

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KUMLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ BASİT
KESME DENEYLERİ ile İNCELENMESİ**

Jeofizik Müh. Zeynep Tuğçe YÜKSEL

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ÖNSÖZ	xviii
ÖZET	xix
ABSTRACT	xx
1 GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
2.1 Giriş	2
2.2 Zeminler İçin Dinamik Deneyler.....	6
2.2.1 Tekrarlı Üç Eksenli Deney.....	7
2.2.2 Tekrarlı Burulmalı Kesme Deneyi.....	8
2.2.3 Tekrarlı Basit Kesme Deneyi	8
2.3 Kumların Dinamik Davranışı	11
2.4 Sıvılaşma	12
2.5 Dinamik Laboratuar Deneylerinde Gözlenen Sıvılaşma Davranışı	22
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
3.1 Giriş	26
3.2 İndeks Özellikleri	26
3.3 Sıkışma Özellikleri	27
3.4 Geçirimsizlik Özellikleri	28
3.5 Statik Kesme Deneyleri	28
3.6 Çevrimsel Basit Kesme Deneyleri.....	32
3.7 Suya Doygun Kumların Dinamik Davranışına Frekansın Etkisi	45
4 SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	533

EKLER:.....	544
Ek 1 Direkt Kesme Deney Sonuçları.....	55
Ek 2 Kuru Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları.....	57
Ek 3 Suyu Doygun Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	137

SİMGE LİSTESİ

D_{10}	Efektif dane çapı
D_{50}	Ortalama dane çapı
D_r	Rölatif sıklık
$d\varepsilon$	Düşey şekil değiştirme
dU	Boşluk suyu basıncı değişimi
dV	Hacim değişimi
V	Toplam hacim
e	Boşluk oranı
$e_{maks.}$	Maksimum boşluk oranı
$e_{min.}$	Minimum boşluk oranı
G_s	Özgül ağırlık
I_p	Plastisite indeksi
f	frekans
K_0	Granüler zeminlerde sukunetteki itki katsayısı
G	Kayma modülü
G_0	Başlangıç kayma modülü
N	Yükleme çevrim sayısı
r_u	Artık boşluk suyu basıncı oranı
ε_v	Hacimsel şekil değiştirme
γ_d	Doygun birim hacim ağırlık
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı
γ	Kayma şekil değiştirmesi
γ_c	Çevrimsel kesme deformasyonu
γ_{tl}	Lineer çevrimli eşik kesme deformasyonu
γ_{tv}	Hacimsel çevrimli eşik kesme deformasyonu
ξ	Sönüm oranı
σ	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
ϕ	İçsel sürtünme açısı
w_n	Doğal su muhtevası
σ_c'	Efektif hücre gerilmesi
σ_{v0}'	Düşey jeolojik efektif gerilme

σ_1'	Efektif büyük asal gerilme
σ_3'	Efektif küçük asal gerilme
U	Boşluk suyu basıncı

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
CSR	Çevrimsel Kayma Gerilmesi Oranı
DG	Düşey Gerilme
NGI	Norveg Geotechnical Institue
SGI	Slicon Graphics
SSR	Kayma Gerilmesi Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Zeminlerde dinamik yükler altında kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi (Özçep, 2006).....	3
Şekil 2.2 Plastisite indeksi çevrimsel kayma deformasyonu genliği ilişkisi (Vucetic, 1994).....	5
Şekil 2.3 Basit kesme yükleme koşulları (Sivathayalan, 1995).....	8
Şekil 2.4 NGI tekrarlı basit kesme düzeneği (Airey ve Wood, 1987).....	9
Şekil2.5 Arazi koşulları altında tekrarlı yükler altındaki zemin durumu (a) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumu (b) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumunu gösteren Mohr daireleri (Tohumcu, 2007).....	10
Şekil 2.6 Çevrimsel yükleme sırasında daneciklerin toplu halde gösterdikleri değişimin idealize edilmiş bir en kesit örneği (Kammerer, 2002).....	14
Şekil 2.7 Orta sıkılıktaki Nevada kumu üzerinde tek yönlü basit kesme deneyinin sonuçları eğrilerde (sol tarafta) gerilme izleri ve (sağ tarafta) kesme deformasyonu-normalize kesme gerilmesi ilişkisi. Son çevrim dört kısma ayrılmıştır, her biri koyu renkle gösterilmektedir. (Kammerer, 2002).....	16
Şekil2.8 Toyoura kum numunelerinin başlangıç ve bitiş koşullarını gösteren kritik durum teorik çalışma örneği (Kammerer, 2002).....	19
Şekil 2.9 Tek yönlü basit kesme deneyi $D_r=54\%$, $\sigma'_v=95\text{kPa}$, $CSR=0.2$ (Kammerer, 2002).....	21
Şekil 2.10 Tek yönlü basit kesme deneyi $D_r=77\%$, $\sigma'_v=77\text{kPa}$, $CSR=0.36$ (Kammerer, 2002).....	22
Şekil 2.11 Kayma modülü azalım eğrilerine çevrim sayısının etkisi (Altun ve Ansal, 2003).....	24
Şekil 2.12 Bir, üç ve beşinci çevrime ait kayma modülü ve sönüm oranı değerleri (Altun ve Ansal, 2003).....	24
Şekil 2.13 Farklı rölatif sıkılık değerlerindeki kayma modülü azalım eğrileri (Altun ve Ansal, 2003).....	24
Şekil 3.1 Deneyde kullanılan kum zeminin granülometri eğrisi (Tohumcu, 2007).....	26
Şekil 3.2 Deneyisel çalışmada kullanılan kum zemine ait sıkışma eğrileri (Tohumcu, 2007).....	27
Şekil 3.3 Sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen hidrolik iletkenlik-boşluk oranı değişimleri (Tohumcu, 2007).....	28
Şekil 3.4 Direkt kesme kutusu deney aleti.....	28

Şekil 3.5 Deney düzeneğine ait parçalardan kesme kutusu (a), konsolidasyonu sağlayan moment kolu (b) ve ağırlıklar (c) ile verilerin toplandığı bilgisayar sistemi (d).....	29
Şekil 3.6 Çevrimsel basit kesme deney aleti (Sheartrac-II-DSS).....	30
Şekil 3.7 Kum yağmurlama sistemi.....	30
Şekil 3.8 Direkt kesme kutusu deneylerinden elde edilen kırılma zarfı.....	31
Şekil 3.9 Çevrimsel basit kesme deneylerinden elde edilen kırılma zarfı.....	31
Şekil 3.10 Çevrimsel basit kesme deney aletinin kesme kutusu (a) ve numunenin yerleştirildiği membrana (b) ait görüntüler.....	32
Şekil 3.11 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için: çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi- düşey şekil değiştirme eğrileri.....	35
Şekil 3.12 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	36
Şekil 3.13 Uygulanan 25kPa düşey gerilme altında kuru kum numunelerin farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri.....	37
Şekil 3.14 Uygulanan 50kPa düşey gerilme altında kuru kum numunelerin farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri.....	38
Şekil 3.15 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında kuru kum numunelerin farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri.....	39
Şekil 3.16 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	40
Şekil 3.17 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	41
Şekil 3.18 Uygulanan 25kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri.....	43
Şekil 3.19 Uygulanan 50kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri.....	44
Şekil 3.20 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri.....	45
Şekil 3.21 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR} = 0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	47

Şekil 3.22 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $CSR=0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	48
Şekil 3.23 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ kayma şekil değiştirme değeri için farklı frekans değerlerinde çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	49
Şekil 3.24 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ için çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisinde frekansın etkisi.....	50
Şekil 3.25 100kPa düşey gerilme altında $D_r = \%50$ sıklıktaki suya doymun numunenin kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinde frekansın etkisi.....	51
Şekil Ek 1.1 Farklı rölatif sıklıklarda ($\%30$, $\%50$, $\%90$) hazırlanan numunelerde uygulanan düşey efektif gerilmenin (a) 25kPa (b) 50kPa (c) 100kPa için, direkt kesme deneyinden elde edilen kayma şekil değiştirmesi-kayma gerilmesi ilişkisi.....	55
Şekil Ek 1.2 Farklı rölatif sıklıklarda ($\%30$, $\%50$, $\%90$) hazırlanan numunelerde uygulanan düşey efektif gerilmenin (a) 25kPa (b) 50kPa (c) 100kPa için, direkt kesme deneyinden elde edilen kayma şekil değiştirmesi-hacim değişimi ilişkisi.....	56
Şekil Ek 2.1 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	57
Şekil Ek 2.2 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	58
Şekil Ek 2.3 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	59
Şekil Ek 2.4 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	60
Ek 2.5 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	61
Şekil Ek 2.6 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	62
Şekil Ek 2.7 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	63

[illegible]

Şekil Ek 2.34 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	90
Şekil Ek 2.35 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	91
Şekil Ek 2.36 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri.....	92
Şekil Ek 2.37 25kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	93
Şekil Ek 2.38 50kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	93
Şekil Ek 2.39 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	93
Şekil Ek 3.1 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	94
Şekil Ek 3.2 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	95
Şekil Ek 3.3 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	96
Şekil Ek 3.4 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	97
Şekil Ek 3.5 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	98
Şekil Ek 3.6 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	99

Şekil Ek 3.7 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	100
Şekil Ek 3.8 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	101
Şekil Ek 3.9 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	102
Şekil Ek 3.10 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	103
Şekil Ek 3.11 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	104
Şekil Ek 3.12 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	105
Şekil Ek 3.13 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	106
Şekil Ek 3.14 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	107
Şekil Ek 3.15 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	108
Şekil Ek 3.16 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	109

Şekil Ek 3.17 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	110
Şekil Ek 3.18 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	111
Şekil Ek 3.19 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	112
Şekil Ek 3.20 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	113
Şekil Ek 3.21 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	114
Şekil Ek 3.22 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	115
Şekil Ek 3.23 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	116
Şekil Ek 3.24 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	117
Şekil Ek 3.25 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	118
Şekil Ek 3.26 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	119

Şekil Ek 3.27 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	120
Şekil Ek 3.28 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	121
Şekil Ek 3.29 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	122
Şekil Ek 3.30 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	123
Şekil Ek 3.31 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	124
Şekil Ek 3.32 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	125
Şekil Ek 3.33 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	126
Şekil Ek 3.34 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	127
Şekil Ek 3.35 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	128
Şekil Ek 3.36 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri.....	129

Şekil Ek 3.37 Uygulanan 25kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	130
Şekil Ek 3.38 Uygulanan 50kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	130
Şekil Ek 3.39 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm\%2.5$ ve $\gamma = \pm\%7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi.....	130
Şekil Ek 3.40 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR}=0.1$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	131
Şekil Ek 3.41 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR}=0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	132
Şekil Ek 3.42 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR}=0.5$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	133
Şekil Ek 3.43 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR}=0.1$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	134
Şekil Ek 3.44 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR}=0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	135
Şekil Ek 3.45 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR}=0.5$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi.....	136

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Şekil Değiştirme Seviyesine Bağlı Zemin Davranışı Modellemesi (Ishihara, 1996).....	3
Çizelge 2.2 Zemin Dinamiği Analizi için Yeni Kategorizasyon (Vucetic, 1994).....	6
Çizelge 2.3 Deneyde Kullanılan Toyoura Kumunun Özellikleri (Altun ve Ansal, 2003).....	23
Çizelge 3.2 Deneyisel Çalışmada Kullanılan Kumun Özellikleri (Tohumcu, 2007).....	27
Çizelge 3.3 Direkt ve Basit Kesme Deneylerinden Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılarının Karşılaştırılması.....	31
Çizelge 3.4 Dinamik Basit Kesme Deney Programı.....	34

ÖNSÖZ

Dünya var olduğu andan evrimini tamamlayana kadar, devamlı bir değişim süreci yaşamış ve yaşayacaktır. Bu süreç içerisinde sahip olduğu enerjinin dışı vurumu tabiat olayları olarak adlandırılmıştır. Doğada meydana gelen bu olaylar bazen felaket boyutlarına ulaşmış, birçok canlının zarar görmesine hatta yok olmasına sebep olmuştur. İnsan neslinin de bu olgulardan direkt olarak etkilenmesi ve uyum sağlama çabası, onları merak edip sorgulamaya, gözlemlemeye, araştırmaya ve gerektiğinde çözüm bulmaya yönlendirmiştir.

Türkiye'nin bir deprem ülkesi olması ve bu gerçekle en acı yüzleşmesi yakın tarihimizde 17 Ağustos 1999'da meydana gelmiştir. Deprem, yirmi binden fazla insanın yaşamını yitirmesine, bununla birlikte ciddi maddi hasarlara yol açmıştır. Böylesi bir kayıp, bilim adamlarının, dinamik etkiye maruz kalan zeminin tepkisini ve yapılarda oluşan zararı inceleme konusunda daha fazla yoğunlaşmalarına sebep olmuştur. Bu konulardan biri de deprem yükleri altındaki suya doymun kumlu zeminlerde oluşan sıvılaşma olayıdır. Bu tez çalışmasında, kumlu zeminlerin statik ve dinamik yüklemeler altındaki davranışı laboratuvar deneyleri ile araştırılarak zemin parametrelerinin elde edilişi amaçlanmıştır. Bu amaçla, statik ve dinamik deney düzenekleri kullanılarak farklı sıklıklarda kum numuneler hazırlanmış, statik deneyler kuru, dinamik deneyler ise kuru ve suya doymun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca sıvılaşma üzerinde frekansın etkisini araştırmak için, yapılan dinamik deneylerin bir bölümü farklı frekans değerlerinde tekrarlanmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında desteğini, ilgisini esirgemeyen ve danışmanım olma nezaketini gösterip bana güvendiği için, kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Berilgen'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Mühendisliğinde Yüksek Lisans yapma ve değerli bilgilerinden yararlanma olanağını bana tanıdıkları için, hocam olmalarından gurur duyduğum Sayın Prof. Dr. Kutay Özyayın, Sayın Prof. Dr. Sönmez Yıldırım ve Sayın Prof. Dr. Mustafa Yıldırım'a teşekkürü bir borç bilirim. Bilgilerini ve tecrübelerini aktardıkları ve anlayışı hiç eksik etmedikleri için çok sevgili hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Saadet Arzu Berilgen'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Şükrü Özçoban'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Havvanur Kılıç'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Pelin Tohumcu'ya, Sayın Öğr. Gör. Dr. Cem Akgüner'e; yüksek lisansa başladığım ilk günlerden bu yana destek elini uzatan ve yardım isteklerimi geri çevirmeyen değerli hocam Sayın Arş. Gör. Dr. Murat Tonaroğlu'na, deneysel çalışmalarında deney aletinin kullanımı ile ilgili bilgilerini benimle paylaşan ve manevi desteğini esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Murat Ergenekon Selçuk'a ve Sayın Arş. Gör. Çiğdem Özçelik'e çok teşekkür ederim.

Hayatta bana zorluklar karşısında dimdik durma gücünü veren, yaşamak için en güzel nedenim olan canım annem, babam ve bir tanecik kardeşime bütün kalbimle sevgilerimi ve teşekkürlerimi, hep yanımda olacaklarını bildiğim dostlarım Seda Cora ve Esra Kalkan'a moral desteklerinden dolayı minnettarlığımı sunarım. Hepinize, hayatıma girdiğiniz için teşekkür ederim.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, kumların dinamik davranışının basit kesme deneyleri ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için farklı rölatif sıklıkta kuru ve suya doygun kum örnekleri ile dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır.

Kumların deprem gibi dinamik yükler altında davranışı sıvılaşma olayı nedeniyle inşaat mühendisliği açısından büyük öneme sahiptir. Sıvılaşma, dinamik yükler altında yeraltı suyunun yüksek olduğu gevşek kumlu zemin tabakalarında boşluklardaki suyun drene olmaması nedeniyle artan boşluk suyu basıncı sonucunda meydana gelen, zeminin üzerinde ve/veya içerisinde yer alan yapıların ciddi hasar görmesine yol açan bir doğa olayıdır. Sıvılaşmanın etkisine gösterilebilecek önemli örneklerden bir kaçı 17 Ağustos 1999'da ülkemizde meydana gelen Kocaeli Deprem'inde Adapazarı ve çevresinde yaşanmıştır. Bu durum ülkemizde sıvılaşma konusunun bilimsel araştırmalar ile incelenmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, farklı sıklıklarda hazırlanmış bir kum zeminin dinamik yükleme durumu için, kuru ve su altında davranışının dinamik basit kesme deneyleri ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ele alınan bir kum numunesinin malzeme özellikleri belirlenmiş ve farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış örnekler üzerinde statik ve dinamik kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Statik deneyler direkt ve basit kesme deney aletlerinde yapılmış ve kayma mukavemeti parametreleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada her iki deneyden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin değerleri yuvalatıldığında eşit olduğunu göstermiştir. Yapılan deneyler neticesinde farklı zemin özelliklerine karşın dinamik zemin parametreleri (kayma modülü, sönüm oranı, dinamik kayma mukavemeti açısı, sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı vb.) belirlenmiştir. Ayrıca bu kapsamda suya doygun durumda frekansın dinamik parametrelere ve boşluk suyu basıncına etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre frekansın etkisinin az olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kumların dinamik davranışı, çevrimsel basit kesme deneyleri, sıvılaşma, frekans

ABSTRACT

In this study the dynamic behaviour of sandy soils is investigated through dynamic simple shear tests performed on dry and water-saturated samples prepared at different relative densities.

The behaviour of sands under dynamic loading, like an earthquake, is very important in Civil Engineering because of the liquefaction phenomenon. Liquefaction is one of the harmful natural events that severely impacts the stability of structures because of increased pore water pressures within saturated or nearly saturated sandy loose layers which cannot be drained during dynamic loading. The damage in Adapazarı and its surrounding as a result of August 17th, 1999 Kocaeli Earthquake can be given as an example of the destructive effects of liquefaction. This situation is an indication of the necessity of scientific research on soil liquefaction in Turkey.

In this study, the behaviour of sandy samples prepared at different densities was examined for dynamic loading under dry and saturated conditions using dynamic simple shear tests. The material properties of the sand used in testing was determined and static and dynamic shear tests were conducted on samples prepared at varying densities. Static tests were conducted on direct shear and simple shear testing devices and the shear strength parameters were compared. Based on the comparison, the shear strength parameters were found to be equal when values are rounded. As a result of these experiments, dynamic parameters of sandy soils such as shear modulus, damping ratio, dynamic internal friction angle and number of cycles of liquefaction were determined for differing soil properties. Furthermore, the effect of the frequency on the dynamic parameters and pore-water pressure is researched on saturated samples. Based on dynamic simple shear tests, the frequency is found to have a minor impact.

Key Words : Dynamic behaviour of sand, cyclic simple shear tests, liquefaction, frequency

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Zemin araştırmalarında merak edilen sorulara yanıt bulabilmek adına yerinde deneylerin yanı sıra, zeminin doğal ortamına göre küçük bir parçası laboratuarlardaki deney aletleri ile incelenmektedir. Geoteknik mühendisliğinde üzerinde durulan sorunlardan biri de sıvılaşma olgusudur ve son yıllarda bu konuda yapılan araştırmalardan bazıları laboratuvar ortamında yapılan dinamik deneylerden meydana gelmektedir. Bunlar dinamik üç eksenli ve burulmalı, dinamik basit kesme, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri şeklindedir, hemen hemen hepsinde ilgilenilen mevzu genellikle suya doygun gevşek kumlarda oluşan sıvılaşmanın etkilerinin anlaşılması üzerinedir. Yapılacak her yeni çalışma neticelerin karşılaştırılması olanağını tanıyıp, nedenlere ve sonuçlara bir adım daha yaklaşmayı sağlayacaktır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında kumlu zeminlerin statik ve dinamik yükler altında davranışını laboratuvarda direkt kesme ve dinamik basit kesme deneyleri ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için, aynı indeks özelliklerine sahip farklı sıklıklarda hazırlanmış kuru kum numuneler üzerinde direkt kesme, kuru ve su altındaki kum numuneler üzerinde ise dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kum zemine ait statik ve dinamik parametreler tespit edilmiştir. Sıvılaşma olgusu üzerinde durulmuş ve ayrıca frekans etkisinin araştırılabilmesi için, üç farklı frekans değerinde yapılan deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde öncelikle zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı ve bu davranışın incelenmesi için halen dünyada yaygın olarak kullanılan bazı dinamik laboratuvar deney aletleri hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiş ve çalışmada kullanılan basit kesme deney aleti ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Bu bölümde ayrıca kumların sıvılaşma davranışı açıklanmakta ve dinamik laboratuvar deney aletleri ile sıvılaşmanın incelendiği bazı çalışmalardan söz edilmektedir. Tezin üçüncü bölümünde çalışmalarda kullanılan kumun zemin özellikleri, yapılan deneysel çalışmalara dayanarak verildikten sonra üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneyi aleti, deney ayrıntıları ve tez kapsamında planlanan deney programı verilmiştir. Deney programına bağlı olarak kumun tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı ve mukavemet özelliklerini yansıtan deney sonuçları verilmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise deneylerden elde edilen sonuçların yorumları yapılmıştır.

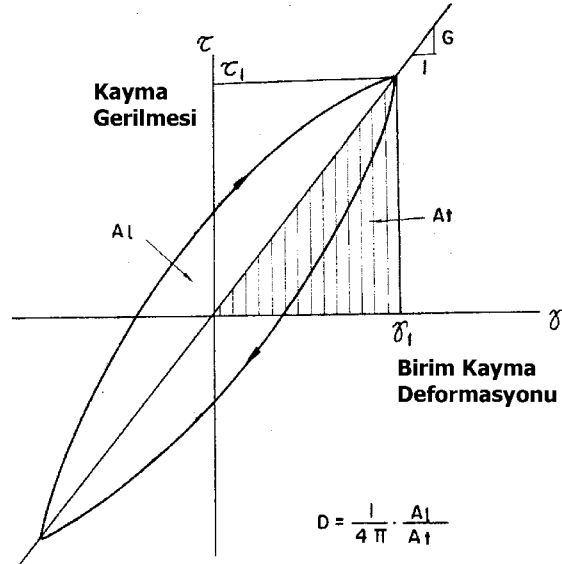
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarını gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri belirler. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile bunların şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması söz konusu iken; mukavemet özelliklerinde göçmeye ya da büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları dikkate alınır. Şekil değiştirmelerin sahip oldukları seviyelerin, zemin davranışı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Çizelge 2.1’de şekil değiştirme seviyelerine bağlı olarak zeminlerin statik ve dinamik yükler altında davranışı gösterilmiştir (Ishihara, 1996). Buradan görüldüğü gibi şekil değiştirmelerin yaklaşık olarak 10^{-5} ’den küçük olduğu durumlarda zemin elastik davranış özelliği göstermektedir. Bu şekil değiştirme seviyesine kadar kayma modülü maksimum değerinde olup, elastik sınırlar içerisinde bu sabit değerini sürdürür. Şekil değiştirme seviyesi yaklaşık olarak 10^{-3} ’den küçük olduğunda, zemin elasto-plastik davranış göstermektedir. Bu şekil değiştirme aralığına orta şekil değiştirme aralığı adı verilir. Bu şekil değiştirme seviyesinden itibaren kayma modülü azalmaya, şekil değiştirmeler artmaya başlar, enerji kayıpları oluşur ve zeminin bu özelliğini temsil etmek için sönüm oranı ifadesi kullanılır. Orta deformasyon seviyesindeki zemin davranışını temsil eden en önemli parametreler kayma modülü ve sönüm oranıdır. Birim kayma deformasyonunun 10^{-2} ’den büyük olması durumunda, artık tekrarlı yükler altında zeminde oluşan şekil değiştirmeler kalıcı olmaktadır. Bu seviyeden sonra kayma modülü ve sönüm oranı değişimlerini sürdürürler, bu yüzden zemin davranışı azalan histeresis türü olarak ifade edilir. Bu deformasyon seviyesi için de şekil değiştirmelerin plastik teoriye uygun olduğu söylenebilir (Altun ve Ansal, 2003). Bu durumları özetleyen Çizelge 2.1 aşağıda verilmiştir. Ayrıca zeminlerde dinamik yükler altında kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Şekil Değiştirme Seviyesine Bağlı Zemin Davranışı Modellemesi (Ishihara, 1996)

Kayma şekil değiştirmesi	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Küçük şekil değiştirme	Orta seviyede şekil değiştirme		Büyük şekil değiştirme	Göçme şekil değiştirme	
Elastik						
Elasto - plastik						
Göçme						
Yük tekrarının etkisi						
Yükleme hızının etkisi						
Model	Doğrusal elastik model		Visko - elastik model		Yükleme tarihçesi iz modeli	
Davranış Analizi Metodu	Doğrusal davranış analizi		Eş değer doğrusal model		Adımsal integrasyon modeli	



Şekil 2.1 Zeminlerde dinamik yükler altında kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi (Özçep, 2006)

Zeminlerin dinamik yükler altında ve farklı şekil değiştirme seviyelerindeki davranışları aydınlatmak için Vucetic(1994) tarafından gerçekleştirilmiş laboratuvar çalışmalarından elde edilen bulgulara dayanarak iki çeşit çevrimli eşik kayma deformasyonu olduğu belirlenmiş ve bunların yaklaşık değerleri değişik zemin çeşitleri için tanımlanmıştır. Araştırmacı, çevrimli eşik kayma şekil değiştirme değerlerinden birini lineer (γ_{el}), diğerini ise hacimsel (γ_{tv}) olarak nitelendirmiştir. Bu deformasyon sınırları, çevrimsel zemin davranışının farklı kategorileri temel alınarak ifade edilmiştir. γ_{el} 'nin altındaki değerler için zeminin elastik davranış

sergilediği; γ_{tl} ile γ_{tv} arasındaki değerler için zeminin lineer olmayan ancak çoğunlukla elastik davranış gösterdiği buna sebep olarak da zeminin mikro yapısındaki değişimlerin göz ardı edilebilecek kadar küçük ya da hiç olmadığı; γ_{tv} 'nin üzerindeki değerler için ise zeminin lineer olmayan davranış gösterdiği belirtilmiştir. Burada, zeminin mikro yapısındaki kalıcı şekil değiştirmelere neden olan etkilerin, tamamen doymuş zeminlerde artık boşluk suyu basıncı gelişimi; kısmen doymuş veya kuru zeminlerde ise hacimsel şekil değişimlerinin meydana geliş olduğu ileri sürülmüştür. Çalışmada, γ_{tl} ve γ_{tv} 'nin zemin tipine bağlı olduğu öne sürülmüş ve bu değerlerin plastisite indeksi (I_p) ile korelasyonu amaçlanmıştır, böylelikle verilen bir zemin tipi ve önceden tahmin edilen bir çevrimli kayma deformasyonu seviyesi için zeminin dinamik analizinin yapılabilmesinin mümkün olacağı belirtilmiştir (Vucetic,1994).

Farklı araştırmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Vucetic, 1994);

a) Her zemin için bir çevrimsel kayma deformasyonu değeri olduğu ve bu değerde,

Kalıcı mikro yapısal değişimlerin gözlenmediği,

Zemin tamamen doymuş ve drenajsız konumda çevrimsel kesme söz konusu iken rezidüel(kalıcı) çevrimsel boşluk suyu basıncının oluşmadığı,

Drenajın izin verildiği durumda ise tamamen doymuş, kısmen doymuş veya kuru bir zeminde kalıcı hacimsel değişimlerin önemsiz seviyelerde olduğu belirtilmiştir.

b) Çevrimsel kesme boyunca eşik kayma deformasyonunun aşıldığı değerlerde,

Mikro yapıdaki değişimin geri dönülmez olduğu,

Zeminin sertliğinin kalıcı değiştiği,

Tamamen doymuş zeminlerin drenajsız şartlarda yüklenildiğinde kalıcı çevrimsel boşluk suyu basınçlarının geliştiği,

Kuru, kısmen doymuş ya da tamamen doymuş zeminlerde drenajın izin verdiği durumda kalıcı hacimsel değişimlerin meydana geldiği ifade edilmiştir.

c) Çevrimsel eşik kayma deformasyonunun, hacimsel eşik kayma deformasyonu γ_{tv} olarak sembolize edildiği, hacimsel değişimle alakası ve rezidüel boşluk suyu basıncı ile ilişkisi olduğu, bu fiziksel mekanizmada drenajsız konumda rezidüel çevrimsel boşluk suyu basıncının, drenaja izin verildiği durumda ise kalıcı hacimsel değişimlerin gözlemlendiğinden bahsedilmiştir.

d) γ_{tv} değerinin, zemin partiküllerinin boyutu azaldıkça ve I_p değeri büyüdükçe arttığı ifade

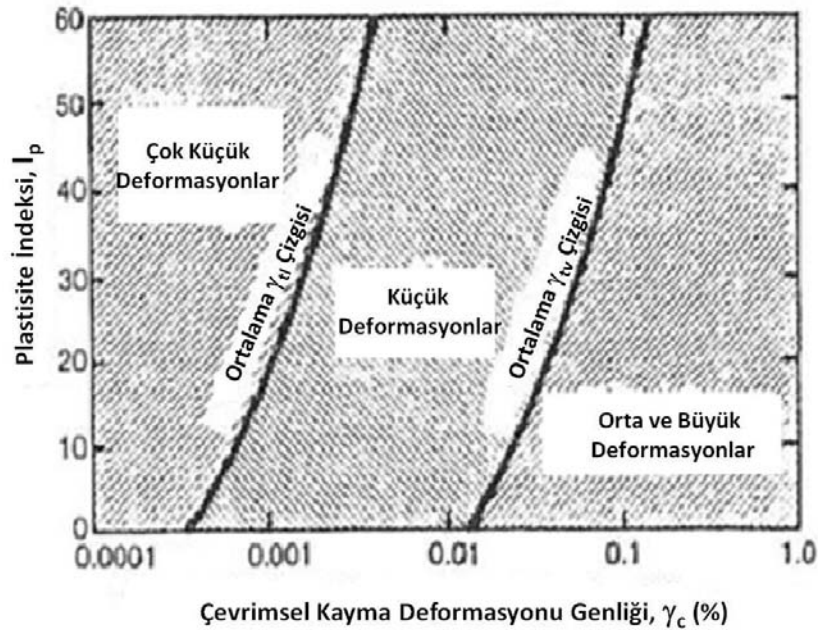
edilmiştir.

e) Kısmen doymun zeminler için, γ_{tv} değerinin tamamen doymun ve kuru zeminlere göre daha büyük olduğu belirtilmiştir.

f) Bir diğer çevrimsel eşik kayma deformasyonu ise, çevrimsel kayma deformasyonu altındaki bir değere tekabül ettiği ve bu değerde zeminlerin tamamen elastik bir materyal gibi davrandığı ileri sürülmüştür. Bu deformasyon değerinin γ_{tv} 'den küçük olduğu ve lineer çevrimsel eşik kayma deformasyonu olarak isimlendirilip γ_{tl} şeklinde sembolize edildiği ve bu değer de I_p ile artışının gözlemlendiği açıklanmıştır.

g) I_p - γ_{tl} - γ_{tv} ilişkisi kurularak yeni bir çevrimsel kayma deformasyonu kategorizasyonunun oluşturulduğu böylece beklenen bir çevrimsel kayma deformasyonu ve I_p 'ye bağlı olarak uygun bir zemin dinamiği analiz tipi seçiminin sağlanabileceği belirtilmiştir.

Aşağıda bu kategorizasyonu temsilen oluşturulmuş olan grafik Şekil 2.2'de ve özeti çizelge 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Plastisite indeksi çevrimsel kayma deformasyonu genliği ilişkisi (Vucetic, 1994)

Çizelge 2.2 Zemin Dinamiği Analizi için Yeni Kategorizasyon (Vucetic, 1994)

γ_c derecesi		Lineerlik	Elastisite ve Plastisite	Drenajsız Çevrimsel Kismeye Maruz Tamamen Doygun Zeminlerde Bozulma	Analiz İçin Uygun Yöntem
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Çok Küçük	$0 < \gamma_c \leq \gamma_{tl}$	Kısmen Lineer	Kısmen Elastik	Temel Olarak Bozulmamış	Lineer Elastik ve uygun sönüm ile G_{Max1} sağlanır.
Küçük	$\gamma_{tl} < \gamma_c \leq \gamma_{tv}$	Nonlineer	Çok Az Elastoplastik	Kısmen Bozulmamış	Uygun G_{sl} ve sönüm oranının sağlandığı eşdeğer lineer veya nonlineerdir.
Ortadan Büyüğe	$\gamma_c \geq \gamma_{tv}$	Nonlineer	Elastoplastik	Bozulmuş	Eğer uygun G_{sN} ve sönüm değeri sağlanıyorsa, eşdeğer lineer analiz ya da nonlineer.

2.2 Zeminler için Dinamik Deneyler

Zeminlerin dinamik davranışını belirlemek ve arazide dinamik yükler etkisi altındaki zeminlere ilişkin analizler ve tasarımlar yapabilmek için, gerekli malzeme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesinde geliştirilmiş deney düzeneği sayısı sınırlıdır. Aşağıda bu deneylerden çok yaygın olarak kullanılanları hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir.

2.2.1 Tekrarlı Üç Eksenli Deney

Tekrarlı üç eksenli deney, dinamik zemin özelliklerinin yüksek deformasyon seviyelerinde laboratuarda ölçüldüğü en yaygın deney şeklidir. Üç eksenli deneyde silindirik bir zemin numunesi ince kauçuk bir membran ile kuşatılmış olarak iki yükleme plakası arasına yerleştirilir. Numuneye çoğu zaman hava basıncı şeklinde uygulanan bir yatay gerilme ile eksenel gerilme uygulanır. Numune üzerindeki asal gerilmeler bu sınır koşullarından dolayı her zaman yatay ve düşey konumdadır. Eksenel ve yatay gerilmeler arasındaki fark deviatör gerilme olarak adlandırılır. Tekrarlı üç eksenli deneyde deviatör gerilme ya gerilme kontrollü şartlar altında ya da deformasyon kontrollü şartlar altında tekrarlı bir şekilde uygulanır, genellikle yatay gerilme sabit olup eksenel yükler de yaklaşık 1Hz frekanslarda tekrarlanmaktadır (Kramer,2003).

Tekrarlı üç eksenli deneylerde Tekrarlı üç eksenli deneylerde, deneyin gerilme izi düşey olarak yayılan S dalgaları ile eşleşse dahi, üç eksenli deneydeki asal gerilmeler S dalgasında olduğu gibi sürekli dönme yerine sadece düşey ve yatay eksenlerle sınırlıdır. Dolayısıyla, tekrarlı üç eksenli deneyler sismik dalga yayılması problemlerindeki gerilme şartlarını modelleyememektedir. Yerel birim deformasyon ölçümleri % 0,0001'den küçük düzeylerde birim deformasyonları hassas bir şekilde verebilse de, tabakalanma hataları ve sistem uyum problemleri genellikle % 0,01'den büyük kayma birim deformasyonlarının ölçümünü sınırlamaktadır (Kramer, 2003).

İri kum ve çakıllardaki tekrarlı üç eksenli deneylerde membran penetrasyon etkileri önemli olabilmektedir. Konsolidasyondan sonra ince üç eksenli deney membranı iri kum ve çakıl örneklerinin boşluklarının kenarlarına nüfuz eder. Tekrarlı yükleme sırasında boşluk suyu basıncı gelişirken, membran üzerindeki net basınç ve dolayısıyla gözenekler içine olan penetrasyonu da azalmış olur. Bu durum meydana geldiğinde, gözeneklerin efektif hacmi artar ve aşırı boşluk suyu basıncı gerçek sabit hacim şartlarının sağlanmış olduğu düzeyin altına düşer. Efektif gerilmelerin sabit hacim şartlarındakine kıyasla daha büyük olmasını sağladıklarından, membran penetrasyon etkileri; rijitlik ve sönümlleme oranı ölçümlerinin yanlış olmasına neden olur ve sıvılaşma direncini olduğundan büyük verir (Kramer, 2003).

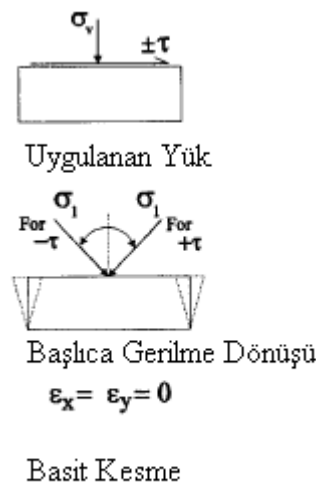
2.2.2 Tekrarlı Burulmalı Kesme Deneyi

Tekrarlı burulmalı kesme deneyleri izotrop veya anizotrop başlangıç gerilme şartlarına izin verir ve asal gerilme eksenleri devamlı surette dönecek şekilde tekrarlı kayma gerilmelerinin yatay düzleme uygulanmasını sağlar. Geniş bir aralıktaki deformasyon düzeylerinde rijitlik ve sönümlenme özelliklerinin ölçülmesinde en çok kullanılan deney türüdür. Kayma birim deformasyonlarının yatay yöndeki üniformaluluğunu arttırmak için bazı araştırmacılar içi boş silindirik burulmalı kesme düzenekleri geliştirmişlerdir. Çok iyi üniformaluk sağlayan ve gerilme ile drenajları da iyi kontrol eden içi boş silindir deneylerinde numune hazırlanması zor olduğundan yaygınca bulunan türden bir ekipman değildir (Kramer, 2003).

2.2.3 Tekrarlı Basit Kesme Deneyi

Bu deney ile deprem gerilme şartlarının çok daha sağlıklı bir şekilde modellenenilmektedir. Sıvılaşma ile ilgili deneylerde en çok kullanılan yöntemdir.

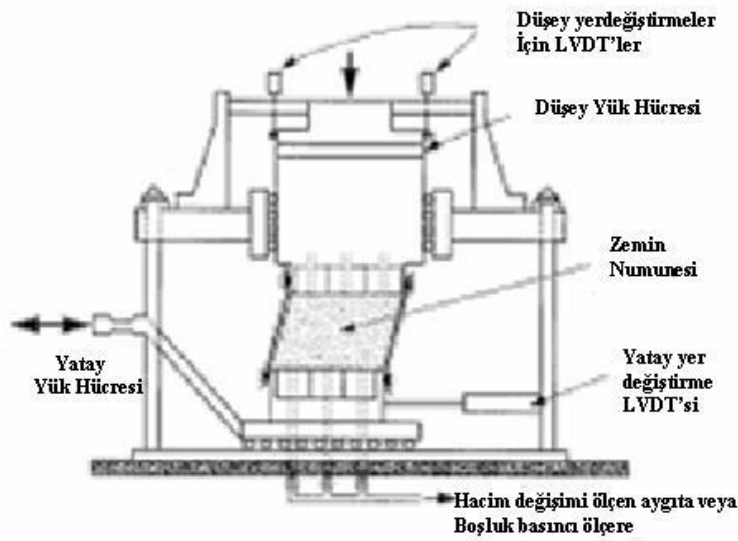
Tekrarlı doğrudan basit kesme deneyinde kısa ve silindirik bir numune, rijit sınır plakları ile (Cambridge türü cihaz), tel takviyeli membran ile (NGI türü cihaz) veya üst üste yığılmış halkalar ile (SGI türü cihaz) sınırlandırılmıştır. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerini numunenin tabanına veya tepesine uygulamak suretiyle deney numunesi, düşey olarak yayılan S dalgalarının maruz kaldığı zemine çok benzer bir şekilde deforme edilir (Kramer, 2003). Buna göre yükleme koşullarının nasıl olduğunu gösteren durum Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Basit kesme yükleme koşulları (Sivathayalan, 1995)

Basit kesme düzeneğinde, kayma gerilmeleri numunenin sadece taban ve üst yüzeylerine uygulanmaktadır. Düşey yüzeylerde tamamlayıcı herhangi bir kayma gerilmesi uygulanmadığından, yatay kayma gerilmeleri tarafından oluşturulan moment üniform olmayan şekilde dağılmış kayma gerilmesi ve normal gerilme ile dengelenmek durumundadır. Gerilmelerin üniform olmayışlarının etkileri numunenin çap/yükseklik oranı arttırılmak suretiyle azaltılabilir. Geleneksel basit kesme düzeneklerinin K_0 şartlarına karşılık gelen başlangıç şartlarından başka başlangıç şartlarını uygulama yeteneği sınırlıdır (Kramer, 2003).

Aşağıda NGI (Norveç Geoteknik Enstitüsü) tipi basit kesme düzeneğine ait şematik görünüm Şekil 2.4’de verilmiştir.



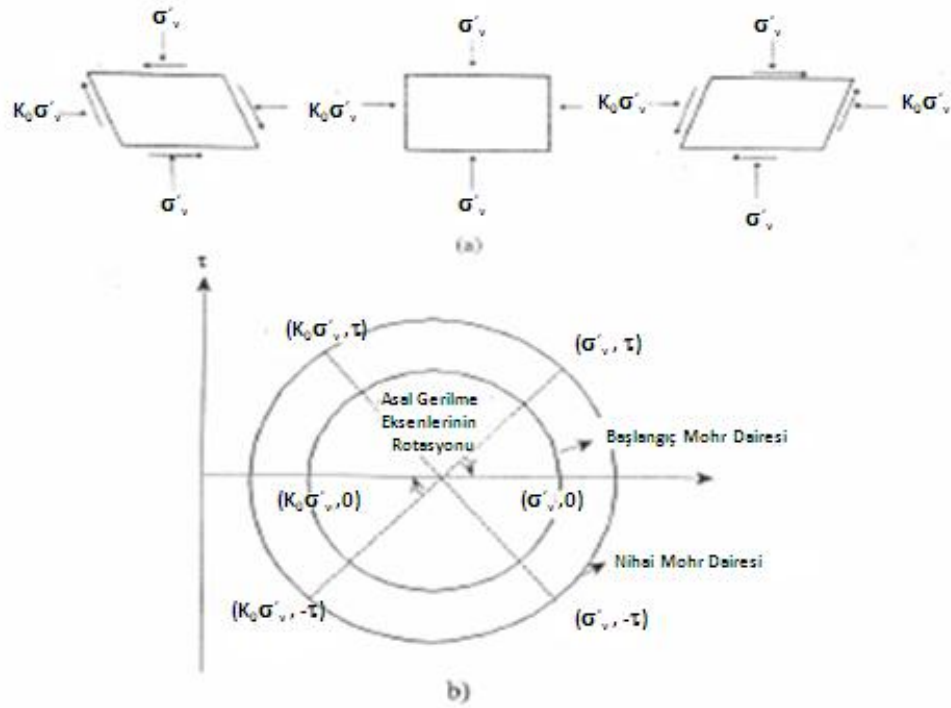
Şekil 2.4 NGI tekrarlı basit kesme düzeneği (Airey ve Wood, 1987)

Basit kesme deneyini özellikle üç eksenli deney ile karşılaştırdığımızda basit kesme deneyinde, kesme esnasında, numunenin düzlem deformasyon altında sabit tutulduğu böylece asal gerilmelerin dönmesine olanak sağladığı belirtilmekte, bu yüzden de birçok avantaja sahiptir. Asal eksenlerin bu tür yükleme koşulları altında nasıl döndüğü Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Bu durum, birçok geoteknik problem için daha gerçekçi bir yükleme durumu sağlamaktadır. Bu geoteknik problemleri, dolgu temelindeki zeminin davranışı; kazık shaftına yakın zemin elemanındaki kesme; taşıt yüklerinden kaynaklanan dinamik yükler; kumların sıvılaşma davranışı vs. şeklinde sayılabileceği ifade edilmektedir. Aslen arazideki gerilme şartları çok daha karmaşıktır ve tek bir deney sistemiyle bu koşulların sağlanması ve modellenmesi zordur ve kimi zaman yetersizdir. Aynı zemin elemanında herhangi bir gerilme durumu için bir deney sistemi uygun iken gerilme durumunun değişmesiyle başka bir sistem

kullanılabilir (Altun, 2002).

Deprem yükü veya okyanus dalgaları gibi doğal tekrarlı yüklemeler düzensiz olup tekrarlı gerilmeler bir çevrimden diğerine değişir. Bu yüzden doğadaki bütün tekrarlı gerilme durumlarını laboratuvarda modellemek mümkün değildir. Laboratuvar deneyleri, başlangıç ve sabit tekrarlı kesme gerilmelerinin farklı kombinasyonları ile yapılır. Dolayısıyla düzensiz tekrarlı gerilmeler altındaki zemin davranışı, sabit tekrarlı kayma gerilmesi uygulayan bu deneylerle belirlenebilir (Altun, 2002).

Bu bilgilerin ışığı altında aşağıdaki bölümlerde suya doygun kum zeminin dinamik koşullardaki davranışı yani sıvılaşma olgusu ifade edilmeye çalışılacak ve bu olgunun laboratuvar deneyleri ile araştırılmasına yönelik yapılmış bazı çalışmalar aktarılacaktır.



Şekil2.5 Arazi koşulları altında tekrarlı yükler altındaki zemin durumu (a) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumu (b) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumunu gösteren Mohr daireleri (Tohumcu, 2007)

2.3 Kumların Dinamik Davranışı

Dinamik yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin davranışının anlaşılması, gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarla sağlanabilmektedir. Bu konuda çok değişik arazi ve laboratuvar yöntemleri mevcut olup bunların her birinin değişik problemler açısından farklı üstünlükleri ve sınırlamaları vardır. Bunların bir kısmı düşük deformasyon seviyelerindeki özellikleri ölçmek için tasarlanmış bir kısmı da büyük deformasyon seviyelerindeki özellikleri ölçmede kullanılmaktadır.

Dalga yayılmasını etkileyen zemin özellikleri ve diğer düşük deformasyon kavramları rijitlik, sönümleme, Poisson oranı ve yoğunluğu kapsar. Bunlar arasında rijitlik ve sönümleme en önemlileridir. Diğerlerinin etkisinin daha az olduğu, değer olarak genellikle dar bir aralığa düşme eğilimindedirler (Kramer, 2003). Yüksek deformasyon seviyelerinde tekrarlı yük sayısı ve hızının kayma dayanımı üzerindeki etkisinin önemli olabileceği ifade edilmekte buna ek olarak yüksek deformasyon seviyelerinde ayrıca hacim değişimi veya boşluk suyu basıncı değişiminin dikkate alınmalıdır (Kramer, 2003). Özellikle kumların dinamik davranışı incelenirken zemin suya doygun ve drenajın gerçekleşemeyeceği şartlar geçerli ise tekrarlı yüklere maruz kalındığında gelişebilecek boşluk suyu basıncı değişimi dikkate alınmalıdır. Zeminlerin dinamik özelliklerini ölçmek üzere geliştirilmiş birçok arazi ve laboratuvar deneyi mevcut olup bu deneyler amacına göre kendi içlerinde düşük deformasyonlu ve yüksek deformasyonlu deneyler olarak ayrılırlar. Aynı mantıkla kum zeminin dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için benzer deneylerden yararlanılabilmektedir. Bu çalışmada kum zeminin dinamik özelliklerini belirlemek üzere yüksek deformasyonlu laboratuvar deneylerinden yararlanıldığından burada yalnızca yüksek deformasyon laboratuvar deneyleri ile ilgili bilgi verilecektir.

2.4 Sıvılaşma

Sıvılaşma terimi, seksen yıldan fazla bir süredir kullanılmasına rağmen, hala tam anlamıyla kabul edilebilir, evrensel bir tanımlamasının yapılamadığı düşünülmektedir. Genel olarak sıvılaşma, boşluk suyu basıncı artışının toplam düşey gerilmeye eşit (veya yaklaşık eşit) olduğu durumda meydana gelen bir olgu olarak ifade edilmektedir ($r_u = \Delta u / \sigma'_{v_0} \approx 1.0$, böylece efektif gerilme sıfırlanır). Efektif gerilmedeki bu önemli azalış, geniş bir deformasyon aralığında oldukça düşük rezidüel dayanım (direnc) ile zeminin deforme olmasına izin vermektedir (Seed, 1979). Çok küçük statik ya da çevrimsel yüklemelerde dahi ek çevrimler neticesinde büyük deformasyonlar gelişebileceği belirtilmektedir (Kammerer, 2002).

Sıvılaşmanın, gevşek granüler malzemeler üzerinde yapılan geçmişteki laboratuvar deneylerinden ve o dönemlerde rastlanılan vakalara dayanarak yapıldığı düşünülmektedir. Efektif çevre gerilmesinin sıfırlanması olarak ifade edilen sıvılaşma tanımının, yalnızca sınırlı sayıdaki durumlar için geçerliliğini koruduğu iddia edilmektedir (yani düz arazi üzerindeki çok gevşek zeminler). Sıvılaşma tanımının mühendislik uygulamalarına bu şekilde geçmiş olmasının nedenleri olarak, öncelikle geleneksel bir anlam içermesi, bunun dışında arazi ve laboratuvar incelemelerinin açıklanmasında genel ve anlaşılabilir olması şeklinde gösterilebileceği ifade edilmektedir (Kammerer, 2002).

Bazı araştırmacıların, “kısmi sıvılaşma”, “çevrimsel hareketlilik” veya “sınırlı deformasyon potansiyeli ile sıvılaşma” gibi kavramları, orta sıkı-sıkı zeminlerde çevrimsel tepki sonucunda gelişen orta derecedeki deformasyonları açıklamak için kullandıkları belirtilmektedir. Sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik arasındaki farkın temelini, yüksek rölatif sıklığa sahip zeminlerin sergilediği davranışın tanımlanmasıyla oluşturulabileceği, bu tür zeminlerin genelde genişleme davranışı gösterdiği ve bunun “kilitlenme” olarak tanımlandığı belirtilmiştir. Bir zeminin tamamen sıvılaşabilir olduğunu ya da çevrimsel hareketlilik sergileyip sergilemeyeceğini, o zeminin rölatif sıklığı ve çevre gerilmesinin kontrol ettiği ifade edilmektedir (Kammerer, 2002).

Ayrıca, diğer araştırmacıların, kohezyonsuz zeminlerde, deformasyonların büyüklüğünden bağımsız olarak, artan boşluk suyu basıncı neticesinde meydana gelen deformasyon yumuşaması durumlarının hepsini açıklayabilmek için bir sıvılaşma tanımı kullandıkları belirtilmektedir. “Kilitlenme” ile birlikte sınırlı deformasyon durumlarını ayırt etmek için, sıklıkla “sınırlı deformasyon potansiyeli ile sıvılaşma” ifadesi kullanılmıştır. Bu

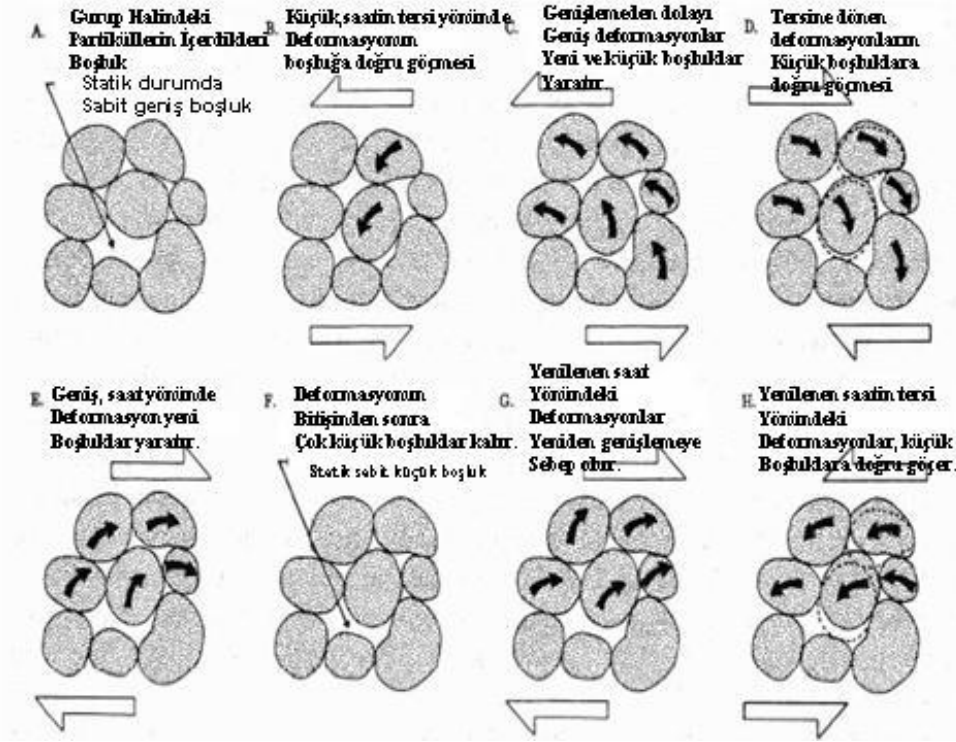
terminolojinin güçlü bir temele sahip olduğu, buna neden olarak da gevşek zeminlerin sürekli farklı davranış sergilediği ileri sürülmüştür. Gerçekte, uygulama alanındaki mühendislerin daha çok sıvılaşma olgusunu, büyük deformasyonlar veya sismik olaylar sırasında yıkıcı etkiler neticesinde meydana gelen çok büyük dayanım kayıpları olarak tanımladığı ve deformasyonların çoğunun faaliyet alanının daha çok ortalarında olduğu ifade edilmektedir (Kammerer, 2002).

Vurgulanması gereken bir diğer önemli nokta olarak da, sınırlı artık boşluk basıncı gelişimi neticesinde oluşan zemin deformasyonlarının, önemli yapılarda yarattığı zararlardan bahsedilmektedir (yani $r_u < 1.0$). Deprem mühendisliğinin ilgi alanının, performans dayalı yöntem gelişimine doğru yön değiştirdiği düşünülmektedir. Sıvılaşabilir zeminlerde yapıya dayalı bir deformasyonun göz önünde bulundurulmasının önemli olduğu ileri sürülmektedir. Geniş bir deformasyon aralığı üzerinde tam olarak ve sağlam zemin tepkisi tahmini yapabilmenin, yeni bir performans değerlendirmede ve sıvılaşma eğilimi olan bölge üzerinde var olan yapılar için, bir anahtar öge olduğu belirtilmektedir (Kammerer, 2002).

Sıvılaşma potansiyeline sahip materyal ile ilişkili olarak zemin tepkisine iki ana bakış açısı olması gerektiği, bunlardan ilkinin boşluk basıncı gelişimine neden olan kesme, diğerinin de artan çevrimli kayma deformasyonu ve biriken kaçınılmaz plastik deformasyon olduğu ifade edilmektedir (Kammerer, 2002).

Sıvılaşmanın tanımıyla ilgili tartışmalar devam etmesine karşın dayanım kaybının nedeninin çok iyi anlaşıldığı düşünülmektedir. Az kohezyonlu doygun zeminlerin, hızlı ve çevrimsel olarak yüklendiğinde sıkılaşma davranışı gösterdiği ve sıvılaşmanın meydana geldiği belirtilmektedir. Doygun olmayan zeminlerde ise bu sıkılaşma, materyalin oturması ile sonuçlanmaktadır. Şekil 2.6'da her bir çevrim sırasında doygun zeminin çevrimsel sıkılaşmasının nasıl meydana geldiği şematik olarak gösterilmiştir. Çevrimsel yükleme meydana gelirken, üzerine yatan materyalin ağırlığının zemin iskeletinden boşluk suyuna aktarıldığı, bunun da boşluk suyu basıncının artmasına neden olduğu belirtilmektedir. Eğer basınç, dağılımından daha hızlı oranda artış gösterirse, artık basıncın biriktiği ve efektif gerilmenin azalımı ile sonuçlandığı ifade edilmiştir. Danecikler arasında etki eden efektif gerilmelerin aşağı yukarı orantılı olduğu belirtilmektedir, buna neden olarak kayma dayanımının çoğu zeminde sürtünme kuvvetlerinden ileri gelmesi gösterilmektedir. Bu yüzden bir zemin sıvılaştığında kayma dayanımı ve sertliğin her ikisinin de çok küçük olabildiği görüşü ifade edilmiştir (özellikle gevşek zeminlerde). Tamamen sıvılaşmaya neden olanlardan çok daha az artık boşluk basıncı değerinde de yumuşamanın gerçekleşebildiği ileri

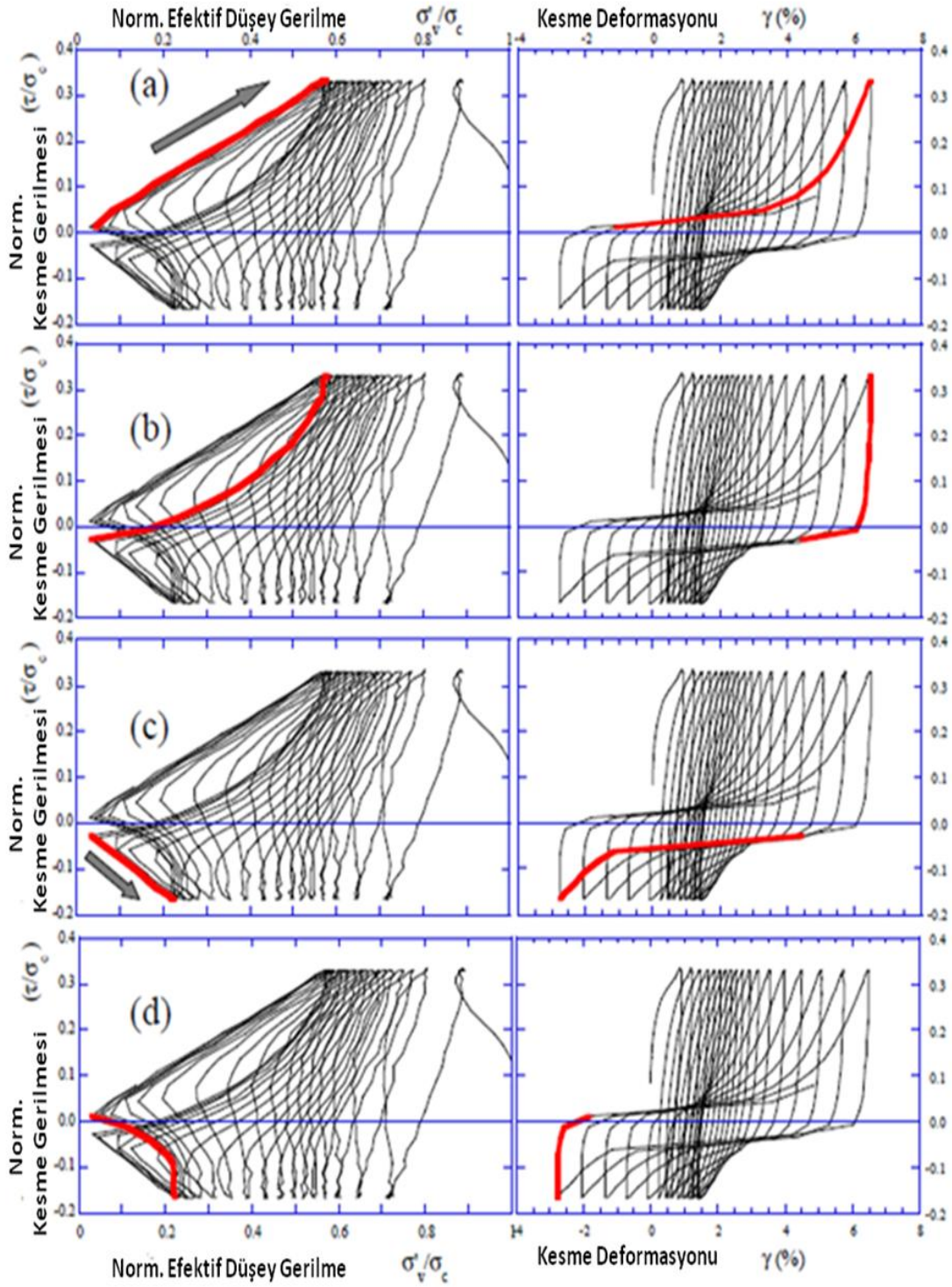
sürülmüştür ($0.65 \leq r_u < 1.0$). Sonuç olarak, rölatif sıkılığın geniş bir aralığında zemin hareketinin tartışmaya açık olduğu iddia edilmektedir (Kammerer, 2002).



Şekil 2.6 Çevrimsel yükleme sırasında daneciklerin toplu halde gösterdikleri değişimin idealize edilmiş bir en kesit örneği (Kammerer, 2002)

Tek yönlü yüklemede boşluk basıncının çok düzenli bir şekli takip ettiği belirtilmiştir ve bu durum Şekil 2.7’de görülmektedir. Bu şeklin, eğimli yer koşulları altında orta sıkılığa sahip kum üzerinde yapılan basit kesme deneylerinden elde edilen verileri gösterdiği ifade edilmiştir. Sol taraftaki eğrilerin deney boyunca normalize edilmiş düşey efektif gerilmelere (σ'_v / σ'_c) karşılık gelen normalize edilmiş kesme gerilmelerini (τ / σ'_c) (bu değer kesme gerilmesi oranı SSR olarak ifade edilmiştir) gösterdiği belirtilmiştir. Kesme gerilmesi ve efektif düşey gerilmenin her ikisinin de düşey efektif gerilme tarafından normalize edildiği, bu değer, numunenin konsolide edilmesini sağlayan σ'_c olduğu ifade edilmiştir. Eğrinin efektif gerilme izine benzediği yönünde açıklama yapılmıştır. r_u , gerilme durumu sola doğru hareket ettiğinde ($r_u = \Delta u / \sigma'_c = 1 - (\sigma'_{vc} / -\sigma'_c)$ iken) boşluk basıncının arttığı, sebebinin de normalize edilmiş efektif düşey gerilmenin direkt olarak normalize edilmiş boşluk basıncı oranı ile ilişkilendirilmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Kesme gerilmesi uygulanıp sıfırlandıktan sonra boşluk basıncının maksimum değerine ulaştığının görülebildiği, bu noktadan sonra boşluk basıncının artan kesme gerilmesi ile birlikte azaldığı açıklanmıştır.

Artık boşluk basıncı maksimum değerine ulaştığında, zemin danelerinin mümkün ölçüde açıldığı, danelerin birbirleri arasında göreceli olarak kolaylıkla hareket edebildiği ve genellikle materyalin daha ileride sıkışma davranışı sergileyeceği ileri sürülmüştür. Maksimum boşluk basıncı artışının, sabit duruma erişilene dek artış göstereceği belirtilmiştir. Oldukça gevşek materyaller için, artık boşluk basıncının tamamen, yani başlangıç düşey gerilmenin %100'ne erişebildiği durumda ($r_u \approx 1.0$), sıvılaşmanın gerçekleşeceği belirtilmiştir. Fakat zemin sıkı ise ya da tam anlamıyla ayrılmamışsa maksimum boşluk basıncı oranının, r_u , genellikle birden daha az bir değerde dengelendiği; orta sıkılıktaki zeminler için ise zeminde, r_u 'nun neredeyse bire eşit olabileceği ifade edilmiştir (Kammerer, 2002).



Şekil 2.7 Orta sıkılıktaki Nevada kumu üzerinde tek yönlü basit kesme deneyinin sonuçları eğrilerde (sol tarafta) gerilme izleri ve (sağ tarafta) kesme deformasyon-normalize kesme gerilmesi ilişkisi. Son çevrim dört kısma ayrılmıştır, her biri koyu kırmızı renkle gösterilmektedir (Kammerer, 2002)

Sıvılaştırılabilir materyallerde, deformasyon potansiyellerinin belirlenmesinin, araştırmacılar tarafından uzun zamandır incelenilen bir konu olduğu, deformasyonun iki şeklinin mutlaka değerlendirilmesi gerektiği görüşü ifade edilmektedir. Bunlardan ilki gevşek materyallerdeki sıvılaşmanın, yer çekimi nedeni ile yanal olarak akışlarla sonuçlanabileceği ve birçoğunun arazide belgelendiği belirtilmiştir. Aksine, daha sıkı materyallerin ise birbirini takip eden çevrimli yüklemeler dolayısıyla deformasyon birikimi davranışı sergilediği, ancak hiçbir zaman aşırı deformasyon olmadığı ileri sürülmektedir. Deformasyonun ikinci bir tipi olarak, materyalin genişleme ve sıkışmaya doğru gösterdiği eğilim için bir limit faktör olduğu belirtilmiştir. Genişleme özelliğine sahip olan zeminlerin, genişleyen malzemeler olarak adlandırılması gerektiği ve bunlara sıkışabilen zeminler denilemeyeceği ifade edilmiştir. Bu tür davranışa bir örnek Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şeklin sağındaki eğriler için, genişleyen malzeme üzerinde uygulanan tek yönlü basit kesme deneyinin tipik gerilme-deformasyon davranışını sergilediği yönünde açıklama yapılmıştır. Kesme gerilmesinin başlangıç düşey efektif gerilme ile normalize edildiği belirtilmiştir (yani SSR). Numunede çok yüksek boşluk basıncı elde edilmesine rağmen (düşey yükün yaklaşık %97’si) kesme gerilmesinin aşağı yukarı en küçük değerine ulaşıldığında, gerilmedeki bir sonraki artışın materyalin genişlemesinden kaynaklandığı, bir sonraki aşamada ise materyalin kilitlenmesi ya da sertleşmesi ile sonuçlandığı ifade edilmiştir (Şekil2.7(a) ve Şekil 2.7(c)). Nitekim büzülebilen zeminlerin, gevşeme; genişleyen zeminlerin de sıkışma davranışı gösterebileceği belirtilmektedir (Kammerer, 2002).

Genişlemenin, drenajlı kesme koşulunda hacimdeki artış olarak belirlendiği, ilk olarak Reynold (1885) tarafından yapılan monotonik deneylerle gerçekleştirildiği, Casagrande’nin (1936,1938) ise genişlemeyi, hacimde ilave bir değişim olmaksızın zeminde meydana gelen deformasyon için bir kritik boşluk oranını ifade ettiği belirtilmiştir. Casagrande’nin ayrıca bu kritik boşluk oranının hücre basıncına dayalı olduğunu belirttiği ifade edilmiştir. Taylor’ın da (1948) kumun dayanımı üzerinde hacim değişiminin büyük öneme sahip olduğunu laboratuvar deneyleri ile kanıtladığından söz edilmektedir (Kammerer, 2002).

Genişlemenin nedeninin en kolay, tek yönlü çevrimsel yüklemeye maruz kalan kohezyonsuz materyallerin incelenmesiyle açıklanabileceği ileri sürülmektedir. Deneyde, materyal kesilerek, uygulanan kesme kuvveti içsel kuvvetlere karşı koyacak seviyeye ulaştığında danelerin birbirleri arasında göreceli harekete zorlandığı ifade edilmektedir. İçsel kuvvetler ve daneler arasındaki sürtünme kuvvetlerinin, genişleme ve daneleri birbirinden ayırmaya çalışan boşluk suyunun yarattığı çekme gücünün bir kombinasyonu olduğu belirtilmektedir.

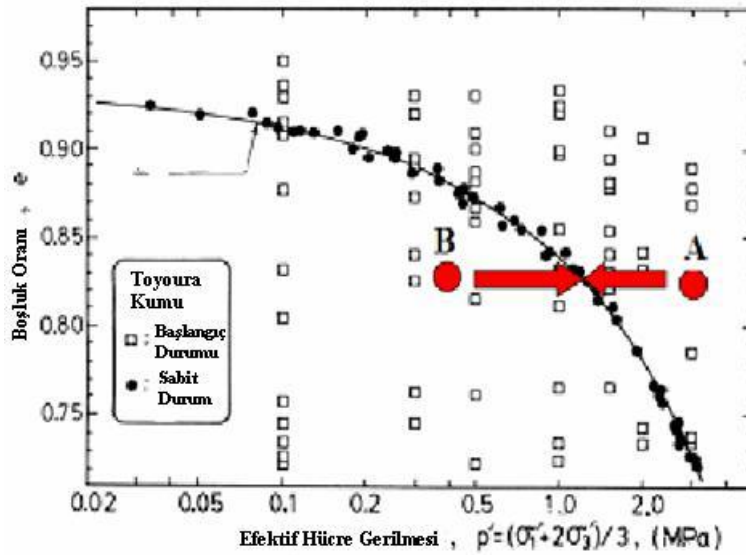
İçsel kuvvetler, uygulanan kesme kuvvetine eşitlendiğinde göreceli dane hareketi durmaktadır. Literatürde bazen bu tür deformasyonlardan, limit deformasyonu olarak söz edildiği, yine de tam bir tanımlamanın araştırmacıya göre değişebileceği ifade edilmiştir (Kammerer, 2002).

Tek yönlü deneylerde, uygulanan kesme kuvvetlerinin ilk olarak verildiği ve daha sonra ters yönde arttığı (Şekil 2.7(b) ve 2.7(d)), danelerin tekrar göreceli hareket edip birbirlerine yaklaşacak şekilde bir toplu düzene girdiği ve kısa süreli yüksek boşluk basıncı oluştuğu belirtilmektedir. Deformasyon ya da yükteki ani değişim nedeniyle oturma eğiliminin, genişlemeden sonra oluşabileceğinin, bazı araştırmacılar tarafından gözlemlendiği belirtilmiştir. Bazen, materyalin kesme altında tekrar genişlediği ve uygulanan kesme kuvvetinin yine içsel kuvvetleri karşılayabilecek kadar olduğu ifade edilmiştir (Kammerer, 2002).

Her bir çevrim sırasında sıklık artarken, artık boşluk basıncının ve kuvvetlerin dengelendiği bir deformasyon seviyesinin her ikisinin de artabileceği ileri sürülmektedir. Daha sıkı materyallerde, çevrimsel sıkışmanın sonunda yavaşlayacağı ve duracağı iddia edilmektedir. Bu durum meydana geldiğinde, bir kararlı hal boşluk basıncı davranışının elde edileceği ifade edilmektedir. Verilen her kesme yükü için aşağıda belirtilen üç sonuçtan birinin meydana gelebileceğinden söz edilmiştir;

- (1) Materyal kararlı hale ulaşmadan önce titreşimin duracağı,
- (2) İçsel direnç kuvvetleri ile uygulanan kesme eşitlenmeksizin, danelerin birinin diğerinin üzerine tam anlamıyla hareketine izin verildiği durumda materyalin yeterince sıkışacağı,
- (3) Tekrar eden her bir çevrim için kısa süreli maksimum boşluk basıncına ulaşıldığında ve uygulanan kesme kuvveti içsel kuvvetlere eşitlendiğinde, materyalin kararlı hal sıklığına ulaşacağı belirtilmektedir.

Bir zeminin daha sıkı hale gelmesi için mevcut rölatif sıklığına ve hücre basıncının her ikisine de bağlı olduğu belirtilmektedir. Bu yüzden gevşek zeminlerin, akmanın mümkün olduğu noktada sıkılaşabileceği (yukarıda sözünü ettiğimiz sonuçlardan ikincisi gibi) ifade edilmektedir. Şekil 2.8'deki A ve B noktalarının belirtildiği iki tür zemin göz önüne alınmıştır. İzlerde de görüldüğü üzere zeminler kararlı hale doğru yönelmişlerdir. Efektif hücre gerilmesindeki değişime bağlı olarak materyalin ya sertleştiği (B noktası) ya da yumuşadığı (A noktası) vurgulanmıştır. Bu teoremin monotonik yükleme yoluyla geliştirildiği buna karşın, çevrimsel yükleme koşullarına bağlı bulguların da benzer şekilde elde edilebildiği belirtilmiştir (Kammerer, 2002).



Şekil 2.8 Toyoura kum numunelerinin başlangıç ve bitiş koşullarını gösteren kritik durum teorik çalışma örneği (Kammerer, 2002)

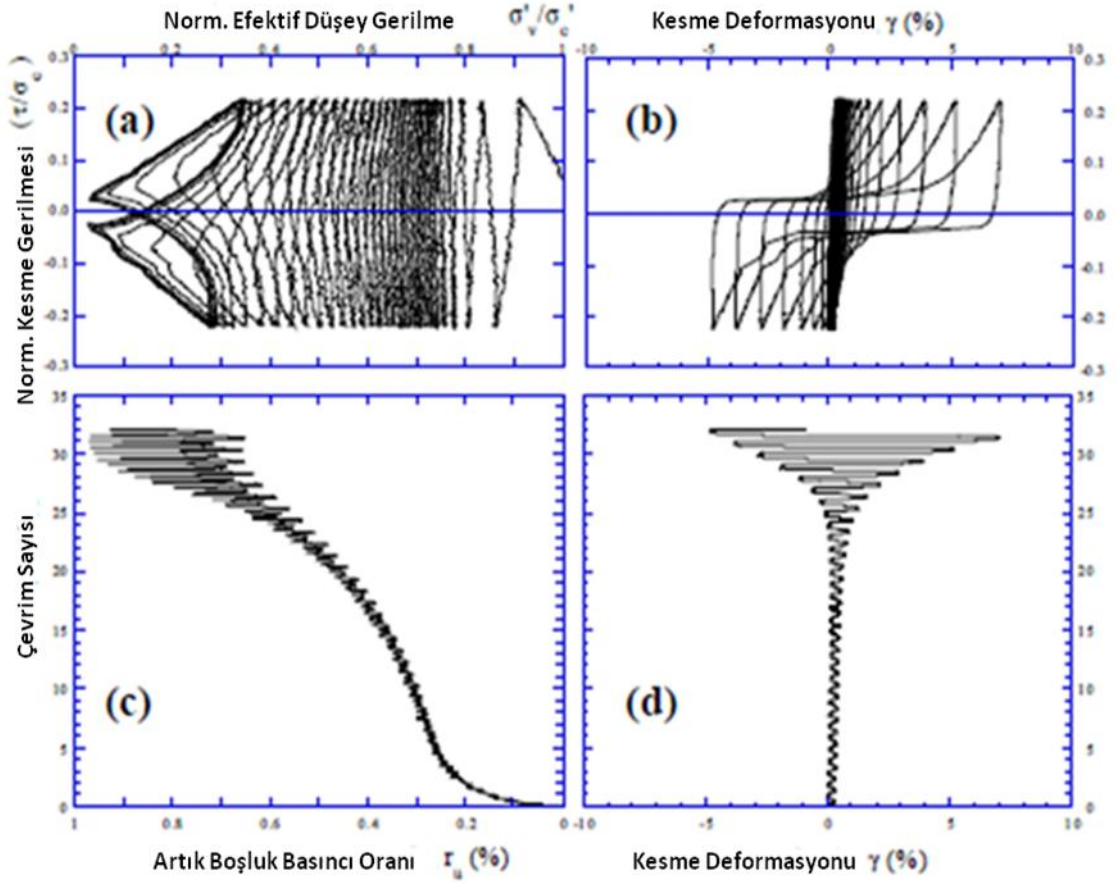
Kritik durum çizgisine ulaşıldığında, anlık artık boşluk basıncının (yani normalize boşluk basıncı) artışının durduğu belirtilmiştir. Önemle vurgulanan bir husus olarak, $r_{u,lim}$ değerine ulaşıldığında dahi her bir çevrimde meydana gelen deformasyonlardaki artışın devam ettiği, özellikle başlangıç statik kesme gerilmesinin var olduğu yerde bu durumun (mesela yamaç ya da bir yapının çevresinde) geçerliliğini koruduğu belirtilmiştir. Örneğin, Şekil 2.7’de her bir çevrimde anlık maksimum boşluk basıncının kararlı hal tutumu sergilediği ki bu durumun deneyin son birkaç çevriminde gerilme izlerindeki örtüşmeden görülebileceği belirtilmiştir. Fakat çevrimler sırasında elde edilen deformasyonlardaki gelişimin devam ettiği, bu artışın gerilme-deformasyon eğrisinde gösterildiği ifade edilmiştir (Kammerer, 2002).

Şekil 2.7’de tek yönlü deney verilerinin gösterilmiş olmasının sebebi olarak önceden tecrübe edilen deneylere göre daha basit olduğu ileri sürülmüştür. Bu şeklin önemli olduğu buna neden olarak da, çevrim sırasında yükleme-boşaltma kısımlarındaki boşluk basıncı davranışının birbirinden ayırt edilebilmesi özelliği olduğu ifade edilmiştir. Her iki yönde de, verilen bir kesme gerilmesi oranı SSR için boşluk basınçlarının yüklenen zeminlerde çok daha büyük olduğundan söz edilmiştir. Maksimum boşluk basıncının, boşaltma sırasında ya da kesme gerilmesinin sıfır olduğu anda elde edilmediğinin, ancak bu noktadan kısa bir süre sonra ters yönde küçük bir yük uygulandığında aynı yönde bir miktar deformasyon meydana geldiği belirtilmektedir (Kammerer, 2002).

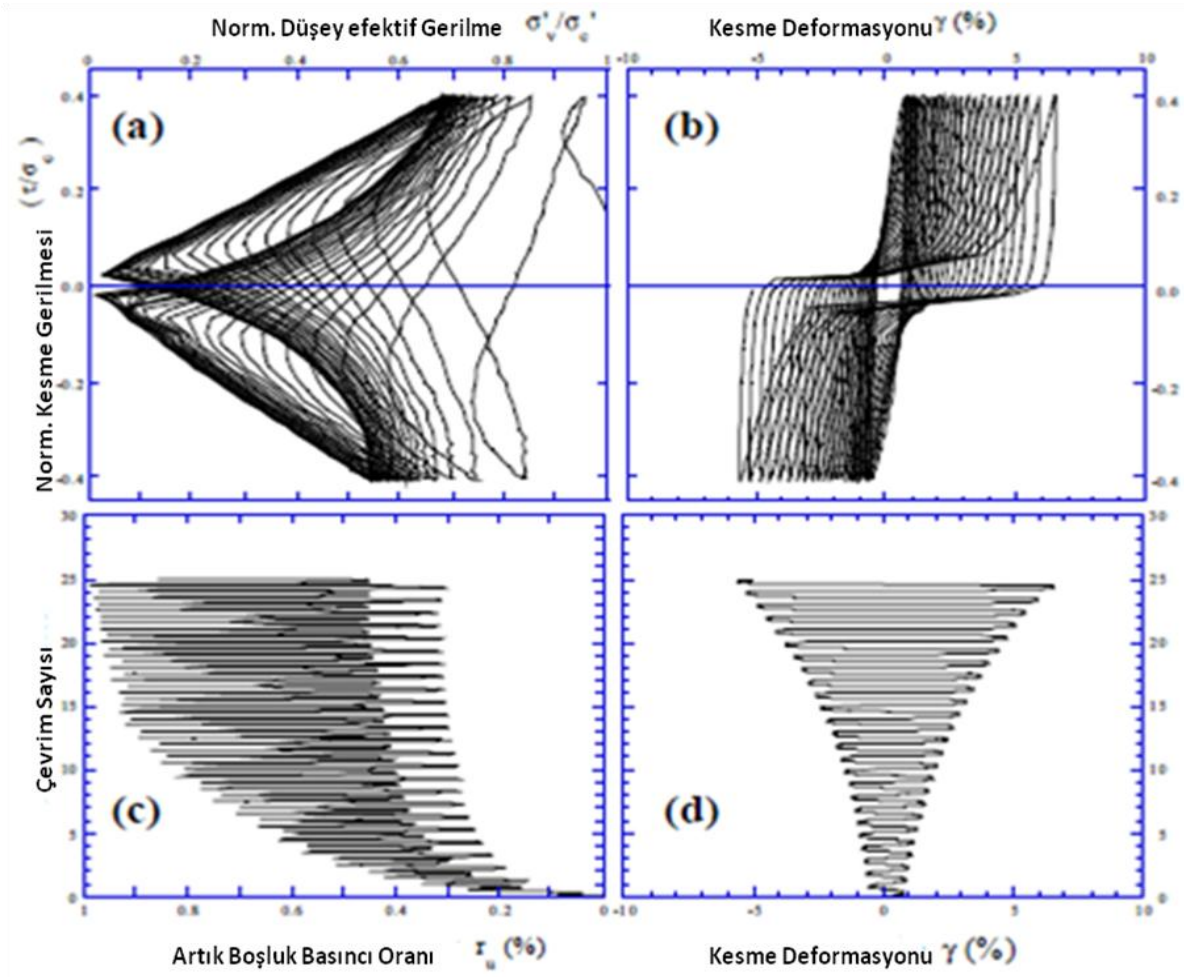
Kalıcı deformasyonun büyük bir bölümünün, gerçekleştirilen her bir çevrimde, kesme gerilmesinin kaldırıldığı ($SSR=0$)/zıt yönde uygulandığı durum ile limit deformasyona varıldığı andaki nokta arasındaki bir yerde kaydedilebildiği belirtilmiştir. Bazı ek deformasyonların numunenin genişlemesi sırasında oluşabileceğinden söz edilmiştir. Bunun dışında çok küçük deformasyonların, maksimum kesme gerilmesinin uygulandığı ve kesme gerilmesinin tamamen ortadan kalktığı andaki (yani boşaltma fazında) durumlar arasındaki bir noktada elde edilebildiği ifade edilmiştir. Bu fikre göre, sadece gerilmenin boşaldığı durum için değil, uygulanan kesme gerilmesi ile danelerin bir araya gelerek kilitlemenin söz konusu olabileceği ancak bazı zorlayıcı hareketlerde danelerin birbirlerinden uzaklaşmasının gerçekleşebileceği düşünülmüştür. Sonuçta, bu gözlemlerle sıvılaşma teorisinin bazı temel fikirlerinin desteklendiği belirtilmiştir. Bunlardan birisinin, büyük boşluk basıncının zeminde deformasyona sebep olduğu, diğerinin de zemin daneleri arasındaki göreceli hareketin, artık boşluk basıncı gelişimi nedenli gerçekleştiği yönünde açıklanmıştır (Kammerer, 2002).

Deformasyonların ve artık boşluk basıncının bir araya getirilmesi yolu ile numunenin genel sıkılık ayrımının yapılabildiğinden bahsedilmiştir. Numunenin davranışındaki bu farklılığın, Şekil 2.9 ve 2.10'da da açıkça görülebildiği ve sıklığa bağlı olduğundan söz edilmiştir. Şekillerde gösterilen eğrilerde, farklı sıklıktaki numunelere uygulanan iki ayrı tek yönlü deney sonuçlarının verildiği belirtilmiştir. Kullanılan eksenlere bakıldığında benzer oldukları görülmektedir. Şekil 2.9(a) ve 2.10(a)'da aynı Şekil 2.7'deki gibi normalize edilmiş efektif gerilmeye karşılık normalize edilmiş kesme gerilmesi oranı sunulmuştur. Bu eğrinin "p-q" ilişkisine benzediği ifade edilmiştir. Özellikle çevrimsel kesme gerilmesi ile deney sırasında düşey efektif gerilmenin nasıl düştüğü gösterilmiştir. Şekil 2.9(b) ve 2.10(b) de aynı Şekil 2.7'de olduğu gibi her deneyin başından sonuna gerilme-deformasyon davranışı verilmiştir. Bu eğrideki genişleme davranışının açıkça görüldüğü belirtilmiştir. Numunenin limit deformasyondan daha büyük bir değerde genişlediği, her bir çevrimde deformasyonların, önemli ölçüde sertleşme ile sınırlandırıldığından söz edilmiştir. Böylesi bir sertleşme davranışının, gevşek ve sıkı materyal ayırımında kılavuzluk edebileceği belirtilmiştir. Bu eğrinin aynı zamanda, aşağı yönde (yani başlangıç statik gerilme yönü) biriken kalıcı deformasyonu gösterdiği ifade edilmiştir (Kammerer, 2002).

Şekil 2.9(c) ve 2.10(c)'de artan her bir çevrimde boşluk basıncının nasıl değiştiği sergilenmiştir. Bu son iki eğrinin gevşek ve sıkı materyaller arasındaki davranış farklılığını en iyi gösteren eğriler olduğu iddia edilmiştir. Sıkı numunelerin, deformasyon ve boşluk basıncının her ikisinde de sabit bir artış gösterdiği; gevşek numunelerin ise tamamen büzülüp boşluk basıncı yaklaşık %65 değerine denk gelene kadar küçük deformasyon oluşturduğu, sonra deformasyonların hızlı bir şekilde arttığı ifade edilmiştir. Orta sıklıktaki numunelerin ise her iki davranışı da sergileyebileceği belirtilmiştir. Bu numunelerde artık boşluk basıncının kısa sürede yüksek değerlere ulaşabileceği, fakat numunedeki genişlemenin akma yenilmesi durana kadar devam edeceğinden söz edilmiştir.



Şekil 2.9 Tek yönlü basit kesme deneyi, D_r =%54, σ'_v =95kPa, CSR=0.2 (Kammerer, 2002)



Şekil 2.10 Tek yönlü basit kesme deneyi, $D_r=77\%$, $\sigma'_v=77\text{kPa}$, $\text{CSR}=0.36$ (Kammerer, 2002)

2.5 Dinamik Laboratuvar Deneylerinde Gözlenen Sıvılaşma Davranışı

Basit kesme koşulunda kumun sıvılaşmasını araştırmak için Hosono ve Yoshimine (2004), kumun drenajsız koşullardaki kesme davranışını gerilme-deformasyon ilişkisi üzerinden incelemek istemişlerdir. Bu amaçla delikli silindirik burulmalı kesme aletini ve deney materyali olarak Toyoura kumunu kullanmışlardır. İçi boş silindirik numuneler kullanılarak yapılan burulmalı kesme deneylerinde, drenajsız basit kesme deformasyonu sırasında gerilme koşulları ifade edilmeye çalışılmış ve bu koşullar altındaki sıvılaşma direnci hakkında yorum yapılmaya çalışılmıştır. Gerilmeye bağlı sıvılaşma direnci ilişkisini en iyi şekilde açıklayabilmek için, üç eksenli deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı açıklamalarına yer vermişlerdir. Sonuçta, yerinde zeminin sıvılaşma olgusunun basit ve anlaşılabilir tahmininin, başlangıç kesme yüklemesinin üç eksenli deneylerle ilişkilendirilmesi ile gerçekleştirilebileceği yorumu yapılmıştır.

Kumların dinamik davranışı ile ilgili bir başka çalışma da Altun ve Ansal (2003) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kum zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyan özellikler ve bunları etkileyen faktörlerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Kumlarda dinamik kayma modülü ve sönüm oranındaki değişimin, artan genlikli gerilme koşullarında ele alınması ile bu özelliklerin çevrim sayısı, çevre gerilmesi ve boşluk oranı gibi faktörlerden ne ölçüde etkilendiğinin tespiti hedeflenmiştir.

Deneylerin, İstanbul Teknik Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarında içi boş silindirik burulmalı kesme aleti ile yapıldığı ifade edilmiştir. Kullanılan malzemenin Toyoura kumunun özellikleri aşağıda Çizelge 2.3’de verilen şekliyle sunulmuştur.

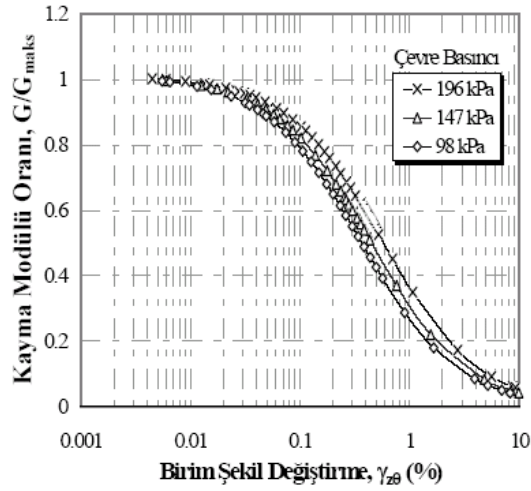
Çizelge 2.3 Deneyde Kullanılan Toyoura Kumunun Özellikleri (Altun ve Ansal, 2003)

Minerolojisi	Kuvars
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	0.977
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	0.605
Özgül Ağırlığı (G_s)	2.65
Ortalama Dane Çapı (D_{50})	0.17mm
Efektif Çapı (D_{10})	0.13mm
Üniformluk Katsayısı (U_c)	1.43

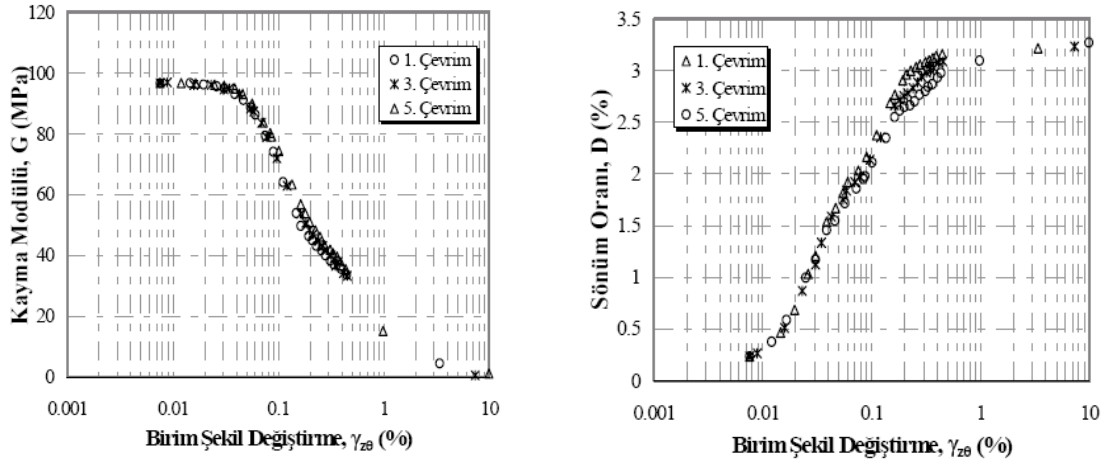
Numunenin, kuru yağmurlama metoduyla $D_r = 30; 50; 60; 75$ rölatif sıkılık değerlerinin elde edilebilmesi için sırasıyla 10-15, 15-20, 20-25 ve 25-30cm yükseklikten 8 tabaka halinde dökülerek gevşek ve orta sıkılıkta, CO_2 geçirme tekniği ve $20kN/m^2$ ters basınç uygulanmasıyla Skempton B değeri 0,96 ve üstü olacak şekilde doyunlaştırılması sağlanarak hazırlandığı belirtilmiştir.

Kullanılan deney aleti ile içi boş numuneye drenajsız şartlarda, izotropik veya anizotropik üç eksenli gerilme koşullarında 0,1Hz frekansında tekrarlı burulma yüklemesi yapıldığı, zeminin dinamik gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin belirlenmeye çalışıldığı ifade edilmiştir.

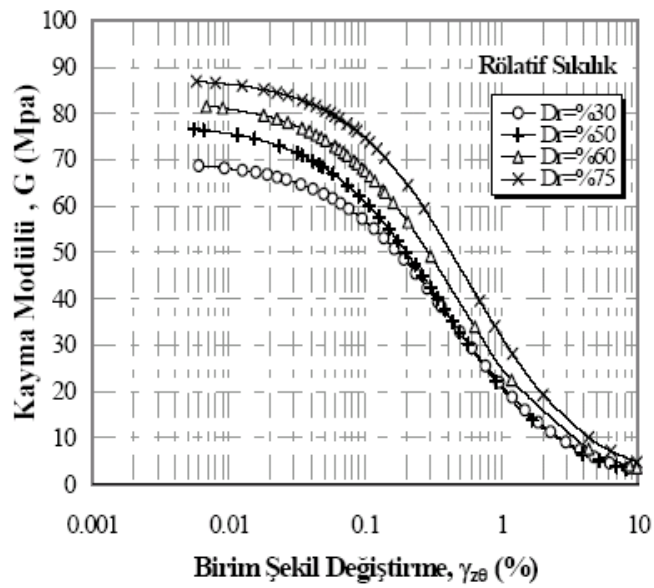
Deney sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 2.11, 2.12, 2.13’deki gibi araştırmacılar tarafından sunulmuştur.



Şekil 2.11 Kayma modülü azalım eğrilerine çevrim sayısının etkisi (Altun ve Ansal, 2003)



Şekil 2.12 Bir, üç ve beşinci çevrime ait kayma modülü ve sönüm oranı değerleri (Altun ve Ansal, 2003)



Şekil 2.13 Farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım eğrileri (Altun ve Ansal, 2003)

İçi boş silindirik burulmalı gerilme deney aletinin diğer laboratuvar dinamik deney aletlerine göre, birçok avantaja sahip olduğu, bu deney aletinde küçük ve büyük deformasyon seviyelerinde, belirli başlangıç ve sınır şartlarında ve birçok zemin türünde monotonik ve tekrarlı deneyleri yapabilmenin mümkün olduğu ve deney sisteminde, oldukça üniform gerilme dağılımları ile zeminlerin gerilme–şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin farklı koşullar altında belirlenebildiği ifade edilmiştir (Altun ve Ansal, 2003).

Değişik başlangıç ve sınır koşullarında, artan genlikli gerilmelerle burulmalı yükleme deneylerinin yapıldığı, deney sonuçlarına bağlı olarak kum zeminlerin dinamik yükler altındaki gerilme–şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmeye çalışıldığı belirtilmiştir. Beşer çevrimlik gerilme artımı yöntemi ile kum zemine ait dinamik kayma modülü ve sönüm oranının, farklı çevre gerilmesi ve boşluk oranı değerlerinde belirlendiği ve çevre gerilmesi ile boşluk oranının, kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde değişiklikler oluşturduğu açıklanmıştır. Sonuçta meydana gelen değişimlerin dinamik parametreler üzerindeki etkilerinin incelendiği, buna göre de, belirlenen bu etkilerin, geçmişte değişik araştırmacılar tarafından yürütülen benzeri çalışmalarla uyumluluk gösterdiği görüşü Altun ve Ansal (2003) tarafından ortaya konmuştur.

Ural ve Önalp (2005) tarafından yürütülen çalışmada ise, kullanılan dinamik üç eksenli kesme deneyinin Monterey kumu ile kalibrasyonunun sağlamaya çalışıldığı ifade edilmiştir. Yapılan deney sonucunda elde edilen verilerin, literatür ile karşılaştırıldığında Sakarya Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında kullanılmakta olan Wykeham Farrance CTX aletinin diğer aletlerle aynı performansa sahip olduğu ancak her yeni sistemin kontrol edilmesi ve kalibrasyonunun titizlikle gerçekleştirilmesi gerektiğine işaret edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında ise kumların dinamik davranışı basit kesme deney aleti ile incelenerek, ayrıntıları üçüncü bölümde deneysel çalışma kısmında verilecektir.

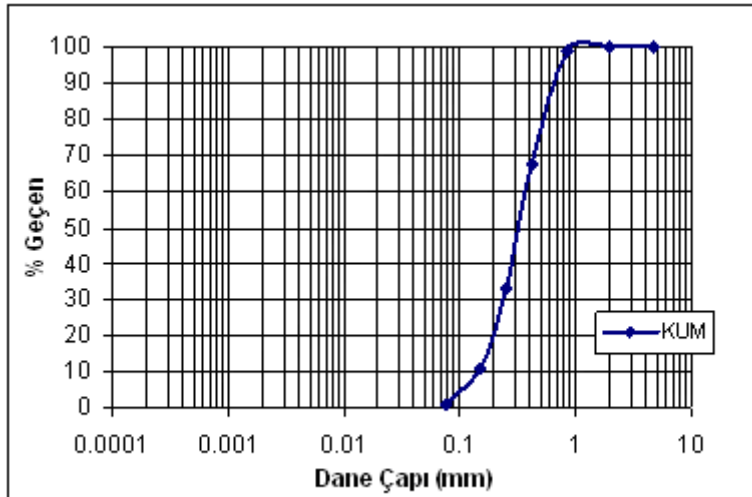
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, kum zeminlerin çevrimsel yükler altında davranışının dinamik basit kesme kutusu deneyleri ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için tez kapsamında indeks özellikleri ve statik kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiş bir kum zeminin farklı rölatif sıkılıklarda hazırlanmış numuneleri ile kuru ve suya doygun durumda farklı frekans ve çevrimsel gerilme oranları (CSR=cyclic stres ratio) uygulanarak laboratuarda dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Basit kesme deneyleri Geocomp tarafından üretilen deney cihazında gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca kuru kum numuneler üzerinde statik direkt kesme ve sonra basit kesme deneyleri yapılarak statik kayma mukavemeti açısı belirlenmiş ve elde olunan parametreler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ayrıntıları aşağıda açıklanmıştır.

3.2 İndeks Özellikleri

Model deneylerde kullanılan kumun indeks özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Kumun granülometrisi Şekil 3.1’de, indeks özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.2’den görüldüğü gibi tez kapsamında üzerinde çalışılan kum Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne göre kötü derecelenmiş kum (SP) zemin sınıfına girmektedir.



Şekil 3.1 Deneyde kullanılan kum zeminin granülometri eğrisi (Tohumcu, 2007)

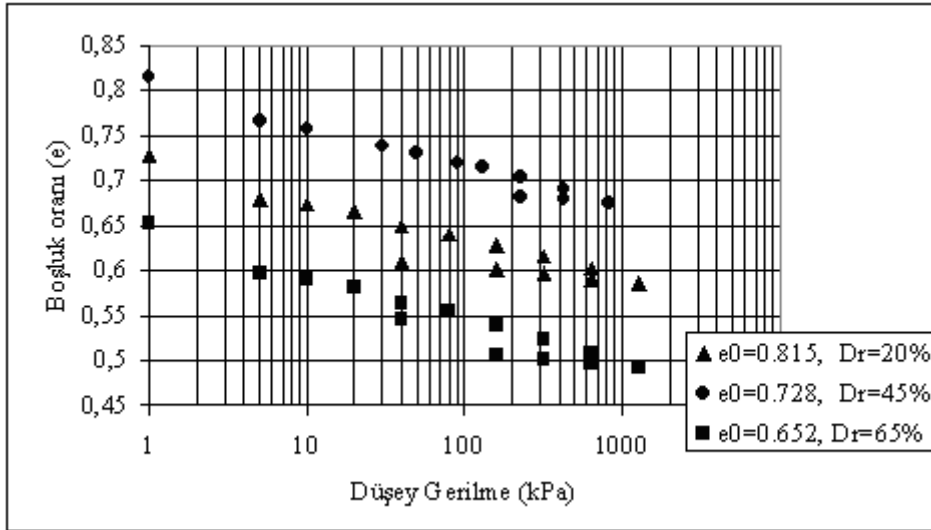
Kumun maksimum ve minimum boşluk oranı değerlerini belirleyebilmek için Adalier (1992) tarafından kullanılan yöntemden faydalanılmış ve kumun maksimum ve minimum boşluk oranı ile diğer granülometrik özellikleri Çizelge 3.2’ de verildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kumun Özellikleri (Tohumcu, 2007)

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Özgül Yoğunluk, G_s	2.65
Maksimum Boşluk Oranı, e_{max}	0.88
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0.50
Ortalama Dane Çapı, D_{50} (mm)	0.31
Efektif Çap, D_{10} (mm)	0.15

3.3 Sıkışma Özellikleri

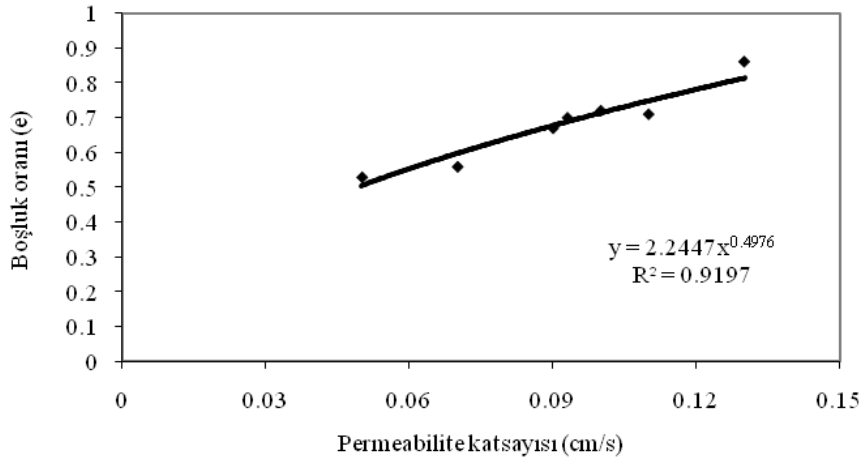
Ele alınan kumun farklı yükler altında sıkışma davranışını incelemek için farklı başlangıç sıklık değerlerinde hazırlanmış numuneler üzerinde ödometre deney aleti kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde elde edilen sıkışma eğrileri (logaritmik efektif gerilme-boşluk oranı) Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Deneysel çalışmada kullanılan kum zemine ait sıkışma eğrileri (Tohumcu, 2007)

3.4 Geçirimsilik Özellikleri

Kumun geçirimsilik özelliklerini saptamak için sabit seviyeli permeametre kullanılarak hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Farklı sıklıklarda hazırlanmış numunelerden elde hidrolik iletkenlik-boşluk oranı değişimi eğrisi Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen hidrolik iletkenlik-boşluk oranı değişimleri (Tohumcu, 2007)

3.5 Statik Kesme Deneyleri

Bu çalışmada kullanılan kum zeminin statik kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için ilk olarak direkt kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için kullanılan deney sistemi ELE 26-2114 olup Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Direkt kesme kutusu deney aleti (ELE 26-2114)

Direkt kesme kutusu deneylerinde, numunenin hazırlanması için, öncelikle kesme sistemi boş hale getirilir. İki poroz plaka, (bir alt ve bir üst 25mm kalınlıkta) deney öncesinde su içinde daha fazla hava kabarcığı çıkmayınca kadar kaynatılır. Alt poroz plaka kesme kutusu hücresi içine yerleştirilir. Numune kesiciler, örselenmemiş numune için aksesuar olarak verilmektedir, numune kesici de kutu üzerine yerleştirip üst yüzeyden kesilir. Numune, kutu içine poroz plaka üzerine iyice oturuncaya kadar ahşap itici ile yerleştirilir, daha sonra da üst poroz plaka ve basınç plakası yerleştirilir. Deney düzeneğinde numunenin yerleştirildiği kesme kutusu (a), numunenin konsolide olmasını sağlayacak olan moment kolu (b) ile üzerine konulan ağırlıklar (c) ve verilerin toplandığı sistem (d) Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Deney düzeneğine ait parçalardan kesme kutusu (a), konsolidasyonu sağlayan moment kolu (b) ve ağırlıklar (c) ile verilerin toplandığı bilgisayar sistemi (d)

Direkt kesme deneyleri için, yatay boyutları 60 mm x 60 mm ve yüksekliği 25mm olan numuneler kullanılmıştır. Rölatif sıklığı $Dr=\%30$, $\%50$ ve $\%90$ olarak hazırlanan kuru kum numuneler üç farklı düşey yük altında ($\sigma_v'=25$ kPa, 50 kPa ve 100 kPa) konsolide edildikten sonra kesme işlemine tabii tutulmuşlardır.

Statik basit kesme deneyleri ise Geocomp firması tarafından üretilen cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz 1960’ın ortalarında Norveç Geoteknik Enstitüsü tarafından (NGI) geliştirilmiş basit kesme kutusu tipindedir. Bu tip basit kesme deneyi düzeneğinde zemin numuneleri çelik donatılı plastik membranlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan da ise donatılı membran içerisine yerleştirilen zemin numunesi çevresine teflonla kaplanmış

ince metal halkalar yerleştirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan deneyi aletinin fotoğrafı Şekil 3.6'da verilmiş olup bu cihazda yükler ve yer değiştirmeler elektronik olarak ölçülmekte ve deneyler bir bilgisayardan otomatik olarak yürütülmektedir. Deneyler sırasında uygulanan yükler ve oluşan yer değiştirmeler zamana bağlı olarak bilgisayara kaydedilmektedir. Basit kesme cihazı ile birlikte gelen yazılım yardımı ile deneyler yürütülebilmekte ve alınan ölçümler ile bu ölçümlerden türetilen parametrelerin grafikleri bilgisayar ekranında çizdirilebilmekte ve istenildiğinde yazıcıdan alınabilmektedir. Cihaz hem statik direkt kesme deneylerini hem de dinamik basit deneylerini yapabilmektedir.



Şekil 3.6 Çevrimsel basit kesme deney aleti (Sheartrac-II-DSS)

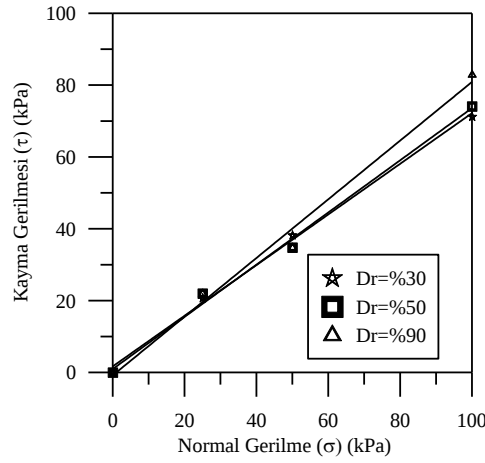
Çalışmada, kum numunelerin yerleştirildiği kesme kutusunun alanı 3165.3mm^2 ve numune yüksekliği 26mm'dir. Direkt kesmenin gerçekleştirilebilmesinde belirlenen kesme hızı 1.27mm/dk'dır. Bu deneylerde de direkt kesme deneylerinde kullanılan rölatif sıklık ve konsolidasyon basıncı değerleri uygulanmıştır.

Direkt kesme ve basit kesme kutusu deney aletlerinin her ikisinde de kesme kutusu içerisine kum malzemenin kontrollü bir şekilde konulabilmesi ve numunenin üniform sıklıkta oluşturulabilmesi için, bir kum yağmurlama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem bir huni ve bu huni ağzına monte edilmiş plastik alt tabanı kesilmiş şişeden oluşmaktadır. Bu sistem Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

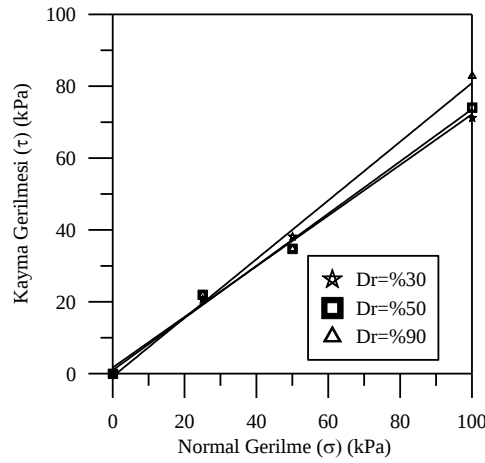


Şekil 3.7 Kum yağmurlama sistemi

Kumun statik kayma mukavemeti parametrelerinin belirlemek için yapılan direkt ve basit kesme deneylerinden elde edilen göçme zarfları sırası ile Şekil 3.8 ve 3.9’de gösterilmiştir. Her iki deneyden elde edilen kayma mukavemeti açısı değerleri ise Çizelge 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Direkt kesme kutusu deneyinden elde edilen kırılma zarfı



Şekil 3.9 Çevrimsel basit kesme deneylerinden elde edilen kırılma zarfı

Çizelge 3.3 Direkt ve Basit Kesme Deneylerinden Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılarının Karşılaştırılması

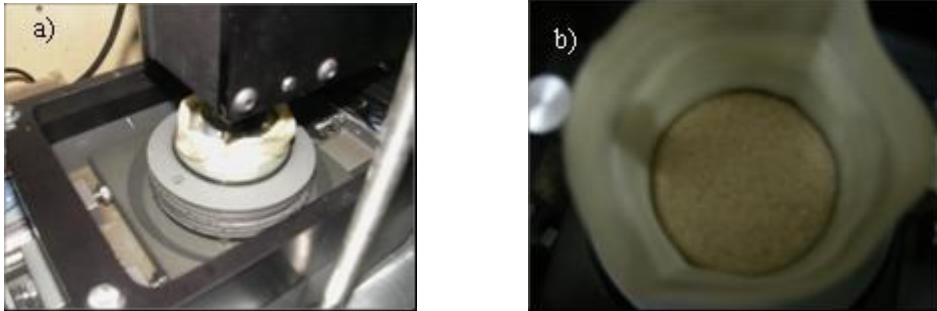
D _r (%)	Kayma mukavemeti açısı ϕ (°)	
	Direkt kesme kutusu	Basit kesme kutusu
30	35	35
50	37	37
90	40	40

Direkt kesme kutusu deney aleti ile statik yük altında yapılan kesme deneylerinden elde edilen kayma şekil değiştirmesi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirmesi-hacim değişimi ilişkilerini gösteren eğriler Ek 1’de sunulmuştur.

3.6 Çevrimsel Basit Kesme Deneyleri

İncelenen kumun çevrimsel yükler altındaki dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için, yukarıda belirtilen rölatif sıkılıklarda (%30, %50 ve %90) ve konsolidasyon basınçlarında (25, 50 ve 100 kPa) çevrimsel basit kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan cihaza ait bilgiler Statik Kesme Deneyleri başlığı altında verilmiştir.

Numunenin hazırlanması için, öncelikle kesme sistemi boş hale getirilir. Sistemden çıkarılan parçalardan alt poroz plaka düz bir yüzeye konulur, membran alt poroz plakaya takılır ve dengeleme halkası yardımı ile plaka üzerinde sabitlenir. Dinamik etkiyi yaratacak olan teflon halkalar, üst üste membranı saracak şekilde yerleştirilir ve halkalar kaymaması için vidalanır. Bu parçaların üzerine metal içi boş silindirik parça, içerisinden membran geçecek şekilde konulur ve membran metal parçanın dışına doğru gerilerek silindirik parçanın şeklini alması sağlanır. Numuneler bölüm 3.5’de anlatıldığı gibi yağmurlama sistemi ile hazırlanırlar ancak suya doymun numunelerde kesme kutusu belli bir seviyeye kadar su ile doldurulup yağmurlama, su içerisine gerçekleştirilir. İstenilen sıkılık değeri (bir tokmak yardımı ile) elde edildikten sonra çok hasas bir şekilde üst poroz plaka yerleştirilir ve plakanın üzerine membranın sabitlenmesini sağlamak amacıyla diğer dengeleme halkası takılır. Şekil 3.10’de basit kesme kutusu ve numunenin yerleştirildiği membrana ait resimler görölmektedir.



Şekil 3.10 Çevrimsel basit kesme deney aletinin kesme kutusu (a) ve numunenin yerleştirildiği membrana (b) ait görüntüler

Basit kesme deneyi, gerilmelerin numune boyunca sabit olarak uygulanmasına olanak veren bir deney düzeneğidir. Başlangıç gerilme koşulu, gerilme izi ve deformasyon düzeninin sağlandığı bu modellerde farklı yükleme koşullarını uygulamak mümkün olup çevrimsel yükler altında zemin davranışını incelemek için diğer deney sitemlerine göre daha basittir. Bu çalışmada kullanılan cihaz, bilgisayar kontrollü bir üniteye sahiptir ve numuneye uygulanan düşey ve yatay yüklemeler micro-stepper motor ile gerçekleştirilir. Cihaz otomatik olarak 32 artırma varan konsolidasyon aşamasında çalışma kapasitesine sahiptir. Yatay kesme, belli bir deformasyon oranında ya da belli bir yatay kuvvet değişimi oranında veya belli bir zaman aralığına ait kuvvet adımlarında uygulanabilir. Gerilme kontrollü çevrimsel yüklemeler 1Hz frekansında gerçekleştirilir. Zemin numunesi, halka plakalarla desteklendirilmiş lastik membran içerisinde hapsolmuş durumda konumlanır. K_0 konsolidasyon koşulu, yanal deformasyonun engellenip yalnızca düşey deformasyona izin verildiği durumda sağlanır. Kesme sırasındaki sabit hacim koşulu, ayarlanan düşey yükler tarafından sağlanır bu da geri bildirim mekanizması gibi çalışan yer değiştirme sensörleri ve kapalı döngü bilgisayar kontrolü vasıtasıyla gerçekleştirilir. Düşey gerilmelerdeki değişim sonuçları, drenajsız testlerde meydana gelen artık boşluk suyu basınçları ile ilişkili olup buradan deney sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçları belirlenir.

Cihaz deney sırasında uygulanan gerilmeleri ve meydana gelen şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı değerlerini üzerindeki sensörler ve transdüserler ile ölçerek cihazla birlikte verilen yazılımı vasıtası ile eş zamanlı olarak grafiklerle bilgisayar ekranına yansıtma özelliğine sahiptir. Ayrıca, operatöre istenilen herhangi bir deney koşulu ve yöntem üretme olanağı tanımaktadır. Cihaz yazılımı donanımı ile birlikte verilmiş olup bütün deney girdileri, seçilen parametreler, veriler üzerinde standart mühendislik hesaplamaları, grafik olarak çizilen eğriler kaydedilir ve çıktılar ASTM D6528-07 standardında alınır.

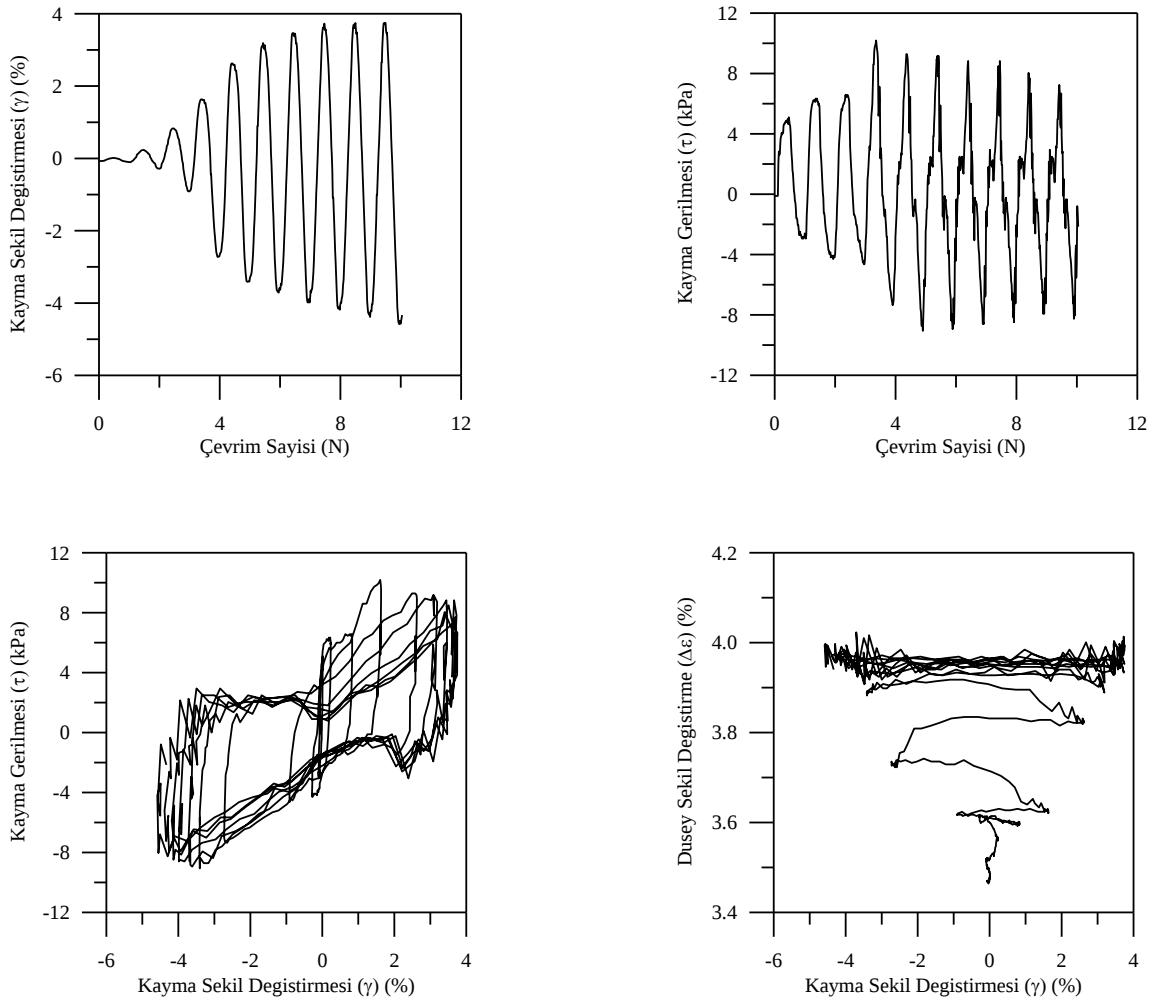
Dinamik yükleme koşullarında kuru ve suya doymuş kumun davranışını incelemek için üç farklı rölatif sıklıkta (%30, %50, %90) hazırlanmış numunelerin her biri için üç ayrı düşey gerilme (25kPa, 50kPa, 100kPa) ve dört ayrı çevrimsel gerilme oranı (0.10, 0.20, 0.25, 0.50) değeri ile toplam 72 adet deney yapılmıştır. Numuneler üç farklı düşey gerilme ve dört farklı çevrimsel gerilme oranı değerlerinde deneye tabii tutulmuşlardır. Deneyler 1Hz frekans değerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda planlanan ve uygulanan deney programı Çizelge 3.4’de sunulmuştur.

Çizelge 3.4 Dinamik Basit Kesme Deney Programı

D_r (%)	σ_v' (kPa)	CSR
30	25	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
	50	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
	100	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
50	25	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
	50	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
	100	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
90	25	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
	50	0.10, 0.20, 0.25, 0.50
	100	0.10, 0.20, 0.25, 0.50

Yukarıda verilen parametreler doğrultusunda, önce kuru numuneler üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneyleri daha sonra suya doymun numuneler üzerinde yapılan basit kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

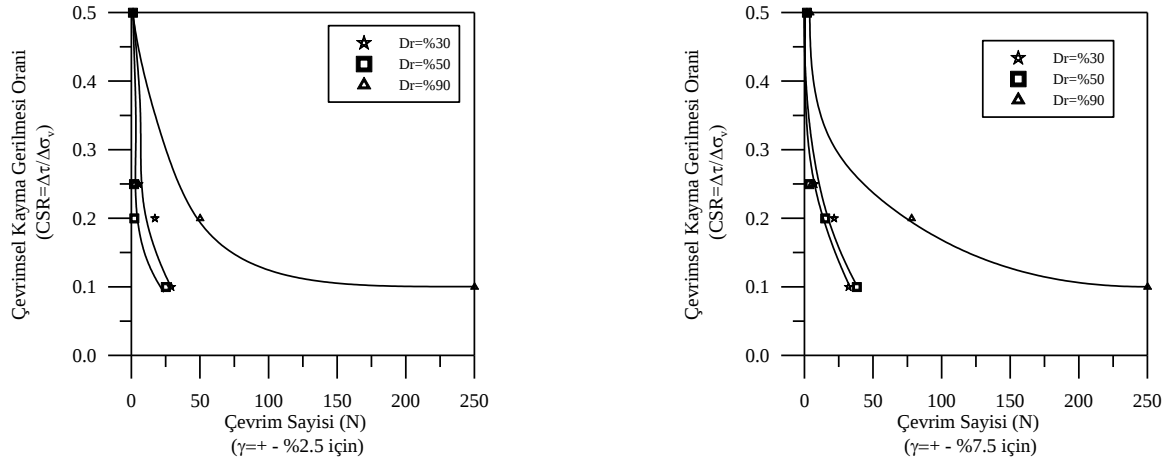
Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarını gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olarak iki ayrı grupta incelediğimizde; gerilme-şekil değiştirmenin, dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması anlaşılırken; mukavemet özelliklerinde göçmeye ya da büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır (Altun, 2003). Çizelge 3.4’de verilen deney programı doğrultusunda kuru numuneler için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme ilişkisi incelemiştir. Rölatif sıkılığı %30, düşey gerilme değeri 50kPa ve çevrimsel gerilme oranı 0.25 için, dinamik basit kesme deneyinden elde edilen eğriler aşağıda Şekil 3.11’de sunulmuştur, diğer değerlere ait eğriler ise Ek 2’de verilmiştir.



Şekil 3.11 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi- düşey şekil değiştirme eğrileri

Şekil 3.11’de 50 kPa düşey gerilme altında, 0.25 çevrimsel gerilme oranında 1Hz frekans için yapılan 10 çevrimlik yükleme sonucunda kayma gerilmesinin $\pm 8 \text{ kPa}$ civarında olduğu, yaklaşık 2 çevrimden sonra kayma şekil değiştirme seviyelerinin arttığı, ayrıca kayma şekil değişimine bağlı olarak düşey şekil değişiminin gerçekleştiği ve göçme durumuna 10 çevrim sonucunda ulaşılmakta ve bu durumda düşey şekil değiştirme değerinin sabit olduğu görülmektedir.

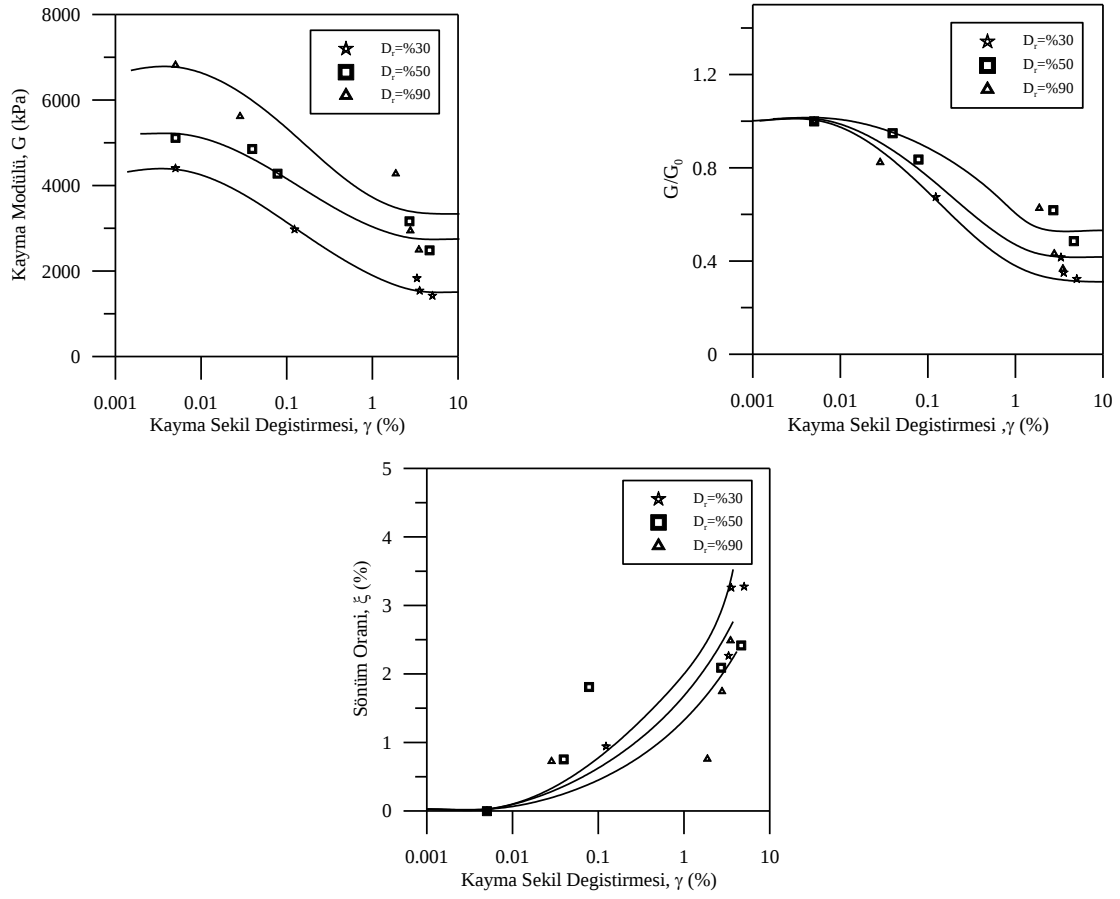
Düşey gerilmenin 100kPa değerinde uygulandığı deneylerde dinamik yükleme sırasında kuru numunelerin sıkılığının kayma dayanıma etkisini incelemek için, kayma şekil değişiminin $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ değerlerinde çevrim sayısına karşılık çevrimsel gerilme oranı eğrileri üç rölatif sıkılık (30%, 50%, 90%) için, aşağıda Şekil 3.12’de çizdirilmiştir.



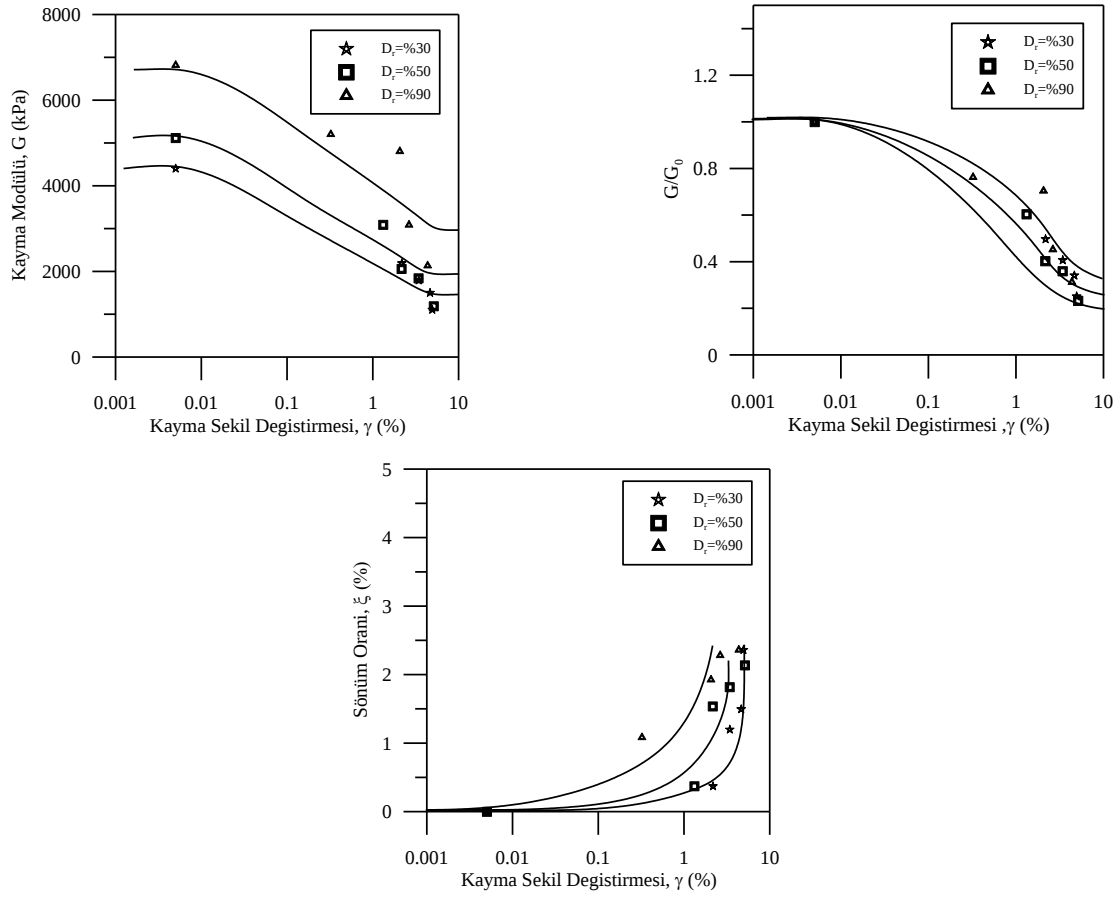
Şekil 3.12 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi

Şekil 3.12’de verilen grafiklerden $\gamma = \pm 2.5\%$ şekil değiştirme seviyesine, çevrimsel gerilme oranı 0.1 değeri için, %30 sıkılığa sahip numunenin yaklaşık 25 çevrimde, %50 sıkılığa sahip numunenin yaklaşık 27 çevrimde ve %90 sıkılığa sahip numunenin ise yaklaşık 250 çevrimde ulaştığı; $\gamma = \pm 7.5\%$ seviyesine, çevrimsel gerilme oranı 0.1 değeri için, %30 sıkılığa sahip numunenin yaklaşık 30 çevrimde, %50 sıkılığa sahip numunenin yaklaşık 40 çevrimde ve %90 sıkılığa sahip numunenin ise yaklaşık 250 çevrimde ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre sıkılığın artması ile dayanımın da arttığı söylenebilir. Uygulanan diğer düşey gerilme değerleri için benzer ilişkilerin olduğu tespit edilmiş ve grafikler Ek 2’de verilmiştir.

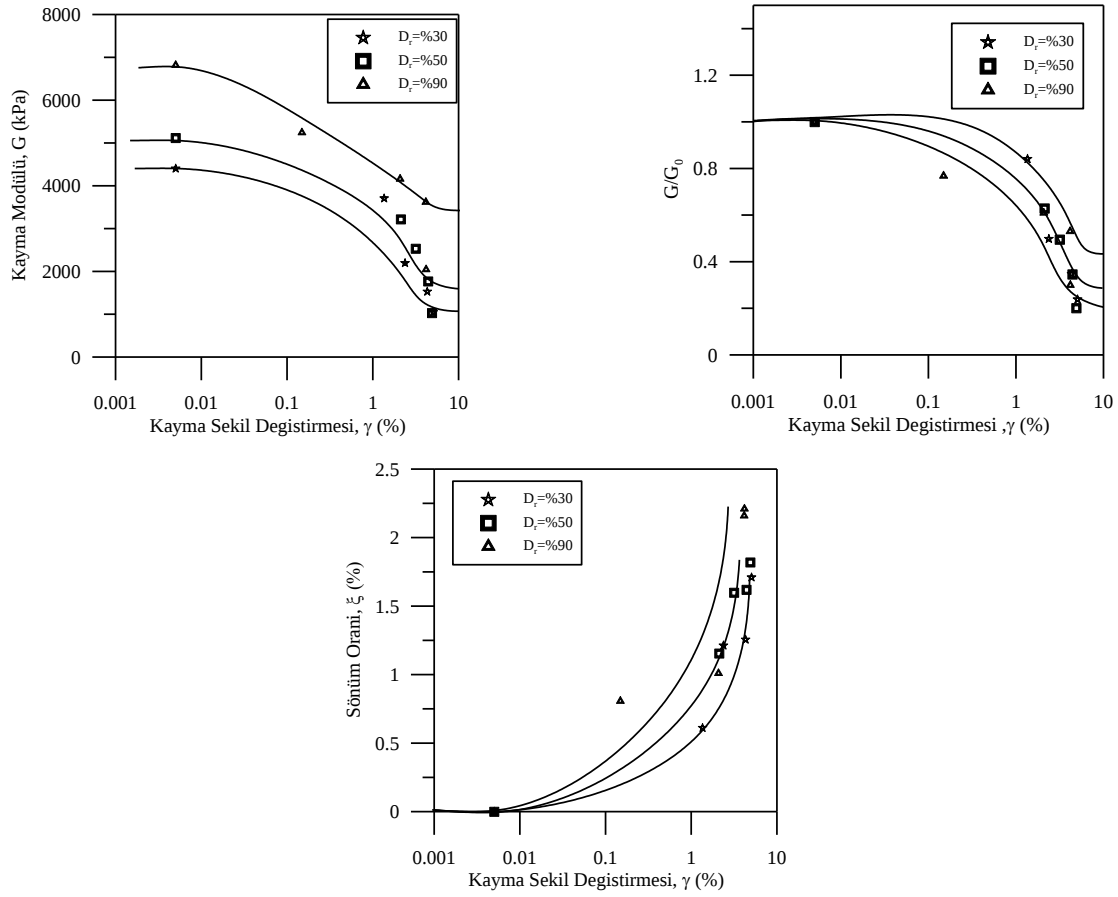
Kum zeminlerin dinamik yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin belirlenebilmesi için, gerilme-şekil değiştirmenin, dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile bunların birim şekil değiştirmeye bağlı değişimlerinin değişimlerinin incelenmesi gerekmektedir. Buna göre basit kesme deney aleti ile yapılan deney sonuçlarına bağlı olarak aşağıda Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15’de 25kPa, 50kPa ve 100kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıkılığa (%30, %50, %90) sahip kuru numuneler için kayma şekil değişimi-kayma modülü, kayma şekil değişimi-normalize edilmiş kayma modülü, kayma şekil değişimi-sönüm oranı eğrileri verilmiştir. Burada sönüm oranı değerleri, Excel’de yazılan program vasıtasıyla Cross yöntemine göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.13 Uygulanan 25kPa düşey gerilme altında kuru kum numunelerin farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri



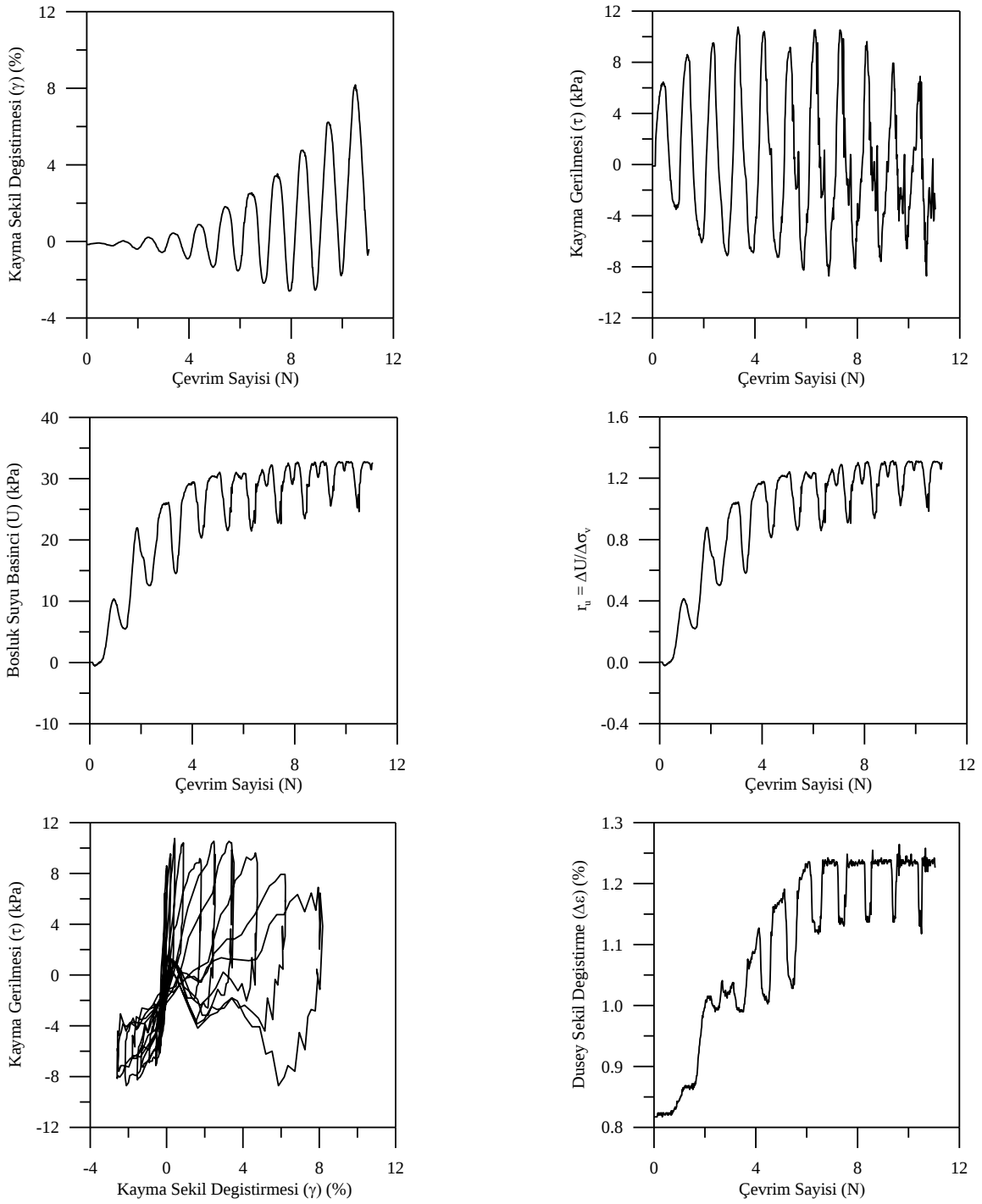
Şekil 3.14 Uygulanan 50kPa düşey gerilme altında kuru kum numunelerin farklı rölatif sıkılık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri



Şekil 3.15 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında kuru kum numunelerin farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri

Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15’de verilen eğrilere göre kuru kum zemine ait dinamik kayma modülü ve sönüm oranının, verilen bir düşey gerilme altında farklı boşluk oranı değerlerinde tespit edildiği ve boşluk oranının, kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde değişiklikler oluşturduğu gözlenmektedir.

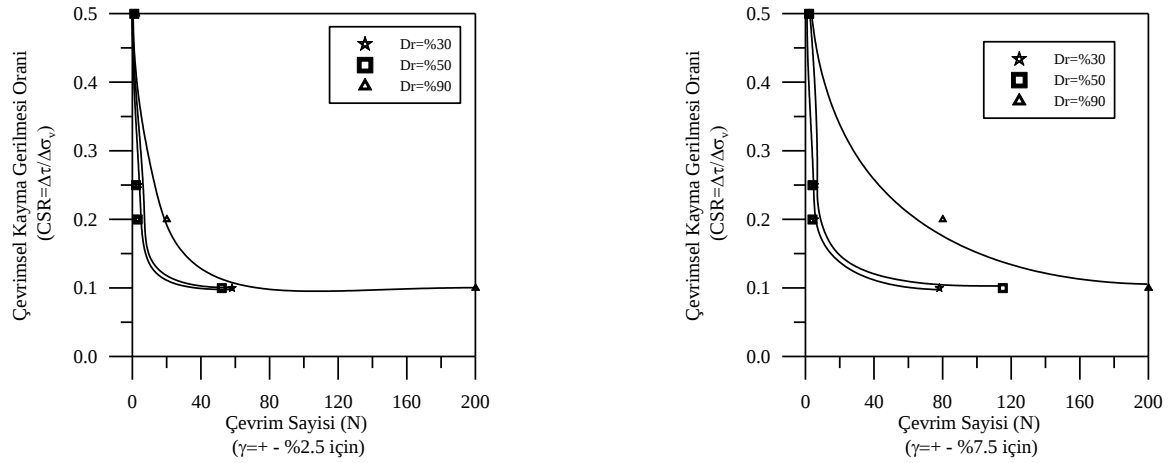
Suya doymun numuneler üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneylerinde, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi incelenmiştir. Rölatif sıklığı %30, düşey gerilme değeri 25kPa ve çevrimsel gerilme oranı 0.5 için, eğriler aşağıda Şekil 3.16’de sunulmuştur, diğer değerlere ait eğriler ise Ek 3’de verilmiştir.



Şekil 3.16 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri

Şekil 3.16’da 25 kPa düşey gerilme altında, 0.5 çevrimsel gerilme oranında 1Hz frekansa yapılan dinamik kesme deneyinde kayma gerilmesinin ± 8 kPa civarında olduğu, kayma şekil değiştirme seviyelerinin çevrim sayısına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Boşluk suyu basıncının ise ilk çevrimden itibaren hızla arttığı ve uygulanan düşey gerilme değerine ulaştığı, buna bağlı olarak efektif gerilmenin 11 çevrimden sonra sıfırlandığı yani r_u ’nun 1’e eşit olduğu böylece sıvılaşmanın meydana geldiği anlaşılmaktadır. Dinamik basit kesme sırasında boşluk suyu basıncında meydana gelen artışların kayma şekil değiştirmelerindeki değişime bağlı olarak geliştiği gözlenmiştir. Boşluk suyu basıncının azalması durumunda numunede artan şekil değiştirmelerin etkisi ile kum daneciklerinin birbirleri üzerlerinden yuvarlanmaları ve bunun da geçici olarak bir hacim kabarması davranışına yol açabileceği düşünülmektedir (Ansal, 1982). Buna göre uygulanan çevrimli yükleme ile düşey şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Bu davranış Şekil 3.16’de çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme ilişkisini gösteren eğriden görülebilmektedir.

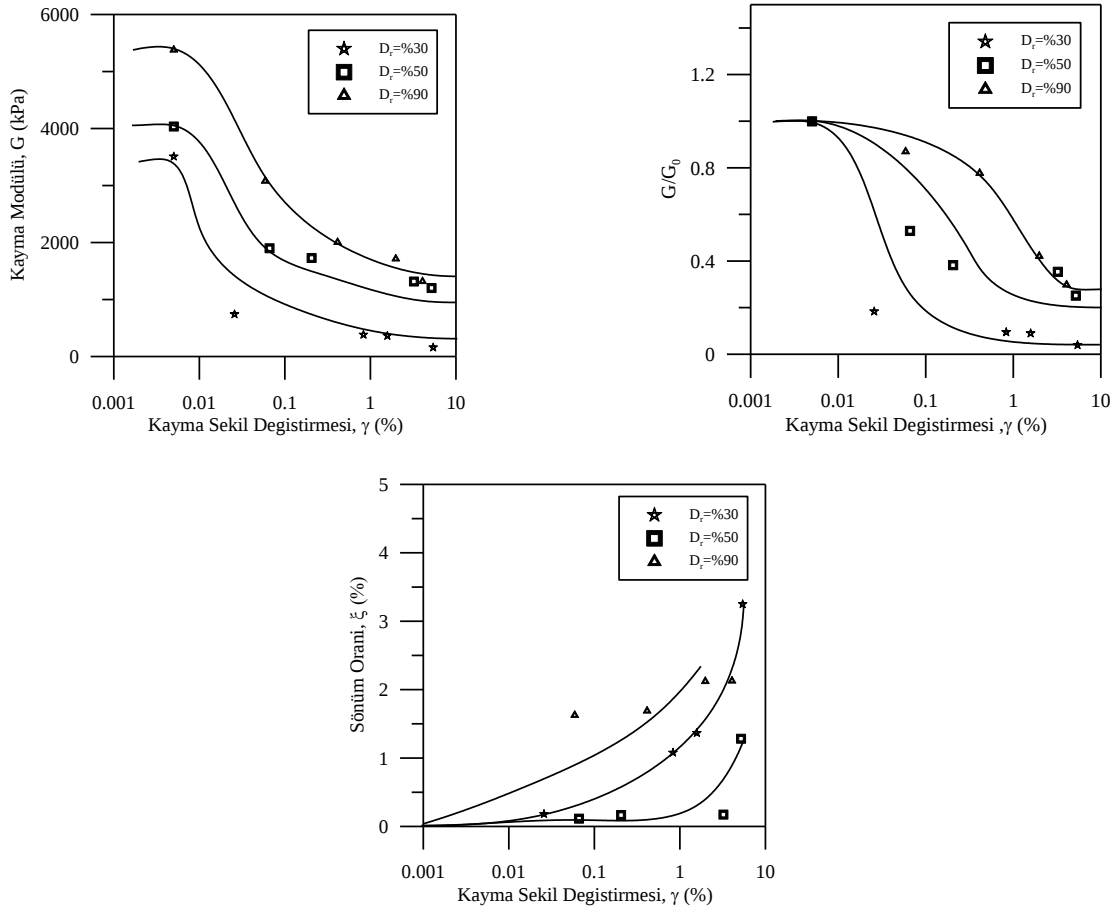
Düşey gerilmenin 100kPa değerinde uygulandığı deneylerde dinamik etki sırasında kuru numunelerin sıklığının gösterdikleri dayanıma etkisini incelemek için, kayma şekil değişiminin $\gamma = \pm 2.5$ ve $\gamma = \pm 7.5$ değerlerinde aşağıda Şekil 3.17’de çevrim sayısına karşılık çevrimsel gerilme oranı eğrileri üç rölatif sıklılık (%30, %50, %90) için çizdirilmiştir.



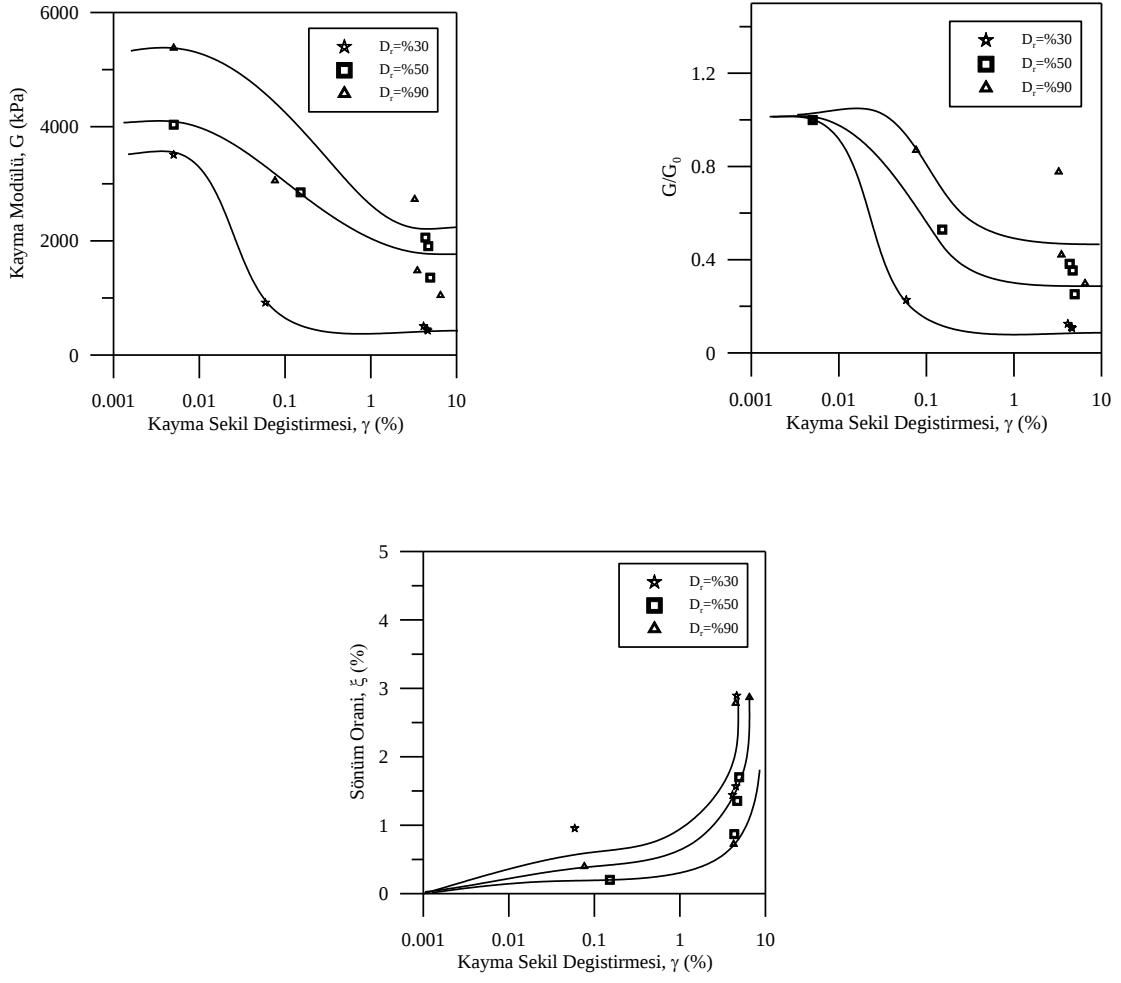
Şekil 3.17 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5$ ve $\gamma = \pm 7.5$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi

Şekil 3.17’de verilen grafiklerden $\gamma = \pm\%2.5$ şekil değiştirme seviyesine çevrimsel gerilme oranı 0.1 değeri için, %30 sıklılığa sahip numunenin yaklaşık 43 çevrimde, %50 sıklılığa sahip numunenin yaklaşık 48 çevrimde ve %90 sıklılığa sahip numunenin ise yaklaşık 200 çevrimde ulaştığı; $\gamma = \pm\%7.5$ seviyesine çevrimsel gerilme oranı 0.1 değeri için, %30 sıklılığa sahip numunenin yaklaşık 80 çevrimde, %50 sıklılığa sahip numunenin yaklaşık 120 çevrimde ve %90 sıklılığa sahip numunenin ise yaklaşık 200 çevrimde ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında sıklılığın artması ile dayanımın da arttığı görülmüştür. Uygulanan diğer düşey gerilme değerleri için benzer ilişkilerin olduğu tespit edilmiş ve grafikler Ek 3’de verilmiştir.

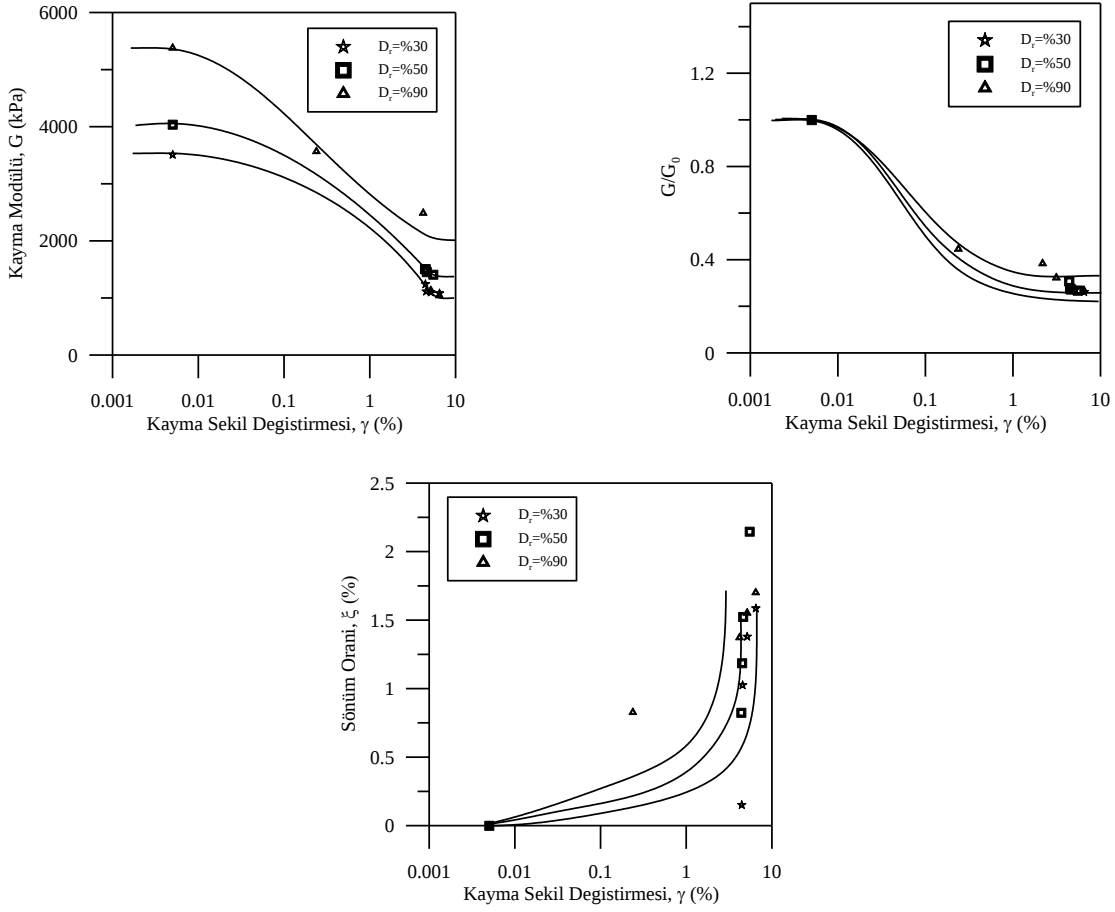
Kum zeminlerin dinamik yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmeye çalışıldığı ve gerilme-şekil değiştirmenin, dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunduğu belirtilmiştir. Buna göre, suya doymun kum zeminler için basit kesme deney aleti ile yapılan deney sonuçlarına bağlı olarak farklı rölatif sıklılık ve efektif düşey gerilme değerlerinde suya doymun numuneler için, aşağıda Şekil 3.18, 3.19 ve 3.20 için kayma şekil değişimi-kayma modülü, kayma şekil değişimi-normalize edilmiş kayma modülü, kayma şekil değişimi-sönüm oranı eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.18 Uygulanan 25kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıkılık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri



Şekil 3.19 Uygulanan 50kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıklık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri



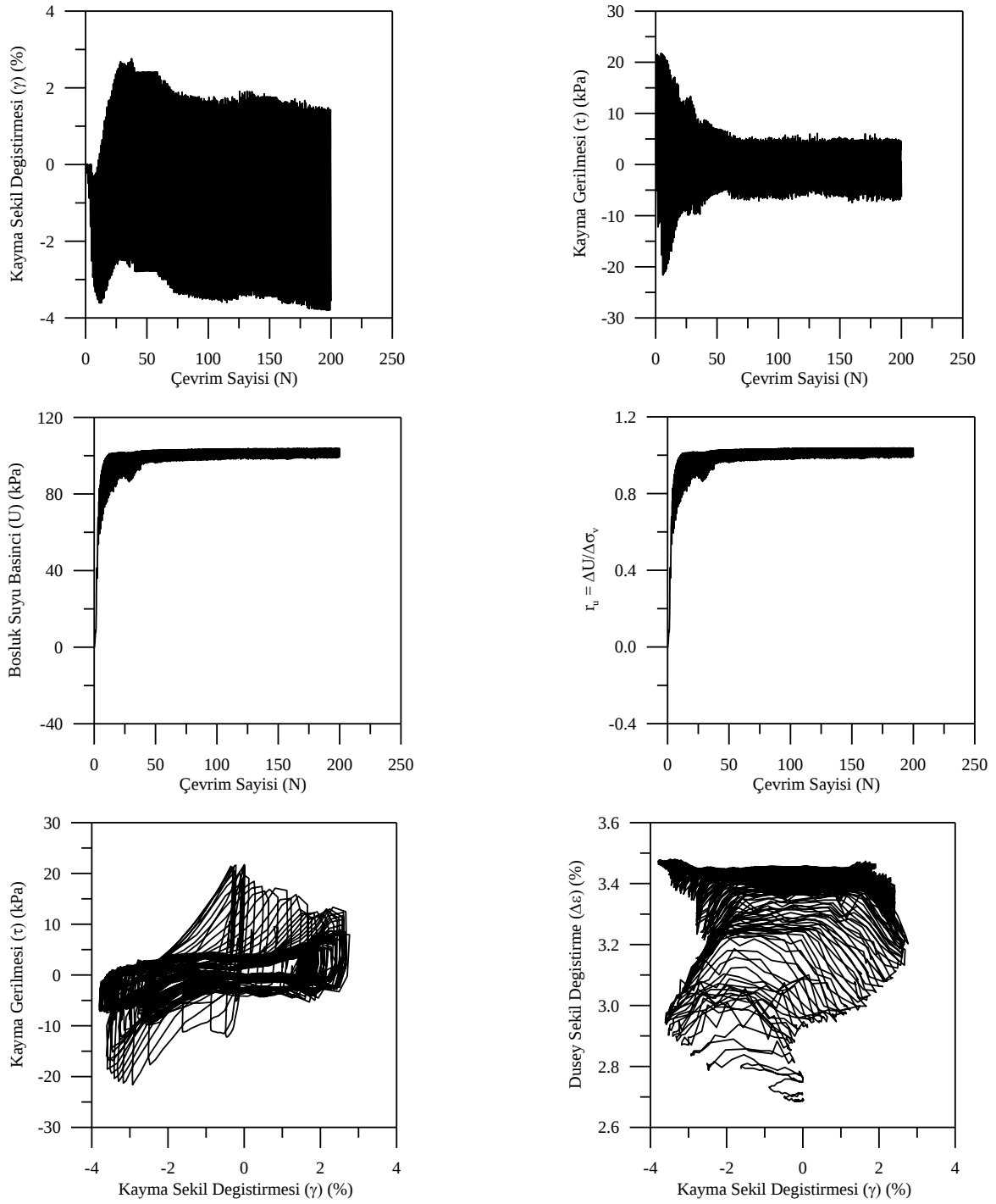
Şekil 3.20 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında farklı rölatif sıkılık değerlerindeki kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri

Şekil 3.18, 3.19 ve 3.20’de verilen eğrilere göre suya doymun kum zemine ait dinamik kayma modülü ve sönüm oranının, verilen bir düşey gerilme altında farklı boşluk oranı değerlerinde tespit edildiği ve boşluk oranının, kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde değişiklikler oluşturduğu gözlenmektedir.

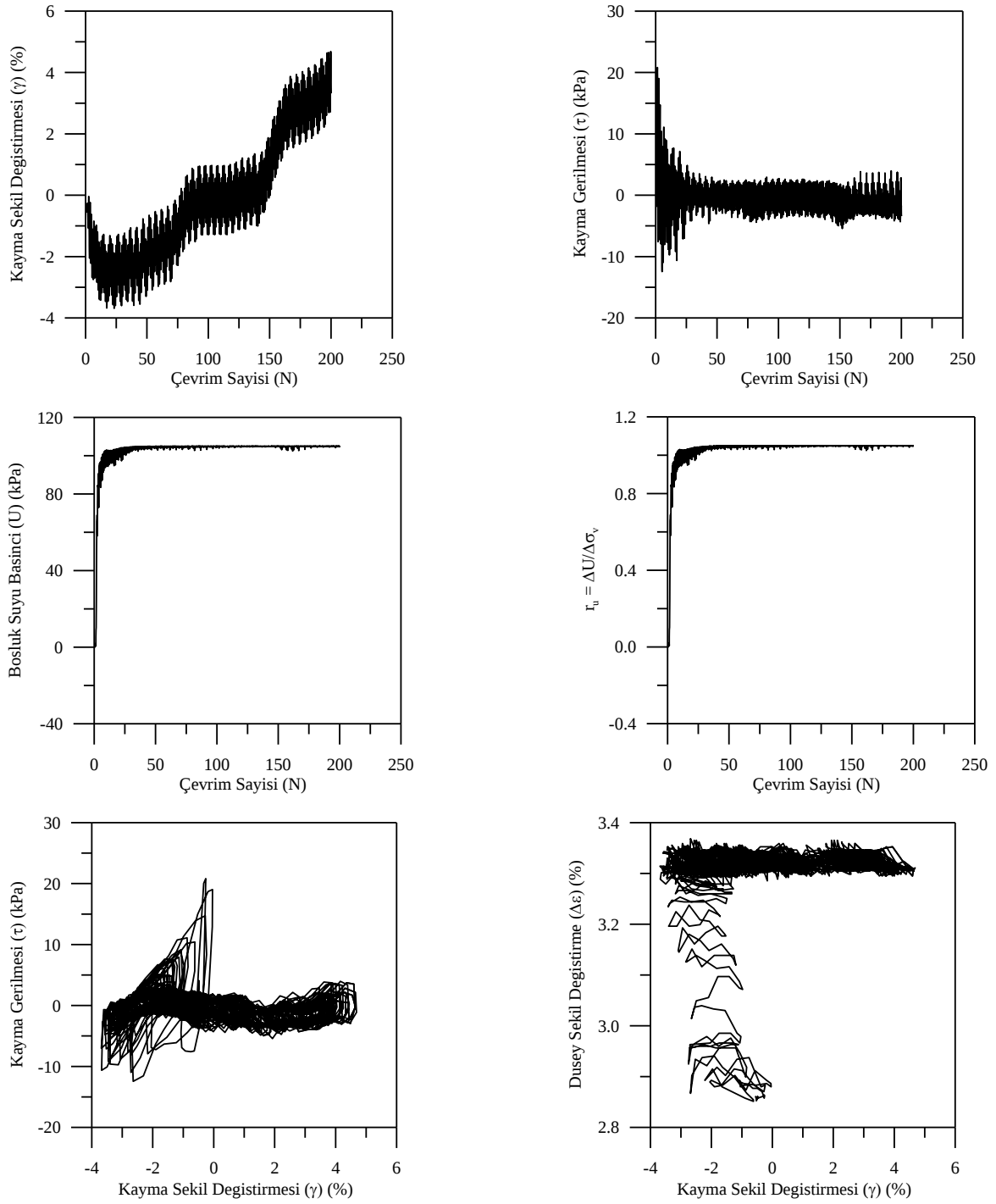
3.7 Suya Doymun Kumların Dinamik Davranışına Frekansın Etkisi

Suya doymun kumların dinamik yükler etkisinde davranışını etkileyen faktörlerden biri de yükleme frekansıdır. Bu konuda geçmiş çalışmalara bakıldığında suya doymun kumların dinamik davranışı üzerinde frekans etkisinin az olduğu görülmektedir. Sıvılaşıma deneylerinin yoğun olarak çalışıldığı yıllarda, Lee ve Fitton (1969), Peacock ve Seed (1968), Yoshimine ve Oh-Oka (1975) gibi birçok araştırmacı yükleme frekansının etkisini de incelemişlerdir. Kumların sıvılaşmasını inceleyen Peacock ve Seed (1968), Yoshimi ve Oh-Oka (1975), Wong vd. (1975), dinamik yükleme altında dinamik dayanım üzerinde bu etkinin oldukça küçük olduğunu bildirmişlerdir. Lee ve Fitton (1969) düşük frekansta dinamik gerilmenin daha

düşük olduğunu öne sürmüştür. (Ural, 2007) Bu çalışmada da frekansın sıvılaşma üzerine etkilerinin araştırılması için 2Hz ve 5Hz frekans değerlerinde yalnızca rölatif sıklığı %50 olan ve düşey gerilmenin 100kPa uygulandığı, farklı çevrimsel gerilme oranındaki (0.1, 0.25, 0.5) değerler için deneyler yapılmıştır. Aşağıda Şekil 3.21 ve 3.22’de 2Hz ve 5Hz frekans değerleri için, çevrimsel gerilme oranı 0.25 değerinin verildiği deneyden elde edilen çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisine ait grafikler verilmiştir. Diğer gerilme oranı değerleri için benzer grafikler Ek 3’de verilmiştir.



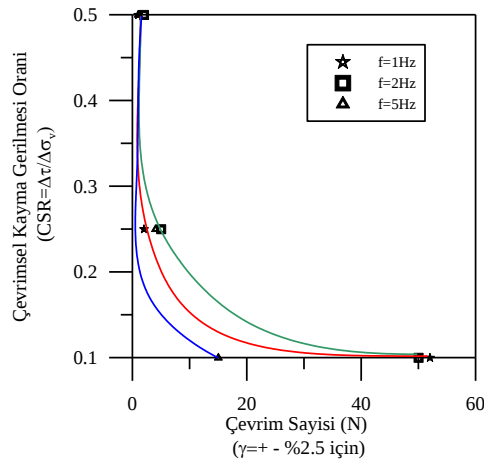
Şekil 3.21 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR} = 0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



Şekil 3.22 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR} = 0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi

Eğrilerden de görüldüğü üzere kayma şekil değişiminin ilk çevrimlerden itibaren hızla arttığı, kayma gerilmesinin ise yaklaşık 25 çevrimden sonra azaldığı ve sabitlenerek belli bir değerde 200 çevrime kadar devam ettiği görülmektedir. Sıvılaştırmanın ilk çevrimlerde gerçekleştiği boşluk suyu basıncının ilk çevrimde hızlı artışından ve r_u 'nun hemen 1'e ulaşmasından anlaşılabilmektedir.

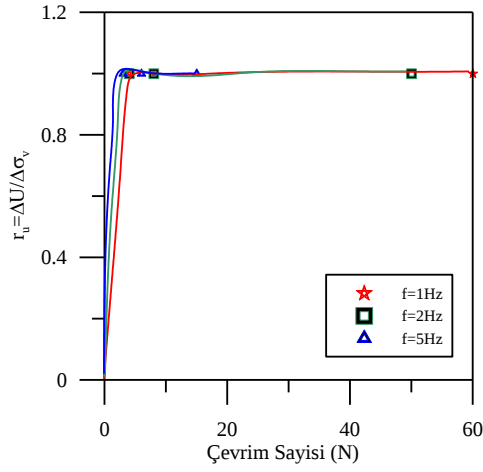
Şekil 3.23'de düşey gerilmenin 100kPa değerinde uygulandığı deneylerde dinamik etki sırasında numunelerin farklı frekans değerlerinde (1Hz, 2Hz, 5Hz) dayanıma etkisini incelemek için, $\gamma = \pm 2.5\%$ kayma şekil değiştirme değeri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.23 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ kayma şekil değiştirme değeri için farklı frekans değerlerinde çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi

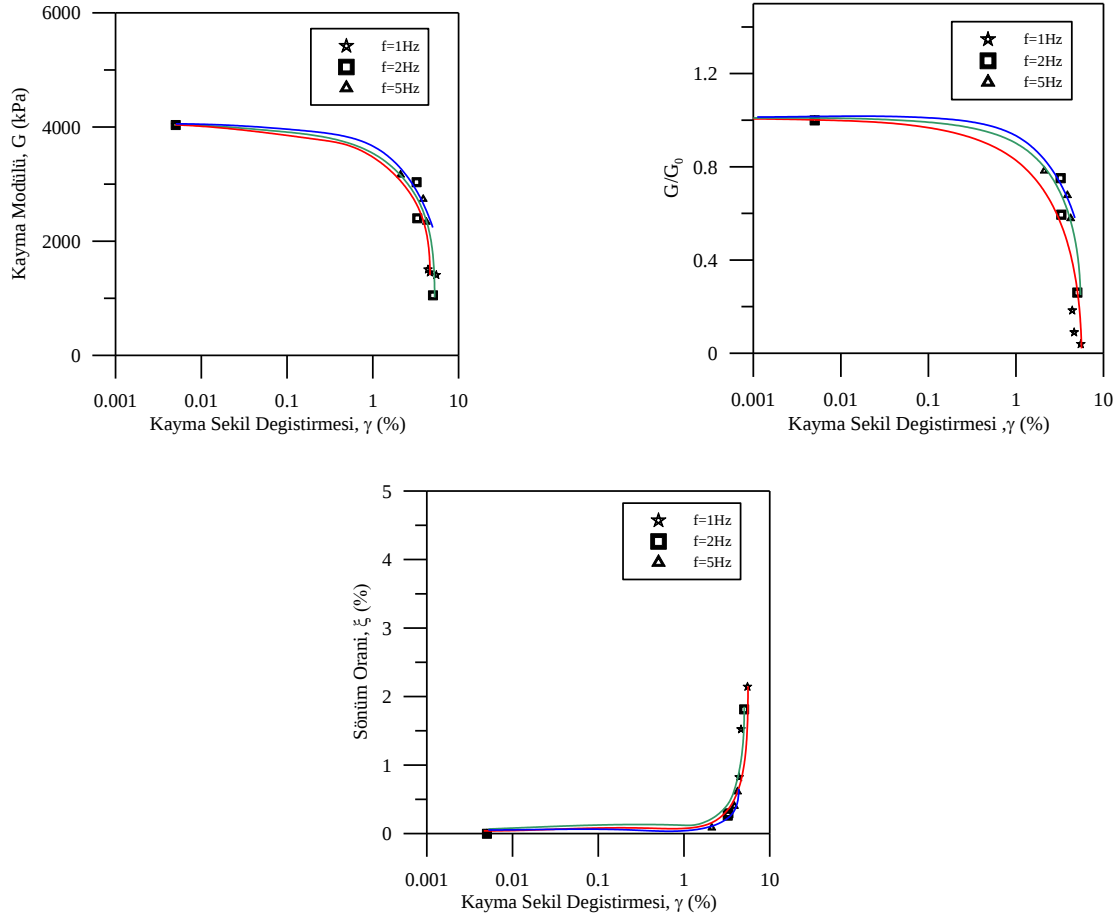
Yukarıda Şekil 3.23'de görüldüğü üzere uygulanan 1Hz ve 2Hz frekans değerleri için sonuçların birbirine çok yakın çıktığı gözlenirken 5Hz değerinde dayanımın oldukça azaldığı çevrim sayısının diğer frekans değerlerinde ulaşılan çevrim sayısı değerine göre yaklaşık % 37.5 kadar olduğu görülmektedir.

Frekansın boşluk suyu basıncı oranına etkisini incelemek için, aşağıda Şekil 3.24’de verilen eğriler çizilmiş ve aralarındaki ilişki gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi frekans arttığında sıvılaşma için gerekli çevrim sayısında azalma gerçekleştiği ancak aralarındaki ilişkiye bakıldığında çok az bir değişiklik olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.24 $D_f = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ için çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisinde frekansın etkisi.

Frekansın kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisini incelemek için, aşağıda Şekil 3.25'deki eğriler verilmiştir. Eğrilere bakıldığında farklı frekanslar için kayma modülü ve sönüm oranı değerleri birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir, buna göre kumların dinamik kayma modülü ve sönüm oranı parametreleri üzerine frekansın etkisinin ihmal edilebilir ölçüde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.25 100kPa düşey gerilme altında $D_r=50\%$ sıklıktaki suya doymun numunenin kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinde frekansın etkisi.

4. SONUÇLAR

Kumların dinamik yükler altında davranışını dinamik basit kesme deneyleri ile incelemeyi amaçlayan bu tez çalışmasında ele alınan bir kum numunesinin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Kuru ve suya doygun durumda farklı sıklıklarda hazırlanan numuneler üzerinde dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Suyu doygun durumda meydana gelen sıvılaşmaya, rölatif sıklık ve düşey efektif gerilmenin yanında frekansın da etkisi araştırılmıştır.

Dinamik basit kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- 1) Kuru durumda gerçekleştirilen deneylerde rölatif sıklık ve efektif düşey gerilme arttıkça, çevrimsel gerilme oranına bağlı olarak numunelerde nihai çevrim sayısı artmaktadır.
- 2) Kuru ve suya doygun durumda meydana gelen düşey şekil değiştirme rölatif sıklığa bağlı olarak değişmektedir.
- 3) Suyu doygun kumlar üzerinde yapılan deneylerde sıvılaşma görülmüştür. Sıvılaşmayı gösteren boşluk suyu basıncı artışının numunenin rölatif sıklığı, CSR ve çevrim sayısına bağlı olduğu görülmektedir.
- 4) Sıvılaşma üzerinde frekansın etkisinin az olduğu deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile tespit edilmiştir.
- 5) Yukarıda belirtilen sonuçların literatürdeki çalışmalarla benzerlik gösterdiği elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Airey D. W. ve Wood D. M., (1987) “An Evulation of Direct Simple Shear Tests on Clay” , Journal of Geotechnical Engineering , Vol. 37, pp. 25-35, 1987
- Altun S., (2002) “Burulmalı Kesme Deney Aleti ile Zeminlerin Dinamik Davranış Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maslak, İstanbul, 2002.
- Altun S., Ansal A., (2003) “Tekrarlı Gerilmeler Altında Kumların Gerilme Şekil Değişirme Özellikleri” , İTÜ Dergisi/d, Mühendislik, Cilt 2, Sayı 4, 25-34, Ağustos 2003.
- Ansal A., (1982) “Kumlu Zemin Tabakalarında Sıvılaşma” , Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, Cilt 9, Sayı 37, Sayfa 21-102, 1982.
- ASTM, (2000) “ Standart Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils” D 6528-07, May 2000.
- Kammerer A. M., (2002) “Undrained Response of Monterey 0/30 Sand Under Multidirectional Cyclic Simple Shear Loading Conditions” Ph. D. Thesis, California University, Berkeley, July 2002.
- Kramer S. L., (2003) “ Geoteknik Deprem Mühendisliği” , (Çev., K., Kayabalı) Gazi Kitabevi, Ankara, Temmuz 2003.
- Özçep F., (2006) “Zeminlerin Statik ve Dinamik Analizi” , TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, Ankara, Kasım 2006.
- Sivathayalan S., (1994) “Static, Cyclic and Post Liquefaction Simple Shear Response of Sands” Master Thesis, British Columbia Univeristy, Vancouver, Canada, December 1994.
- Tohumcu P., (2007) “Depremde Tabakalı Kum Zeminde Oluşan Sıvılaşma ve Sıvılaşma Sonrası Davranışın Model Deneylerle Araştırılması” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Nisan 2007.
- Ural N., Özocak A., Önalp A., (2007) “Dinamik Üç Eksenli Deneyde Frekansın Etkisi” Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim 2007.
- Ural N., Önalp A. (2005) “Dinamik Üç Eksenli Kesme Deneyinin Monterey Kumu İle Kalibrasyonu” , Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Mart 2005.
- Vucetic M., (1994) “Cyclic Threshold Shear Strains In Soils” , Journal of Geotechnical Engineering , Vol. 120, No. 12, December 1994, pp. 2208-2228.
- Yoshimine M., Hosono Y., (2004) “Liquefaction Of Sand In Simple Shear Condition”, International Conferance On Cyclic Behaviour Of Soils And Liquefaction Phenomena, Bochum, German, April 2004, pp.129-136.

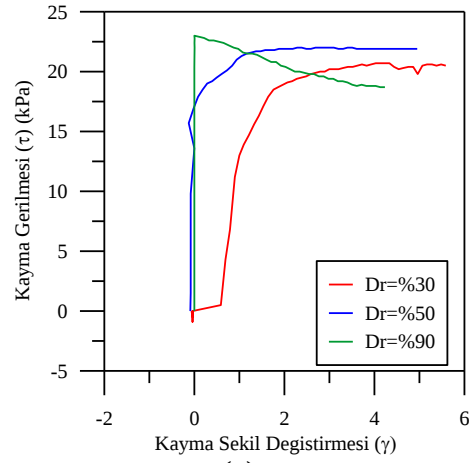
EKLER

Ek 1. Direkt Kesme Deney Sonuçları

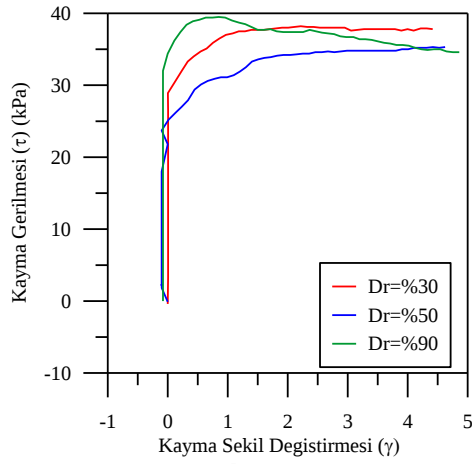
Ek 2. Kuru Dinamik Basit Kesme Deneyleri

Ek 3. Suyu Doygun Dinamik Basit Kesme Deneyleri

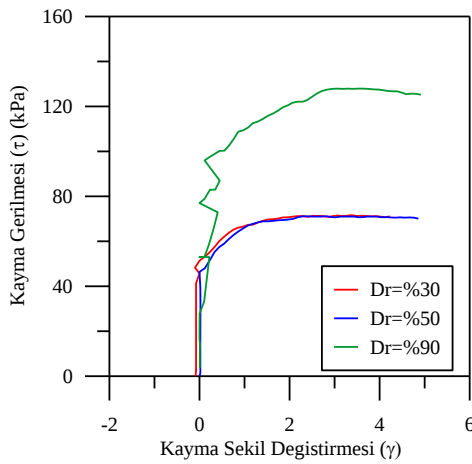
Ek 1. Direkt Kesme Deney Sonuçları



(a)

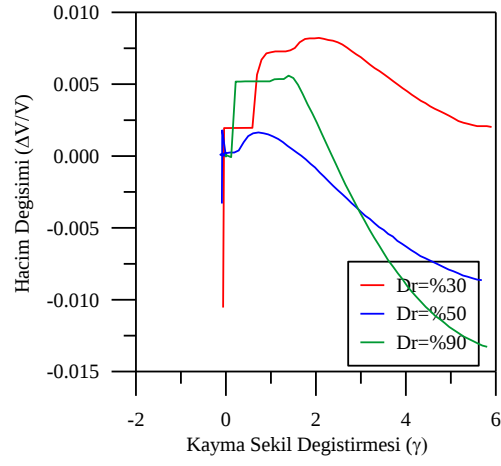


(b)

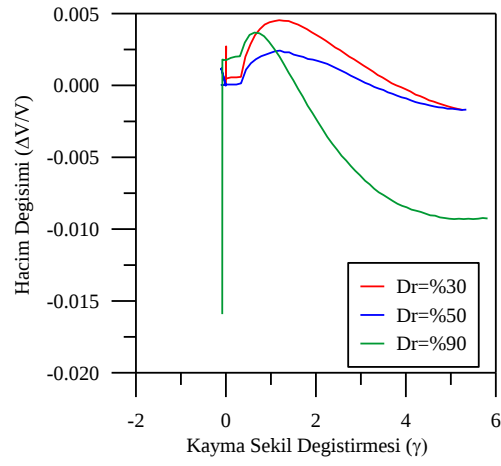


(c)

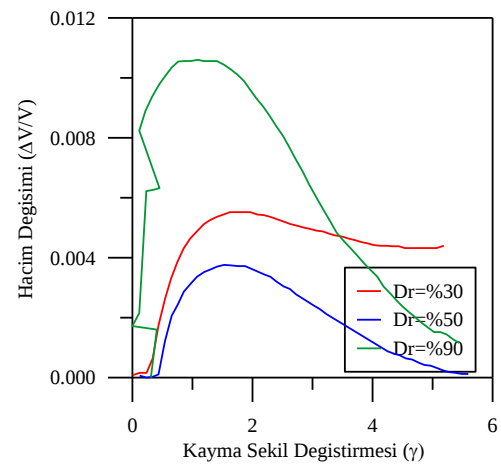
Şekil Ek 1.1 Farklı rölatif sıklıklarda (%30, %50, %90) hazırlanan numunelerde uygulanan düşey efektif gerilmenin (a) 25kPa (b) 50kPa (c) 100kPa için, direkt kesme deneyinden elde edilen kayma şekil değıştirmesi-kayma gerilmesi ilişkisi



(a)



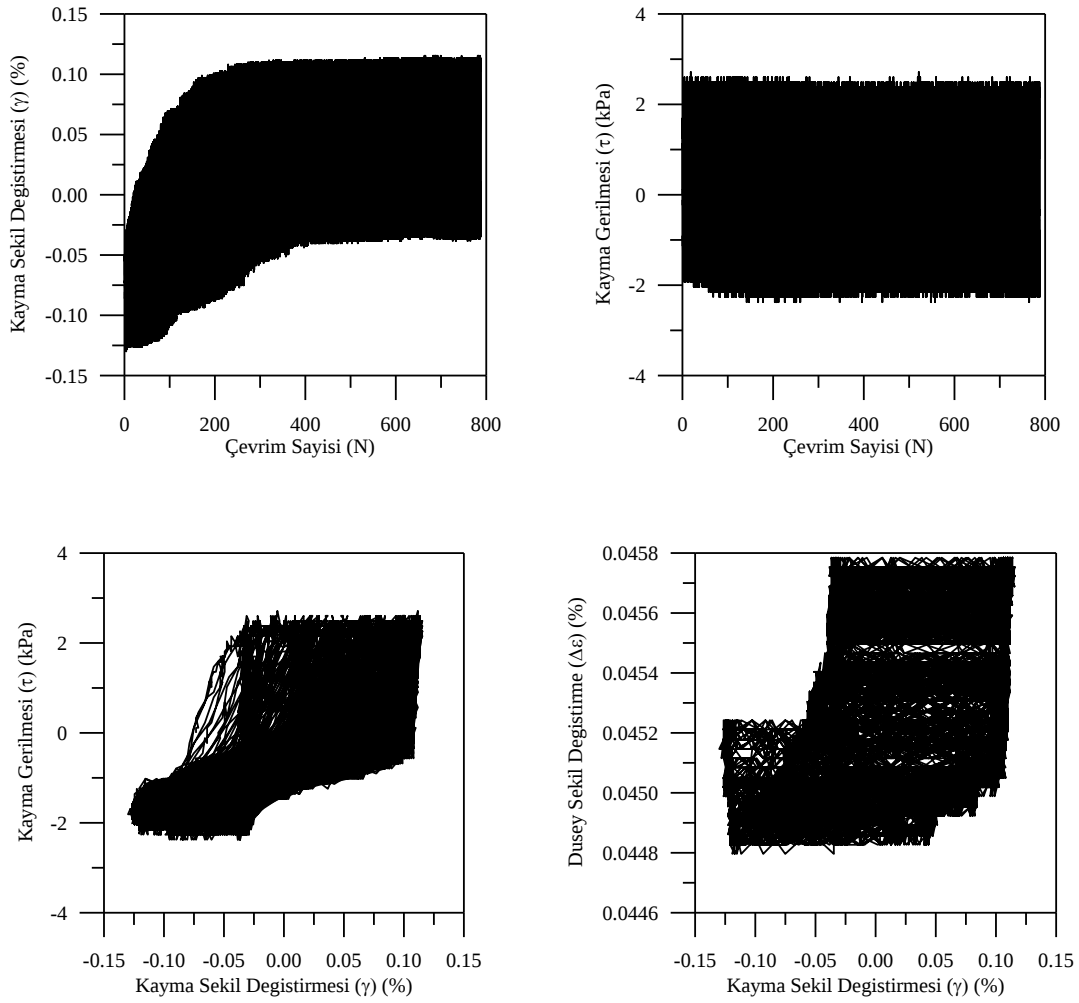
(b)



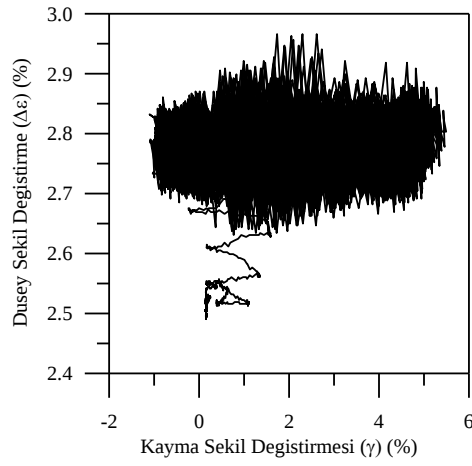
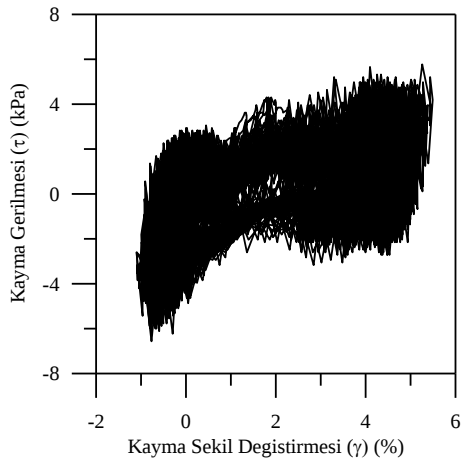
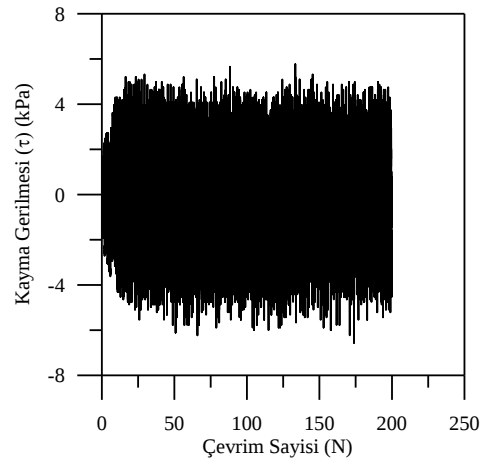
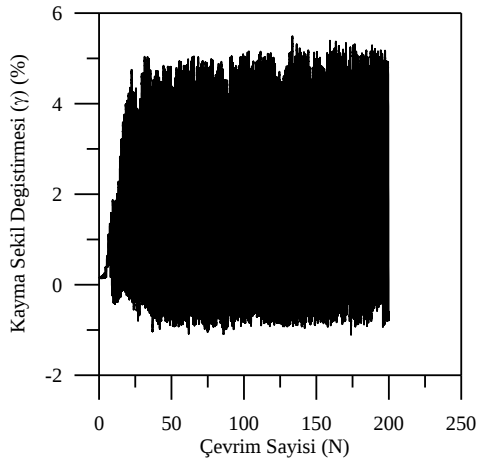
(c)

Şekil Ek 1.2 Farklı rölatif sıkılıklarda (%30, %50, %90) hazırlanan numunelerde uygulanan düşey efektif gerilmenin (a) 25kPa (b) 50kPa (c) 100kPa için, direkt kesme deneyinden elde edilen kayma şekil değıştirmesi-hacim değışimi ilişkisi

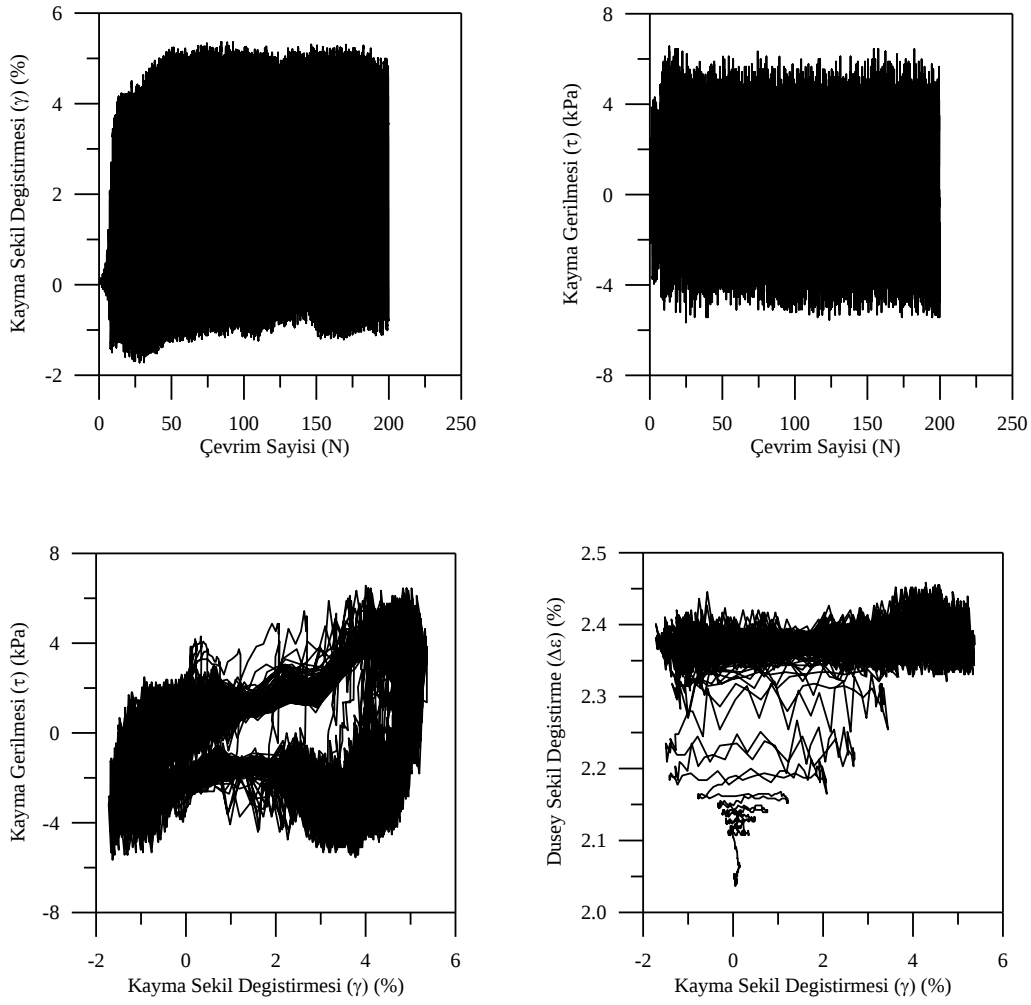
Ek 2. Kuru Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları



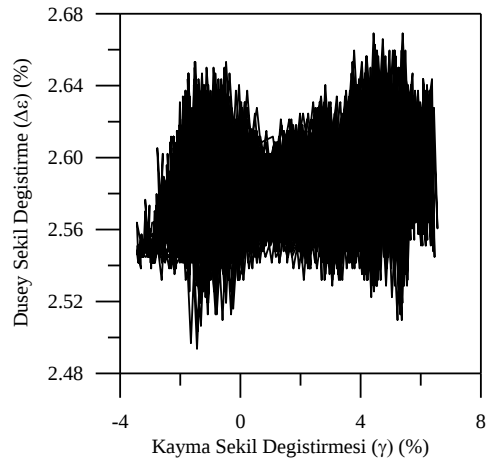
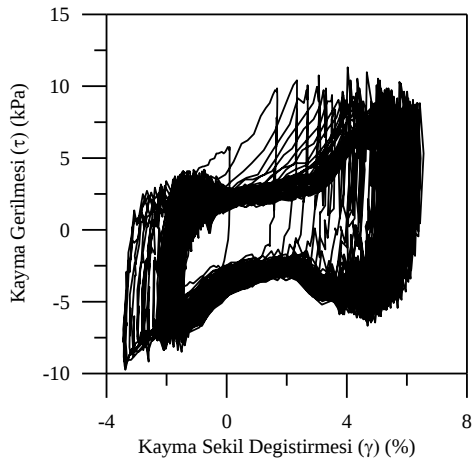
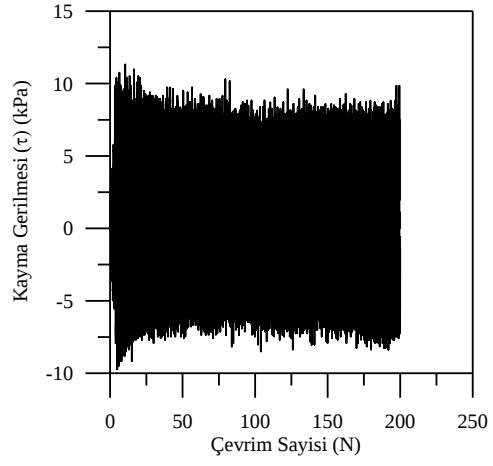
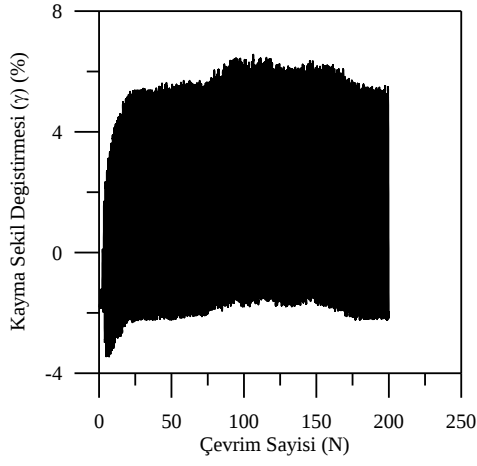
Şekil Ek 2.1 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



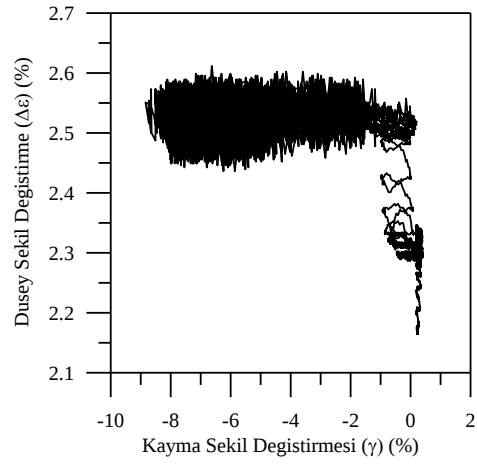
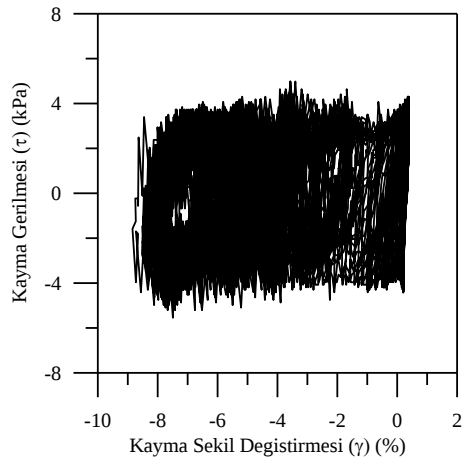
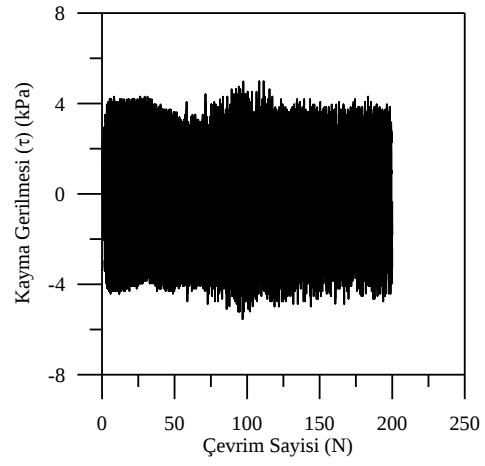
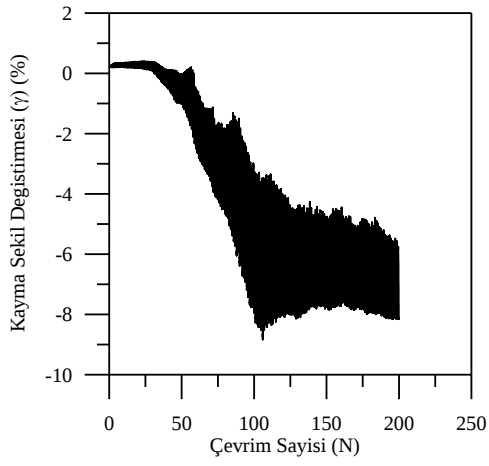
Şekil Ek 2.2 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



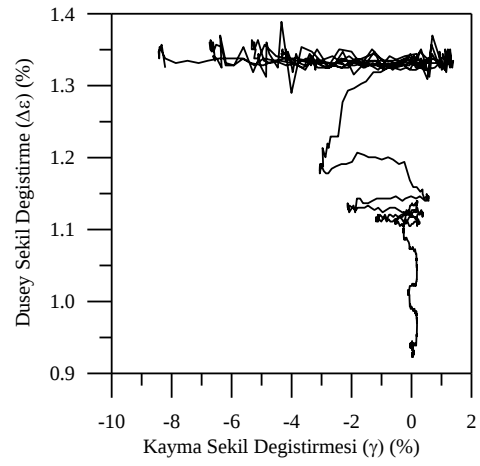
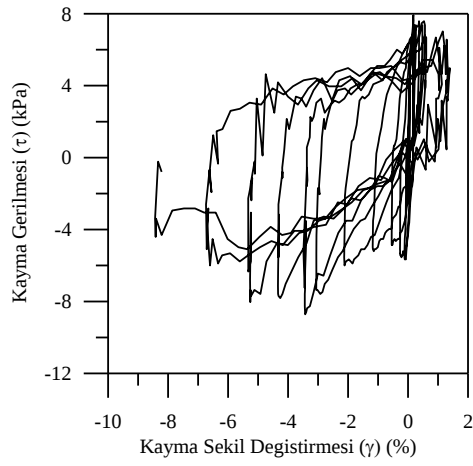
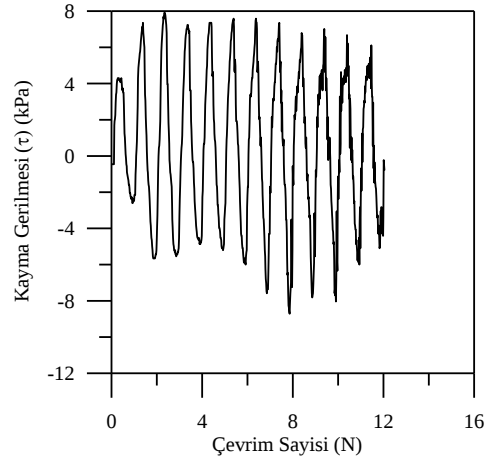
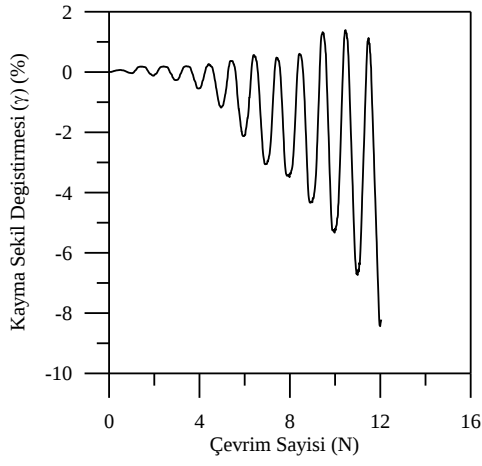
Şekil Ek 2.3 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



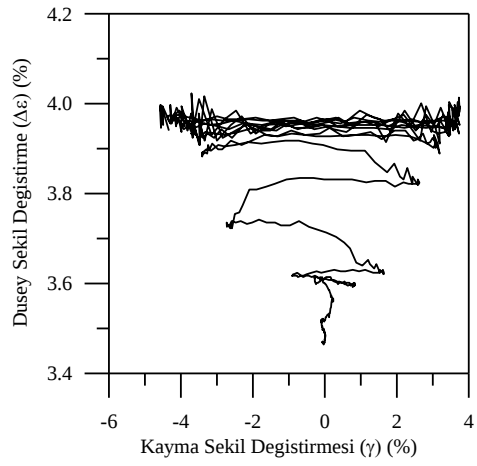
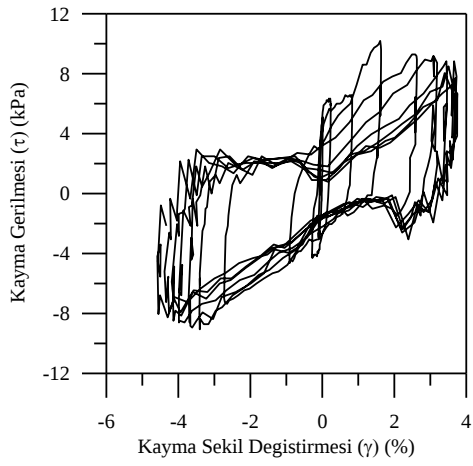
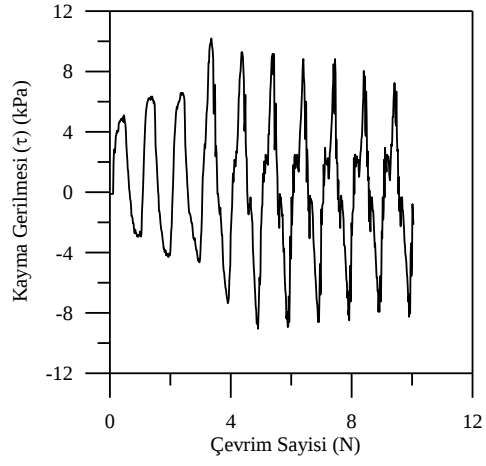
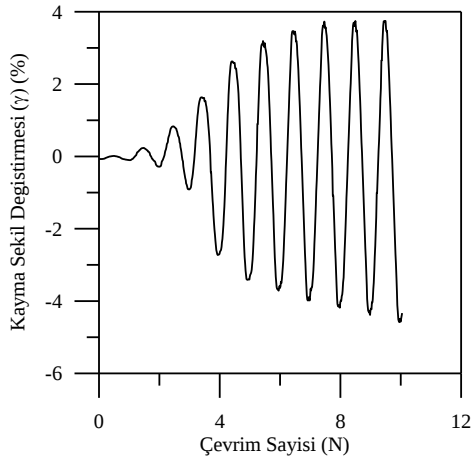
Şekil Ek 2.4 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



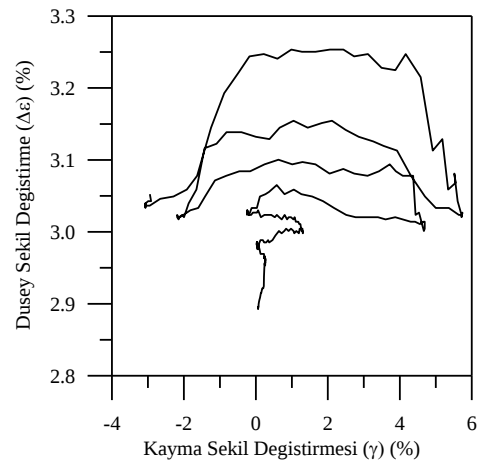
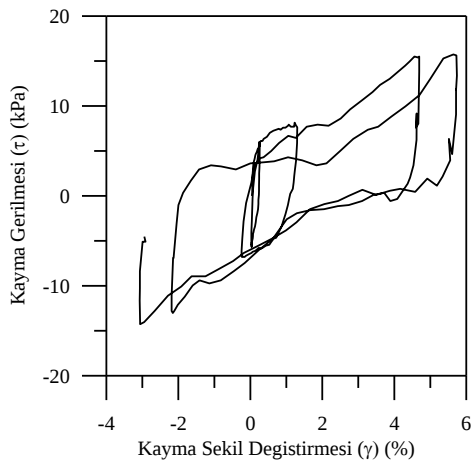
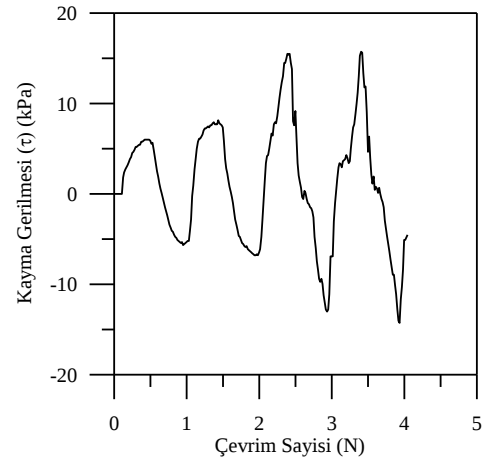
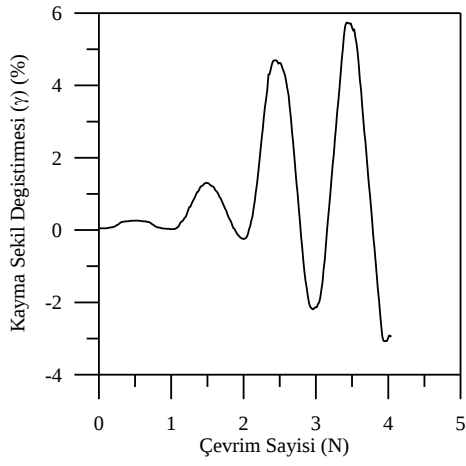
Şekil Ek 2.5 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



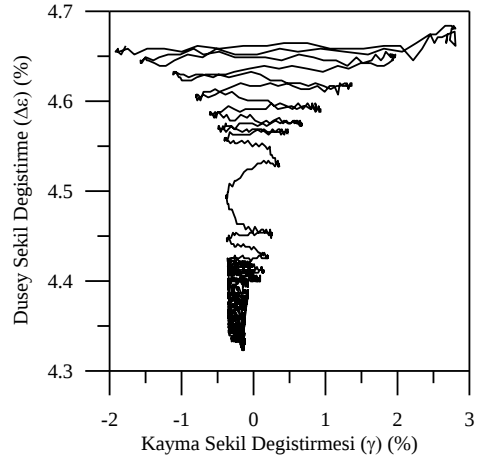
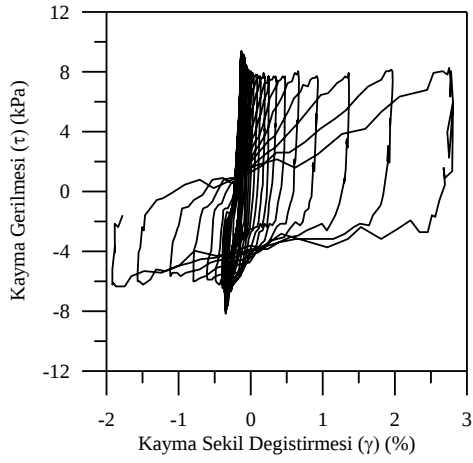
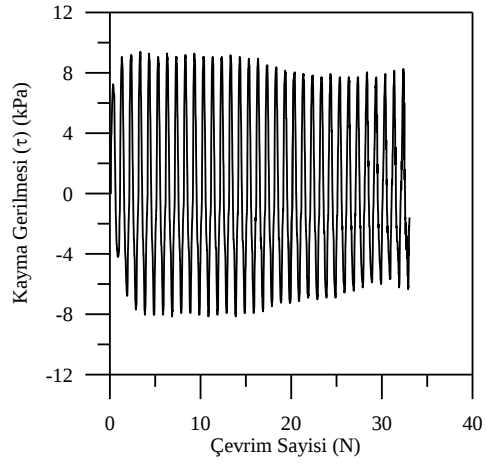
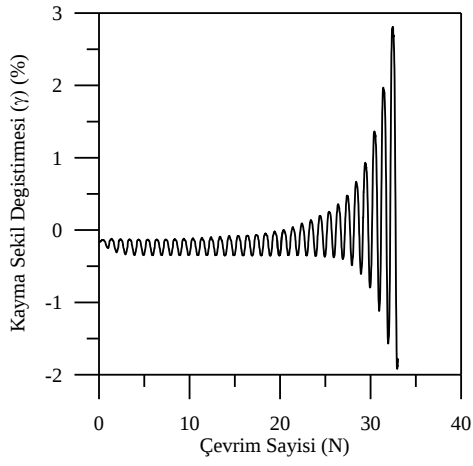
Şekil Ek 2.6 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



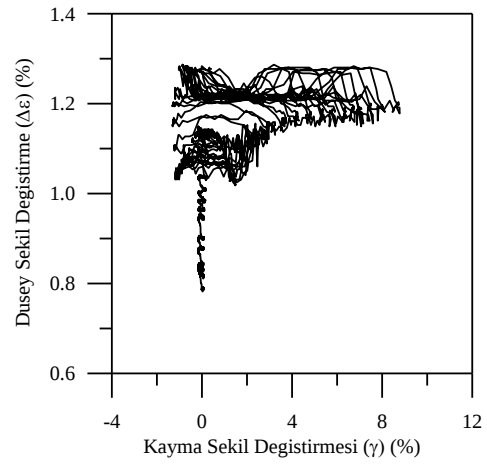
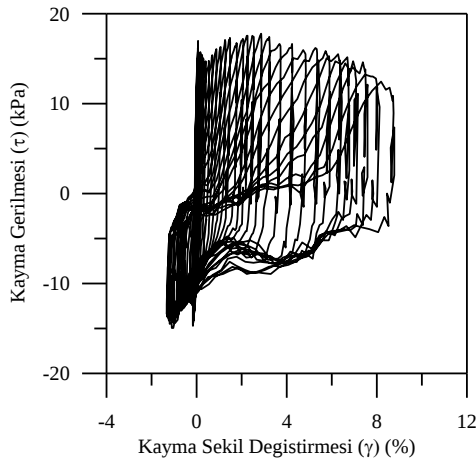
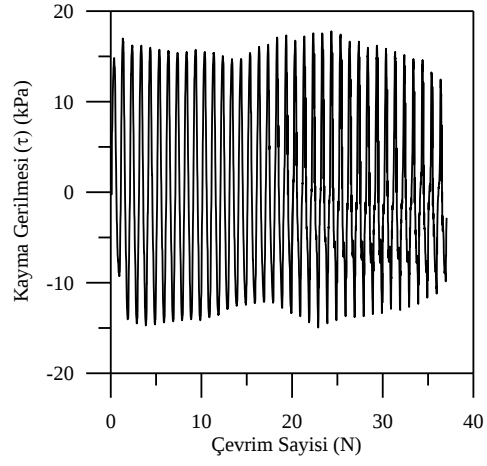
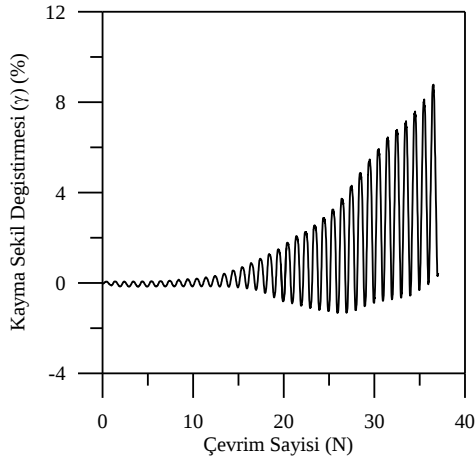
Şekil Ek 2.7 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



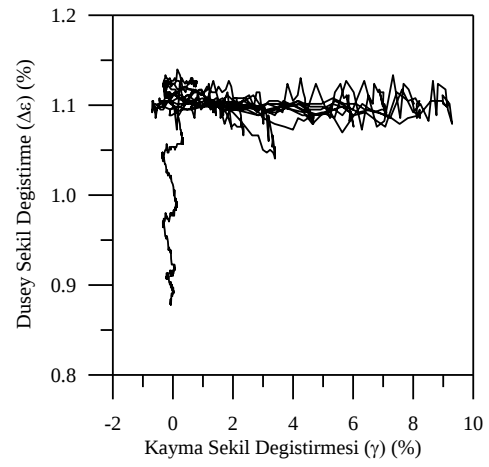
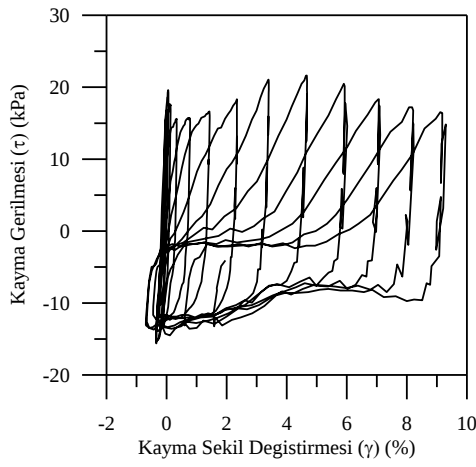
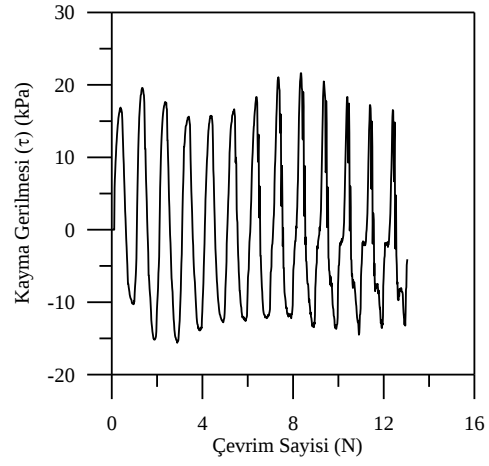
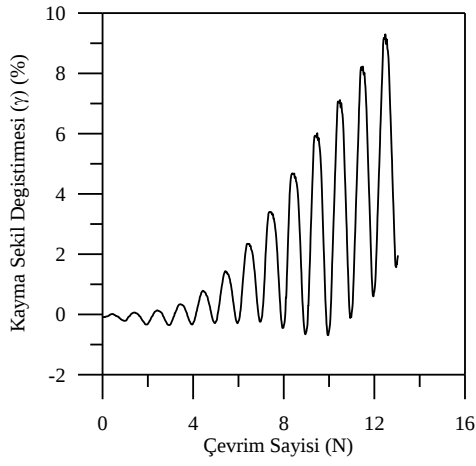
Şekil Ek 2.8 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



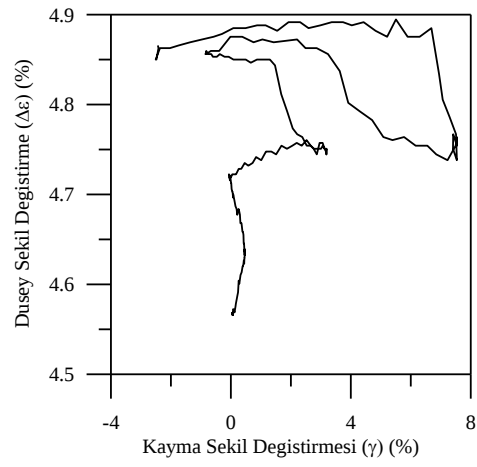
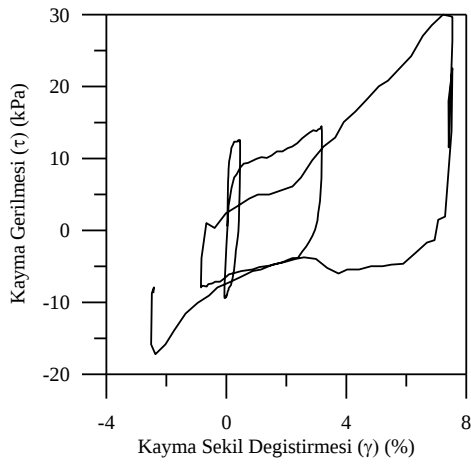
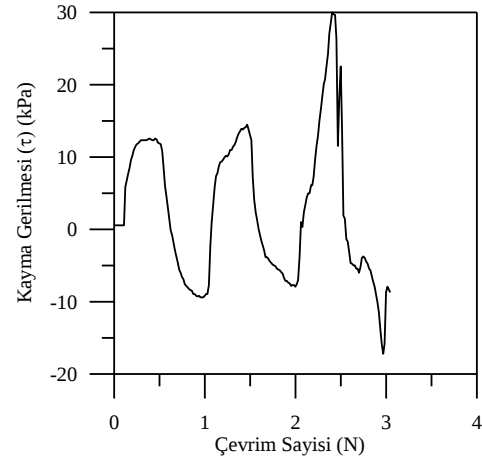
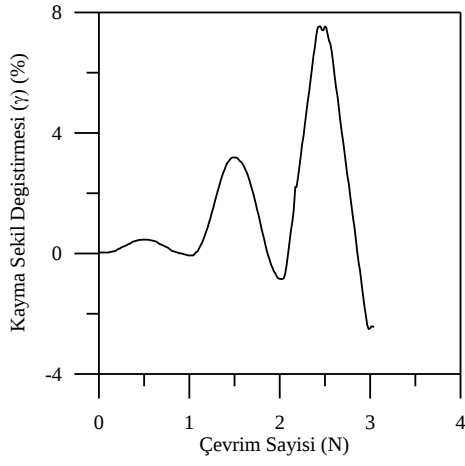
Şekil Ek 2.9 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



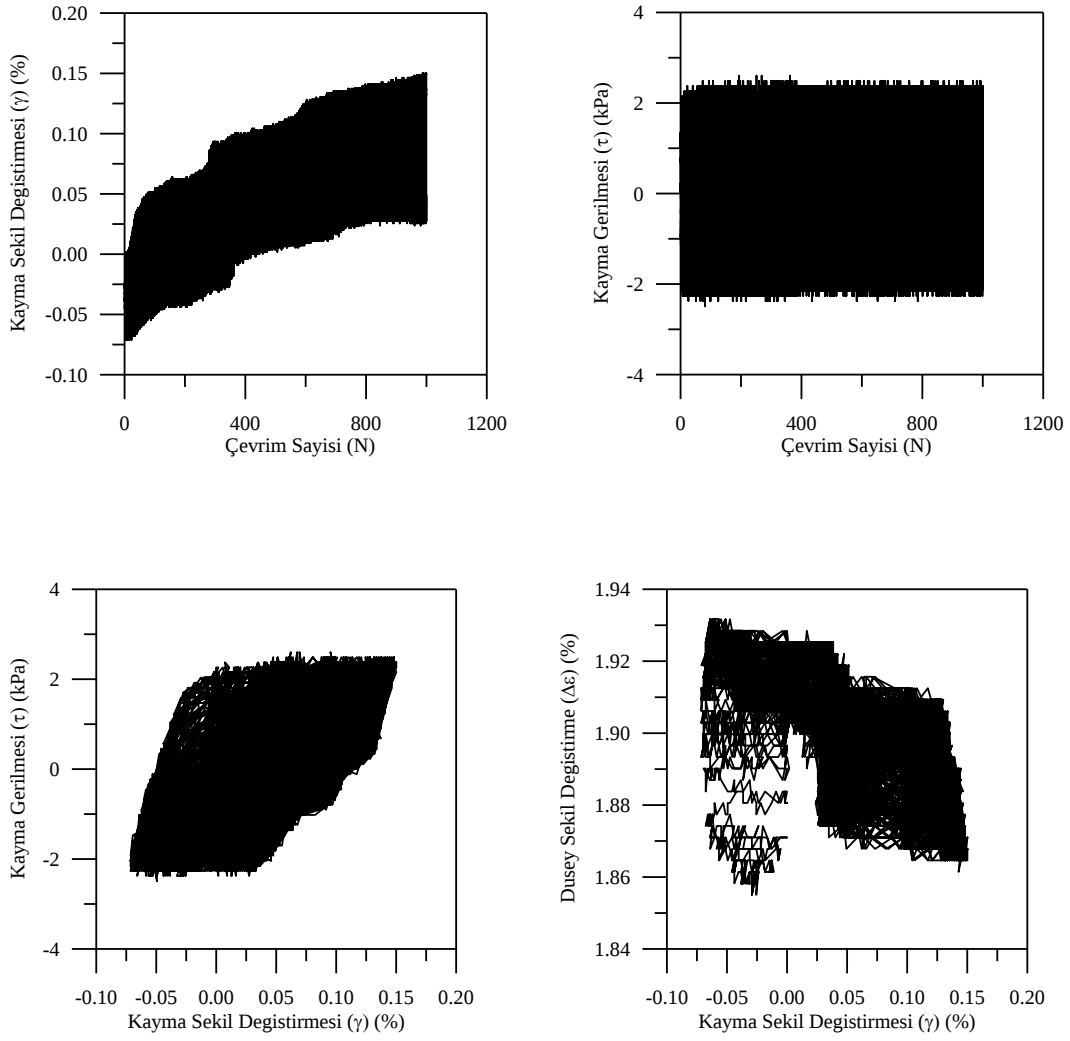
Şekil Ek 2.10 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düsey şekil değiştirme eğrileri



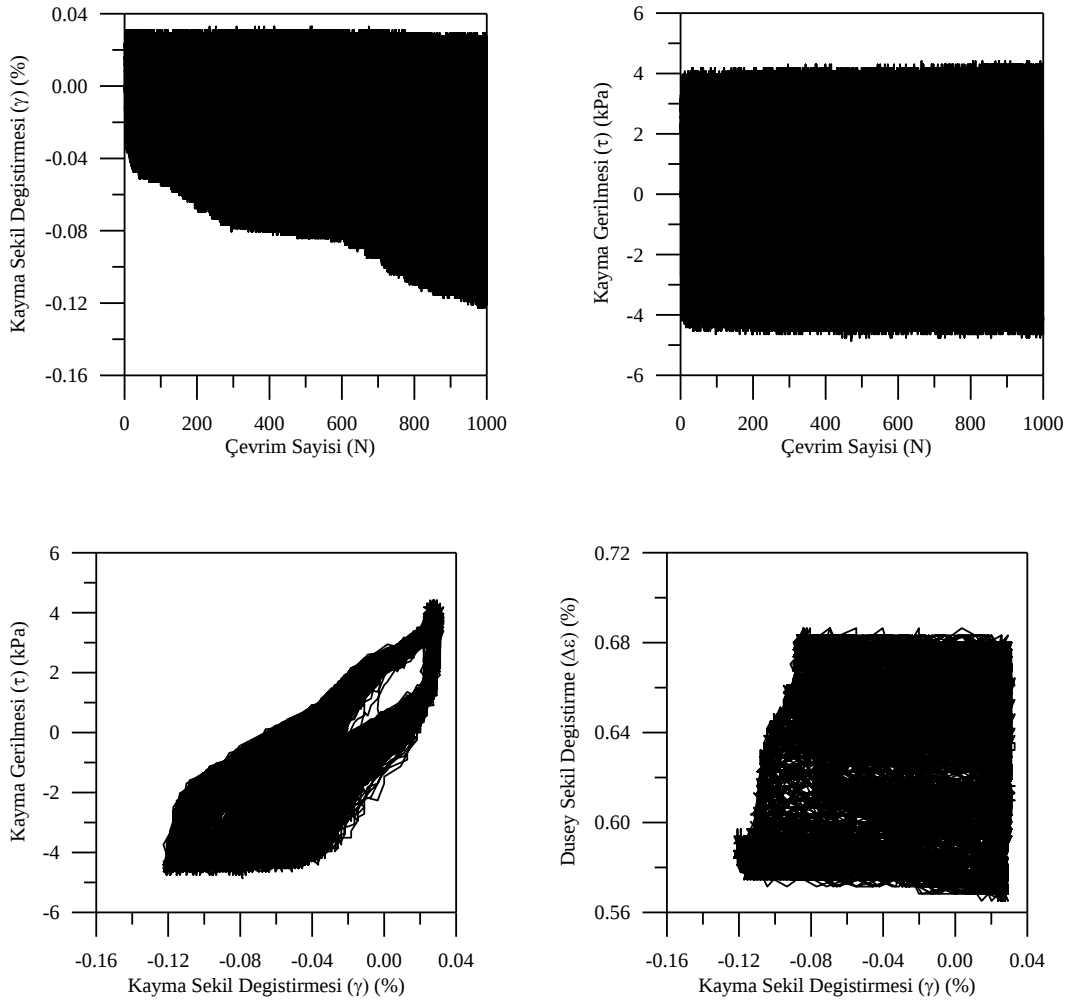
Şekil Ek 2.11 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



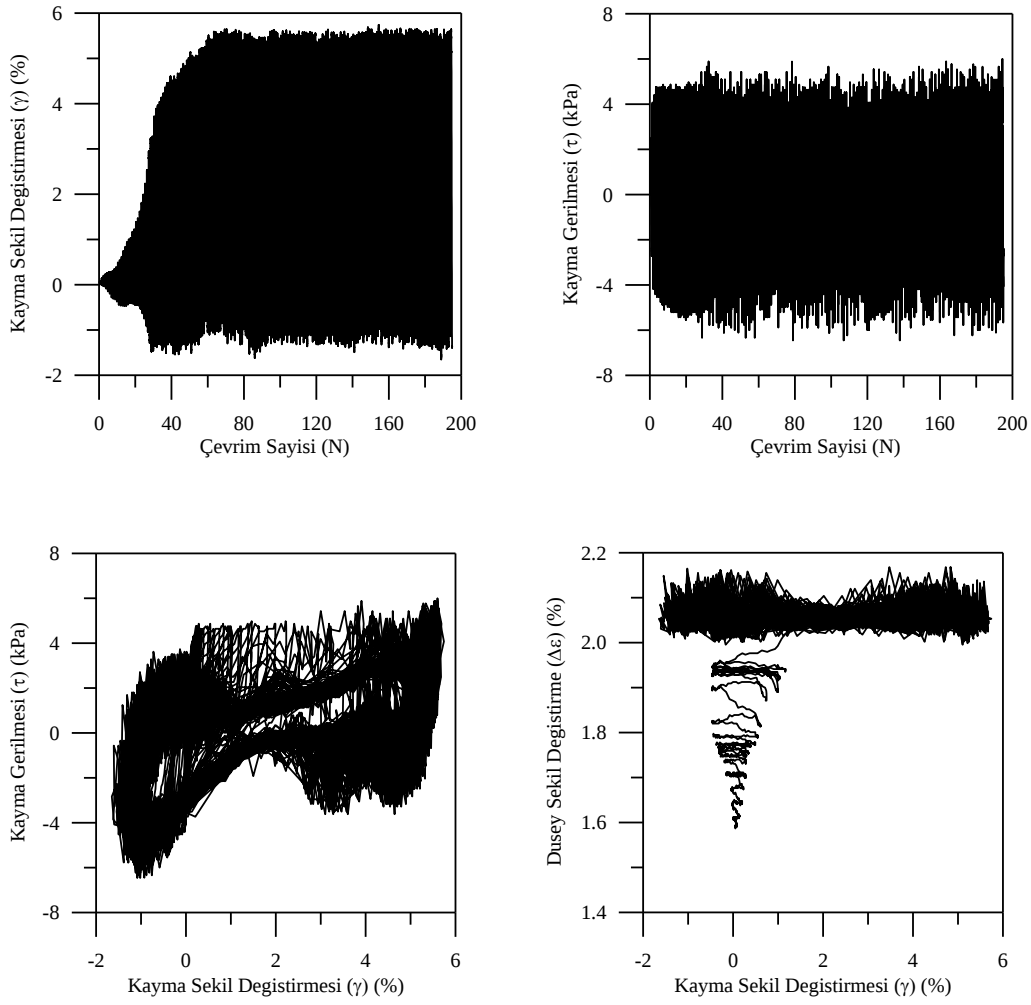
Şekil Ek 2.12 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



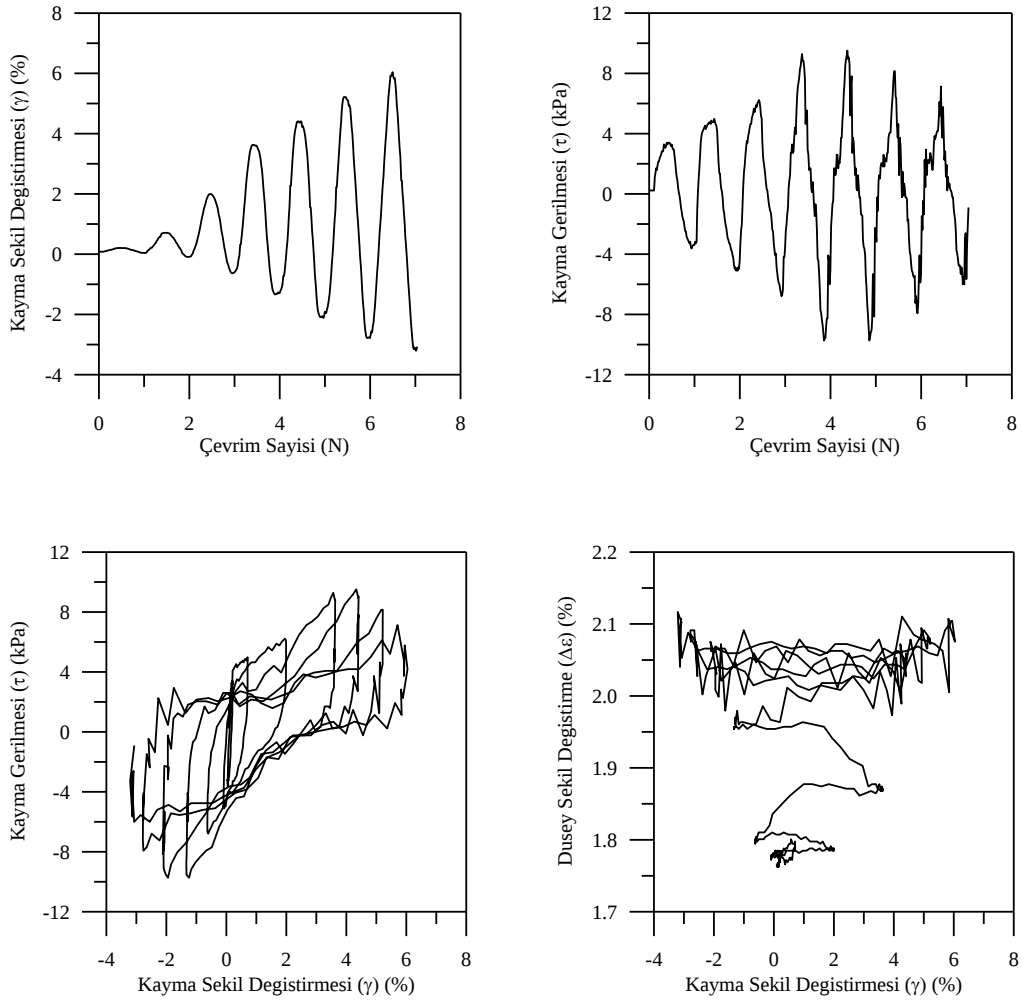
Şekil Ek 2.13 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



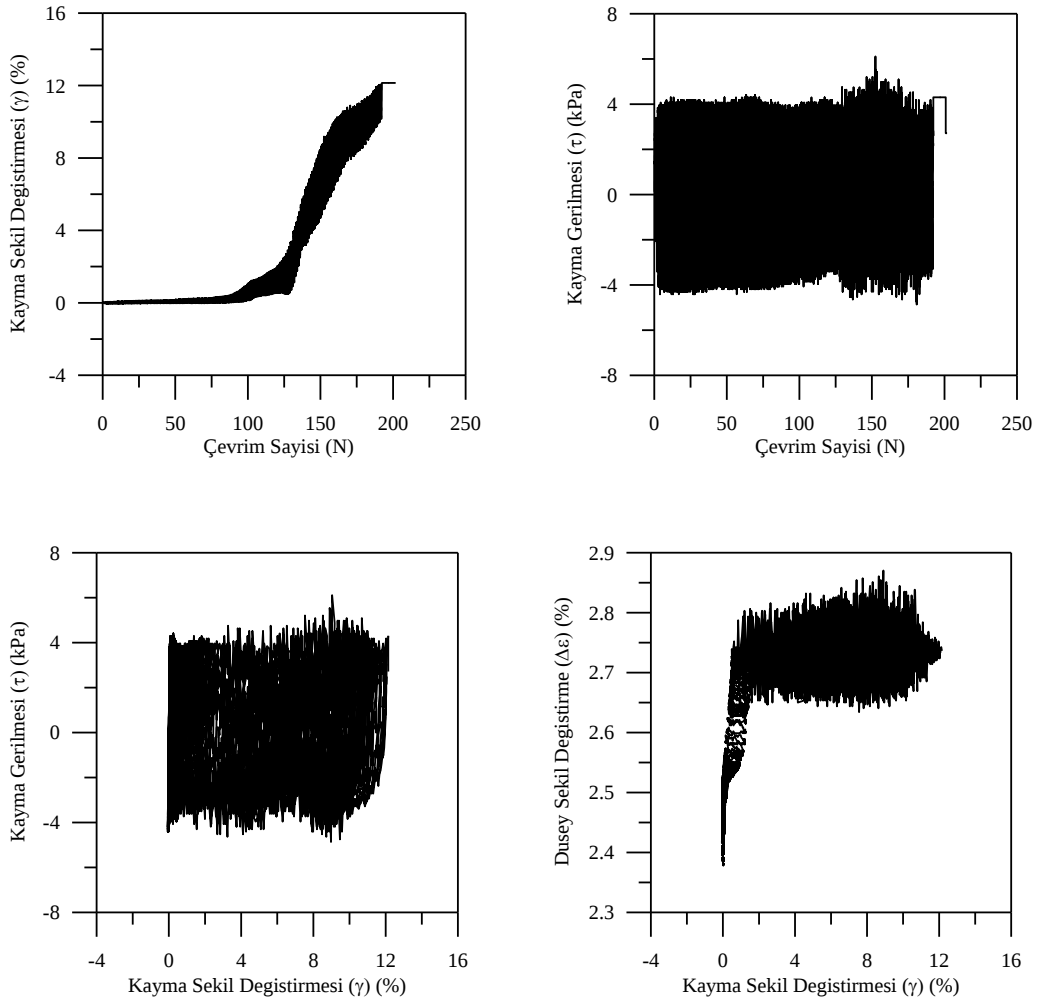
Şekil Ek 2.14 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



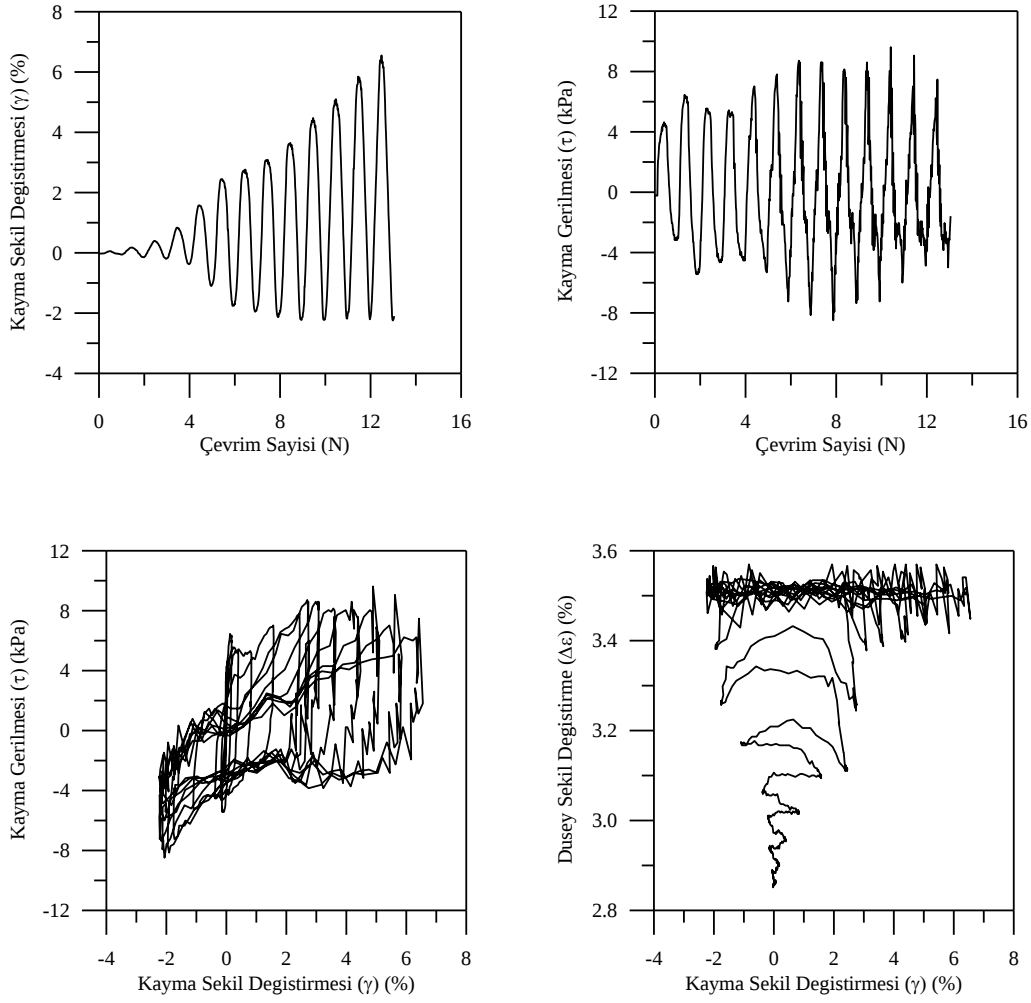
Şekil Ek 2.15 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



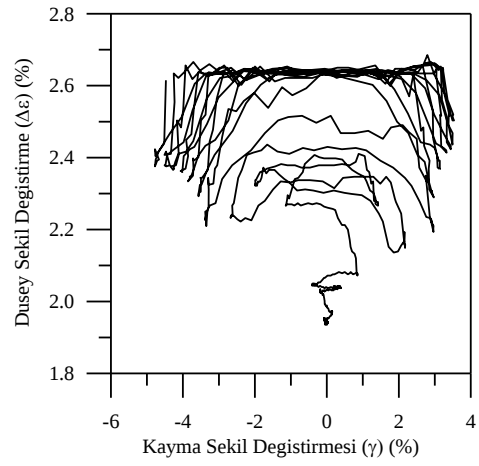
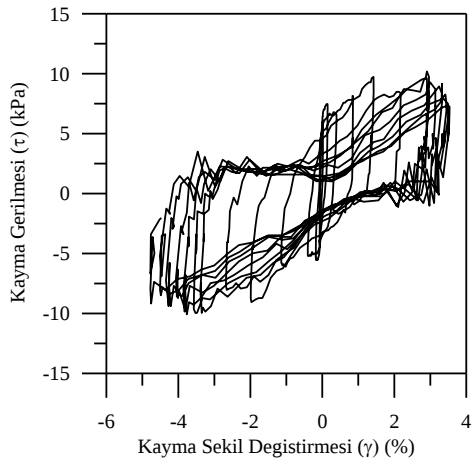
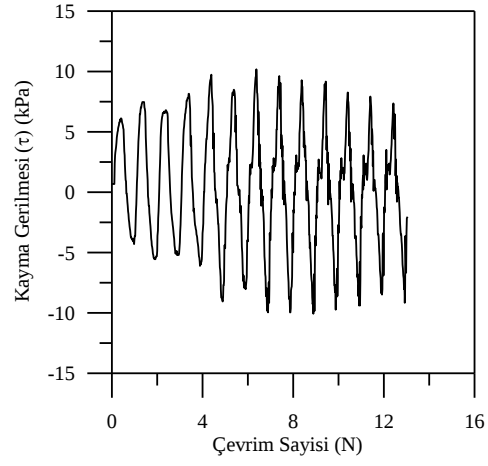
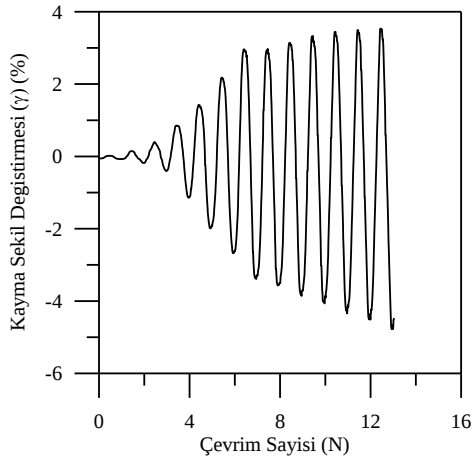
Şekil Ek 2.16 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



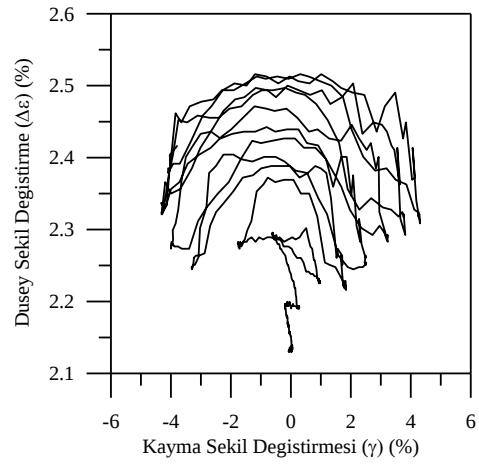
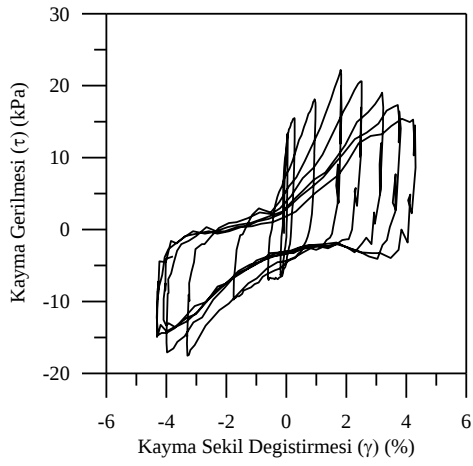
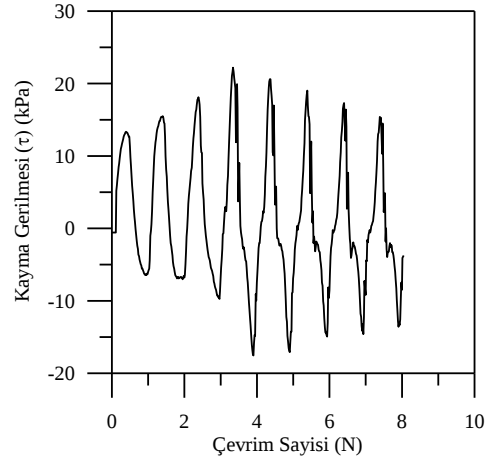
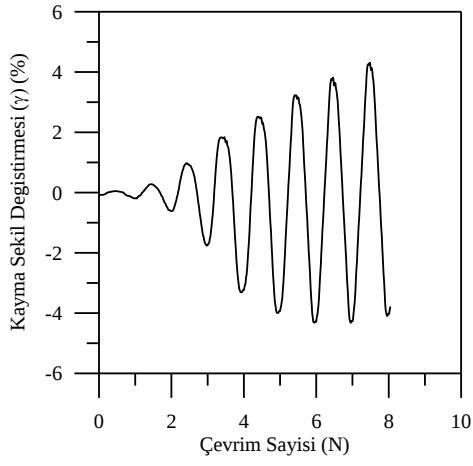
Şekil Ek 2.17 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



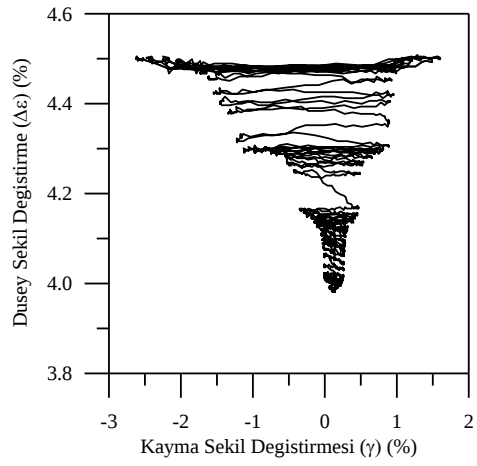
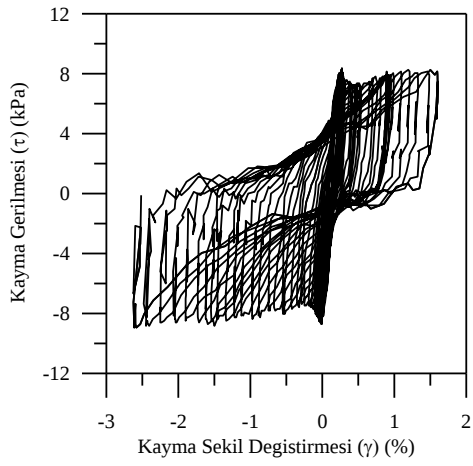
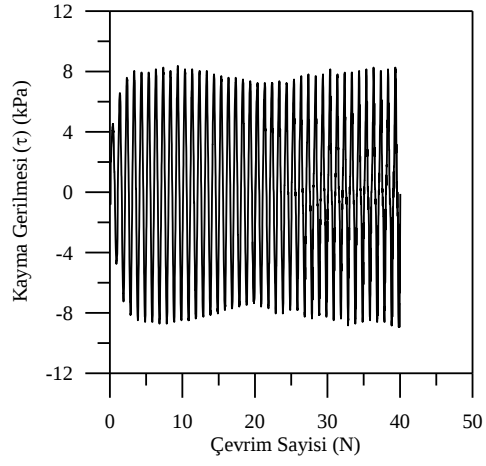
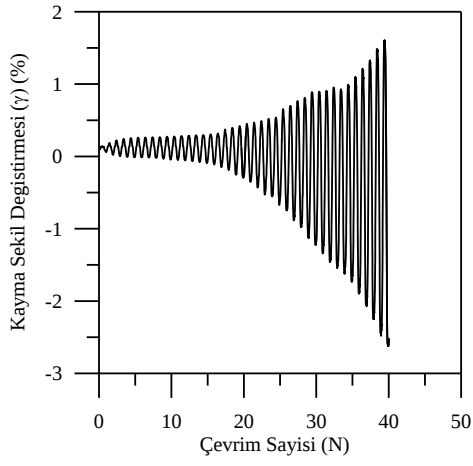
Şekil Ek 2.18 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



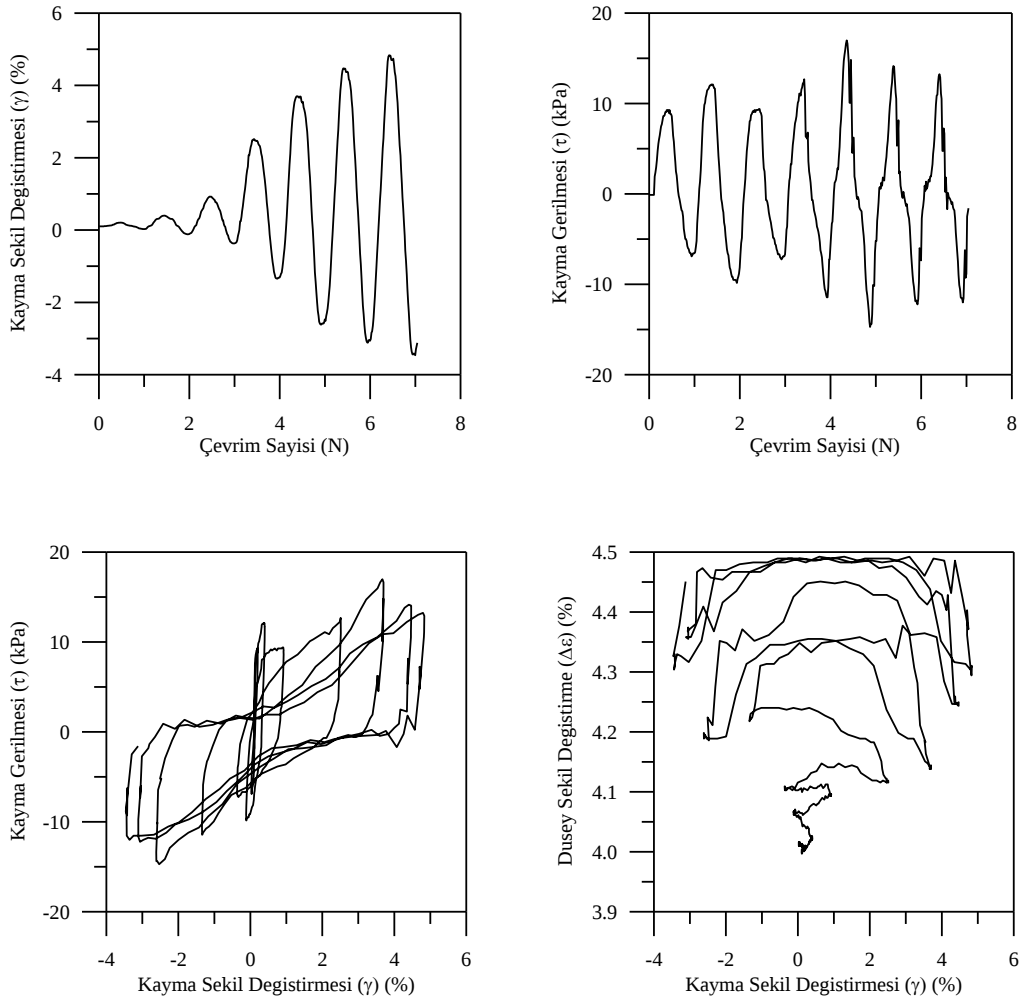
Şekil Ek 2.19 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



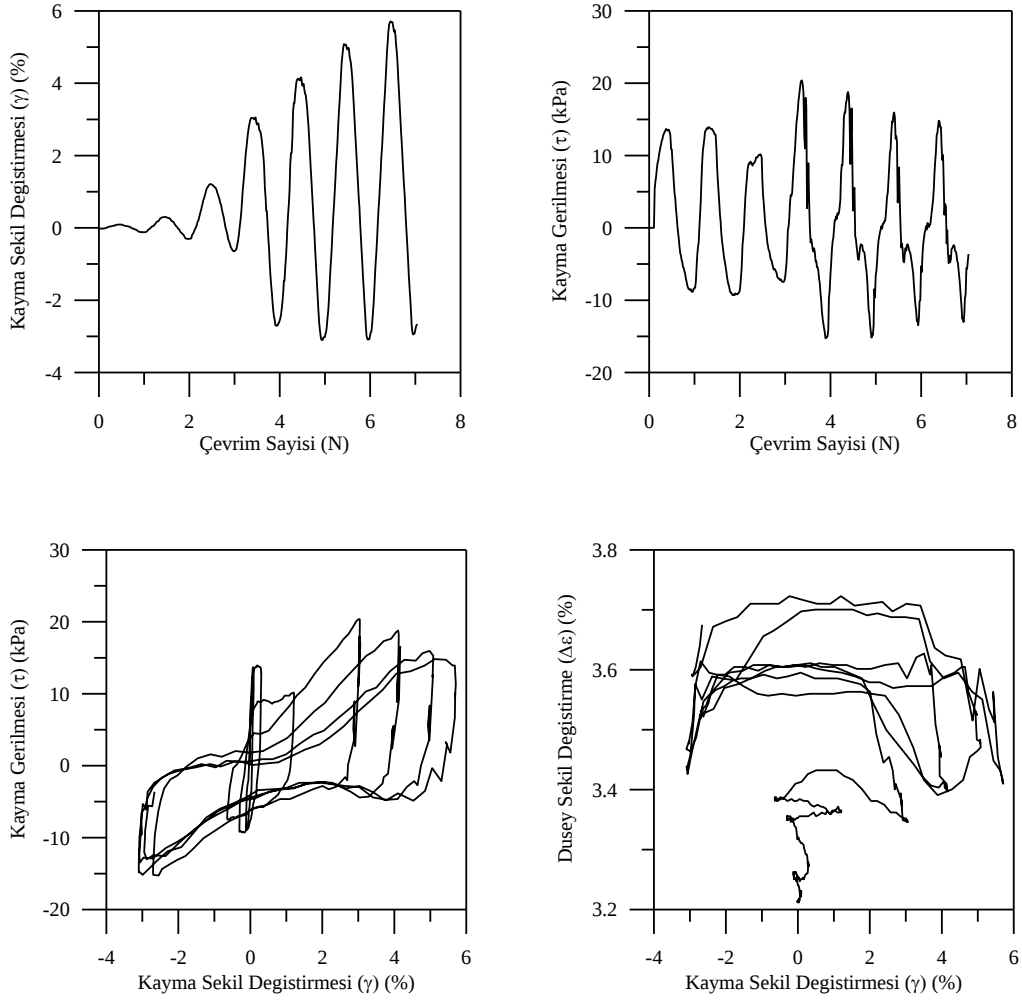
Şekil Ek 2.20 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



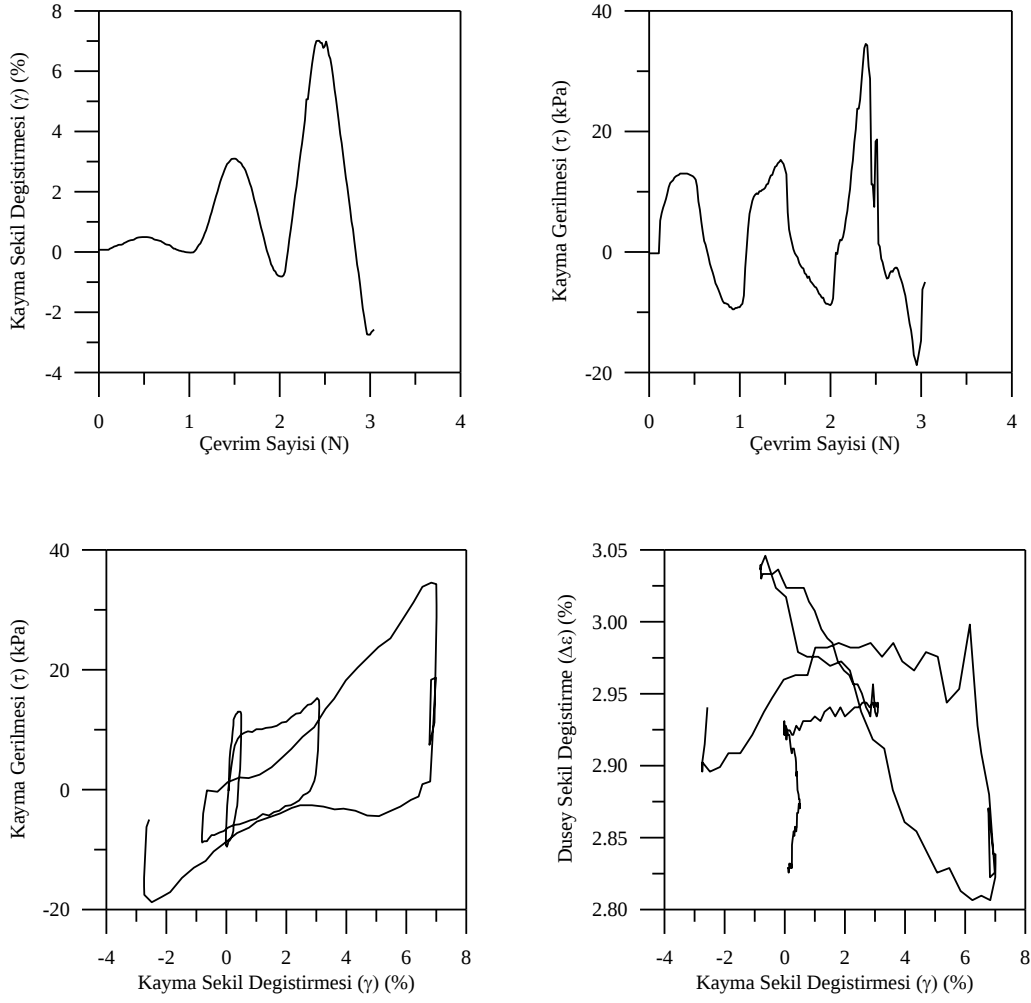
Şekil Ek 2.21 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



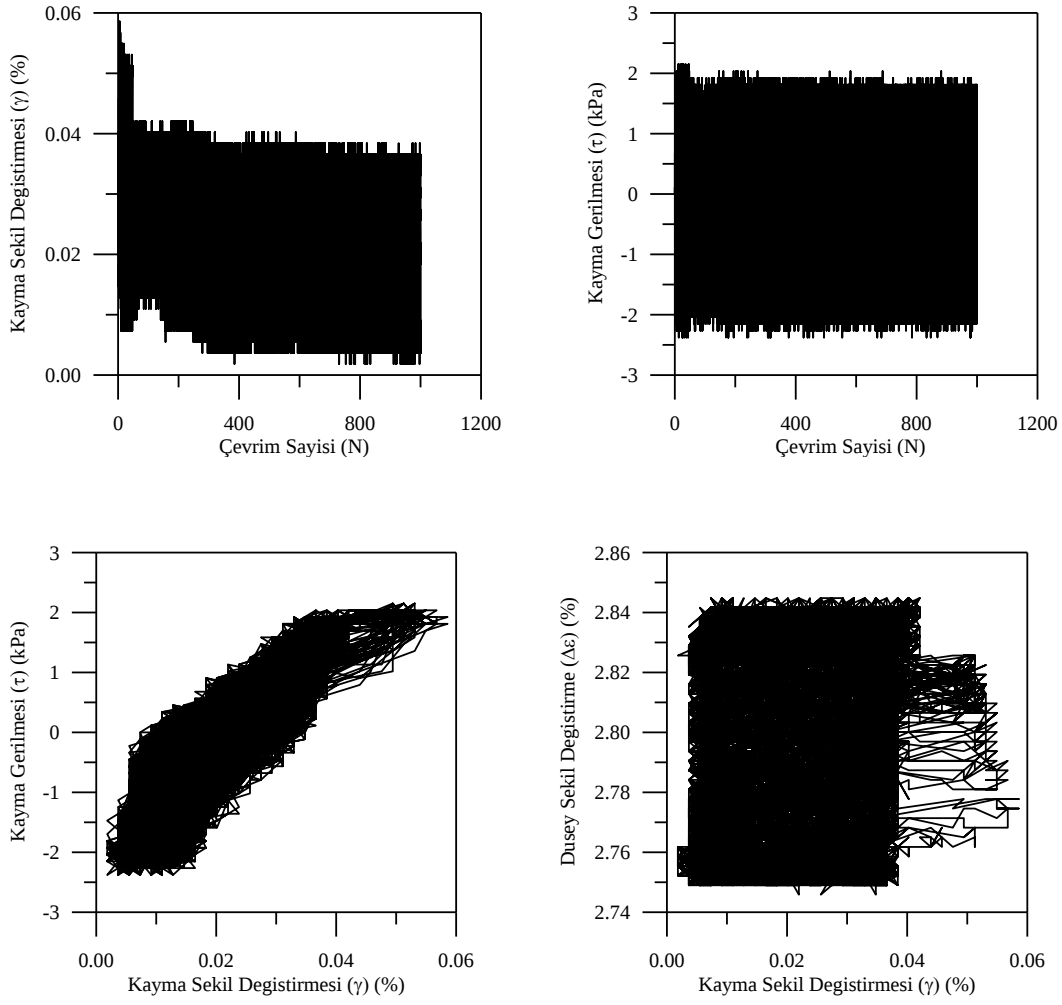
Şekil Ek 2.22 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



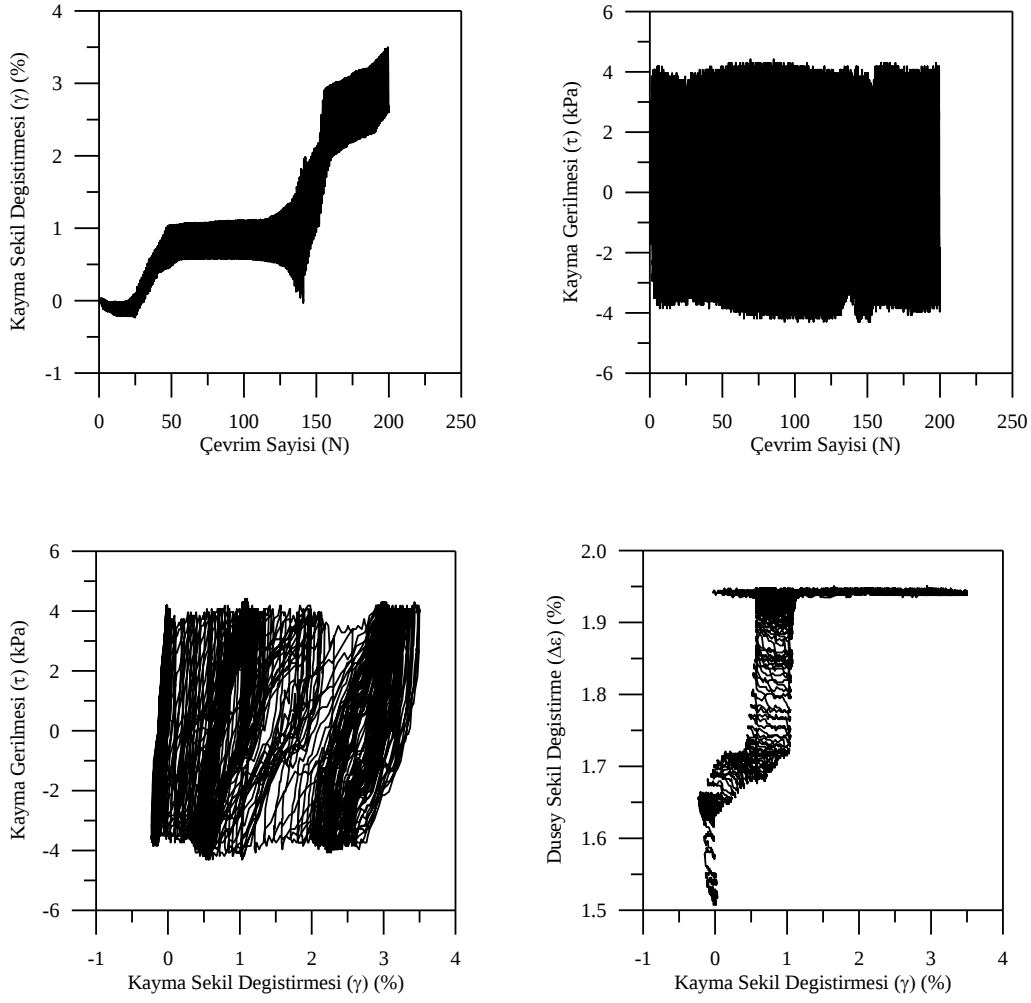
Şekil Ek 2.23 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düsey şekil değiştirme eğrileri



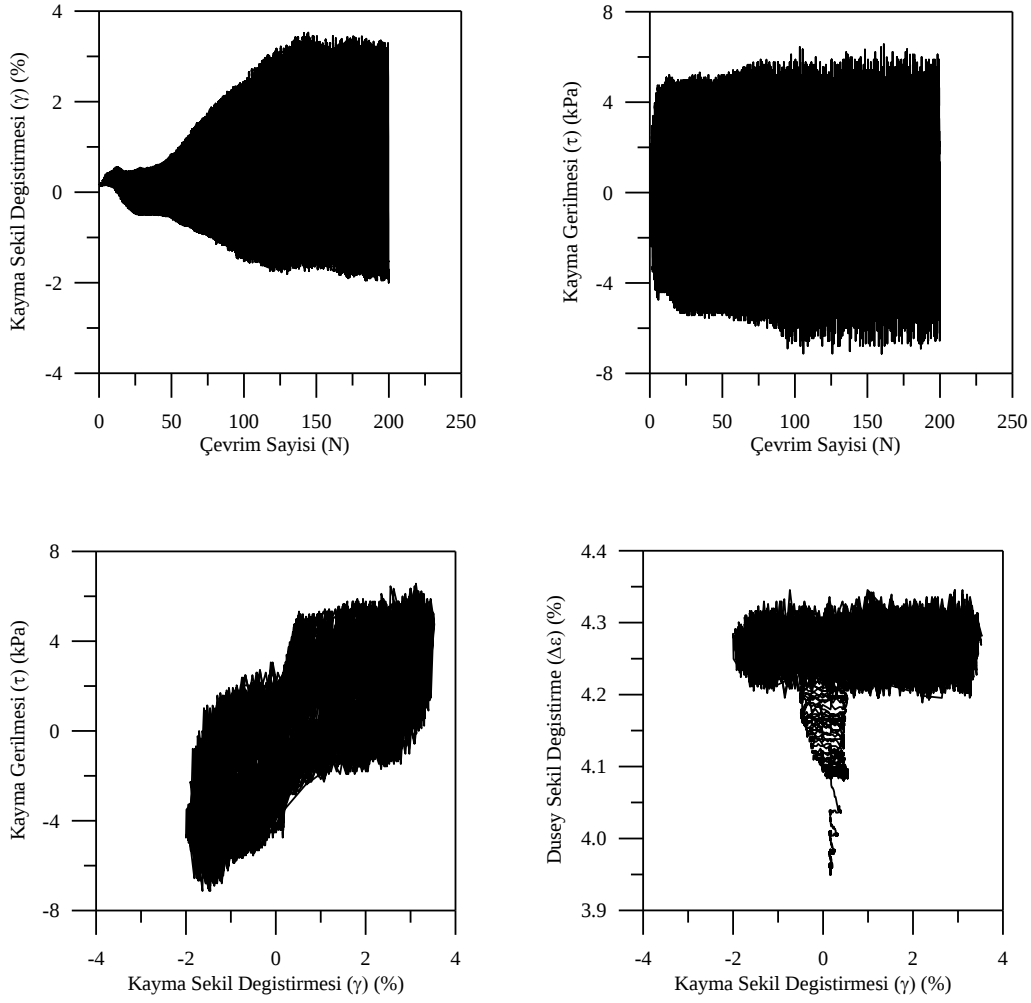
Şekil Ek 2.24 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düsey şekil değiştirme eğrileri



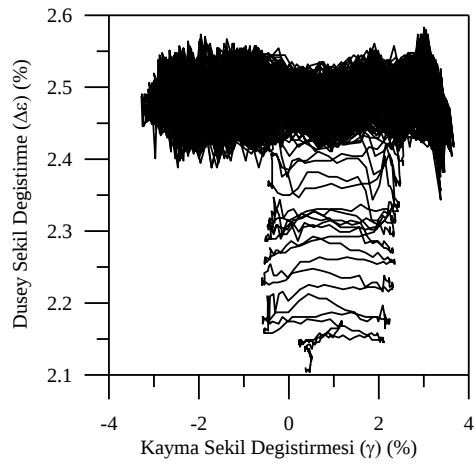
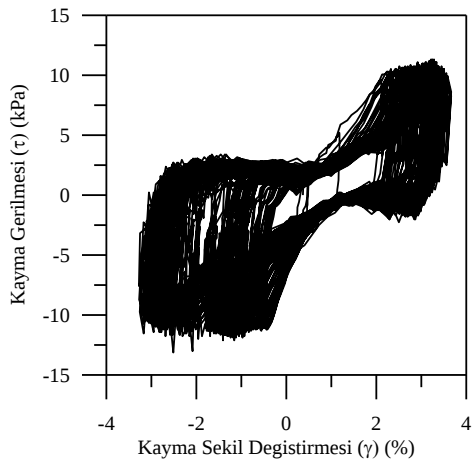
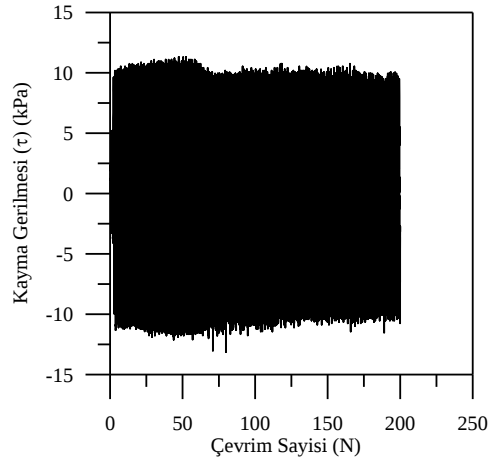
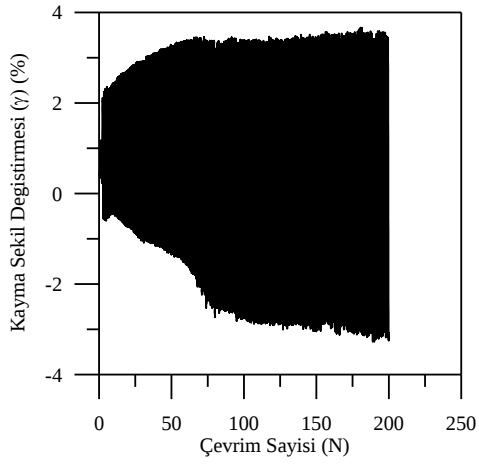
Şekil Ek 2.25 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



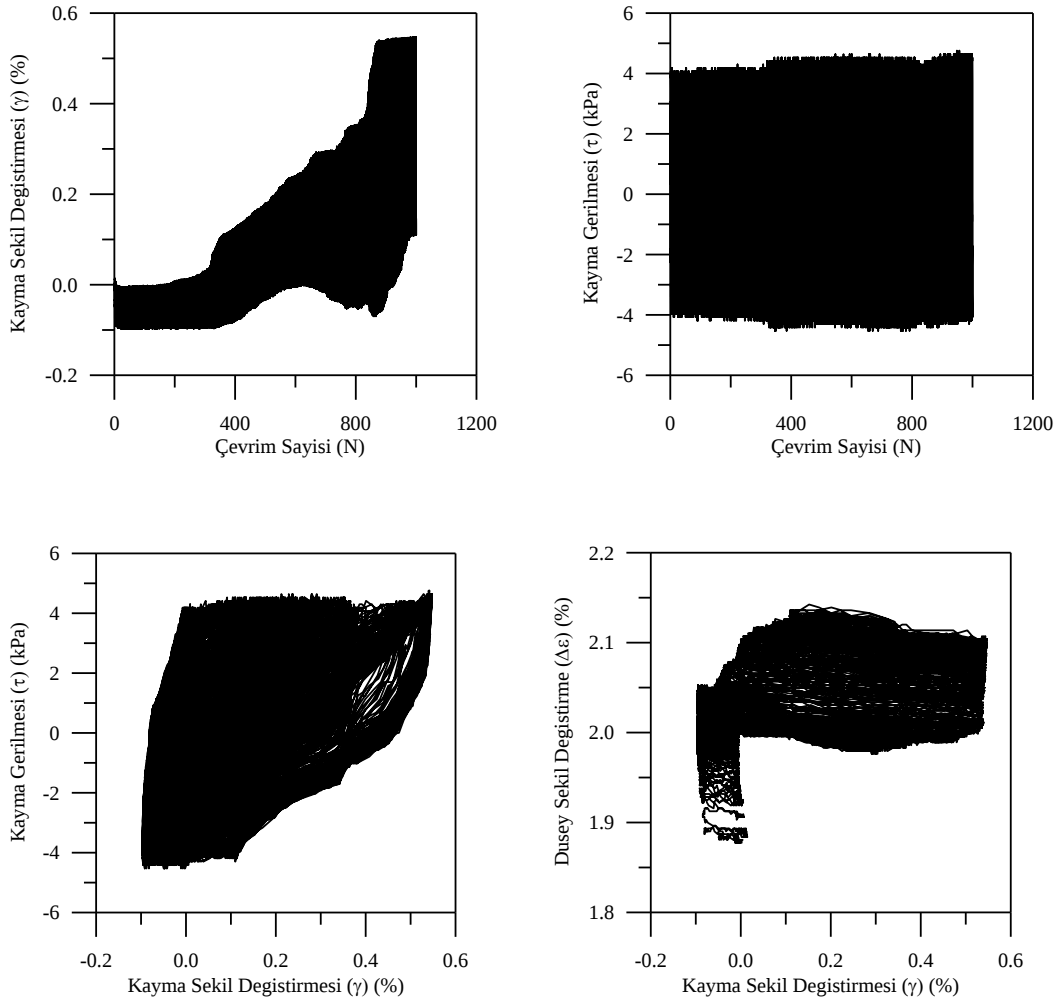
Şekil Ek 2.26 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



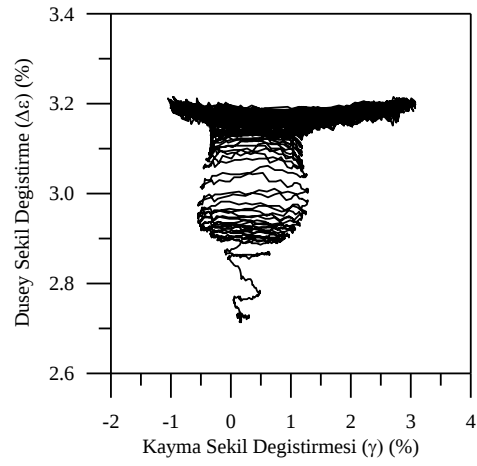
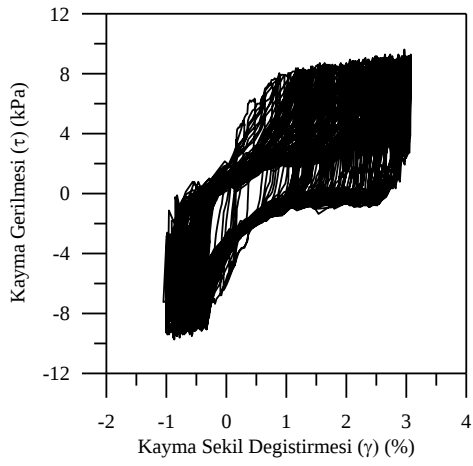
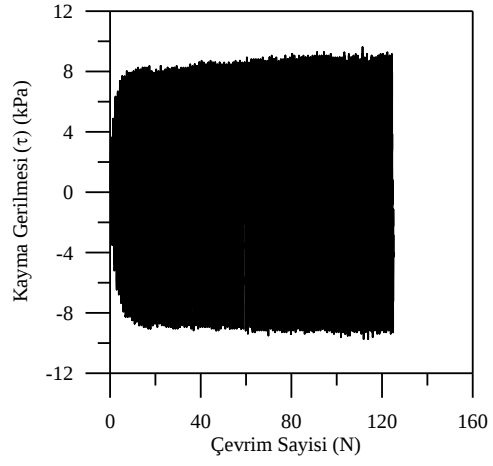
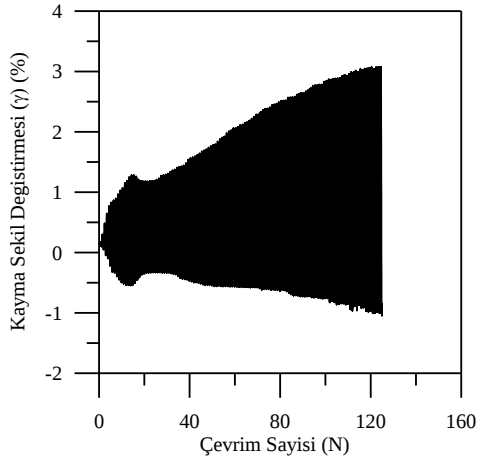
Şekil Ek 2.27 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



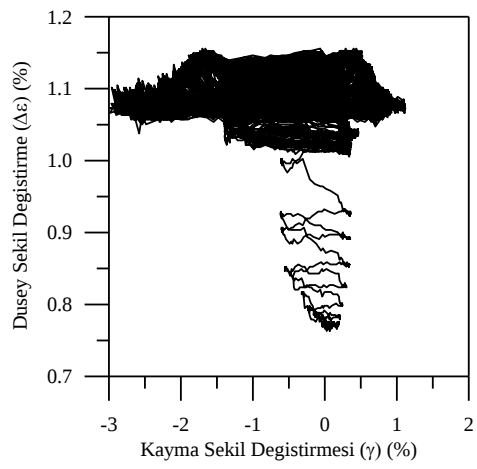
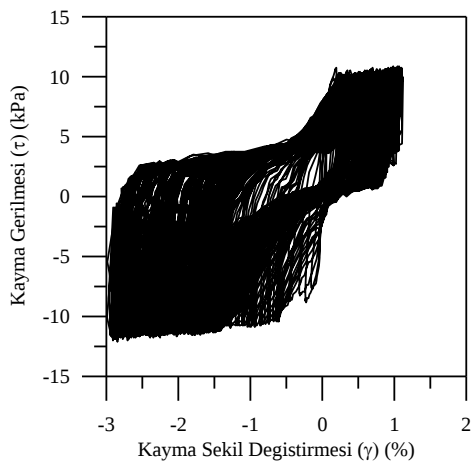
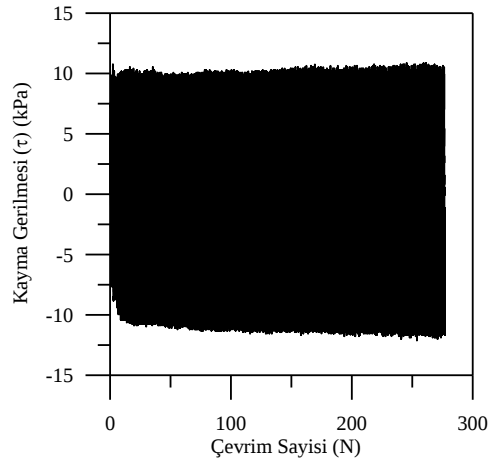
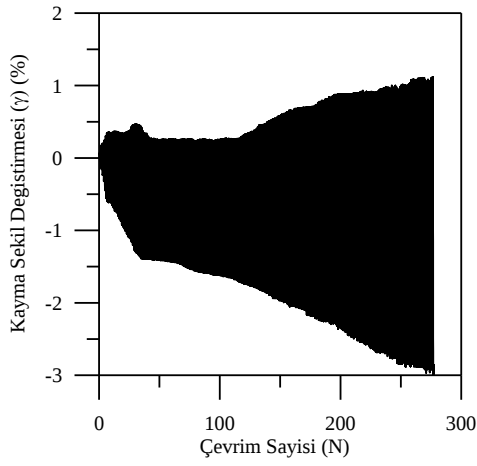
Şekil Ek 2.28 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



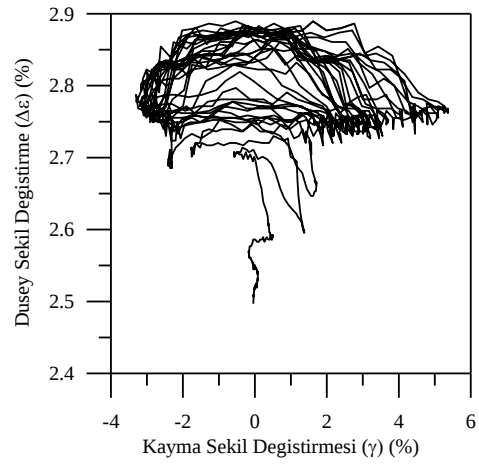
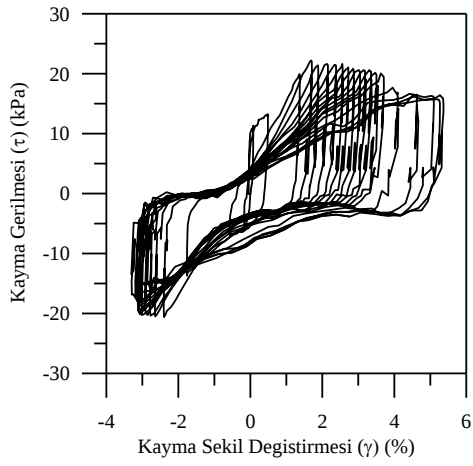
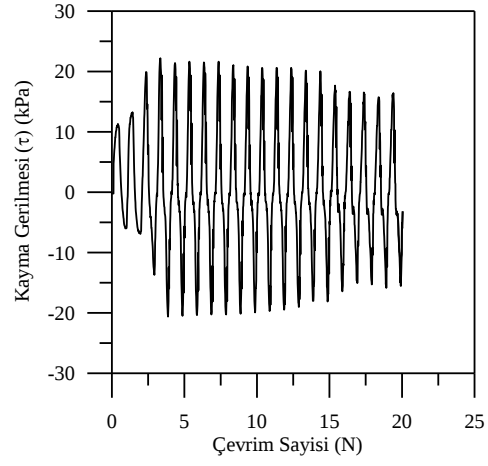
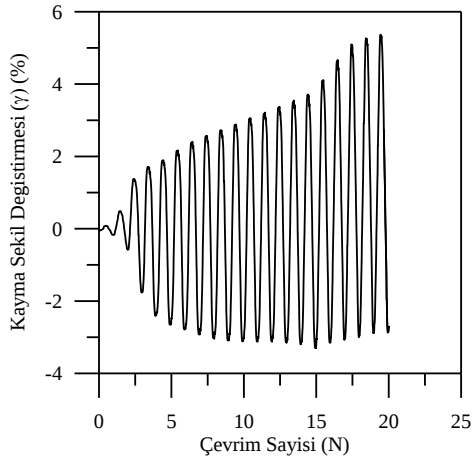
Şekil Ek 2.29 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



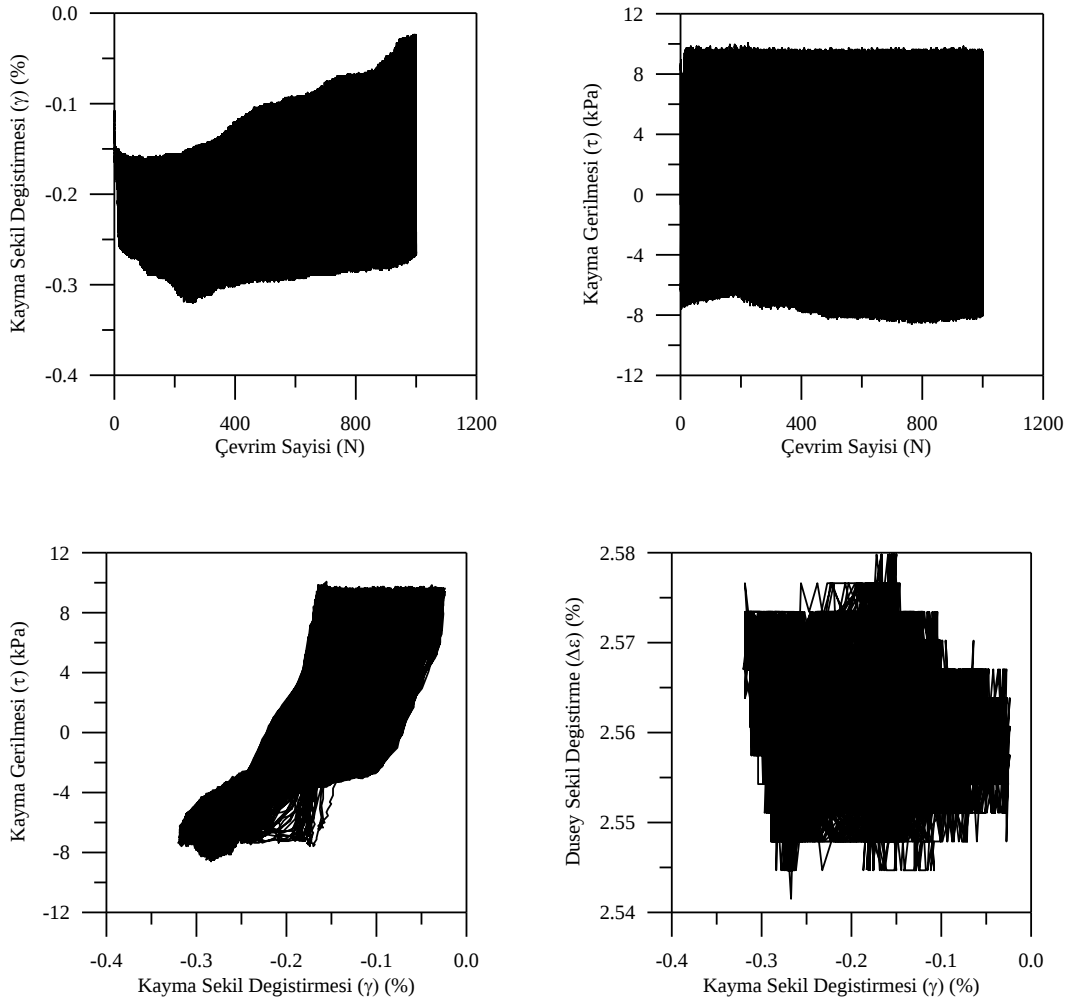
Şekil Ek 2.30 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



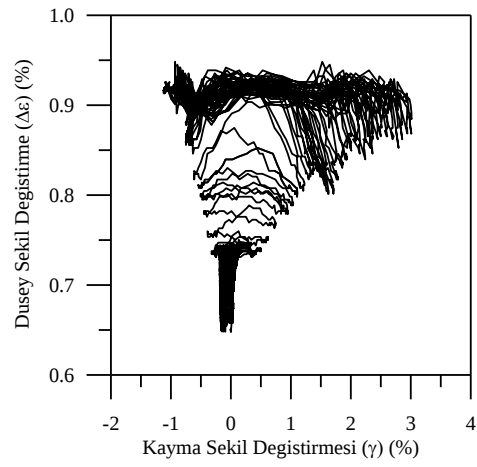
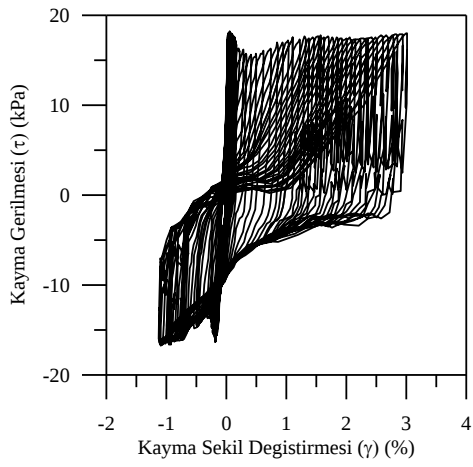
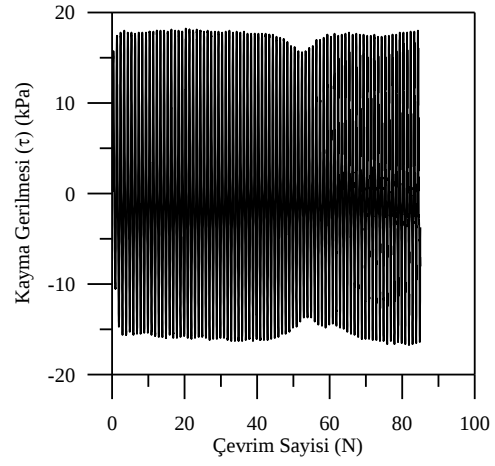
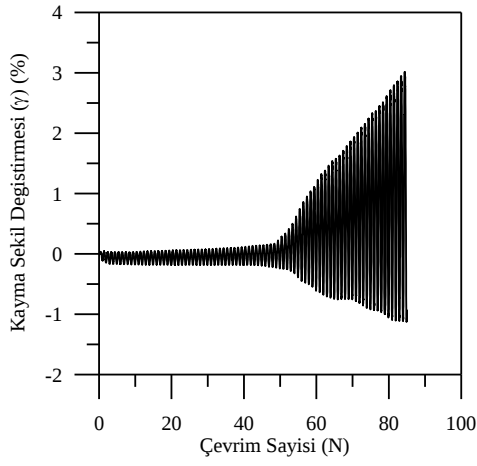
Şekil Ek 2.31 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 50\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



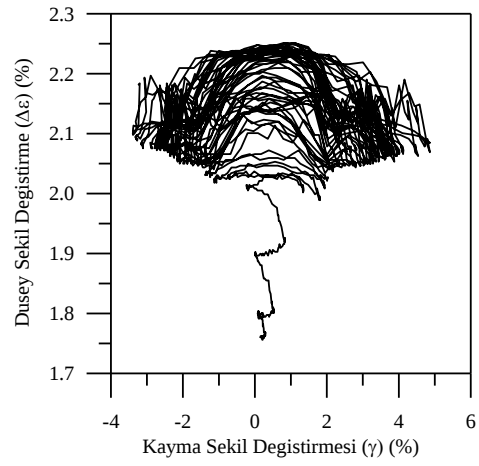
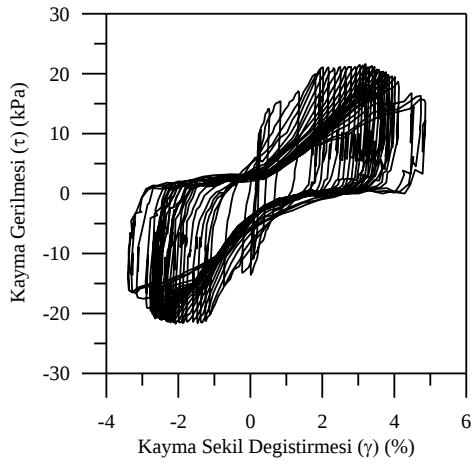
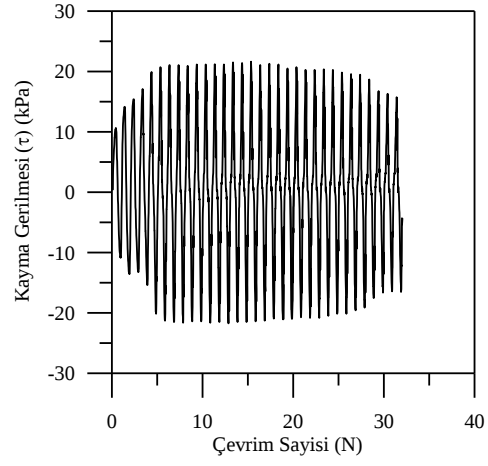
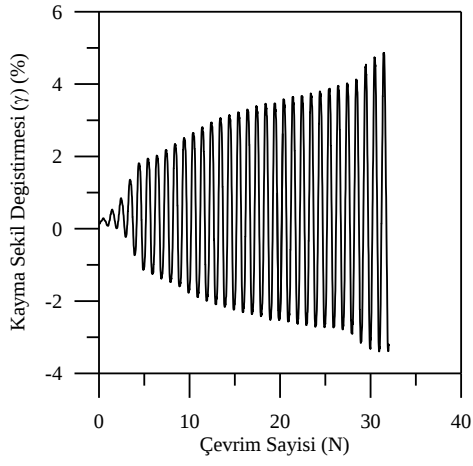
Şekil Ek 2.32 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



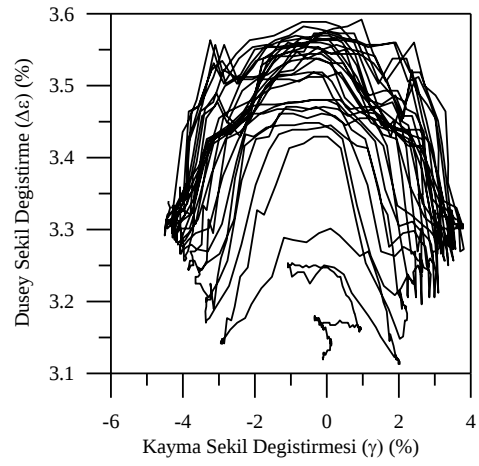
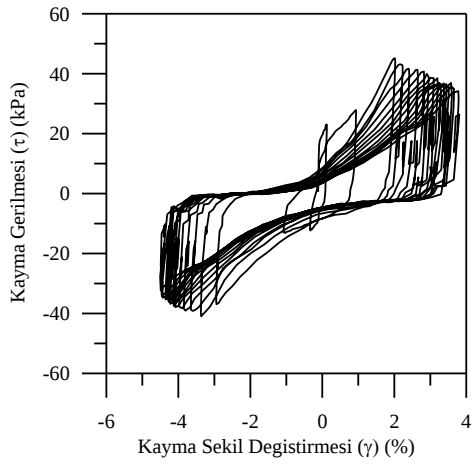
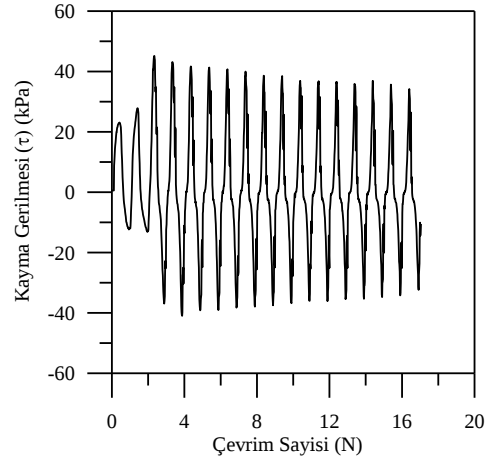
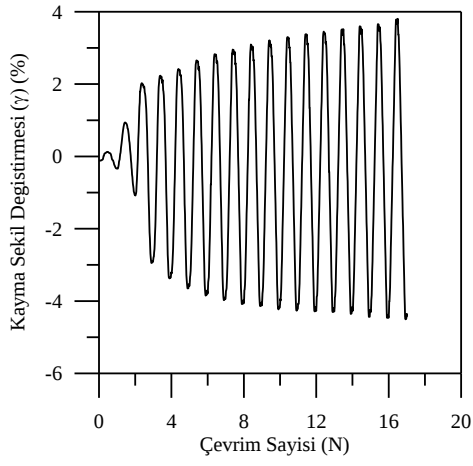
Şekil Ek 2.33 $D_r = 90\%$, $\sigma'_v = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



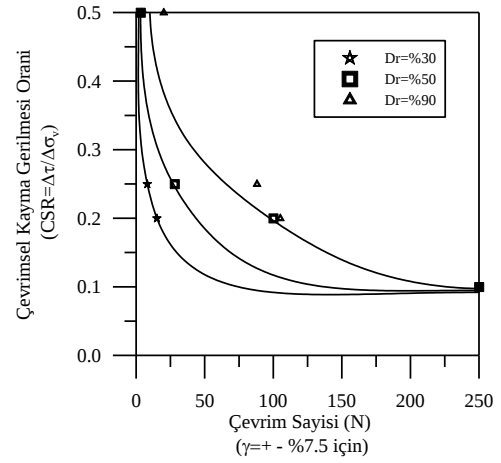
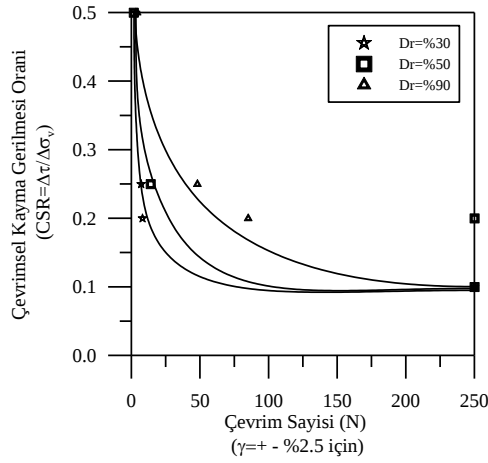
Şekil Ek 2.34 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



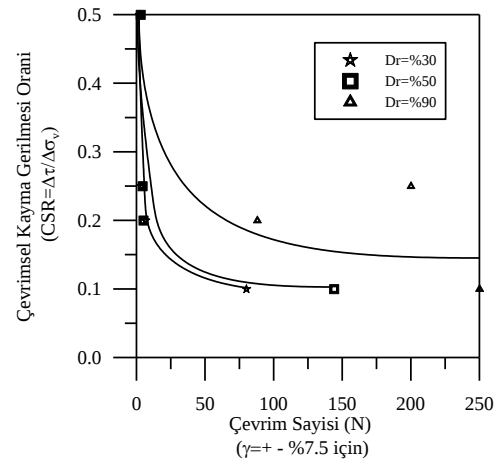
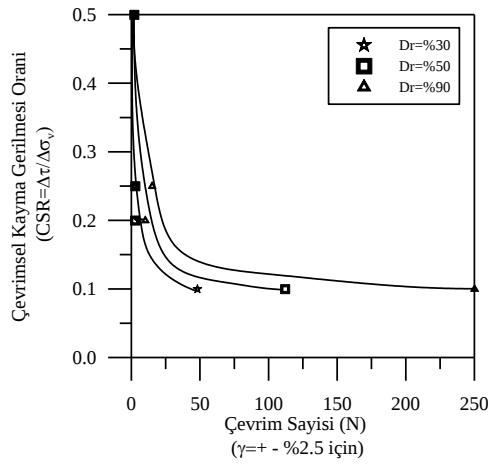
Şekil Ek 2.35 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



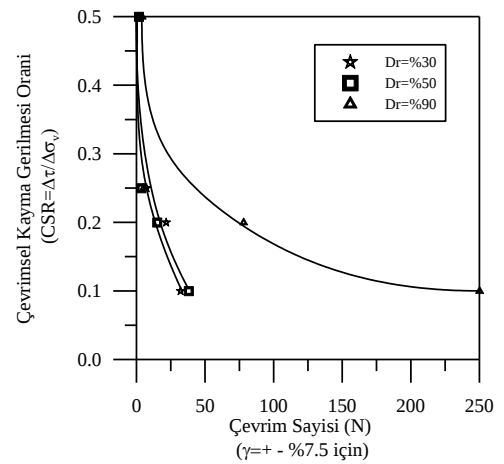
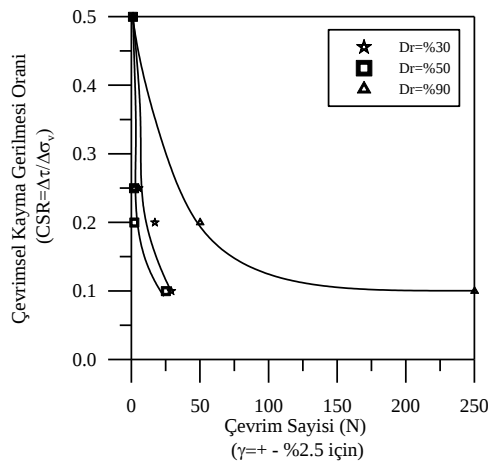
Şekil Ek 2.36 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme eğrileri



Şekil Ek 2.37 25kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi

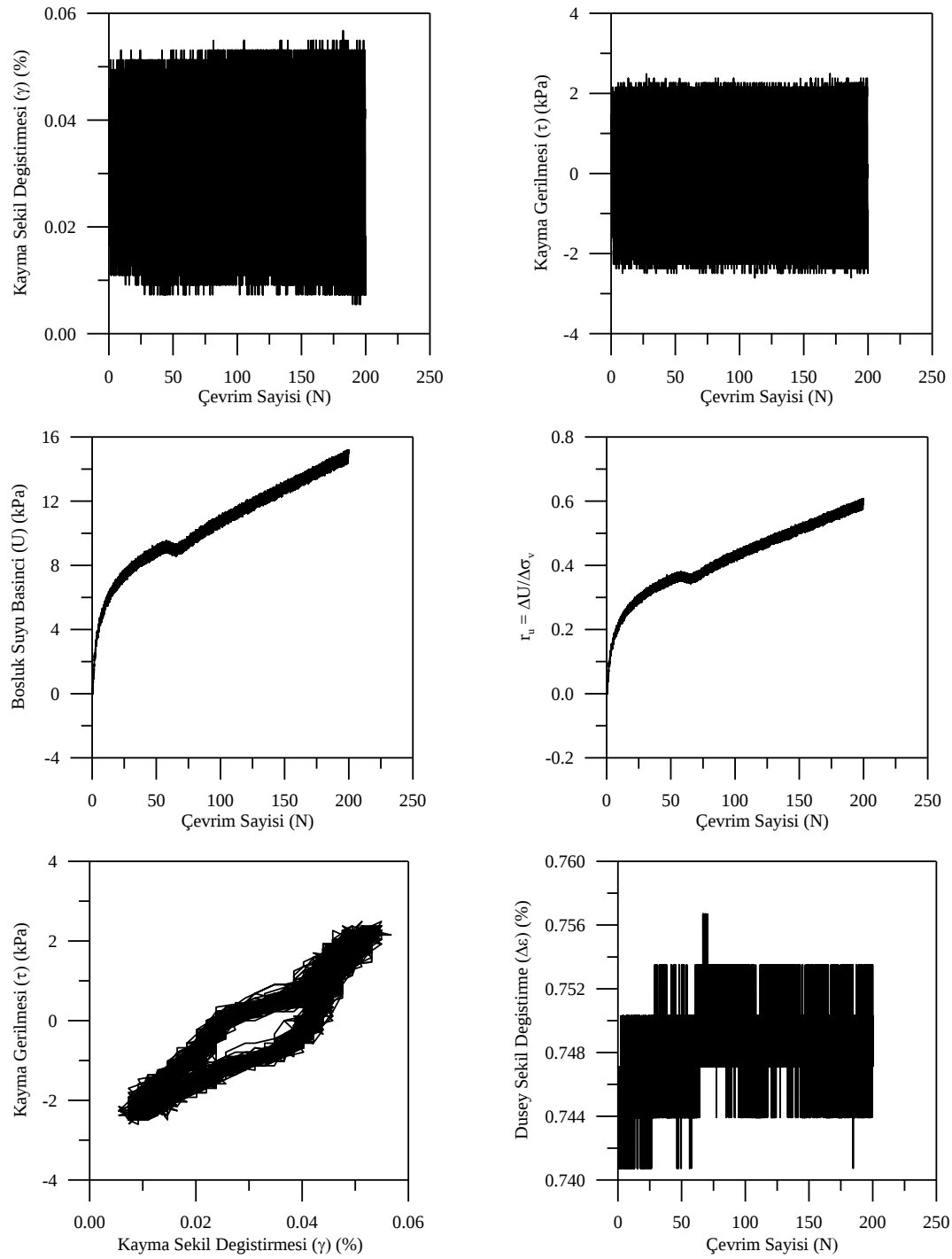


Şekil Ek 2.38 50kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi

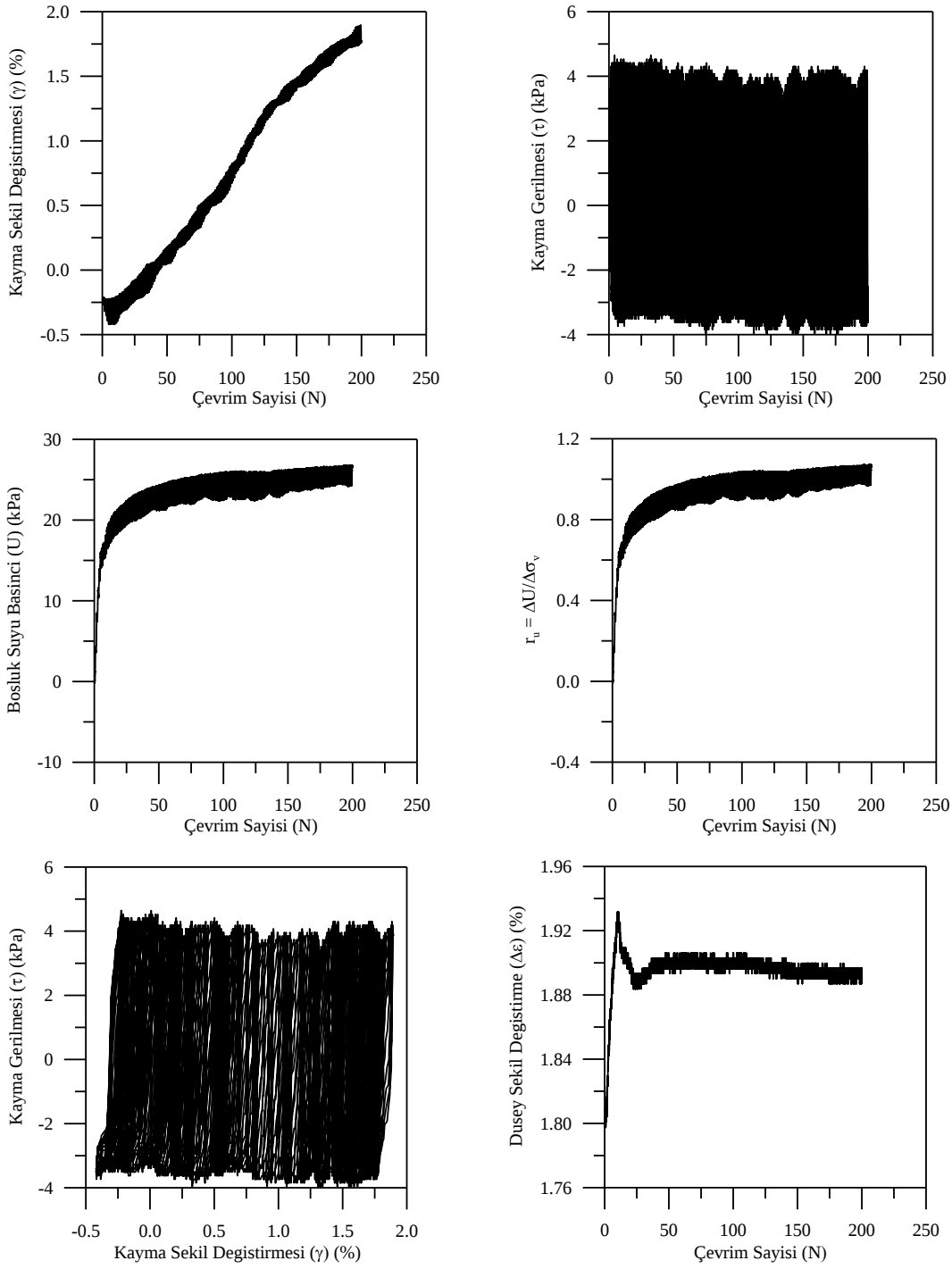


Şekil Ek 2.39 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi

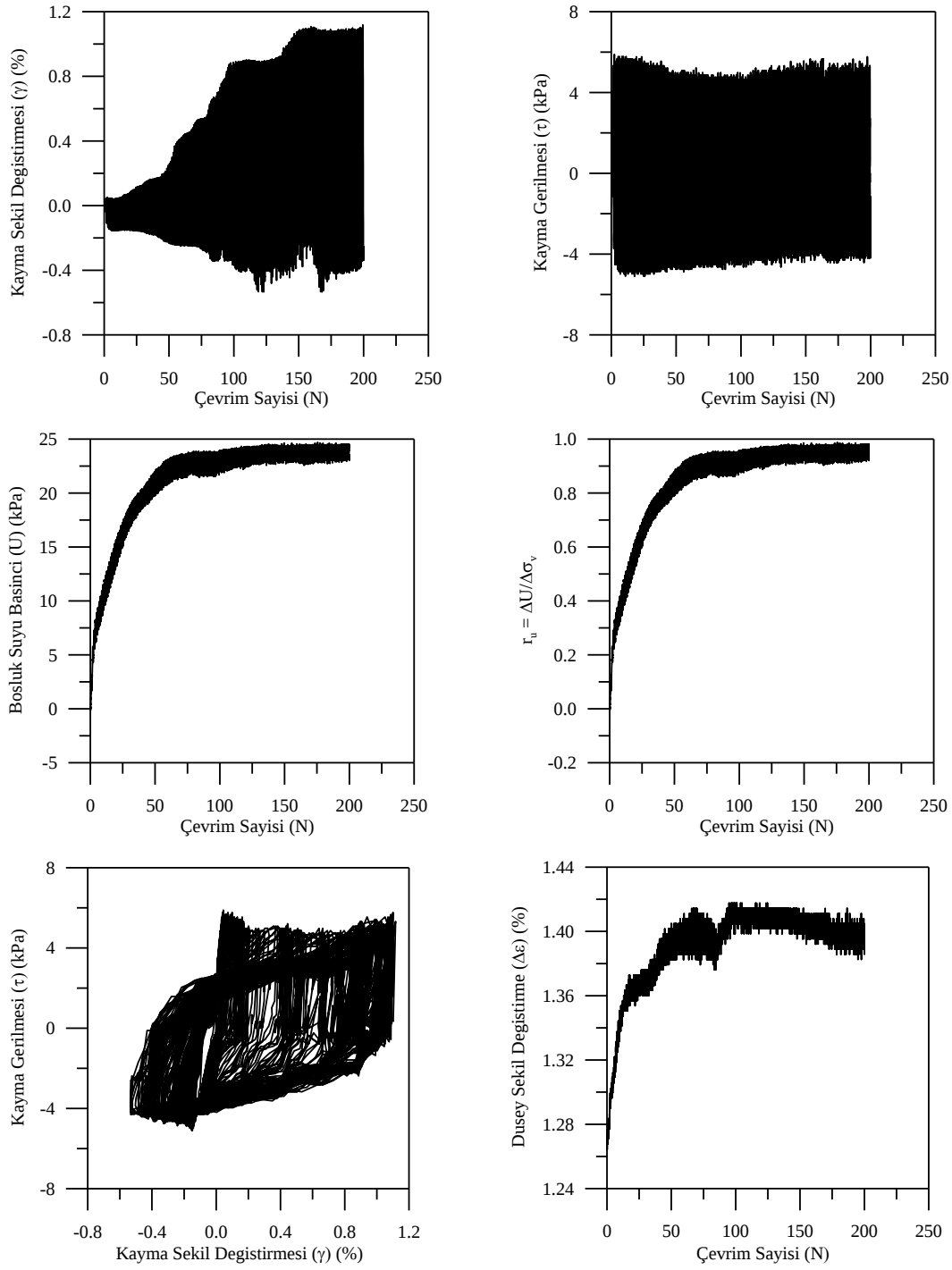
Ek 3. Suya Doygun Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları



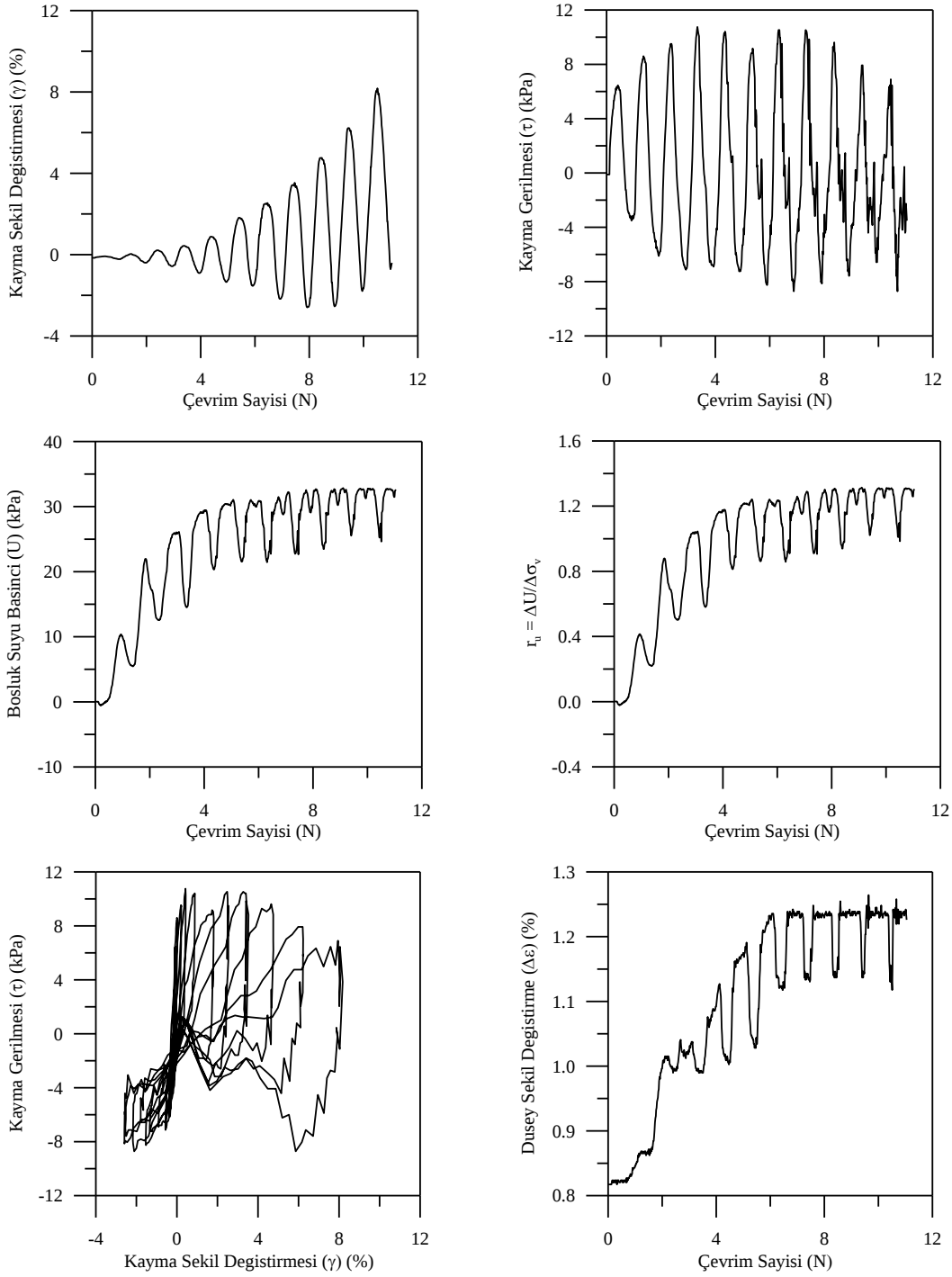
Şekil Ek 3.1 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



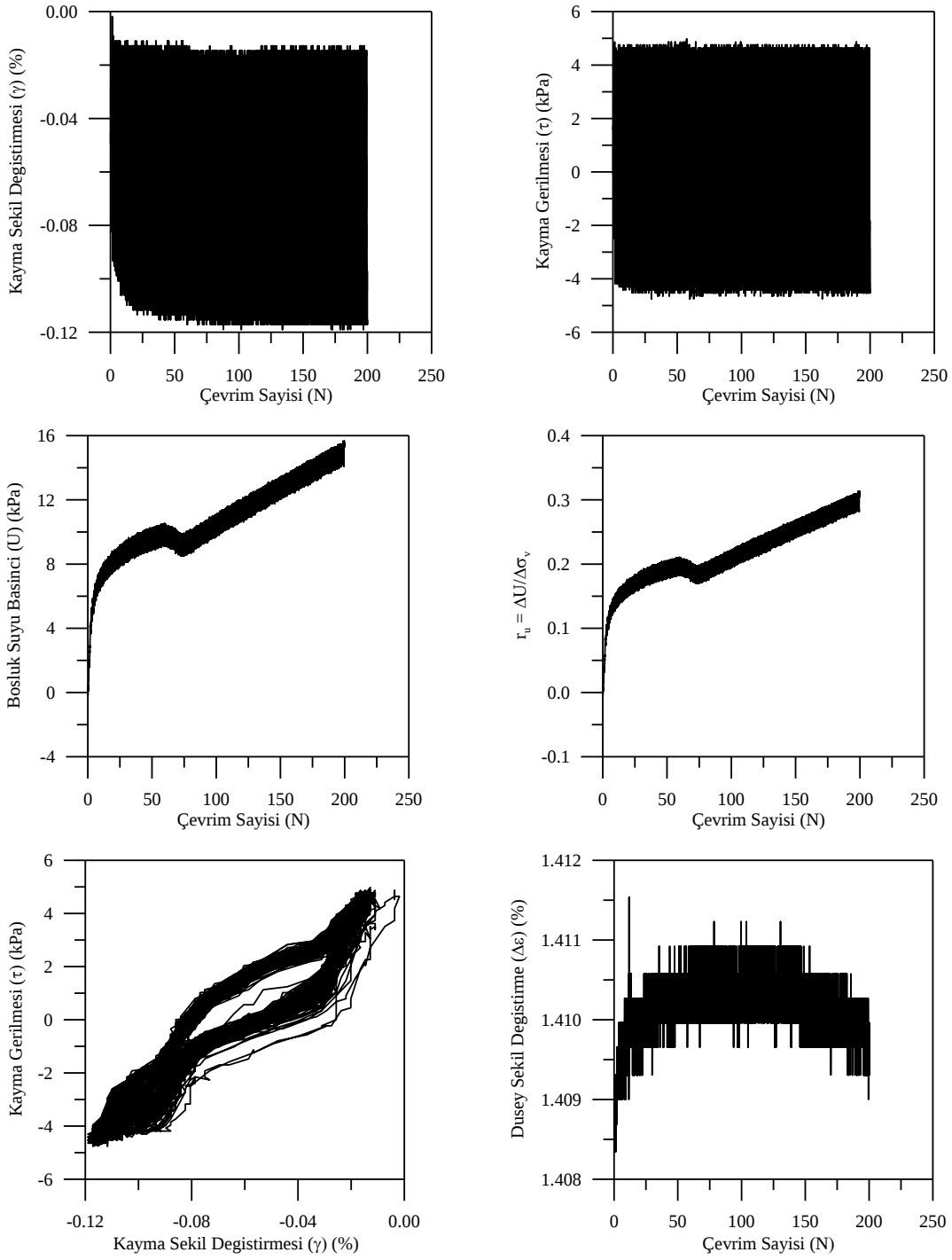
Şekil Ek 3.2 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



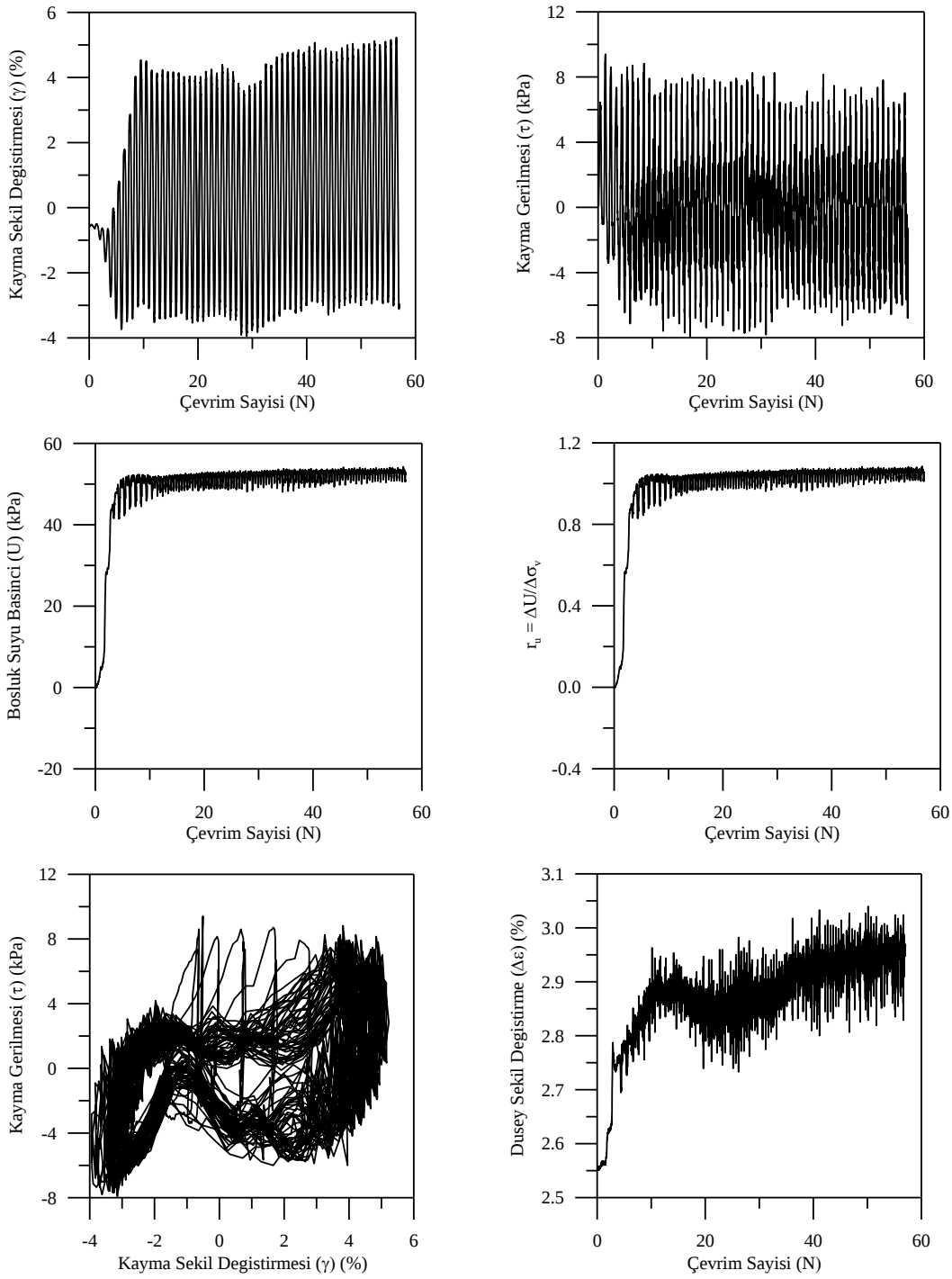
Şekil Ek 3.3 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



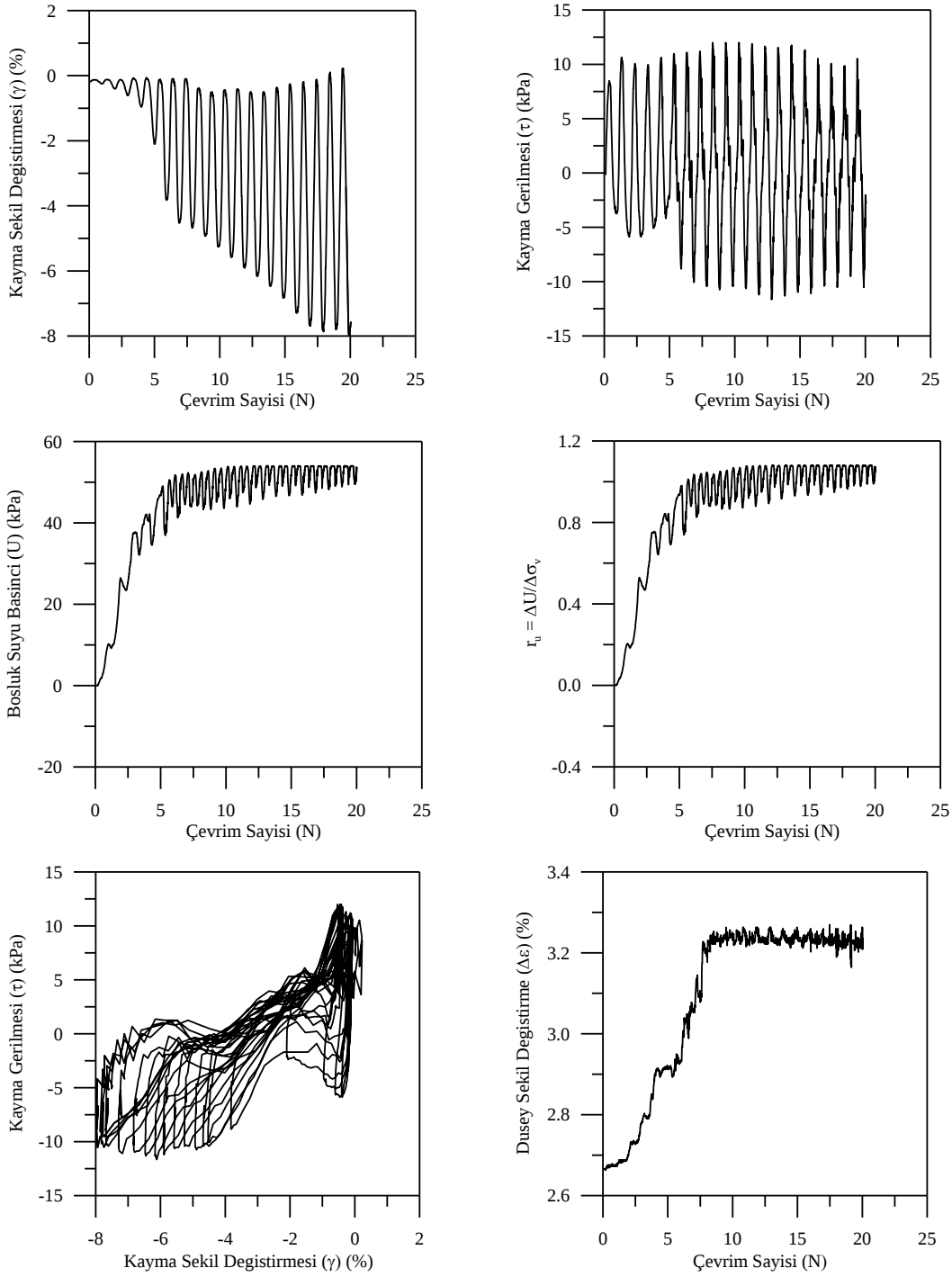
Şekil Ek 3.4 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



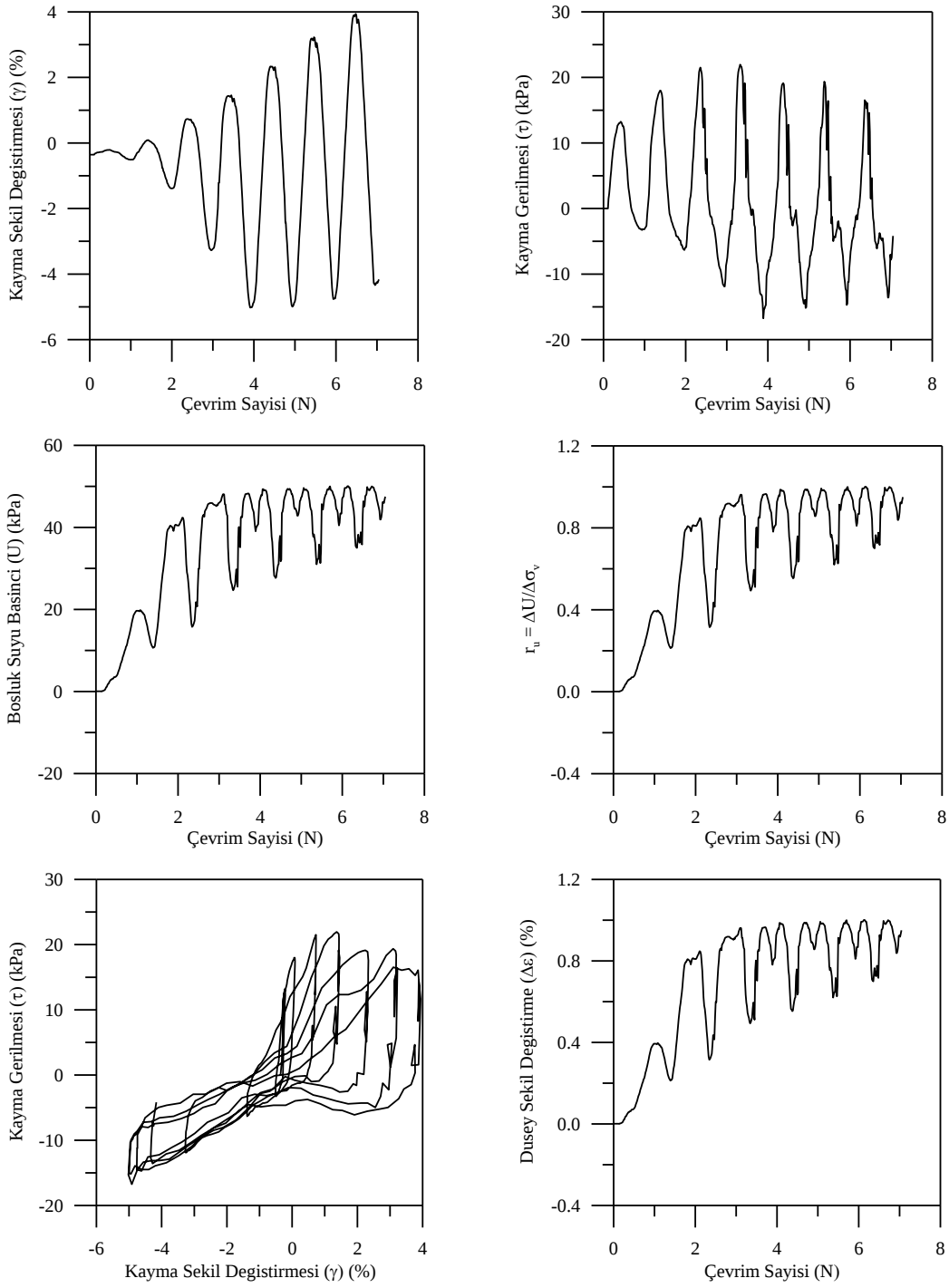
Şekil Ek 3.5 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



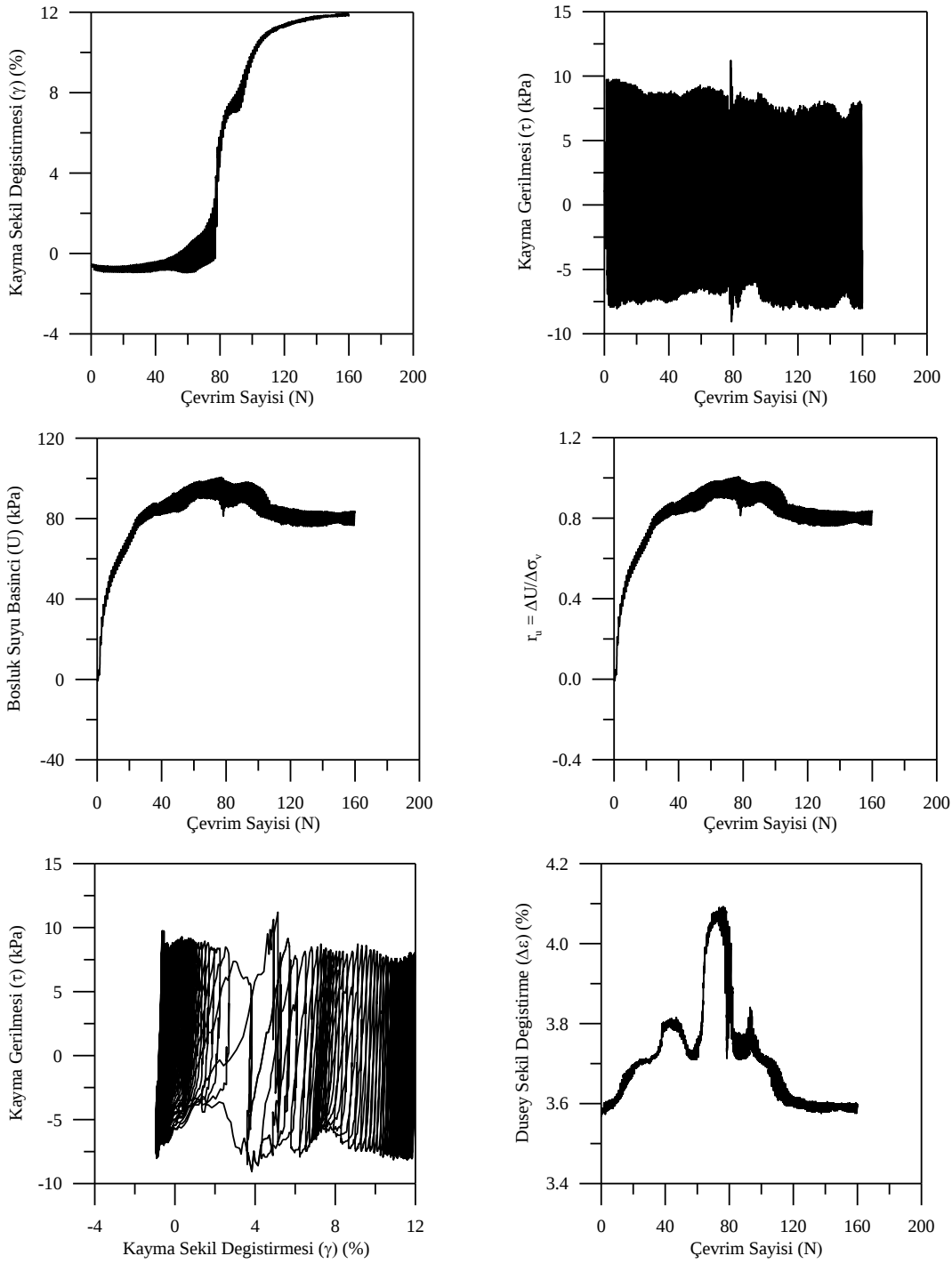
Şekil Ek 3.6 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



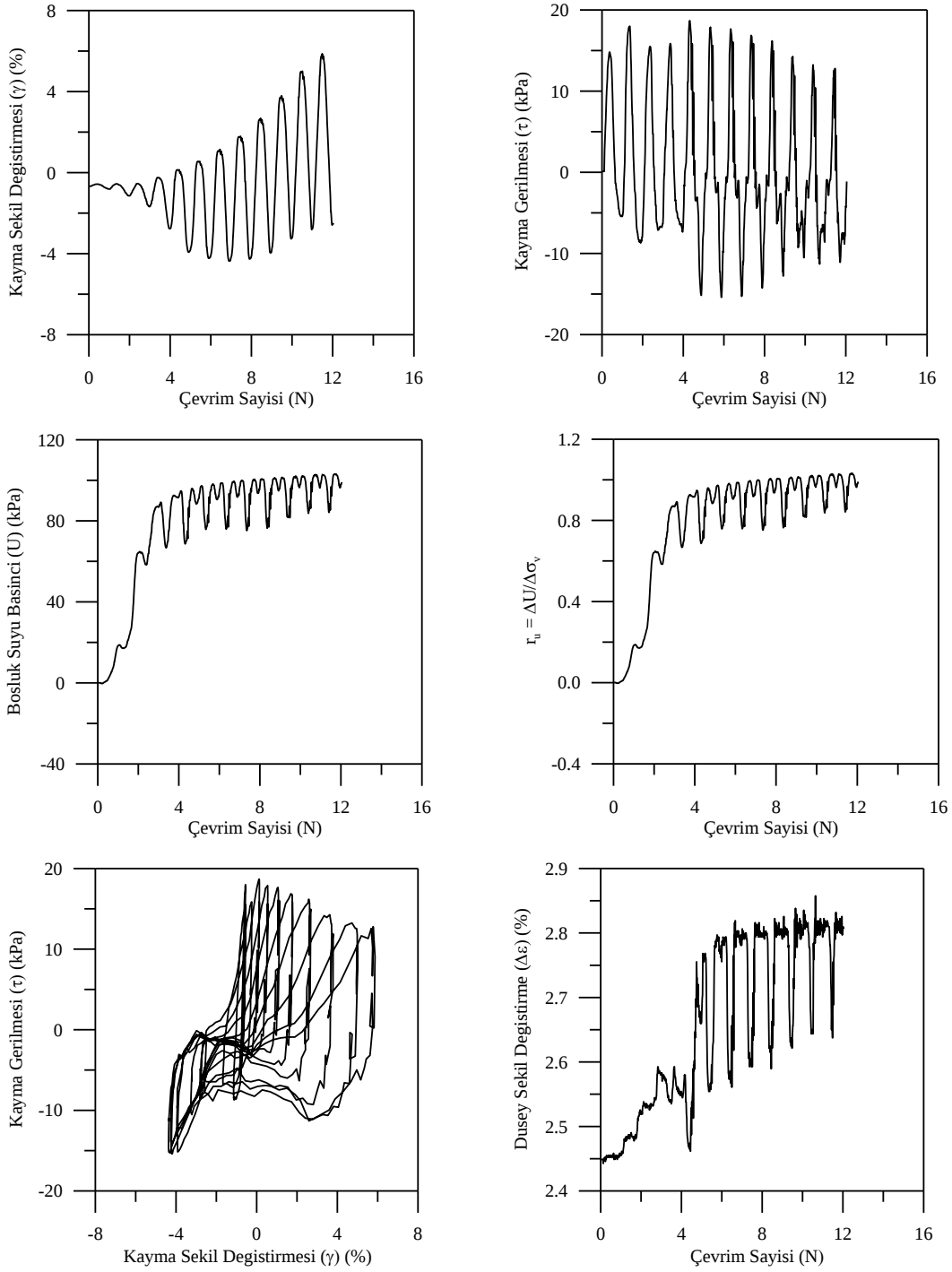
Şekil Ek 3.7 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



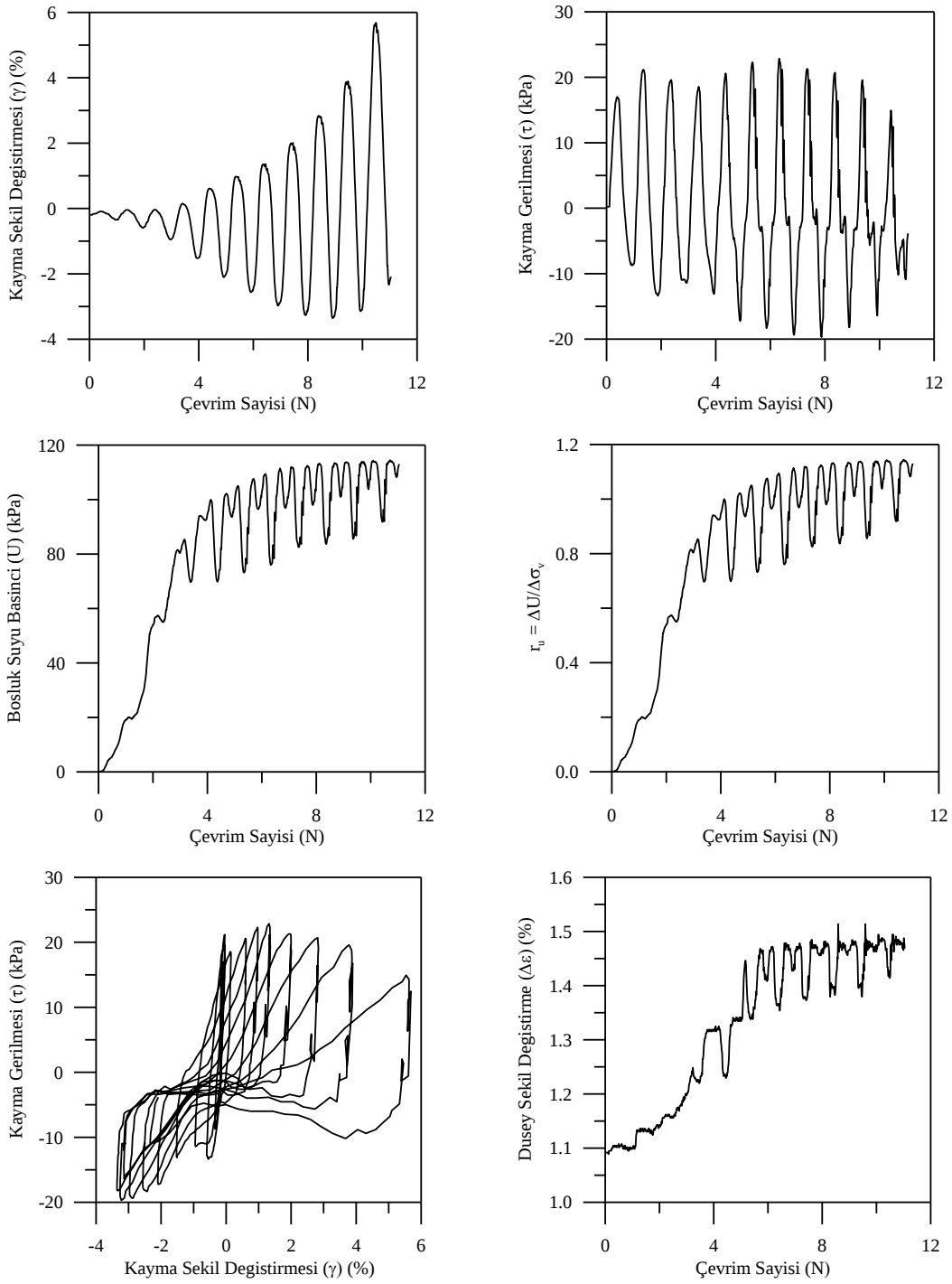
Şekil Ek 3.8 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



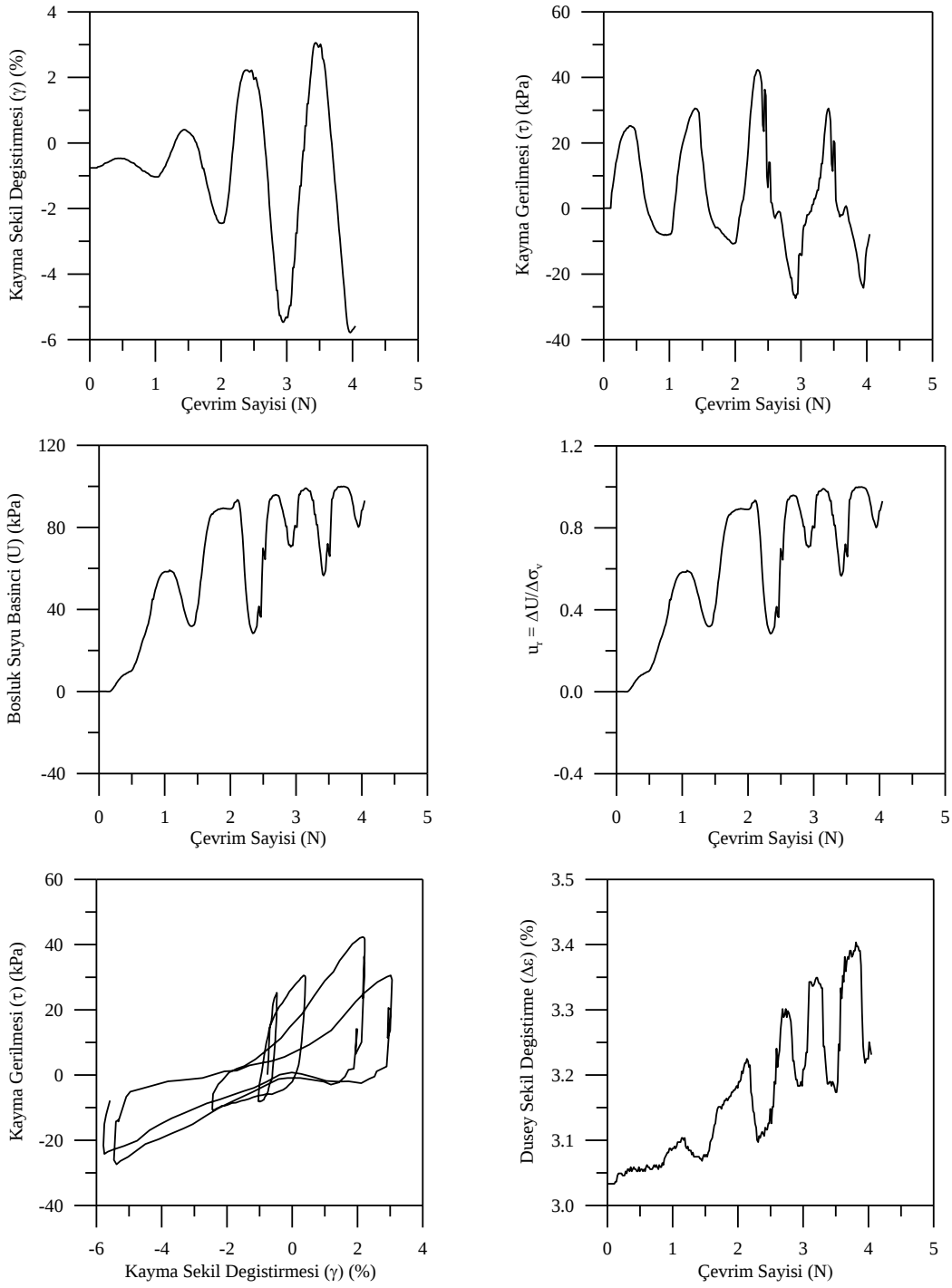
Şekil Ek 3.9 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



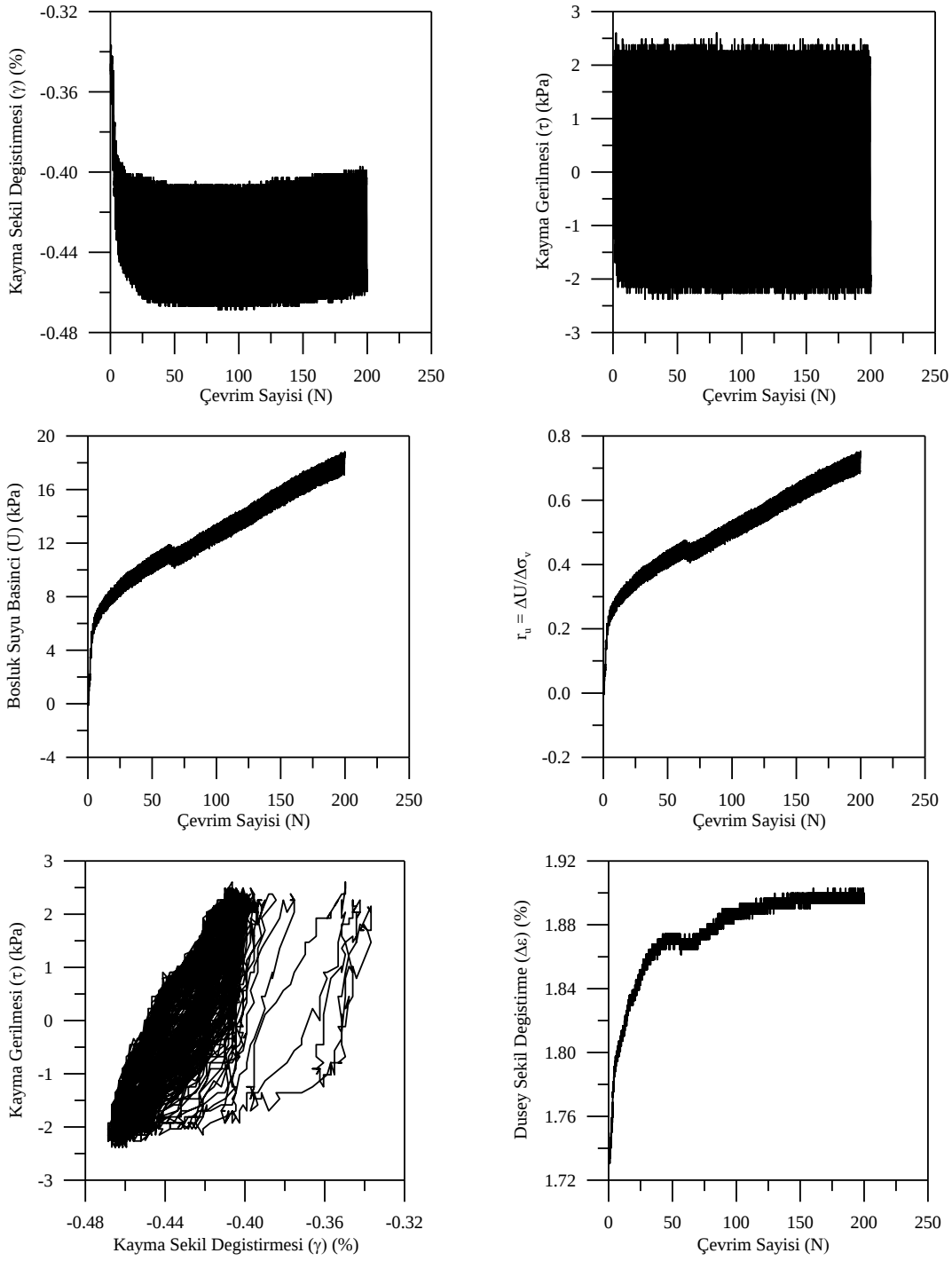
Şekil Ek 3.10 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



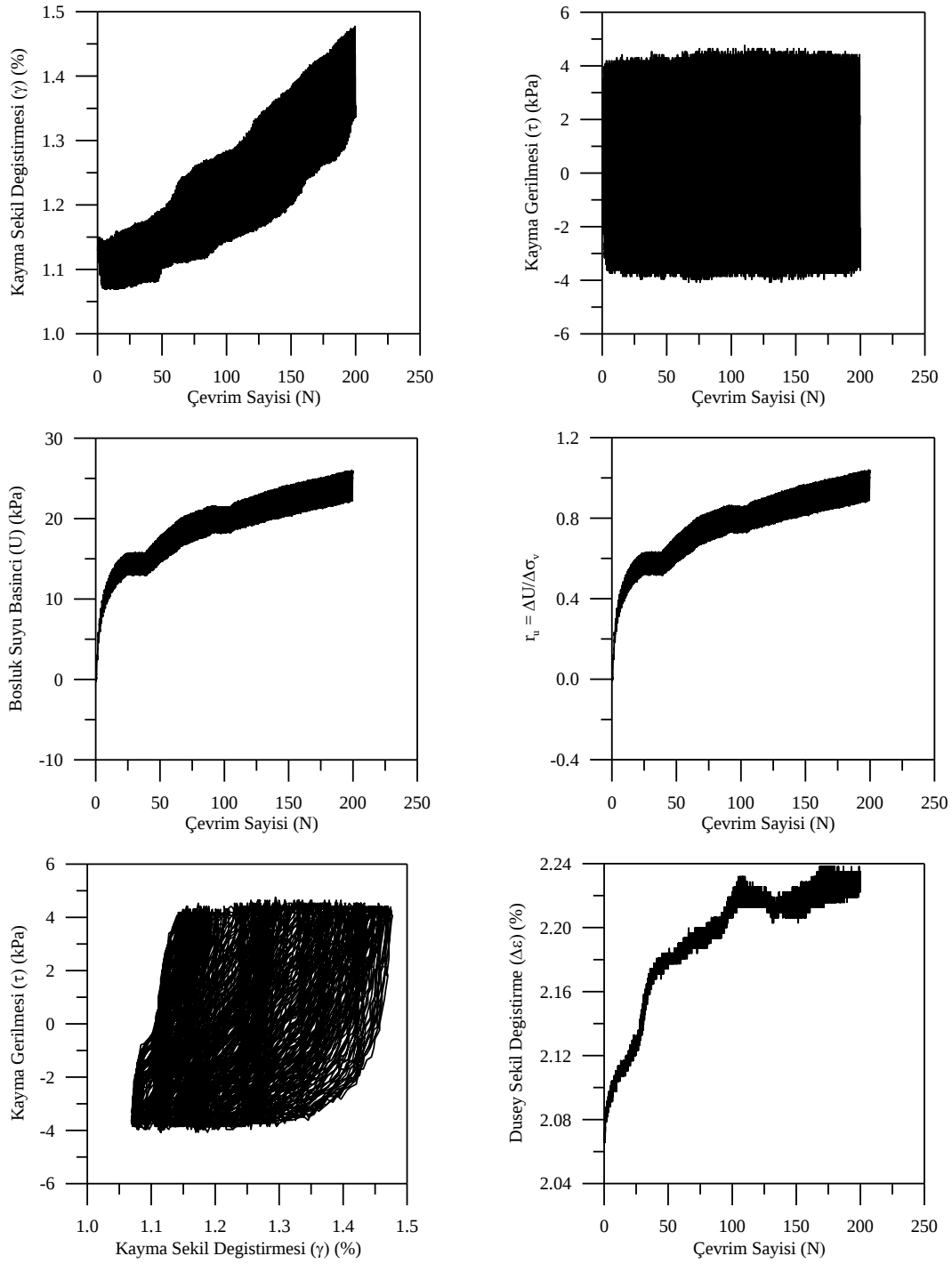
Şekil Ek 3.11 $D_r = 30\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



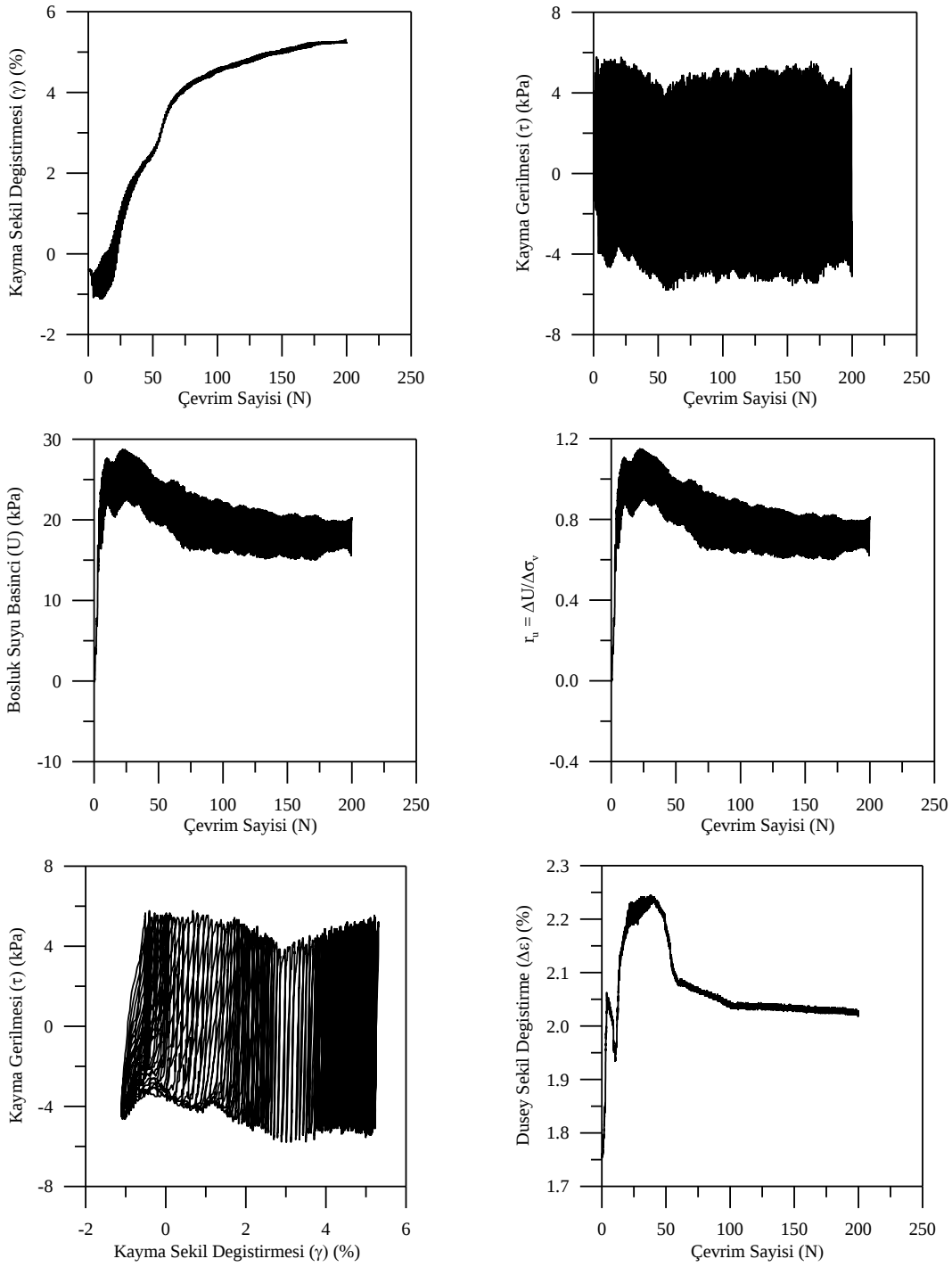
Şekil Ek 3.12 $D_r = \%30$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



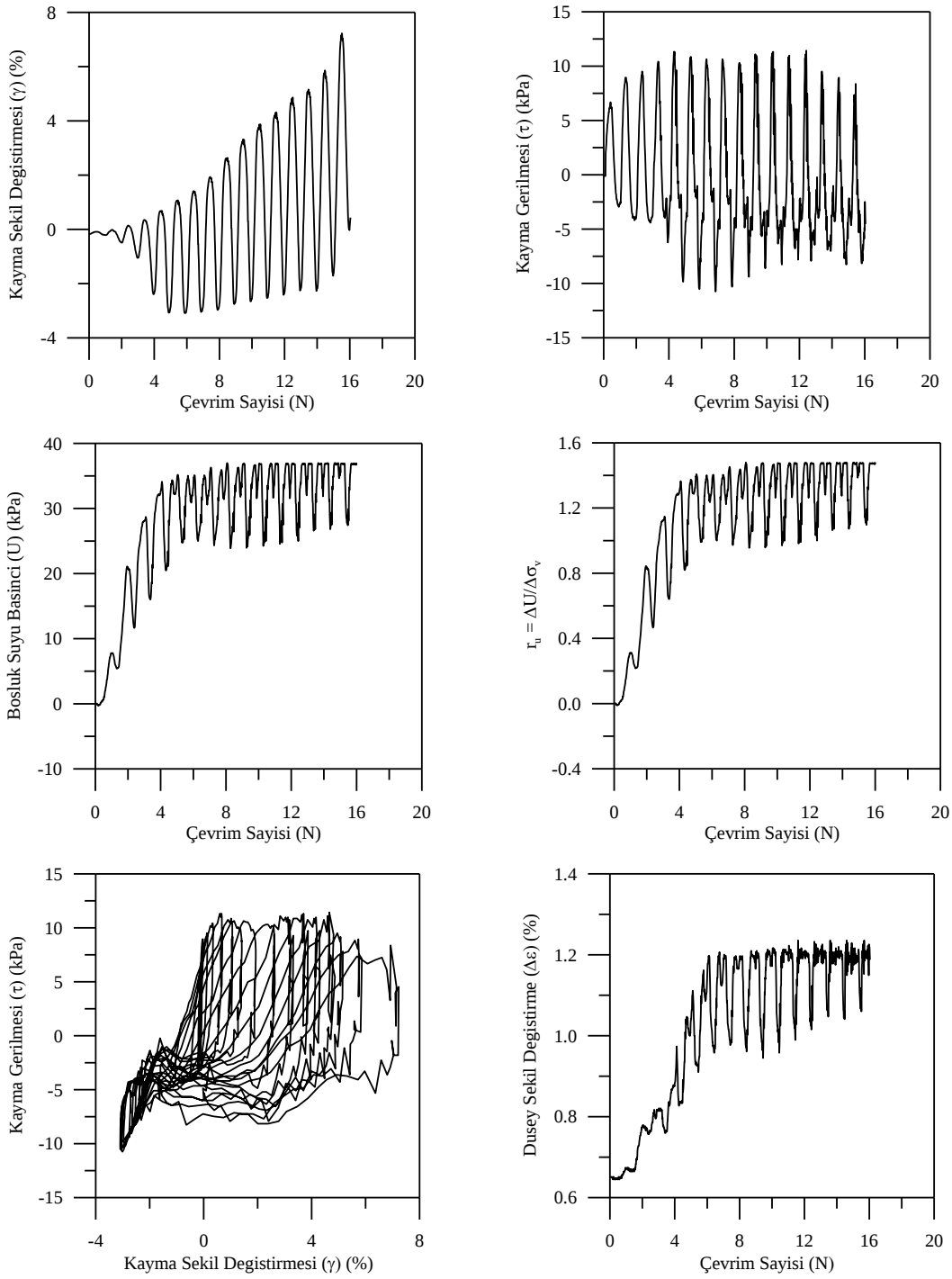
Şekil Ek 3.13 $D_r = 50\%$, $\sigma'_v = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



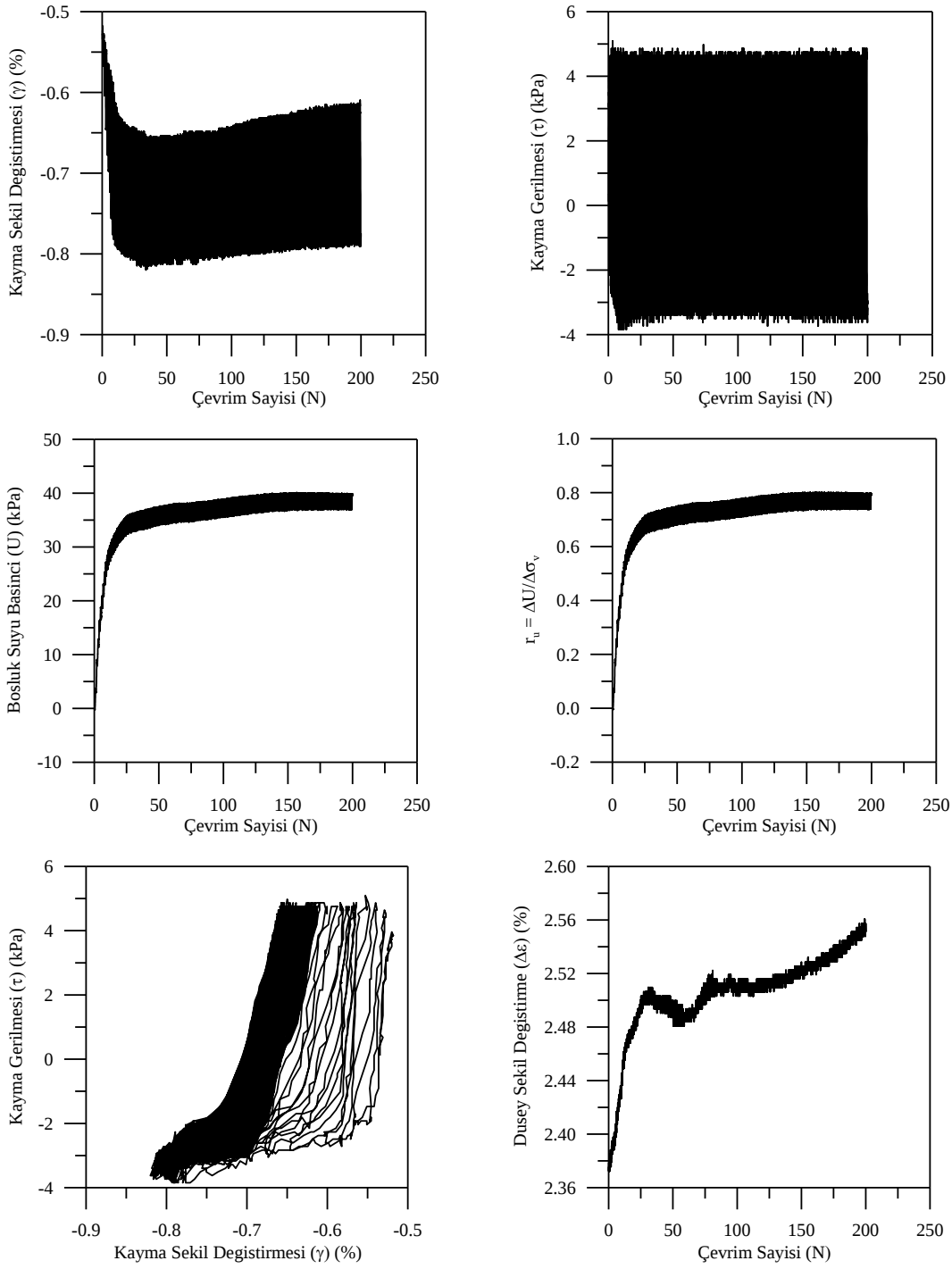
Şekil Ek 3.14 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



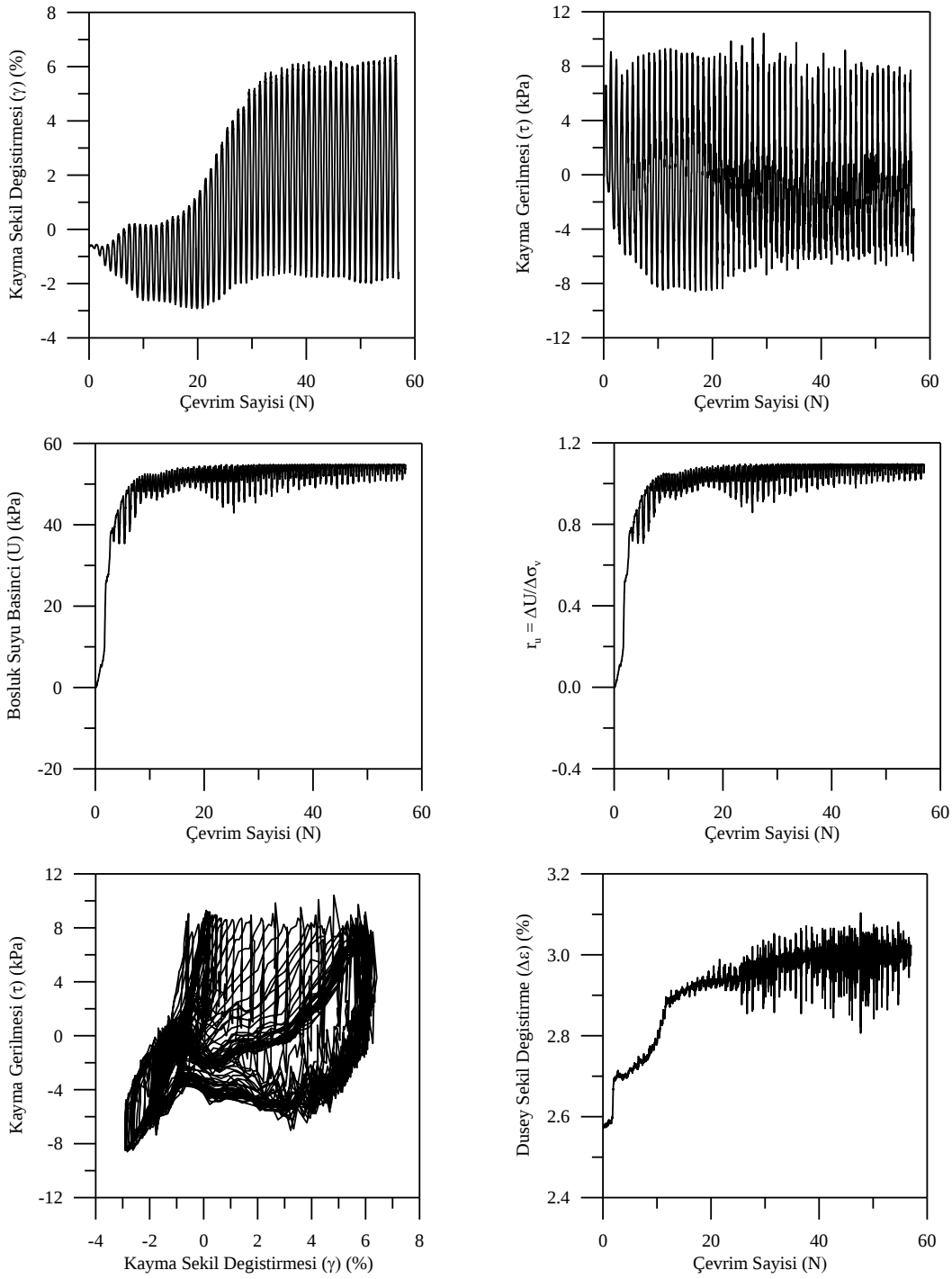
Şekil Ek 3.15 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



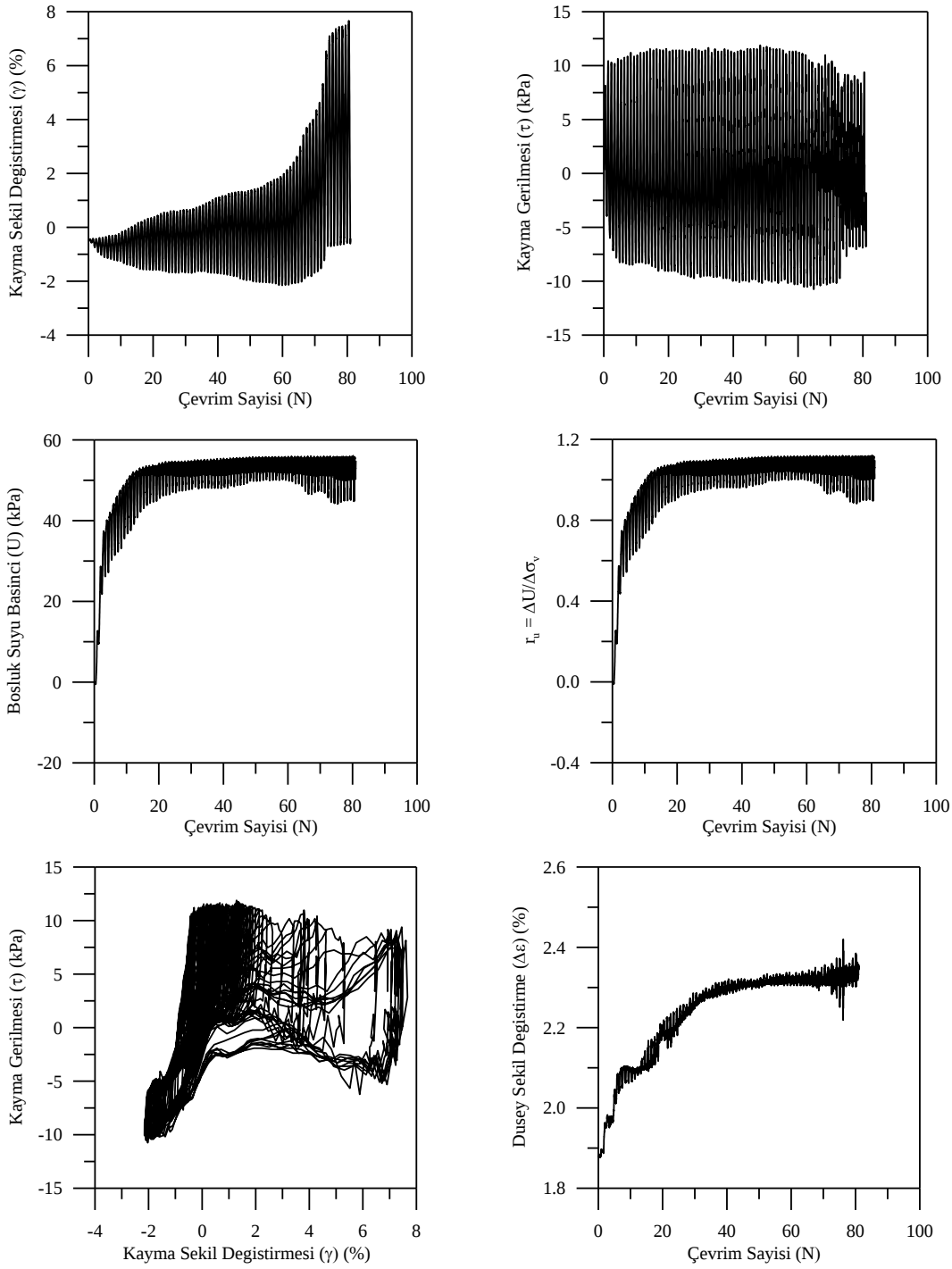
Şekil Ek 3.16 $D_r = 50\%$, $\sigma'_v = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



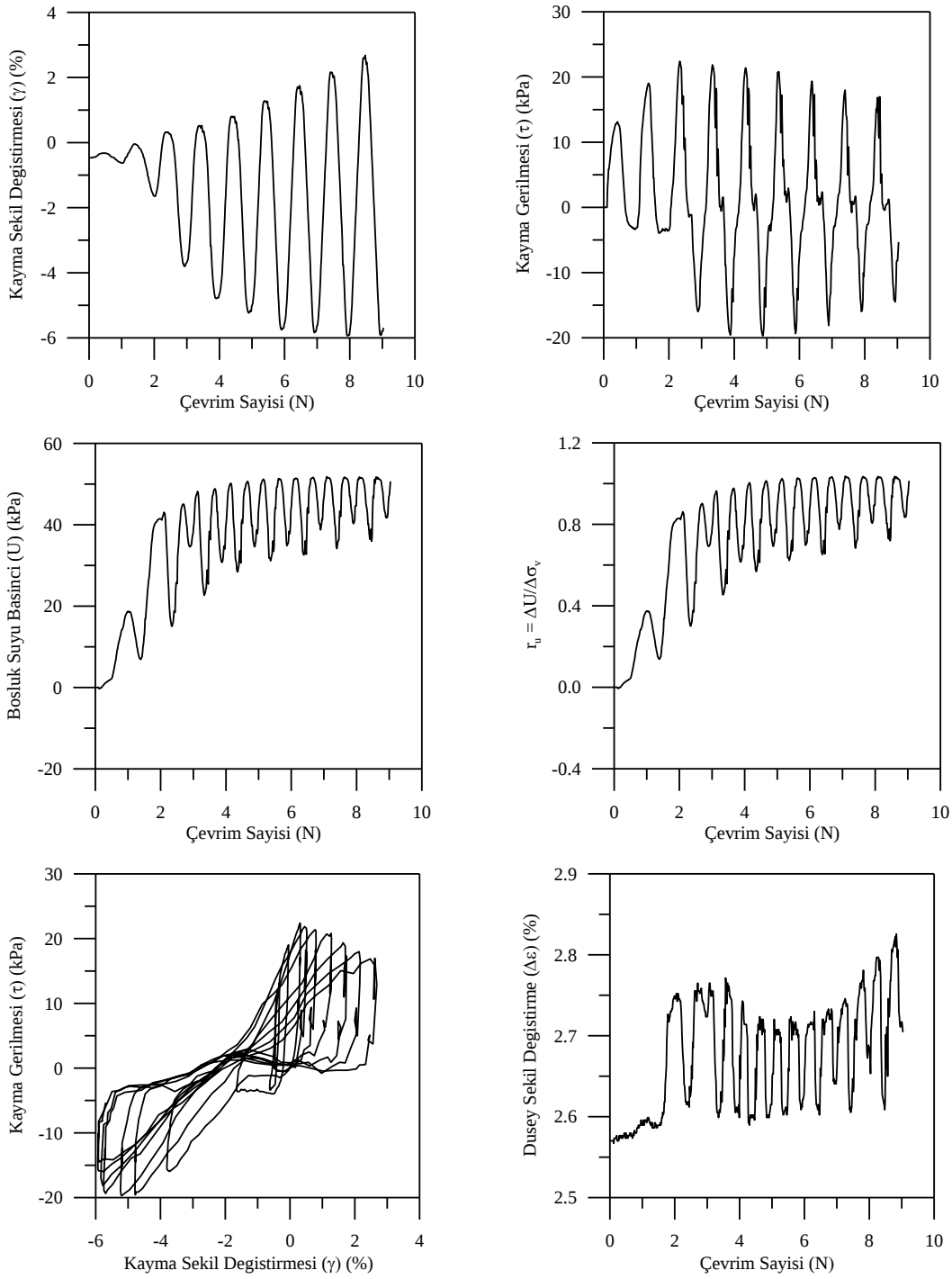
Şekil Ek 3.17 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



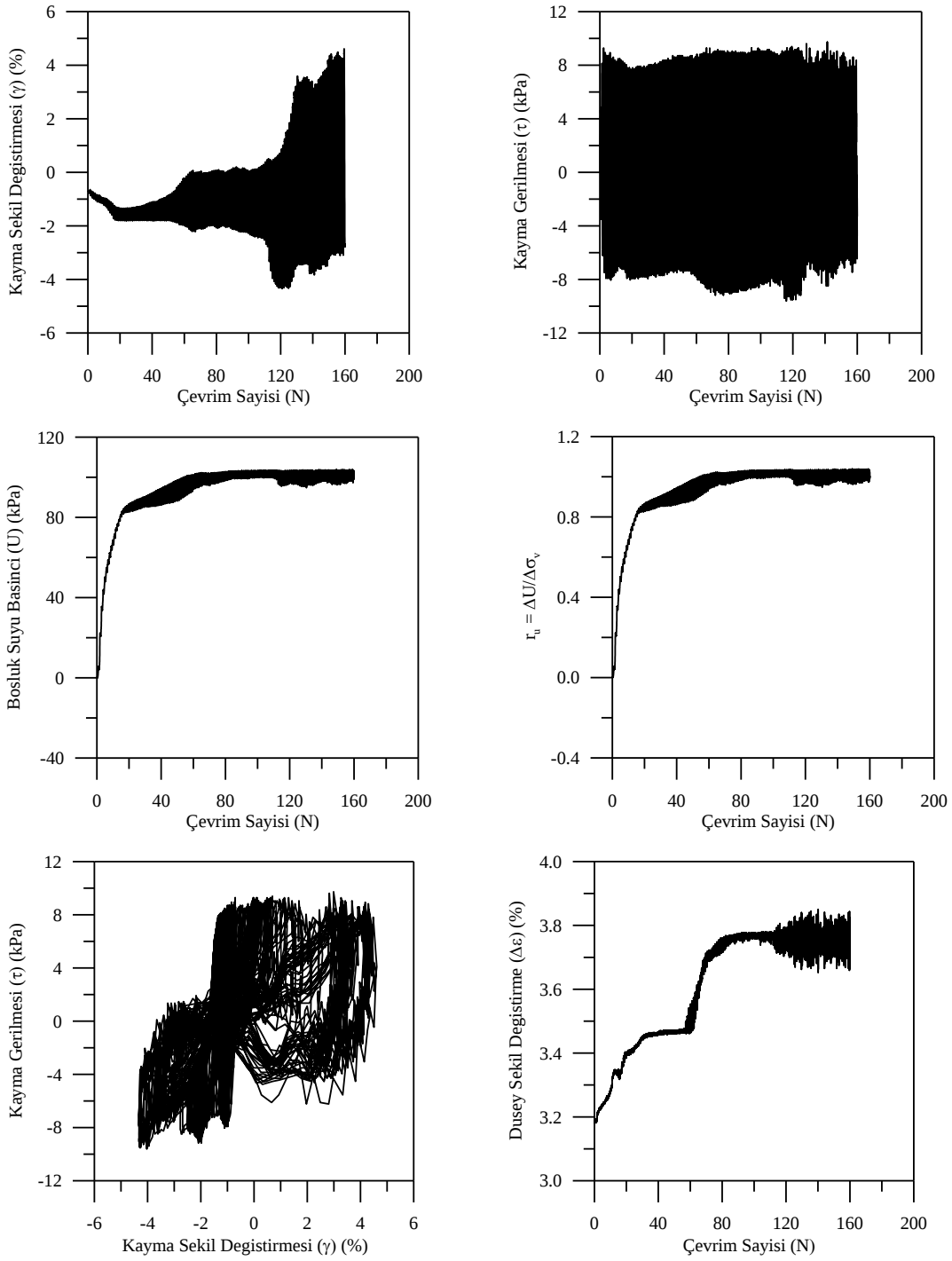
Şekil Ek 3.18 $D_r = 50\%$, $\sigma'_v = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



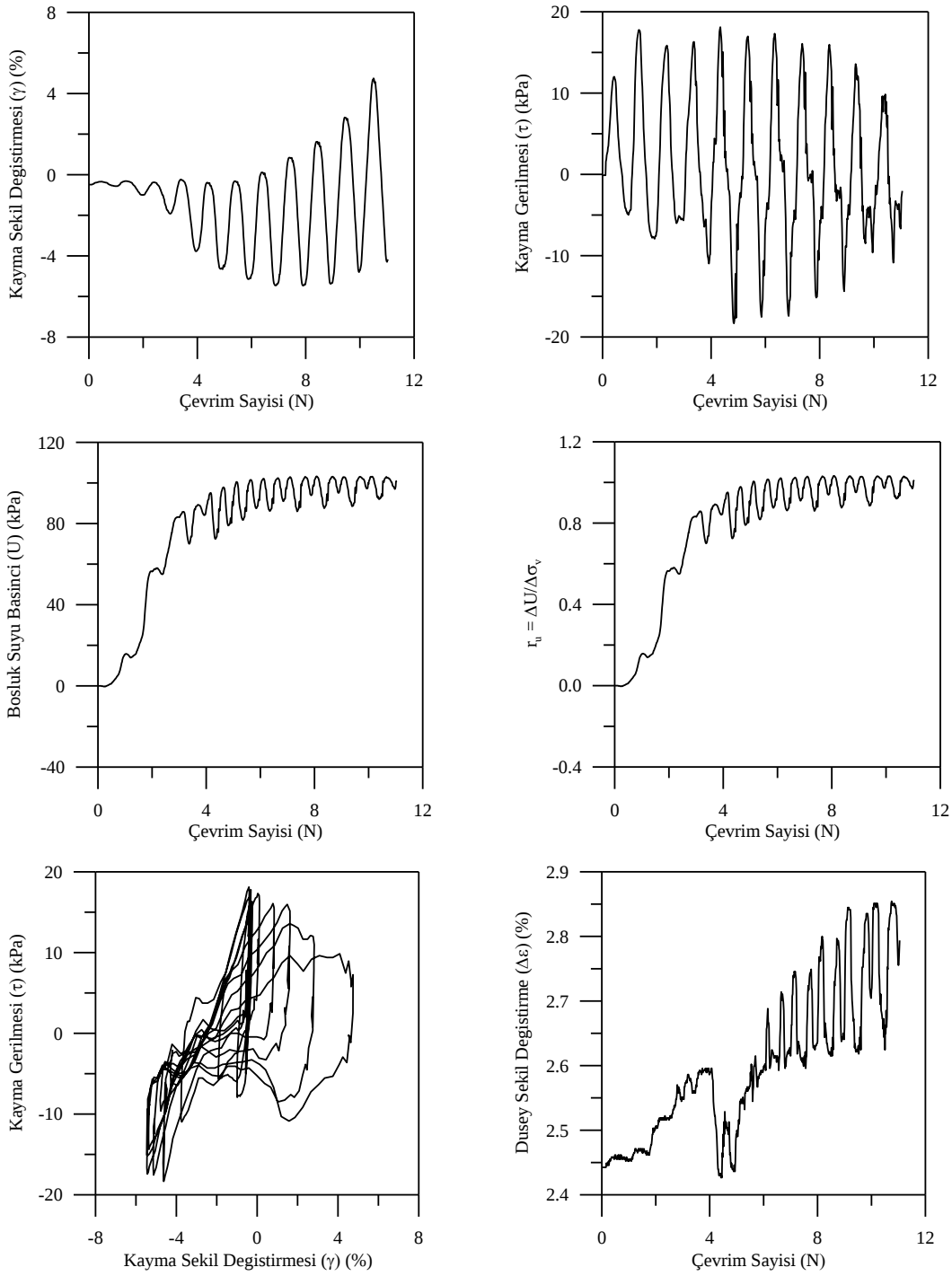
Şekil Ek 3.19 $D_r = 50\%$, $\sigma'_v = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



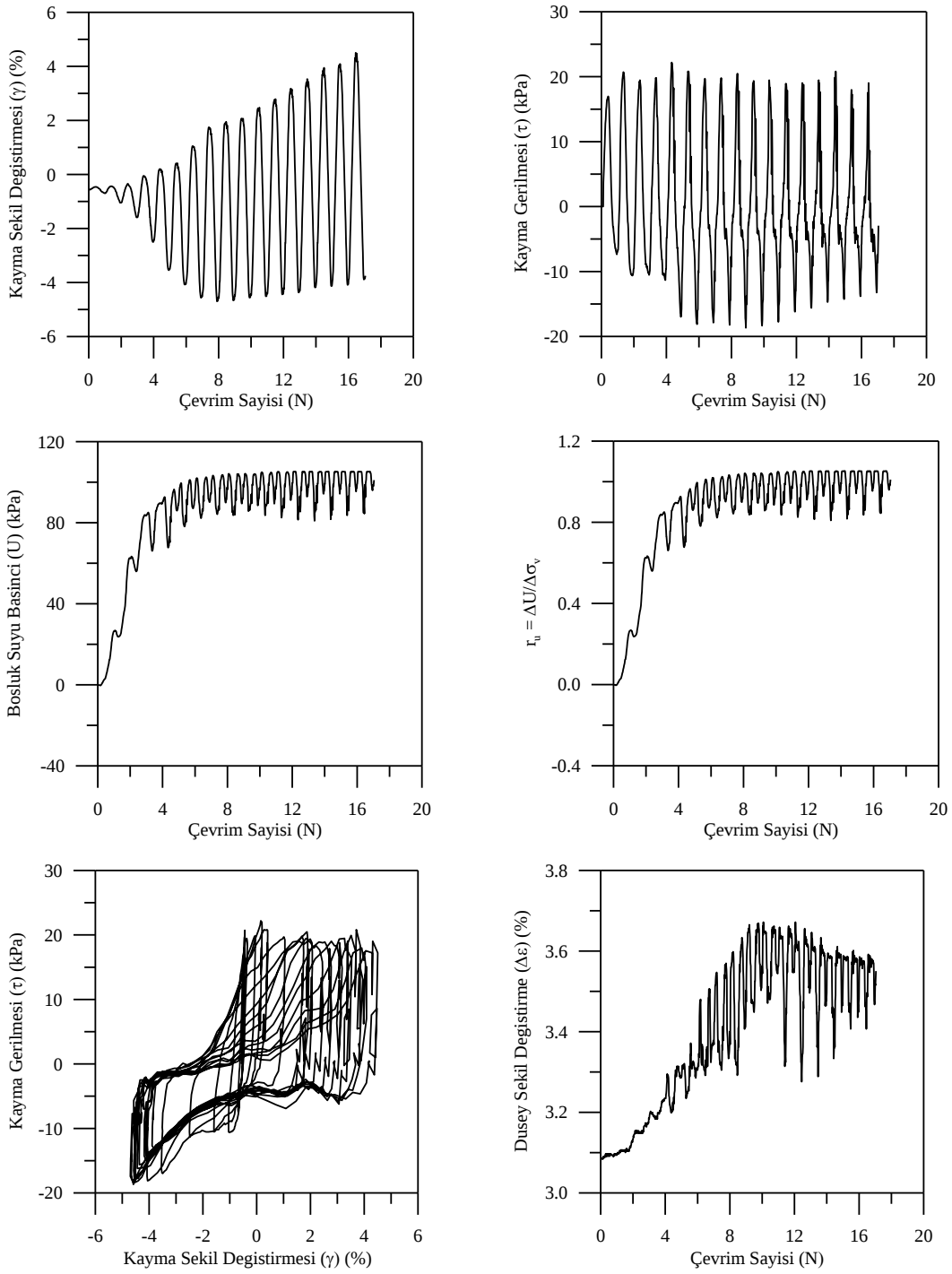
Şekil Ek 3.20 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



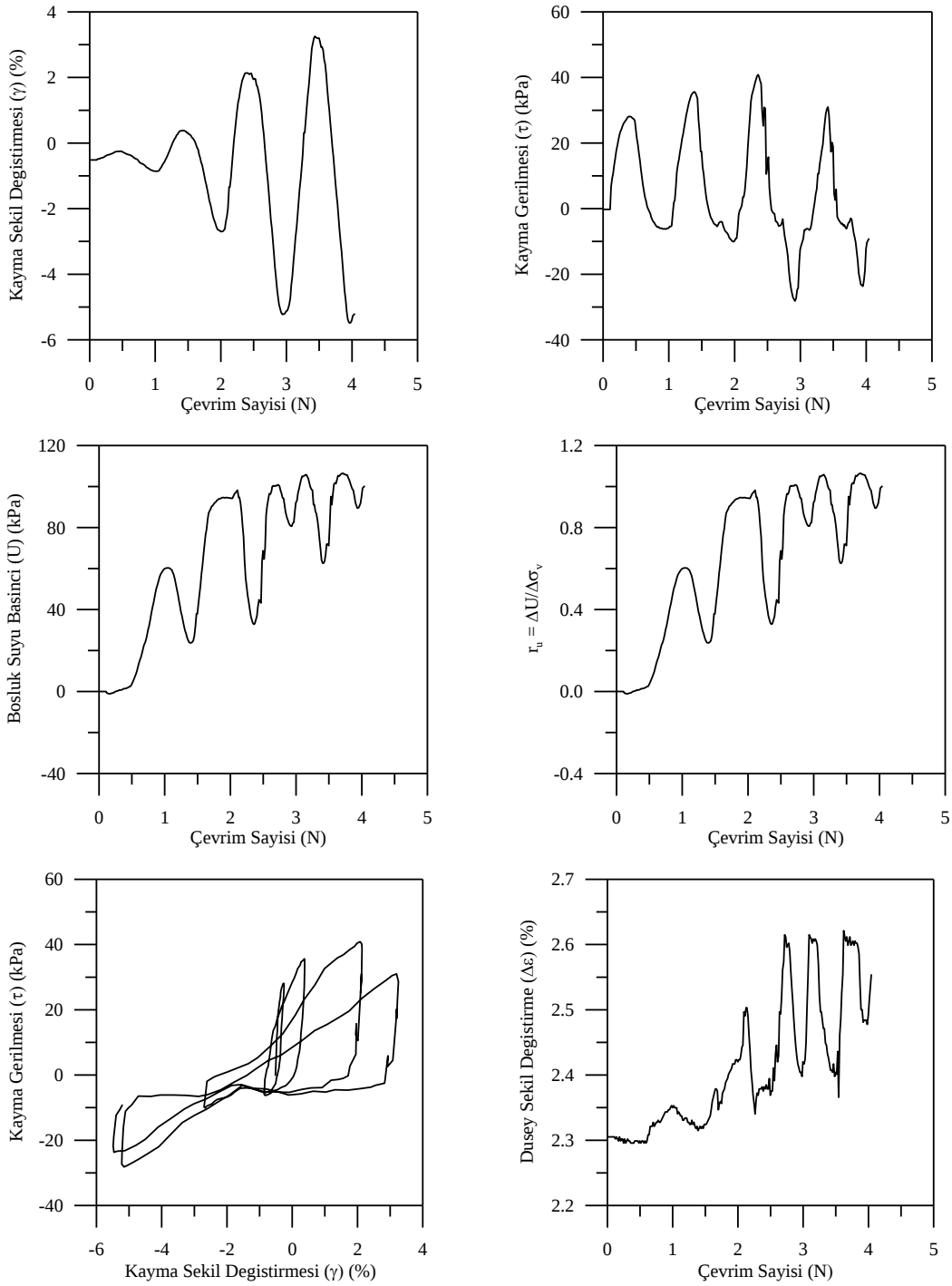
Şekil Ek 3.21 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



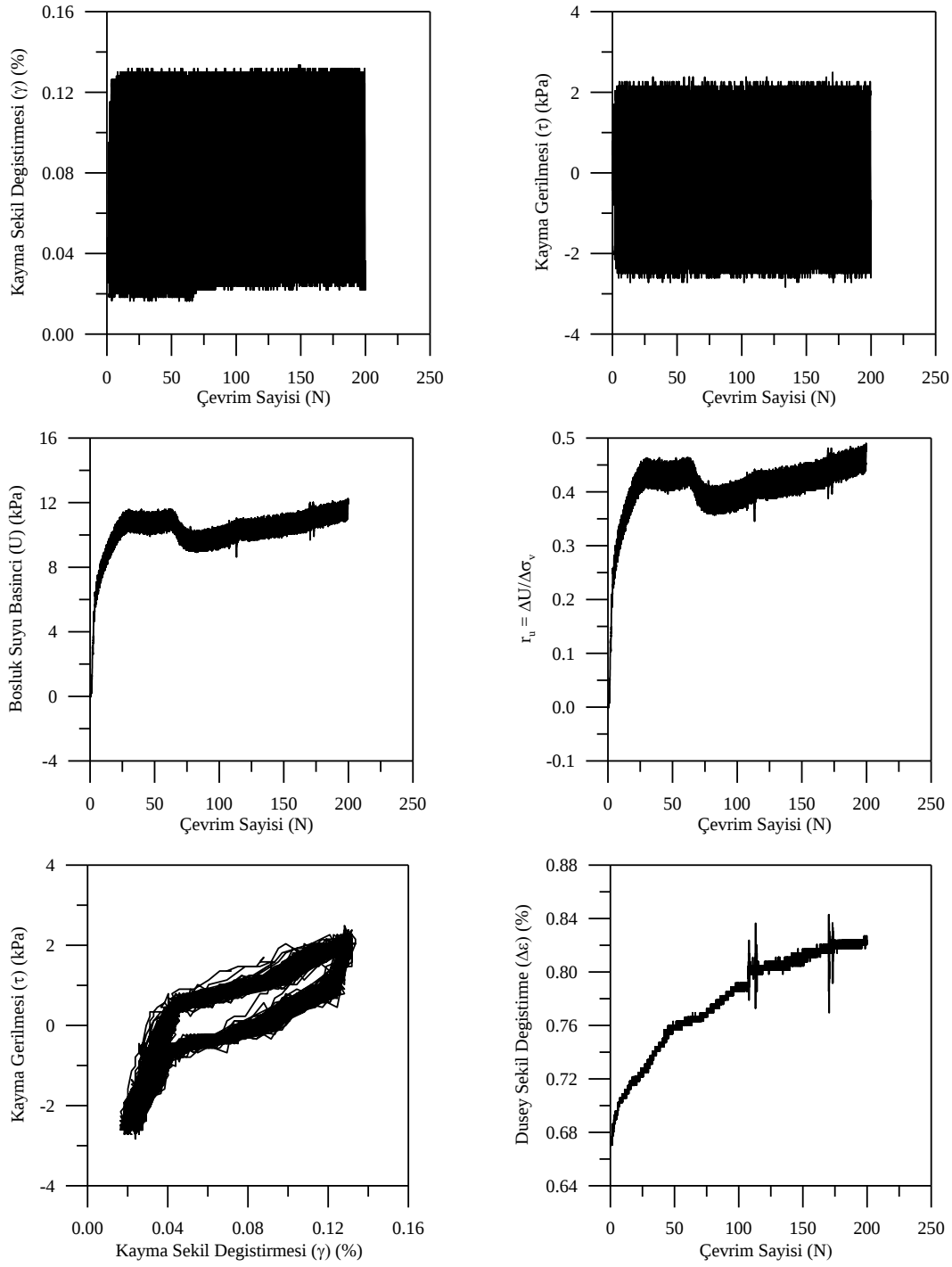
Şekil Ek 3.22 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



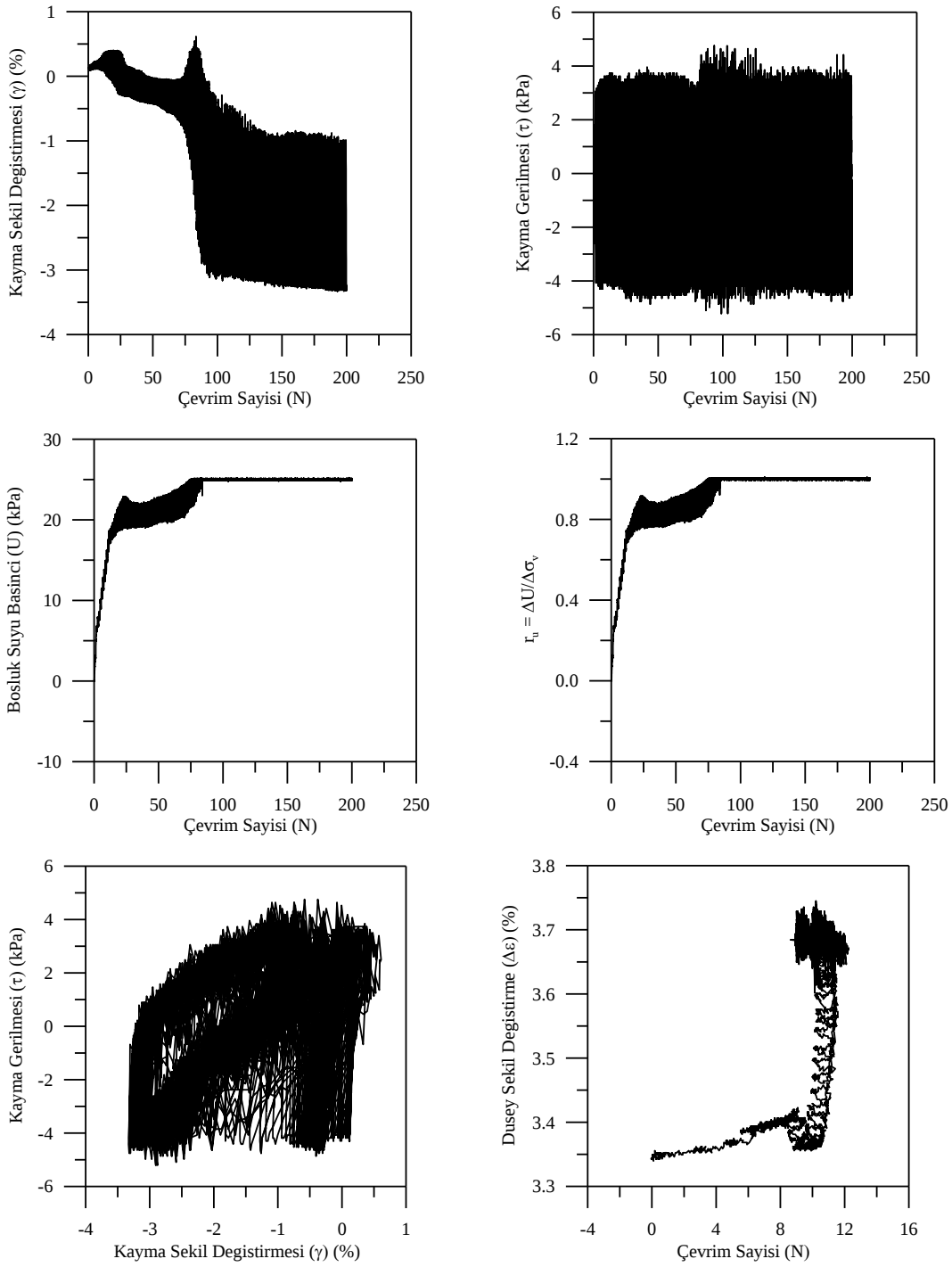
Şekil Ek 3.23 $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



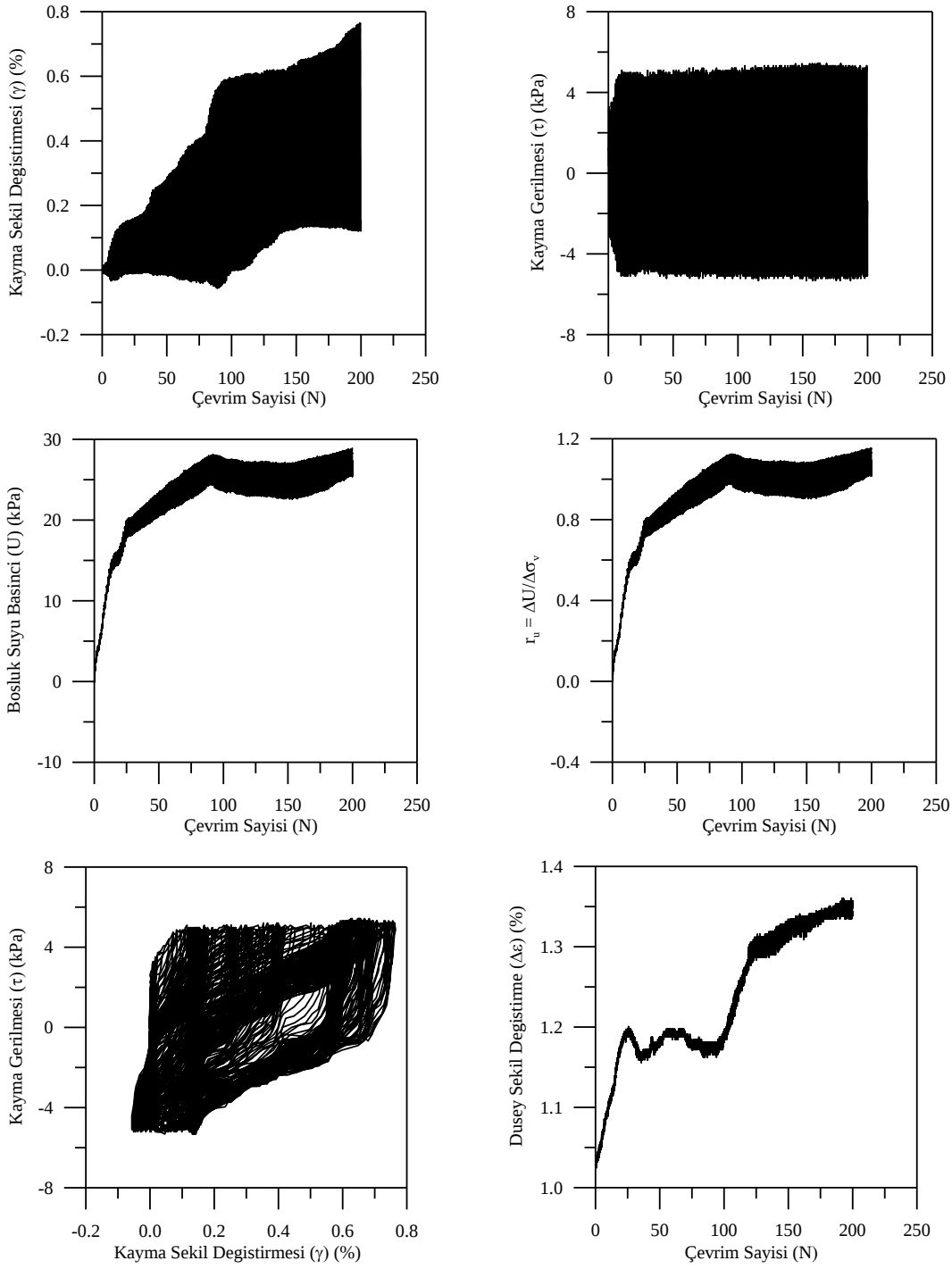
Şekil Ek 3.24 $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değişimi, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



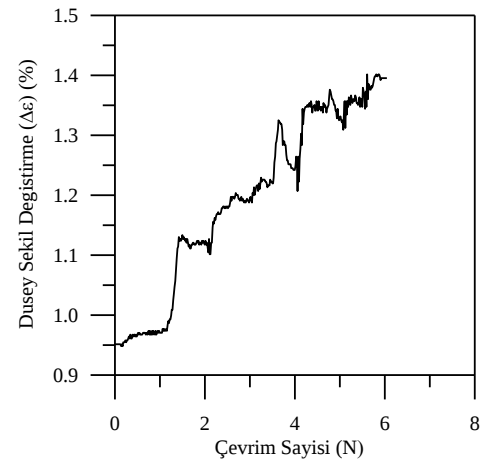
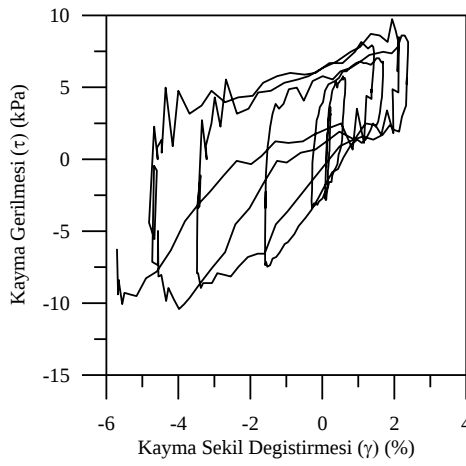
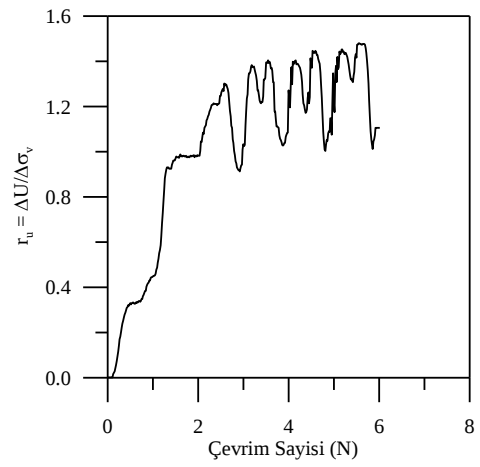
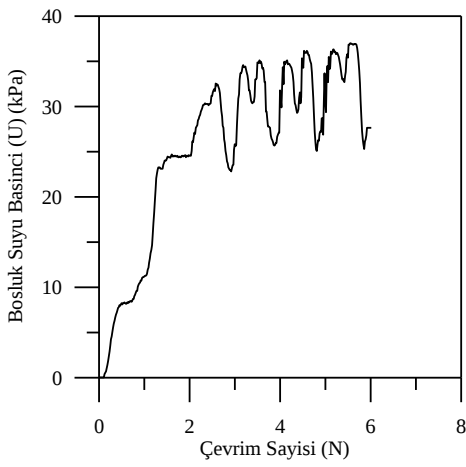
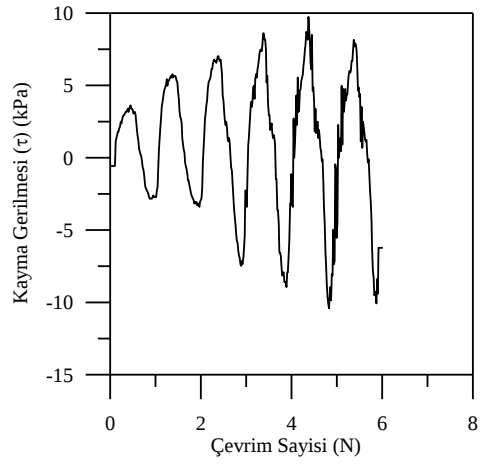
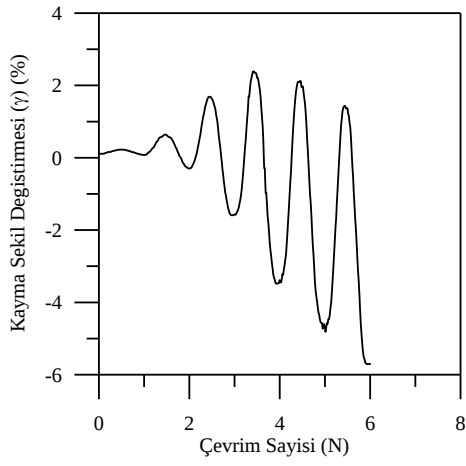
Şekil Ek 3.25 $D_r = 90\%$, $\sigma'_v = 25 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



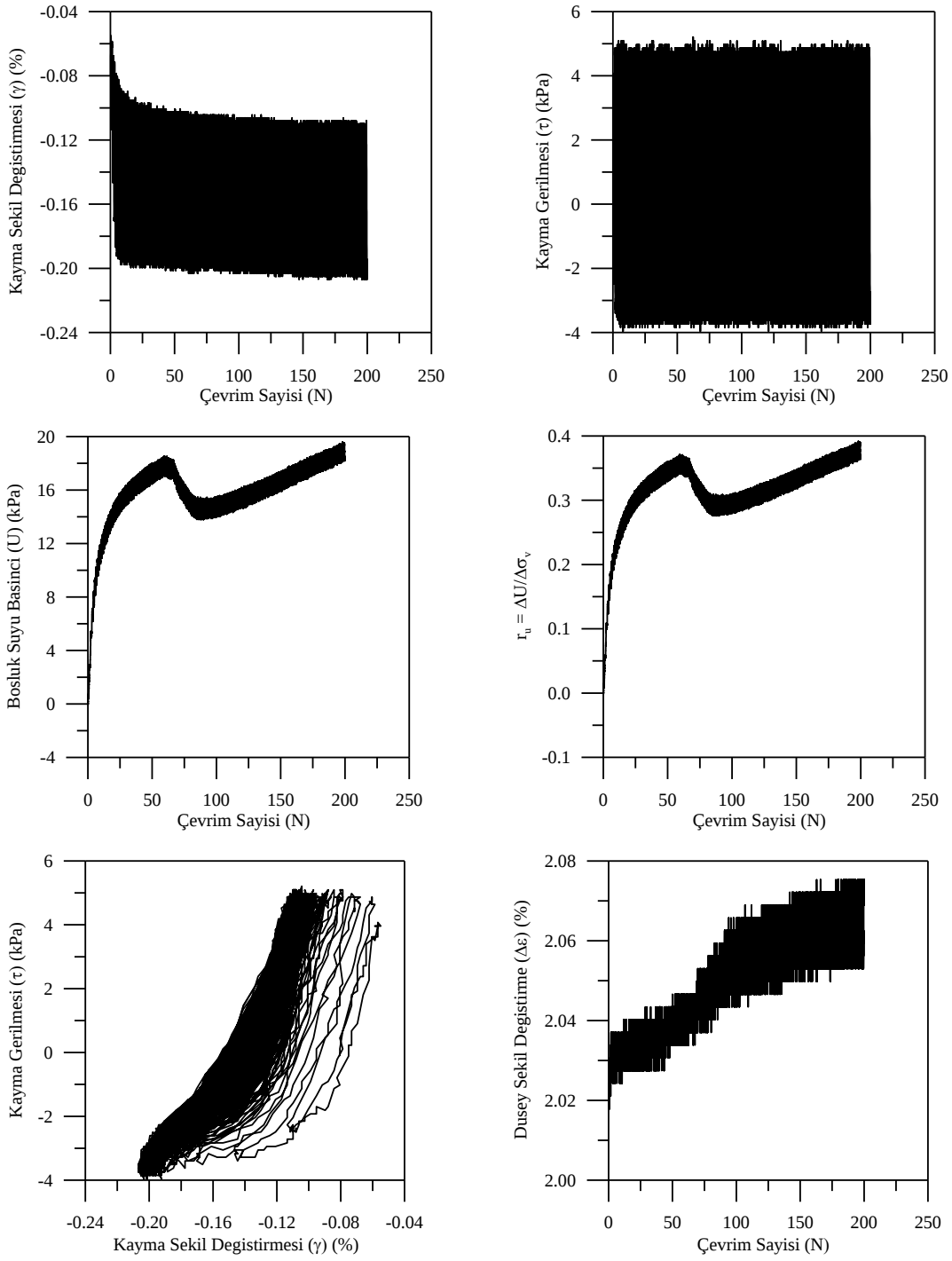
Şekil Ek 3.26 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



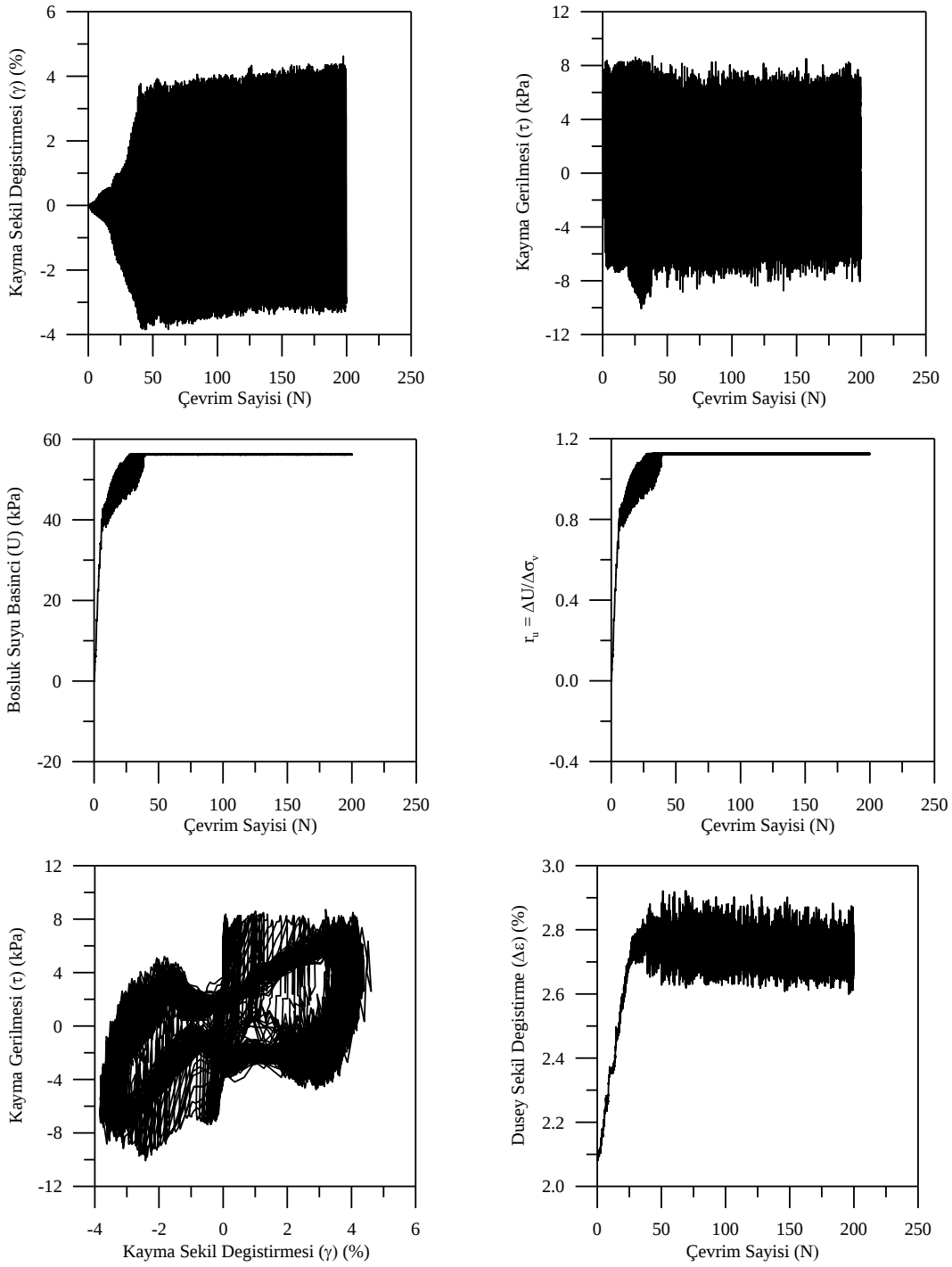
Şekil Ek 3.27 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 25 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



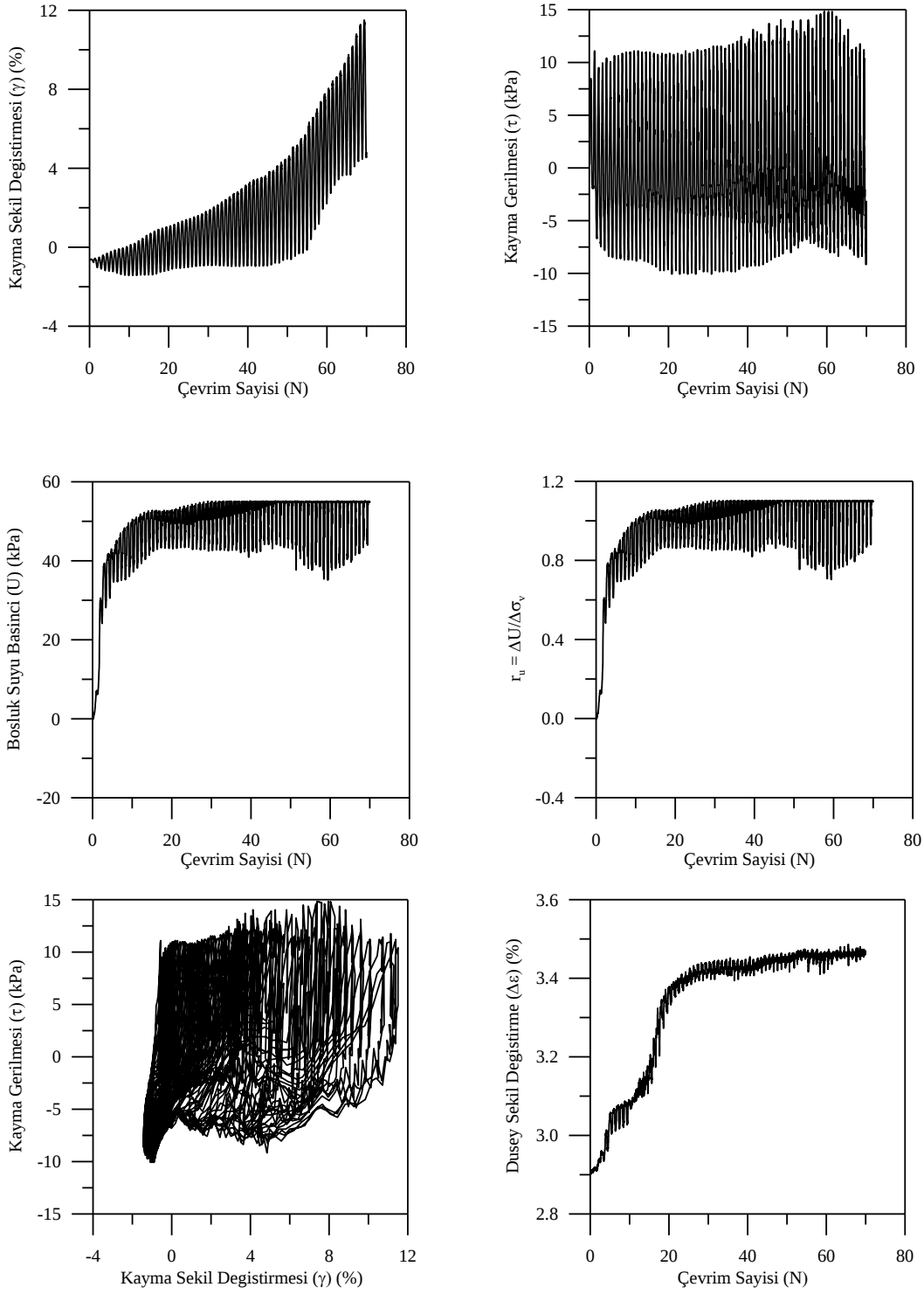
Şekil Ek 3.28 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 25\text{kPa}$, $\text{CSR} = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



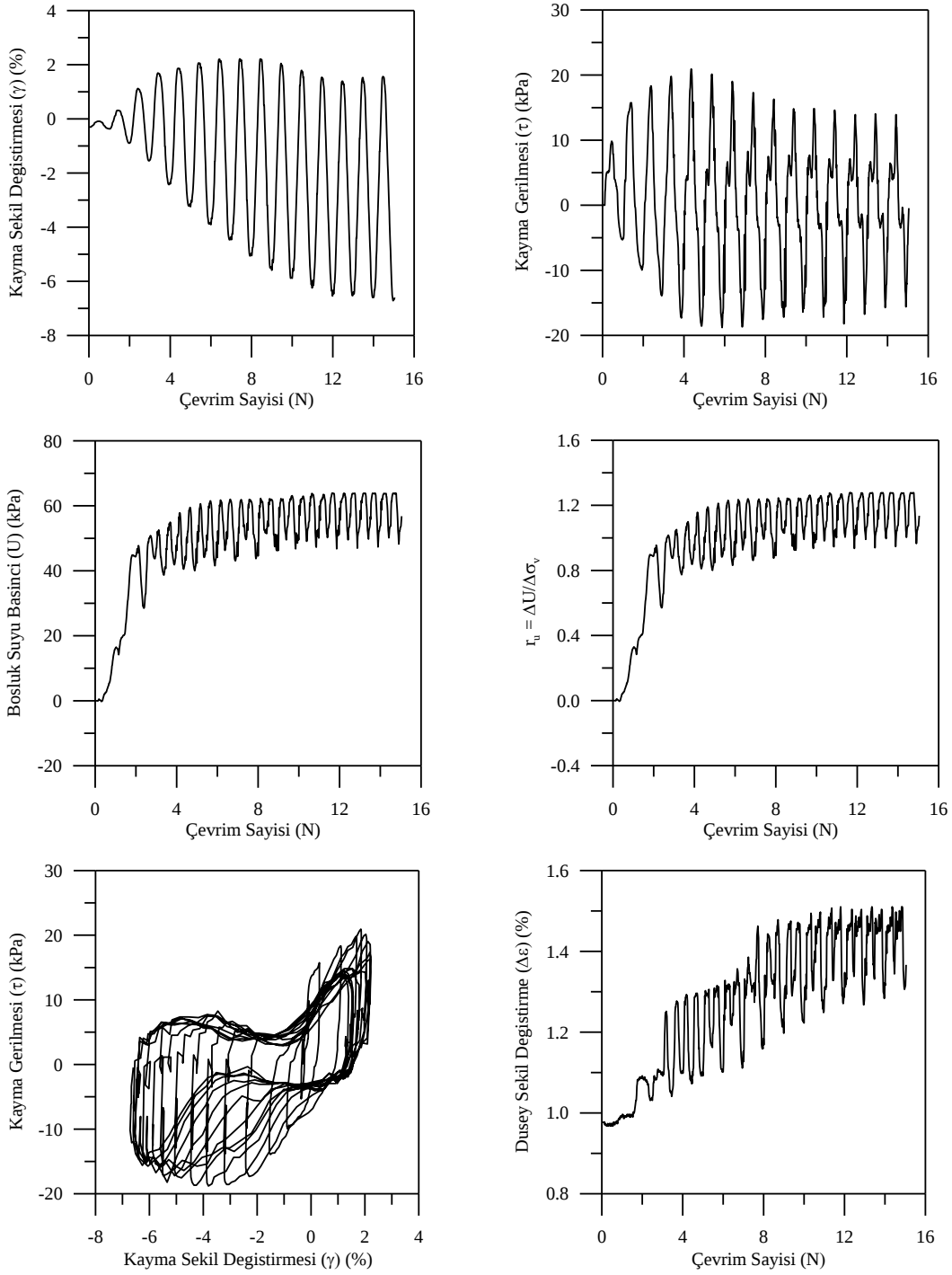
Şekil Ek 3.29 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



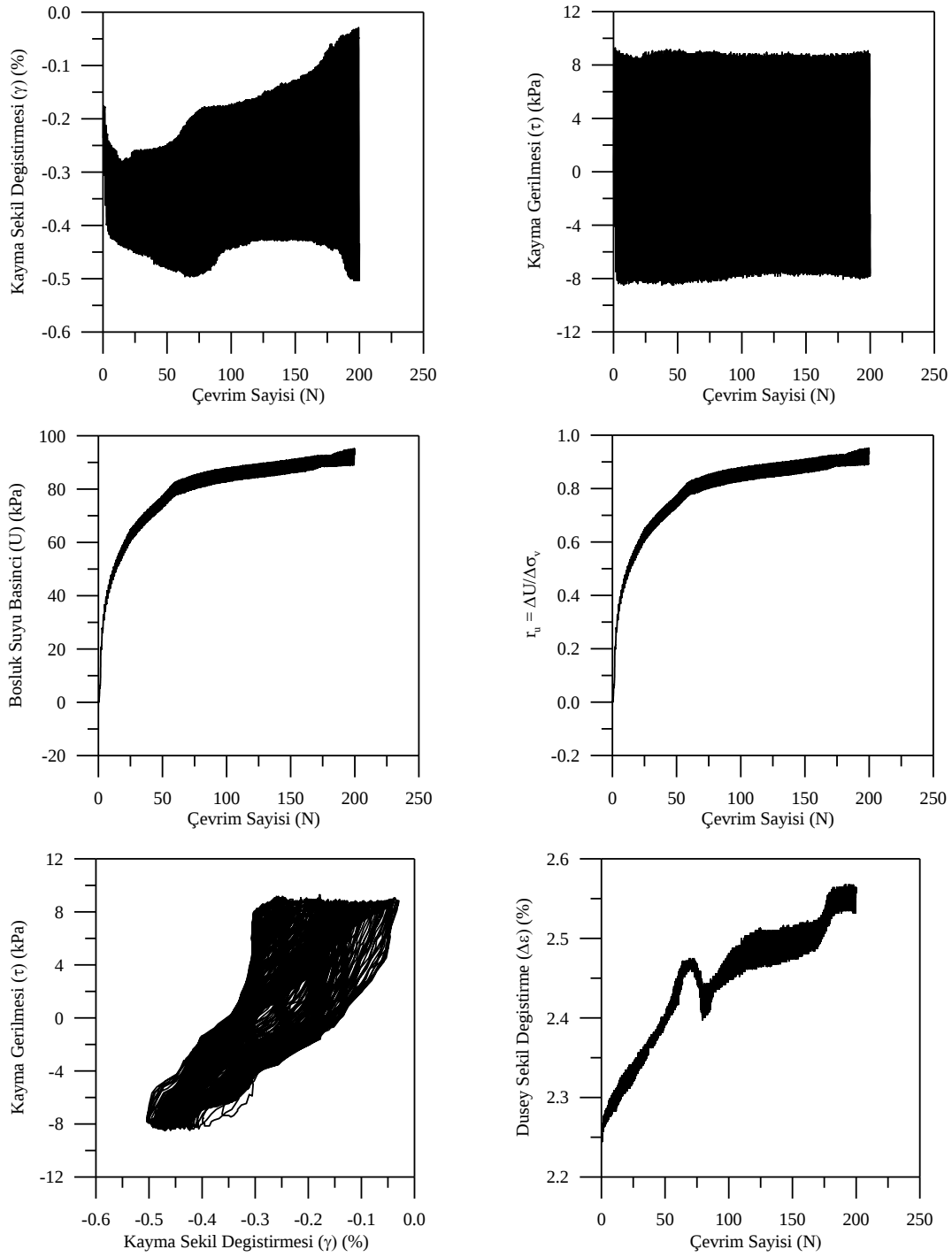
Şekil Ek 3.30 $D_r = 90\%$, $\sigma'_v = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



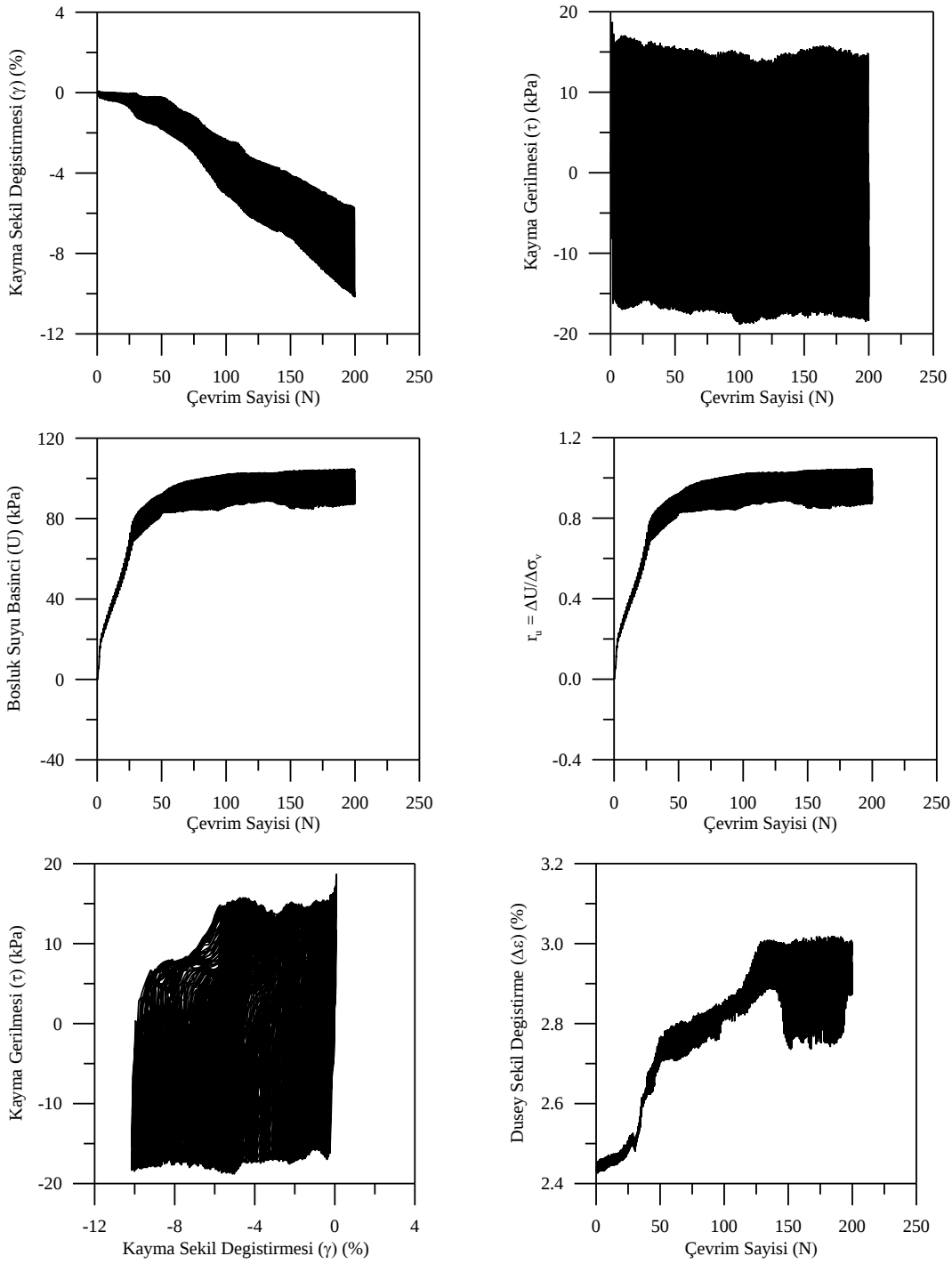
Şekil Ek 3.31 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



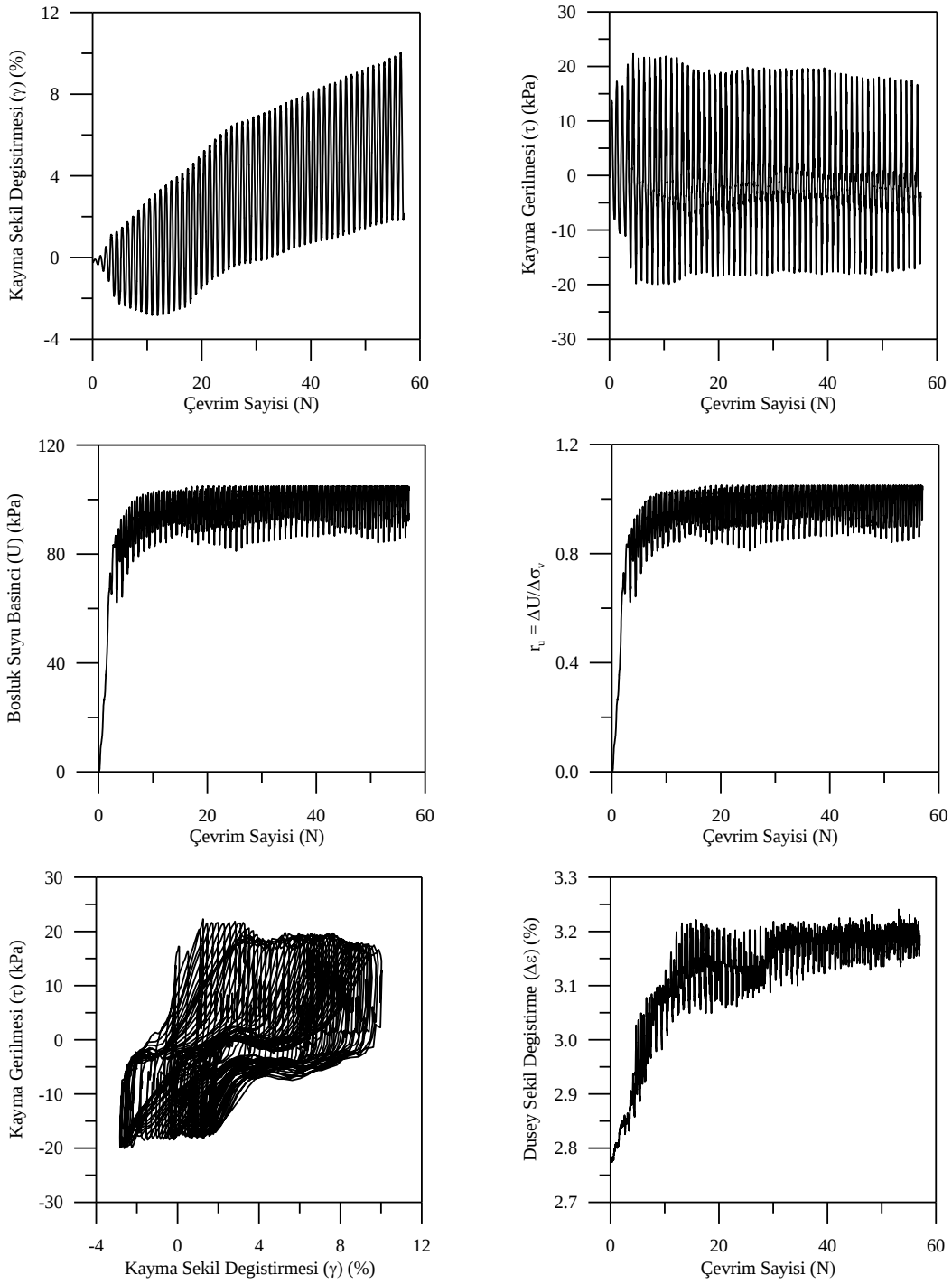
Şekil Ek 3.32 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 50 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



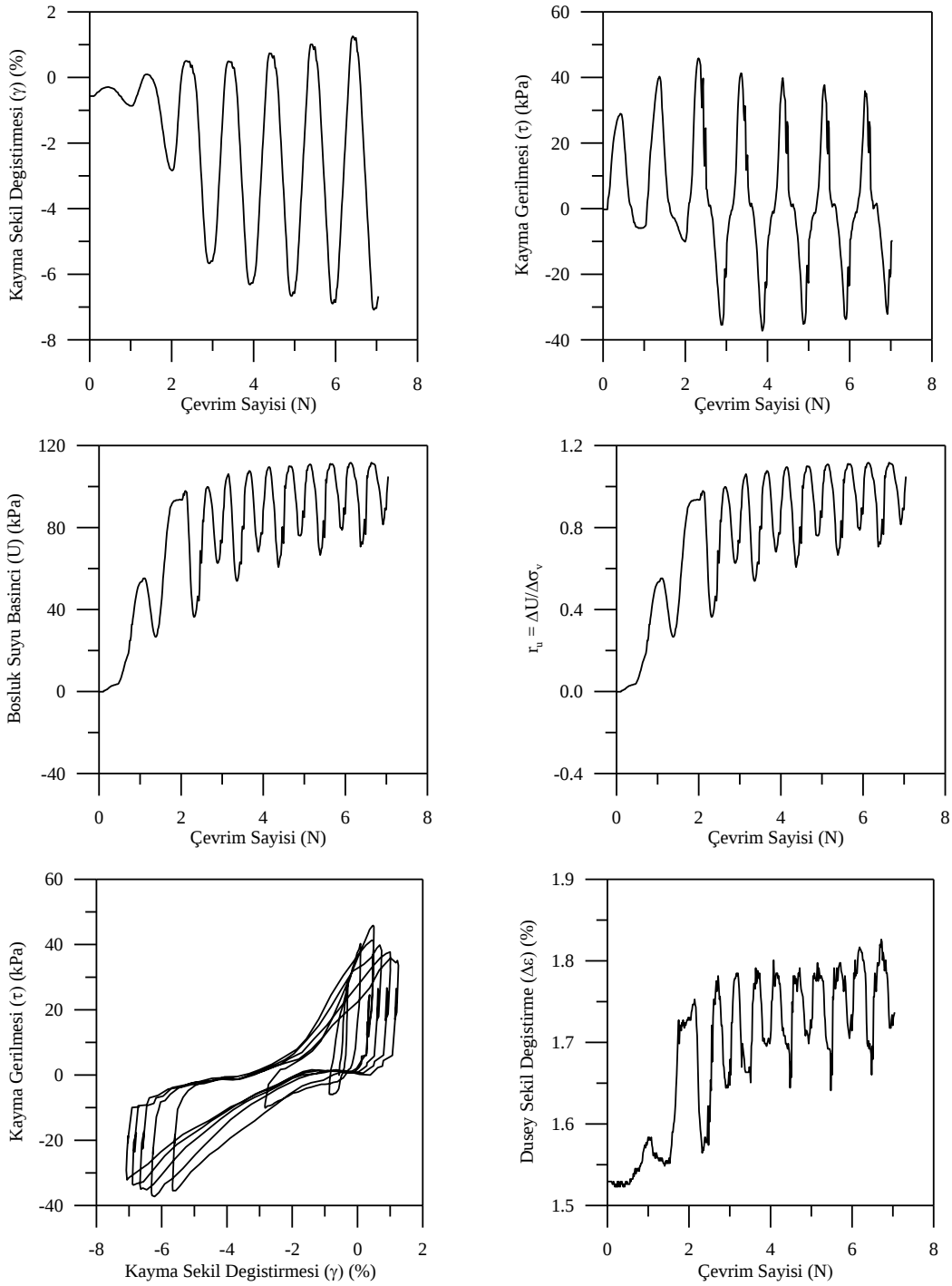
Şekil Ek 3.33 $D_r = 90\%$, $\sigma'_v = 100 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.1$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



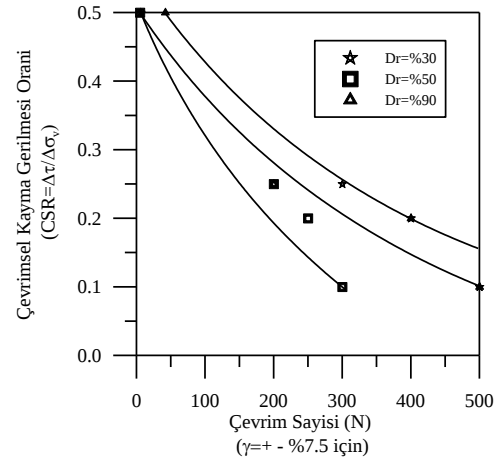
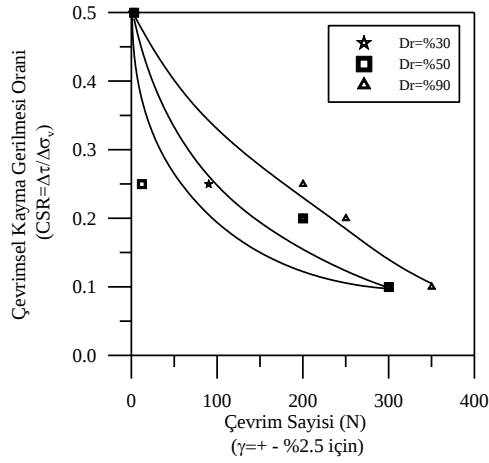
Şekil Ek 3.34 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.2$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



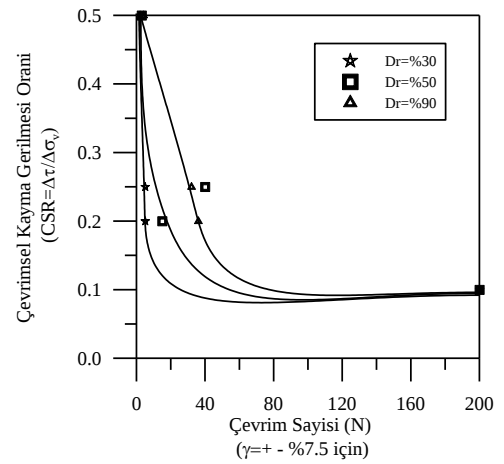
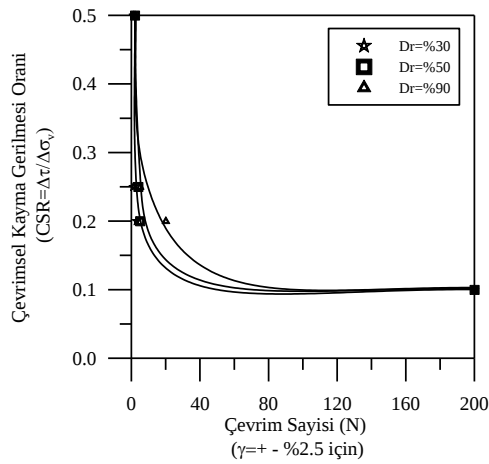
Şekil Ek 3.35 $D_r = 90\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $\text{CSR} = 0.25$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



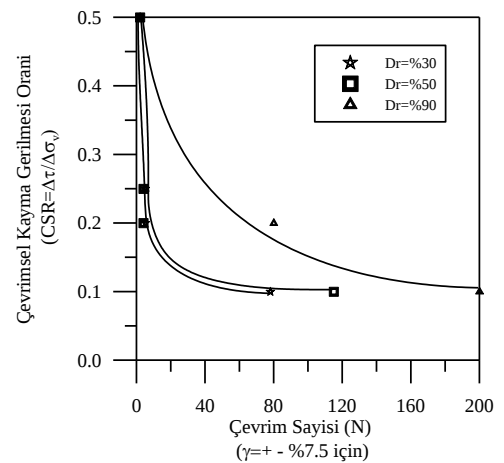
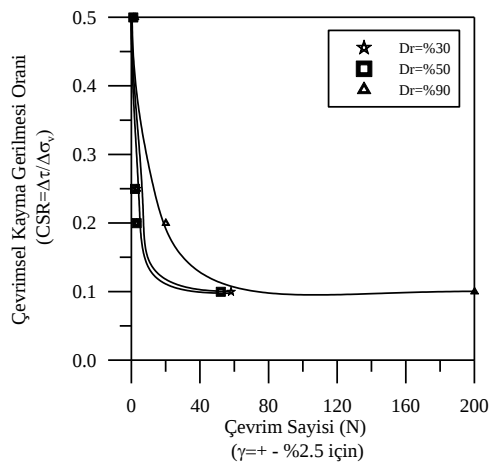
Şekil Ek 3.36 $D_r = \%90$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, $CSR = 0.5$ için, çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi-kayma gerilmesi ve çevrim sayısı-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı-normalize boşluk suyu basıncı eğrileri



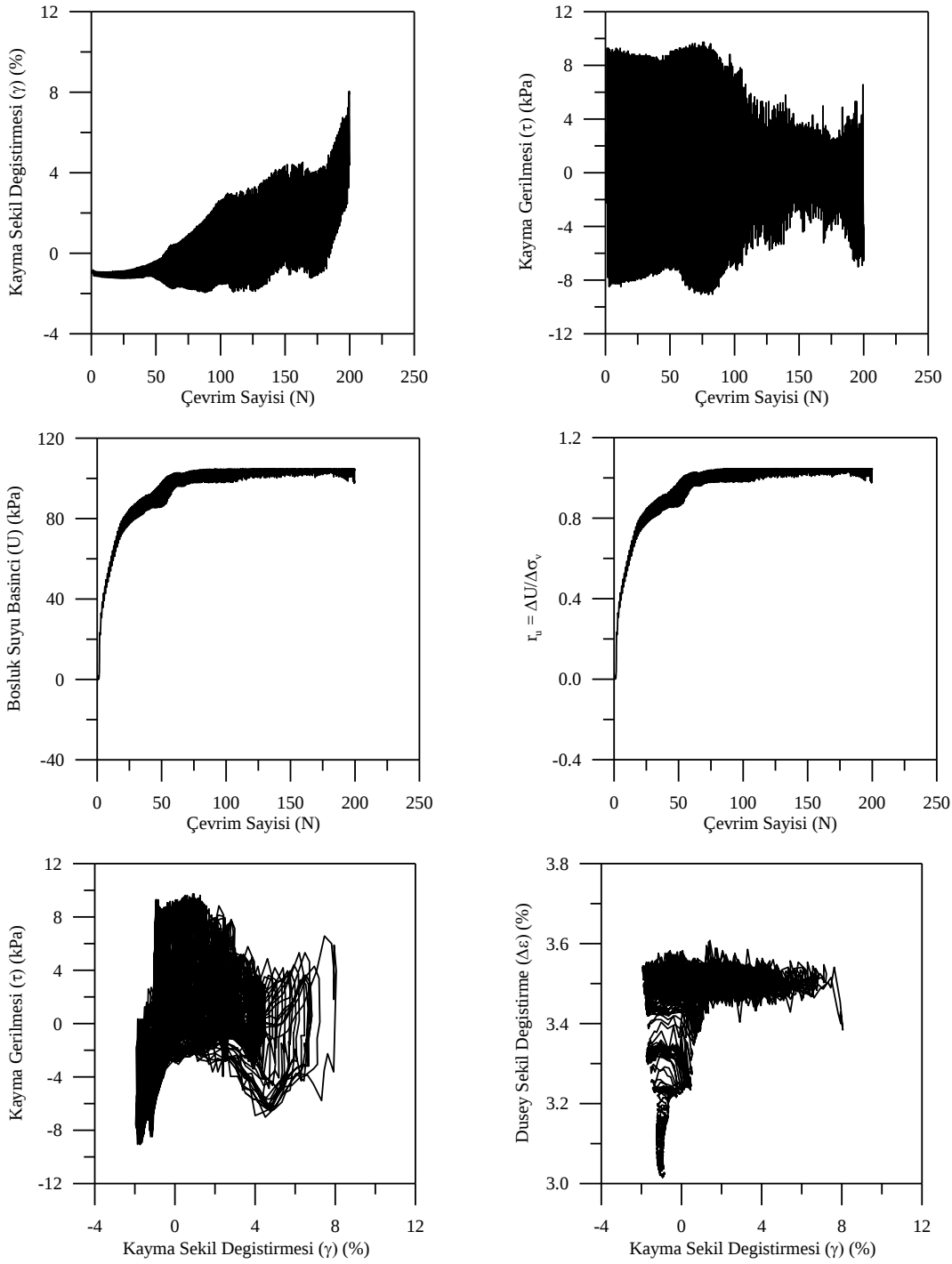
Şekil Ek 3.37 Uygulanan 25kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi



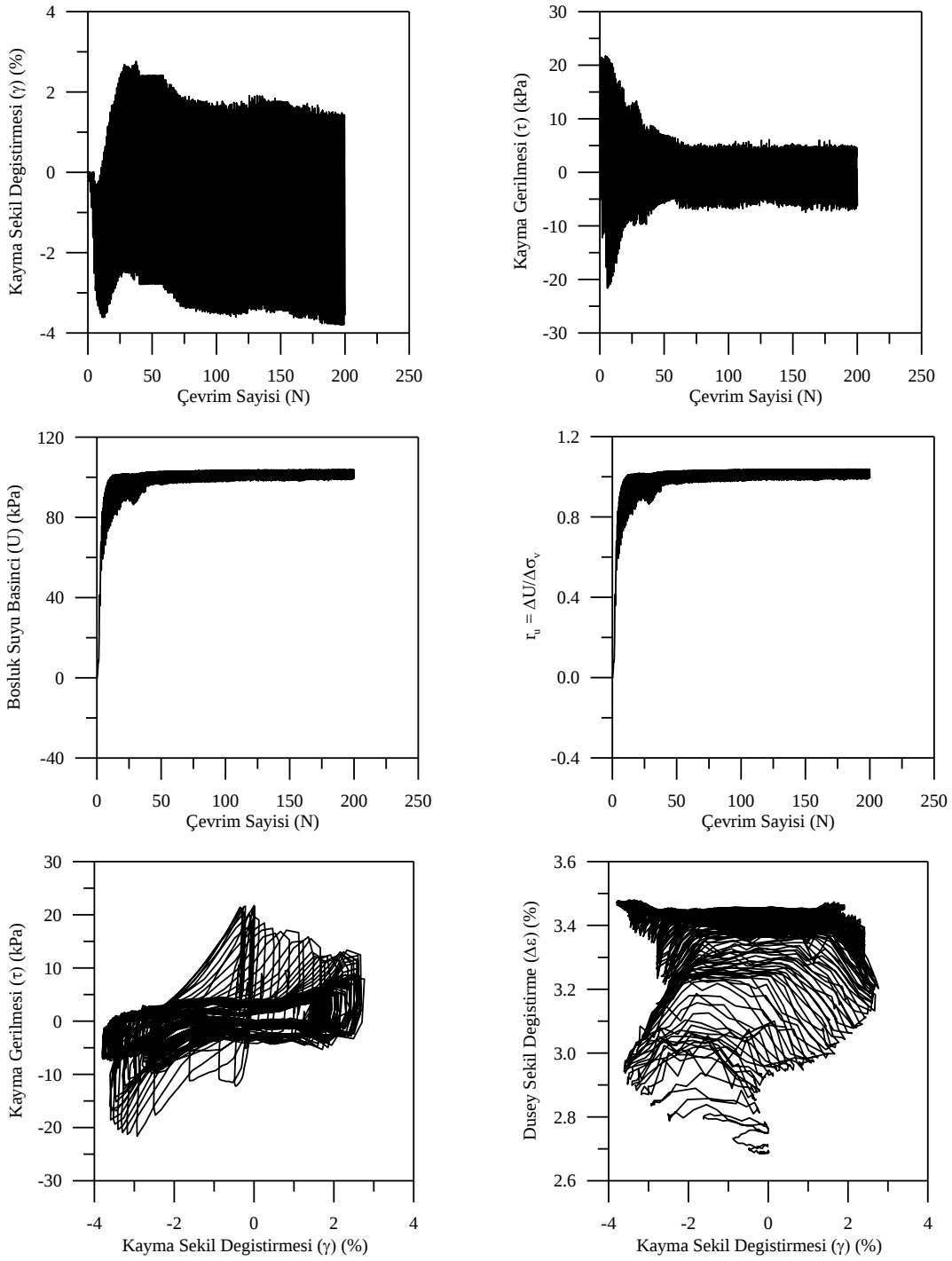
Şekil Ek 3.38 Uygulanan 50kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi



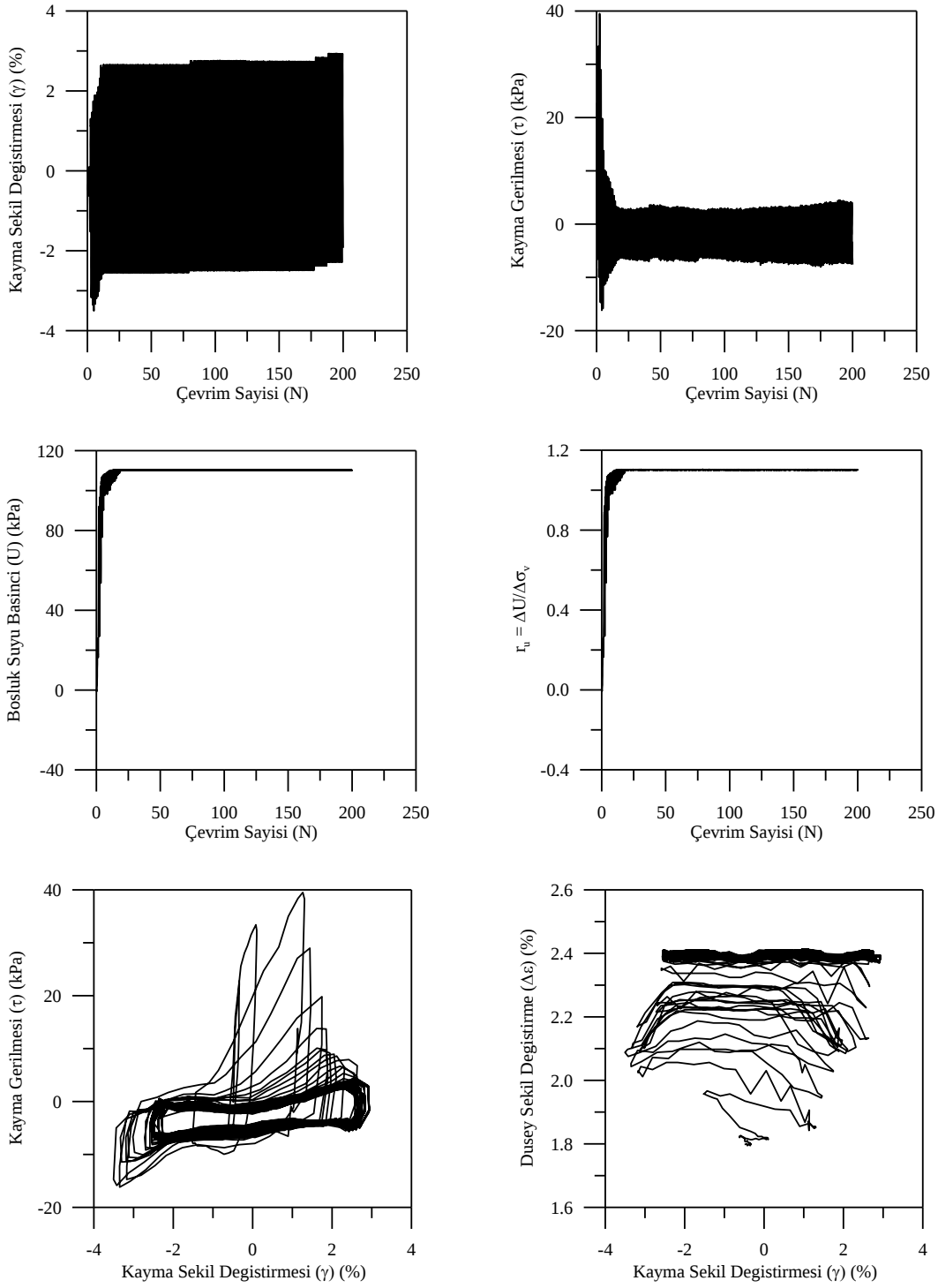
Şekil Ek 3.39 Uygulanan 100kPa düşey gerilme altında $\gamma = \pm 2.5\%$ ve $\gamma = \pm 7.5\%$ kayma şekil değiştirme değerleri için çevrim sayısı-çevrimsel gerilme oranı ilişkisi



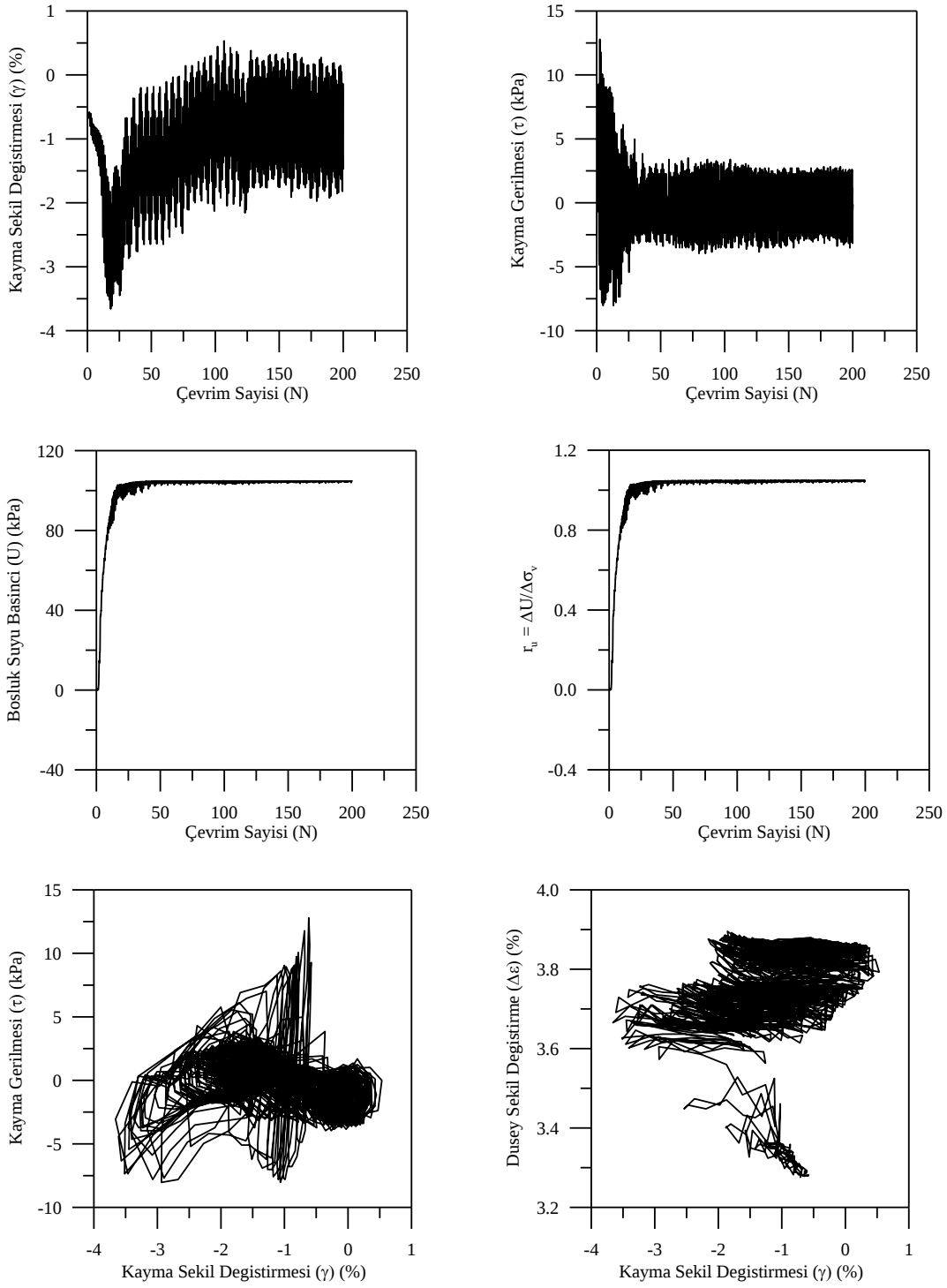
Şekil Ek 3.40 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $CSR = 0.1$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



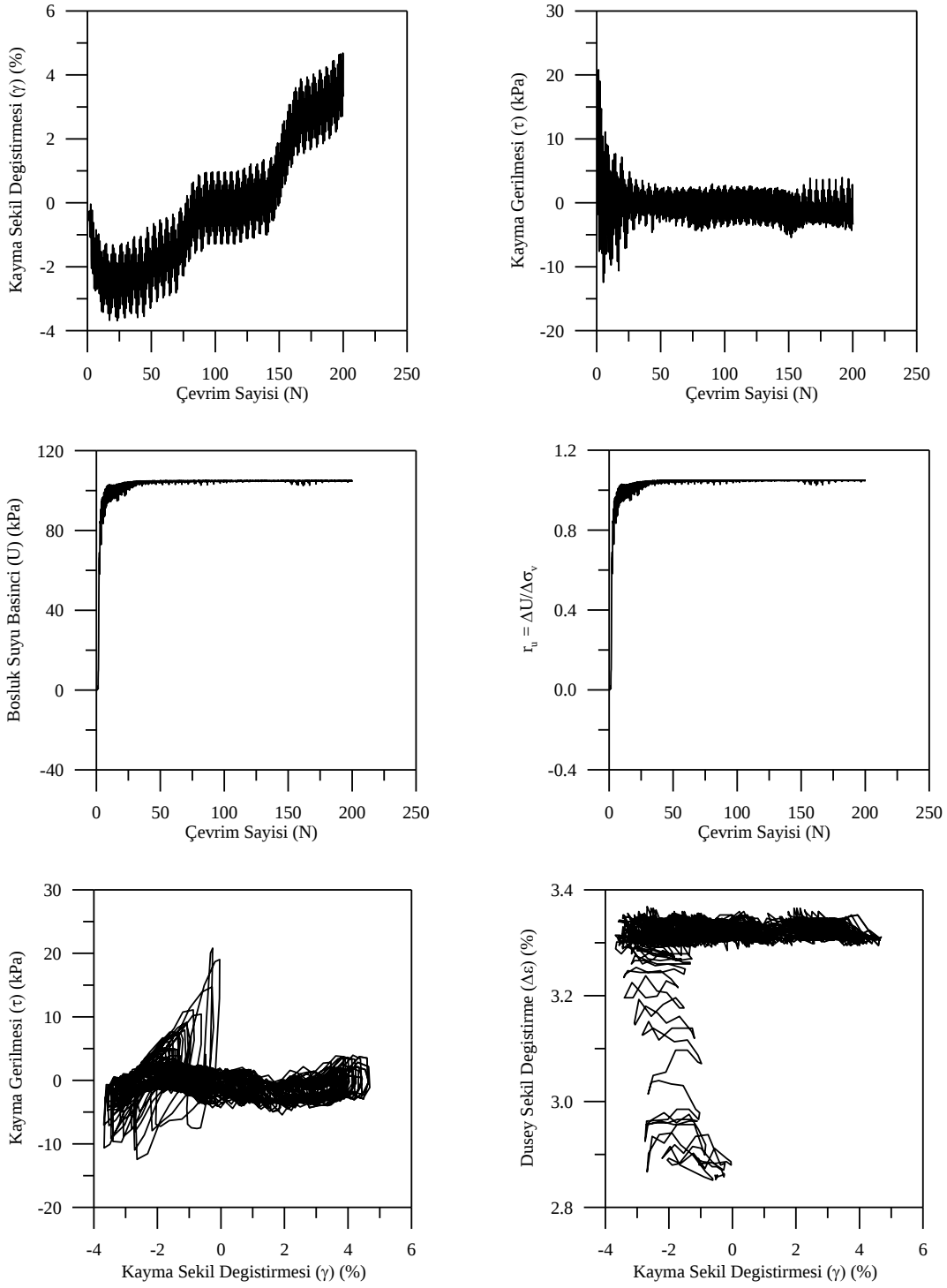
Şekil Ek 3.41 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = \%50$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $\text{CSR} = 0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



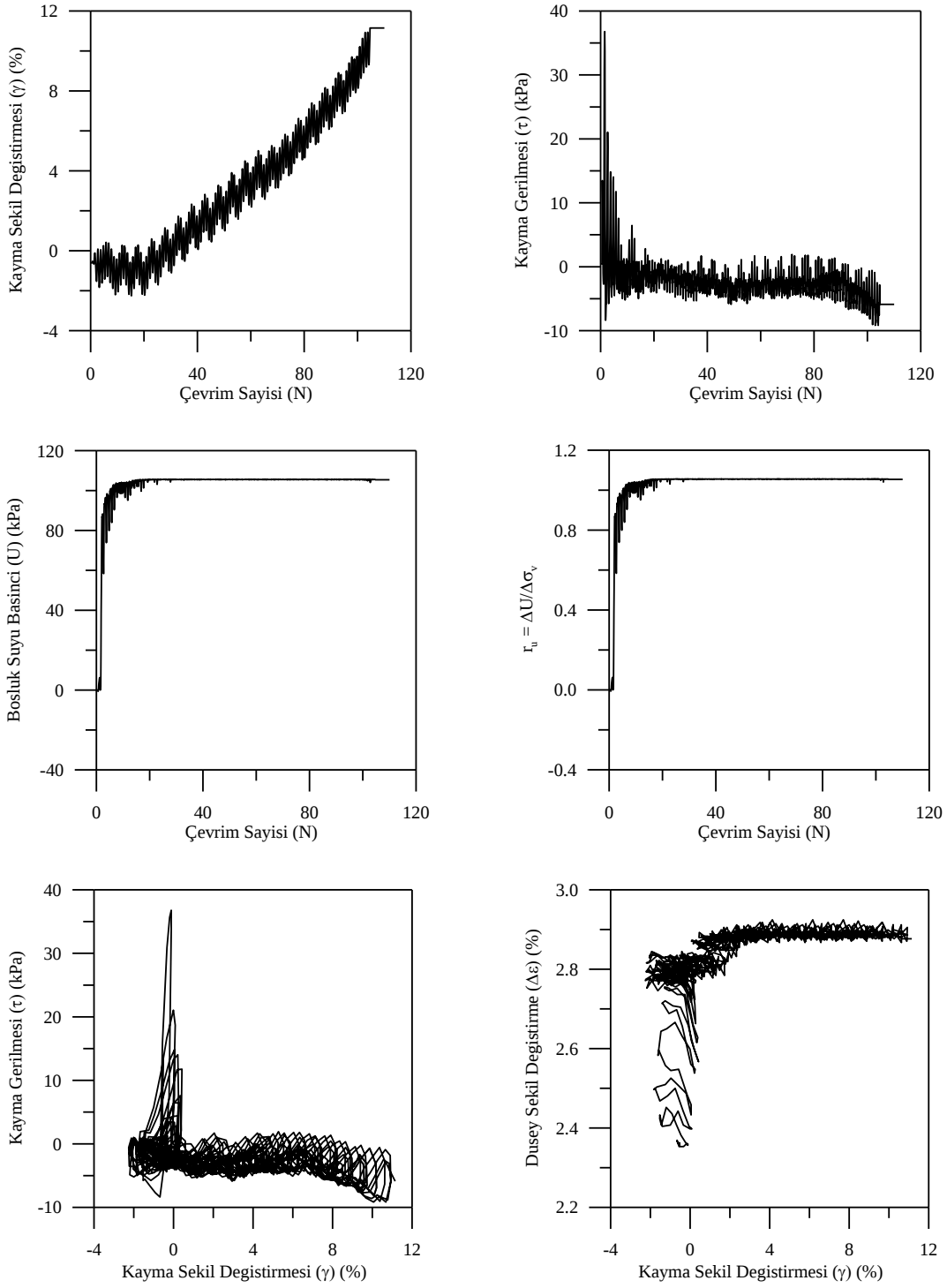
Şekil Ek 3.42 Yükleme frekansı 2Hz, $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $CSR = 0.5$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



Şekil Ek 3.43 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $CSR = 0.1$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



Şekil Ek 3.44 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100\text{kPa}$ ve $CSR = 0.25$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



Şekil Ek 3.45 Yükleme frekansı 5Hz, $D_r = 50\%$, $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$ ve $CSR = 0.5$ olan çevrim sayısı-kayma gerilmesi, çevrim sayısı-kayma şekil değişimi, kayma şekil değişimi- kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi-düşey şekil değiştirme, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	24.04.1985	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1998-2002	Göztepe İhsan Kurşunoğlu Süper Lisesi
Lisans	2003-2007	İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fak. Jeofizik Mühendisliği Bölümü