, G.V.** (2010). *Principles of Soil Dynamics*. Cengage Learning, Stamford.
- Day, R. W.** (2002). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*, McGraw-Hill Companies, New York.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B. & Nusslein, K.** (2006). Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(11): 1381-1392.
- Dobry, R.** (1989). Some Basic Aspects of Soil Liquefaction during Earthquakes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 558: 172-182. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1989.tb22567.x>

- Dobry, R., Powell, D. J., Yokel F. Y. & Ladd, R. S.** (1980). Liquefaction Potential of Saturated Sand - *The Stiffness Methods. Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering*, (Vol: 3 pp.25-33), Istanbul, Turkey.
- Dobry, R., Yokel, F. Y. & Ladd, R. S.** (1981). Liquefaction Susceptibility from S-Wave Velocity. *ASCE National Convention*, St. Louis, Missouri, October.
- Douglas, B. J., Olsen, R. S. & Martin, G. R.** (1981). Evaluation of the Cone Penetrometer Test for SPT-Liquefaction Assessment. In Situ Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility, Preprint 81-544, *ASCE National Convention*, St. Louis, Missouri.
- Elibol, B. ve Erken, A.** (2005). Doygun, kısmi doygün ve kuru kum numunelerin dinamik davranışlarının incelenmesi, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, Antalya, 22-24 Kasım.
- Erken, A., Ansal, A., Yaşargün, A., Şener, A. ve Demir, G.** (2009). The Cyclic Behavior of Undisturbed Low Plasticity Clays by Polluted Leachate in Sanitary Landfill Sites. *Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference XVIIth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt. 2-3. October.
- Erken, A. ve Yaşargün, A.** (2010). The Post Cyclic Monotonic Strength of Polluted Undisturbed Soils. *14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Republic of Macedonia, 30 August - 3 September.
- Erken A. ve Yaşargün A.** (2015). The Post Cyclic Monotonic Stress of Undisturbed Low Plasticity Clays by Polluted Leachate in Sanitary Landfill Sites. *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand, 1-4 November.
- Fardis, M. N. & Veneziano, D.** (1982). Probabilistic Analysis of Deposit Liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 108, No. GT3.
- Finn, W. D. L., Brandy, P. L. & Pickering, D. L.** (1970). Effect of Strain History on Liquefaction of Sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 96, No. GT6.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H.** (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. A Wiley-Interscience Publication, New York.
- Fritzges, M. B.** (2005). *Biologically Induced Improvements of the Response of Sands to Monotonic Loading*. M.S. Thesis, University of Massachusetts, Boston.
- GDP-9 Report.** (2015). Liquefaction Potential of Cohesionless Soils. State of New York Department of Transportation Geotechnical Engineering Bureau. (Report No: EB-15025) Newyork, Geotechnical Design Procedure Report.
- Gratchev, I. B. & Sassa, K.** (2013). Cyclic Shear Strength of Soil with Different Pore Fluids. *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (10) 1817-1821.

- Gratchev, I., Sassa, K. & Fukuoka, H.** (2006). On the Role of pH in the Cyclic Behavior of Fine-Grained Soils. In Proceedings of the Interpraevent International Symposium Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, in Niigata, Japan, pp. 403–409. September, 25 – 27.
- Haldar, A., & Tang, W. H.** (1979). Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. GT2.
- Huat, B. B. K.** (2004). *Organic and Peat Soils Engineering*. University Putra Malaysia Press.
- Ishihara, K., Tsuchiya, H., Huang, Y. & Kamada, K.** (2001). Recent studies on liquefaction studied on sand – effect of saturation. *Proceedings of 4th International Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego 26-31 March.
- Ishihara, K.** (1985). Stability of Natural Deposits During Earthquakes. Proceedings of the Eleventh *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol. 1, pp. 321-76.
- Ishihara, K.** (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford University Press Inc., New York.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. & Yasuda, S.** (1978). A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan. *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application*. Vol. 2, pp. 885-96.
- Kaya Z.** (2008). *Depremler sırasında zeminlerin davranışına bağlı olarak meydana gelen zemin deplasmanlarının belirlenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kishida, H.** (1969). Characteristics of liquefied sands during Mino-Owari, Tohnankai and Fukui earthquakes. *Soils and Foundations*, IX, No.1 pp.75-92.
- Kokusho, T.** (1980). Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. *Soils and Foundations*, 20, 45-60.
- Kovacs, W. D., Yokel, F. Y., Salomone, L. A. & Holtz, R. D.** (1984). Liquefaction Potential and the International SPT. *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, Volume 3, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Kramer, S. L.** (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Kumar, K.** (2008). *Basic Geotechnical Earthquake Engineering*. New Age International (p) Limited, Publishers 4835/24, New Delhi.
- Lade, P. V. & Hernandez, S. B.** (1977). Membrane Penetration Effects in Undrained Tests. *Journal of Geotechnical Engineering Division* 103:109–125.

- Liao, S., Veneziano, P. & Whitman, R.** (1988). Regression Model for Evaluating Liquefaction Probability. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 114, No. GT4.
- Matteo, L. D., Bigotti, F. & Ricco, R.** (2011). Compressibility of Kaolinitic Clay Contaminated by Ethanol-Gasoline Blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137(9):846-849.
- National Research Council.** (1985). *Liquefaction of Soils During Earthquakes. Committee on Earthquake Engineering*, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
- Poulos, S. J.** (1981). The Steady State of Deformation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, No. GT5.
- Poulos, S. J., Castro, G. & France, J. W.** (1985). Liquefaction Evaluation Procedure. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. GT6.
- Resmi, G., Thampi, S. G. & Chandrakaran, S.** (2011). Impact of Lead Contamination on the Engineering Properties of Clayey Soil, *Journal Geological Society of India*, Vol.77, pp.42-46.
- Robertson, P. K. & Campanella, R. G.** (1985). Liquefaction Potential of Sands Using the CPT. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. GT3.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G. & Wightman, A.** (1983). SPT-CPT Correlations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, Vol. 109, No. GT11.
- Seed, H. B.** (1968). Landslides During Earthquakes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 94, No. SM5, September.
- Seed, H. B.** (1979). Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. GT2.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M.** (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Rep. No. EERC 70-10, *Earthquake Engineering Res. Ctr.*, Univ. of California, Berkeley, California.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M.** (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(SM9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. & Arango, I.** (1983). Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 109, No. GT3.
- Seed, H. B., Mori, K. & Chan, C. K.** (1977). Influence of Seismic History on Liquefaction of Sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT4.

- Seed, H. B., Seed, R. B., Harder, L. F. & Jong, H. L.** (1989). Examination of the Post-Earthquake Slide of February 9, 1971. Re-evaluation of the Lower San Fernando Dam Report 2, (Report GL-89-2), Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., Contract, September.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. & Chung, R. M.** (1985). Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 3, No. GT12.
- Sherif, M. A., Ishibashi, I. & Tsuchiya, C.** (1977). Saturation Effects on Initial Soil Liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT8.
- Singh, S., Donovan, N. C. & Park, F.** (1980). A Re-examination of the effect of Prior Loadings on the Liquefaction Resistance of Sands, *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, Istanbul, Turkey.
- Skempton, A. W.** (1954). The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Geotechnique*, (4): 143-147.
- Tatsuoka, F & Iwasaki, T.** (1978). Hysteretic Damping of Sands Under Cyclic Loading and Its Relation to Shear Modulus. *Soils and Foundations*, (18): 25-40.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. A.** (1993). *Integrated Solid Waste Management- Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill International Editions, Michigan.
- Tekinsoy, M. A.** (2005). Doymamış Zeminlerin Özellikleri. 1. *Geoteknik Sempozyumu*, Adana, 26-27 Ekim.
- Terzaghi, K.** (1936). Relation Between Soil Mechanics and Foundation Engineering: Presidential Address. *Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Boston. 13-18 March.
- Tinsley, J. C., Youd, T. L., Perkins, D. M. & Chen, A. T. F.** (1985). Evaluating Liquefaction Potential, *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region, an Earth Science Perspective*, Professional Paper 1360, J. I. Ziony, Ed., U.S. Geological Survey.
- Tsuchida, H.** (1970). Prediction and Countermeasure Against the Liquefaction in Sand Deposits. *Abstract of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute*, p 3.1-3.33.
- Tsukamoto, K., Aoyama, J. & Miller, M. J.** (2002). Migration, speciation, and the evolution of diadromy in anguillid eels. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59, 1989–1998. (doi:10. 1139/f02-165).
- Turer, D.** (2007). Effect of Heavy Metal and Alkali Contamination on the Swelling Properties of Kaolinite, *Environmental Geology*, 52(3):421-425.
- Türkiye İstatistik Kurumu.** (2021). *Belediye Atık İstatistikleri Raporu*. (Sayı No: 37198). Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu, 23 Kasım 2021.

- Verrujit, A.** (2010). *An Introduction to Soil Dynamics*. Springer, Dordrecht Heidelberg, London - New York.
- Walker, A. J. & Steward, H. E.** (1989). Cyclic Undrained Behavior of Nonplastic and Low Plasticity Silts. (Technical Report: NCEER-89-0035), National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY at Buffalo.
- Yegian, M. & Whitman, R. V.** (1978). Risk Analysis for Ground Failure by Liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. GT7.
- Yoshimi, Y., Tanaka, K. & Tokimatsu, K.** (1989). Liquefaction Resistance of Partially Saturated Sand. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundation* V.29, No.3, pp 157–162.
- Youd, T. L.** (1984). Geologic Effects - Liquefaction and Associated Ground Failure. Proceedings of the Geologic and Hydrologic Hazards Training Program, (Open-File Report: 84-760), U.S. Geological Survey, Menlo Park, California.
- Youd, T. L. & Hoose, S. N.** (1977). Liquefaction Susceptibility and Geologic Setting. *Proceedings of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering, Volume 3*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Youd, T. L. & Perkins, M.** (1978). Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential, *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, Vol. 104, No. GT4.
- Youd, T. L., Tinsley, J. C., Perkins, D. M., King, E. J. & Preston, R. F.** (1978). Liquefaction Potential Map of San Fernando Valley, California, *Proceedings of the Second International Conference on Microzonation for Safety Construction- Research and Applications, Volume 1*, National Science Foundation, Washington, D.C.
- Zainorabidin, A., Wijeyesekera, D. C. & Masirin, M. I. M.** (2007). Comparative Study of Malaysian Peat and British Peat Pertaining to Geotechnical Properties. In *Proceedings of Sri Lankan Geotechnical Society's First International Conference on Soil and Rock Engineering*, Colombo, Sri Lanka, 5-11 August.



EKLER

EK A: TEMİZ NUMUNELERİN DİNAMİK DENEY GRAFİKLERİ

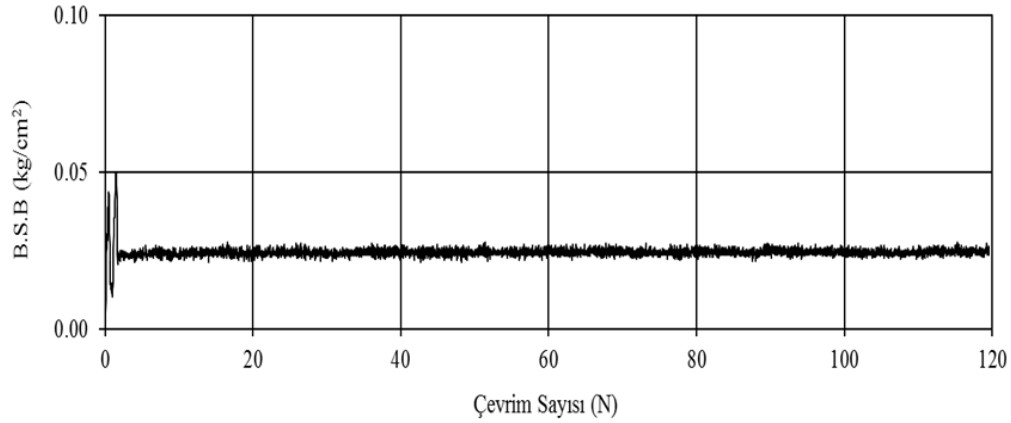
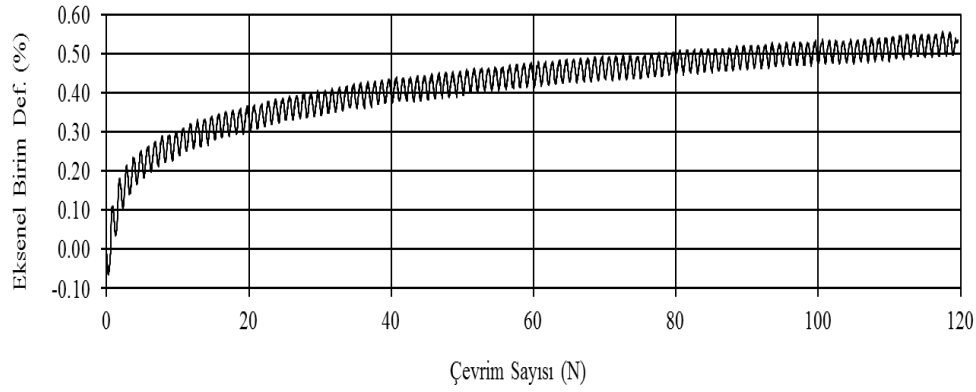
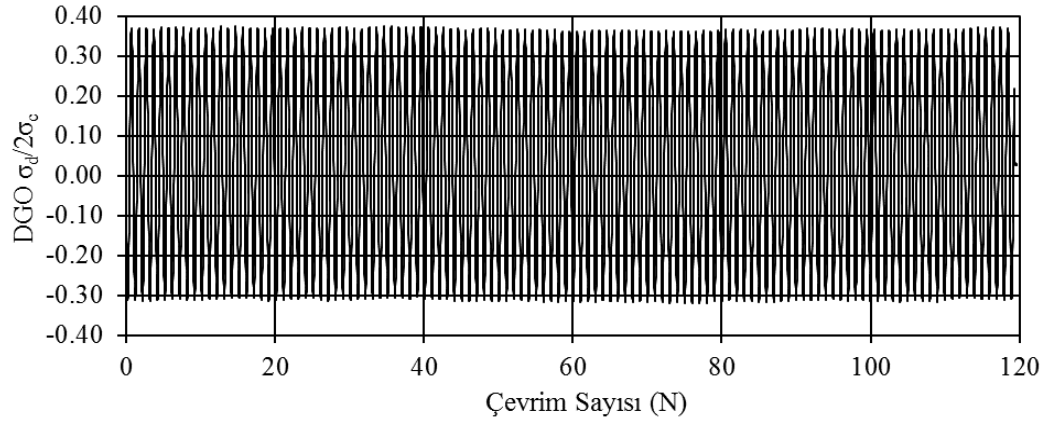
EK B: KİRLENMİŞ NUMUNELERİN DİNAMİK DENEY GRAFİKLERİ

**EK C: TEMİZ VE FARKLI KÜR SÜRELERİNDEKİ NUMUNELERİN
DİJİTAL MİKROSKOP GÖRÜNTÜSÜ**



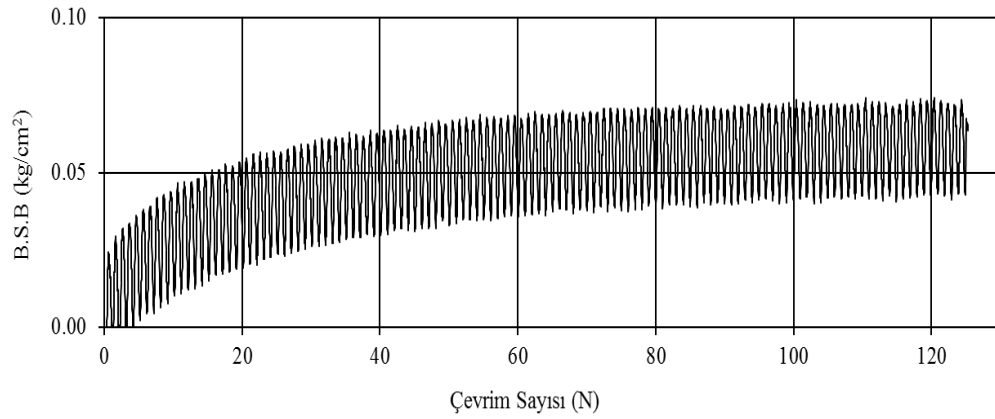
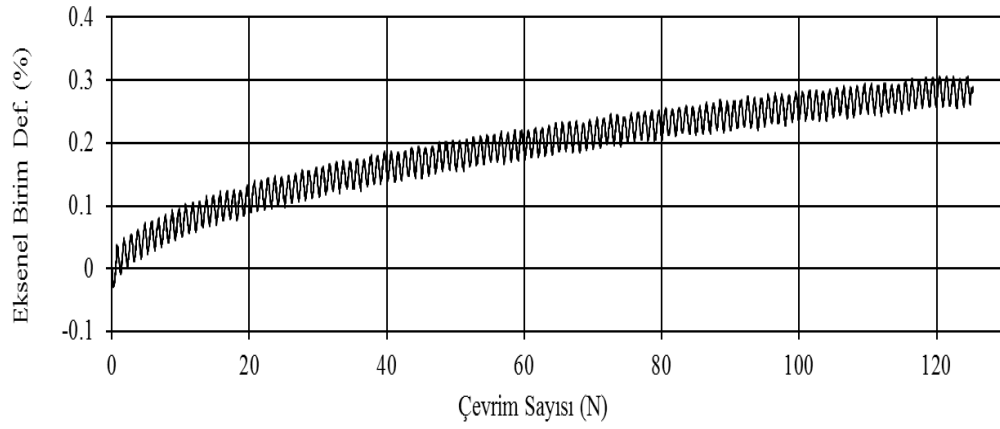
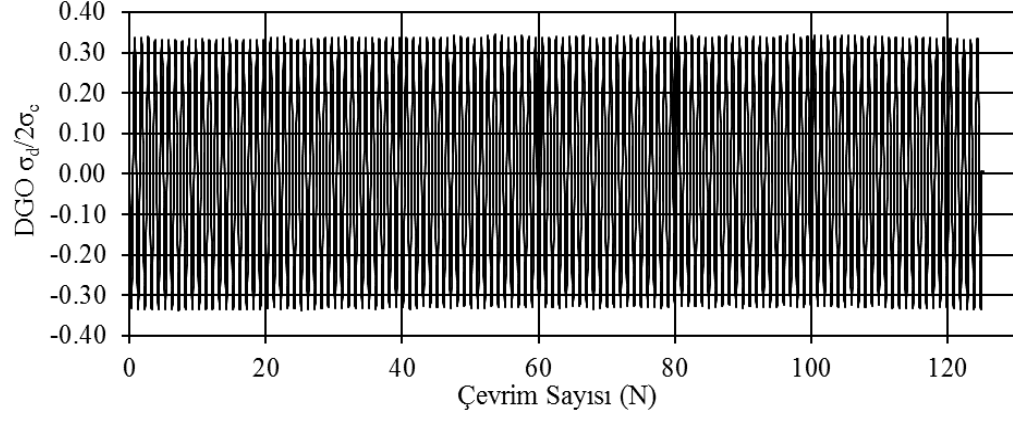
EK A

Deney No	1	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.34
Deney Tarihi	04/08/2014	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



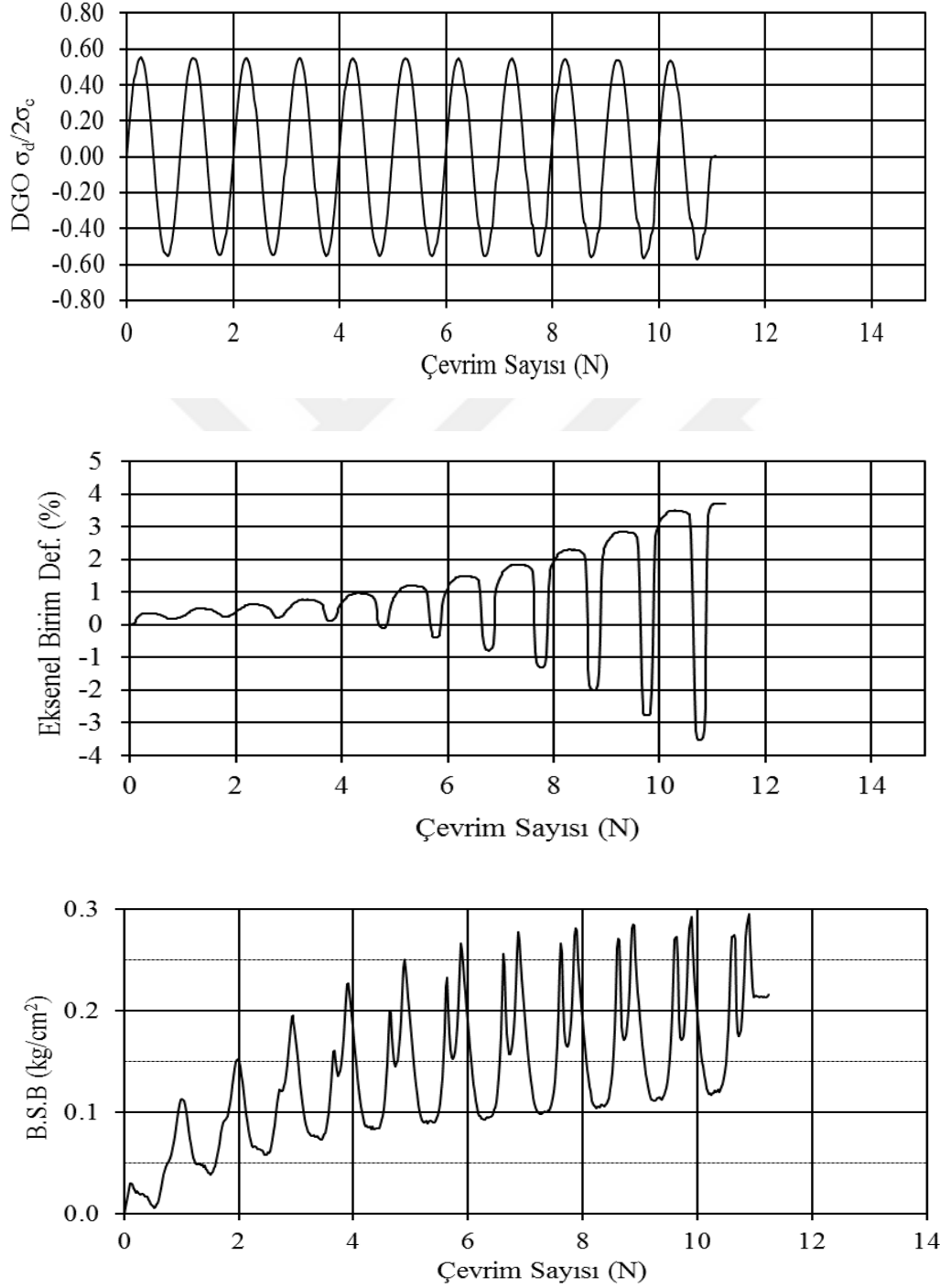
Şekil A. 1 : DN1 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	2	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.34
Deney Tarihi	04/08/2014	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



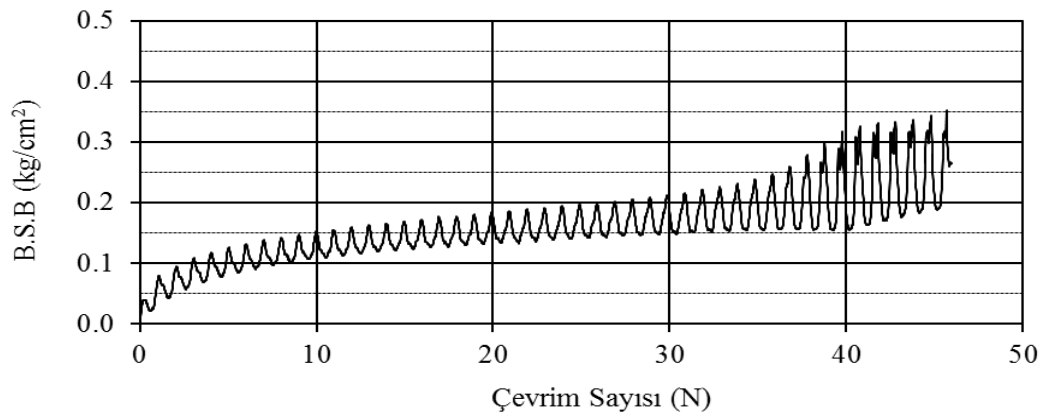
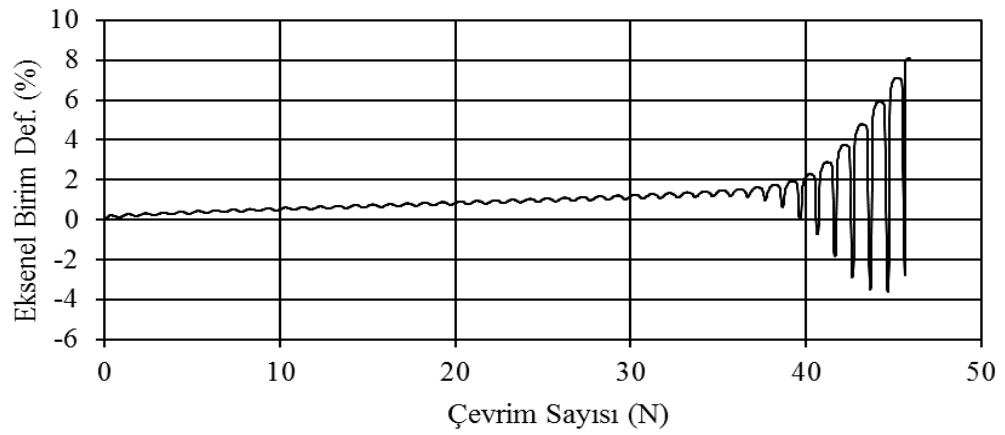
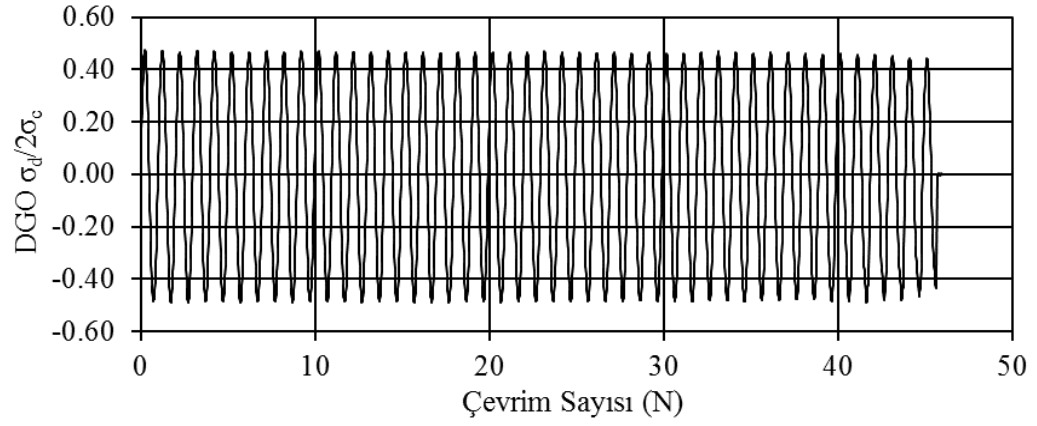
Şekil A. 2 : DN2 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	3	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.55
Deney Tarihi	05/08/2014	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%56
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	10



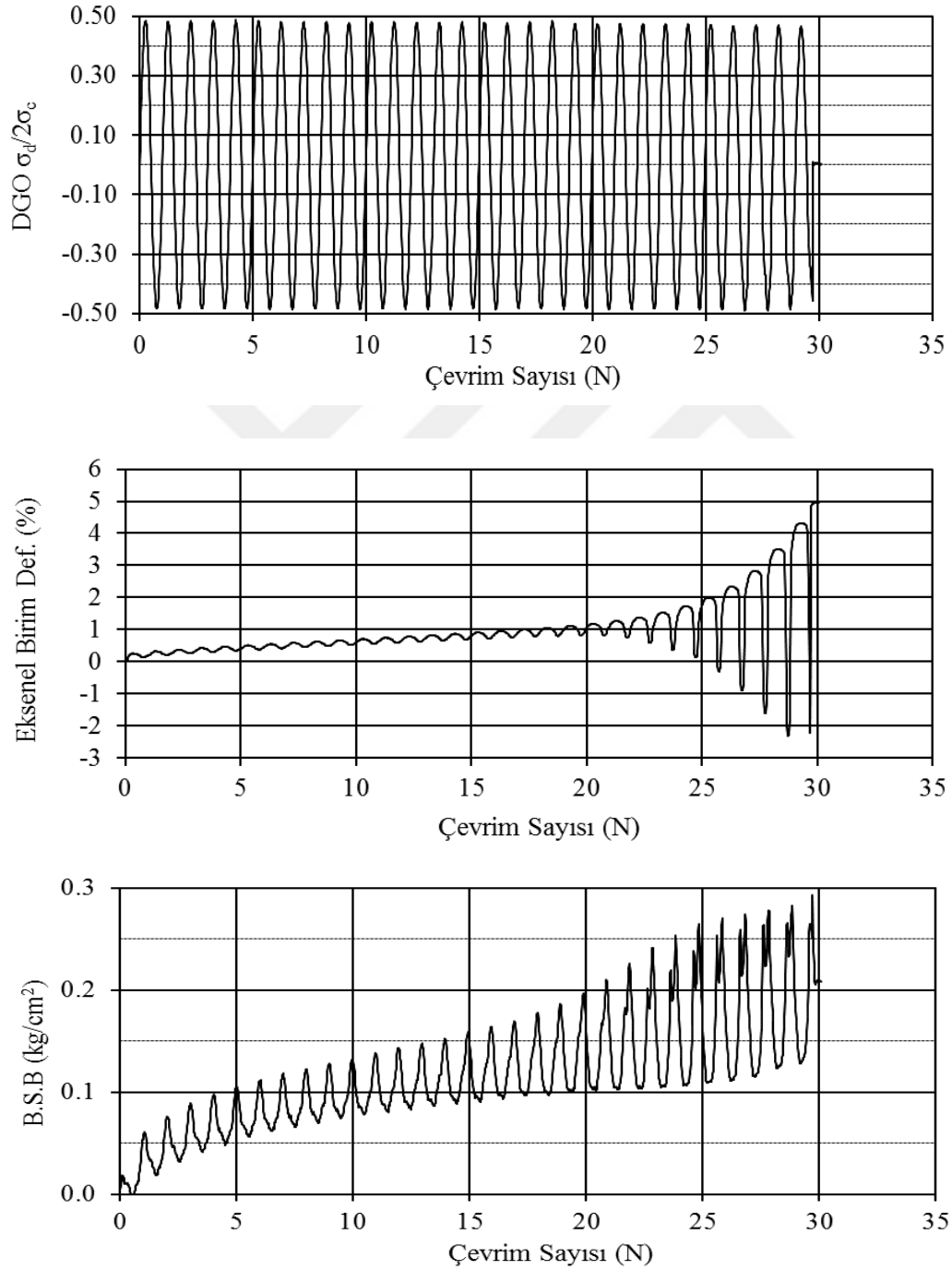
Şekil A. 3 : DN3 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	4	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.48
Deney Tarihi	11/08/2014	Doygunluk (B)	0.95
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%60
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	43



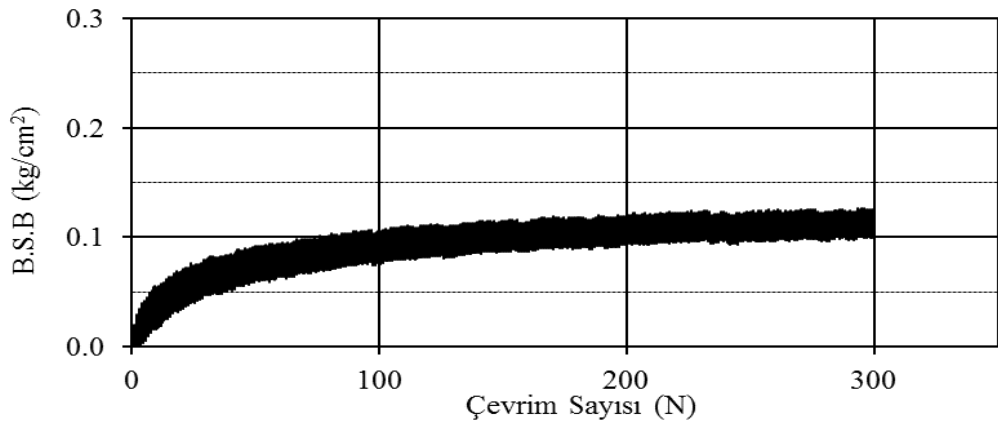
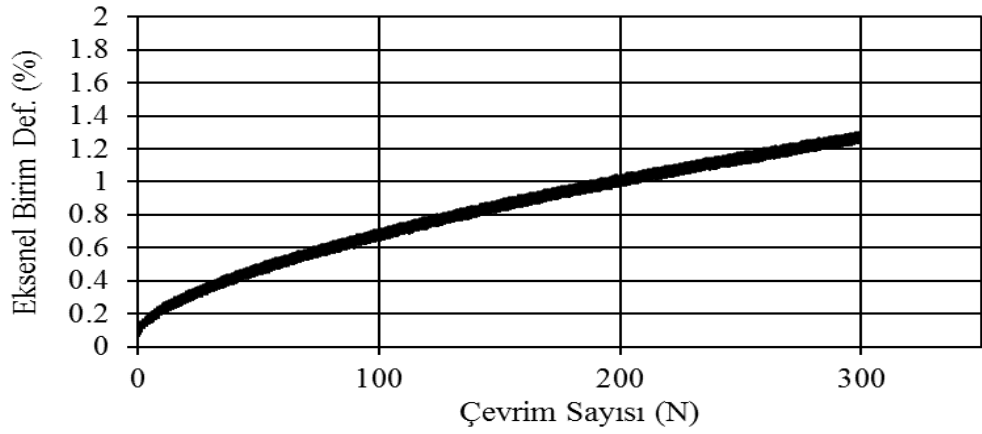
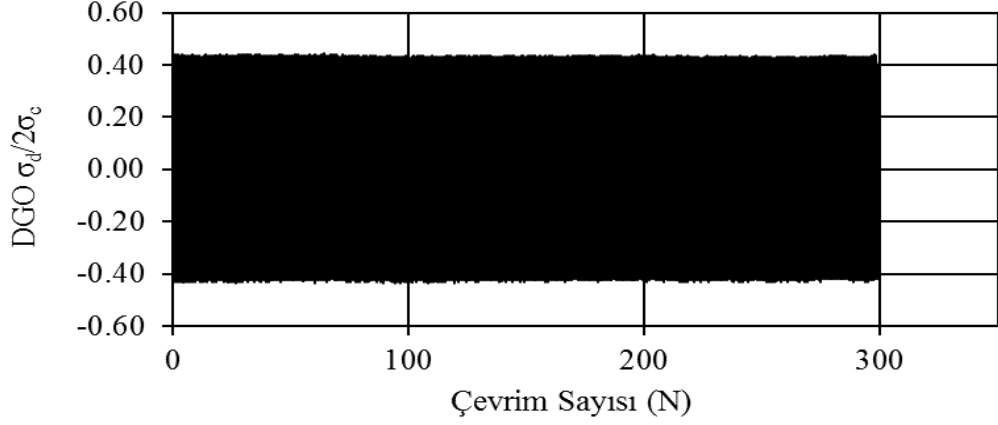
Şekil A. 4 : DN4 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	5	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.48
Deney Tarihi	12/08/2014	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	28



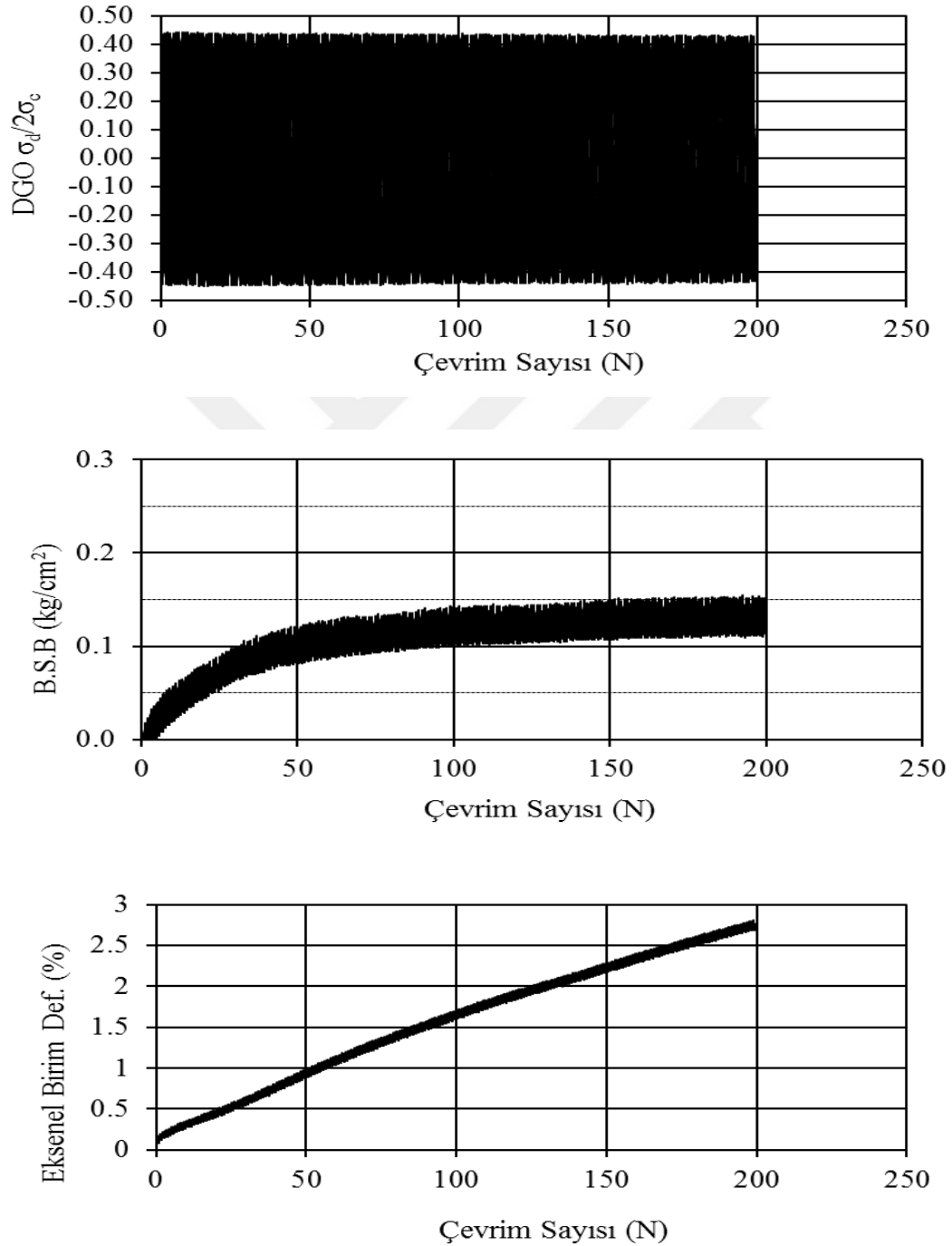
Şekil A. 5 : DN5 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	6	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.44
Deney Tarihi	22/08/2014	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%65
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



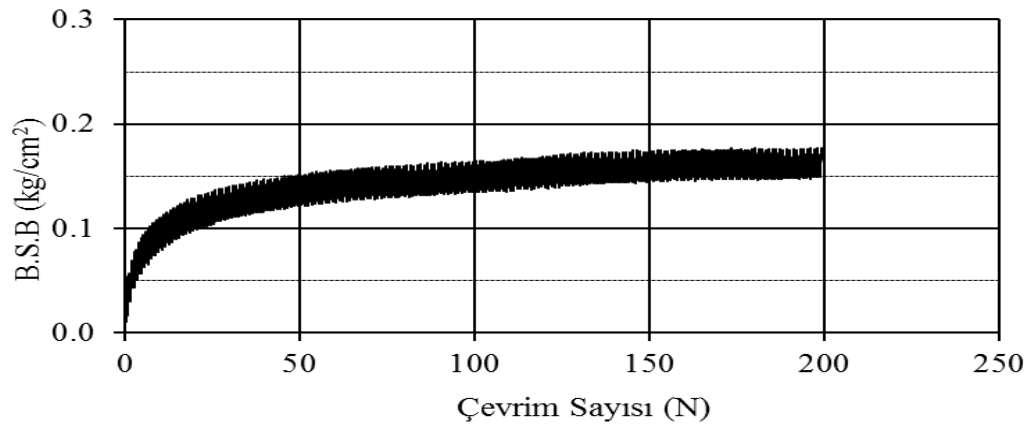
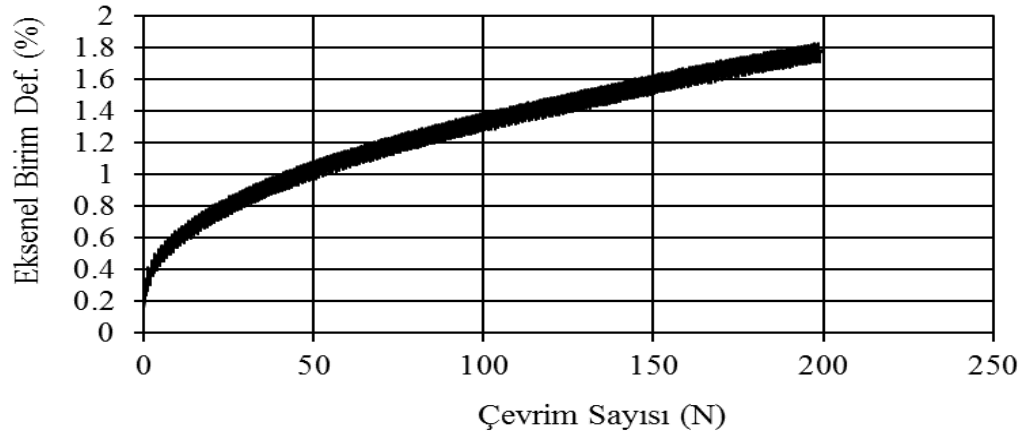
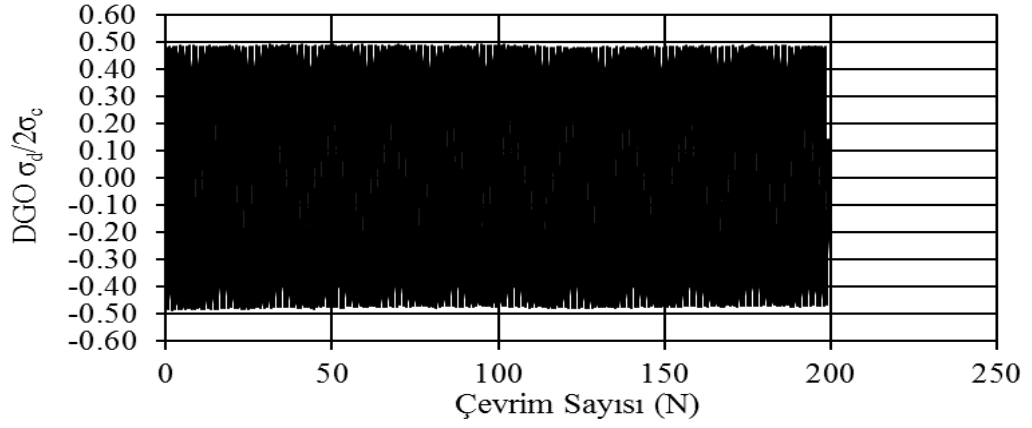
Şekil A. 6 : DN6 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	7	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.44
Deney Tarihi	27/08/2014	Doygunluk (B)	%94
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%52
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



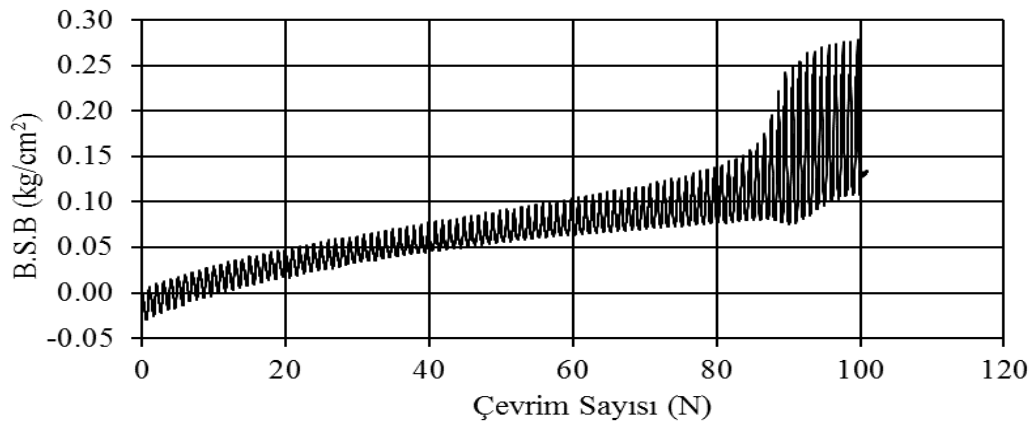
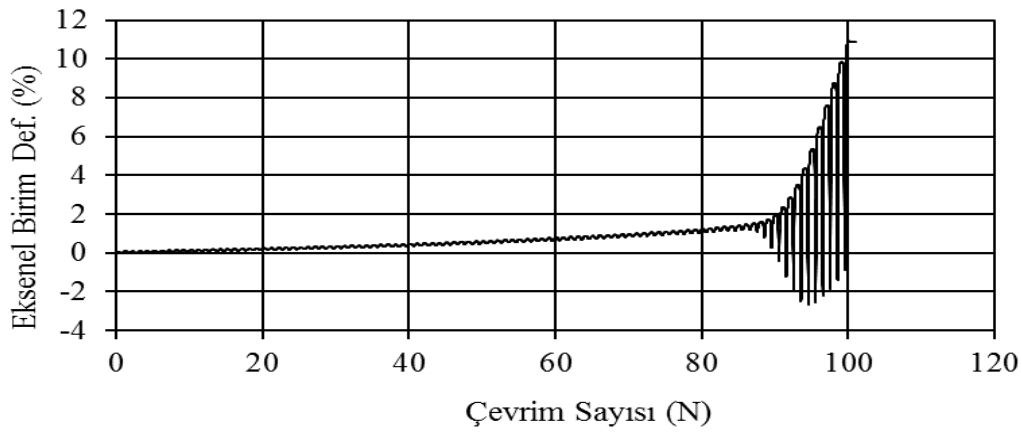
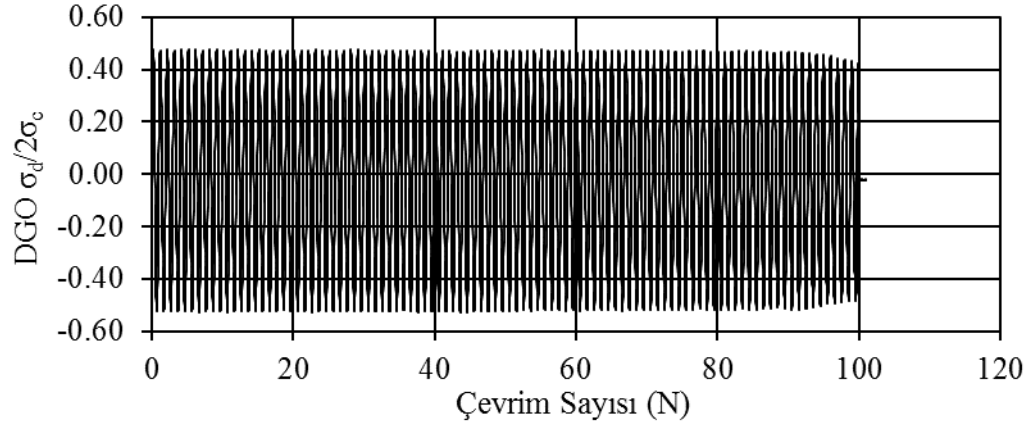
Şekil A. 7 : DN7 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	8	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.47
Deney Tarihi	30/08/2014	Doygunluk (B)	0.56
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%58
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



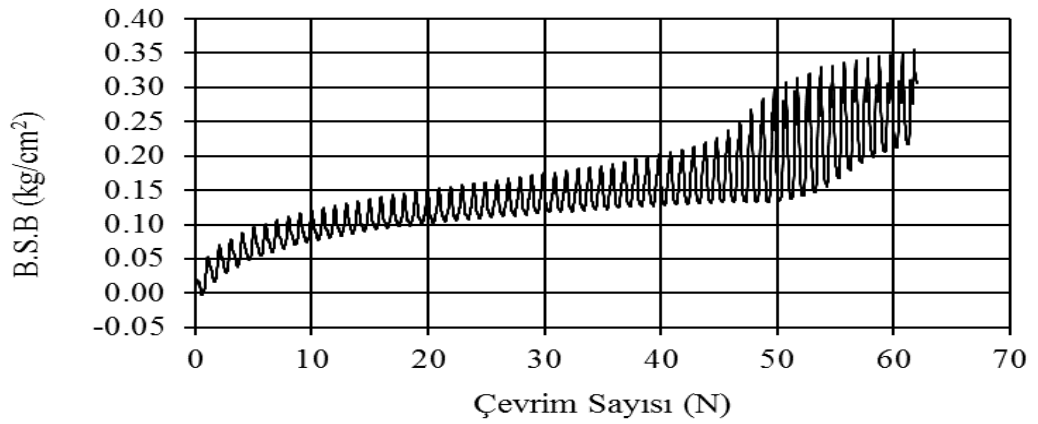
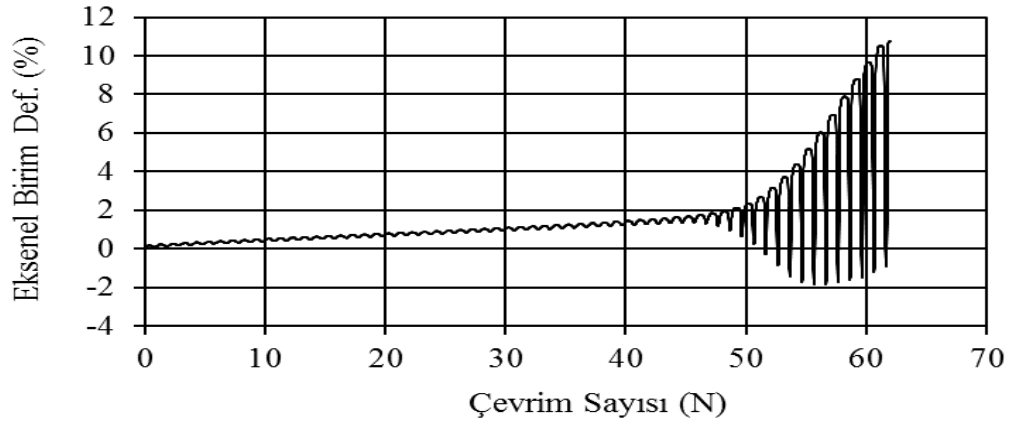
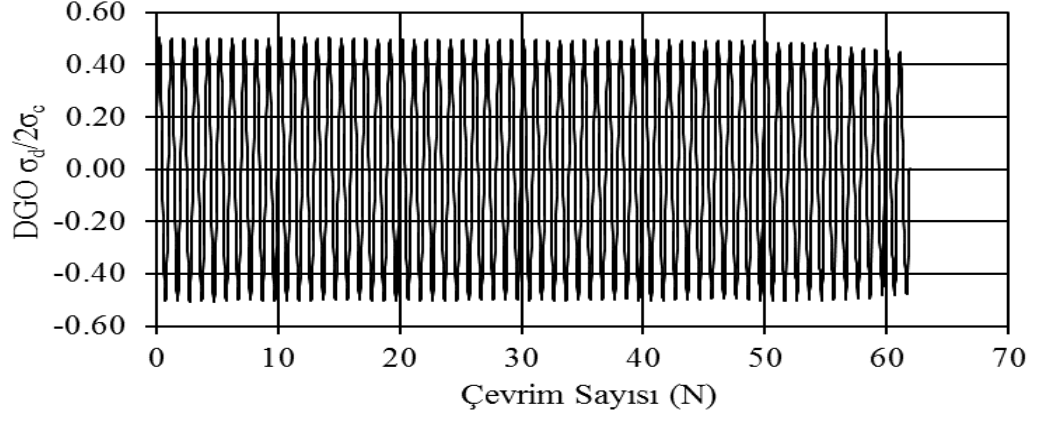
Şekil A. 8 : DN8 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	9	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.50
Deney Tarihi	17/09/2014	Doygunluk (B)	0.60
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%58
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	94



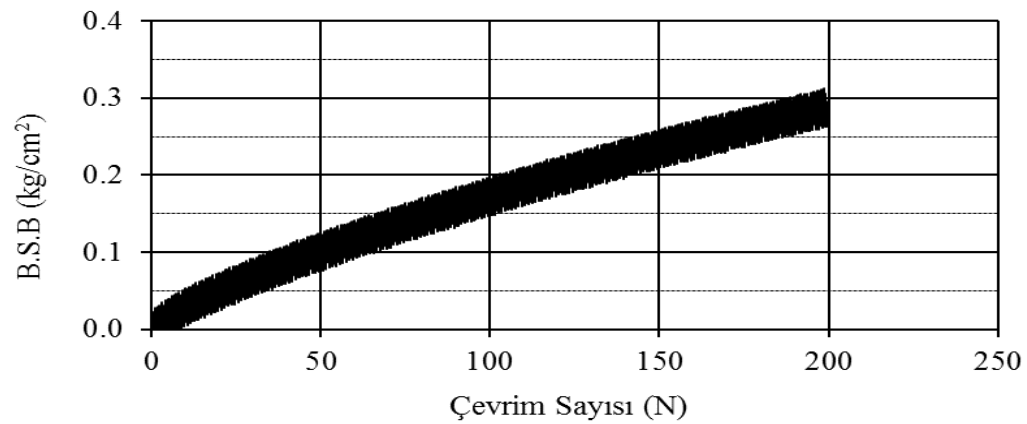
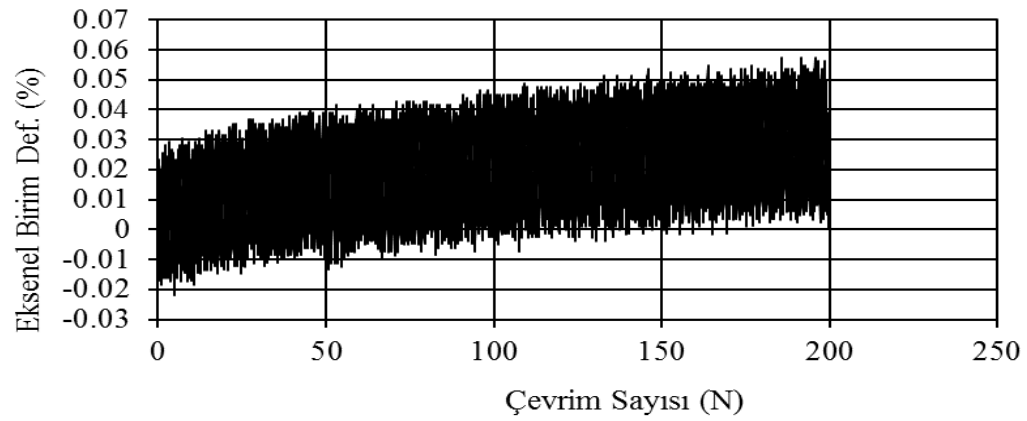
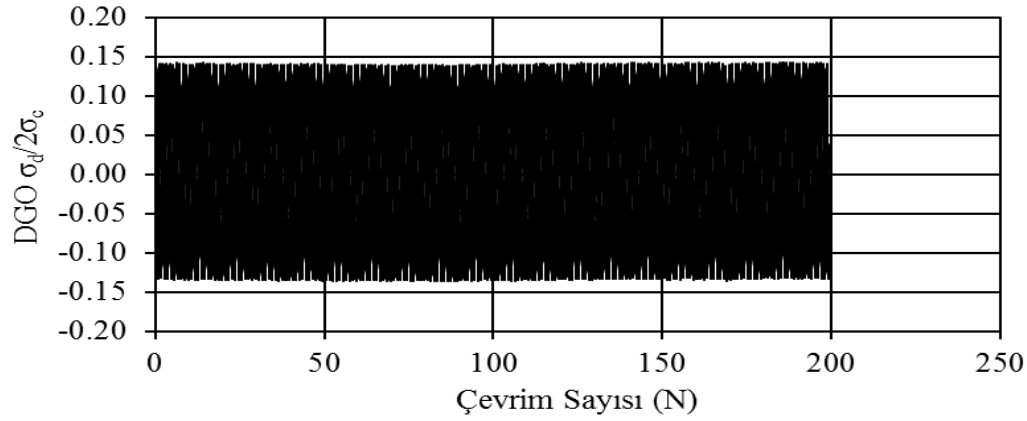
Şekil A. 9 : DN9 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	10	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.50
Deney Tarihi	18/09/2014	Doygunluk (B)	0.84
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%53
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	30 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	54



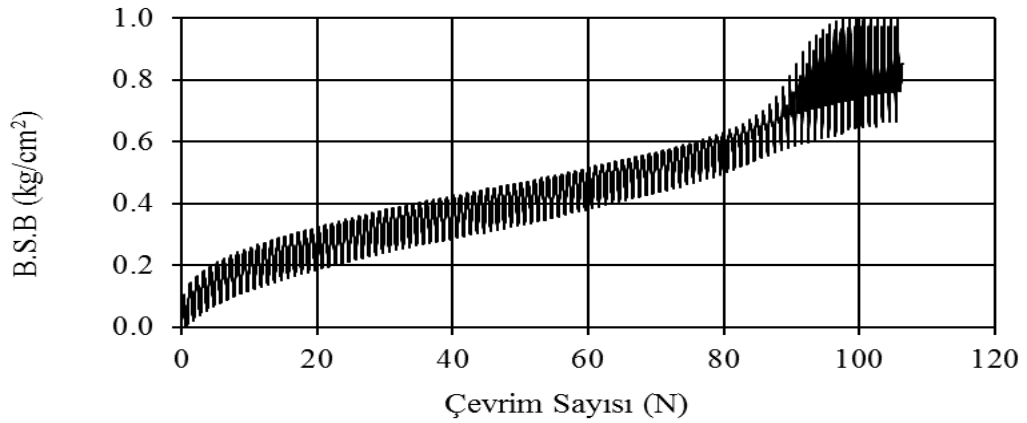
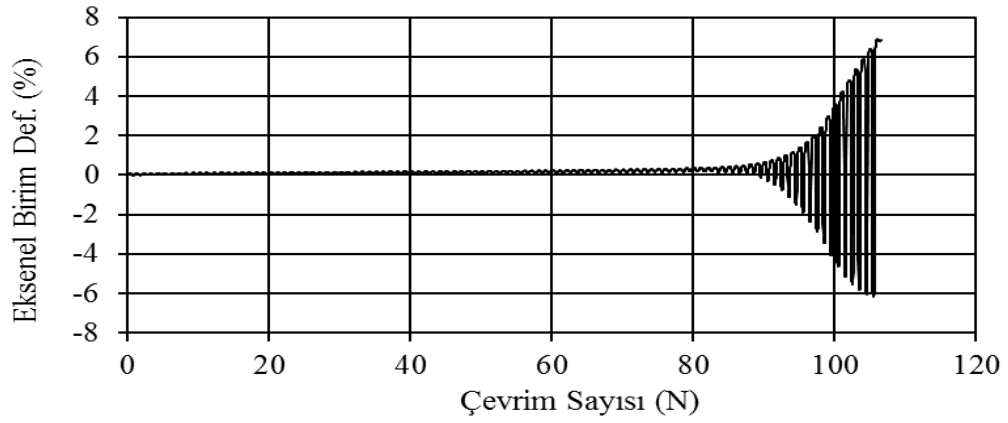
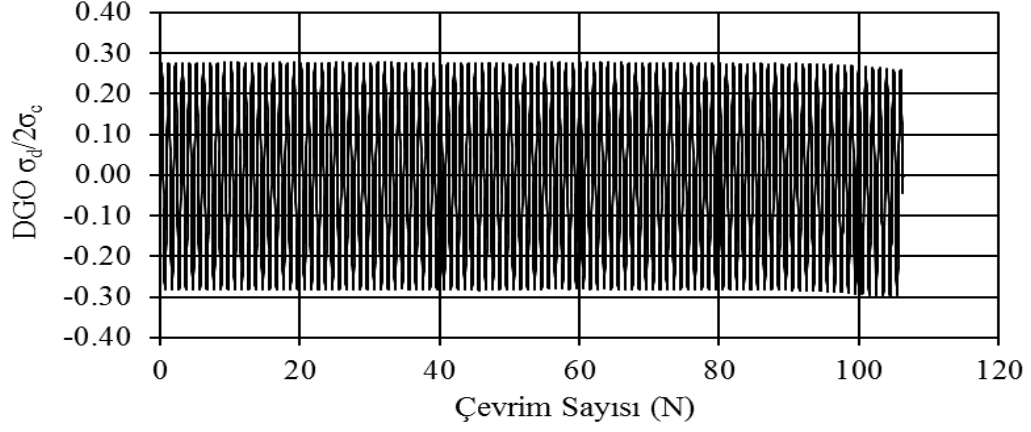
Şekil A. 10 : DN10 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	11	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.14
Deney Tarihi	19/09/2014	Doygunluk (B)	0.50
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%49
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



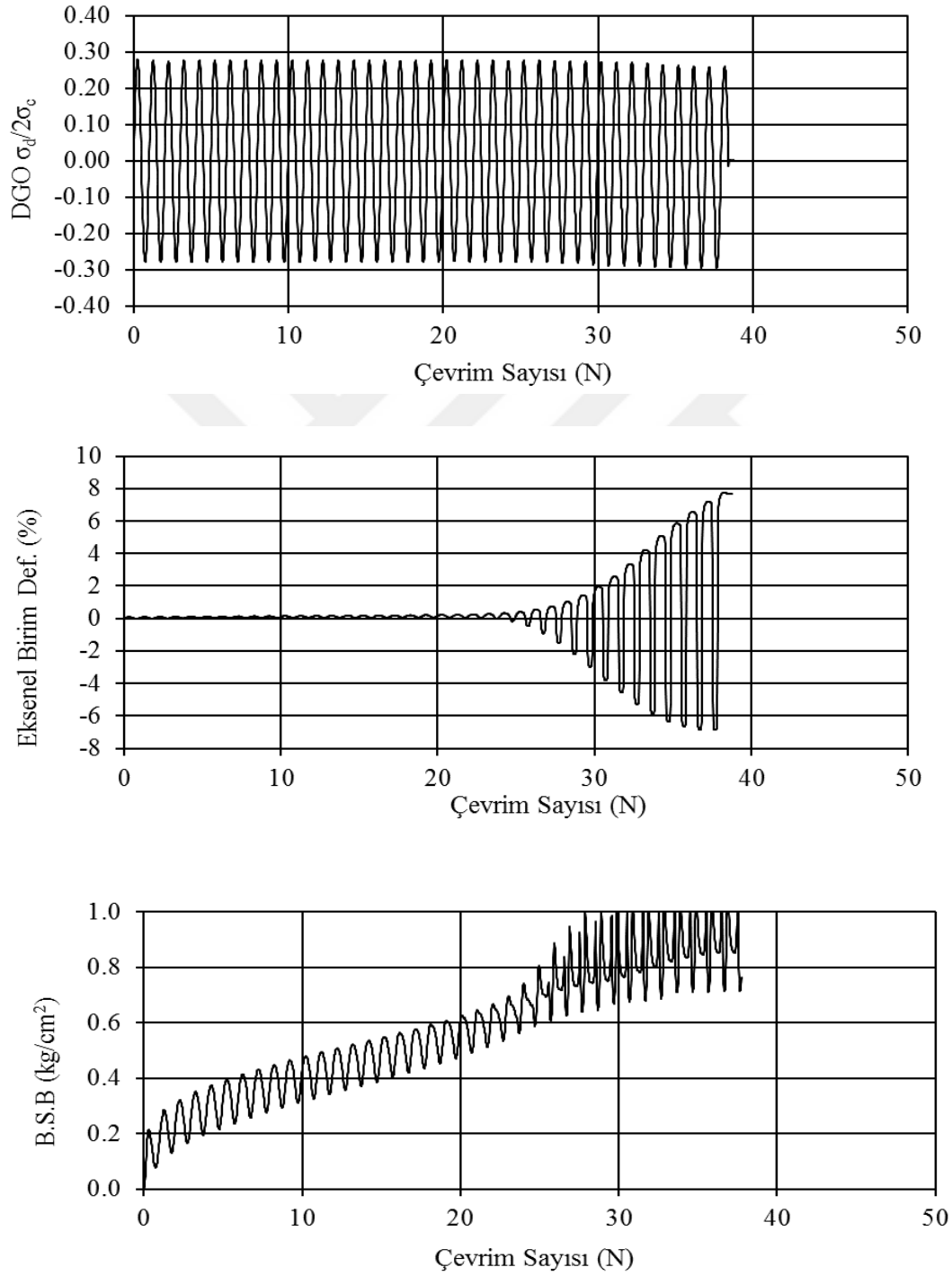
Şekil A. 11: DN11 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	13	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	15/10/2014	Doygunluk (B)	0.52
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	98



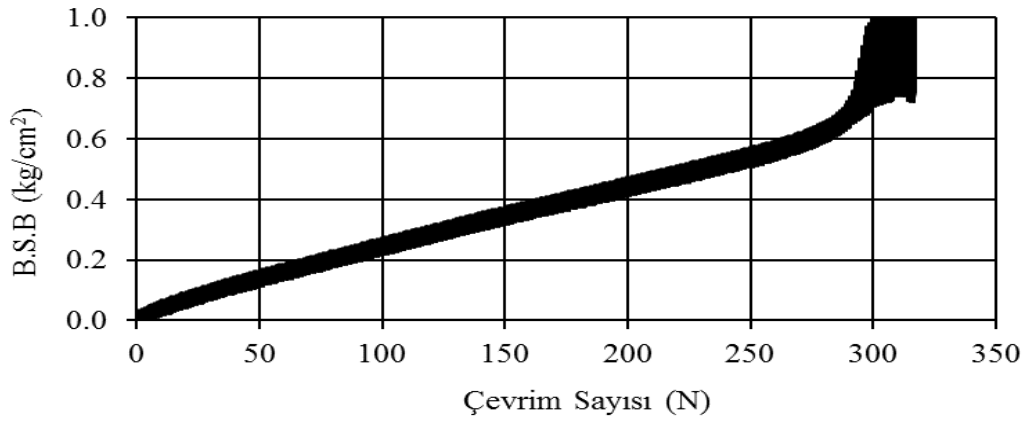
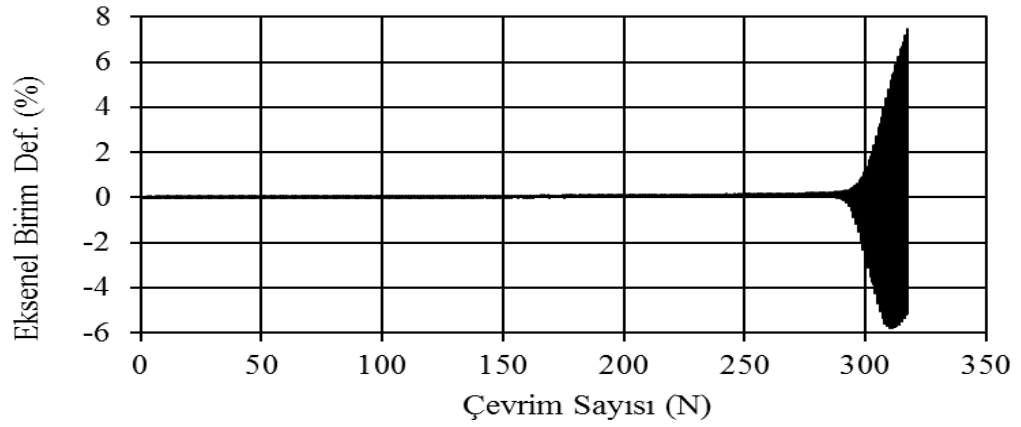
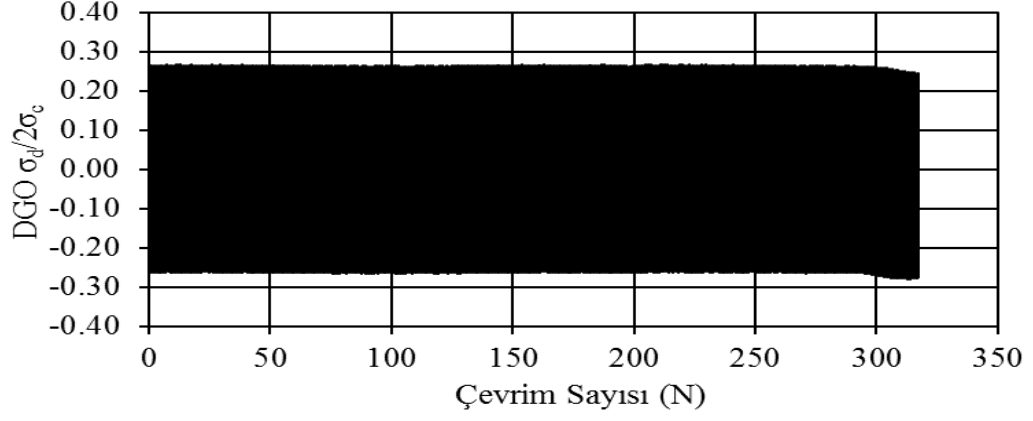
Şekil A. 12 : DN13 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	14	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	16/10/2014	Doygunluk (B)	0.92
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	31



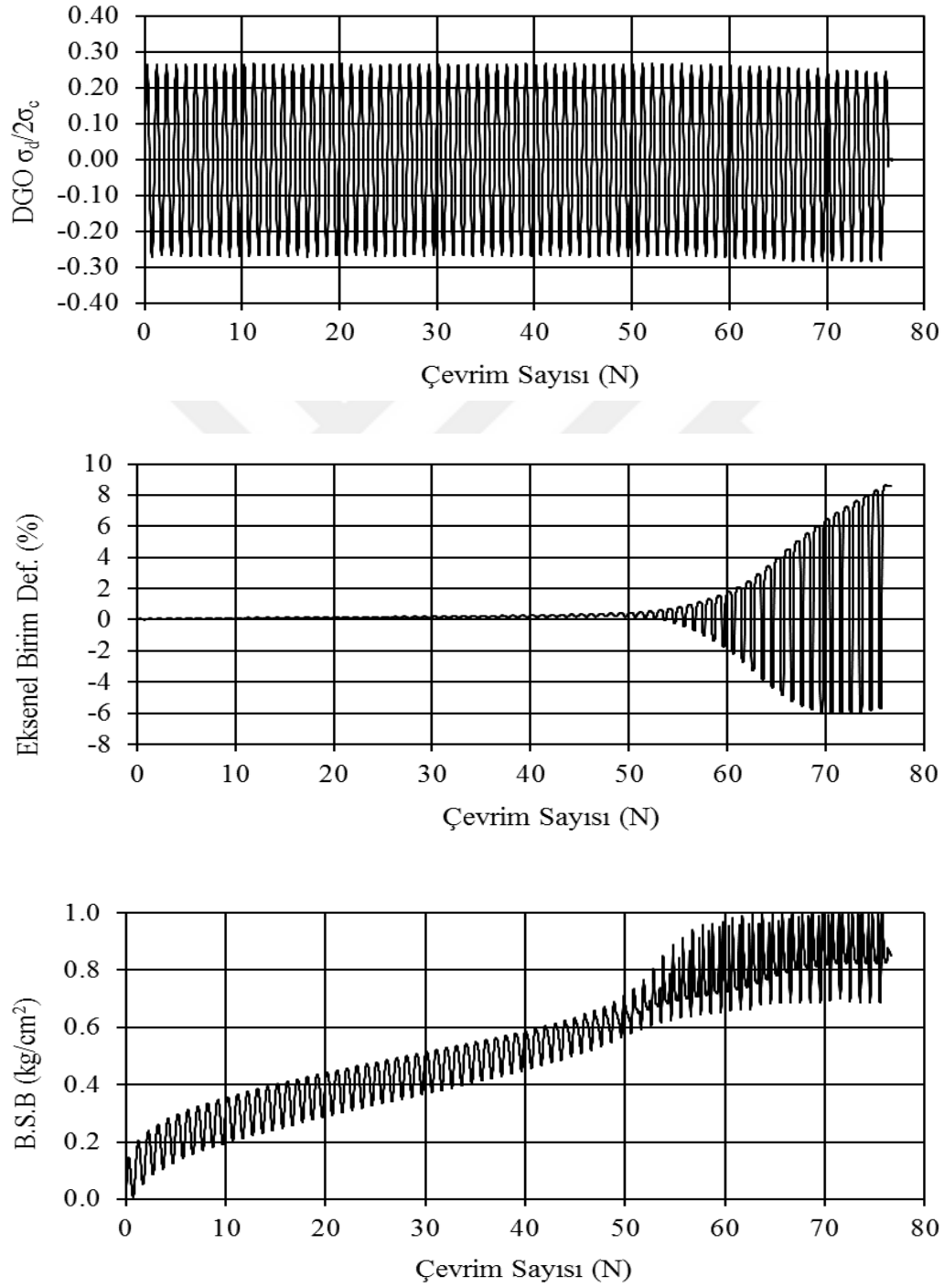
Şekil A. 13 : DN14 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	15	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.26
Deney Tarihi	17/10/2014	Doygunluk (B)	0.50
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	304



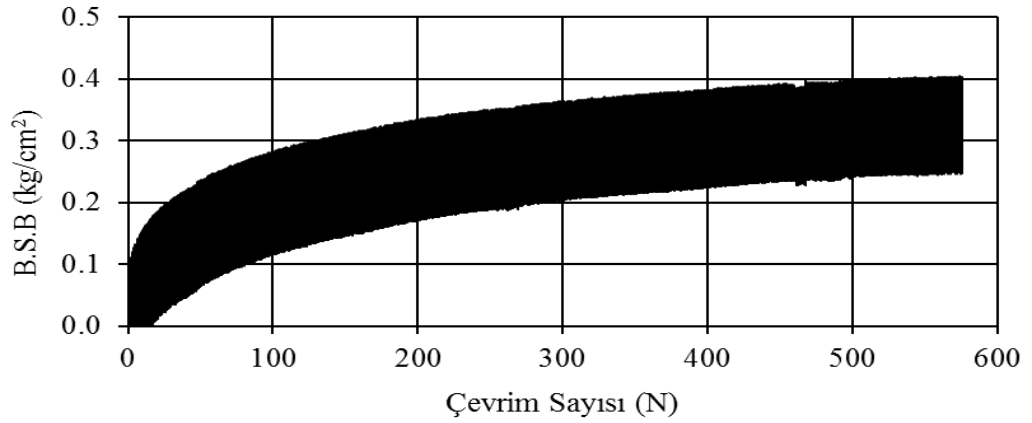
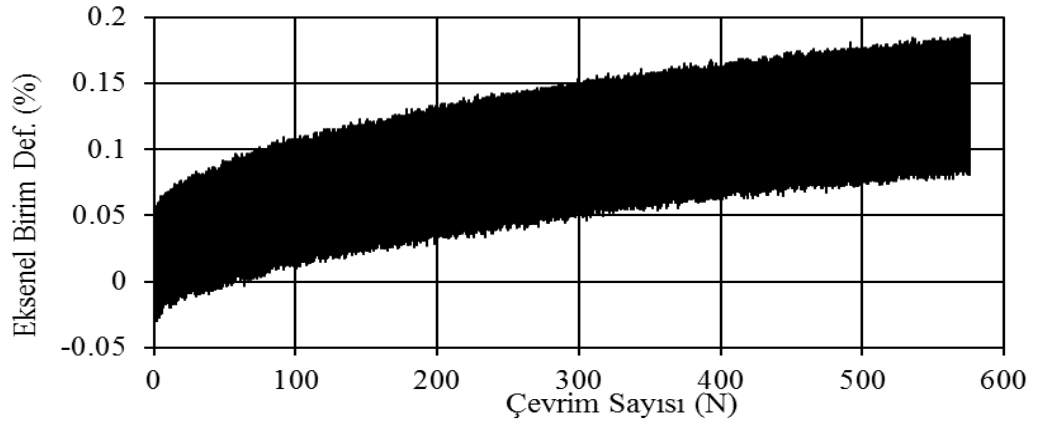
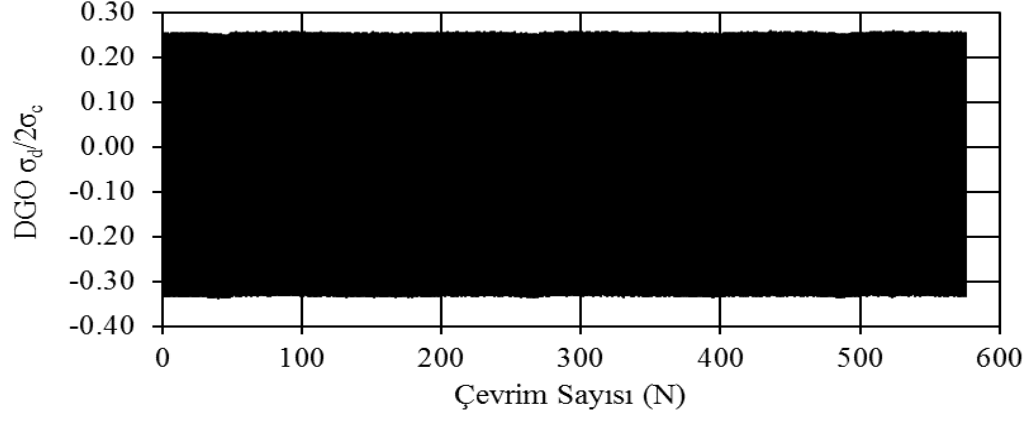
Şekil A. 14 : DN15 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	16	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.275
Deney Tarihi	20/10/2014	Doygunluk (B)	%0.64
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	63



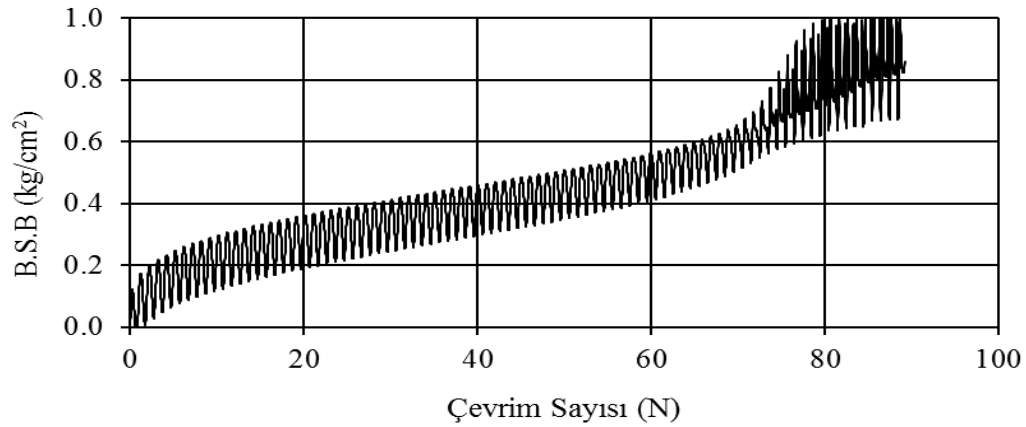
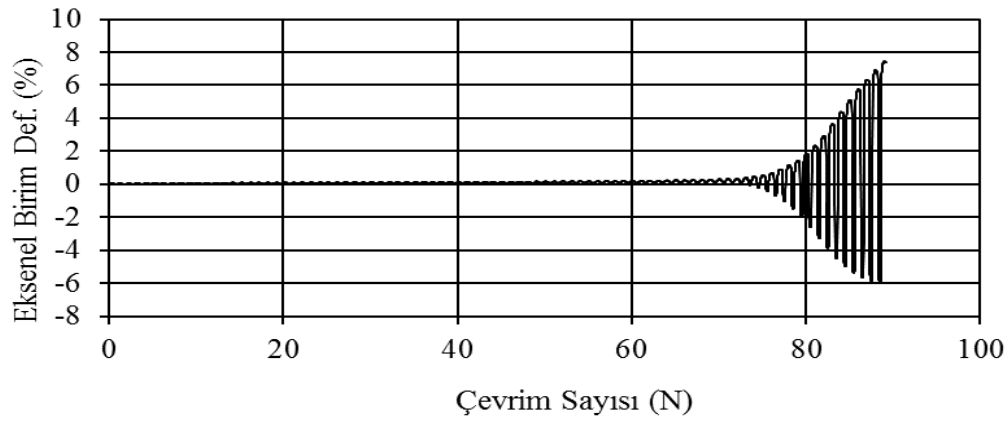
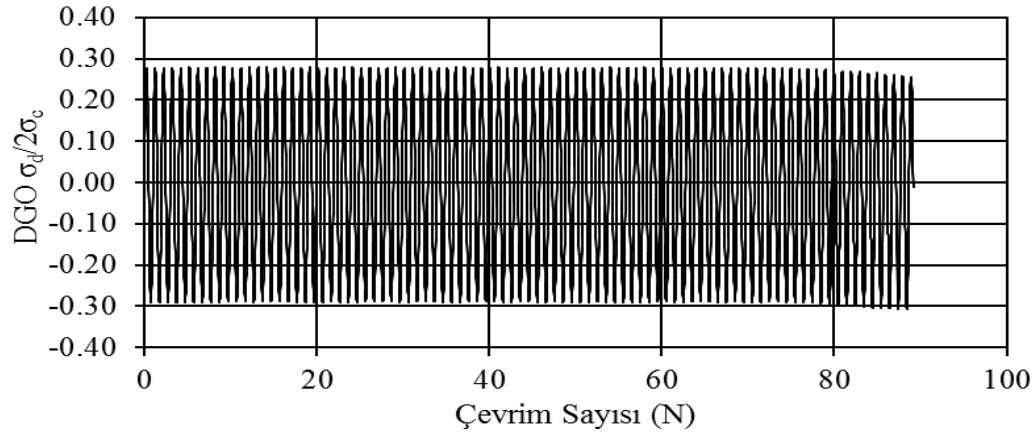
Şekil A. 15 : DN16 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	17	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	22/10/2014	Doygunluk (B)	0.93
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 74
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



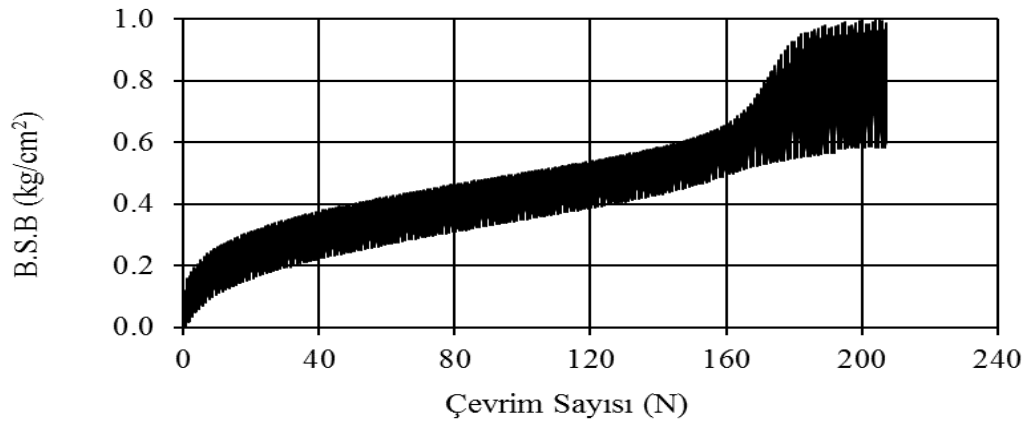
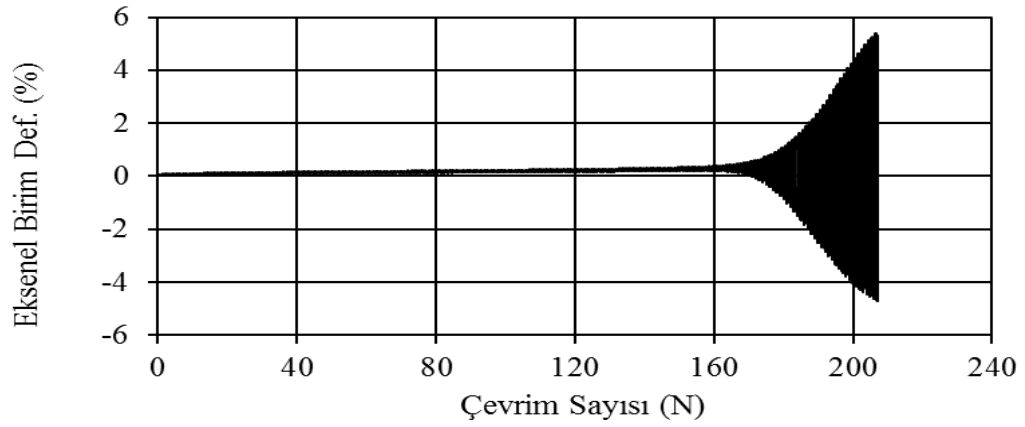
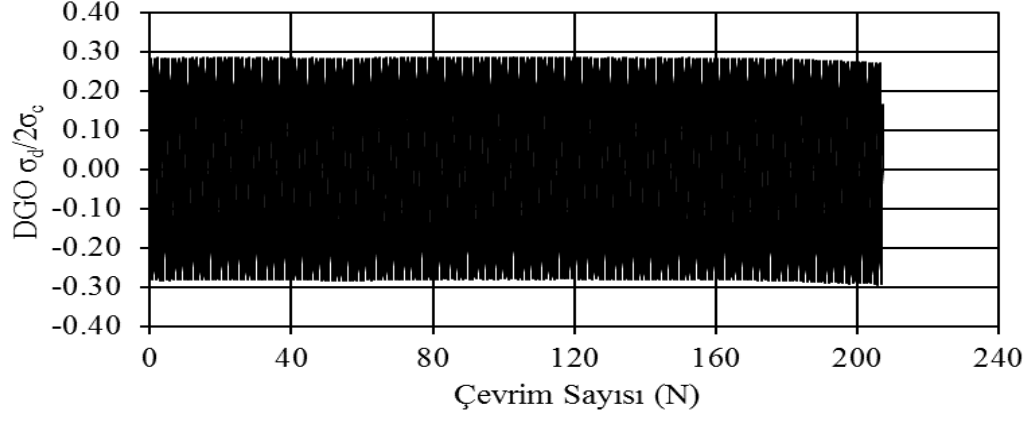
Şekil A. 16 : DN17 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	18	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	23/10/2014	Doygunluk (B)	0.58
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	82



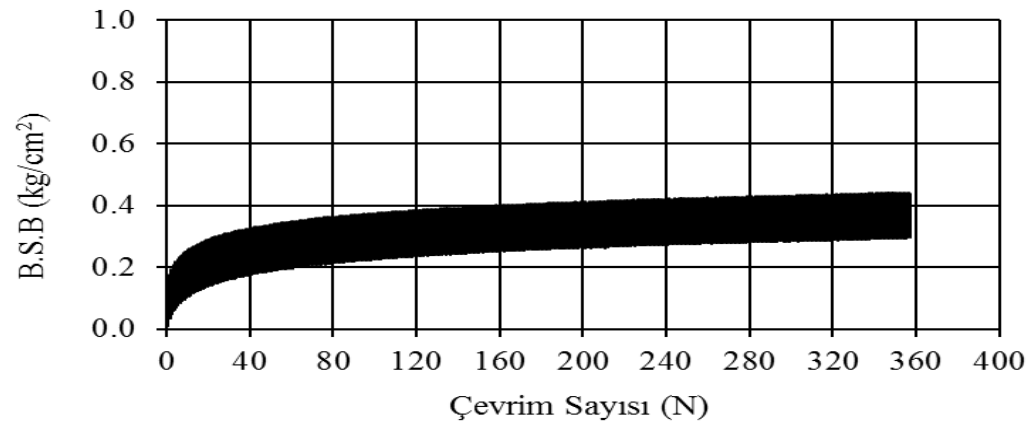
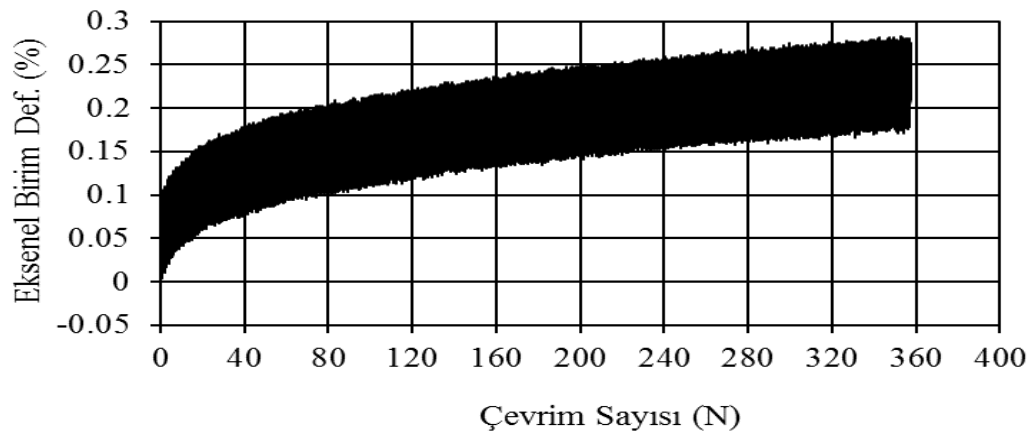
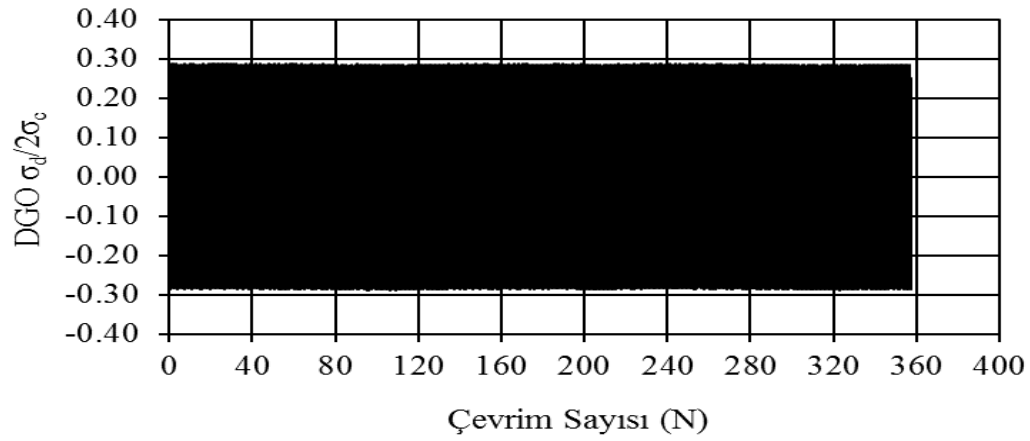
Şekil A. 17 : DN18 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	19	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	24/10/2014	Doygunluk (B)	0.70
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 65
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	190



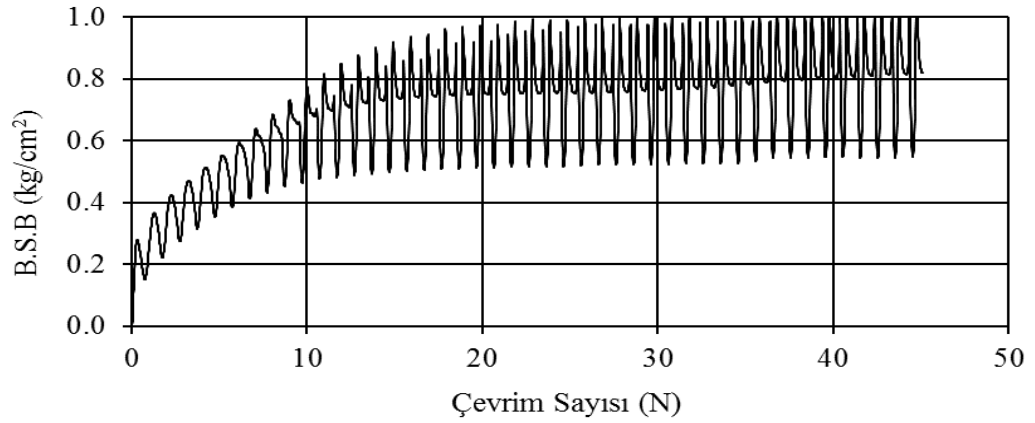
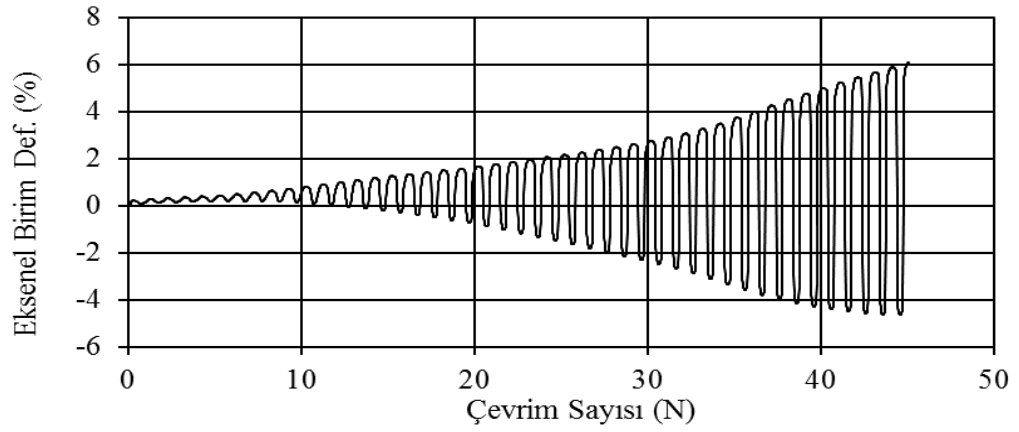
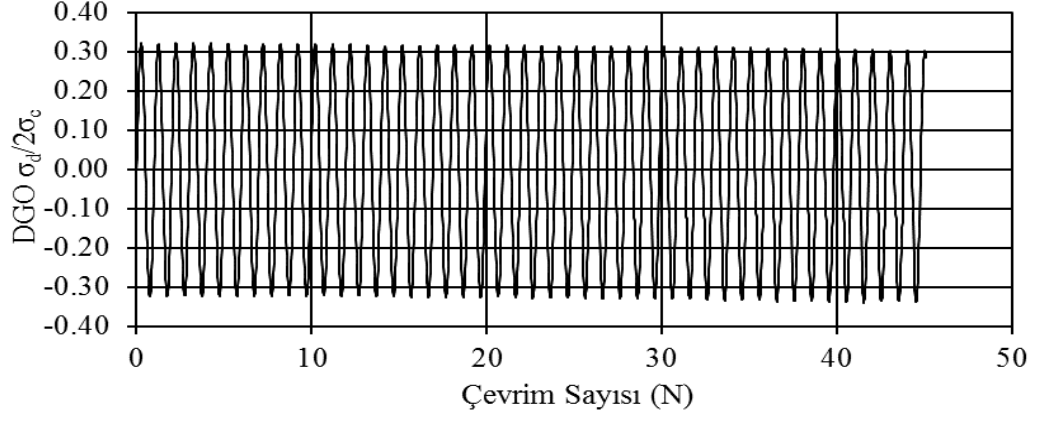
Şekil A. 18 : DN19 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	20	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	25/10/2014	Doygunluk (B)	0.61
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 73
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



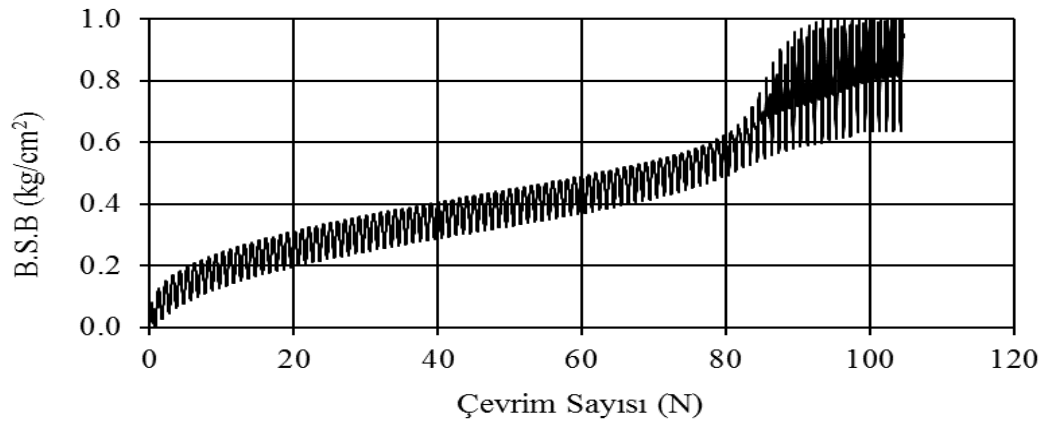
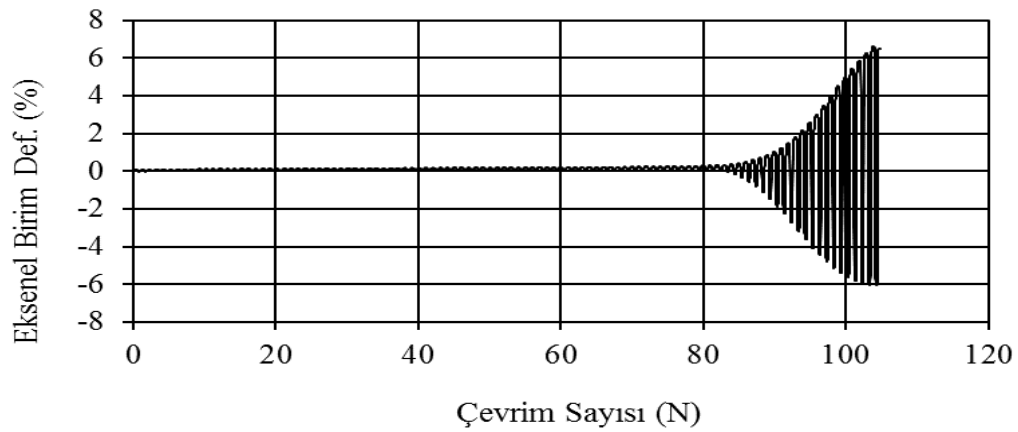
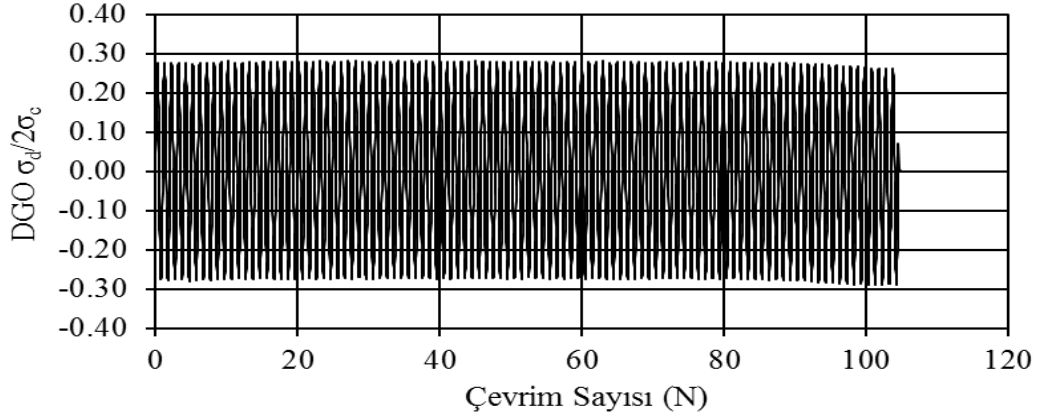
Şekil A. 19 : DN20 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	21	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.32
Deney Tarihi	31/10/2014	Doygunluk (B)	0.60
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 73
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	31



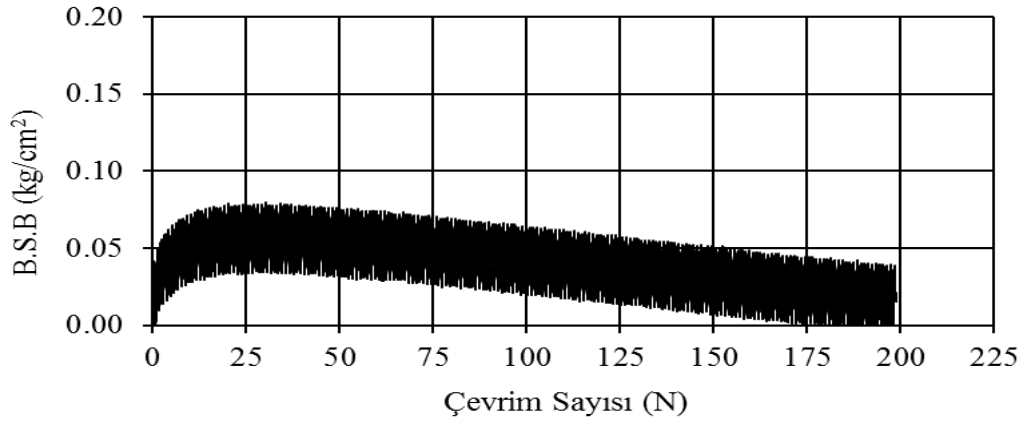
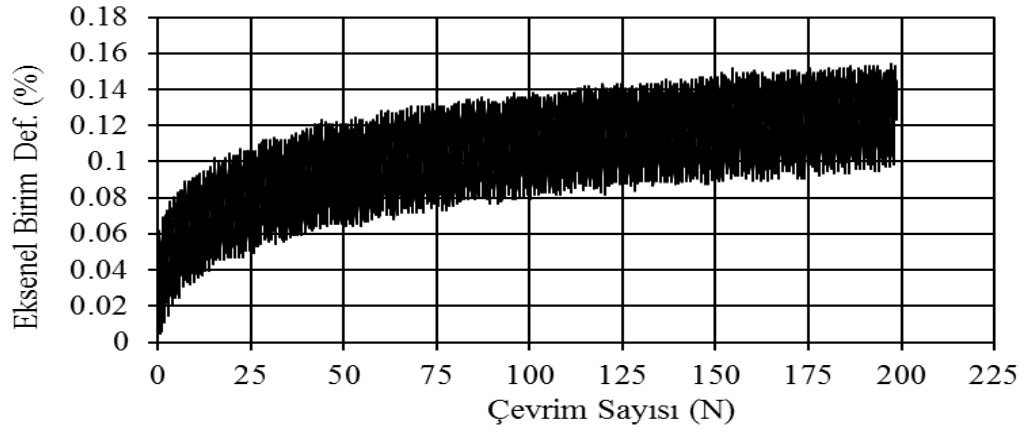
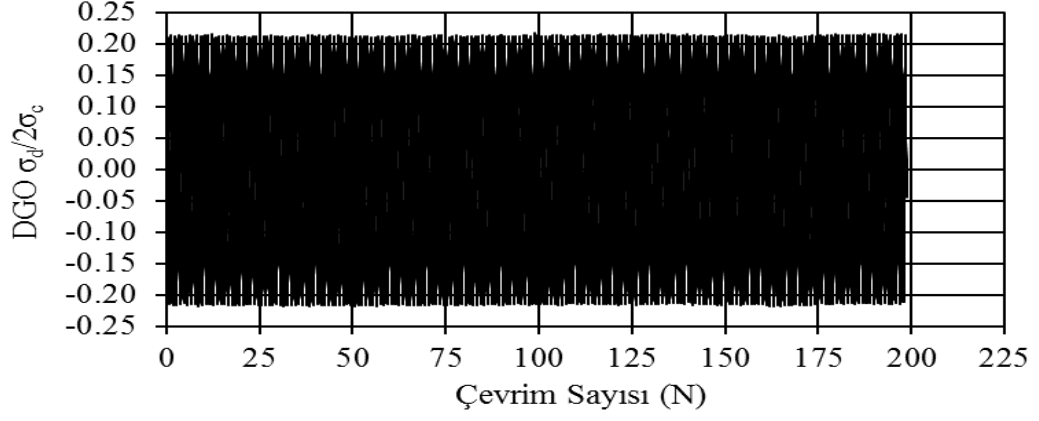
Şekil A. 20 : DN21 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	22	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	03/11/2014	Doygunluk (B)	0.50
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	94



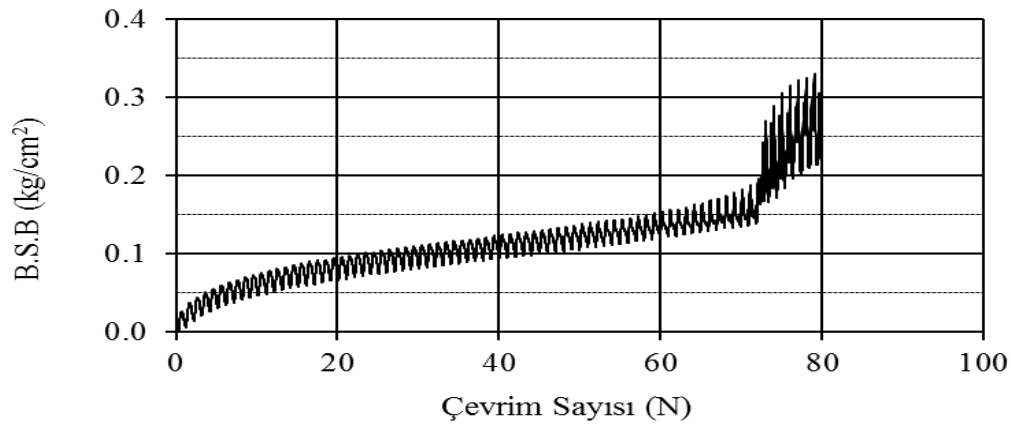
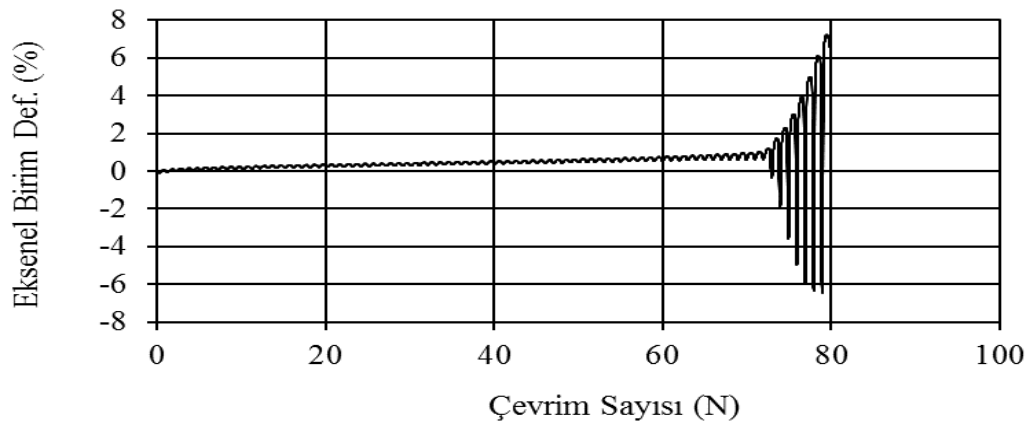
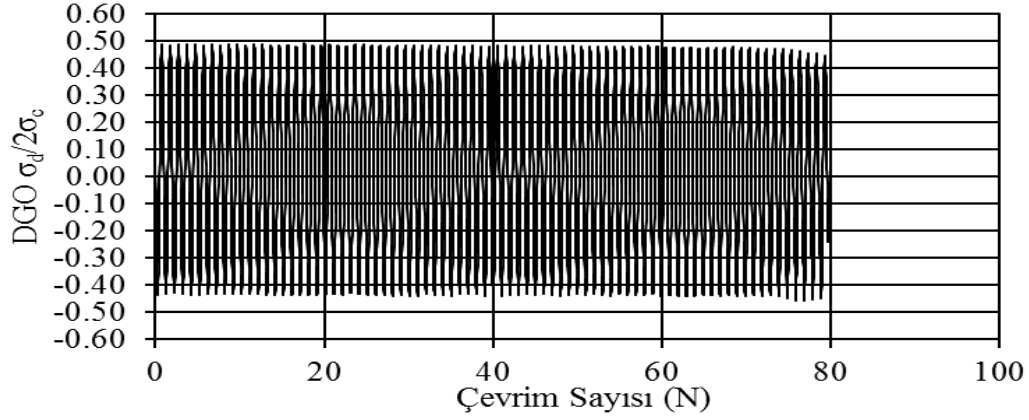
Şekil A. 21: DN22 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	23	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.22
Deney Tarihi	03/11/2014	Doygunluk (B)	0.25
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 54
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



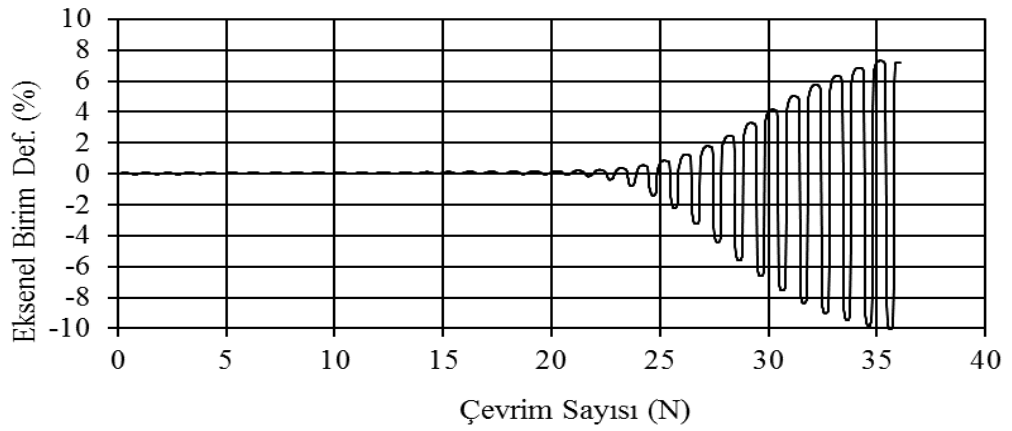
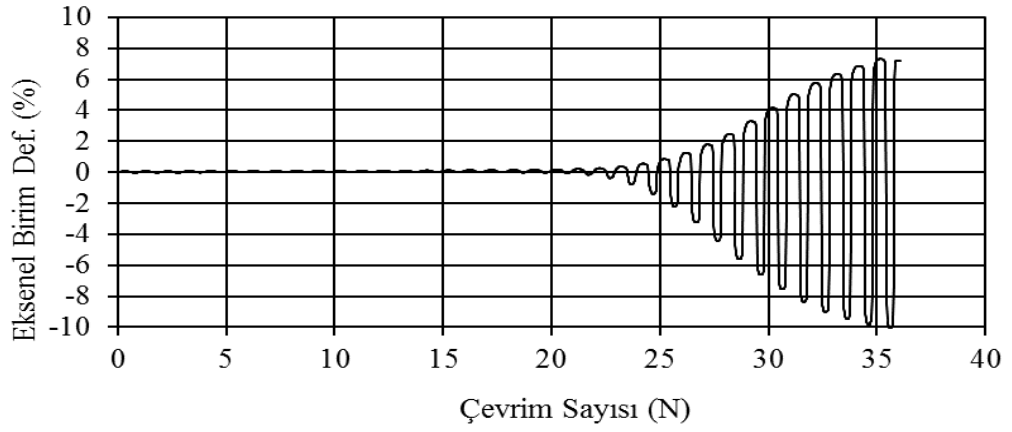
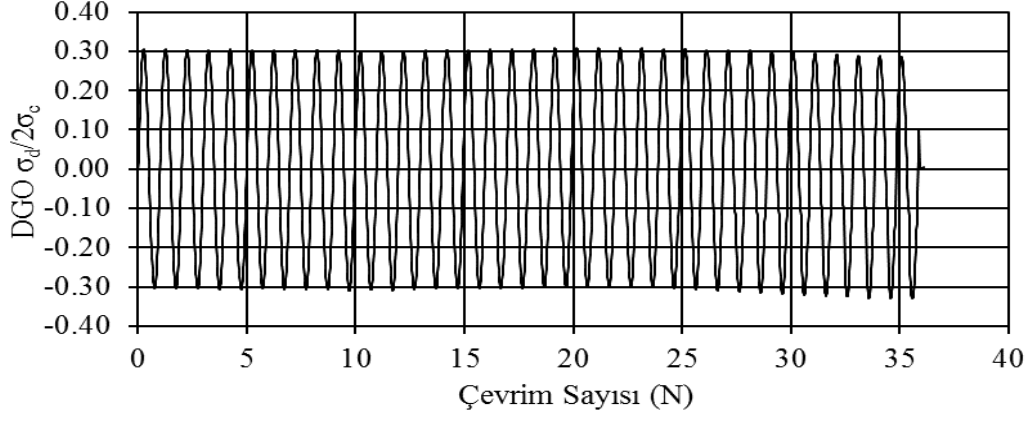
Şekil A. 22 : DN23 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	24	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.46
Deney Tarihi	04/11/2014	Doygunluk (B)	0.95
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	73



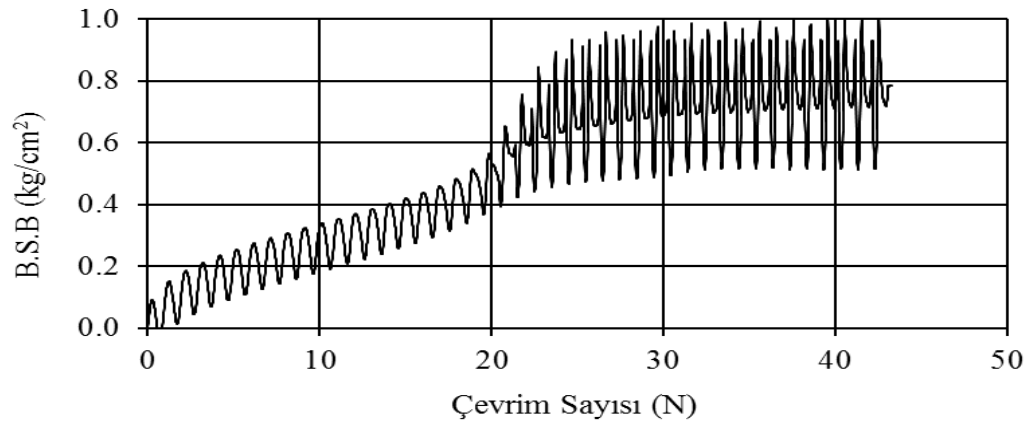
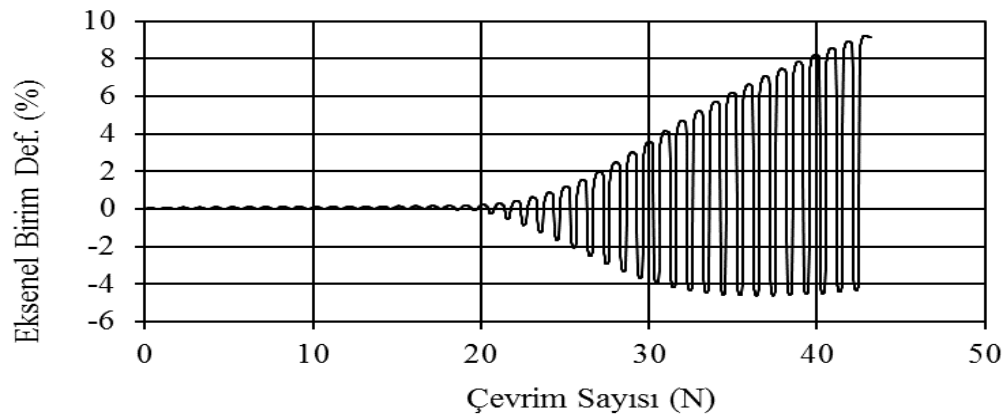
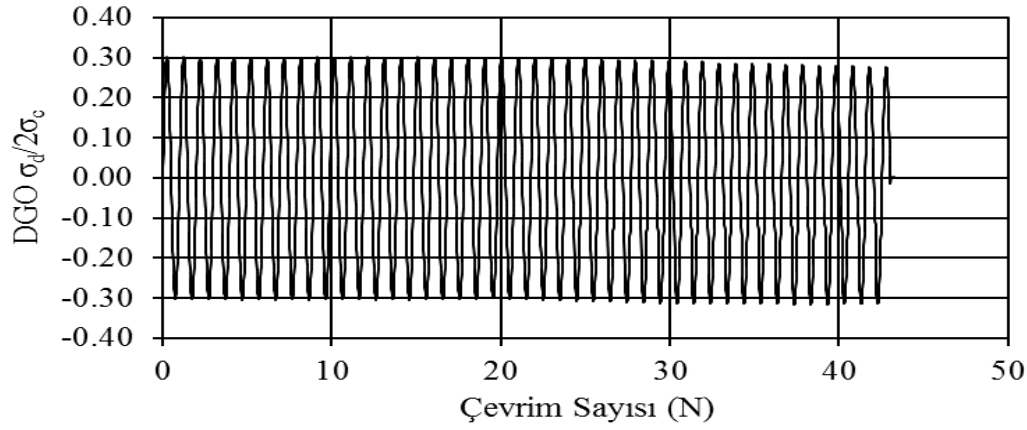
Şekil A. 23 : DN24 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	26	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.31
Deney Tarihi	08/11/2014	Doygunluk (B)	0.94
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 58
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	28



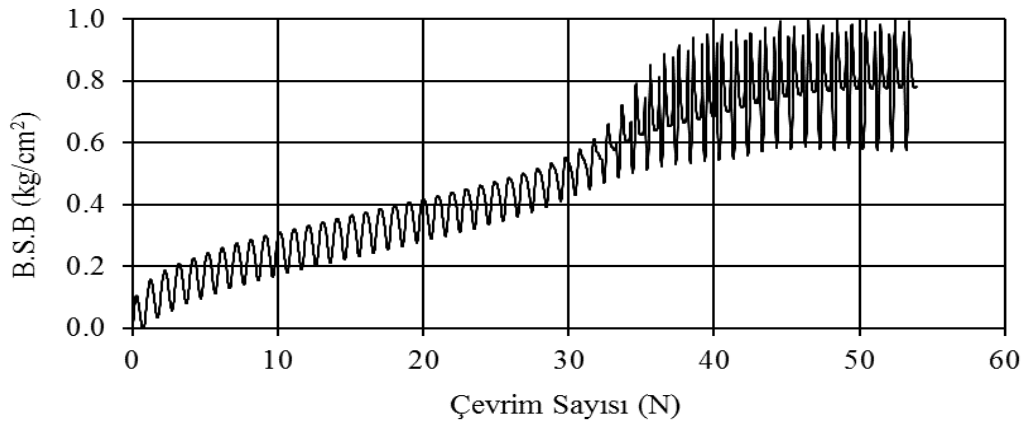
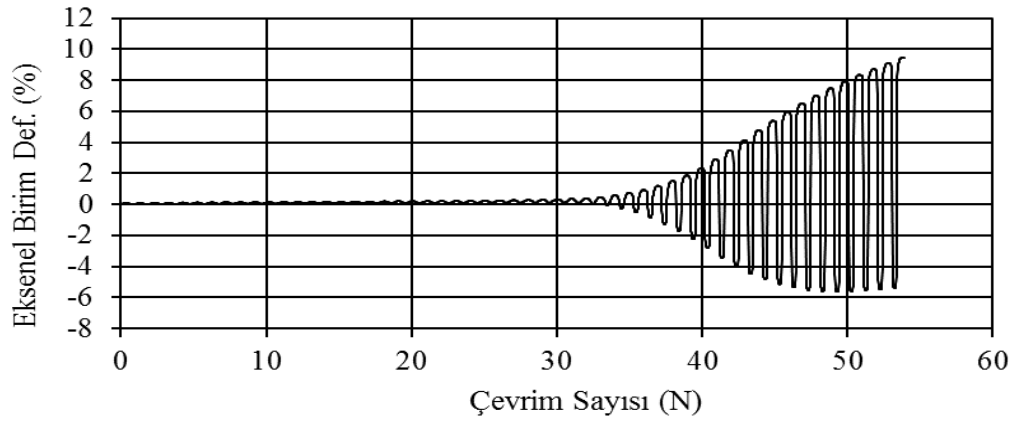
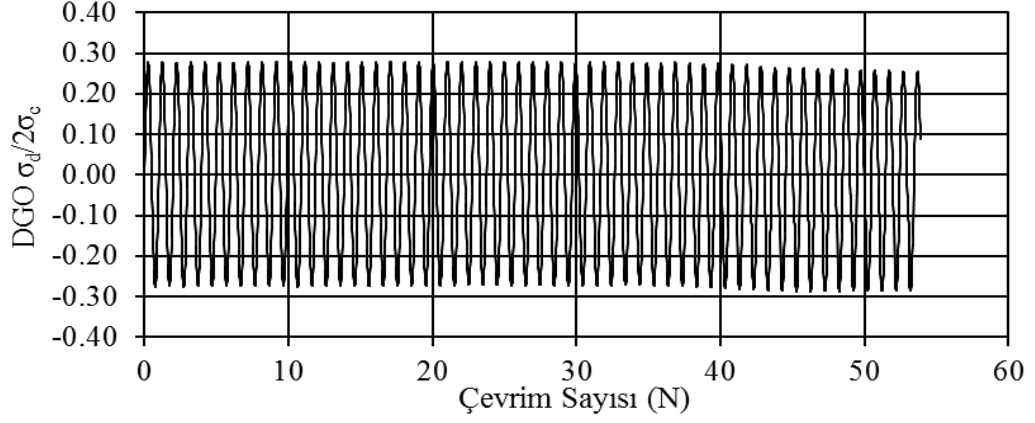
Şekil A. 24 : DN26 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	35	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	14/04/2015	Doygunluk (B)	0.74
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	29



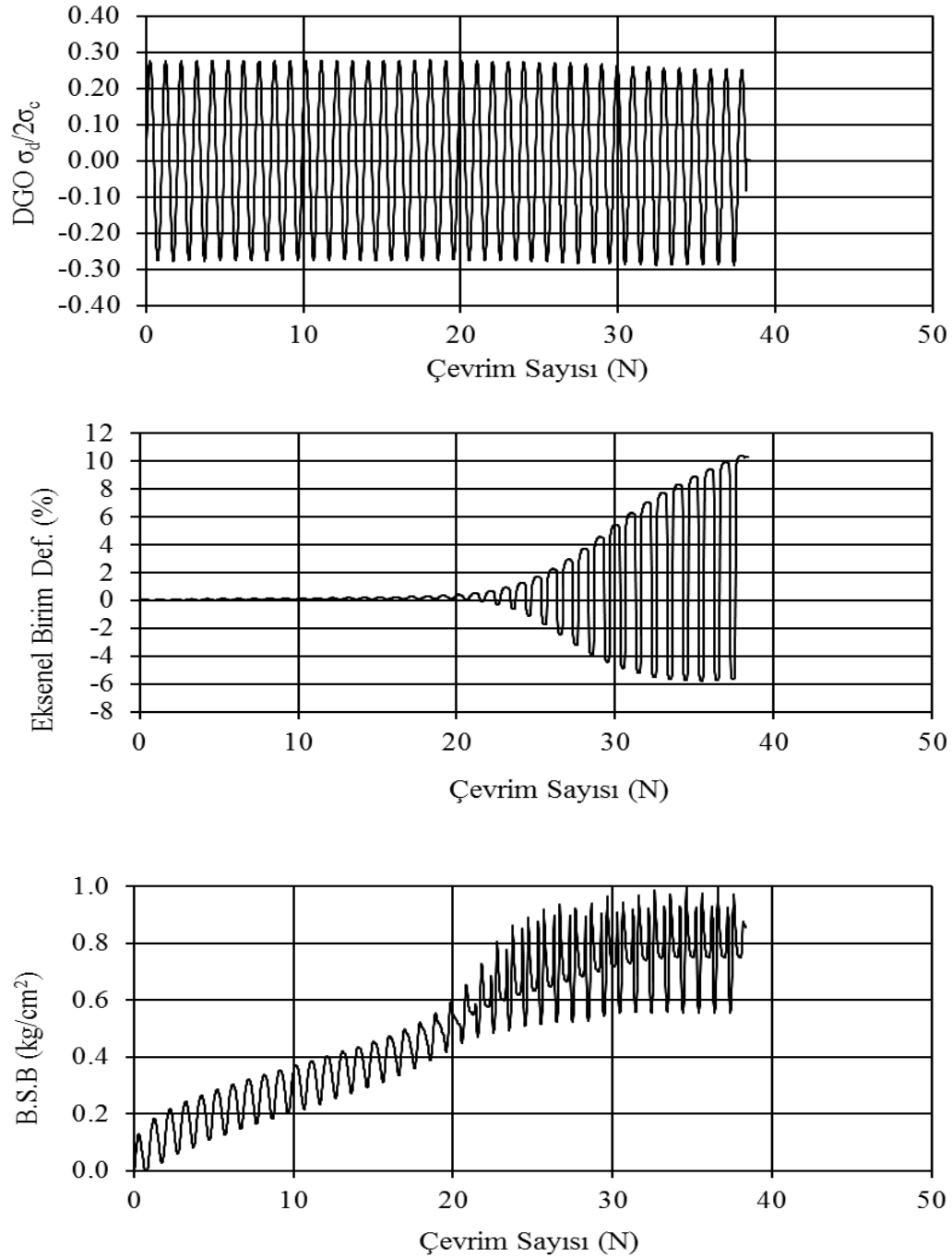
Şekil A. 25 : DN35 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	36	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	15/04/2015	Doygunluk (B)	0.76
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	43



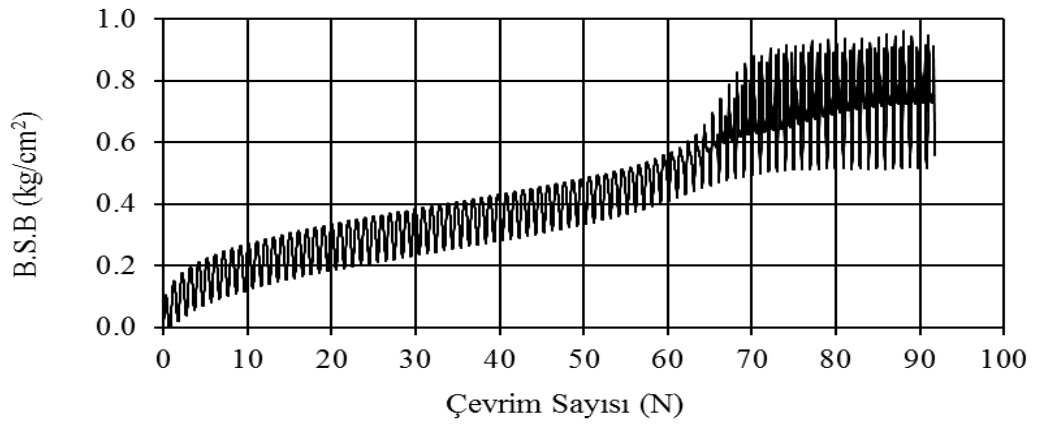
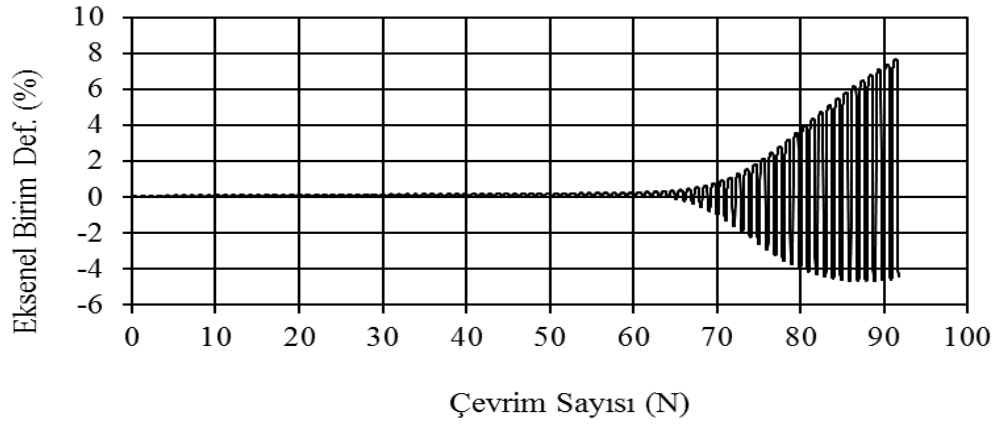
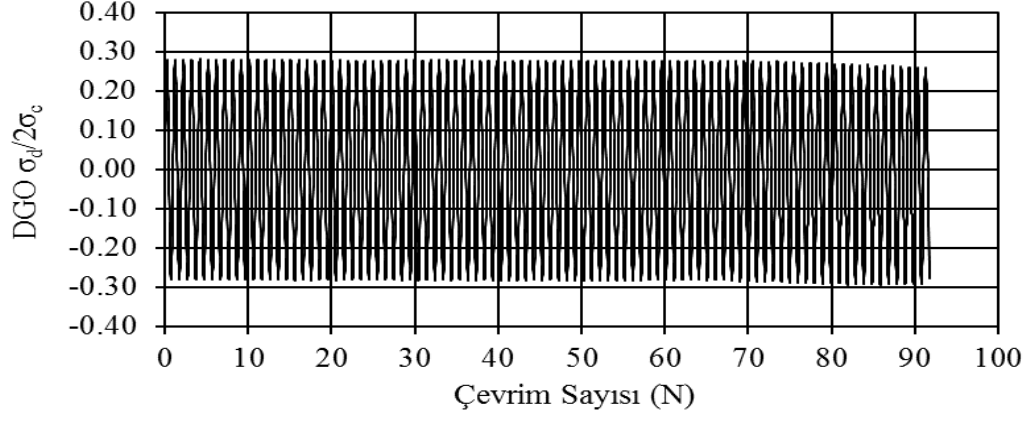
Şekil A. 26 : DN36 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	37	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	16/04/2015	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	28



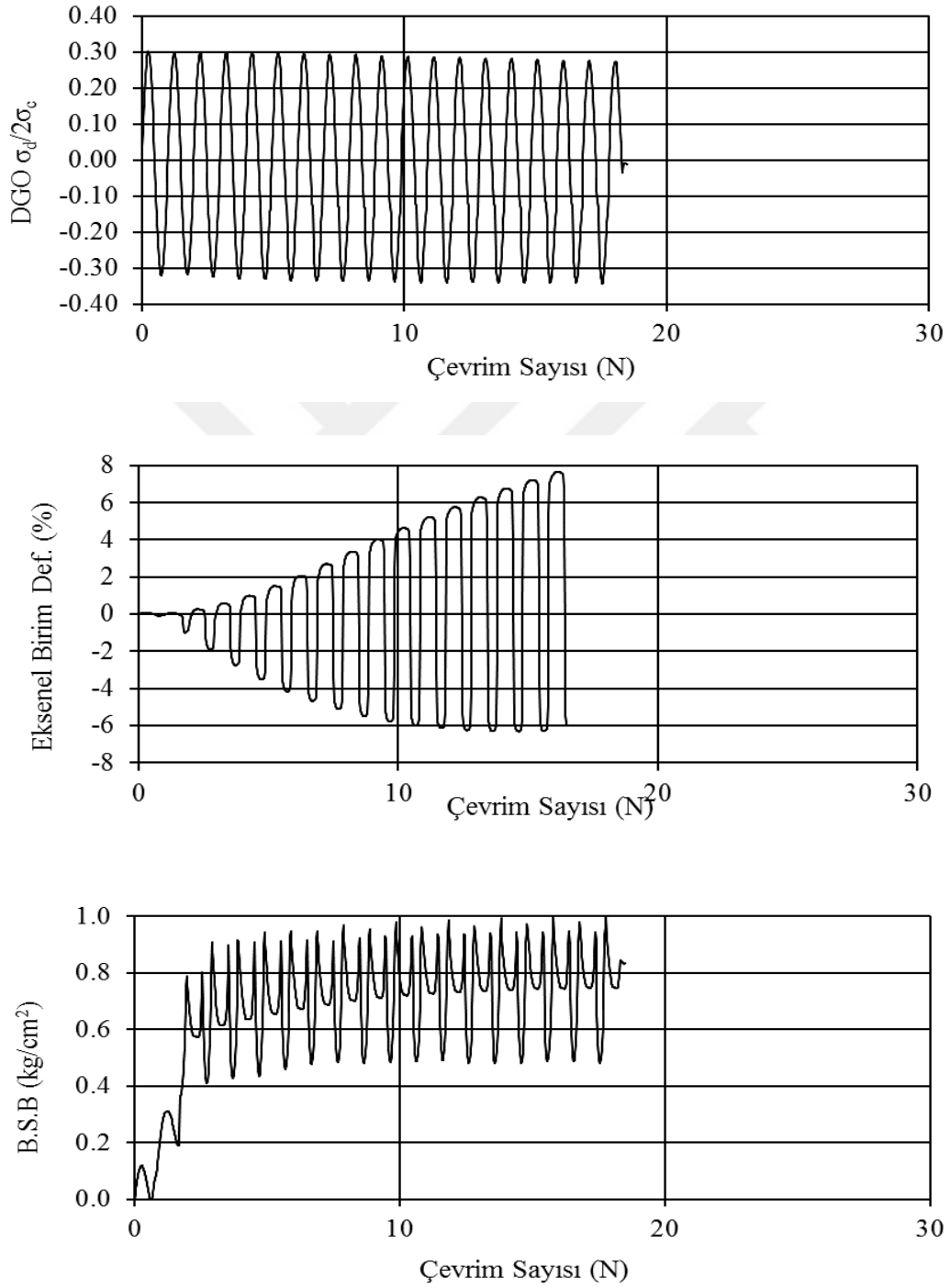
Şekil A. 27 : DN37 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	38	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	18/04/2015	Doygunluk (B)	0.60
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	77



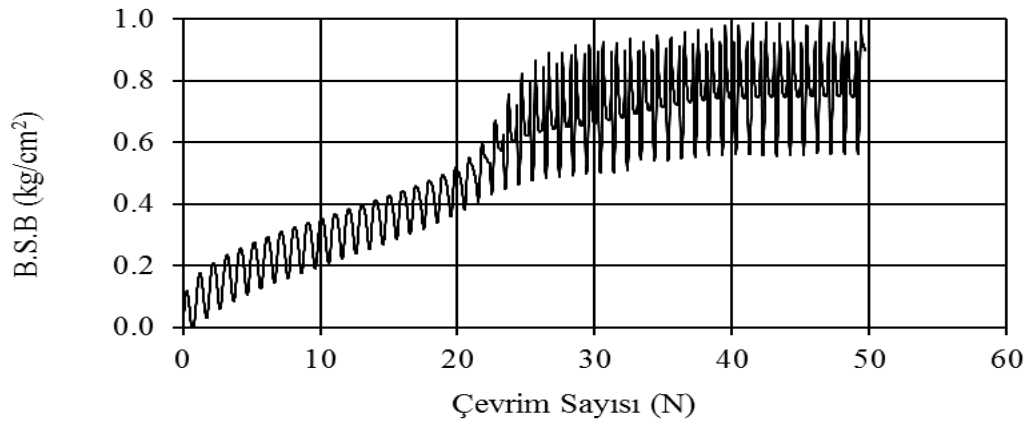
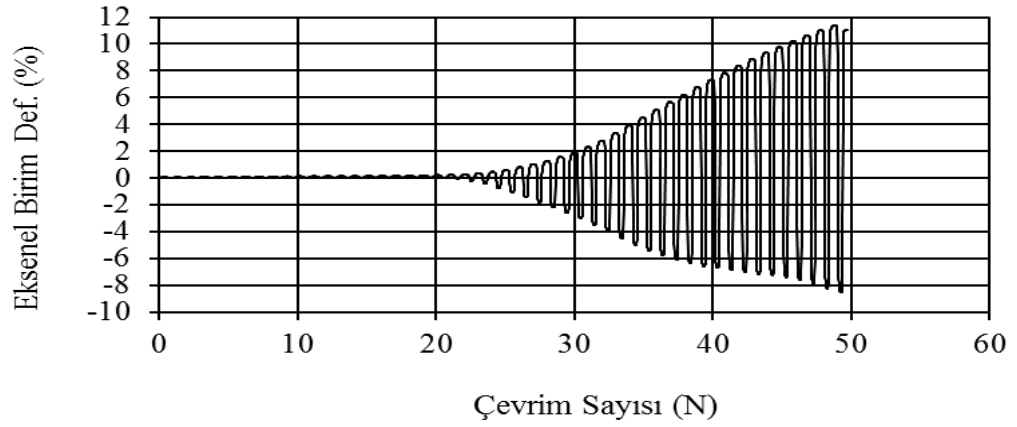
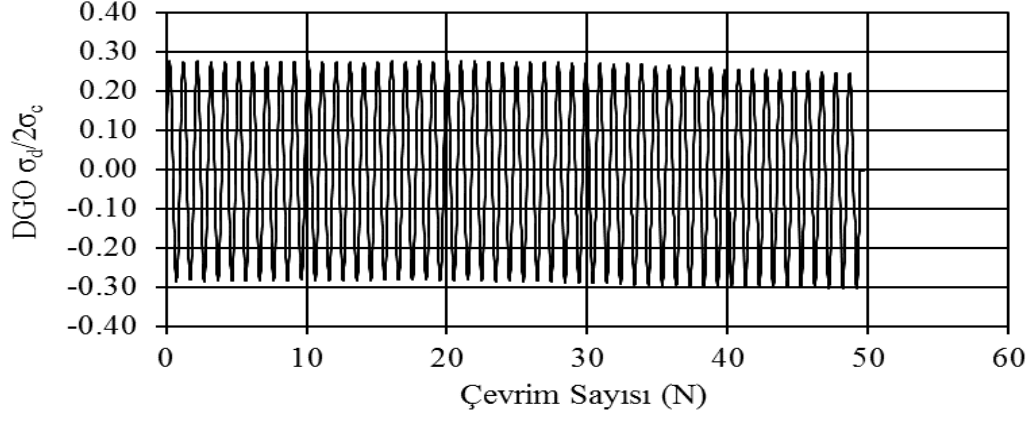
Şekil A. 28 : DN38 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	39	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.305
Deney Tarihi	22/04/2015	Doygunluk (B)	1.00
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	6



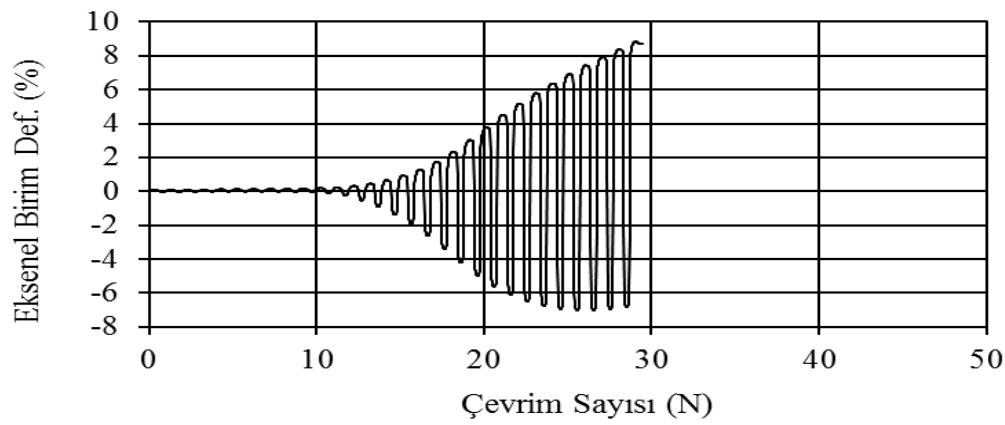
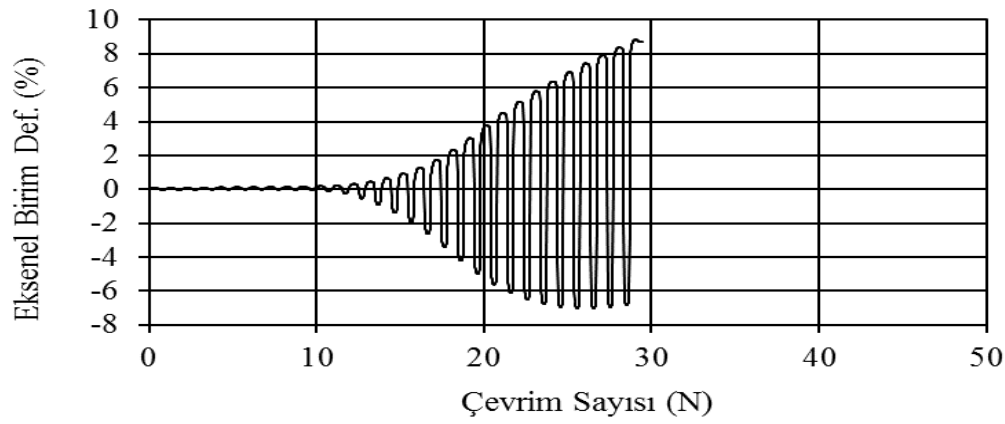
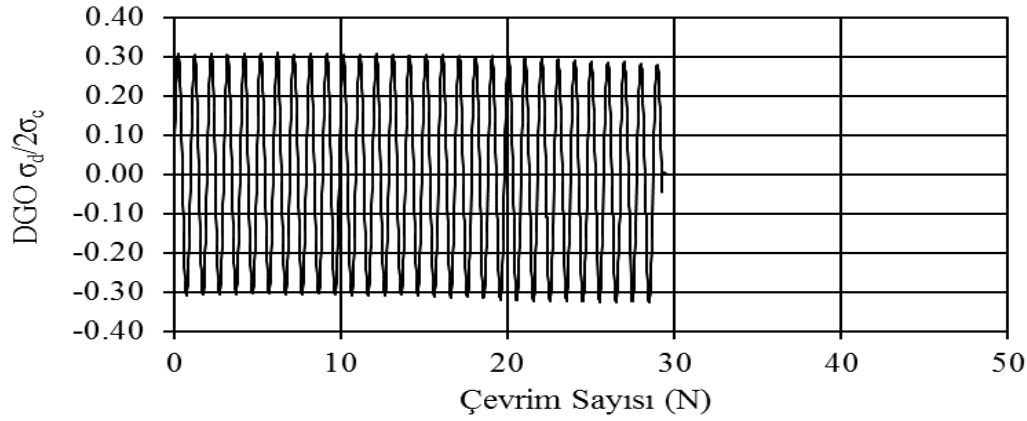
Şekil A. 29 : DN39 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	40	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	23/04/2015	Doygunluk (B)	0.93
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	32



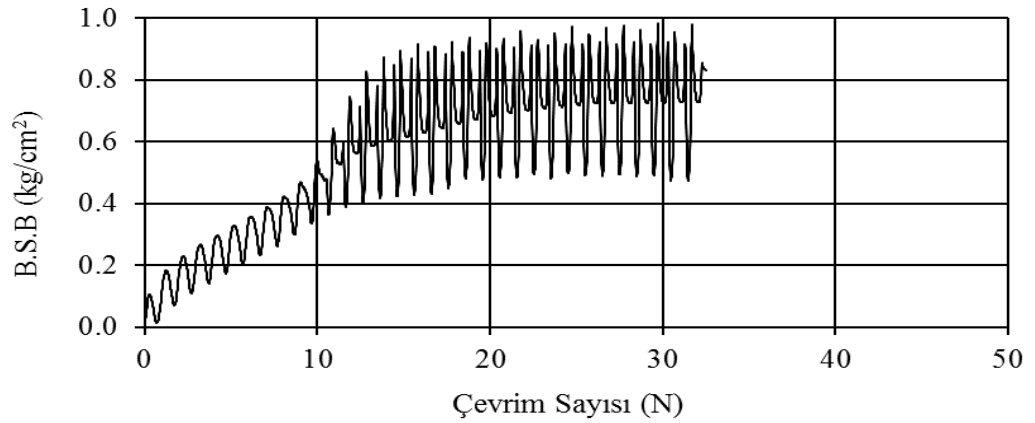
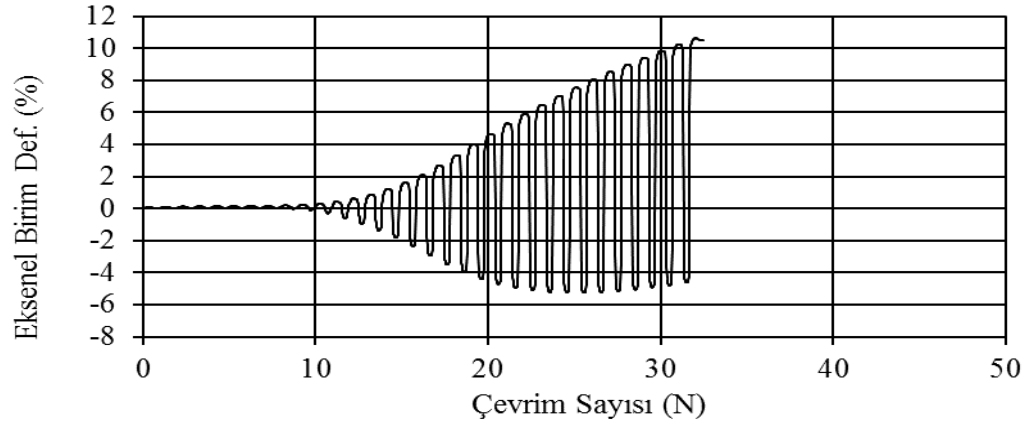
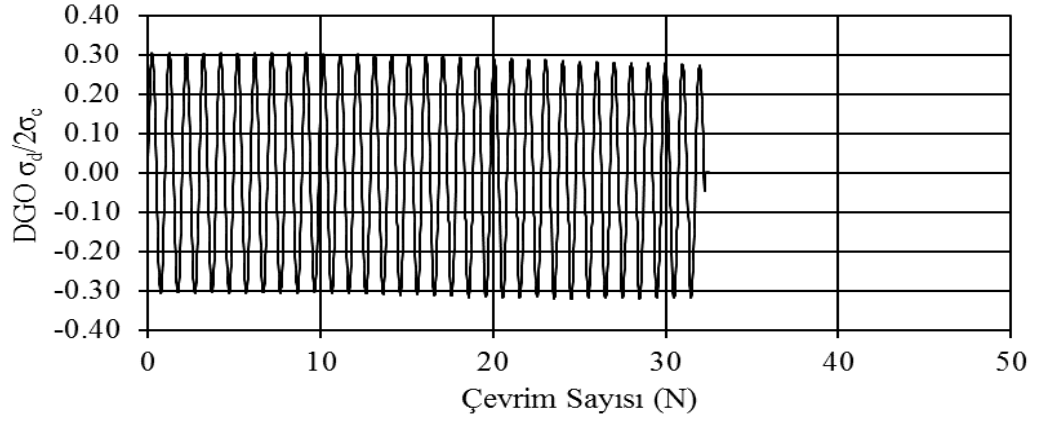
Şekil A. 30 : DN40 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	41	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.305
Deney Tarihi	14/05/2015	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 58
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	19



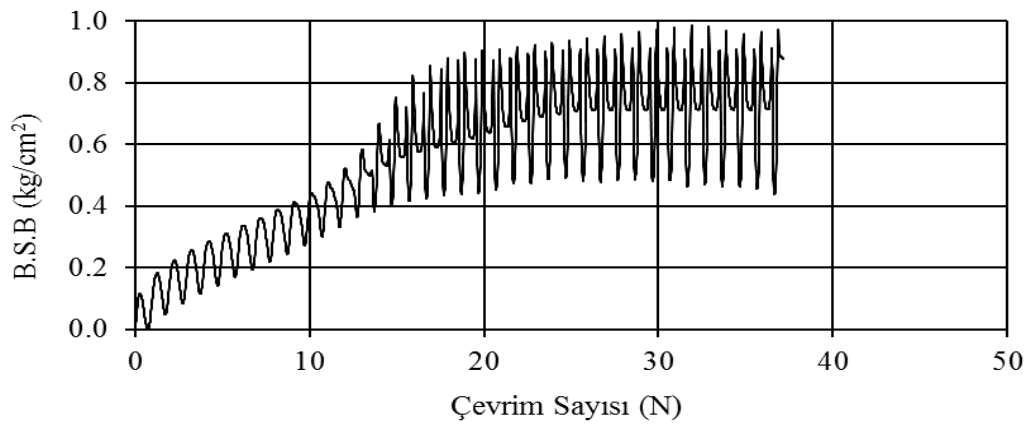
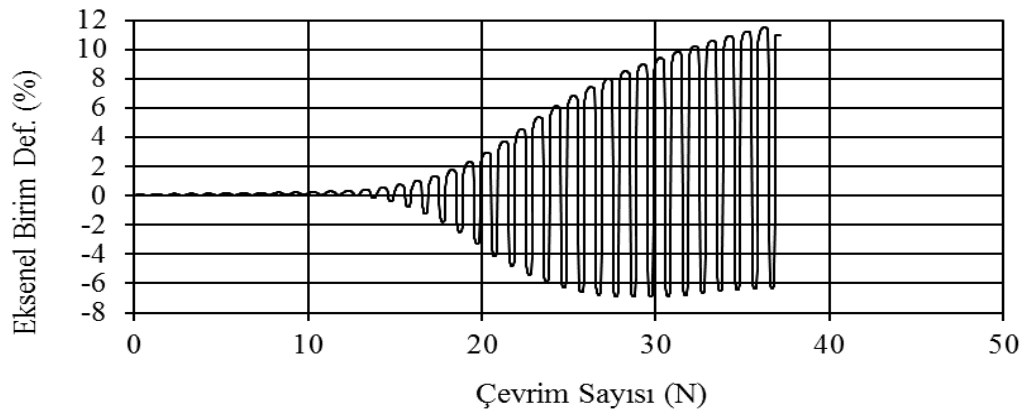
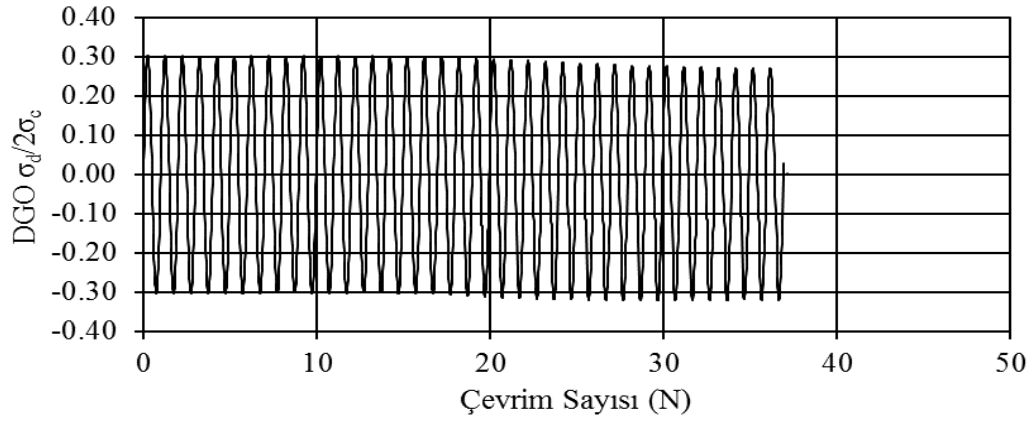
Şekil A. 31 : DN41 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	42	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	18/05/2015	Doygunluk (B)	0.58
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 58
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	17



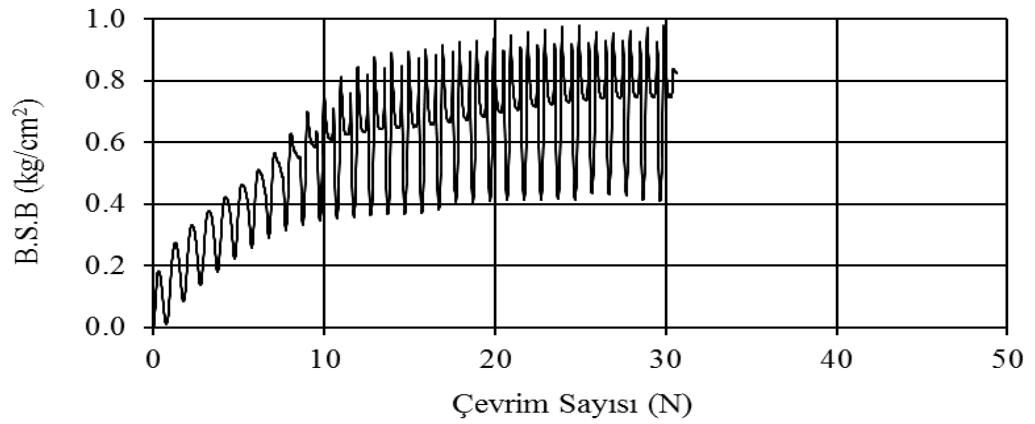
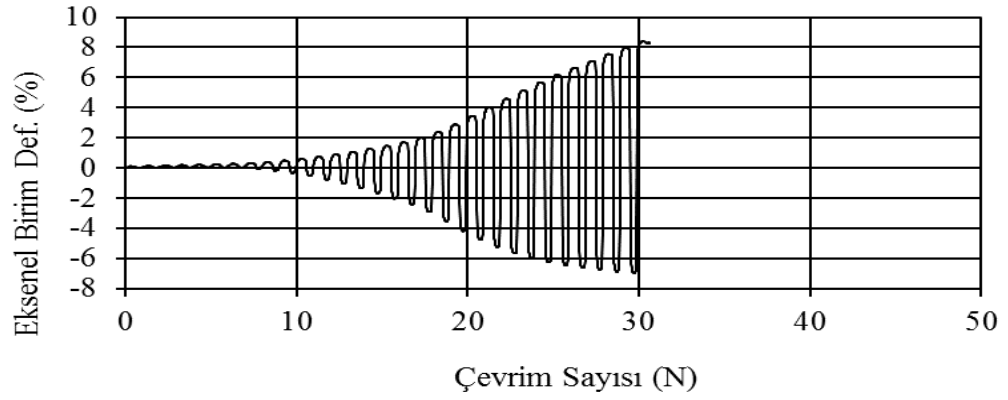
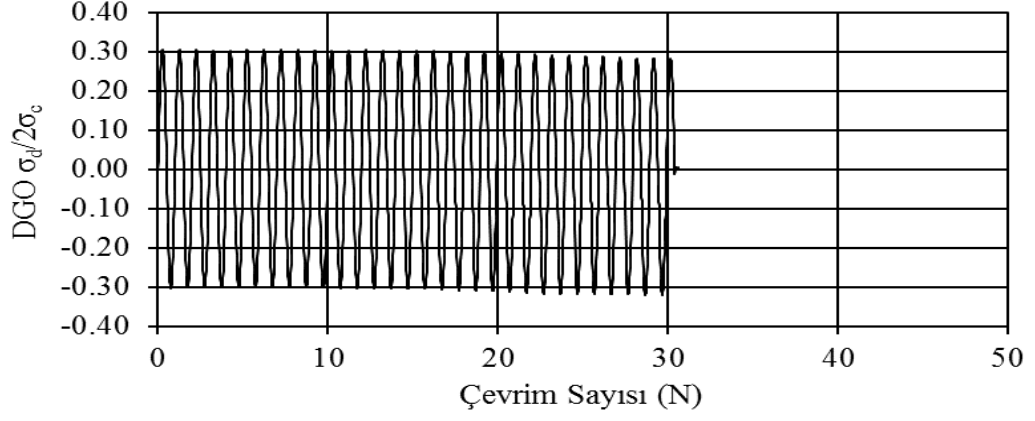
Şekil A. 32 : DN42 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	43	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	08/07/2015	Doygunluk (B)	0.95
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	20



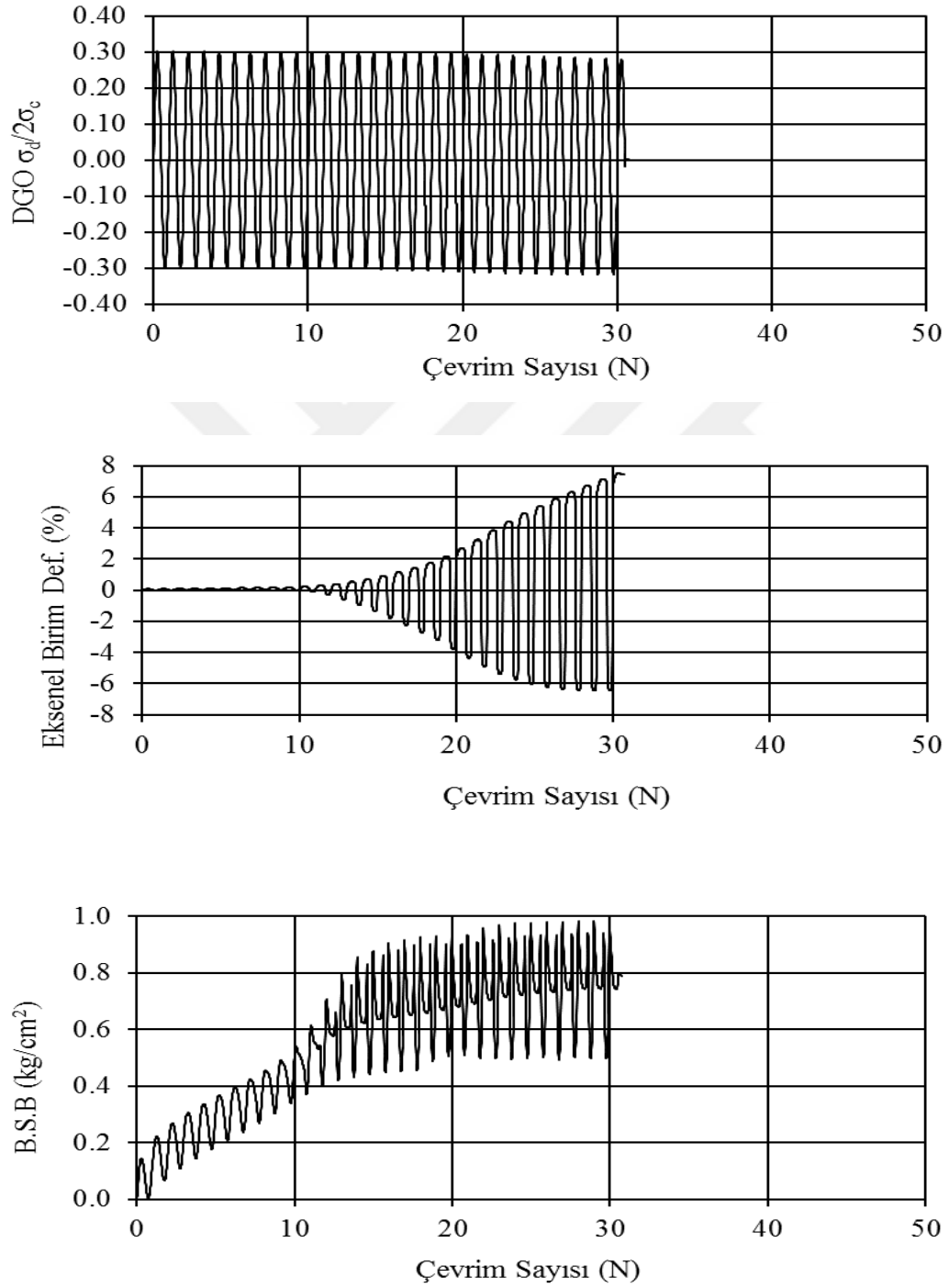
Şekil A. 33 : DN43 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	44	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	10/07/2015	Doygunluk (B)	0.92
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	18



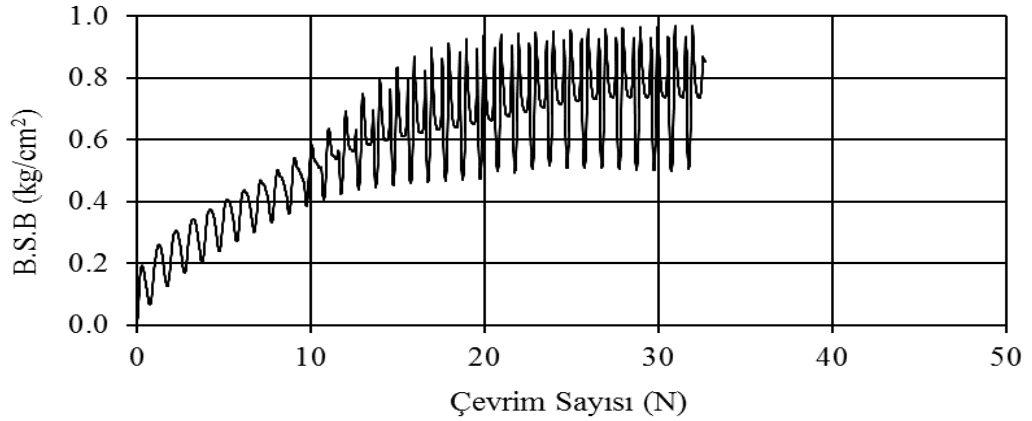
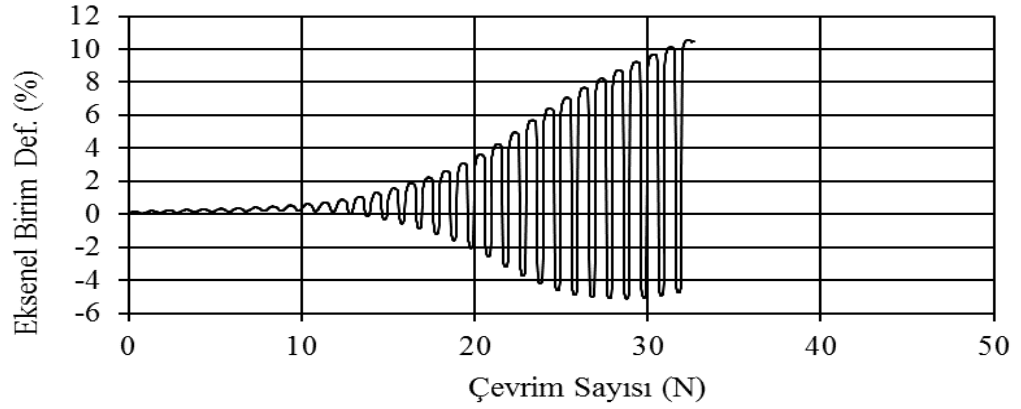
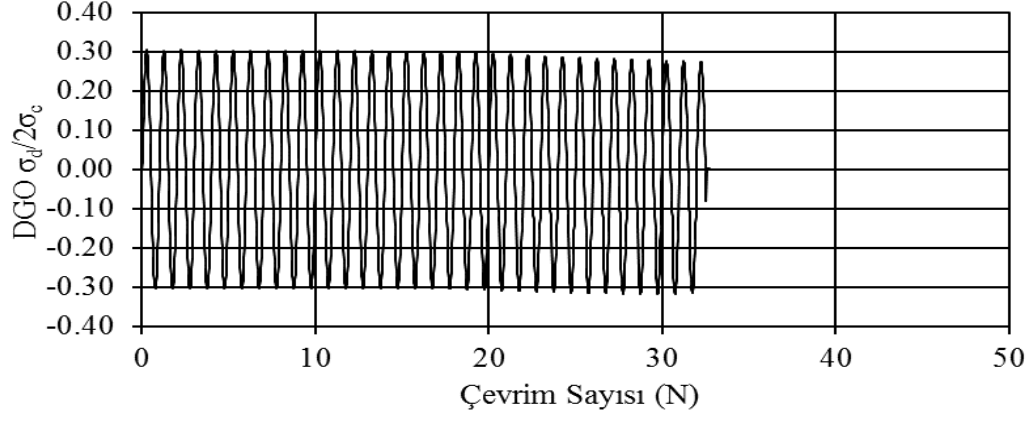
Şekil A. 34 : DN44 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	45	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	06/08/2015	Doygunluk (B)	0.95
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	19



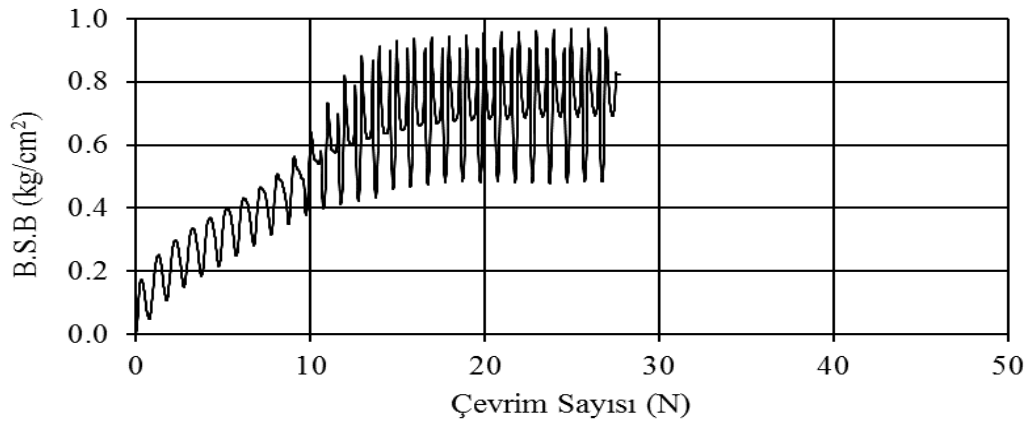
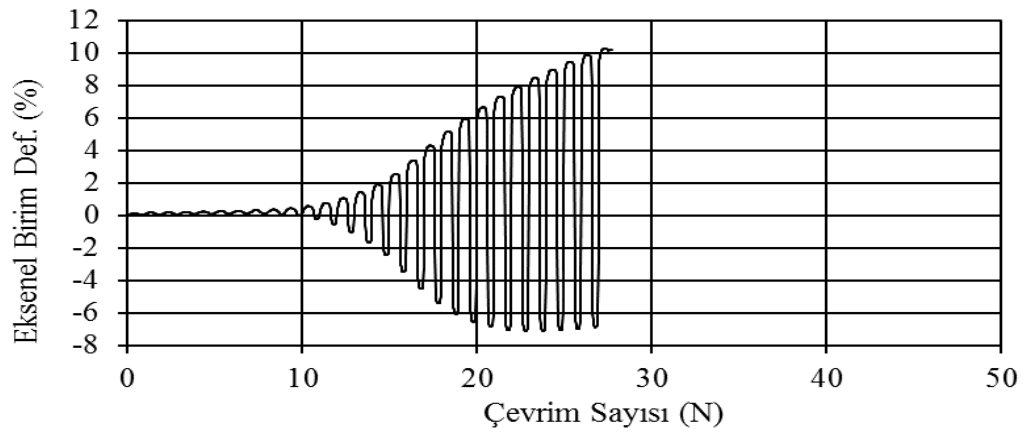
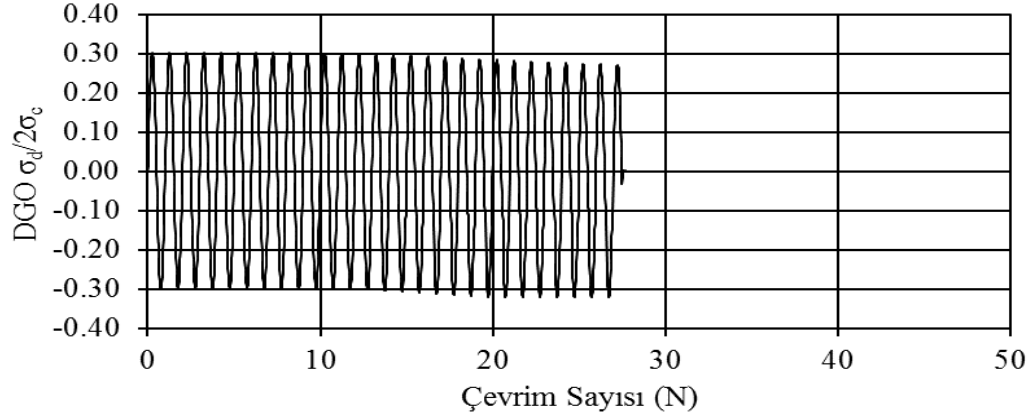
Şekil A. 35 : DN45 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	46	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	07/08/2015	Doygunluk (B)	0.80
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 61
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	20



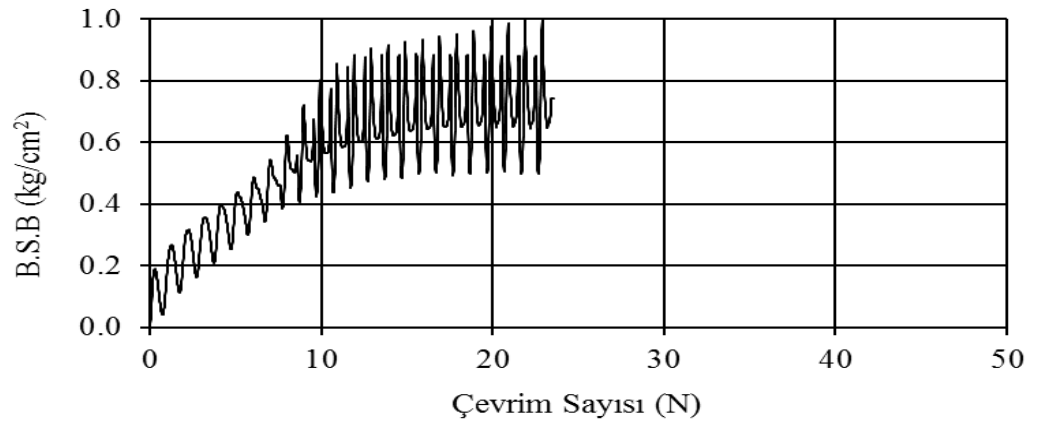
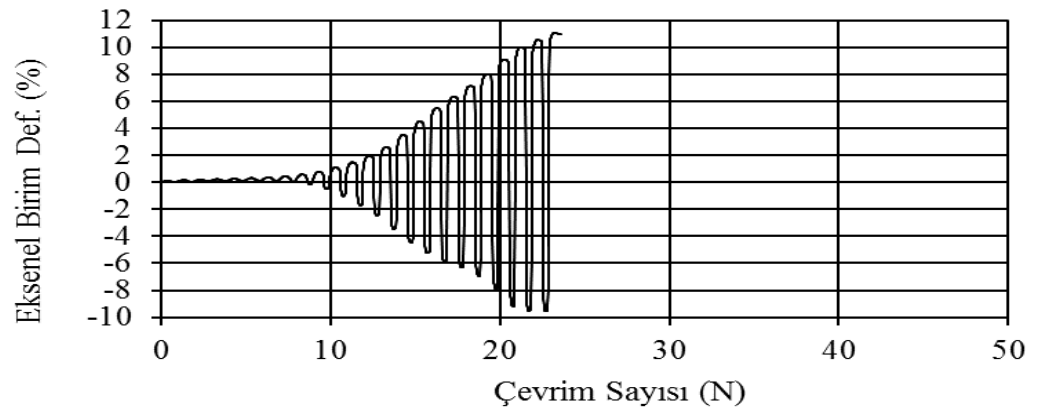
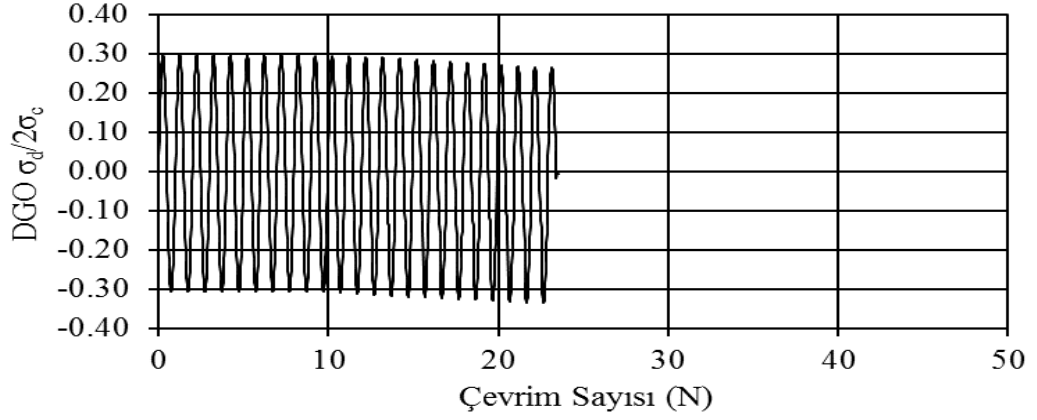
Şekil A. 36 : DN46 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	47	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	11/08/2015	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	16



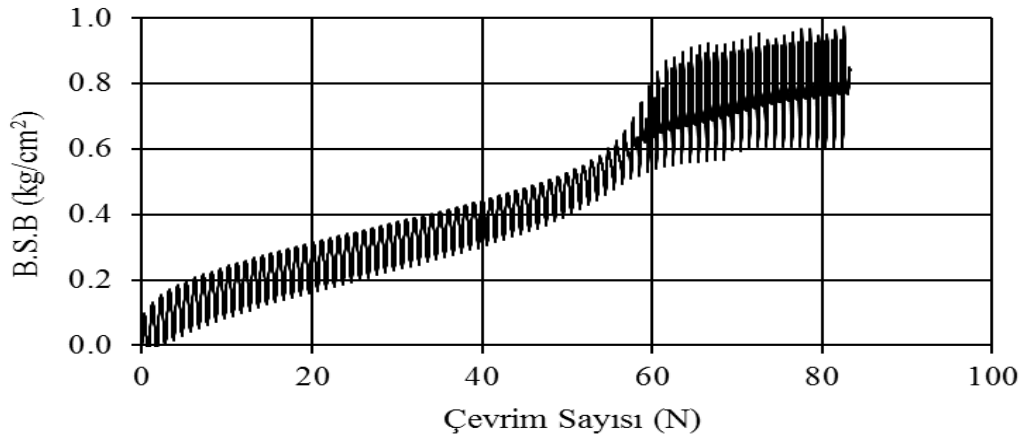
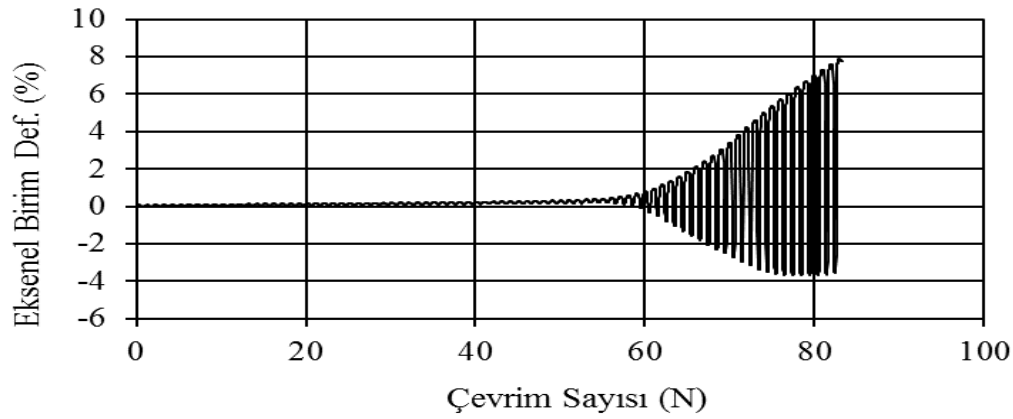
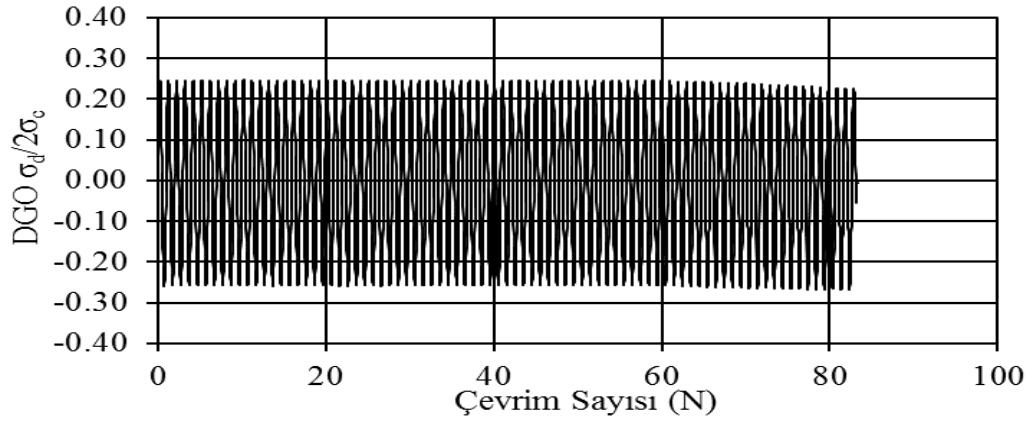
Şekil A. 37 : DN47 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	48	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	12/08/2015	Doygunluk (B)	0.98
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	13



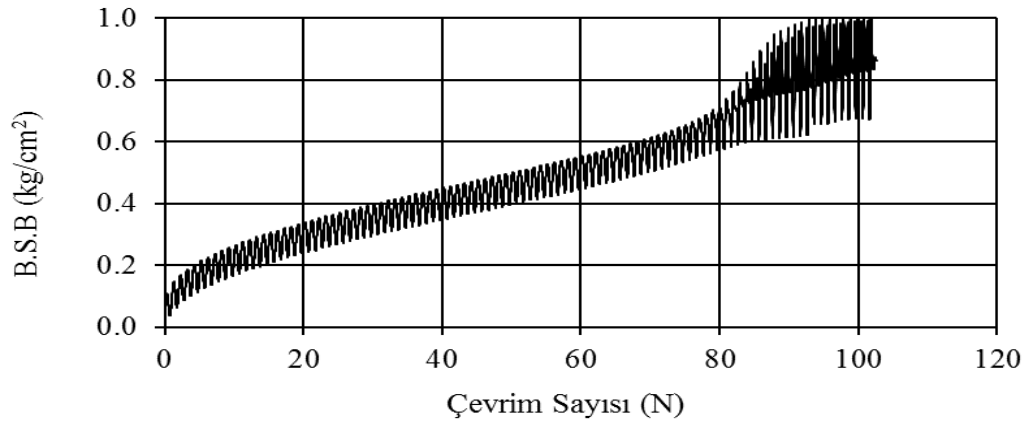
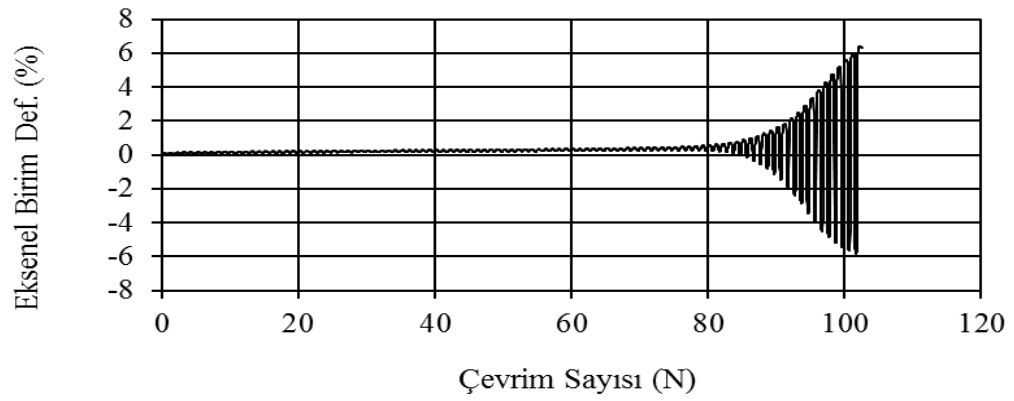
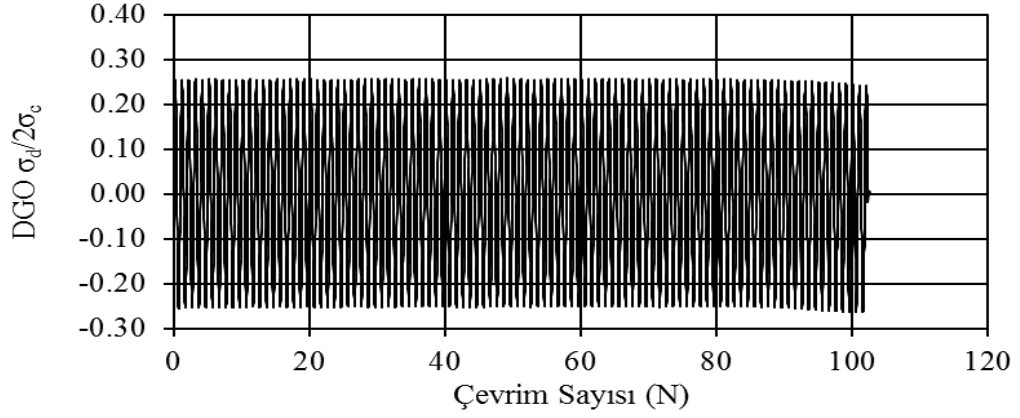
Şekil A. 38 : DN48 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	49	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.25
Deney Tarihi	13/08/2015	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	68



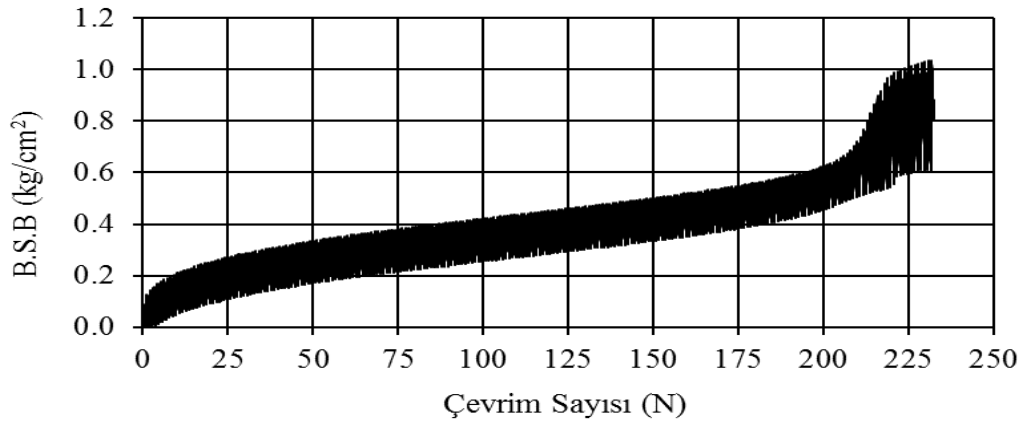
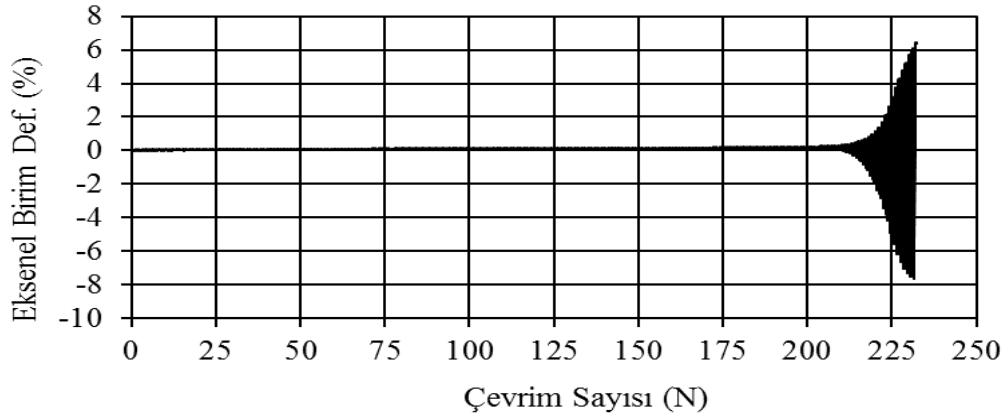
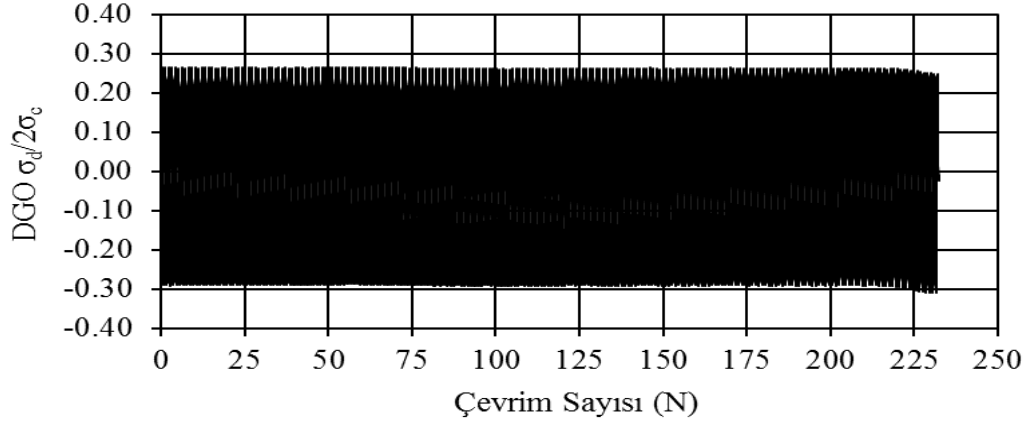
Şekil A. 39 : DN49 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	50	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.25
Deney Tarihi	13/10/2015	Doygunluk (B)	0.70
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	93



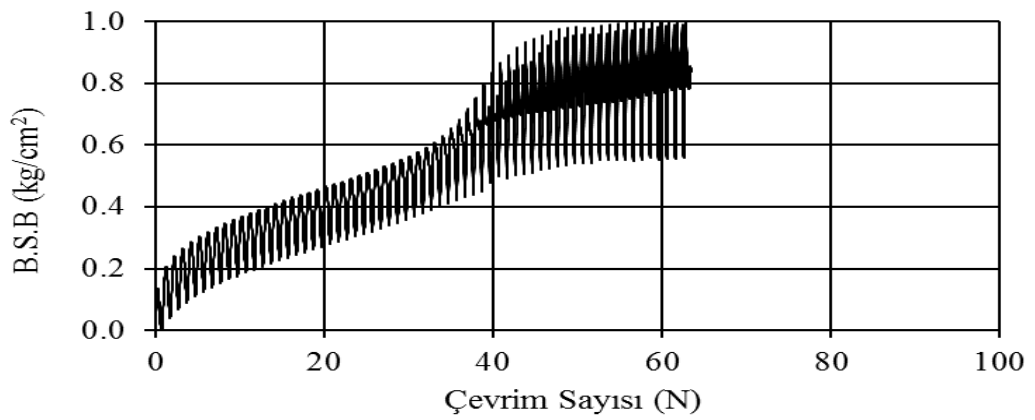
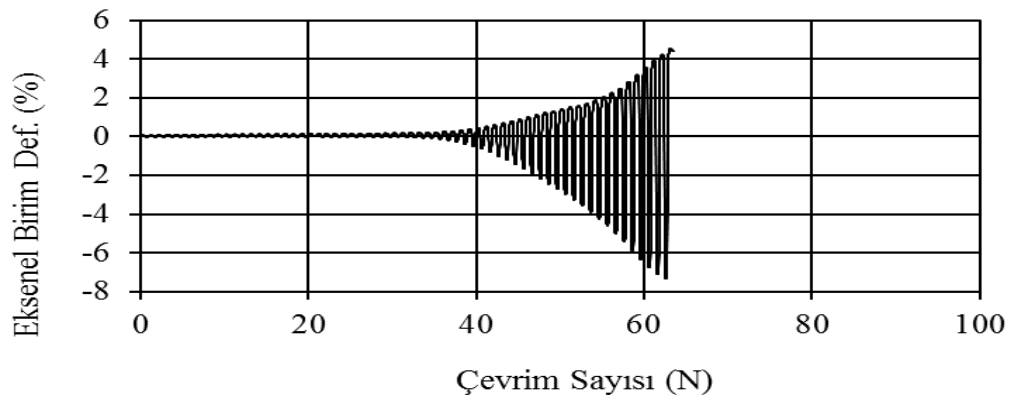
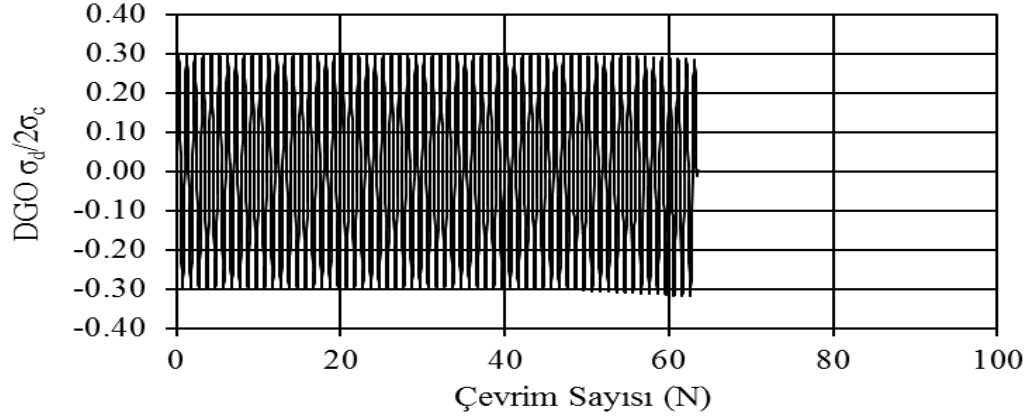
Şekil A. 40 : DN50 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	51	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	23/10/2015	Doygunluk (B)	0.45
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	222



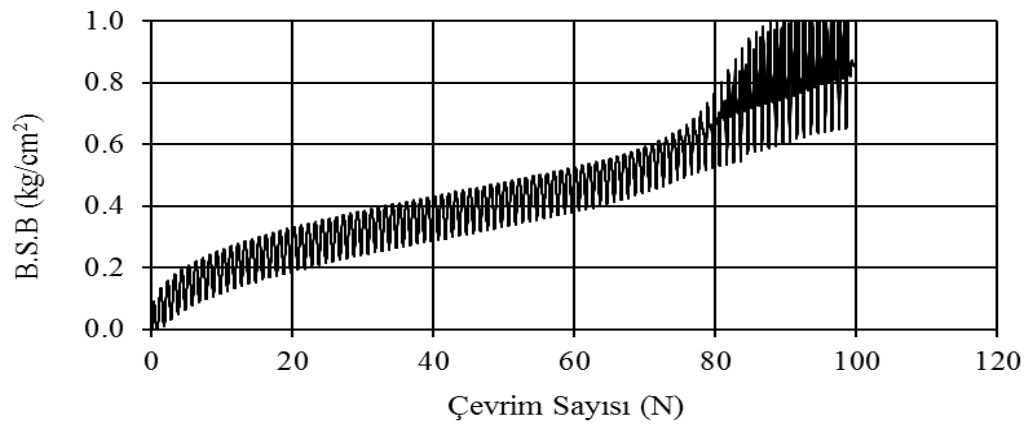
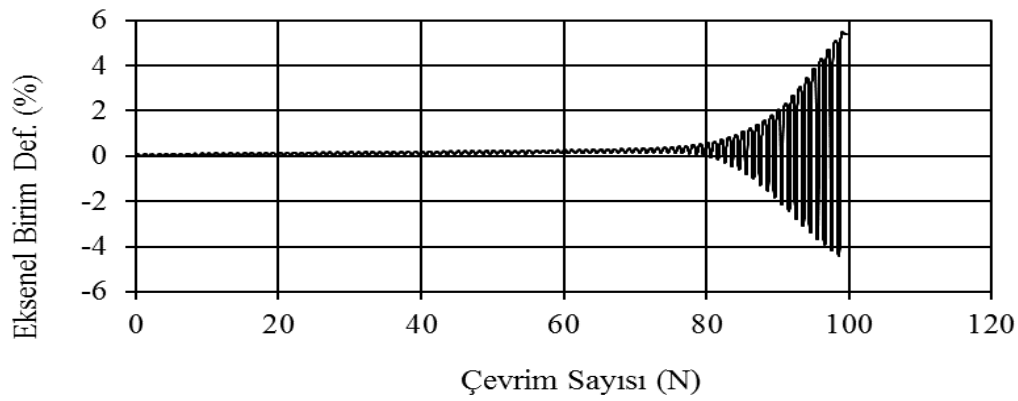
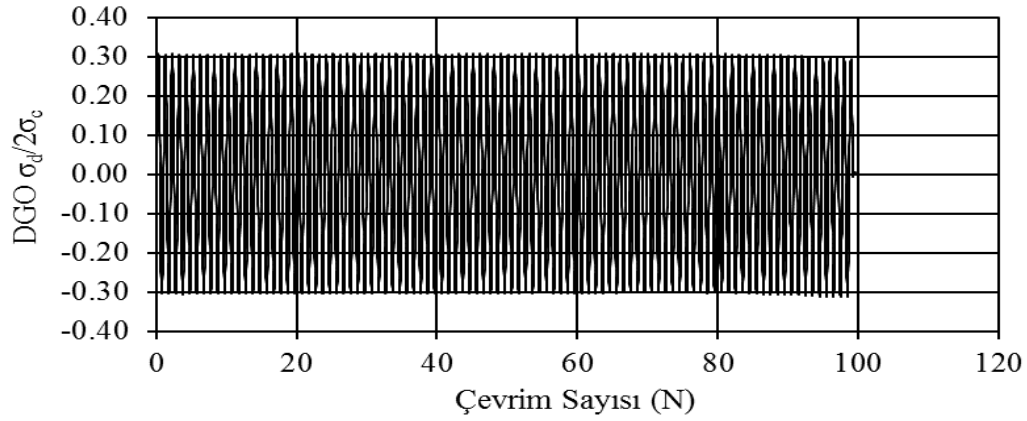
Şekil A. 41 : DN51 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	52	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	29/10/2015	Doygunluk (B)	0.72
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	52



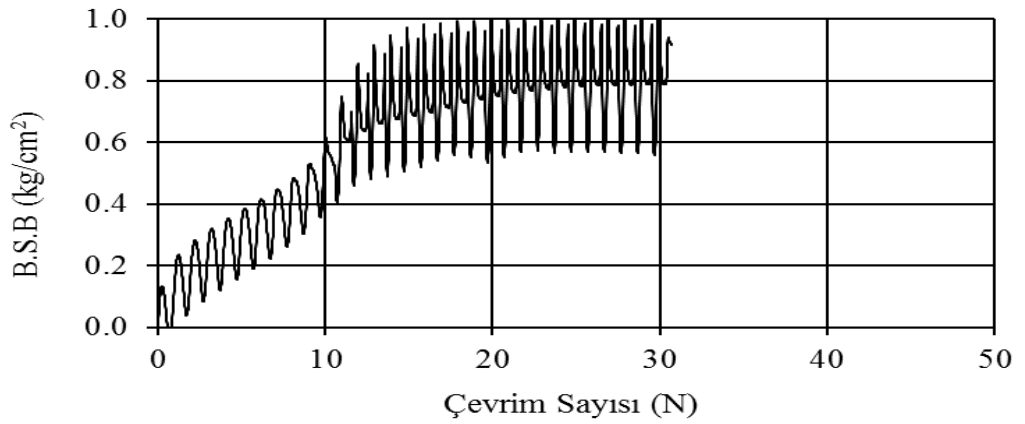
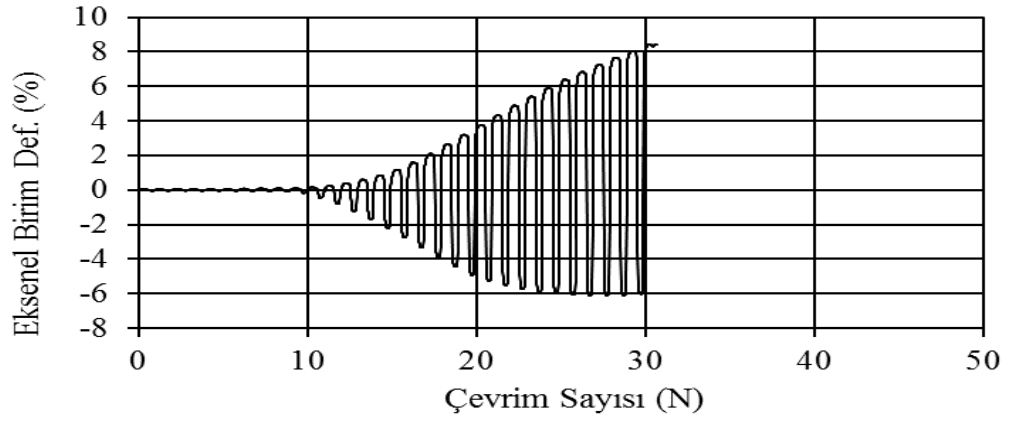
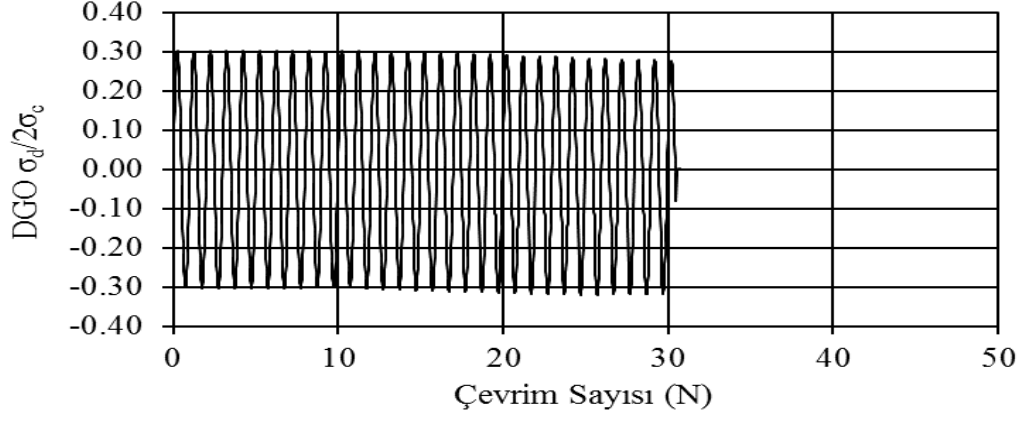
Şekil A. 42 : DN52 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	53	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	30/10/2015	Doygunluk (B)	0.52
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	92



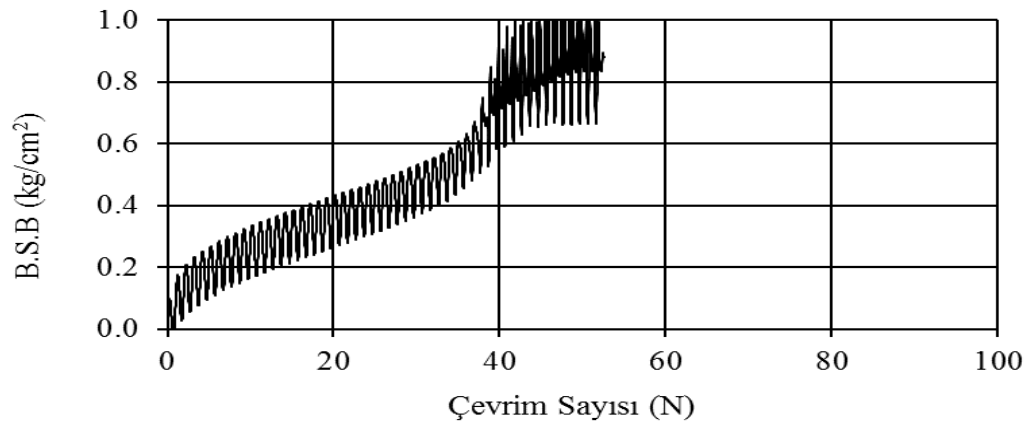
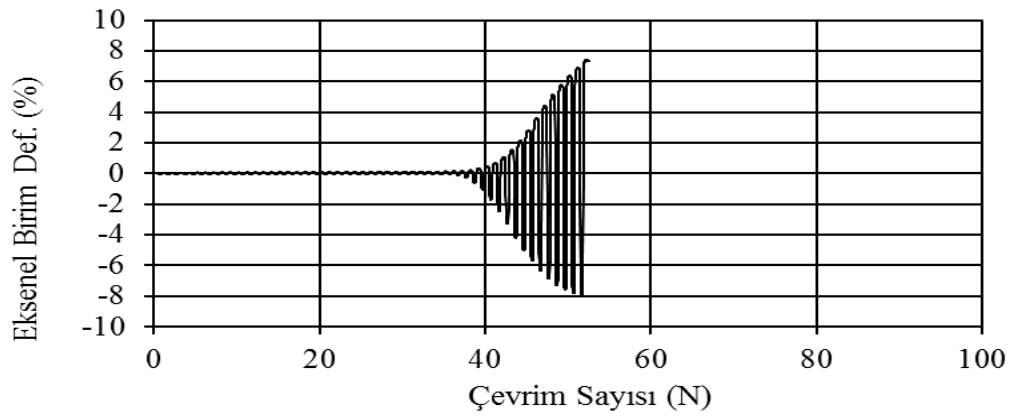
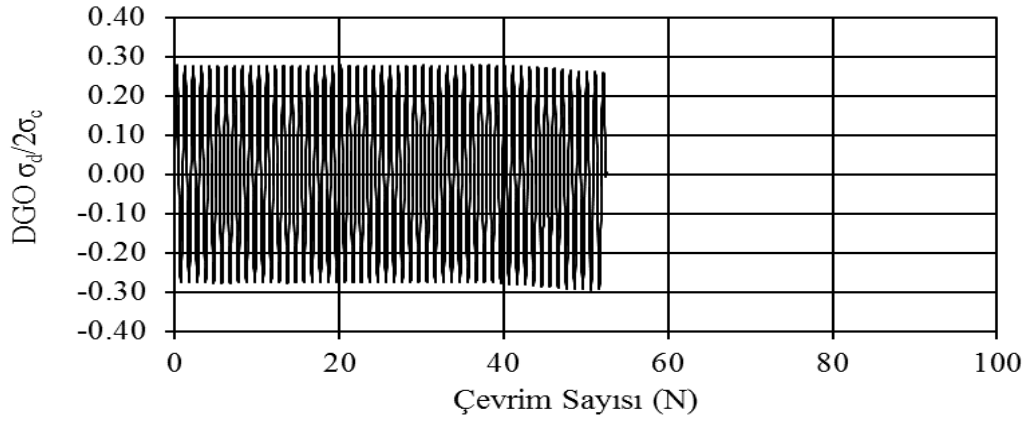
Şekil A. 43 : DN53 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	54	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	18/11/2015	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	17



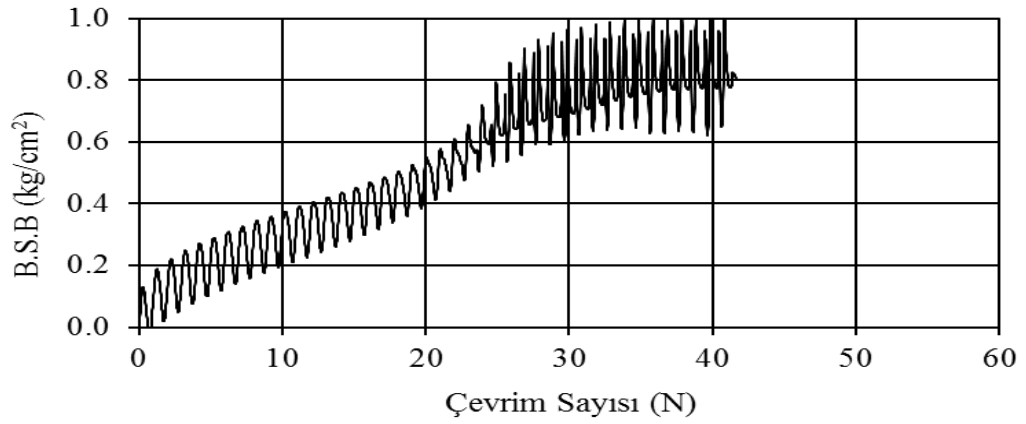
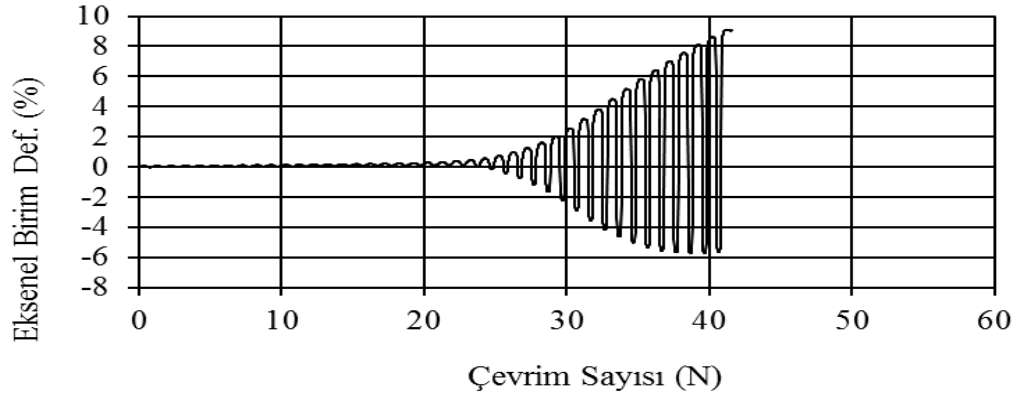
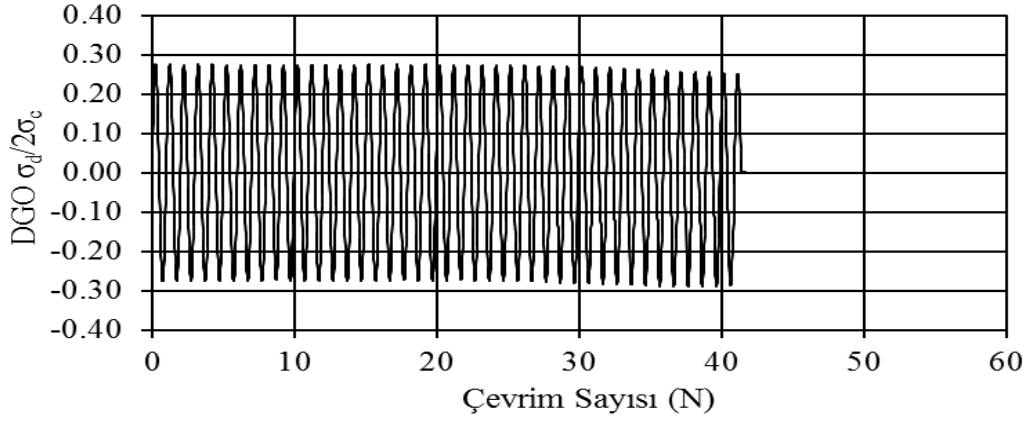
Şekil A. 44 : DN54 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	55	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	18/11/2015	Doygunluk (B)	0.76
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	43



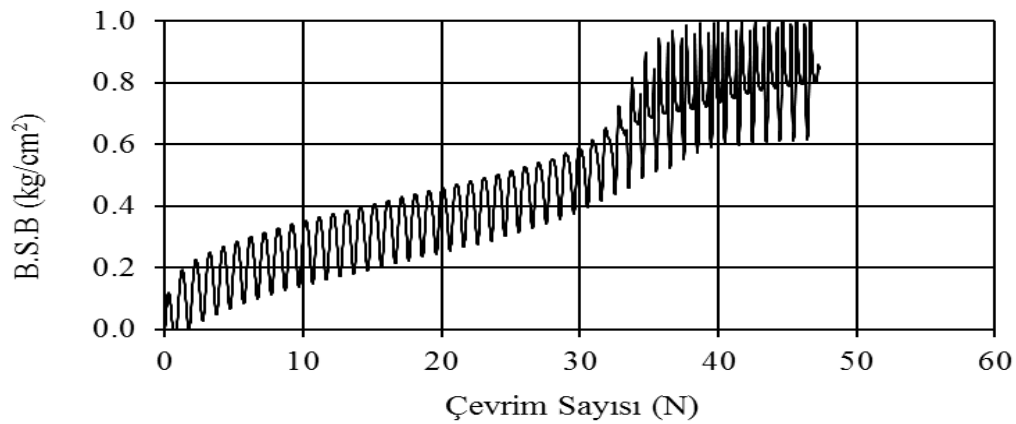
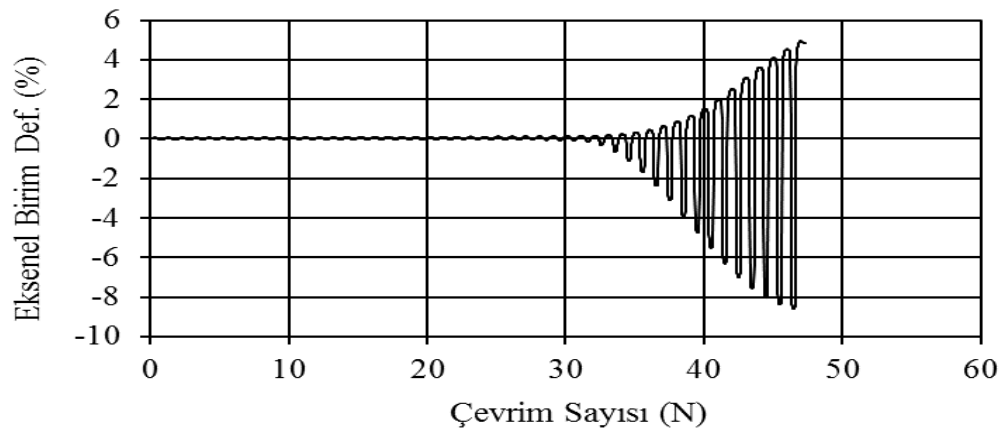
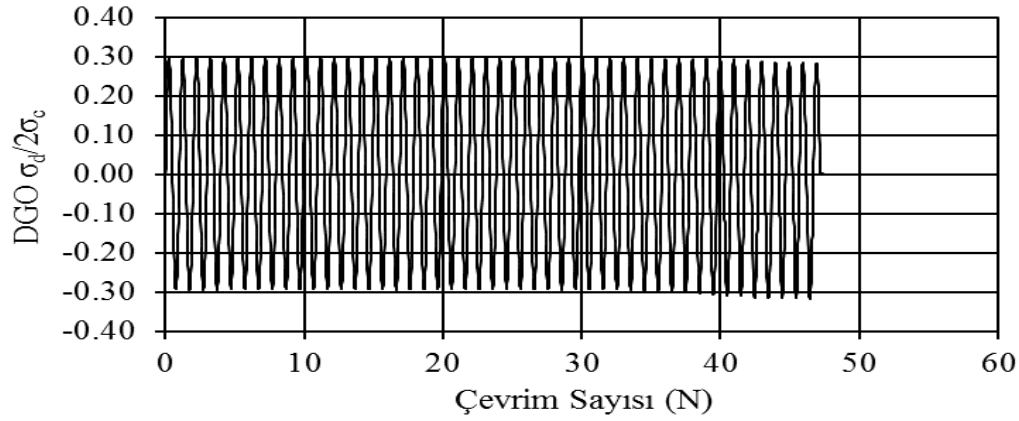
Şekil A. 45 : DN55 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	56	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	19/11/2015	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 52
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	31



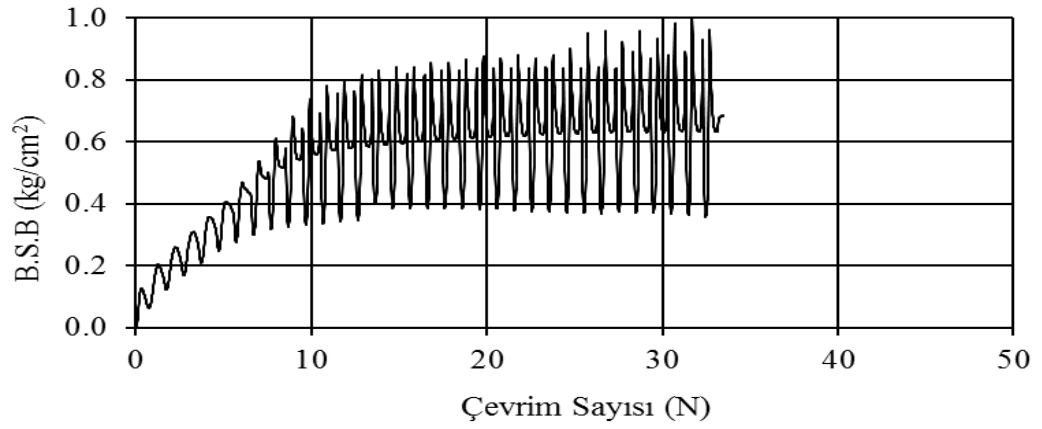
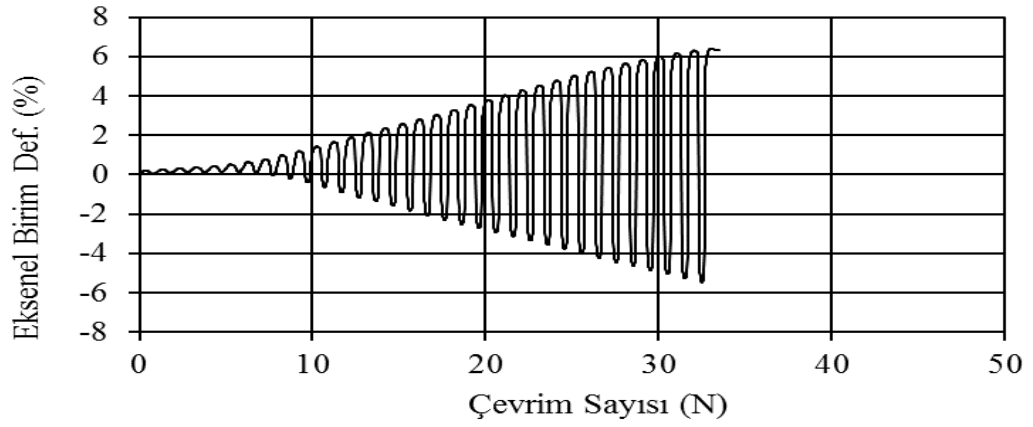
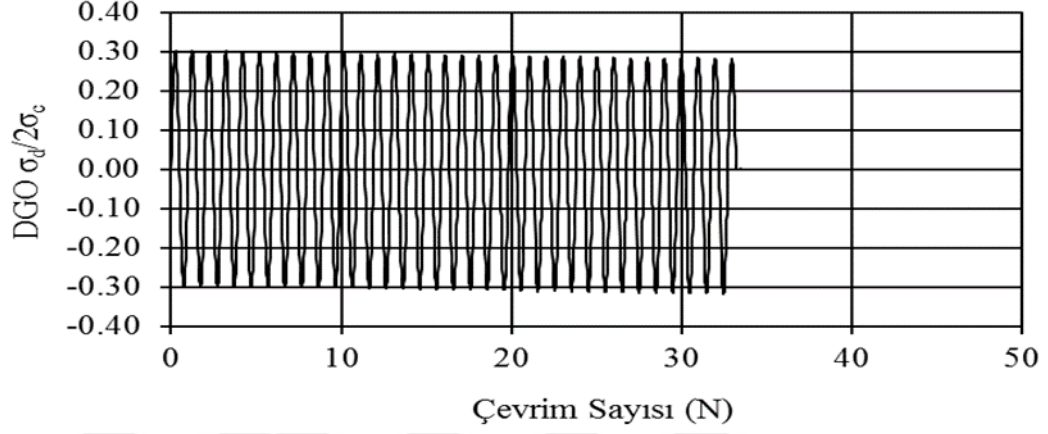
Şekil A. 46 : DN56 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	57	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	17/12/2015	Doygunluk (B)	0.84
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	39



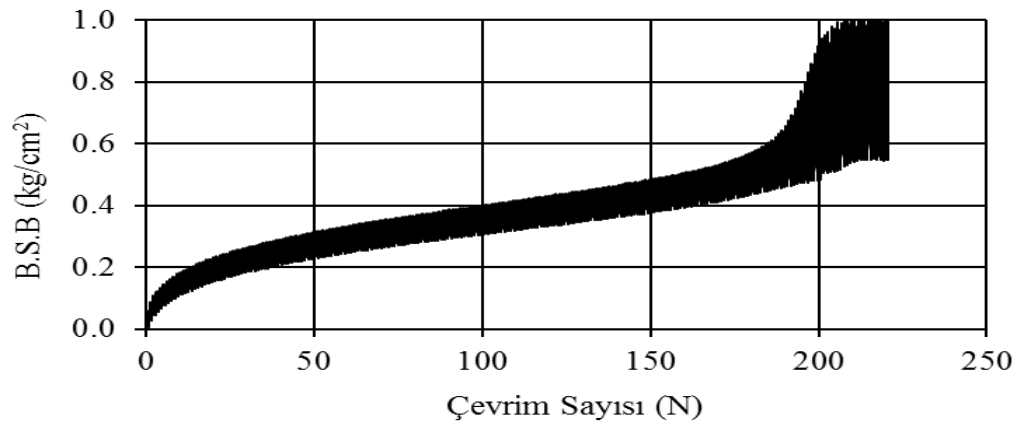
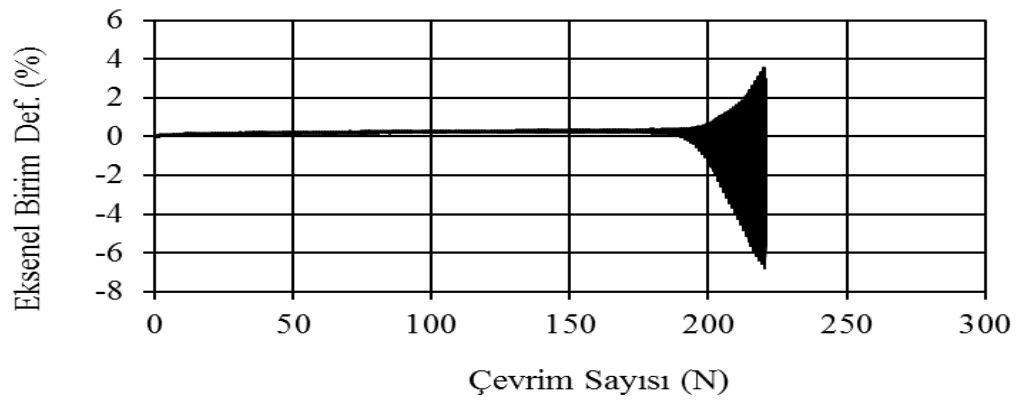
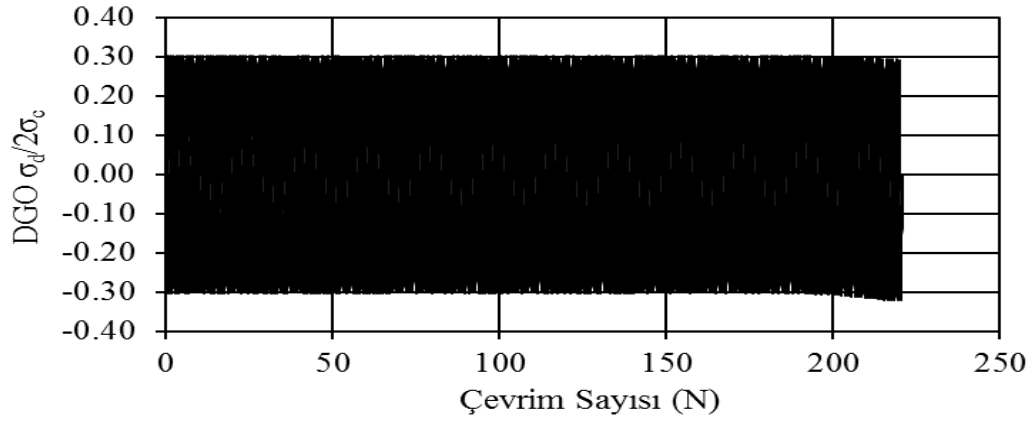
Şekil A. 47 : DN57 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	59	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	19/02/2016	Doygunluk (B)	0.58
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 54
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	18



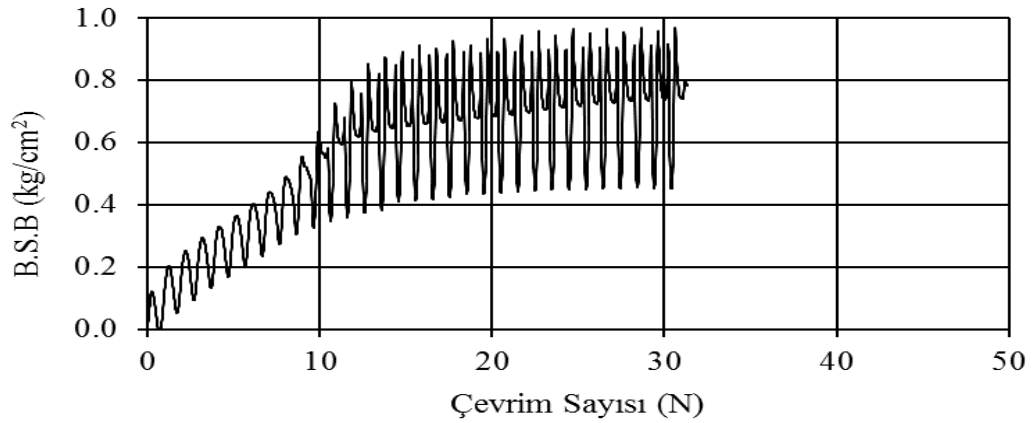
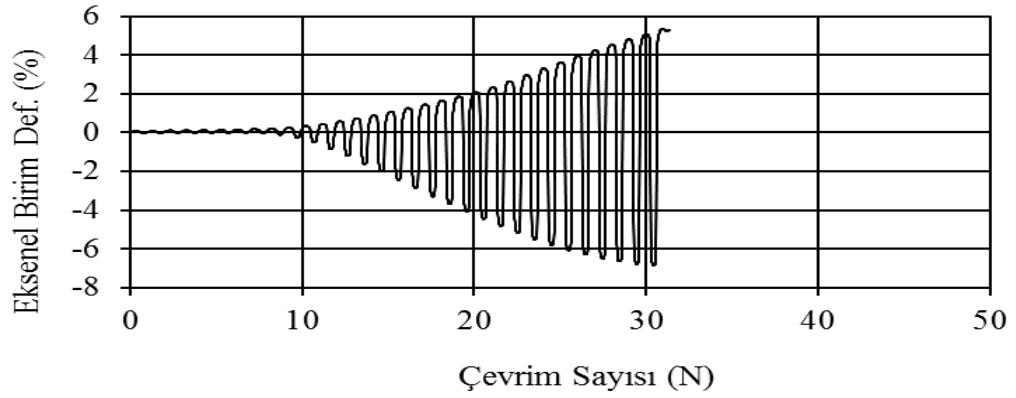
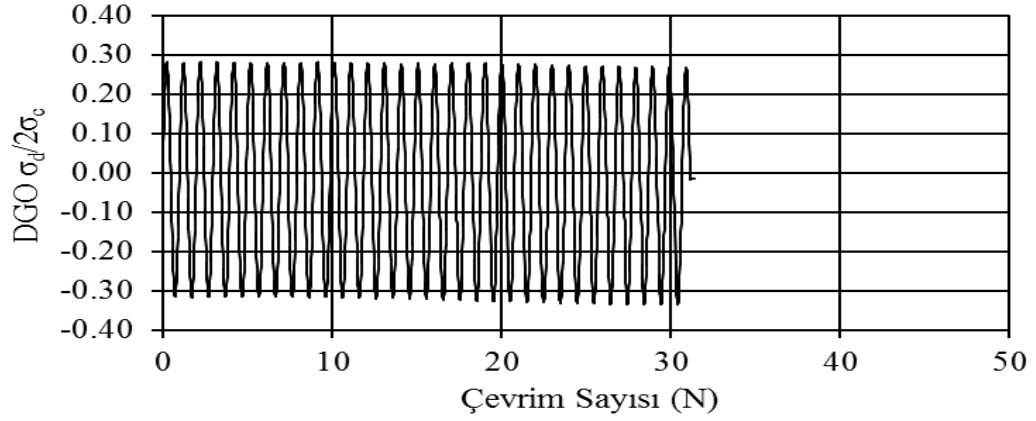
Şekil A. 48 : DN59 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	66	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	30/03/2016	Doygunluk (B)	0.47
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	212



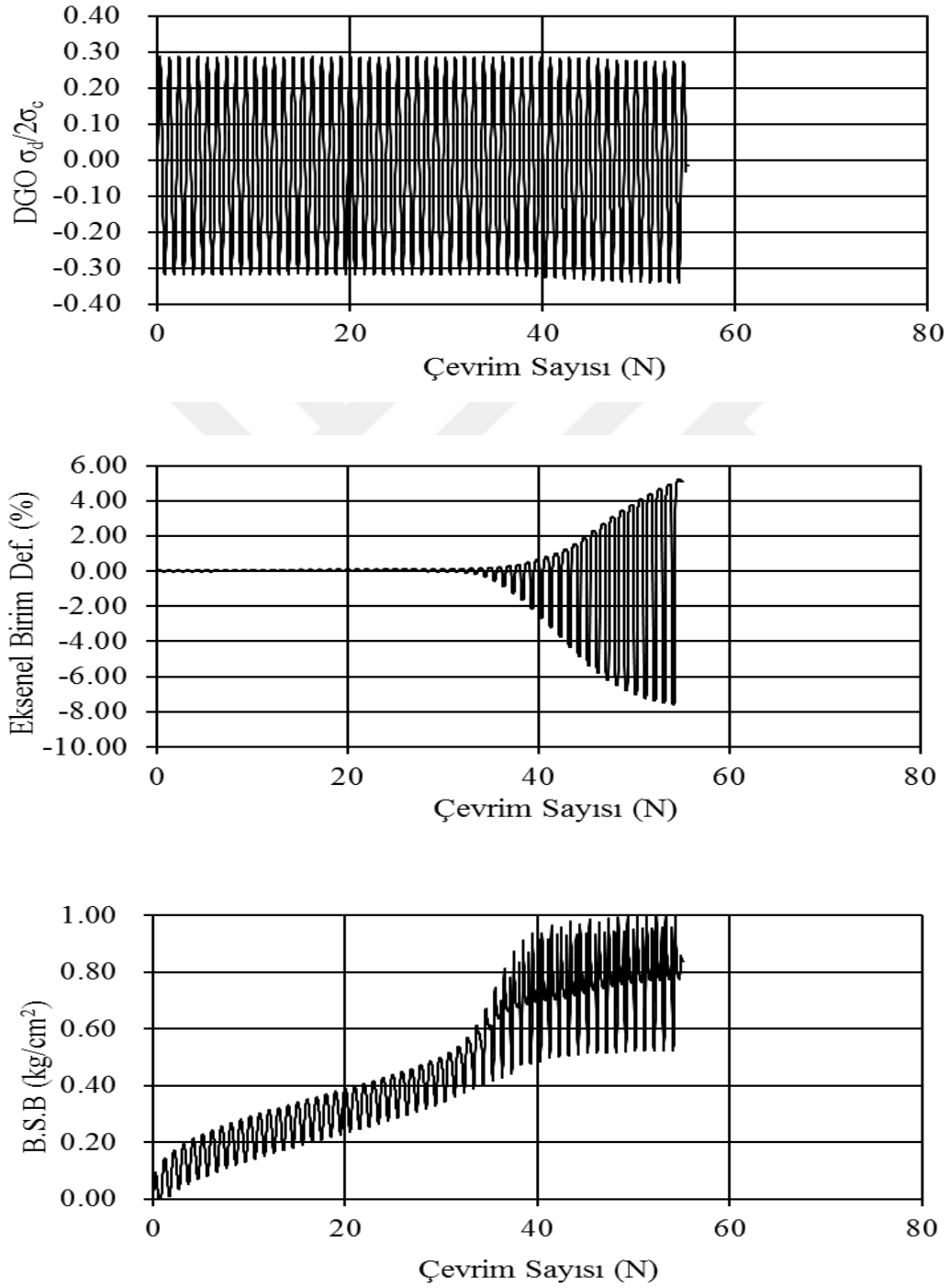
Şekil A. 49 : DN66 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	67	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	31/03/2016	Doygunluk (B)	0.78
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 47
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	19



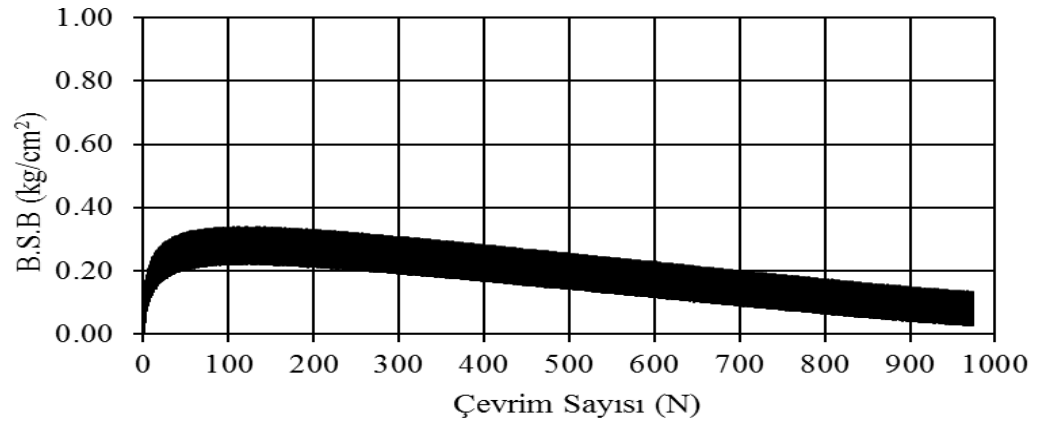
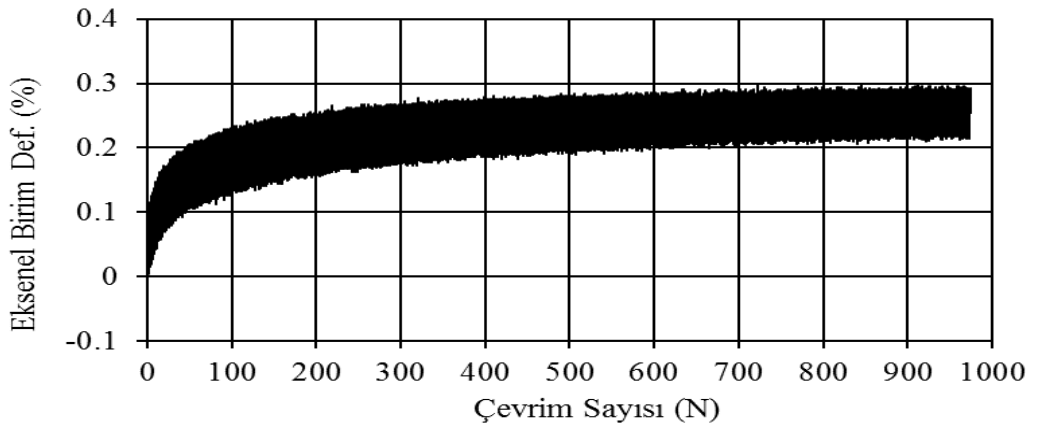
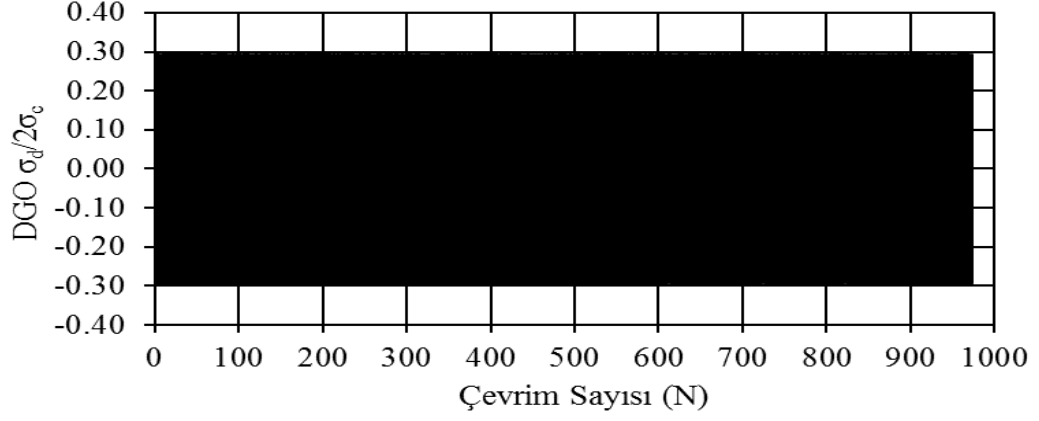
Şekil A. 50 : DN67 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	68	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	01/04/2016	Doygunluk (B)	0.68
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	43



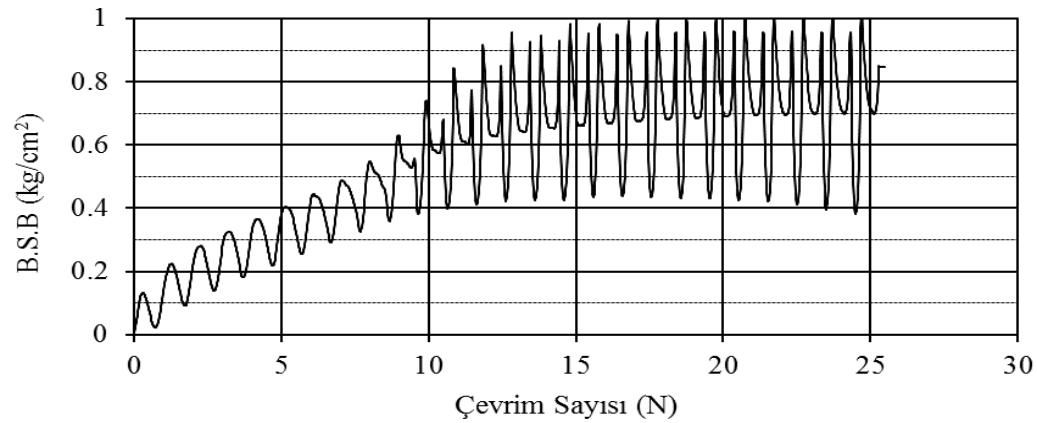
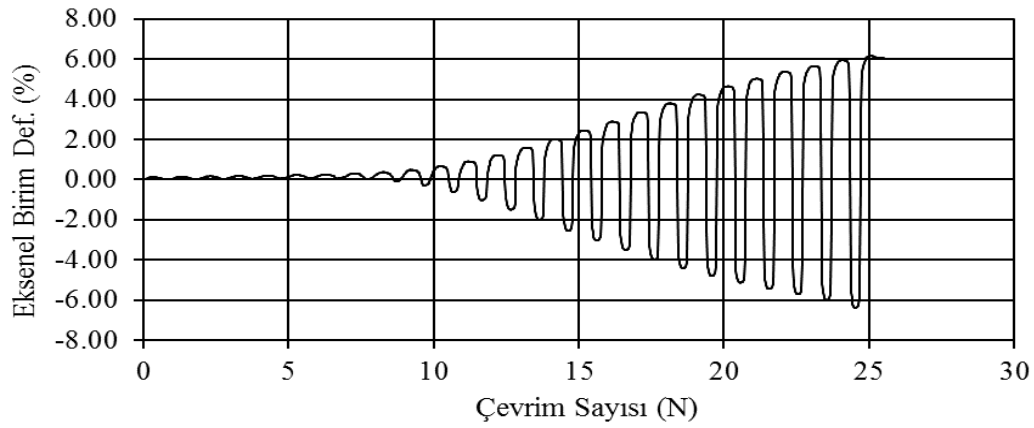
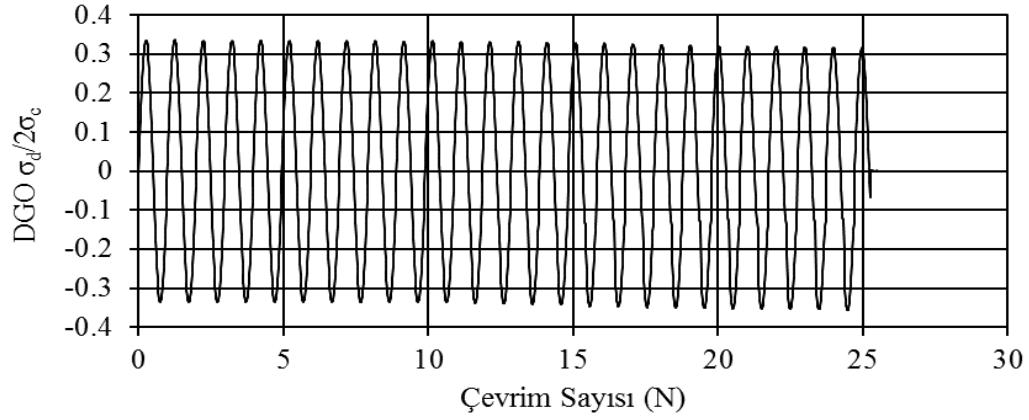
Şekil A. 51 : DN68 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	88	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	18/04/2018	Doygunluk (B)	0.37
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



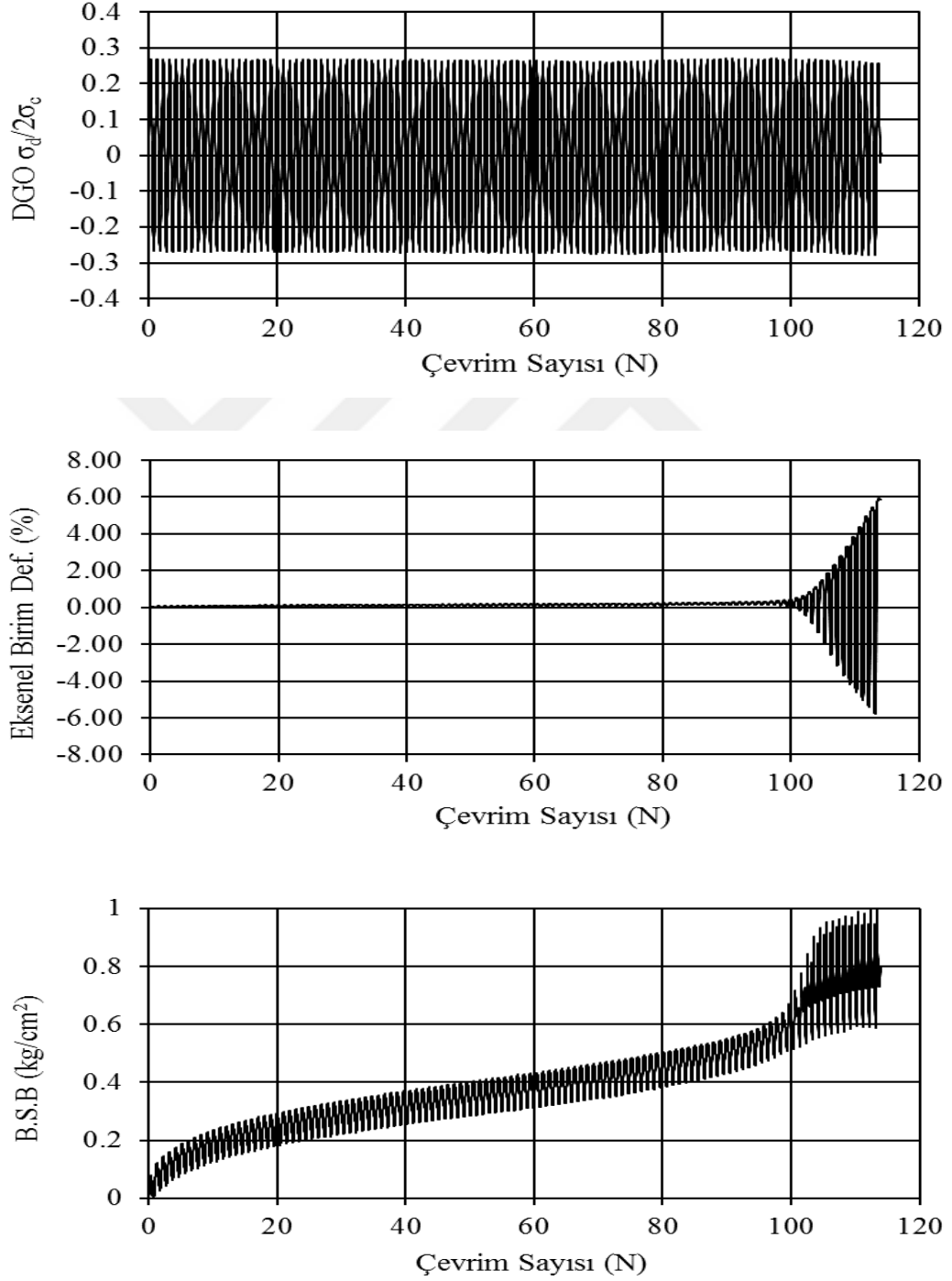
Şekil A. 52 : DN88 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	92	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.34
Deney Tarihi	07/06/2018	Doygunluk (B)	0.50
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	16



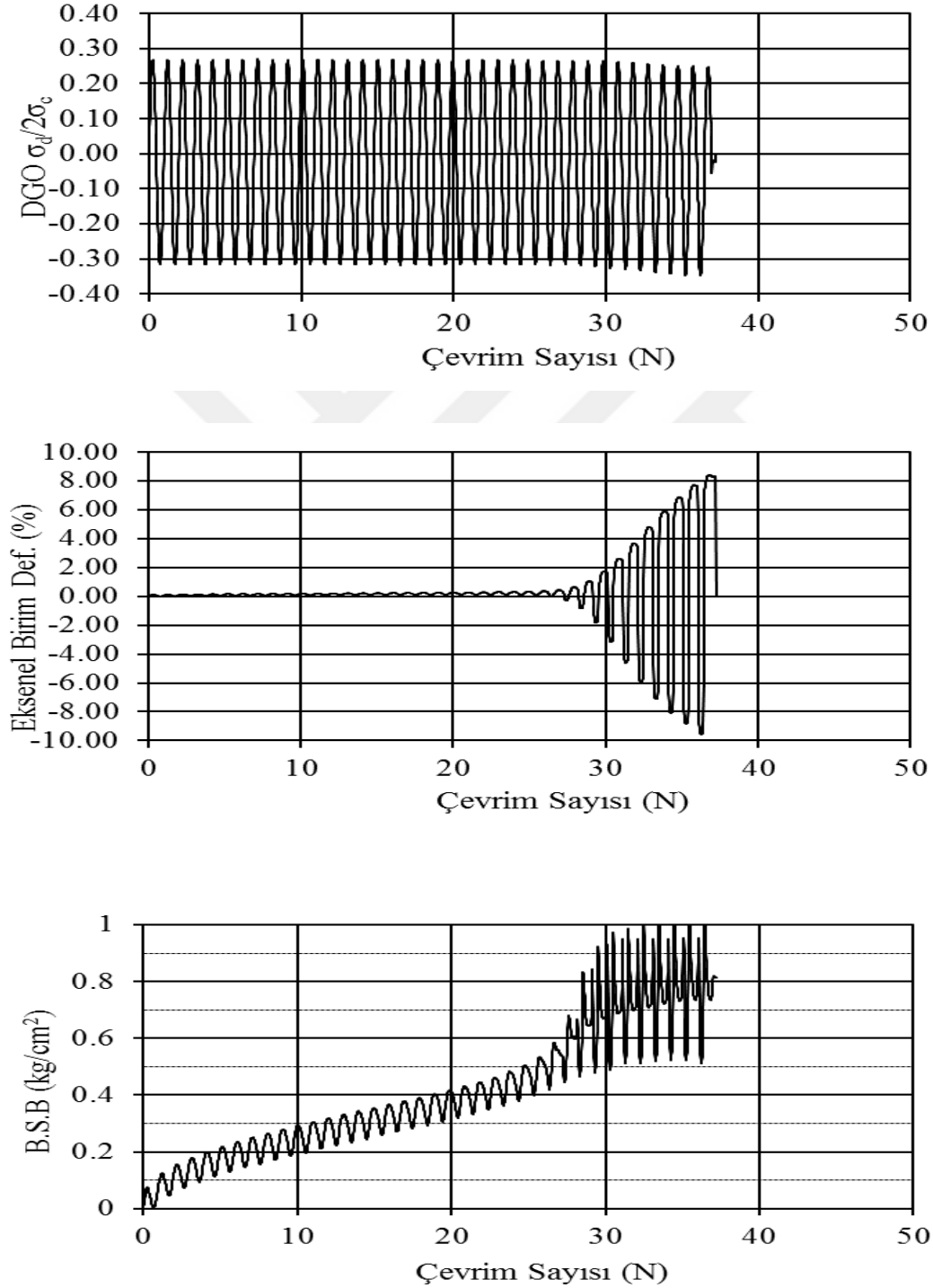
Şekil A. 53 : DN92 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	93	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.26
Deney Tarihi	22/10/2018	Doygunluk (B)	0.95
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	109



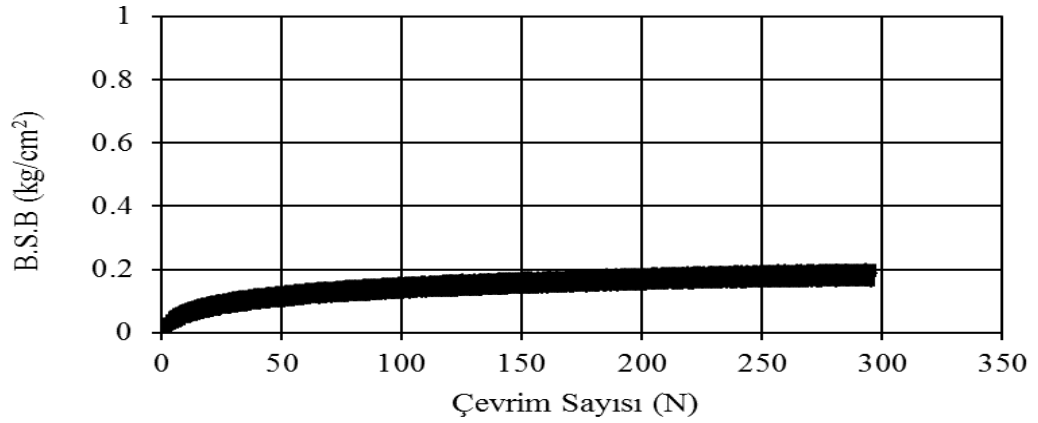
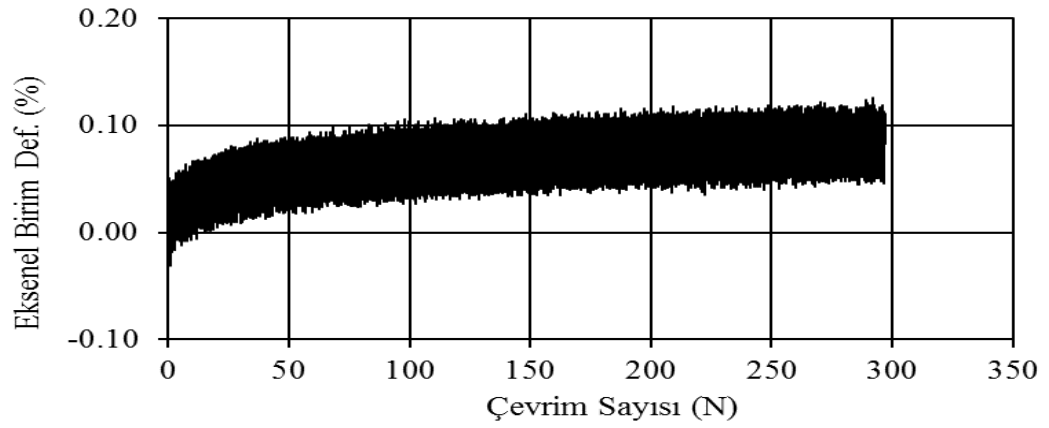
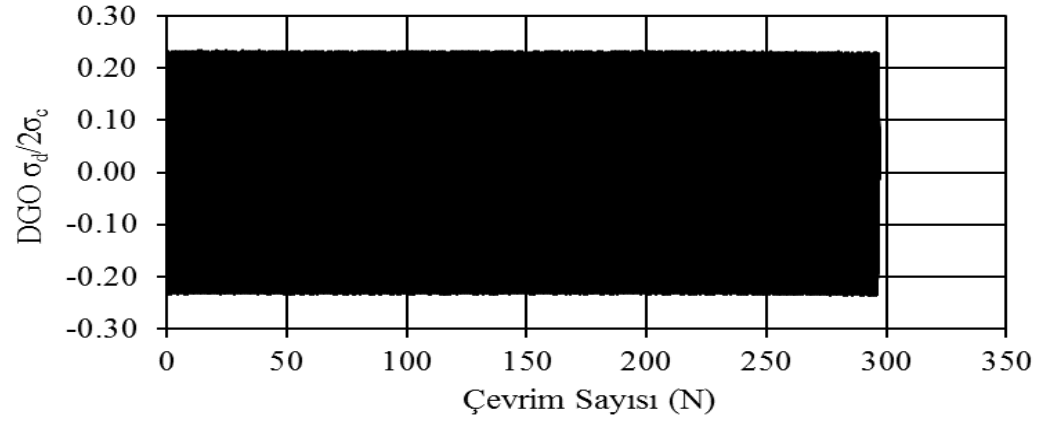
Şekil A. 54 : DN93 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	94	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	23/10/2018	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	31



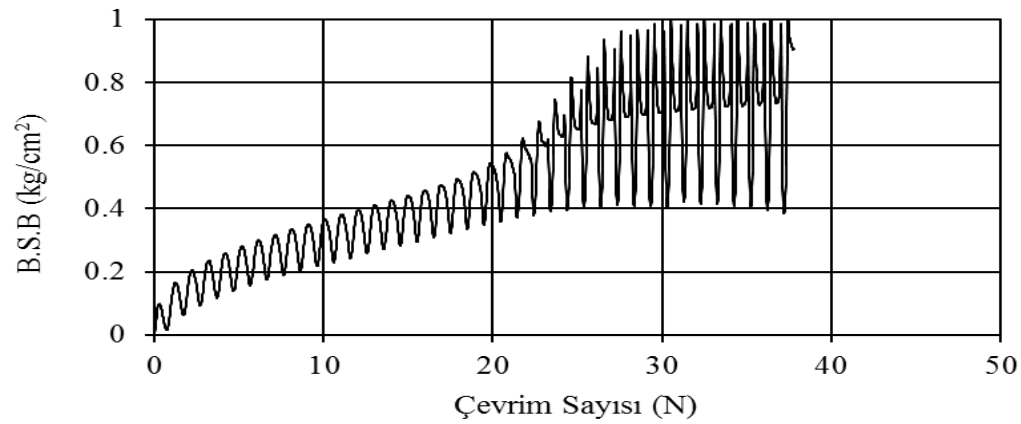
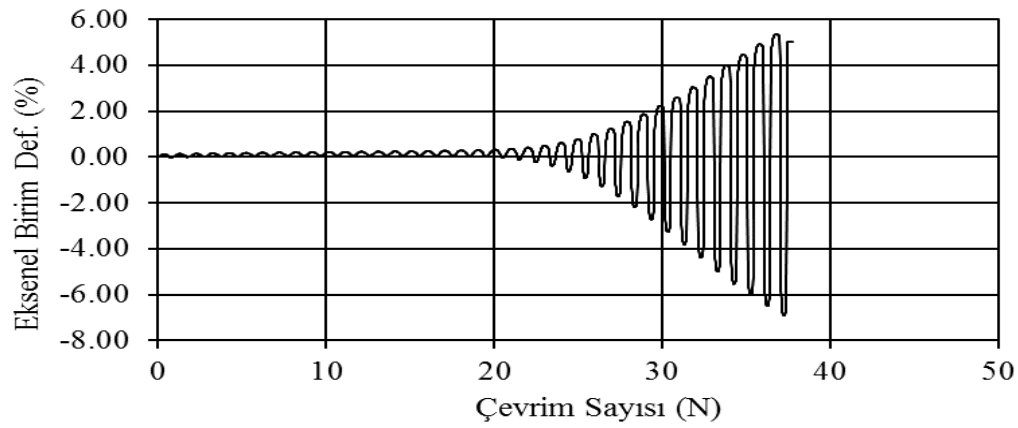
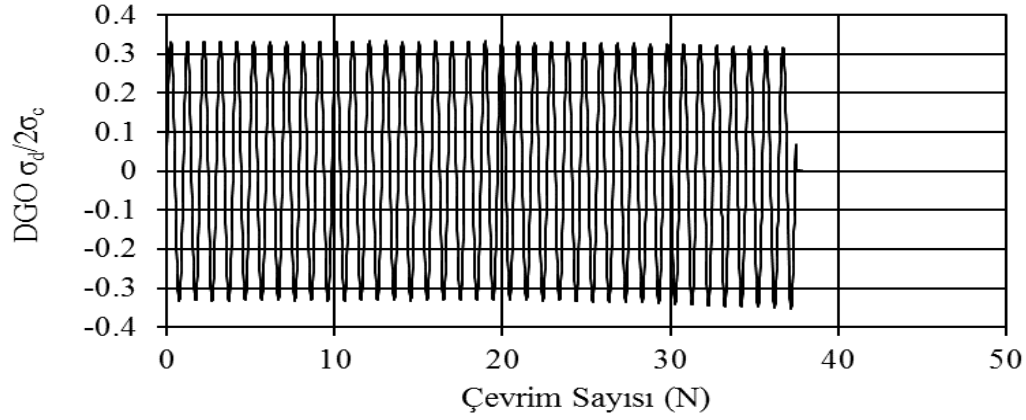
Şekil A. 55 : DN94 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	95	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.23
Deney Tarihi	26/10/2018	Doygunluk (B)	0.97
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



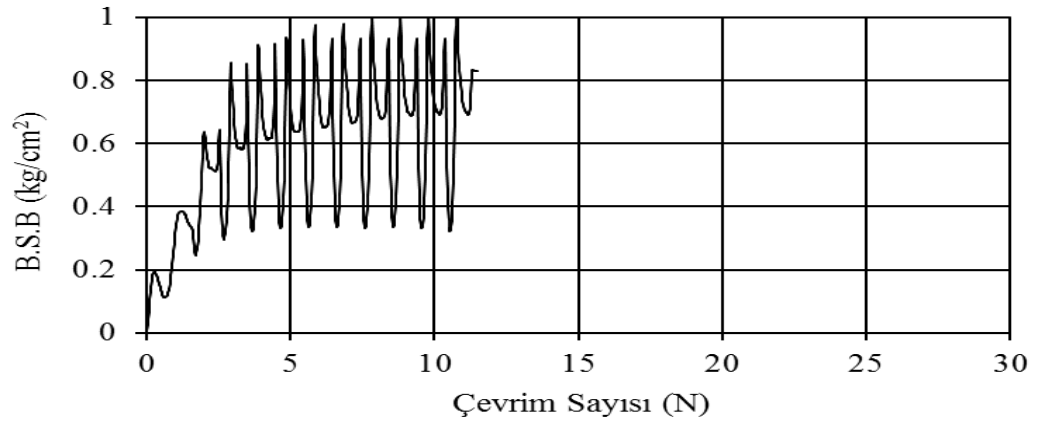
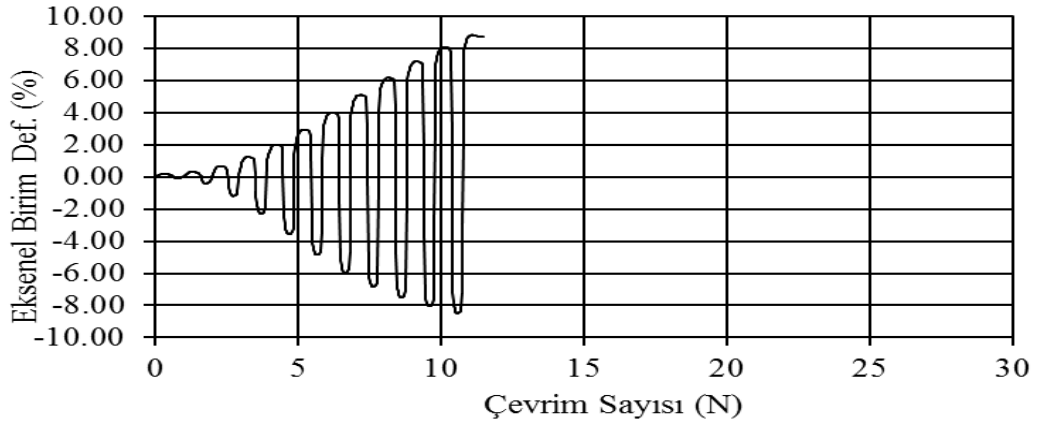
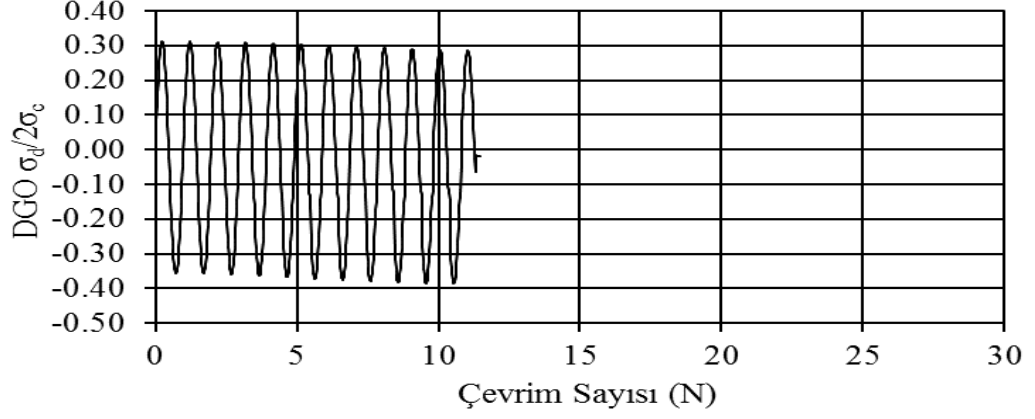
Şekil A. 56 : DN95 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	96	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.33
Deney Tarihi	13/11/2018	Doygunluk (B)	0.49
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 49
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	30



Şekil A. 57 : DN96 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

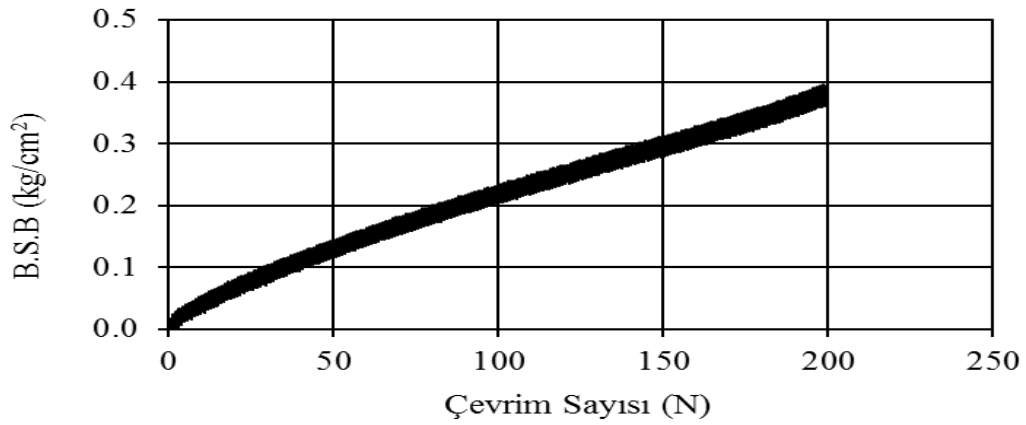
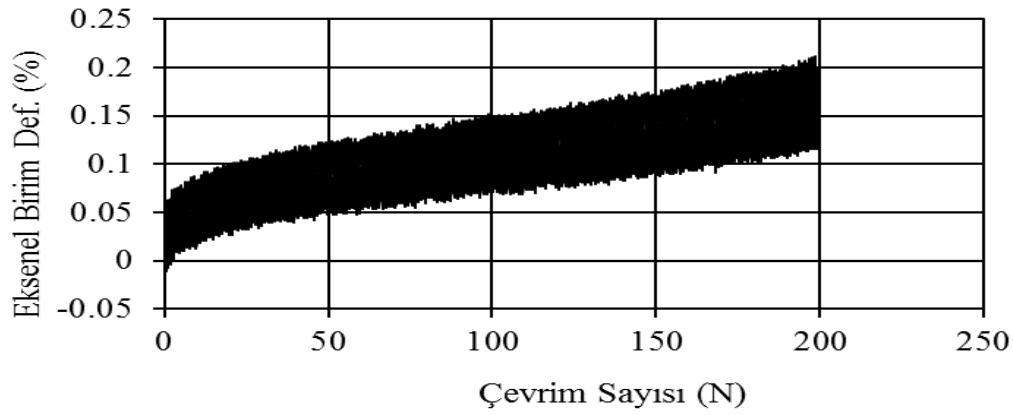
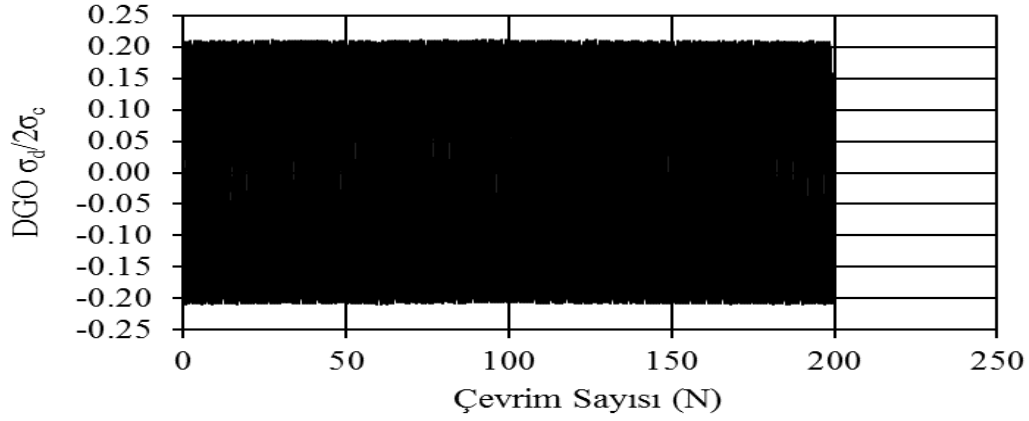
Deney No	97	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.33
Deney Tarihi	26/12/2018	Doygunluk (B)	0.96
Kür Süresi	0 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	Temiz	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	4



Şekil A. 58 : DN97 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

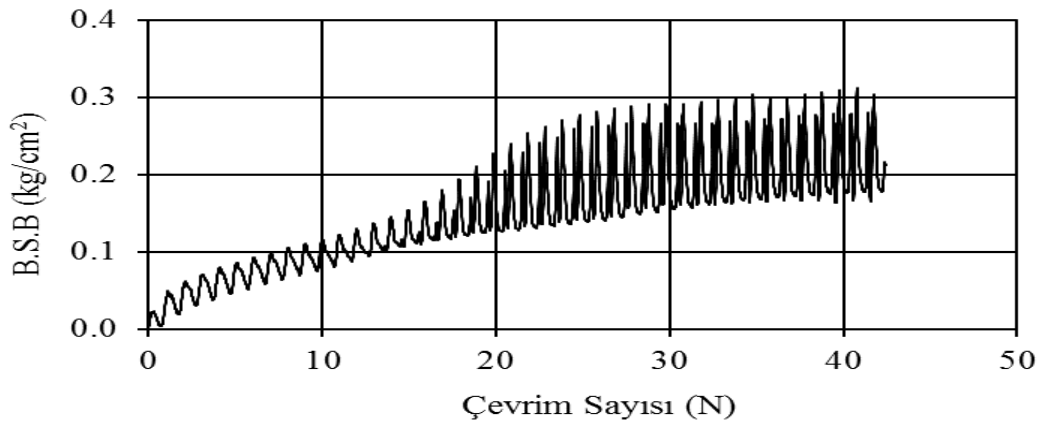
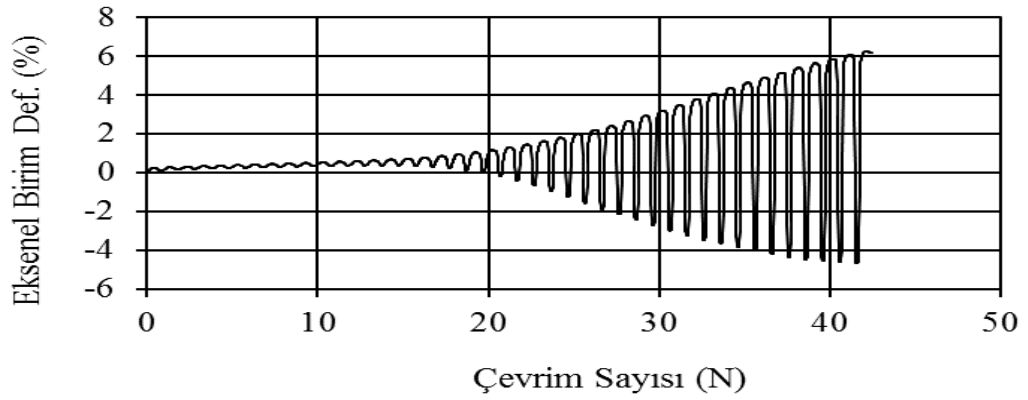
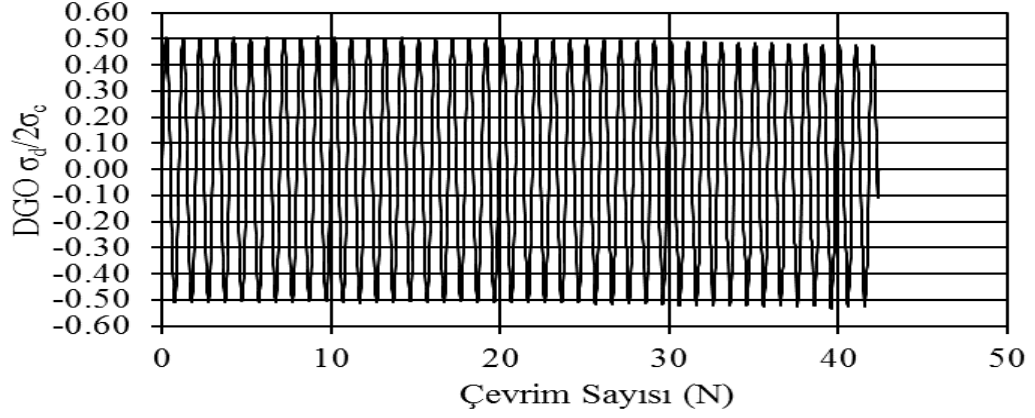
EK B

Deney No	12	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.21
Deney Tarihi	01/10/2014	Doygunluk (B)	0.66
Kür Süresi	134 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	%55
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



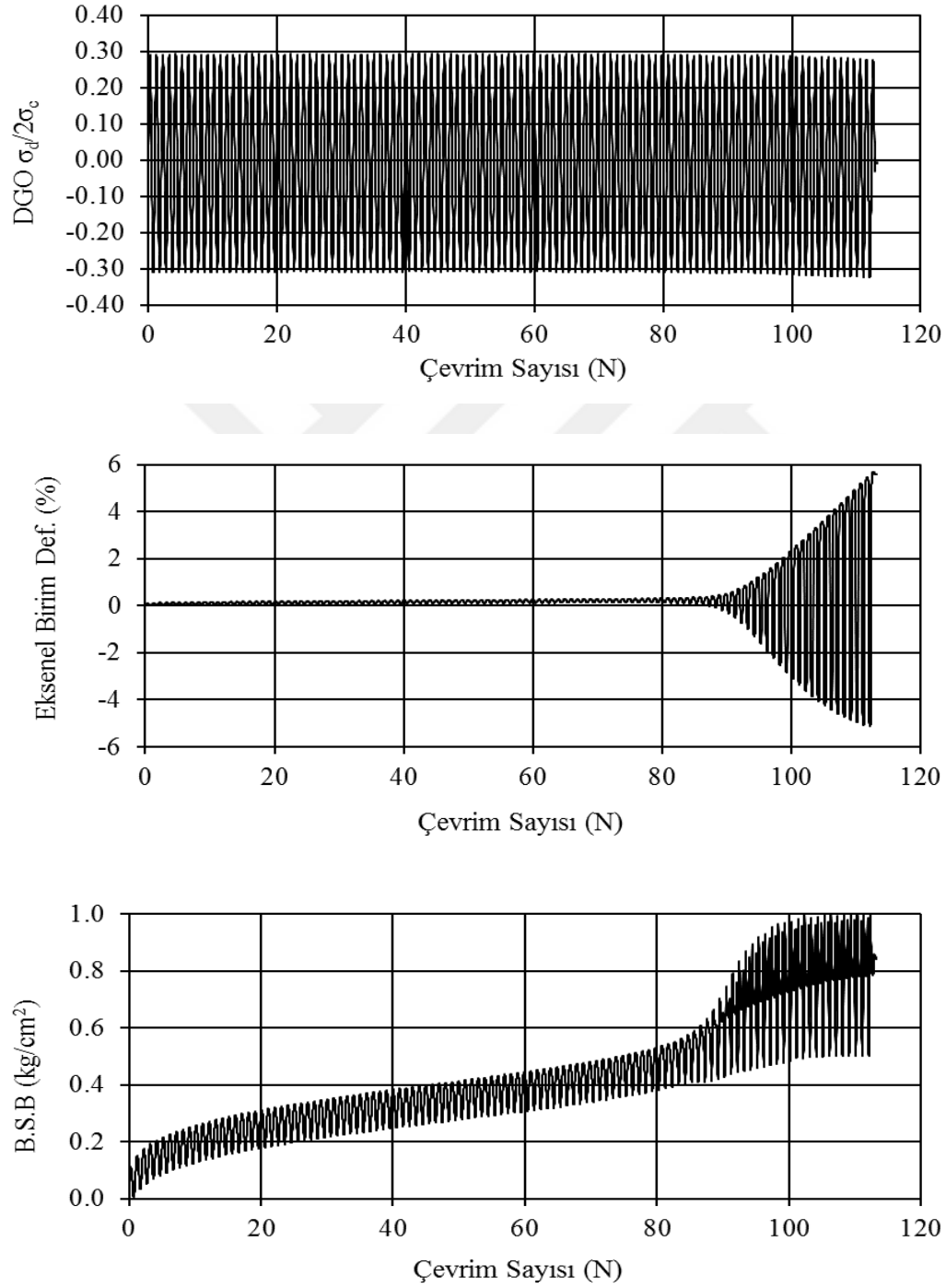
Şekil B. 1 : DN12 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	25	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.51
Deney Tarihi	05/11/2014	Doygunluk (B)	0.73
Kür Süresi	169 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 65
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	29



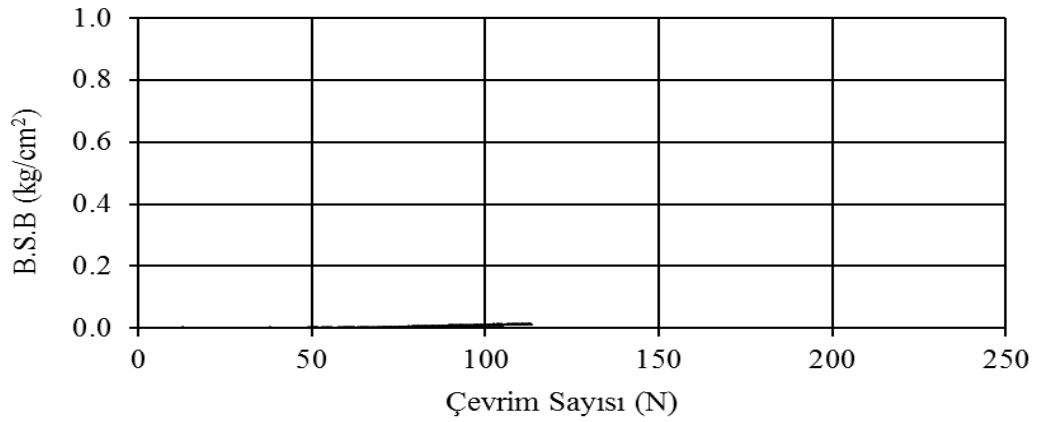
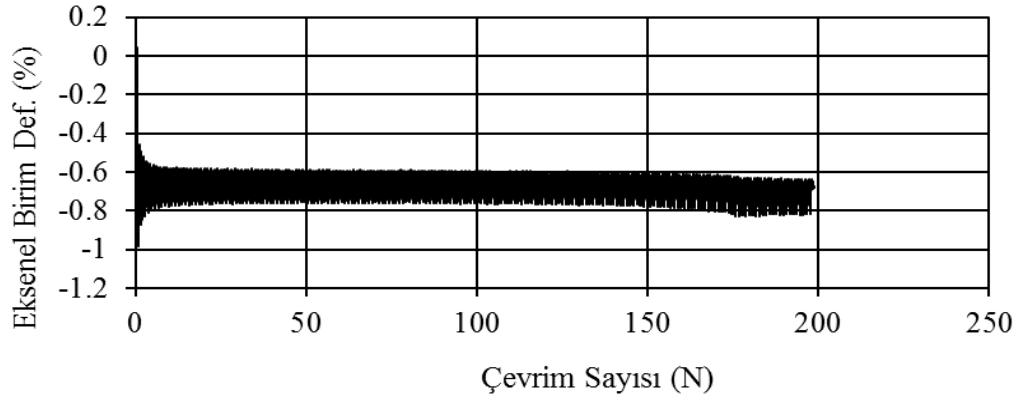
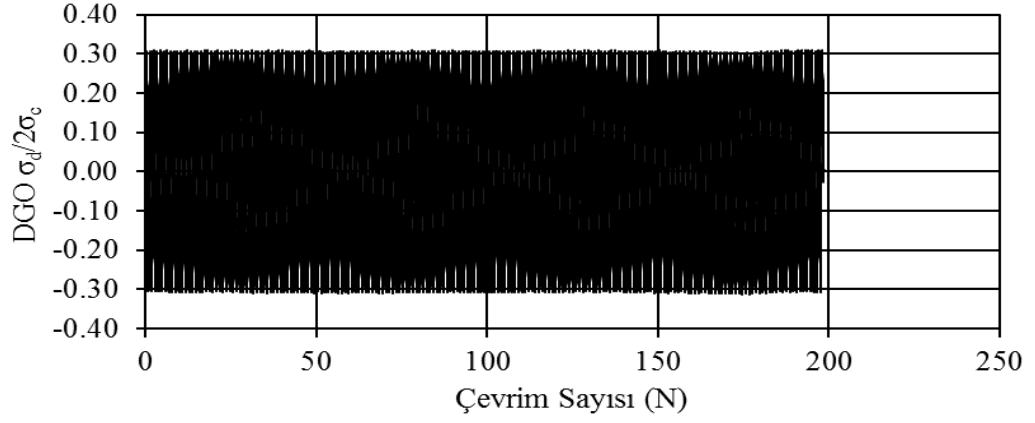
Şekil B. 2 : DN25 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	27	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	13/11/2014	Doygunluk (B)	0.59
Kür Süresi	145 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	102



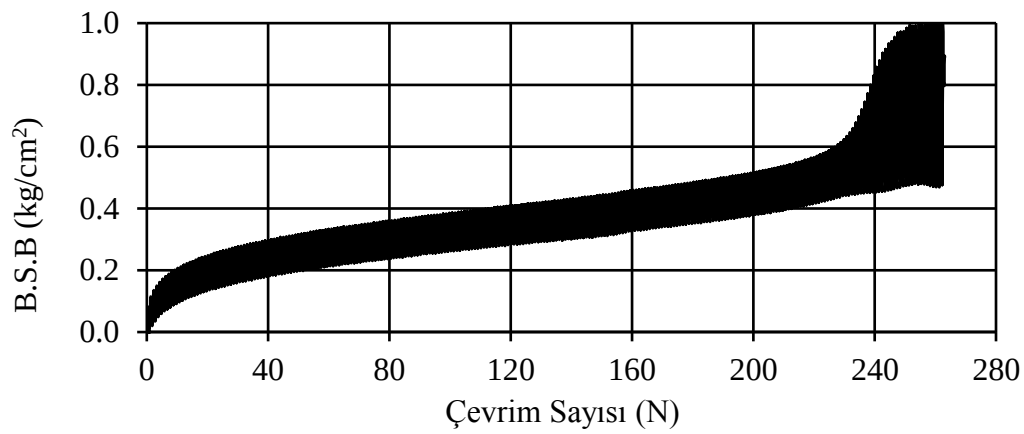
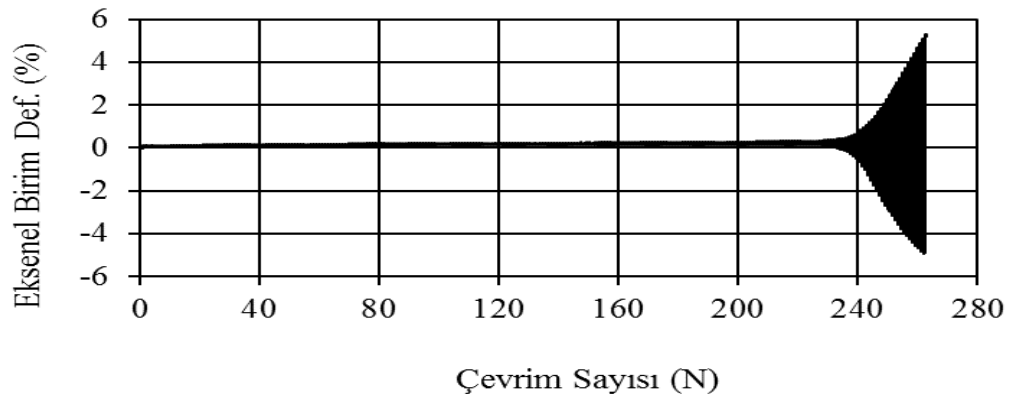
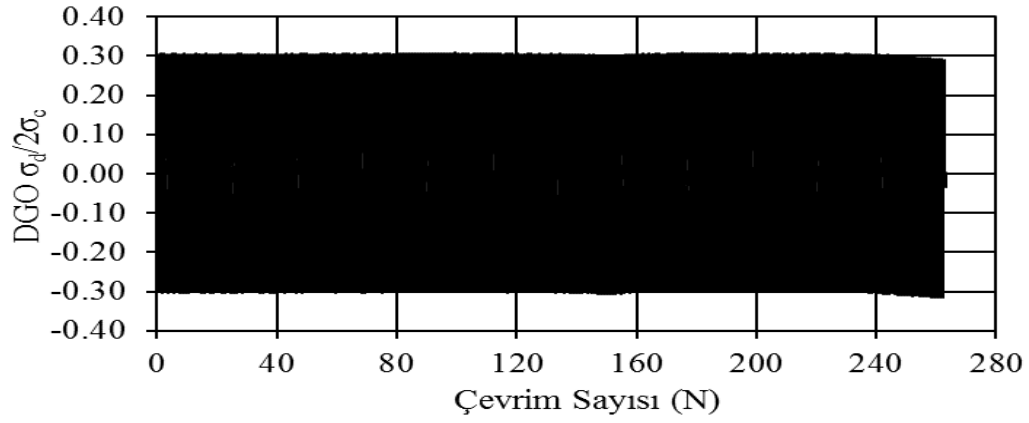
Şekil B. 3 : DN27 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	28	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	25/11/2014	Doygunluk (B)	0.35
Kür Süresi	145 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 65
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



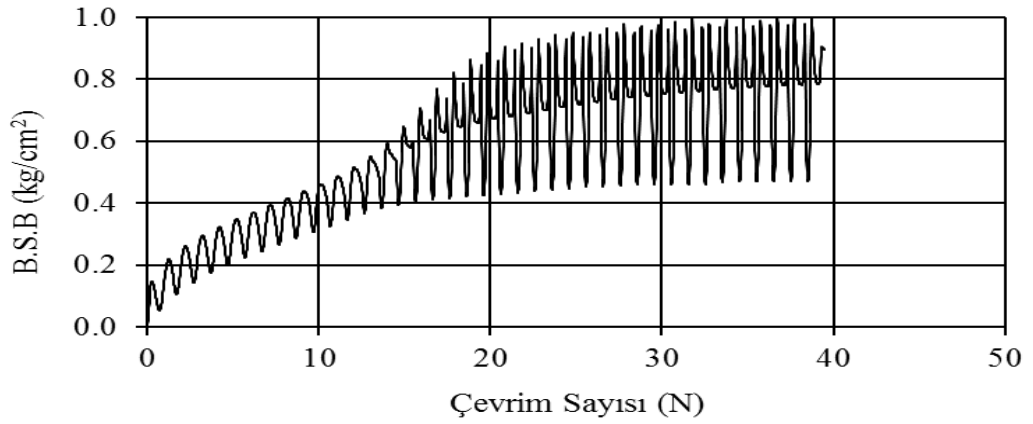
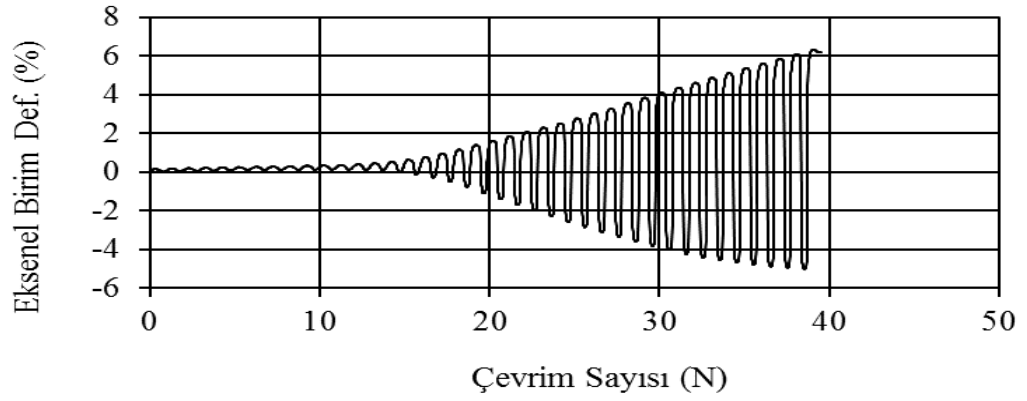
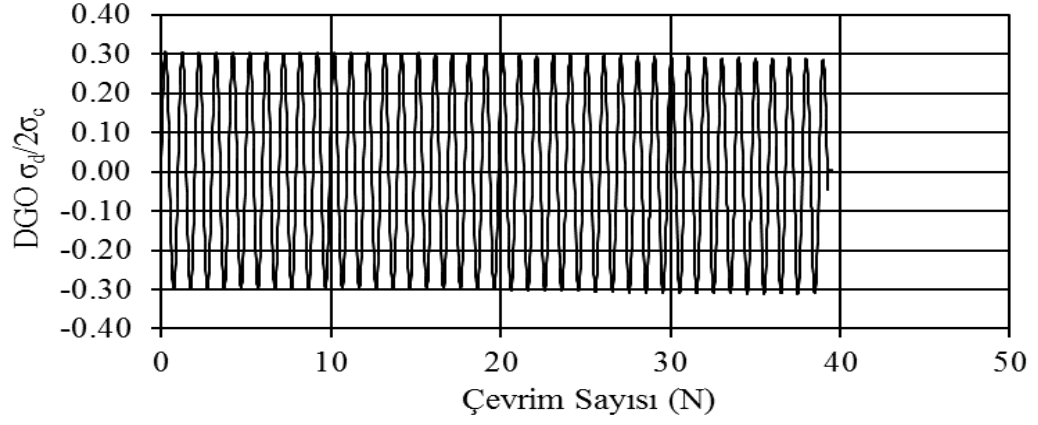
Şekil B. 4 : DN28 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	29	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	26/11/2014	Doygunluk (B)	0.45
Kür Süresi	146 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 56
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	248



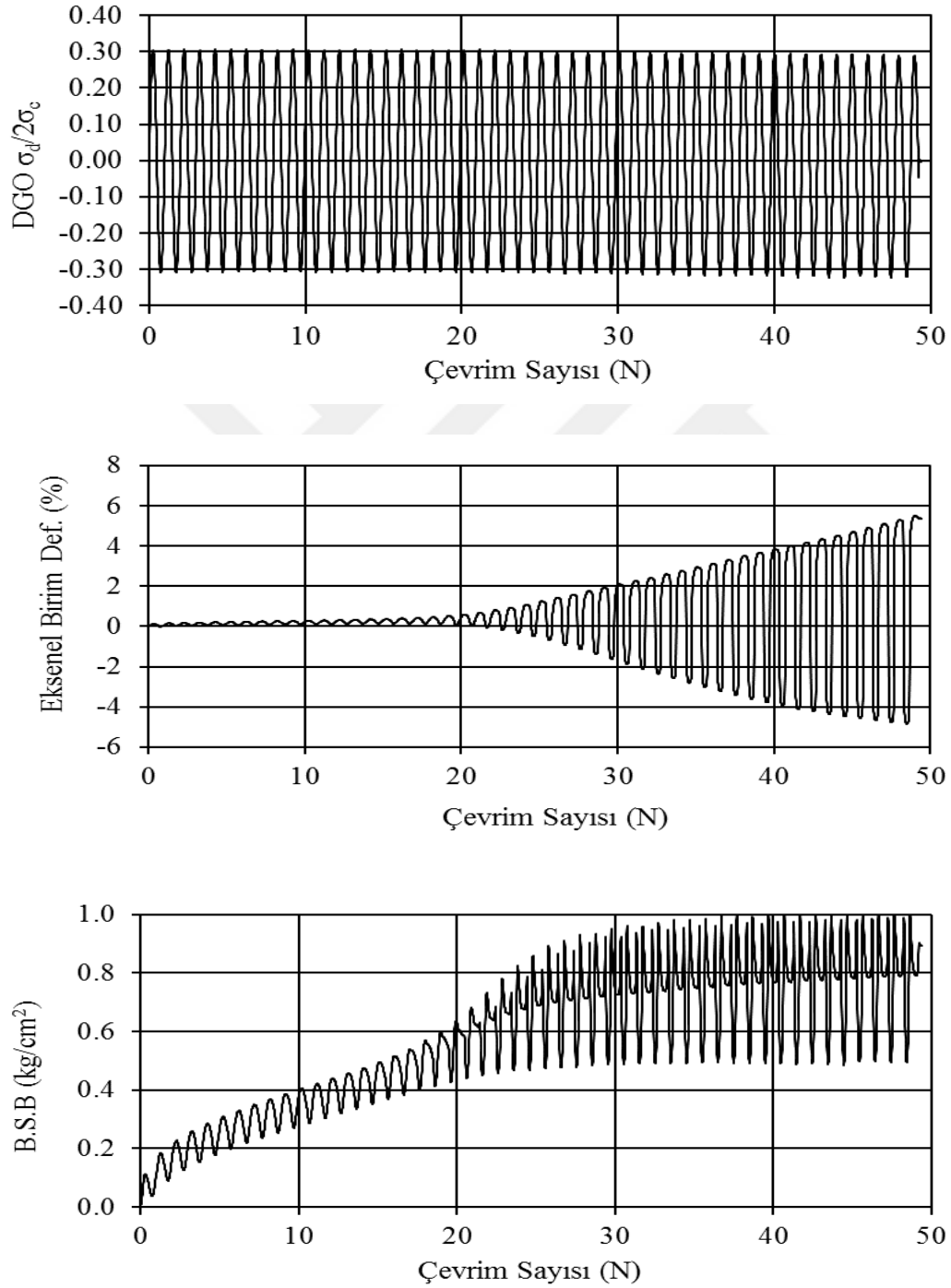
Şekil B. 5 : DN29 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	30	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	06/12/2014	Doygunluk (B)	0.65
Kür Süresi	102 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 52
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	26



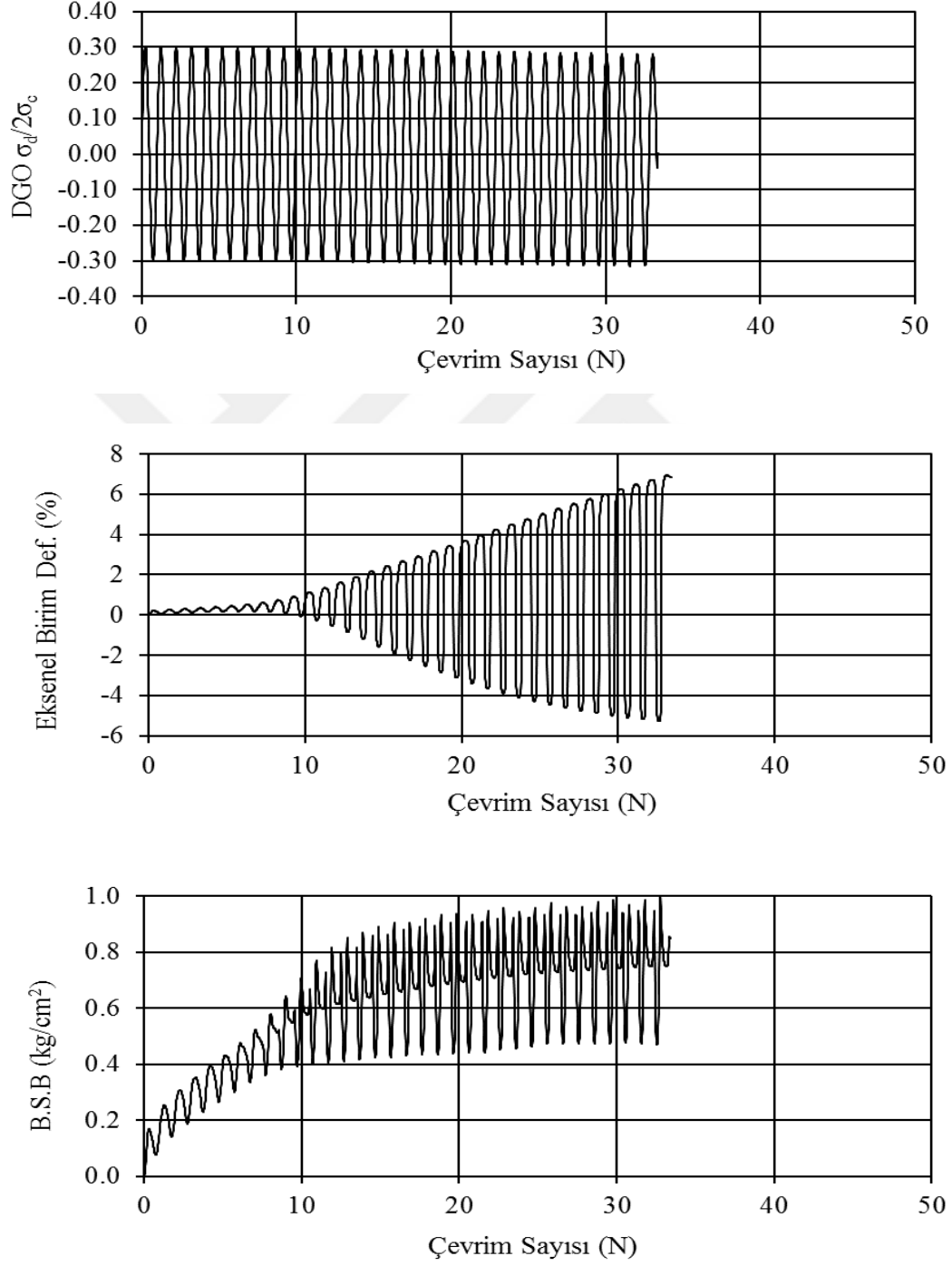
Şekil B. 6 : DN30 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	31	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	07/12/2014	Doygunluk (B)	0.60
Kür Süresi	103 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	35



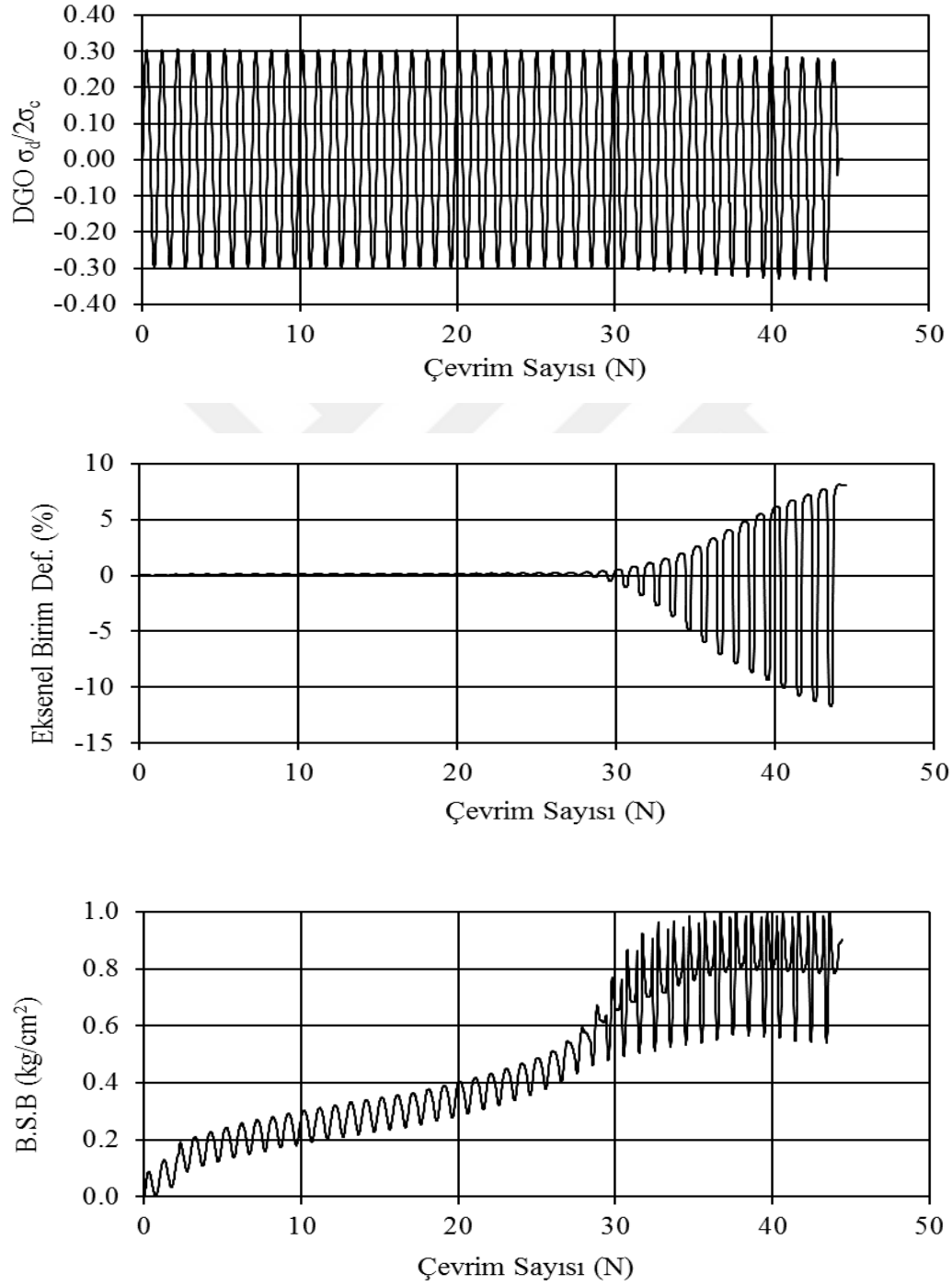
Şekil B. 7 : DN31 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	32	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	13/12/2014	Doygunluk (B)	0.70
Kür Süresi	109 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	18



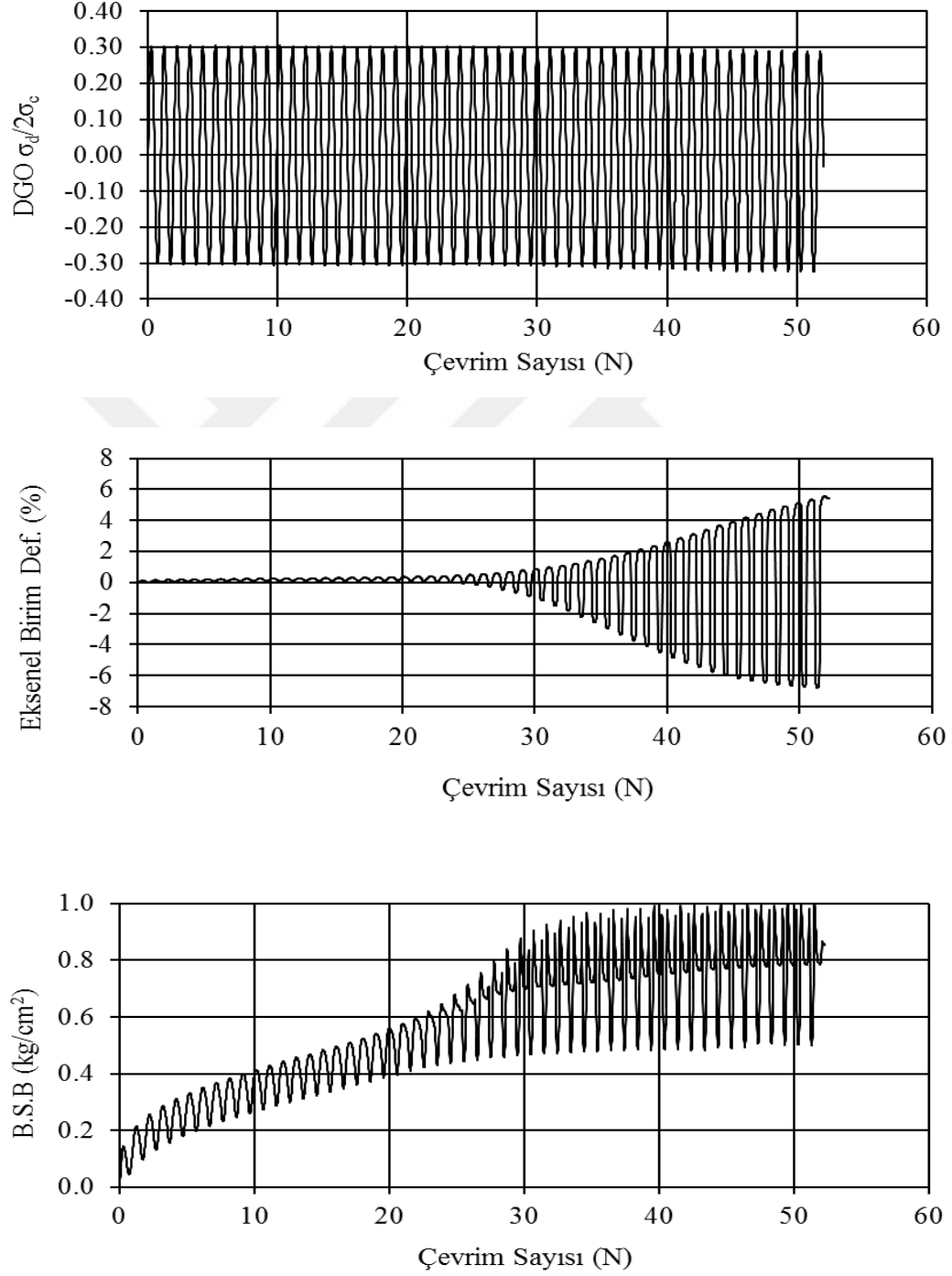
Şekil B. 8 : DN32 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	33	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	14/01/2015	Doygunluk (B)	0.76
Kür Süresi	40 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 54
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	36



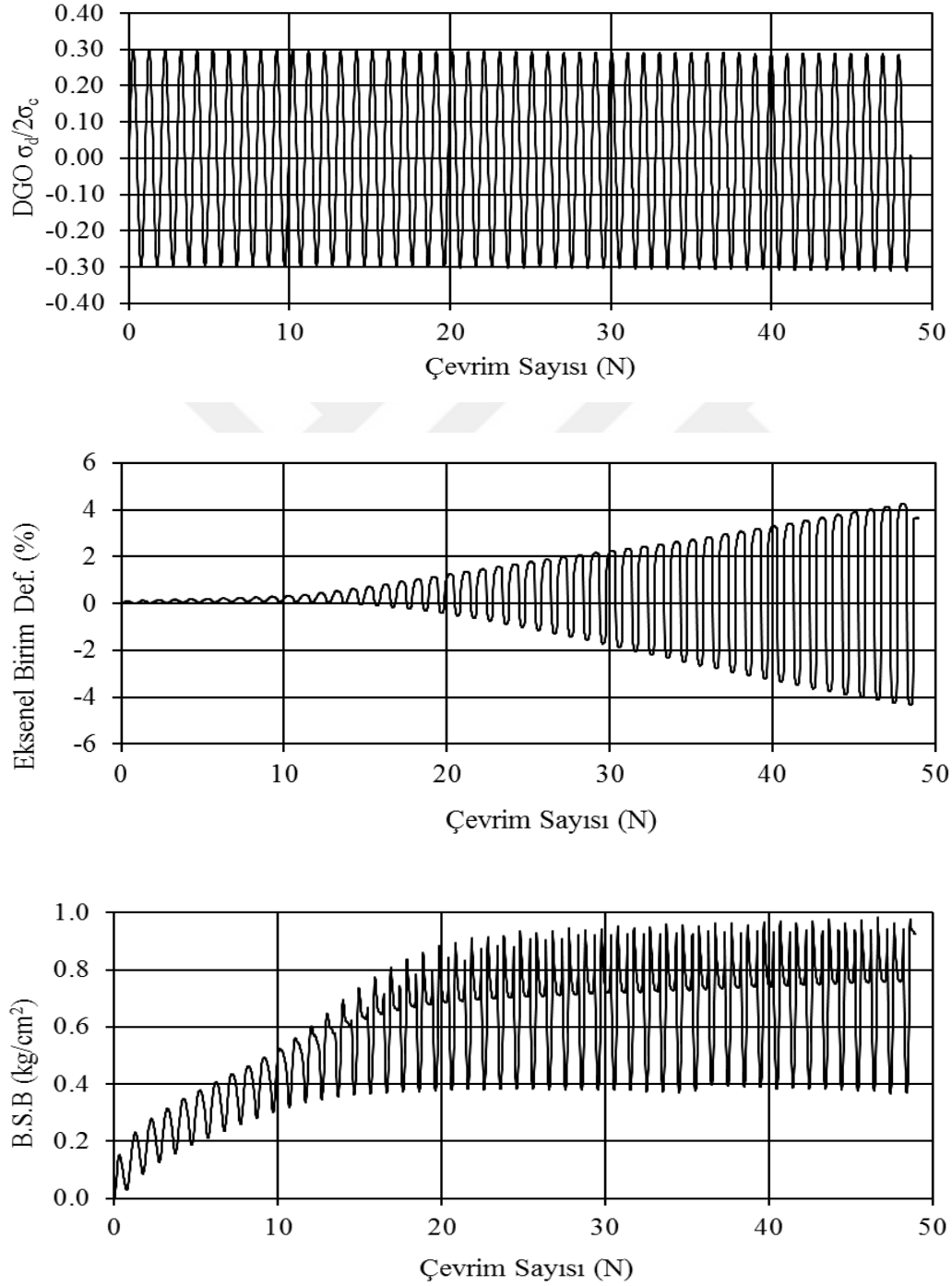
Şekil B. 9 : DN33 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	34	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	05/02/2015	Doygunluk (B)	0.61
Kür Süresi	62 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 53
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	40



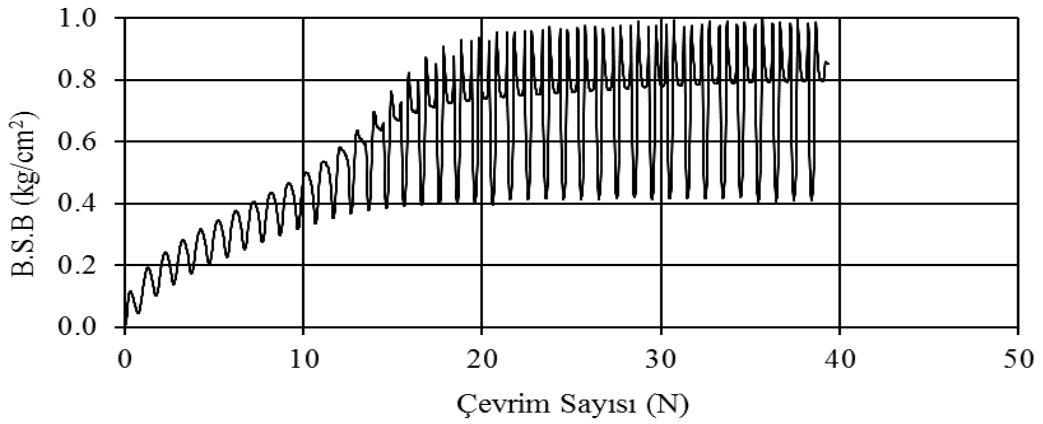
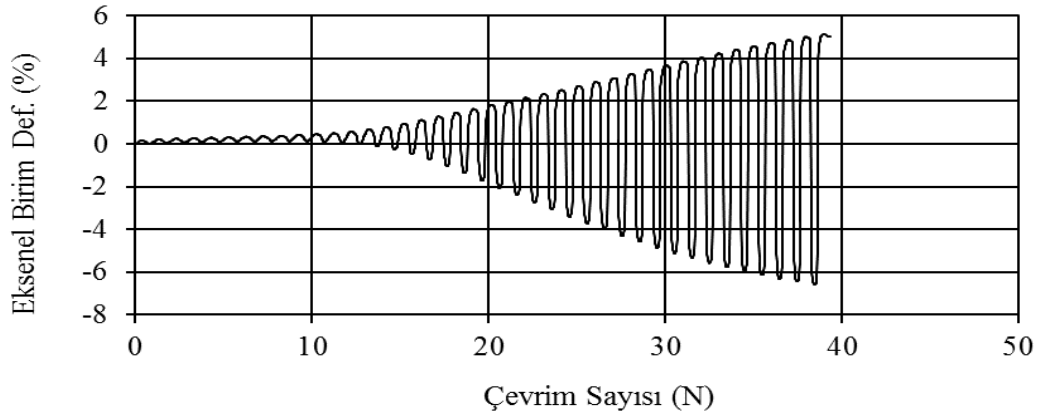
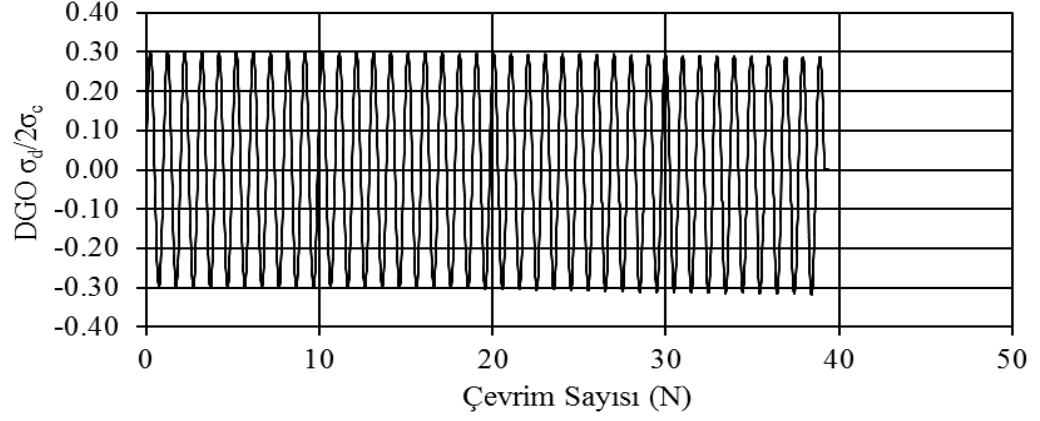
Şekil B. 10 : DN34 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	58	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	13/01/2016	Doygunluk (B)	0.57
Kür Süresi	299 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	34



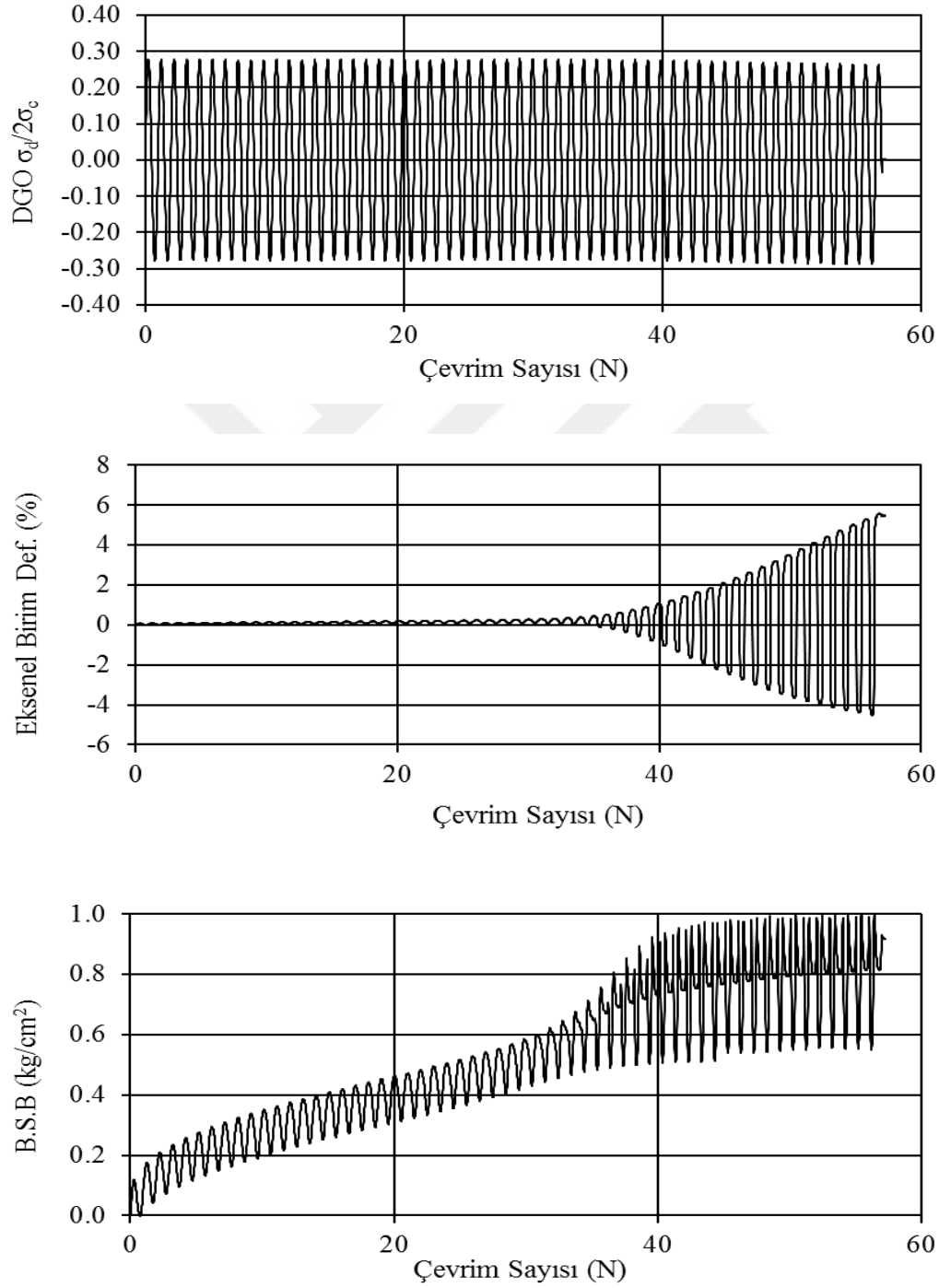
Şekil B. 11 : DN58 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	60	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	26/02/2016	Doygunluk (B)	0.68
Kür Süresi	343 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	24



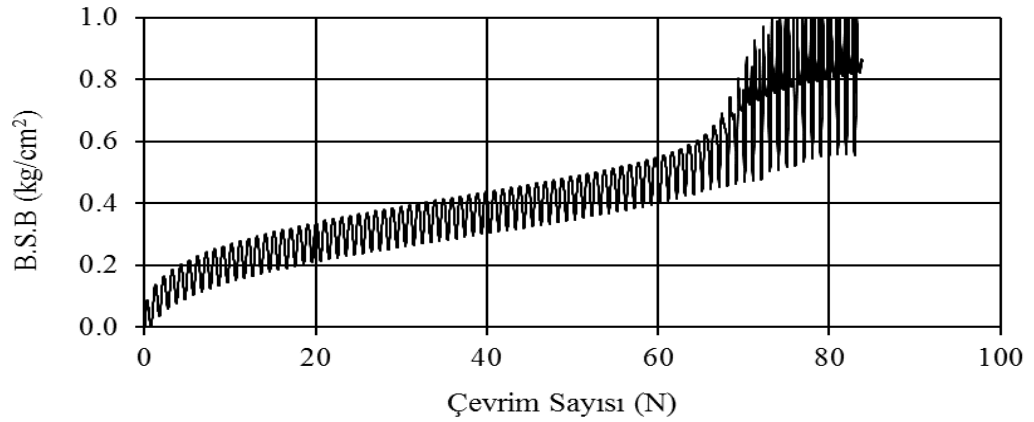
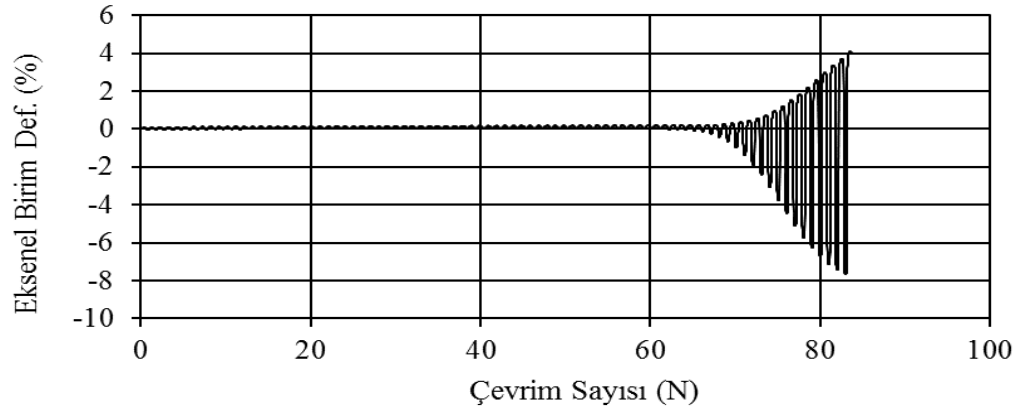
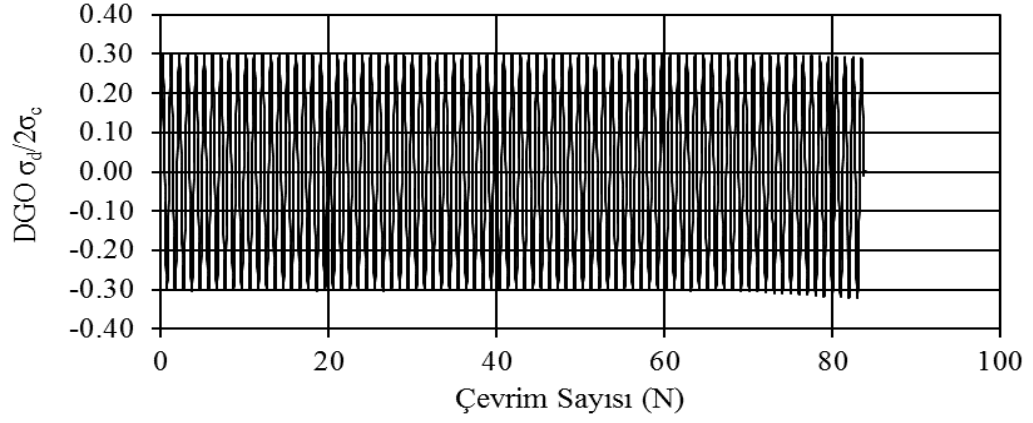
Şekil B. 12 : DN60 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	61	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	27/02/2016	Doygunluk (B)	0.53
Kür Süresi	344 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 56
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	47



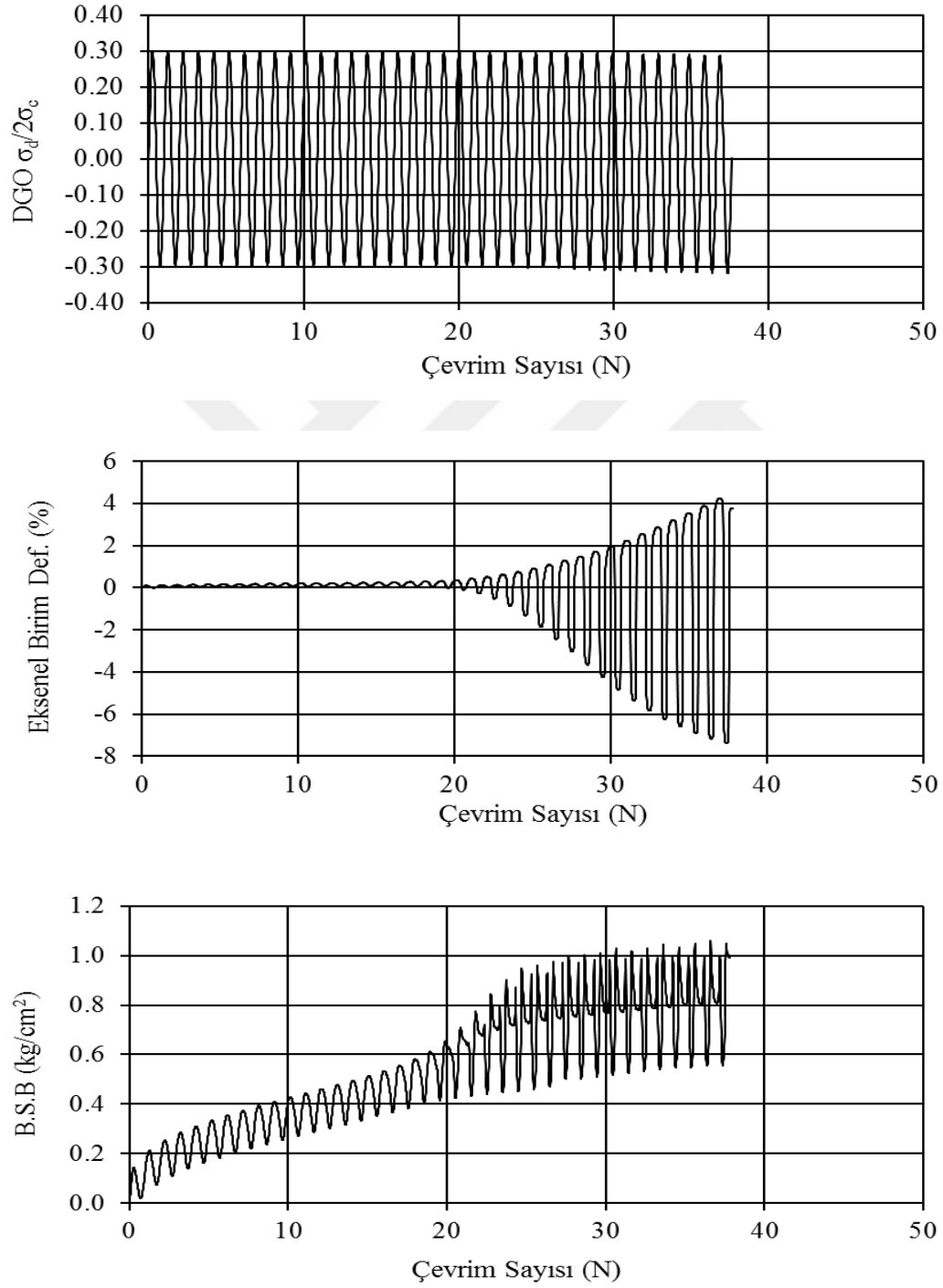
Şekil B. 13 : DN61 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	62	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	08/03/2016	Doygunluk (B)	0.60
Kür Süresi	7 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 51
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	75



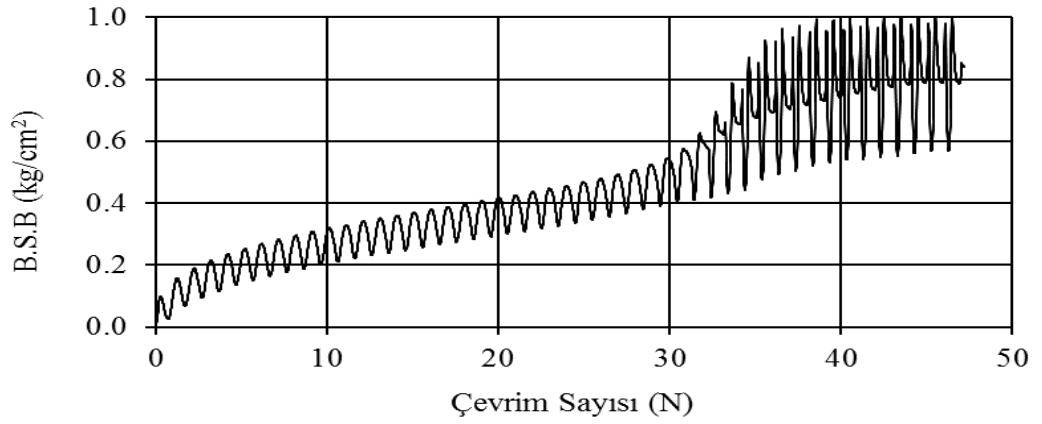
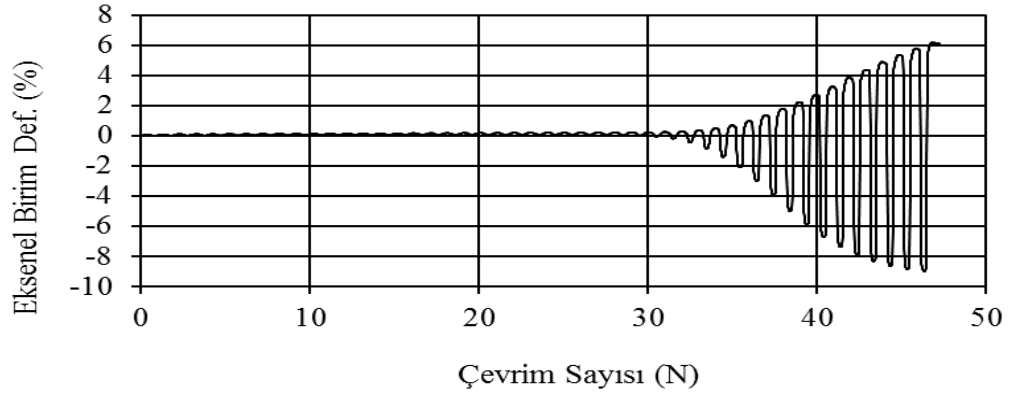
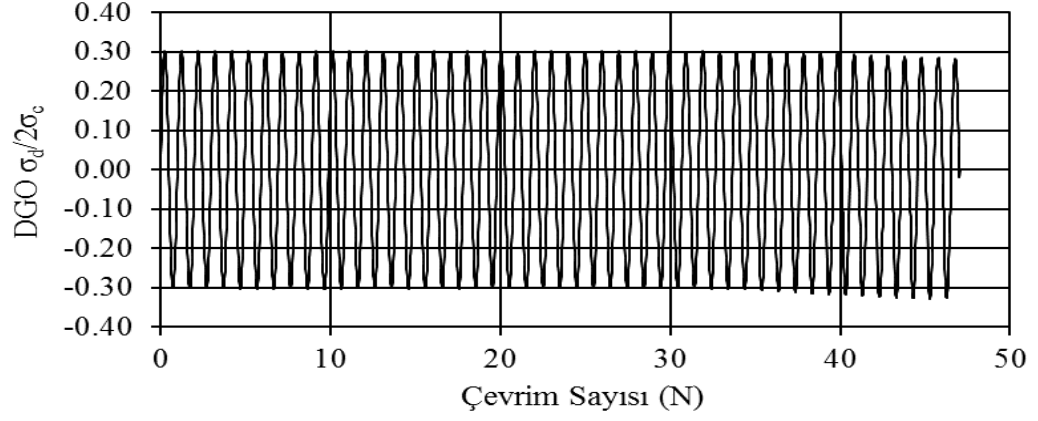
Şekil B. 14 : DN62 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	63	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	09/03/2016	Doygunluk (B)	0.78
Kür Süresi	8 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	29



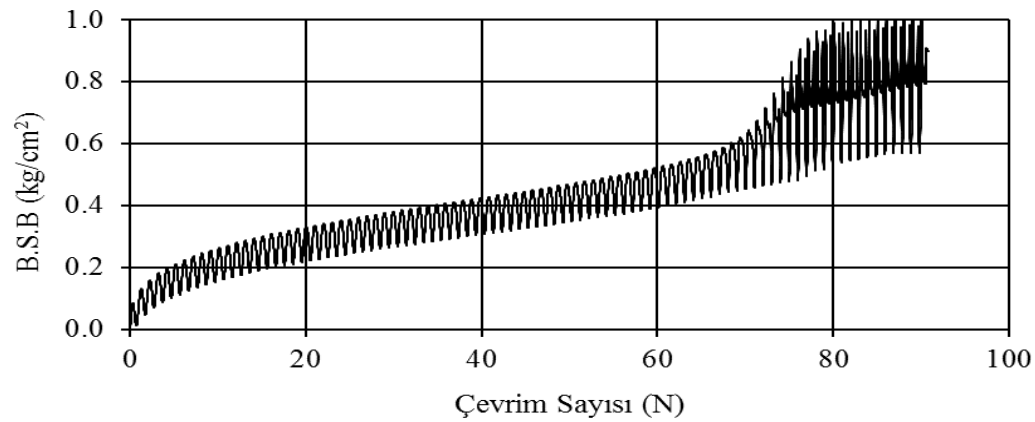
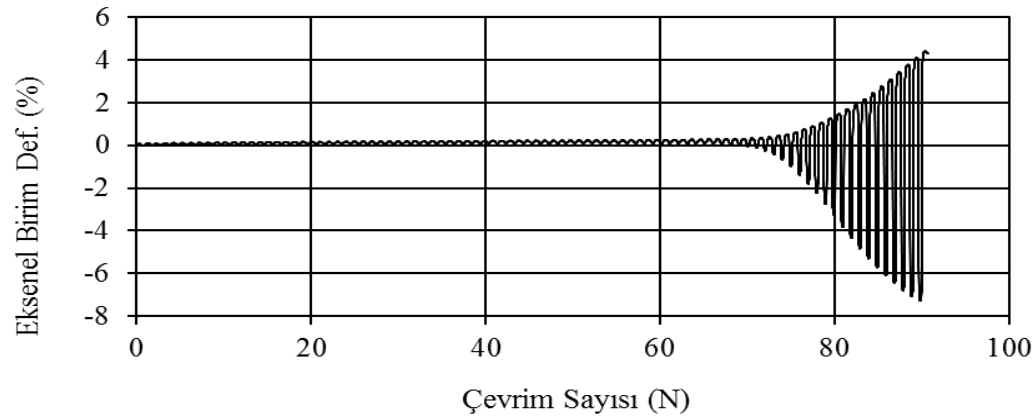
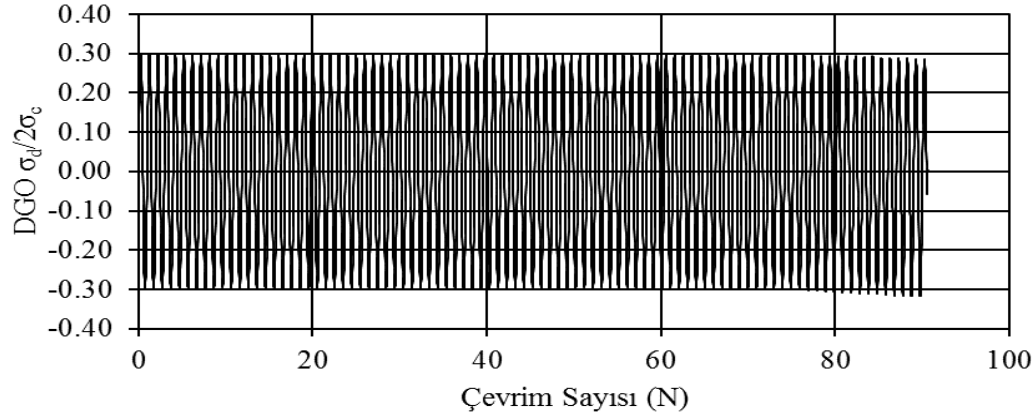
Şekil B. 15 : DN63 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	64	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	09/03/2016	Doygunluk (B)	0.70
Kür Süresi	15 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	38



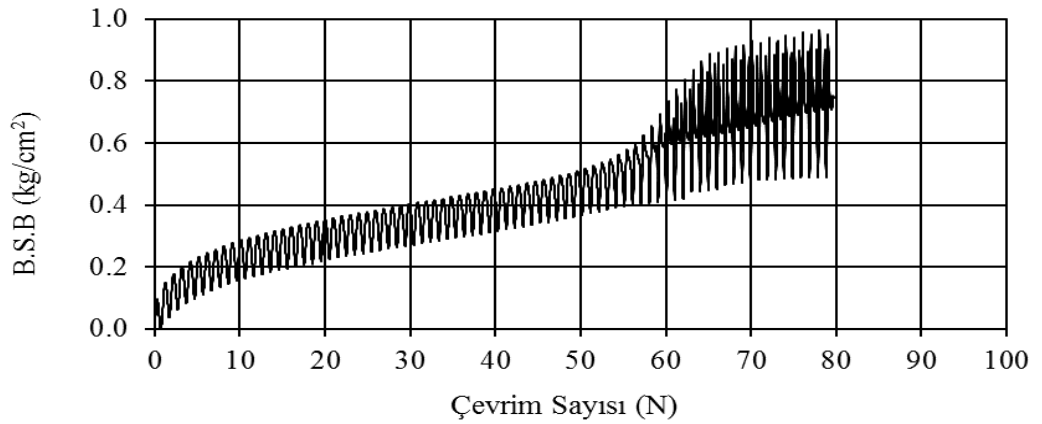
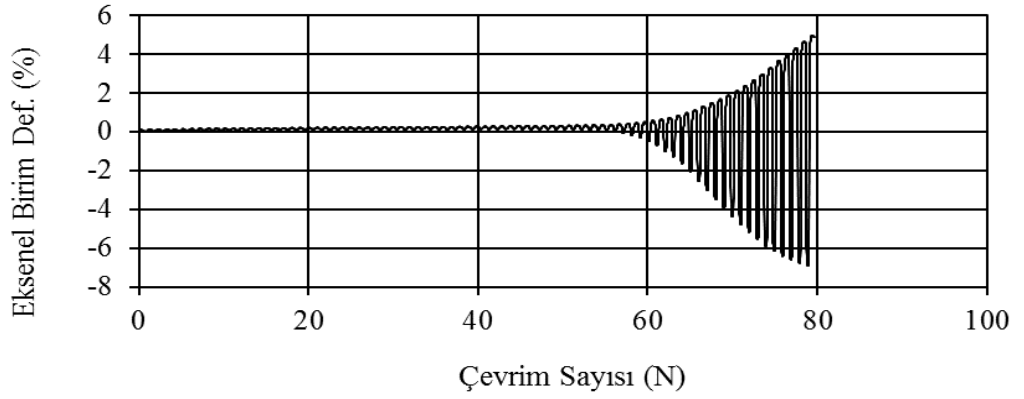
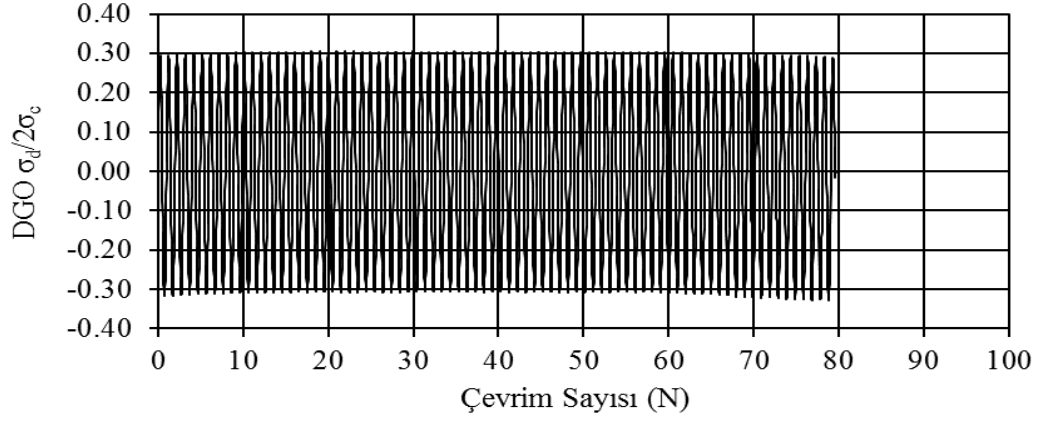
Şekil B. 16 : DN64 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	65	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	17/03/2016	Doygunluk (B)	0.58
Kür Süresi	16 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	%100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	81



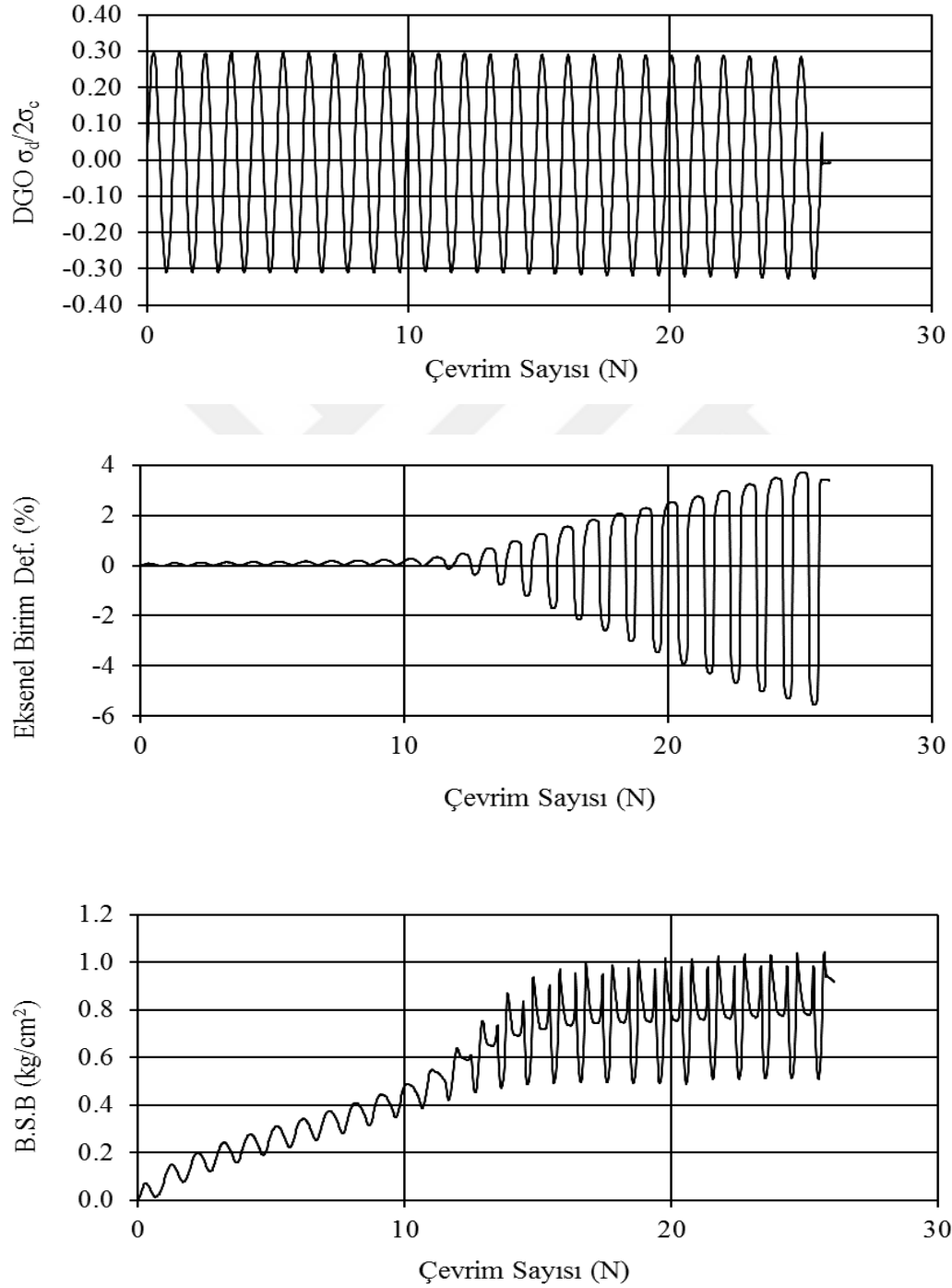
Şekil B. 17 : DN65 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	69	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	14/04/2016	Doygunluk (B)	0.51
Kür Süresi	45 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	69



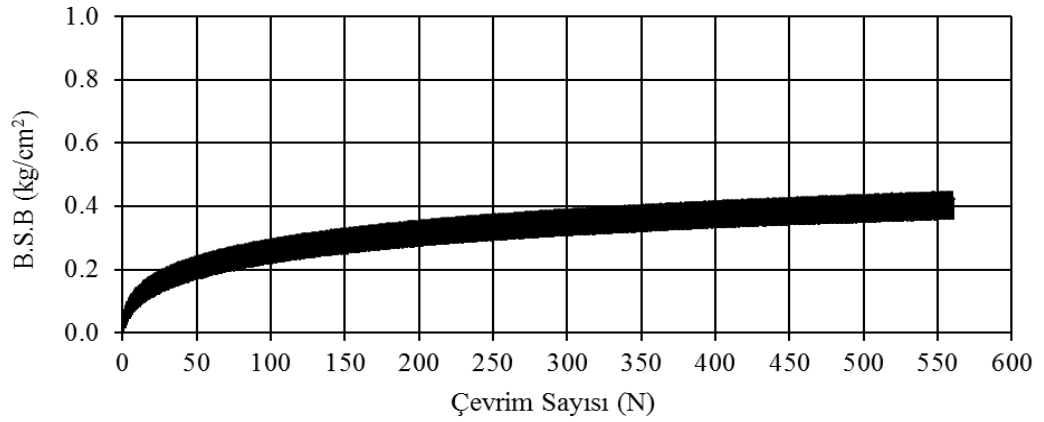
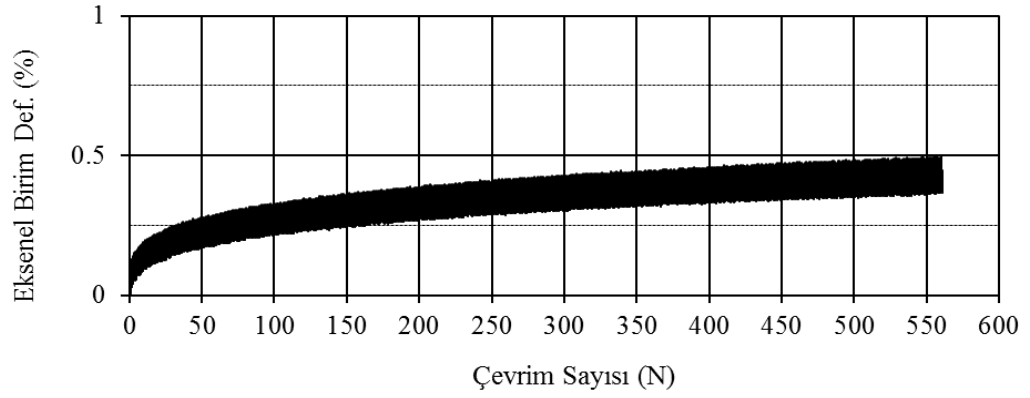
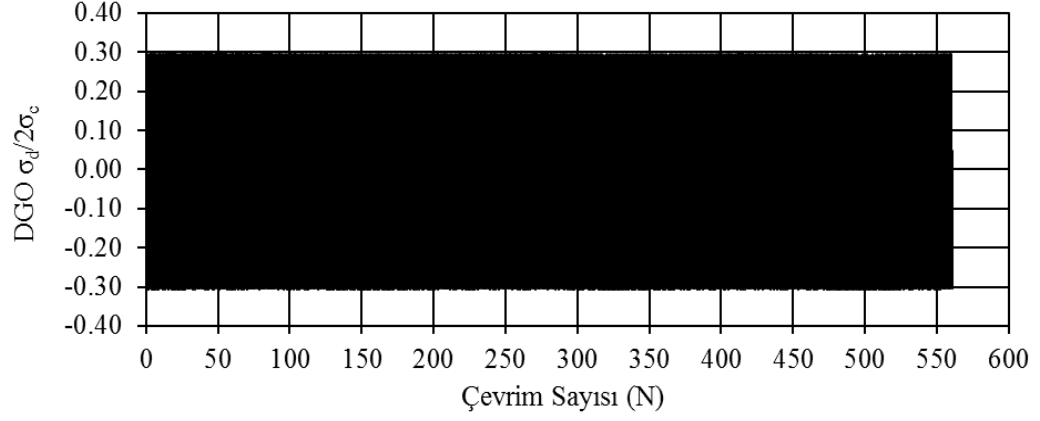
Şekil B. 18 : DN69 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	70	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	06/03/2017	Doygunluk (B)	0.62
Kür Süresi	717 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 52
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	19



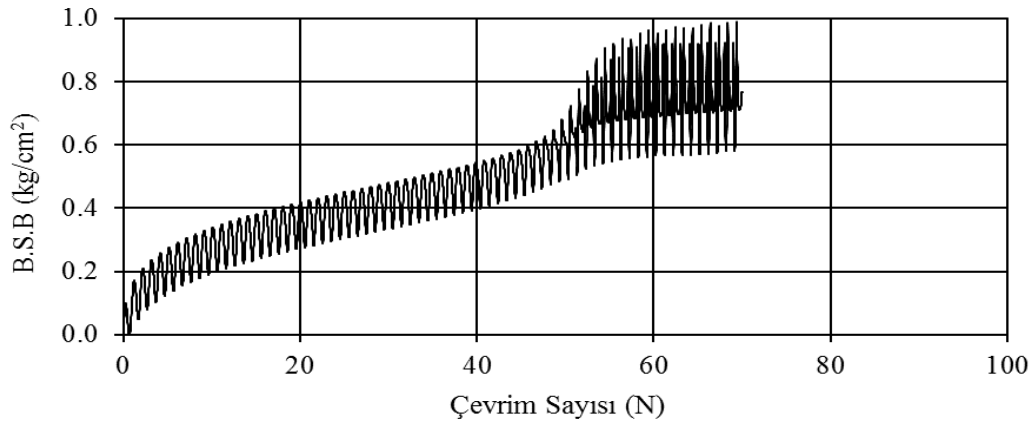
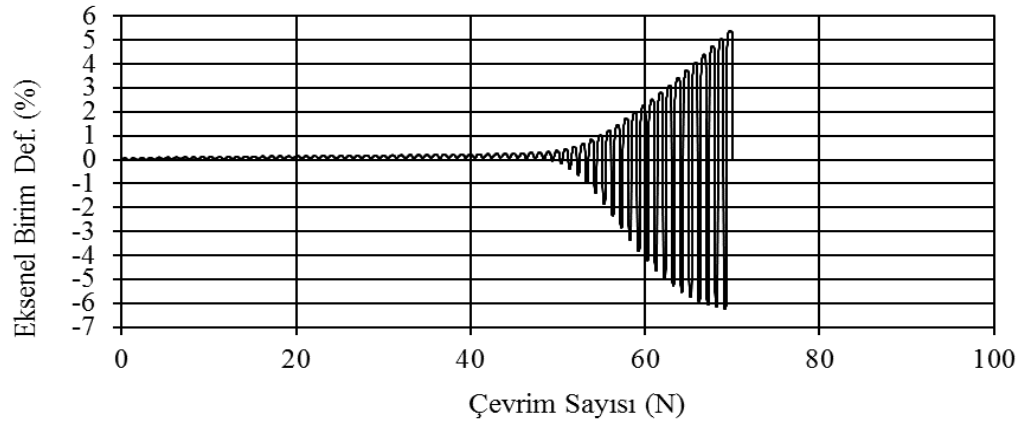
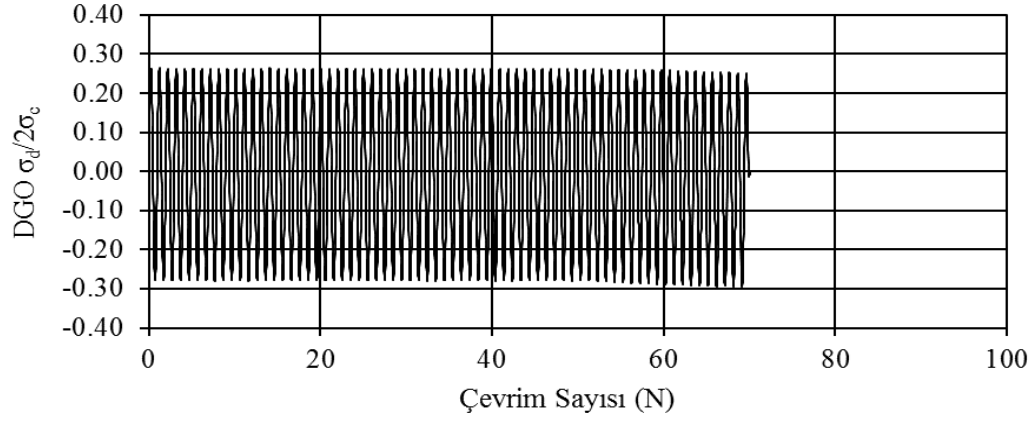
Şekil B. 19 : DN70 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	71	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	07/03/2017	Doygunluk (B)	0.21
Kür Süresi	718 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



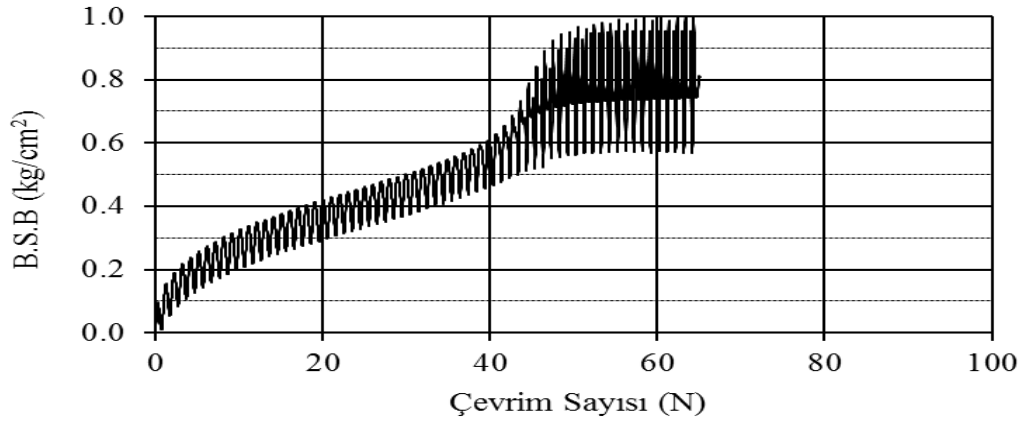
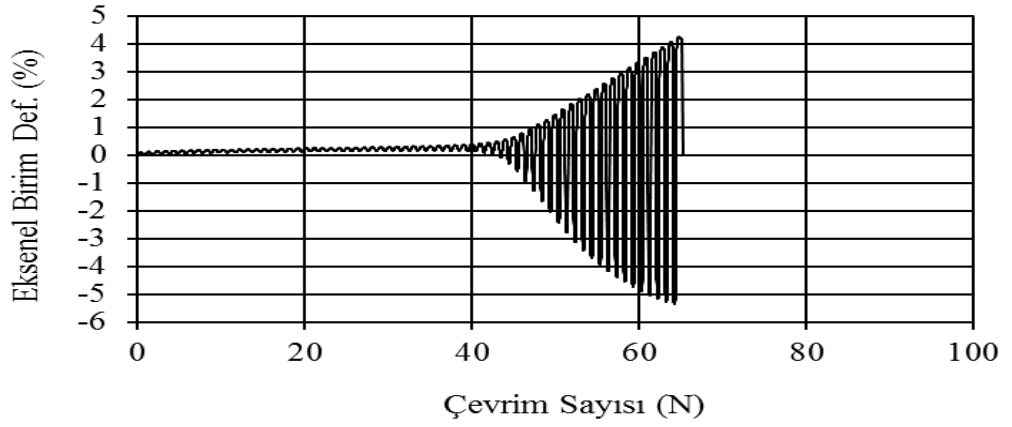
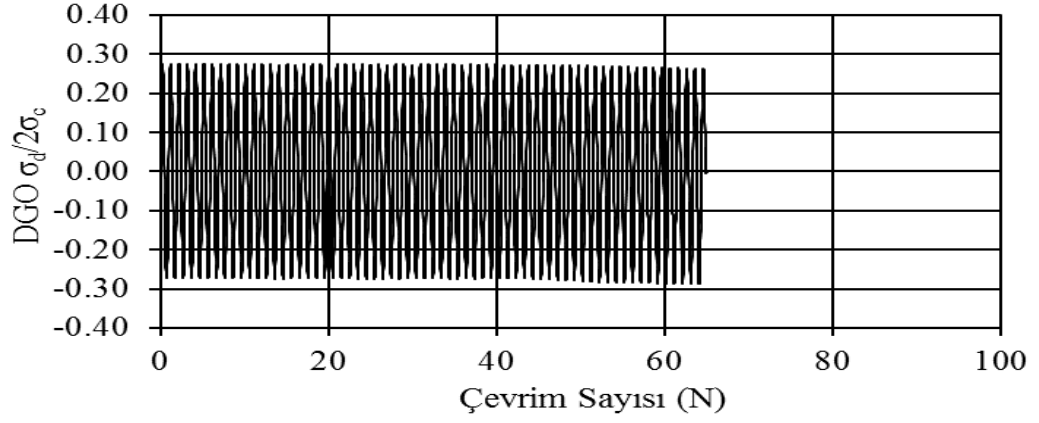
Şekil B. 20 : DN71 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	72	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	26/12/2017	Doygunluk (B)	0.65
Kür Süresi	3 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	59



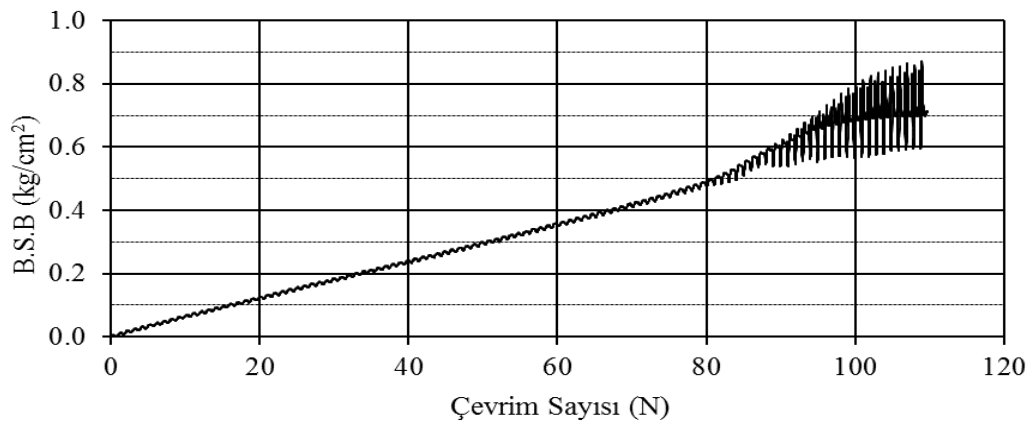
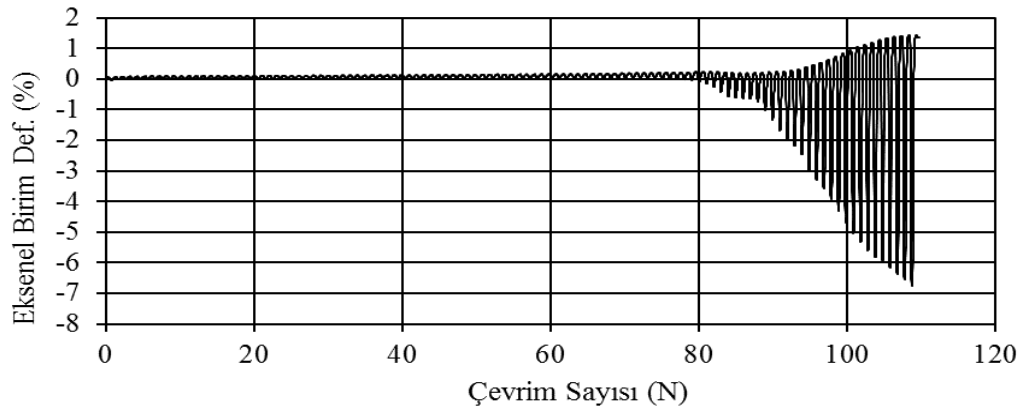
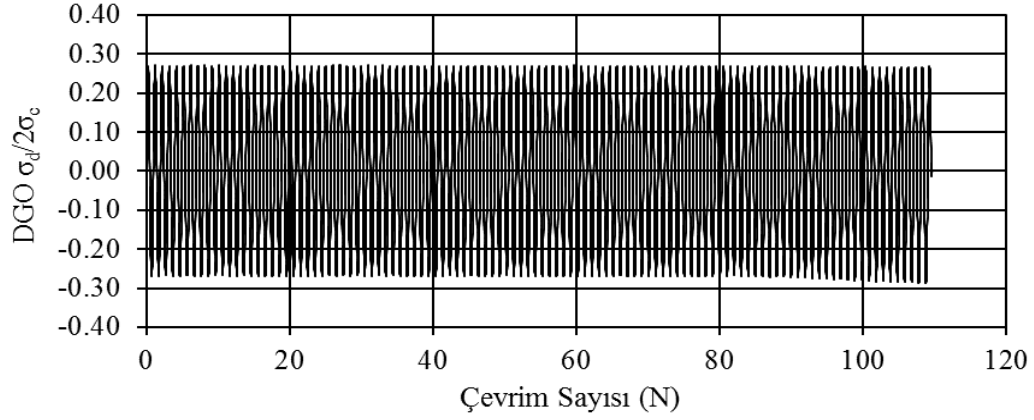
Şekil B. 21: DN72 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	73	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	03/01/2018	Doygunluk (B)	0.53
Kür Süresi	10 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	53



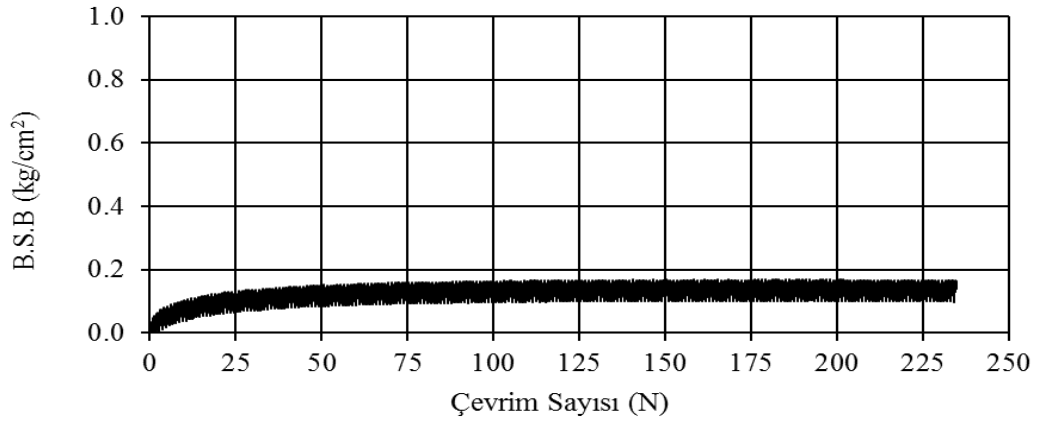
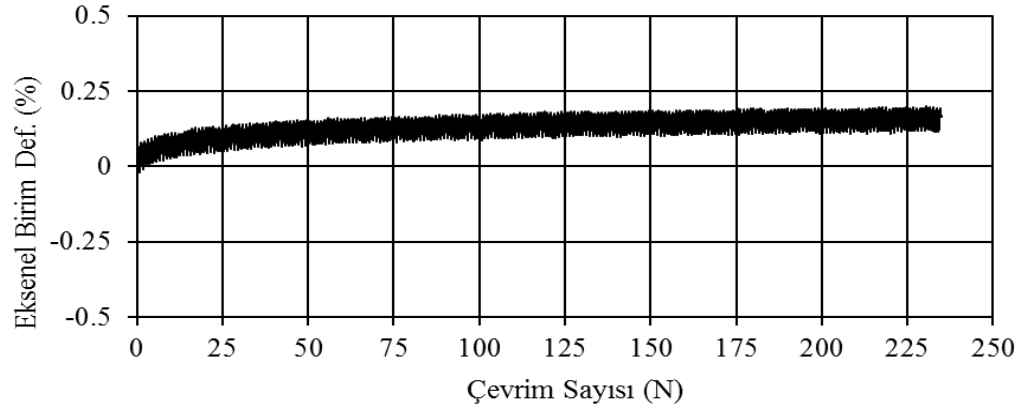
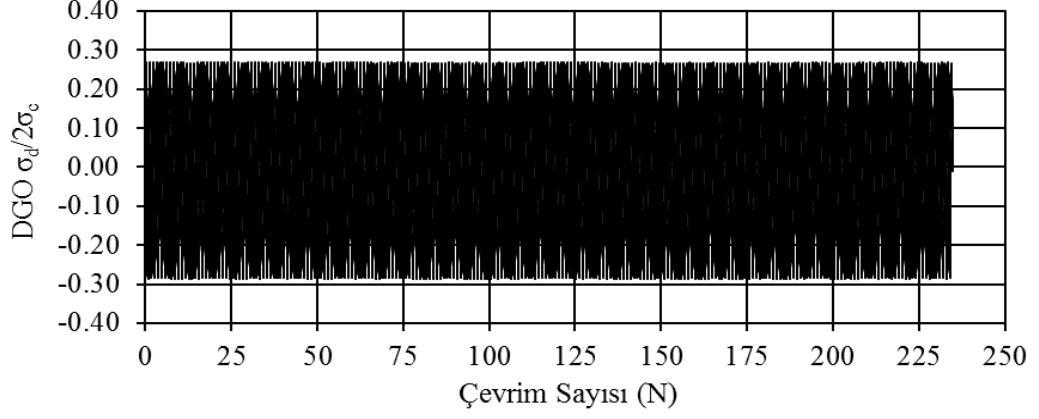
Şekil B. 22 : DN73 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	74	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	19/01/2018	Doygunluk (B)	0.50
Kür Süresi	27 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 45
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	100



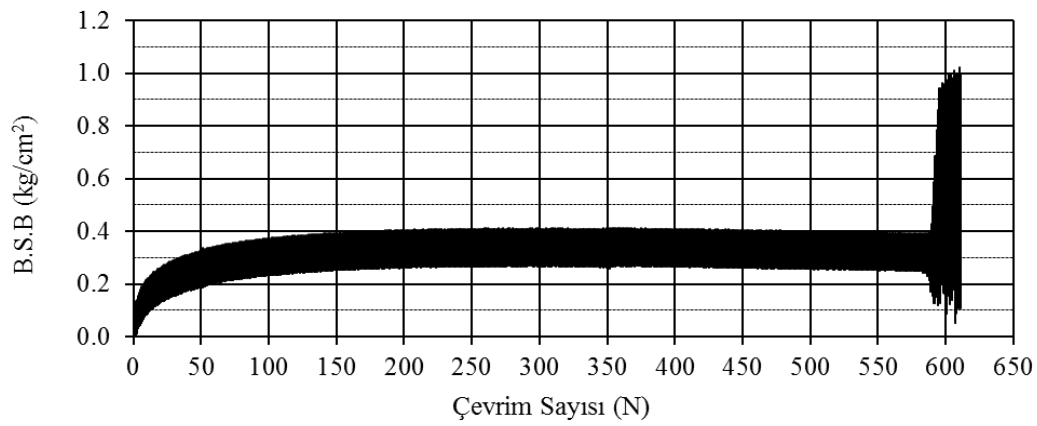
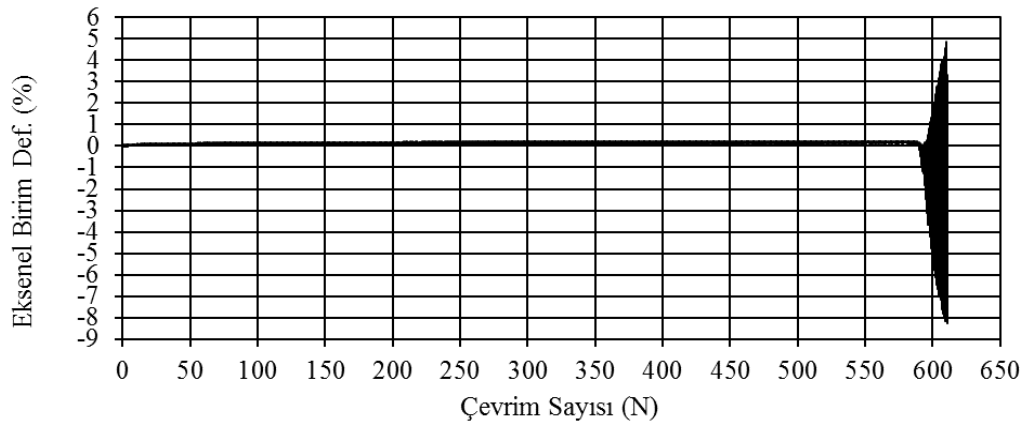
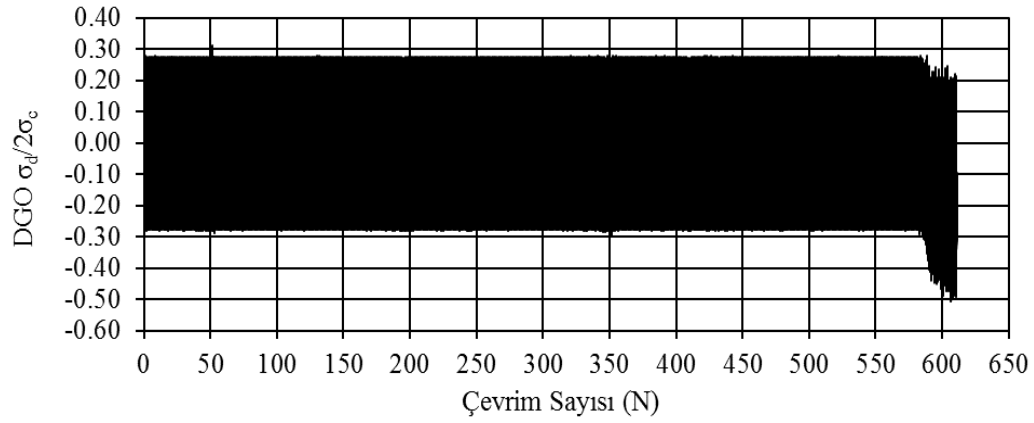
Şekil B. 23 : DN74 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	75	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	26/01/2018	Doygunluk (B)	0.23
Kür Süresi	1 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 54
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



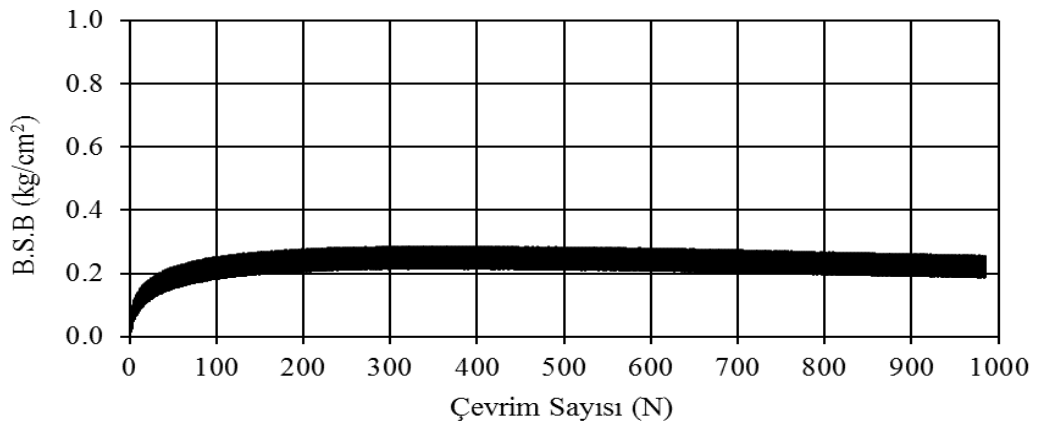
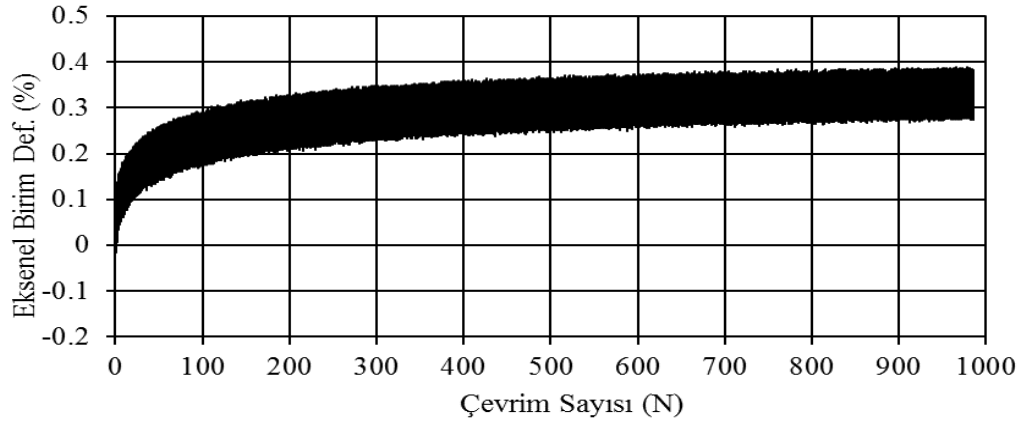
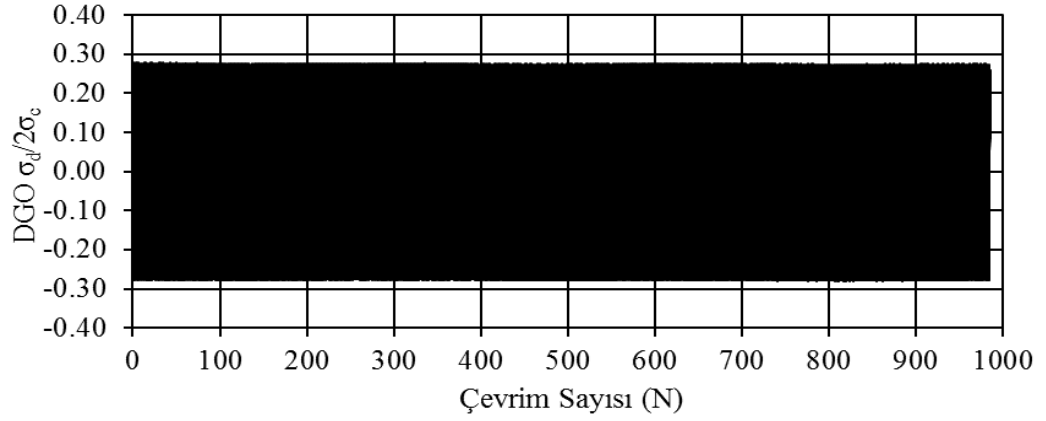
Şekil B. 24 : DN75 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	76	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	01/02/2018	Doygunluk (B)	0.43
Kür Süresi	7 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 54
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	596



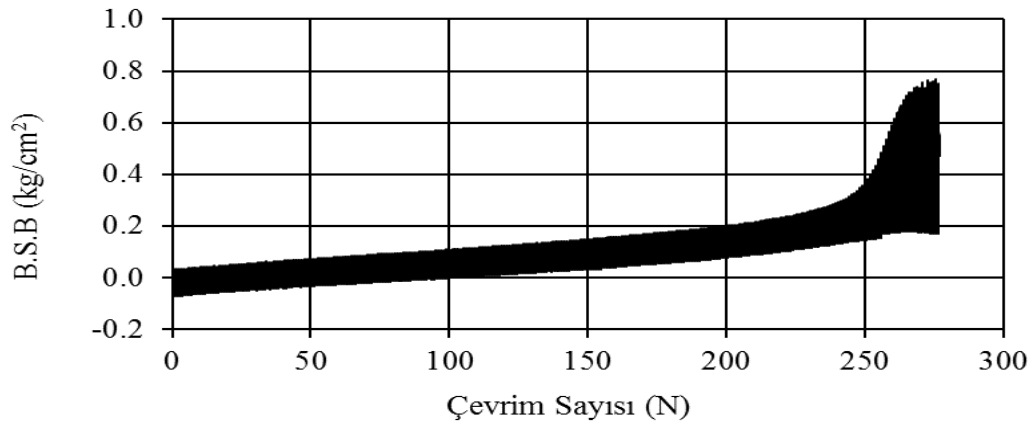
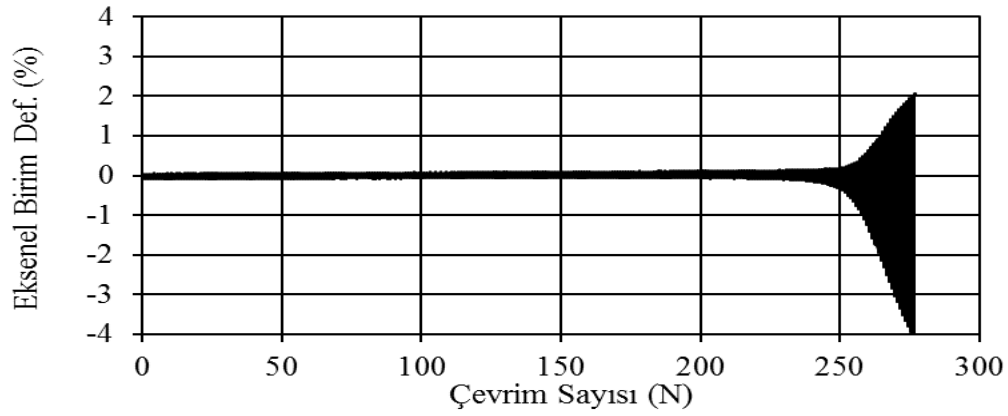
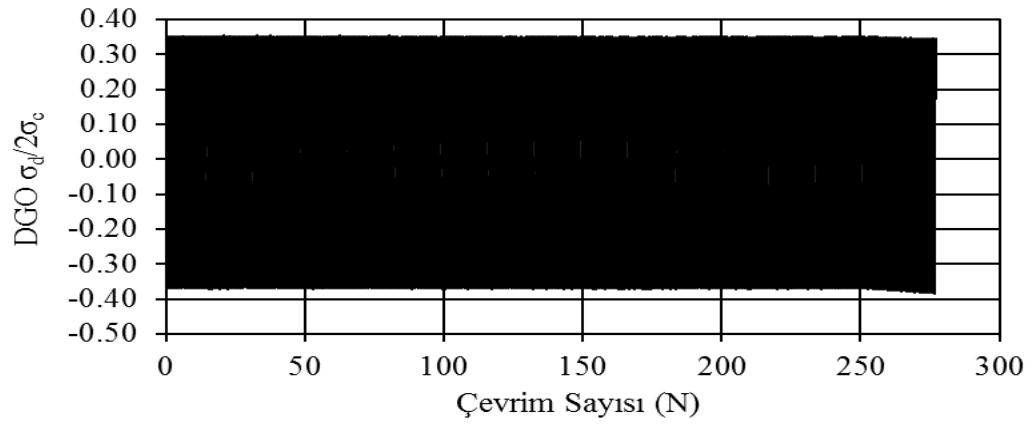
Şekil B. 25 : DN76 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	77	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	06/02/2018	Doygunluk (B)	0.25
Kür Süresi	1 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 54
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



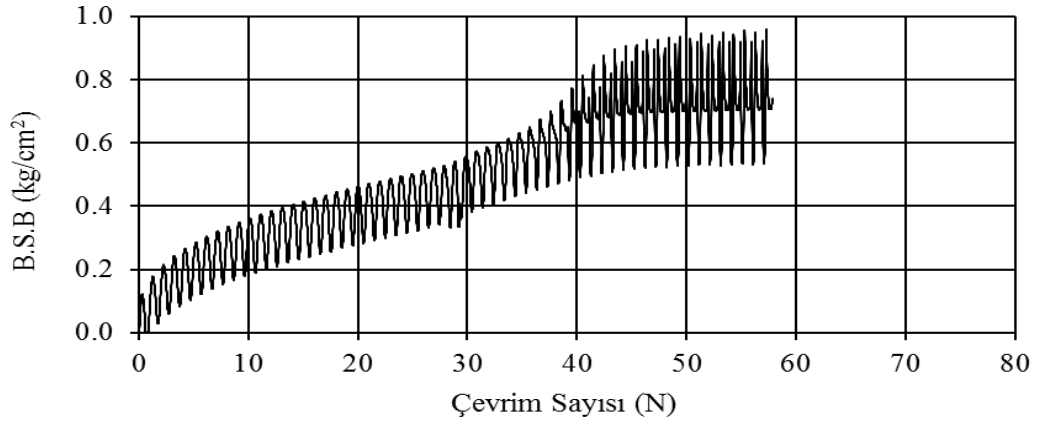
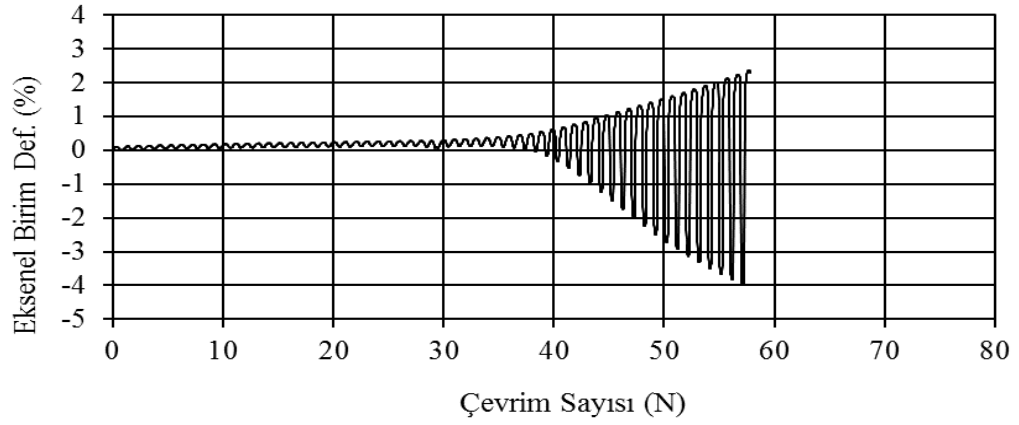
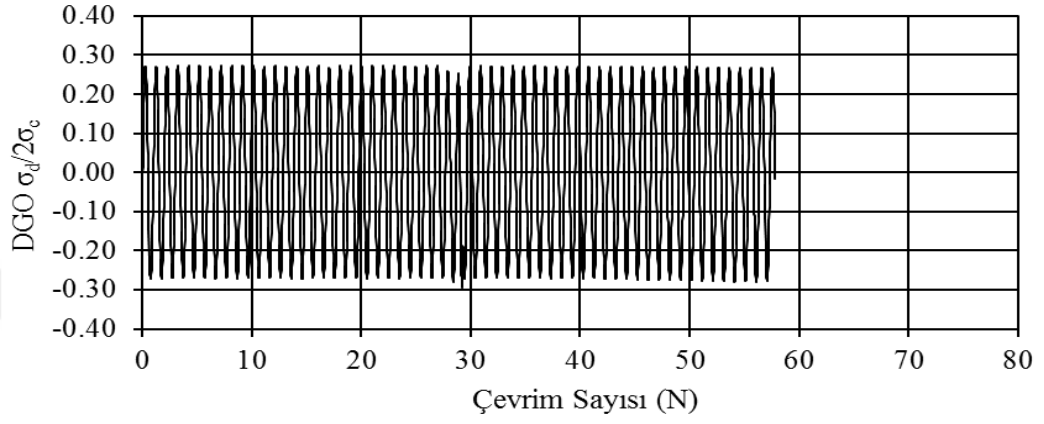
Şekil B. 26 : DN77 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	78 (77 Devamı)	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.36
Deney Tarihi	06/02/2018	Doygunluk (B)	0.25
Kür Süresi	1 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	274



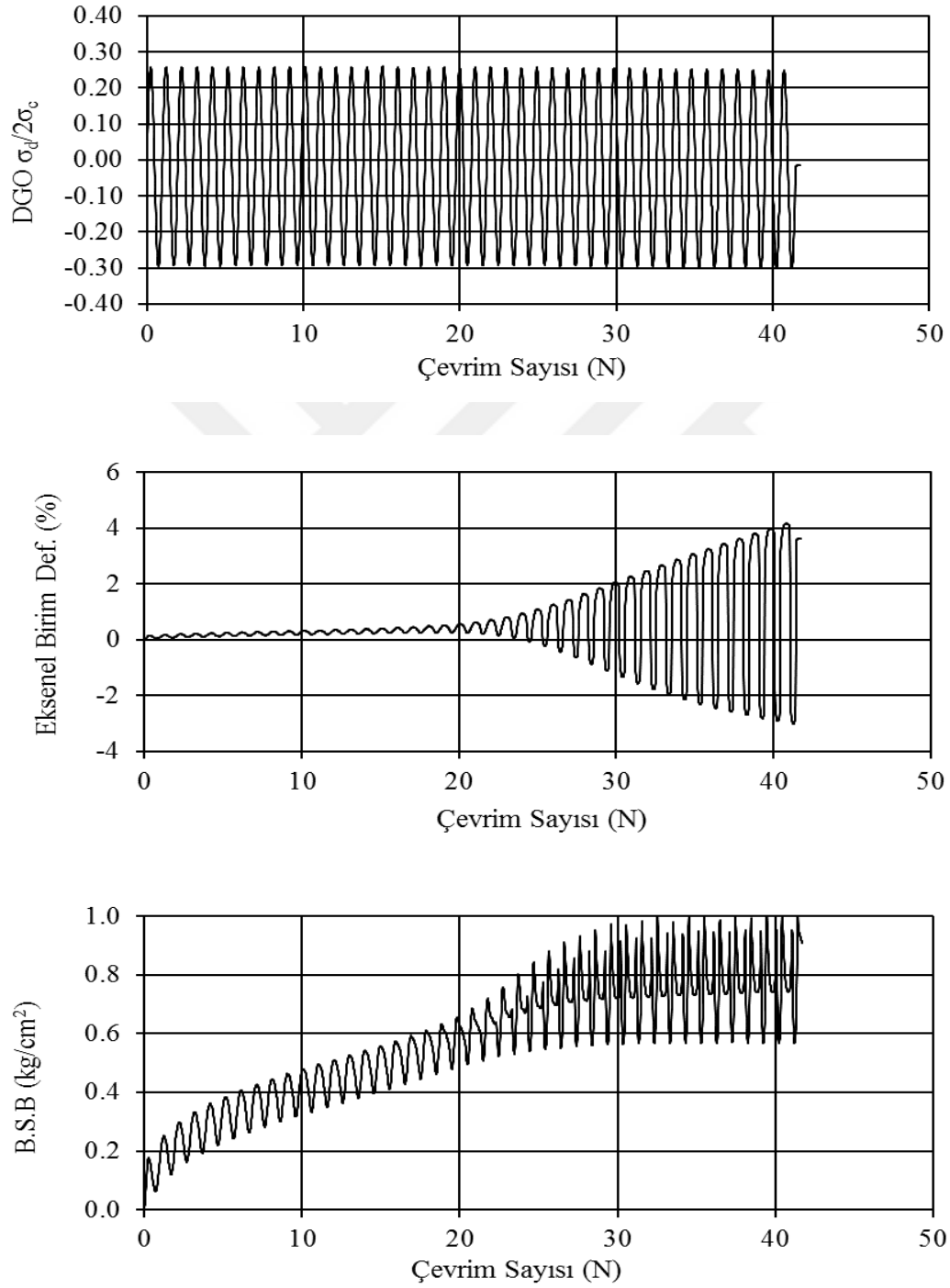
Şekil B. 27 : DN78 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	79	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	15/02/2018	Doygunluk (B)	0.46
Kür Süresi	7 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 50
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	54



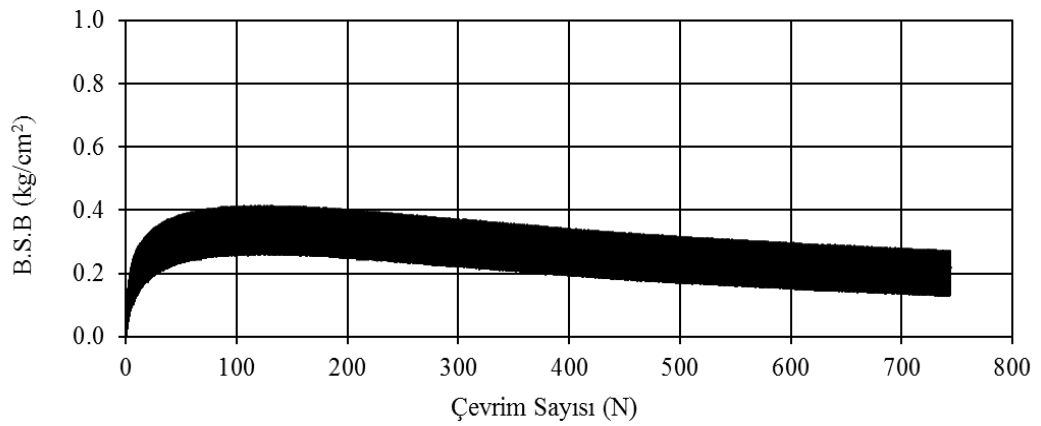
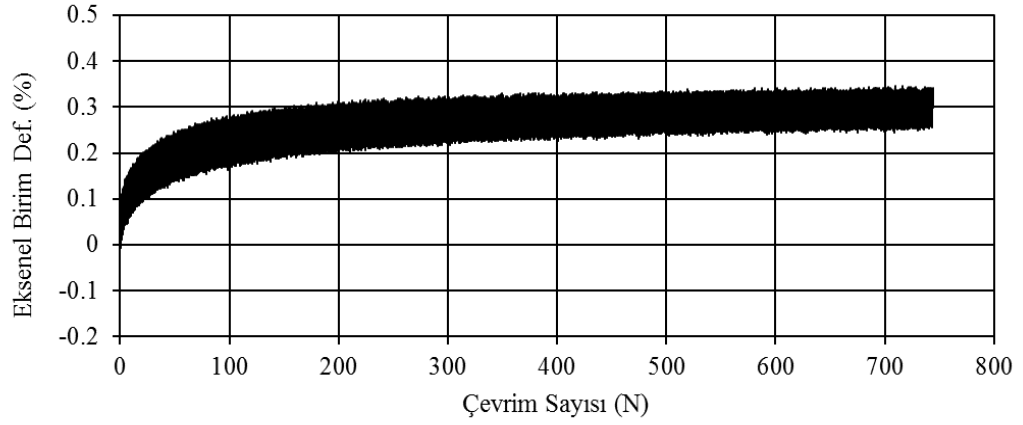
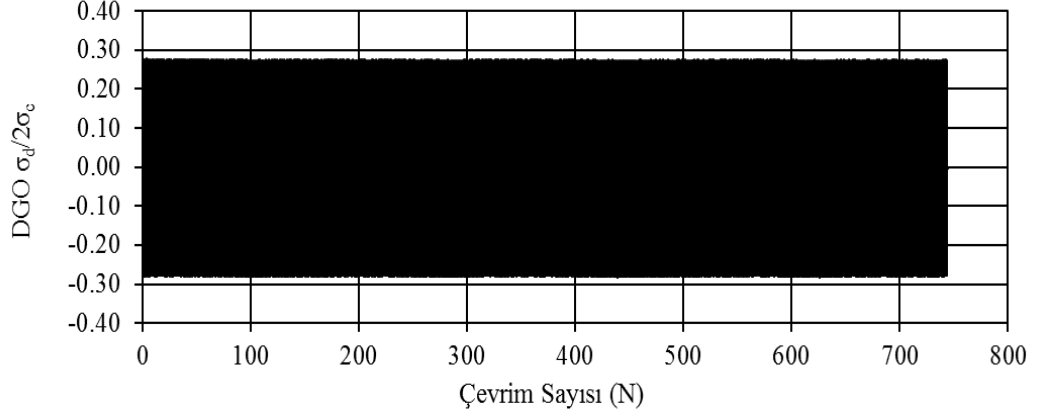
Şekil B. 28 : DN79 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	80	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	21/02/2018	Doygunluk (B)	0.70
Kür Süresi	30 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	33



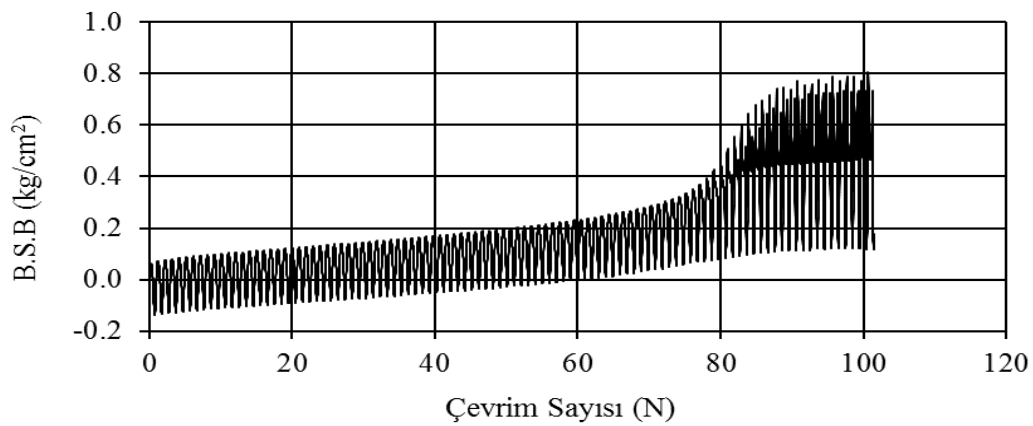
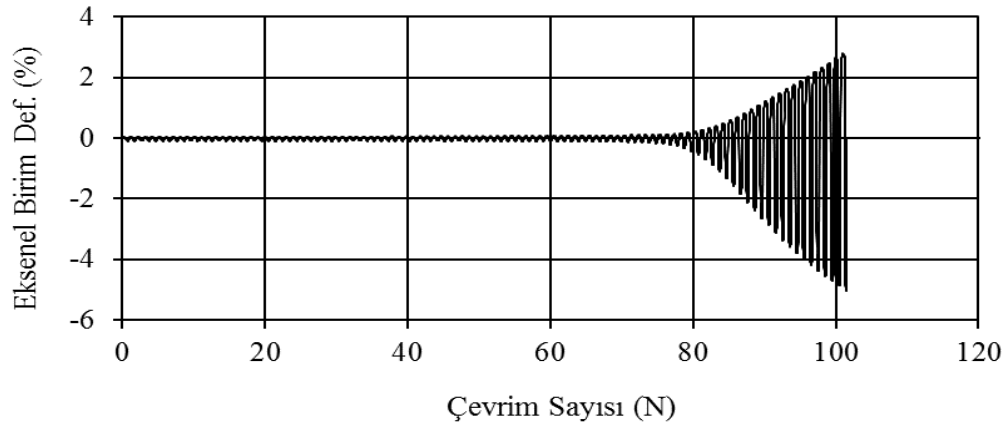
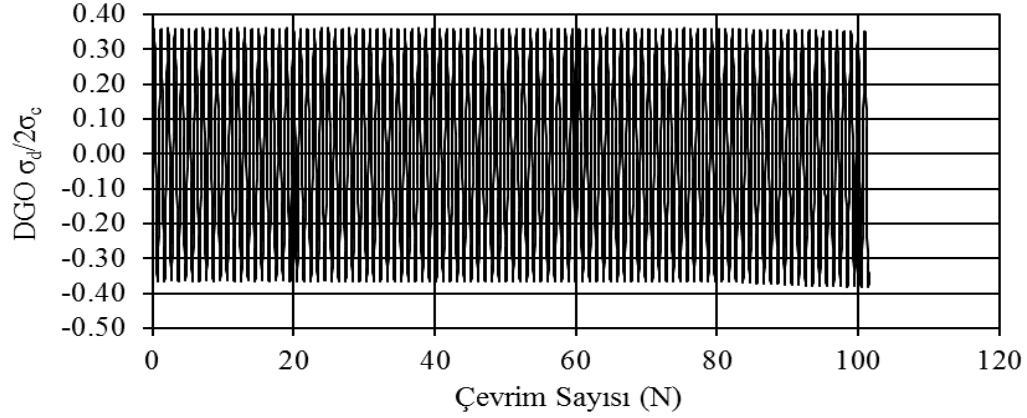
Şekil B. 29 : DN80 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	81	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	22/02/2018	Doygunluk (B)	0.35
Kür Süresi	30 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 55
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	-



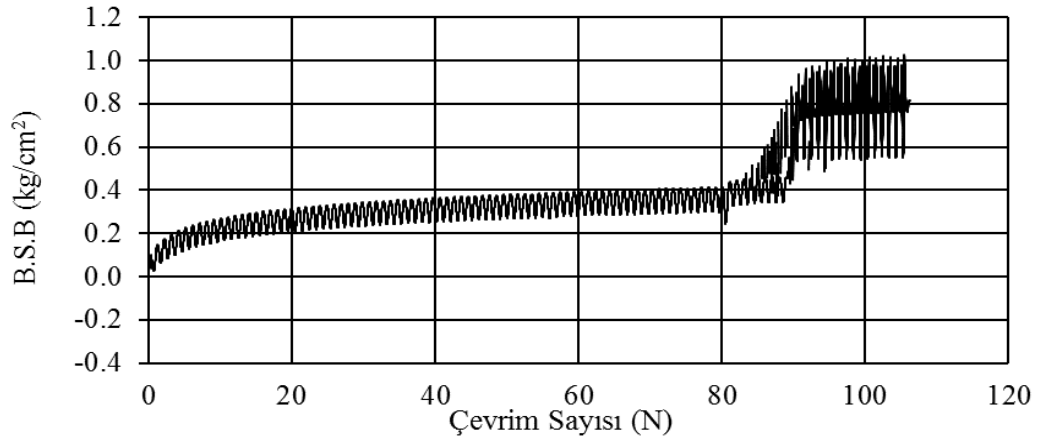
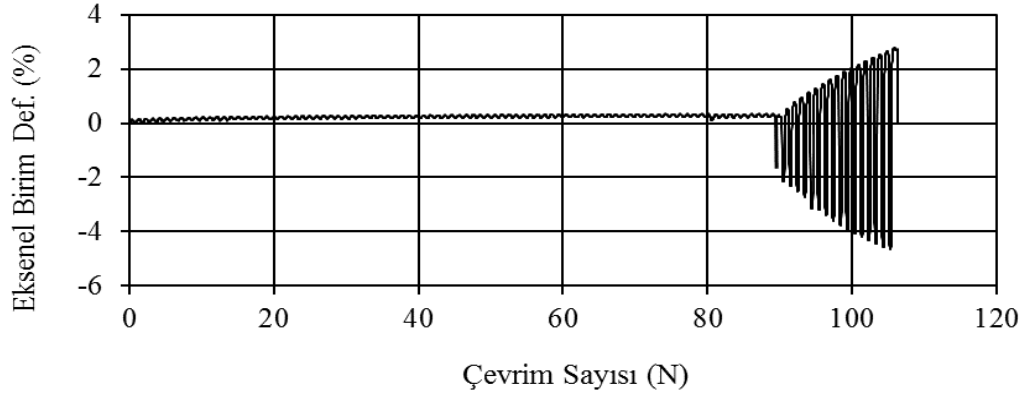
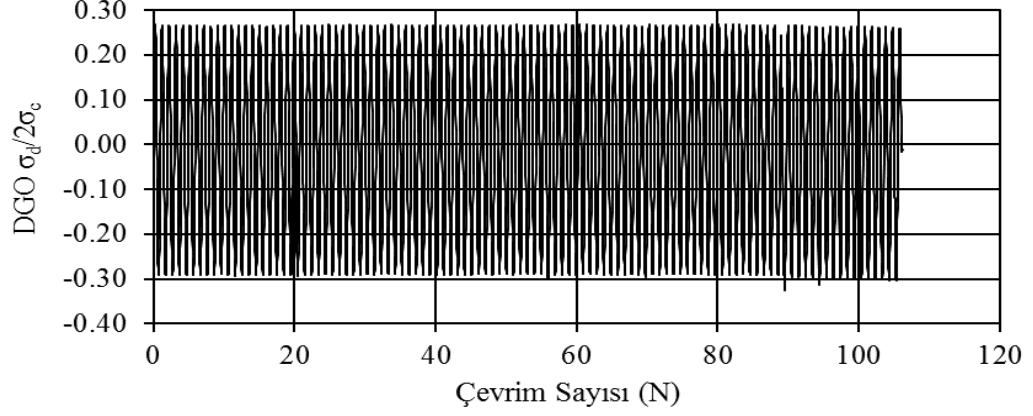
Şekil B. 30 : DN81 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	82 (81 Devamı)	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.36
Deney Tarihi	22/02/2018	Doygunluk (B)	0.35
Kür Süresi	30 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 56
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	94



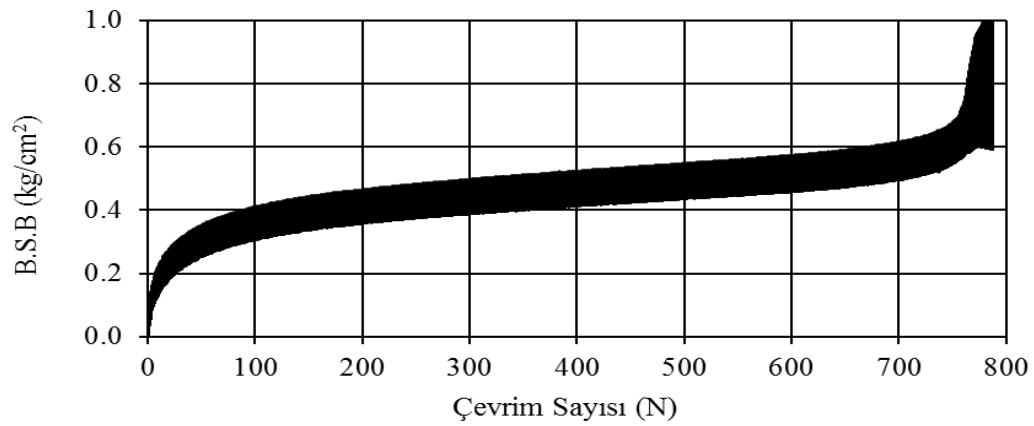
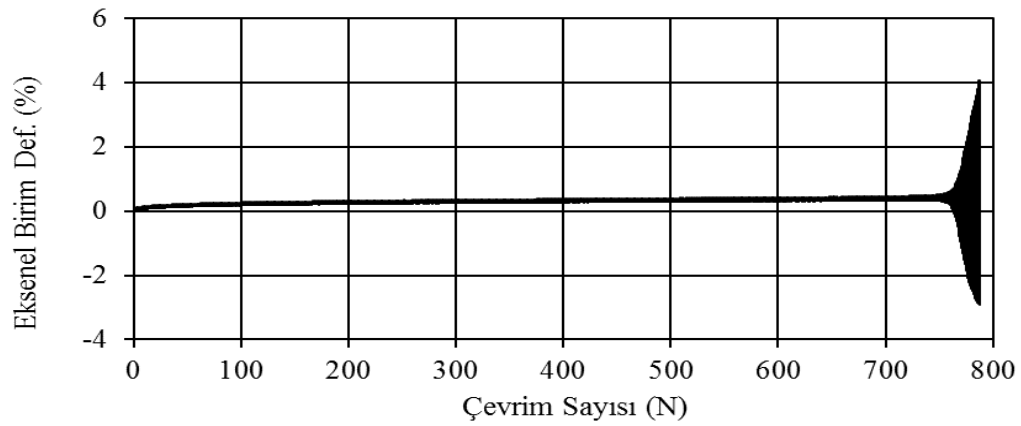
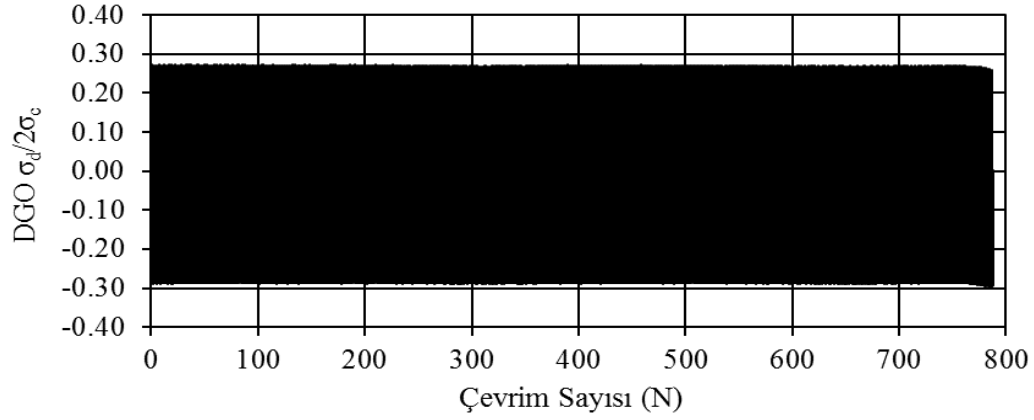
Şekil B. 31: DN82 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	83	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	27/02/2018	Doygunluk (B)	0.51
Kür Süresi	9 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 56
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	100



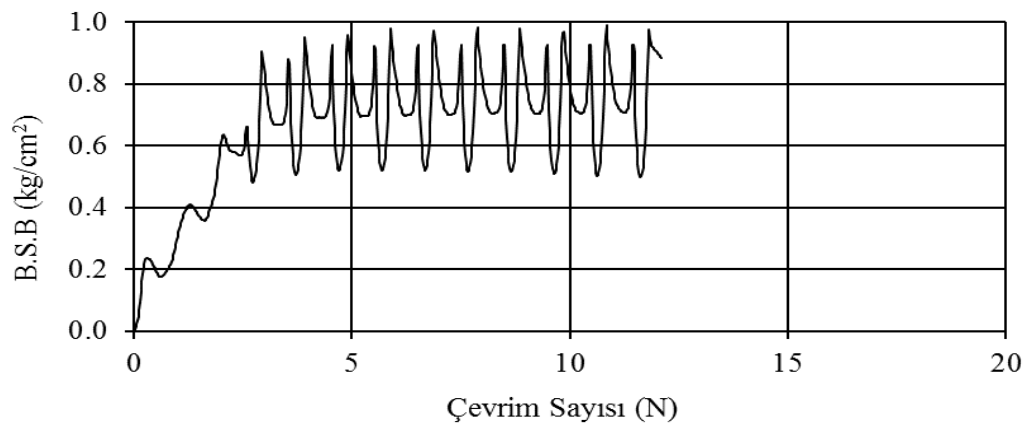
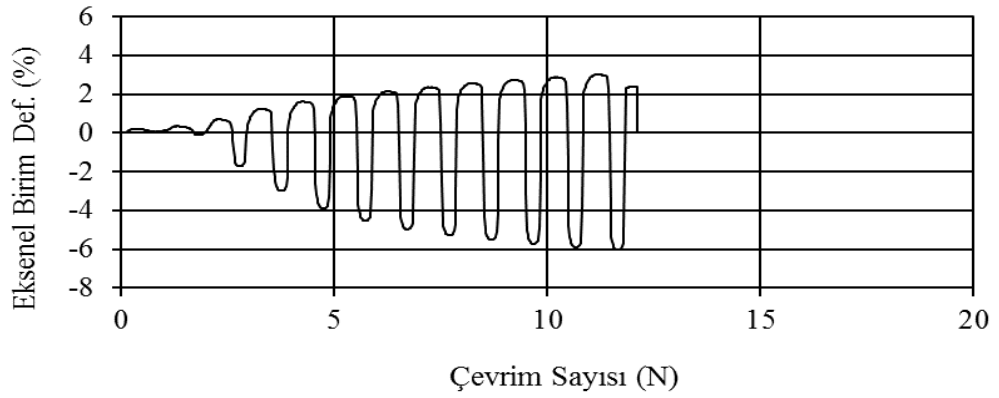
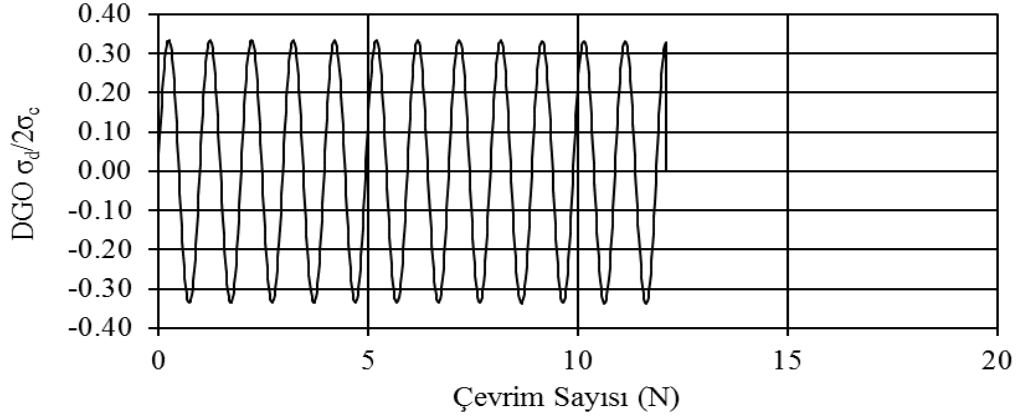
Şekil B. 32 : DN83 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	84	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	13/03/2018	Doygunluk (B)	0.40
Kür Süresi	45 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 57
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	788



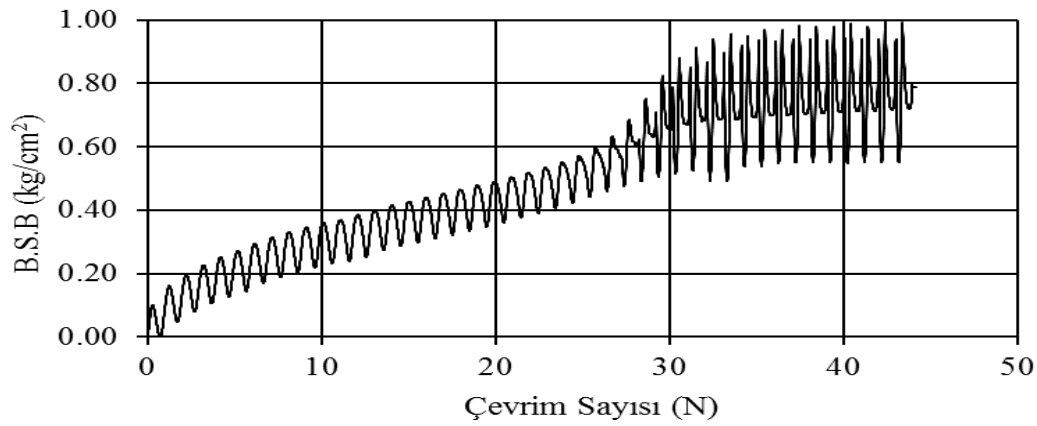
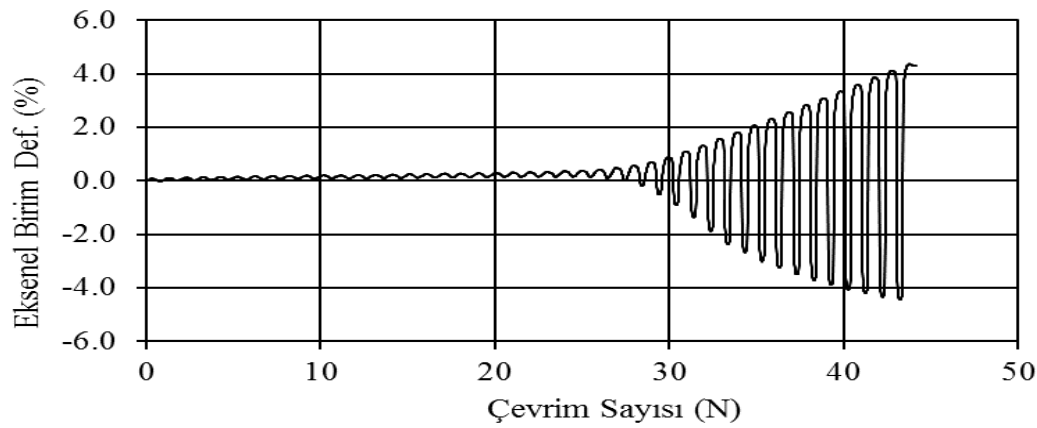
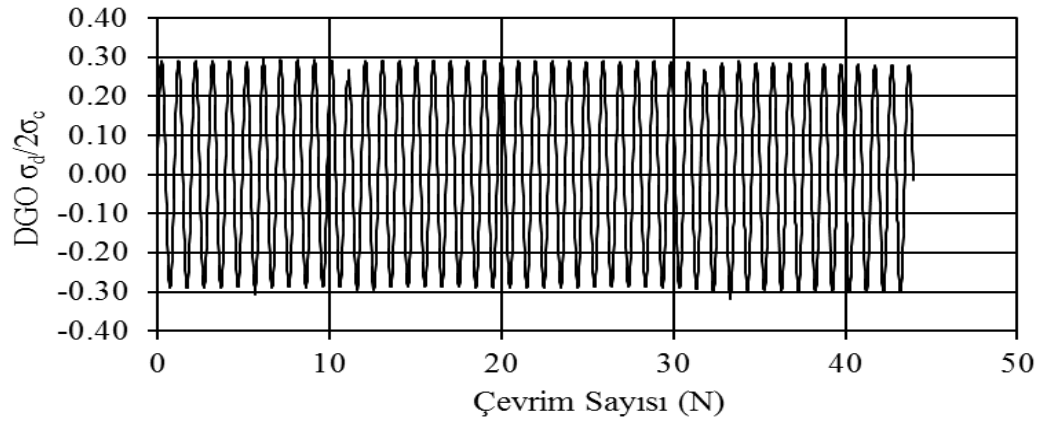
Şekil B. 33 : DN84 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	85	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.34
Deney Tarihi	14/03/2018	Doygunluk (B)	0.78
Kür Süresi	30 Gün	Deney Sonu Sıklık(DR)	% 60
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	5



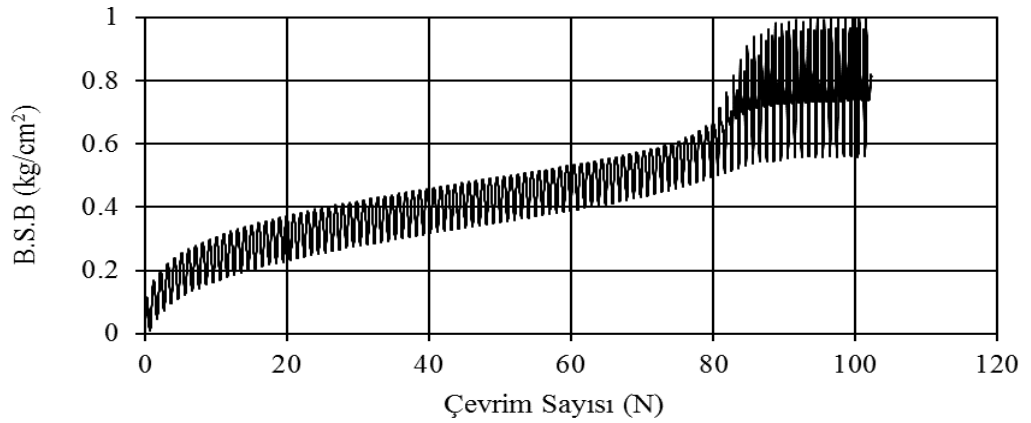
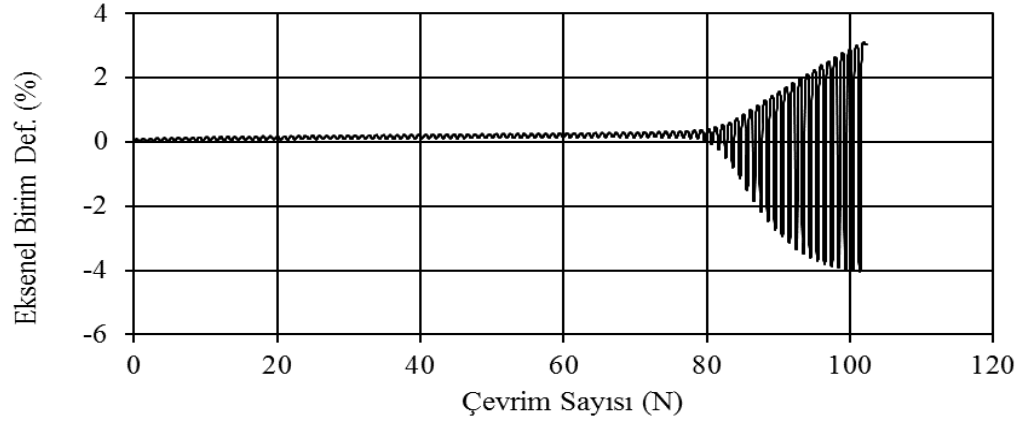
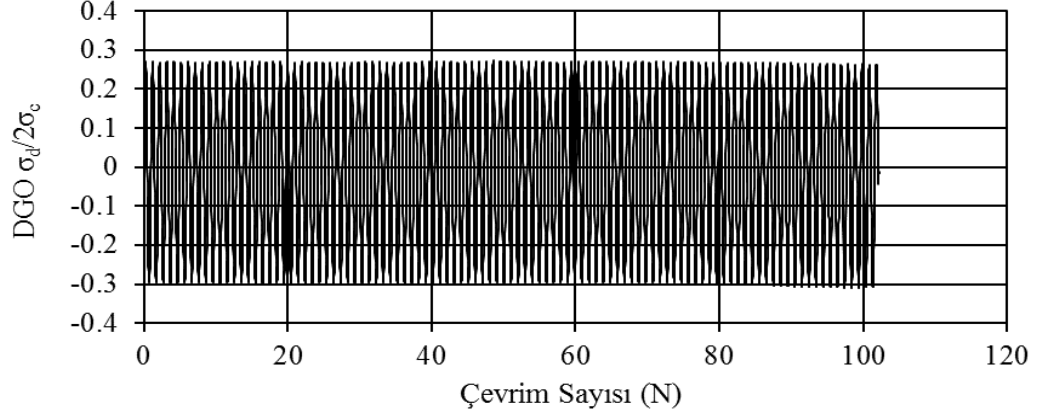
Şekil B. 34 : DN85 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	86	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	04/04/2018	Doygunluk (B)	0.35
Kür Süresi	60 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 62
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	37



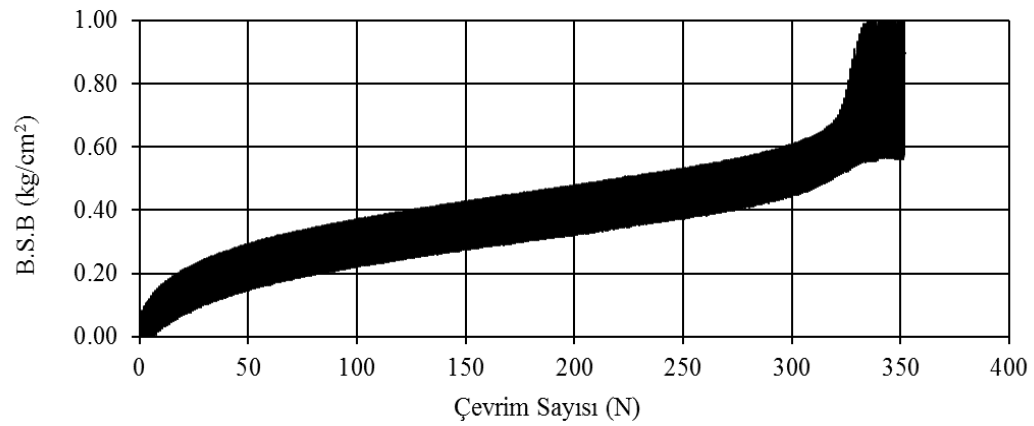
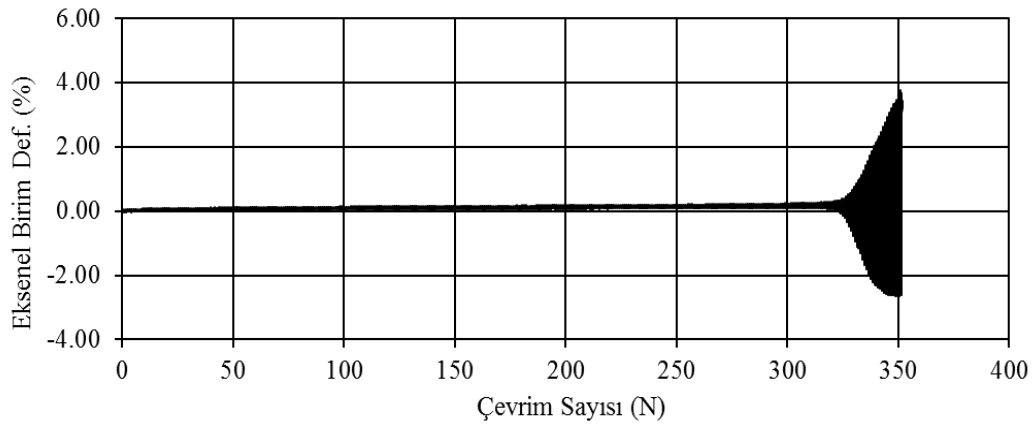
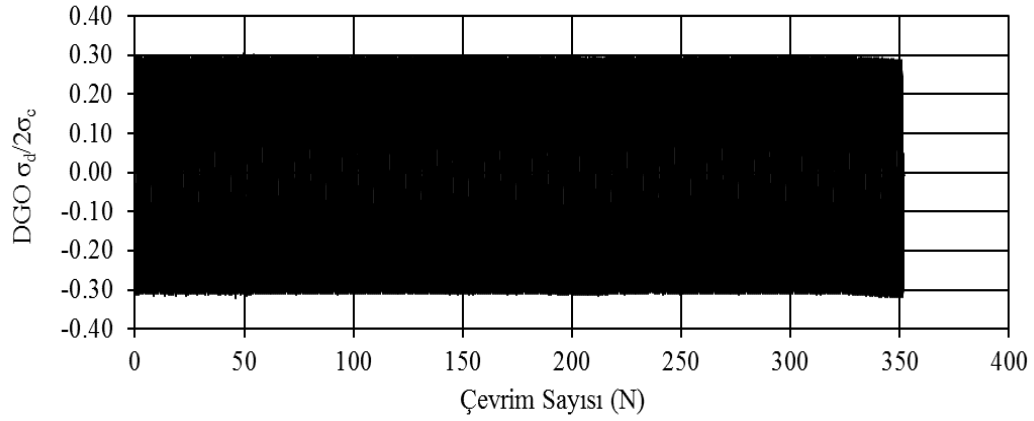
Şekil B. 35 : DN86 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	87	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.28
Deney Tarihi	05/04/2018	Doygunluk (B)	0.53
Kür Süresi	10 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	90



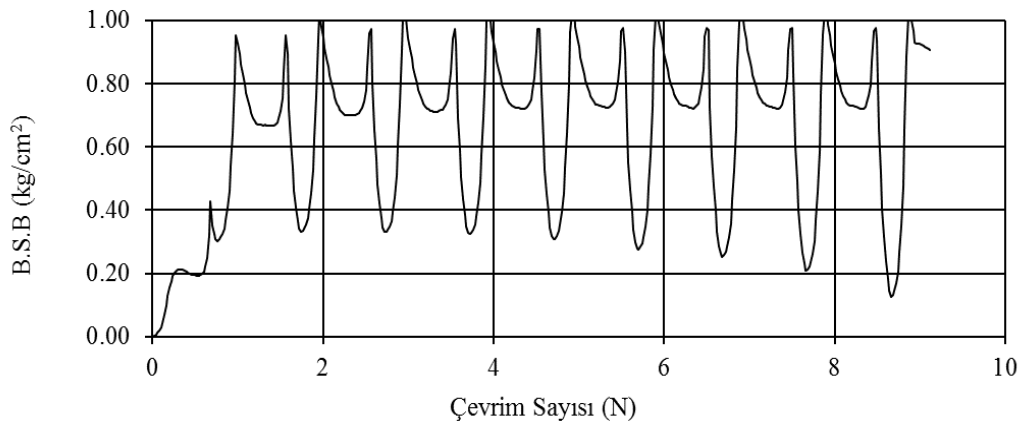
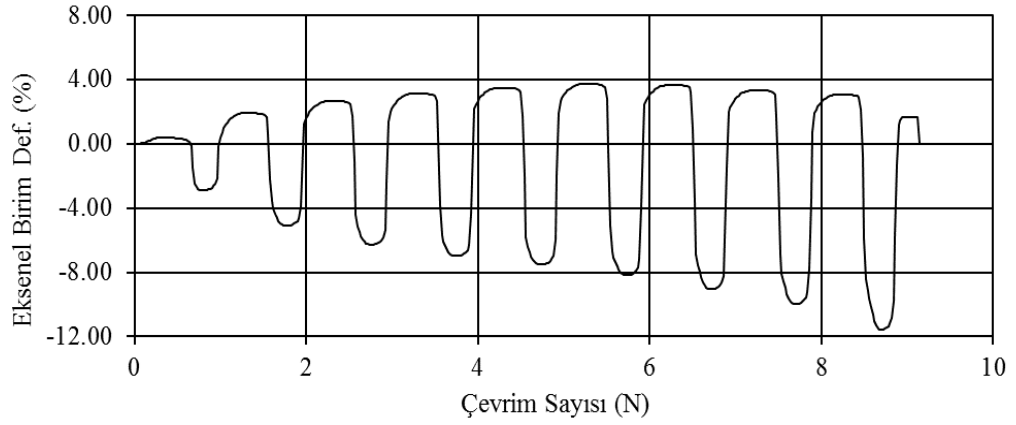
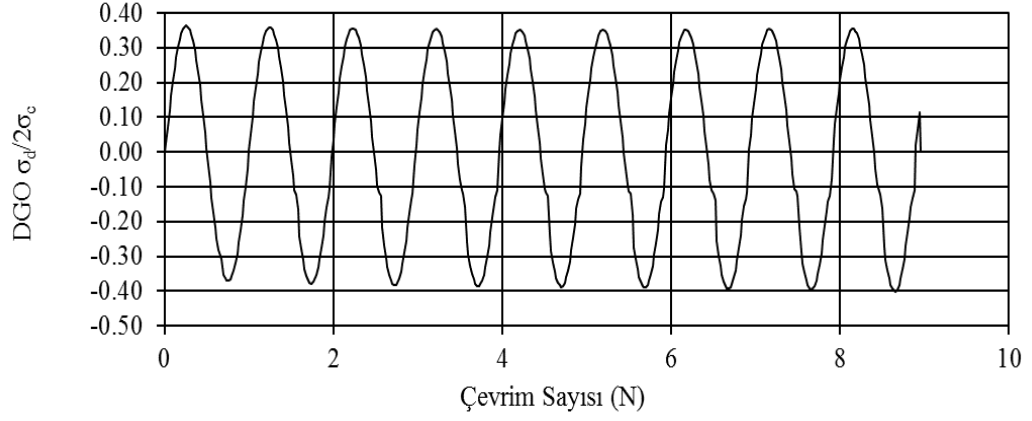
Şekil B. 36 : DN87 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	89	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.30
Deney Tarihi	02/05/2018	Doygunluk (B)	0.42
Kür Süresi	90 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	343



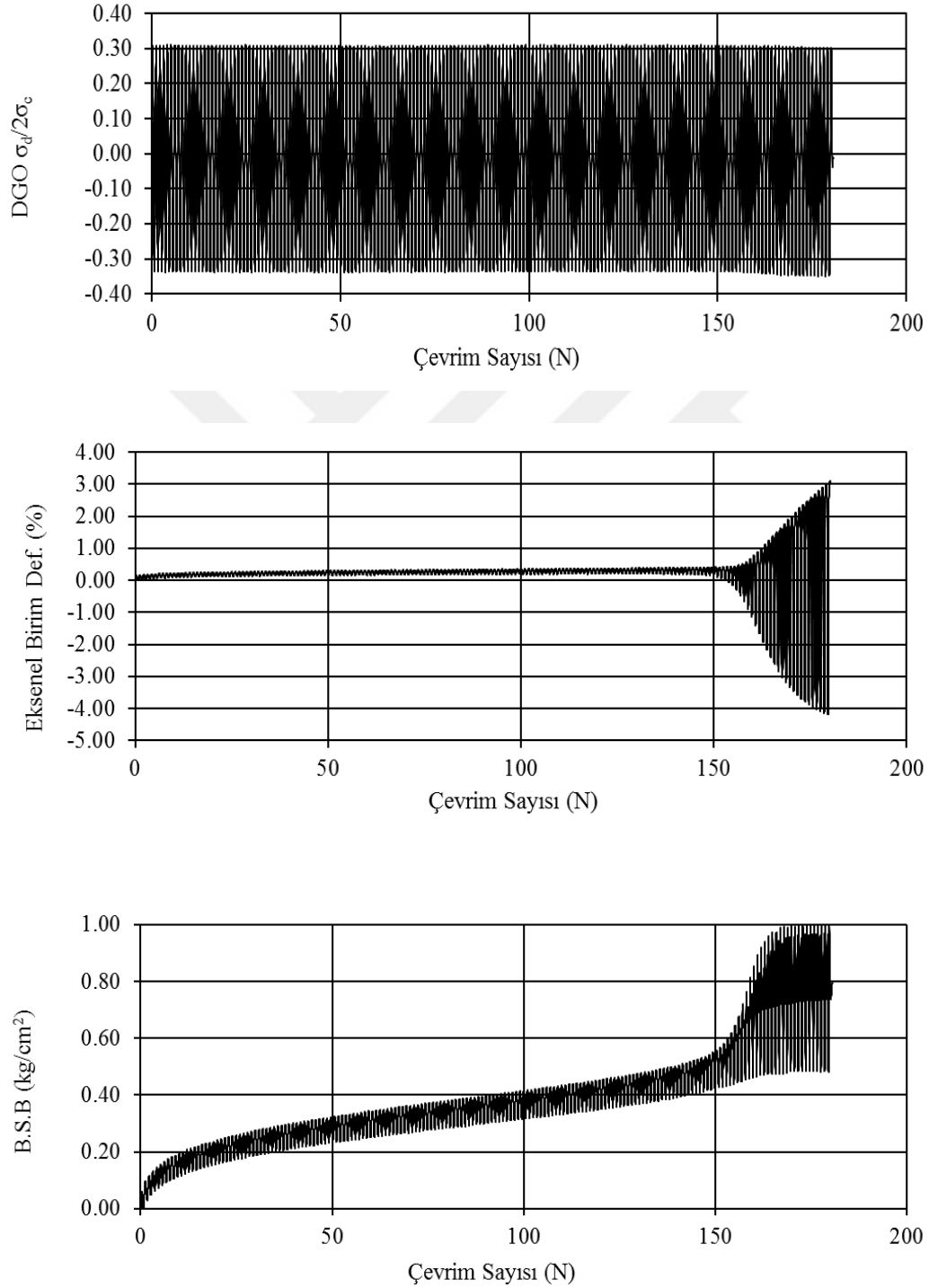
Şekil B. 37 : DN89 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	90	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.37
Deney Tarihi	24/05/2018	Doygunluk (B)	0.34
Kür Süresi	58 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 60
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	2



Şekil B. 38 : DN90 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

Deney No	91	$\pm\sigma_{dev}/2\sigma'_{con}$	0.34
Deney Tarihi	29/05/2018	Doygunluk (B)	0.23
Kür Süresi	60 Gün	Deney Sonu Sıkılık(DR)	% 59
Kür Oranı	% 100	Efektif Gerilme	100 kPa
Frekans	0.1 Hz	Göçme Sınırı Çevrim Sayısı	170



Şekil B. 39 : DN91 dinamik üç eksenli deney sonuçları.

EK C



Şekil C. 1 : Temiz zemin numunesi 20X dijital mikroskop görüntüsü.



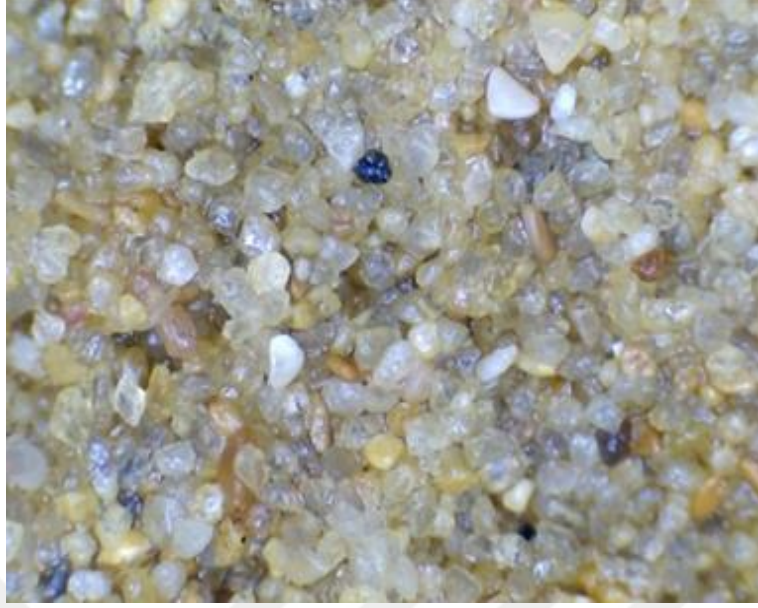
Şekil C. 2 : Temiz zemin numunesi 200X dijital mikroskop görüntüsü.



Şekil C. 3 : Kirlenmiş DN72 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü (K.S. = 3gün).



Şekil C. 4 : Kirlenmiş DN72 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü (K.S. = 3gün).



Şekil C. 5 : Kirlenmiş DN62 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 7gün).



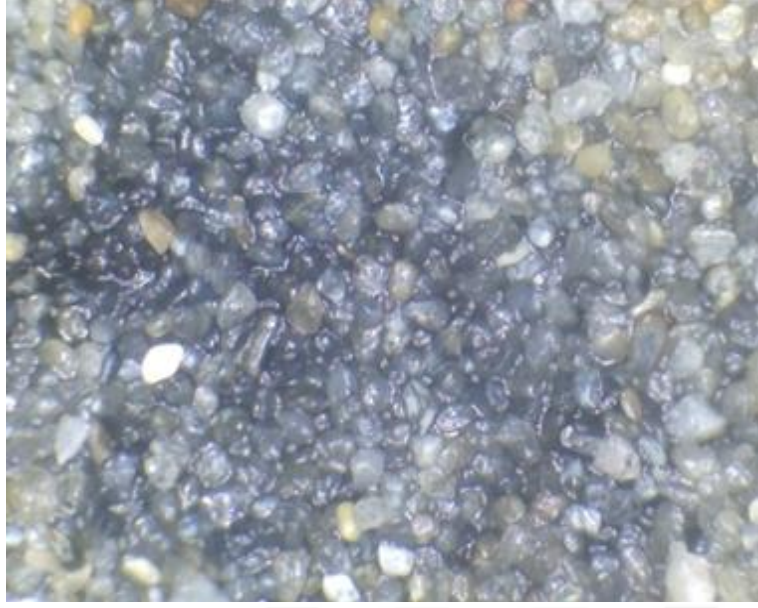
Şekil C. 6 : Kirlenmiş DN62 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 7gün).



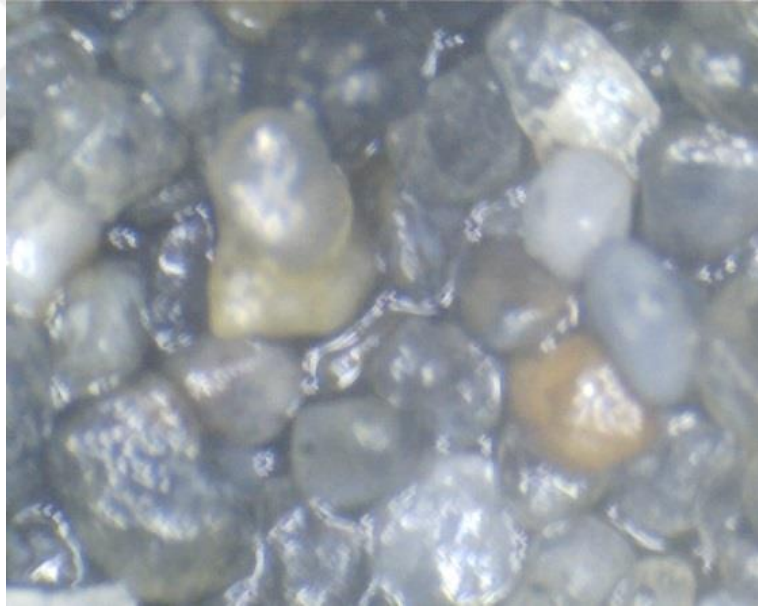
Şekil C. 7 : Kirlenmiş DN33 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 40gün).



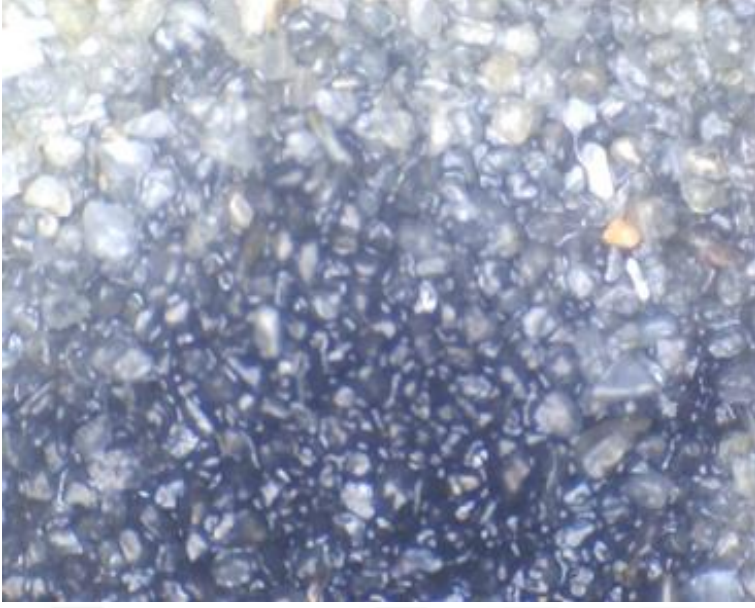
Şekil C. 8 : Kirlenmiş DN33 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 40gün).



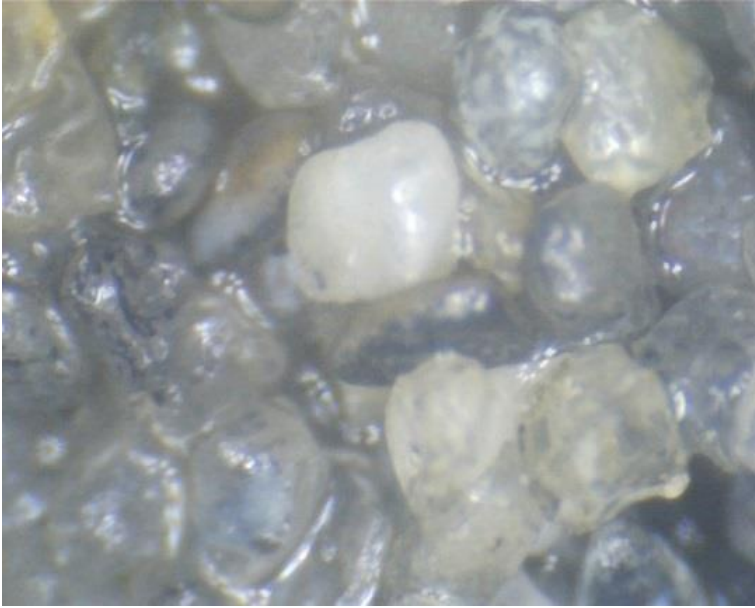
Şekil C. 9 : Kirlenmiş DN31 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 103gün).



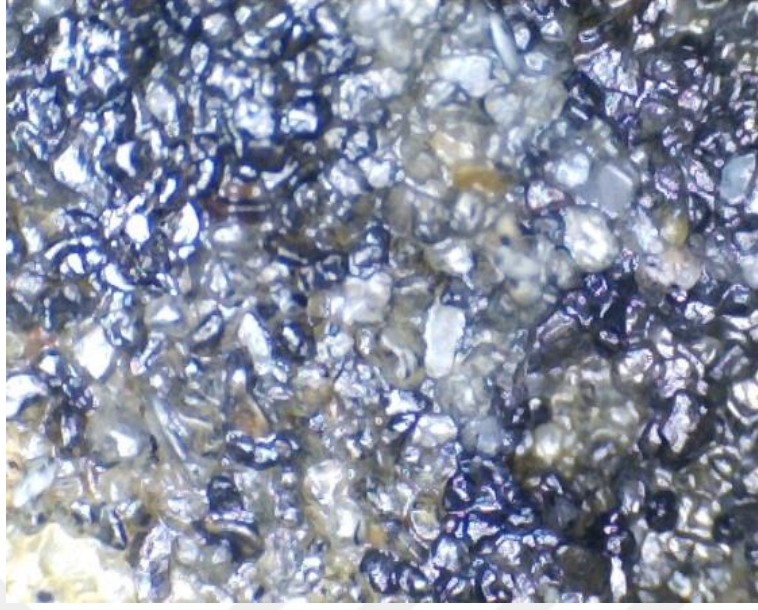
Şekil C. 10 : Kirlenmiş DN31 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 103gün).



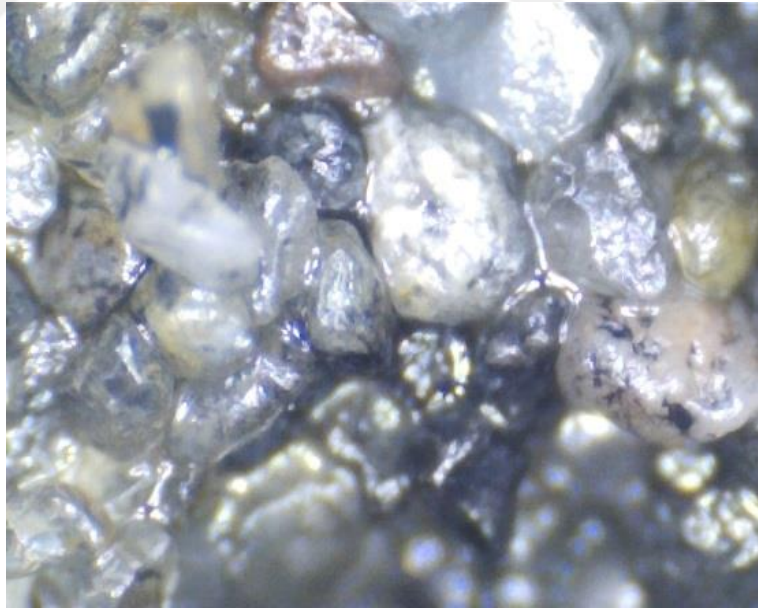
Şekil C. 11 : Kirlenmiş DN29 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 146gün).



Şekil C. 12 : Kirlenmiş DN29 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 146gün).



Şekil C. 13 : Kirlenmiş DN70 numunesine ait 20X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 717gün).



Şekil C. 14 : Kirlenmiş DN70 numunesine ait 200X dijital mikroskop görüntüsü (K.S = 717gün).



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Aytaç YAŞARGÜN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, Çukurova Üniversitesi , Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm
- **Yükseklisans** : 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem Mühendisliği Program

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2007-2009 yılları arası Akton İnşaat A.Ş. Şantiye Şefliği yaptı.
- 2009-2013 yılları arası Akton İnşaat A.Ş. Proje Müdürlüğü yaptı.
- 2013 yılında itibaren kendi firması ile birçok taahhüt işleri yaptı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yaşargün A., Erken A.** 2018. The Cyclic Behavior of Sand Polluted by Leachate. *International Congress – 3. International Conference on Civil and Enviromental Engineering* , April 24-27, 2018 Çeşme, Turkey.
- **Yaşargün A., Erken A.** 2022. The Dynamic Behavior of Pollluted Sand. *International Journal of Engineering and Natural Sciences (IJENS)*, 28 Aralık 2022 Kabul Edildi.
- **Yaşargün A., Erken A.** 2022. Çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kumların dinamik davranışı. *Pamukkale Univ Muh. Bilim Derg.* 2022 , 28 Şubat 2023 Kabul Edildi.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Demir G., Şener A., Yaşargün A., Erken A.** (2008). The Effect of Wastewater on Static Behaviour on Undisturbed Clay Soil. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On ikinci Ulusal Kongresi 16-17 Ekim*, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- **Erken A., Yaşargün A., Şener A., Demir G.** (2009). The Cyclic Behavior of undisturbed low plasticity clays by polluted leachate in sanitary landfill Sites. *Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference 2-3 October*, Alexandria, Egypt.
- **Erken A., Yaşargün A., Şener A.** (2009). Dynamic Behavior of Undisturbed Low Plastic Clays Poluted by Leachate. *Geoteknik Sempozyumu 3-4 Aralık*, Çukurova Üniversitesi, Adana
- **Erken A., Yaşargün A.** (2010). *The Post Cyclic Monotonic Strength of Polluted Undisturbed Soils* August 30-September 03, Ohrid, Republic of Macedonia.
- **Erken A., Yaşargün A.** (2010). The Post Cyclic Axial Strength of Undisturbed Clays By Polluted Leachate. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi 30 Eylül - 1 Ekim 2010*, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- **Erken A., Yaşargün A.** (2015). The Post Cyclic Monotonic Stress of Undisturbed Low Plasticity Clay By Polluted Leachate in Sanitary Landfill Sites. *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering 1-4 November*, Christchurch, New Zealand.
- **Erken A., Yaşargün A.** (2022). The Effect Of Leachate On Liquefaction. *2th National Civil Engineering Symposium*, 14-17 September, North Cyprus.