

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DANELİ KATKILARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ KİL NUMUNELERİNİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

GÖZDE GERÇEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. SUAT AKBULUT

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DANELİ KATKILARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ KİL NUMUNELERİNİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Gözde GERÇEK tarafından hazırlanan tez çalışması 12.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Suat AKBULUT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Suat AKBULUT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Pelin ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayfer ERKEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında daneli katkılarla güçlendirilmiş kil numuneler üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneyleri sonucunda numunelerin dinamik kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanarak, dinamik özelliklere katkıların etkisi araştırılmıştır.

Bu süreçte kendisiyle çalışma imkanı tanıdığı, bilgi ve deneyimini benle paylaştığı için tez danışmanım Prof. Dr. Suat AKBULUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen, tez çalışmama yaptığı katkılarla bilgi ve tecrübelerini aktaran Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK'a teşekkürü borç bilirim.

Saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Pelin ÖZENER ve Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e jüri üyesi olarak tez çalışmama yaptıkları katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu süreç boyunca sabırla yanımda olan annem Sema GERÇEK'e, babam Güven GERÇEK'e ve aynı süreçleri omuz omuza yaşadığım, değerli dostum Gökçe Nazlı KALBAZ'a çok teşekkür ederim.

Haziran, 2019

Gözde GERÇEK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	22
1.3 Hipotez	23
BÖLÜM 2.....	24
ZEMİNLERİN DİNAMİK PARAMETRELERİ VE DİNAMİK BASİT KESME DENEYİ	24
2.1 Zeminlerin Dinamik Parametrelerini Belirleme Yöntemleri	24
2.1.1 Arazi Deneyleri	25
2.1.1.1 Sismik Kırılma ve Yansıma Deneyleri	25
2.1.1.2 Karşıt Kuyu Deneyi	26
2.1.1.3 Alt Kuyu – Üst Kuyu Deneyleri	26
2.1.1.4 Rayleigh Dalgası Deneyi	26
2.1.1.5 Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Koni Penetrasyon Deneyi (CPT).....	27
2.1.2 Laboratuvar Deneyleri	28
2.1.2.1 Dinamik Üç Eksenli Deney.....	29
2.1.2.2 Rezonant Kolon Deneyi.....	29
2.1.2.3 Bender Eleman Deneyi.....	30
2.1.2.4 Burulmalı Kesme Deneyi	30
2.1.2.5 Dinamik Basit Kesme Deneyi.....	30
2.2 Dinamik Kayma Modülü.....	31
2.3 Sönüm Oranı	37
BÖLÜM 3.....	39

MALZEME VE YÖNTEM	39
3.1 Malzemeler	39
3.1.1 Kil	39
3.1.2 Kırmızı Çamur	41
3.1.3 Uçucu Kül	43
3.1.4 Silis Dumanı	44
3.2 Yöntem	45
3.2.1 Katkılı Numunelerin Hazırlanması	45
3.2.2 Kıvam Limitlerinin Tayini	45
3.2.3 Kompaksiyon Deneyi	46
3.2.4 Serbest Basınç Deneyi	47
3.2.5 Dinamik Basit Kesme Deneyi	48
BÖLÜM 4	59
DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	59
4.1 Katkı Malzemelerinin Kıvam Limitlerine Etkisi	59
4.2 Katkı Malzemelerinin Kompaksiyon Parametrelerine Etkisi	63
4.3 Katkı Malzemelerinin Serbest Basınç Dayanımlarına Etkisi	68
4.4 Deney Numunelerinin Dinamik Basit Kesme Deneylerine Bağlı Olarak Histeritik Grafikleri	72
4.4.1 Katkısız Kil Numunesinin Histeritik Grafikleri	72
4.4.2 %5 Uçucu Kül Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	73
4.4.3 %10 Uçucu Kül Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	74
4.4.4 %15 Uçucu Kül Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	75
4.4.5 %5 Silis Dumanı Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	77
4.4.6 %10 Silis Dumanı Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	78
4.4.7 %15 Silis Dumanı Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	79
4.4.8 %5 Kırmızı Çamur Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	80
4.4.9 %10 Kırmızı Çamur Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	81
4.4.10 %15 Kırmızı Çamur Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri	82
4.4.11 Histeritik İlmeklerine Bağlı Olarak Kritik Gerilme Seviyelerinin Belirlenmesi	83
4.5 Katkı Malzemelerinin Sekant Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi ..	83
4.5.1 Uçucu Kül Katkısının Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi	84
4.5.2 Silis Dumanı Katkısının Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi	87
4.5.3 Kırmızı Çamur Katkısının Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi	89
4.5.4 Katkı Malzemelerinin Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Değerlerine Etkisi	92
BÖLÜM 5	98
SONUÇ VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	105

SİMGE LİSTESİ

D	Sönüm Oranı
D_{maks}	Maksimum Sönüm Oranı
D_{min}	Minimum Sönüm Oranı
E_d	Dinamik Elastisite Modülü
E_{dmax}	Maksimum Dinamik Elastisite Modülü
G	Dinamik Kayma Modülü
G/G_{maks}	Normalize kayma modülü
G_{maks}	Maksimum kayma modülü
G_s	Özgül ağırlık
G_{sek}	Sekant kayma modülü
G_{tan}	Tanjant kayma modülü
w_{opt}	Optimum Su Muhtevası
ϵ	Şekil Değişirme
γ	Şekil Değişirme
$\gamma_{k,max}$	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık

KISALTMA LİSTESİ

AKO	Aşırı Konsolidasyon Oranı
ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Official
BK	Burulmalı Kesme
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	Düşük Plastisiteli Kil
CSR	Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranı
DCM	Deep Cement Mixing
DSS	Direkt Basit Kesme
LL	Likit Limit
PL	Plastik Limit
PI	Plastisite İndisi
RCT	Resonant Kolon Deneyi
RK	Resonant Kolon
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
TST	Burulmalı Kesme Deneyi
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Çimento katkı oranının G/G_{maks} - Şekil Değiştirme grafiğine etkisi [1].....	3
Şekil 1.2	Çimento tipinin G/G_{maks} - Şekil Değiştirme grafiğine etkisi [1].....	3
Şekil 1.3	Çimento katkı oranının D/D_{min} - Şekil Değiştirme grafiğine etkisi [1]	3
Şekil 1.4	Çimento tipinin D/D_{min} - Şekil Değiştirme grafiğine etkisi [1]	4
Şekil 1.5	Çimento katkısının sönüm oranına etkisi [1]	4
Şekil 1.6	Çimento tipinin sönüm oranına etkisi [1]	4
Şekil 1.7	Çimento oranına göre G/G_{maks} - Şekil Değiştirme grafiği [2]	5
Şekil 1.8	Çimento oranına göre Sönüm Oranı - Şekil Değiştirme grafiği [2]	6
Şekil 1.9	a) Katkısız kil b) %5 çimento katkılı c) %7.5 çimento katkılı d) %10 çimento katkılı numunelerin kayma modülü karşılaştırmaları [3]	8
Şekil 1.10	a) Katkısız kil b) %5 çimento katkılı c) %7.5 çimento katkılı d) %10 çimento katkılı numunelerin sönüm oranlarının karşılaştırmaları [3]	9
Şekil 1.11	a) Katkısız kil b) %5 çimento katkılı c) %7.5 çimento katkılı d) %10 çimento katkılı numunelerin G/G_{maks} grafiklerinin karşılaştırmaları [3]	10
Şekil 1.12	Kompozit kil/kil-çimento karışım modeli [4].....	10
Şekil 1.13	Kil ve farklı alan oranlarına sahip kompozit numunelerin şekil değiştirmeye bağlı E_d ve D grafikleri [4]	11
Şekil 1.14	Kil ve farklı alan oranlarına sahip kompozit numunelerin normalize edilmiş E_d ve D grafikleri[4]	12
Şekil 1.15	SM zemininin kireç oranına bağlı olarak G- γ ve D- γ grafikleri [5].....	12
Şekil 1.16	CM ve K zemininin kireç oranına bağlı olarak G- γ ve D- γ grafikleri [5].....	13
Şekil 1.17	SM zemininin normalize edilmiş G ve D grafikleri [5]	13
Şekil 1.18	Çimento katkısının kritik dinamik gerilme/donma-çözülme döngü sayısı grafiğine etkisi [6].....	14
Şekil 1.19	Kireç katkısının kritik dinamik gerilme/donma-çözülme döngü sayısı grafiğine etkisi [6].....	15
Şekil 1.20	Farklı uçucu kül oranlarında çevresel basınca bağlı G_{maks} ve D grafiği [7].....	16
Şekil 1.21	Farklı uçucu kül oranlarında kür süresine bağlı G_{maks} ve D grafiği [7]	16
Şekil 1.22	Lif oranına bağlı sönüm oranı değişimi [10].....	18
Şekil 1.23	Lif oranına bağlı dinamik kayma modülü değişimi [10]	19
Şekil 1.24	Fiber oranı ve uzunluğuna bağlı Dinamik Kayma Modülü – Birim Şekil Değiştirme grafiği [11].....	20
Şekil 1.25	Fiber uzunluğu 6 mm olan katkılı zeminler için fiber oranına bağlı Sönüm Oranı – Birim Şekil Değiştirme grafiği [11]	20

Şekil 1.26	Farkı numunelere ait $G/G_{maks-\gamma}$ grafikleri [12]	22
Şekil 2.1	Arazi ve laboratuvar deneylerinin uygulanmasına ilişkin şema [14]	25
Şekil 2.2	Karşıt kuyu methodu [17].....	26
Şekil 2.3	Kararlı titreşim metodu [17], [18]	27
Şekil 2.4	Rezonant kolon deney cihazının şematik temsili [20], [17]	30
Şekil 2.5	Farklı deformasyon genliklerindeki histeristik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [21]	31
Şekil 2.6	G_{maks} , G_{sek} , omurga eğrisi [23]	32
Şekil 2.7	Birim şekil değiştirme ile modül azalma eğrisi [15]	33
Şekil 2.8	Çevre basıncına bağlı olarak plastik olmayan zeminlere ait $G/G_{maks-\gamma}$ grafikleri [30], [24].....	35
Şekil 2.9	Çevre basıncına bağlı olarak yüksek plastisiteli zeminlere ait $G/G_{maks-\gamma}$ grafikleri [30], [24].....	35
Şekil 2.10	Normal ve aşırı konsolide ince daneli zeminler için PI 'nin $G/G_{maks-\gamma_c}$ grafiklerine etkisi [33], [24]	36
Şekil 2.11	Gerilme birim deformasyon eğrisi [17]	37
Şekil 2.12	Normal ve aşırı konsolide ince daneli zeminler için PI 'nin Sönüm Oranı- γ_c grafiklerine etkisi [33], [24]	38
Şekil 2.13	Suya doymun killer için sönüm oranları [29]	38
Şekil 3.1	Kil numunesine ait görsel.....	40
Şekil 3.2	Numunenin dane çapı dağılımı	40
Şekil 3.3	Piknometre ve hidrometre deneylerine ait görseller.	41
Şekil 3.4	Kırmızı çamur katkı malzemesinin görseli.....	42
Şekil 3.5	Çalışmada kullanılan uçucu kül katkı malzemesine ait görsel.....	43
Şekil 3.6	Ferrokrom Fabrikası'ndan temin edilen silis dumanı.....	44
Şekil 3.7	Likit limit ve plastik limit deneylerine ait görseller.....	46
Şekil 3.8	Standart Proktor deneyine ait görsel.....	47
Şekil 3.9	Serbest basınç deneyinin aşamalarına ait görsel.....	48
Şekil 3.10	Dinamik basit kesme deney aleti.	49
Şekil 3.11	Dinamik basit kesme deney aletindeki bir numunenin şematik gösterimi. a) konsolidasyon aşaması, b) drenajsız koşullar altında yatay yükleme, c) drenajsız koşullar altında şekil değiştirme, d) numunenin 3 boyutlu şekil değişimi gösterimi. [42].....	50
Şekil 3.12	Dinamik basit kesme için numune hazırlanması.....	51
Şekil 3.13	Dinamik basit kesme deneyi için yapılan hazırlık.....	52
Şekil 3.14	Numune hazırlık aşamasında yapılan yanlışlık nedeniyle meydana gelen eksen kayması	53
Şekil 3.15	Eksen kayması problemi çözüldükten sonra deney grafikleri.....	54
Şekil 3.16	Dinamik basit kesme programı shear.cyclic başlangıç penceresi.	55
Şekil 3.17	Farklı Gdr değerlerine göre değişen deney sonuçları.	56
Şekil 3.18	Dinamik kesme deneyi cyclic table sekmesi.	56
Şekil 4.1	Uçucu kül oranının kıvam limitlerine etkisi.....	60
Şekil 4.2	Silis dumanı oranının kıvam limitlerine etkisi.	61
Şekil 4.3	Kırmızı çamur oranının kıvam limitlerine etkisi.....	62
Şekil 4.4	Katkısız kil ve katkılı numunelerin plastisite kartında gösterimi.....	63
Şekil 4.5	Farklı oranlarda uçucu kül katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri.....	64

Şekil 4.6	Farklı oranlarda silis dumanı katkıli numunelerin kompaksiyon eğrileri.	65
Şekil 4.7	Farklı kırmızı oranlarda çamur katkıli numunelerin kompaksiyon eğrileri. ...	66
Şekil 4.8	Katkı yüzdesine bağlı maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi.....	67
Şekil 4.9	Katkı yüzdesine bağlı optimum su muhtevası değişimi.	67
Şekil 4.10	Katkısız kil ve uçucu kül katkıli numunelerin serbest basınç deney grafikleri.	69
Şekil 4.11	Katkısız kil ve silis dumanı katkıli numunelerin serbest basınç deney grafikleri.	70
Şekil 4.12	Katkısız kil ve kırmızı çamur katkıli numunelerin serbest basınç deney grafikleri.	71
Şekil 4.13	Katkı yüzdesinin serbest basınç dayanımına etkisi.	72
Şekil 4.14	Katkısız kil için farklı CSR değerlerindeki a)0.09 b)0.2 c)0.4 d)0.5 histeritik ilmekleri.....	73
Şekil 4.15	%5 uçucu kül katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.05 b)0.3 c)0.5 d)0.6 histeritikilmekleri.	74
Şekil 4.16	%10 uçucu kül katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.09 b)0.3 c)0.5 d)0.55 histeritikilmekleri.	75
Şekil 4.17	%15 uçucu kül katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.05 b)0.1 c)0.2 d)0.3 e)0.5 f)0.6 histeritikilmekleri.....	76
Şekil 4.18	%5 silis dumanı katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.3 c)0.5 d)0.6 e)0.8 histeritikilmekleri.	77
Şekil 4.19	%10 silis dumanı katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.3 c)0.6 d)0.8 histeritikilmekleri.	78
Şekil 4.20	%15 silis dumanı katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.3 c)0.5 histeritikilmekleri.....	79
Şekil 4.21	%5 kırmızı çamur katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.05 b)0.2 c)0.4 d)0.6 histeritikilmekleri.	80
Şekil 4.22	%10 kırmızı çamur katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.2 c)0.4 d)0.6 histeritikilmekleri.	81
Şekil 4.23	%15 kırmızı çamur katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.5 c)0.7 d)0.9 histerisisilmekleri.	82
Şekil 4.24	Katkısız kil ve uçucu kül katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü eğrileri.....	85
Şekil 4.25	Katkısız kil ve uçucu kül katkıli numunelerin deformasyona bağlı sönüm oranı eğrileri.	86
Şekil 4.26	Katkısız kil ve silis dumanı katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü eğrileri.....	87
Şekil 4.27	Katkısız kil ve silis dumanı katkıli numunelerin deformasyona bağlı sönüm oranı eğrileri.	88
Şekil 4.28	Katkısız kil ve kırmızı çamur katkıli katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü eğrileri.	90
Şekil 4.29	Katkısız kil ve kırmızı çamur katkıli numunelerin deformasyona bağlı sönüm oranı eğrileri.....	91
Şekil 4.30	Katkısız kil ve %5 oranında katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü azalım eğrileri.....	92

Şekil 4.31 Katkısız kil ve %10 oranında katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü azalım eğrileri.....	93
Şekil 4.32 Katkısız kil ve %15 oranında katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü azalım eğrileri.....	93
Şekil 4.33 Katkı oranına bağlı olarak dinamik kayma modülü değişimi (%1 kayma deformasyonu mertebesinde)	94
Şekil 4.34 Katkısız kil ve %5 oranında katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma sönüm oranı eğrileri	95
Şekil 4.35 Katkısız kil ve %10 oranında katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma sönüm oranı eğrileri	95
Şekil 4.36 Katkısız kil ve %15 oranında katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma sönüm oranı eğrileri	96
Şekil 4.37 Katkı oranına bağlı olarak sönüm oranı değişimi (%1 kayma deformasyonu mertebesinde).....	97



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Ortalama rijitlik iyileşme faktörleri [1]	2
Çizelge 1.2 Çalışmadaki deney programının özeti [3].....	7
Çizelge 1.3 Dinamik deneylerin sonuçları [8]	17
Çizelge 1.4 Çalışmadaki deney programı [9].....	17
Çizelge 1.5 Resonant kolon deney sonuçları [9].....	18
Çizelge 1.6 Deney programı ve $\sigma_0=100$ kPa iken G_{maks} değerleri [12]	21
Çizelge 2.1 SPT darbe sayısı ve konik penetrasyon deneyi uç direnci ile kayma dalga hızı korelasyonları [19], [17].	28
Çizelge 2.2 Laboratuvar deneyleri ile ölçülebilen parametreler [14].....	29
Çizelge 2.3 Normal konsolide ve aşırı konsolide killerde G_{maks} , G/G_{maks} ve D' 'nin farklı faktörlerle değişimi [31], [32].....	34
Çizelge 2.4 Farklı zemin tipleri için yaklaşık kayma modülü değerleri [34], [26]	36
Çizelge 3.1 Kırmızı çamurun kimyasal bileşenleri [37]	42
Çizelge 3.2 Uçucu külün kimyasal bileşenleri [39].....	43
Çizelge 3.3 Silis dumanının kimyasal bileşenleri [41]	44
Çizelge 3.4 Deneylerde kullanılan numuneler.....	45
Çizelge 3.5 Dinamik basit kesme deney programı.....	57
Çizelge 3.5 Dinamik basit kesme deney programı (devamı)	58
Çizelge 4.1 Katkısız ve katkılı numunelerin kıvam limit değerleri.	60
Çizelge 4.2 Kompaksiyon parametrelerine uçucu kül katkısının etkisi.....	64
Çizelge 4.3 Kompaksiyon parametrelerine uçucu kül katkısının etkisi.....	65
Çizelge 4.4 Kompaksiyon parametrelerine kırmızı çamur katkısının etkisi.	66
Çizelge 4.5 Katkısız kil ve katkılı kil numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinin sonuçları.....	68
Çizelge 4.6 Katkılı ve katkısız numuneler için dinamik yükler altında kritik kayma gerilmeleri ve CSR değerleri	83
Çizelge 4.7 %1 kayma deformasyonu mertebesinde numunelerin G_{sek} ve D değerleri... 84	84

DANELİ KATKILARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ KİL NUMUNELERİNİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Gözde GERÇEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Daneli katkı ile stabilize edilmiş zeminlerin mühendislik özellikleri (mukavemet, konsolidasyon, hidrolik, dinamik) hakkında günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Zeminlerin üzerinde yapılan stabilizasyon/iyileştirme işlemleri sonucunda, hacimsel stabilite, geçirimsizlik, kayma mukavemeti parametreleri ve konsolidasyon gibi mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler (pozitif değerler) elde edildiği literatürden bilinmektedir. Bununla beraber bu katkıların zeminlerin dinamik özelliklerine etkileri konusunda yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır.

Bu çalışmada katkı malzemeleri ile stabilize edilmiş zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki değişimler incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan zemin numunesi Erzurum ilinden temin edilmiş olup, katkı malzemesi olarak uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur kullanılmıştır. Zeminin kaba ve ince dane oranını belirlemek için öncelikle elek ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. İnce daneli bir malzeme olduğu belirlenen zeminin piknometre deneyi ile özgül ağırlık değeri bulunmuştur. %0, %5, %10 ve %15 katkı oranlarında kil-uçucu kül, kil-silis dumanı ve kil-kırmızı çamur karışımları hazırlanarak bu numunelere kıvam limitleri ve standart proktor deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında kompakte edilen %0, %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı, kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numuneler üzerinde mukavemet özelliklerini belirlemek için serbest basınç deneyi yapılmıştır. Çalışmanın amacı olan dinamik parametrelerin belirlenmesi için yukarıda belirtilen katkı oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde dinamik basit kesme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler

sonucunda ise kil zeminlerin daneli katkılarla stabilizasyonu sonucunda sönüm oranı, dinamik kayma modülü gibi parametreler üzerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Silis Dumanı, Kırmızı Çamur, Kil, İyileştirme, Dinamik Özellikler, Sönüm Oranı, Dinamik Kayma Modülü



**DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES WITH LABORATORY TESTS
OF STABILIZED CLAY WITH ADDITIVES**

Gözde GERÇEK

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Numerous studies have been carried out on the engineering properties (strength, consolidation, hydraulics) of stabilized soils with grained additives, and studies on the effects of these additives on the dynamic properties of soils are limited.

Therefore, in this study, it is aimed to investigate the effect of additives on dynamic properties of soils such as shear modulus and damping ratio. Scope of this work the natural clay material originated from a clay deposits in Erzurum, Turkey. Fly ash (FA), silica fume (SM) and red mud (RM) is used as stabilization material. SM is obtained from Antalya Ferro-Chrome Plant, Turkey and FA is supplied from Afsin Elbistan Thermal Power Plant, Turkey. RM used in the tests was supplied from Etibank Seydisehir Aluminum Plant, Turkey.

Firstly to determine the soil particle size sieve and hydrometer analyzes were performed and according to test results the soil has fine grain material of 86%. Pycnometer test was conducted to determine the specific gravity of soil. Then clay-fly ash, clay-silica fume and clay-red mud mixtures were prepared at 0%, 5%, 10% and 15% additive ratios, Atterberg limits tests and standard proctor tests were prepared mixtures. Test specimens which has optimum water content were compacted with standart proctor tests. Unconfined compression tests (UCS) were performed on specimens to obtain the strength parameters. Finally in order to determine dynamic properties of specimens, cyclic direct simple shear tests (CDSS) were performed. As a results of experiments, the variation in the liquid limit (LL), plastic limit (PL) and plasticity index (PI) values, optimum water

contents (w_{opt}), maximum dry unit weights (γ_{dmax}), unconfined compressive strengths (q_u), dynamic shear modulus and damping ratio were investigated as a result of the stabilization of clay soils.

Keywords: Fly Ash, Silica Fume, Red Mud, Clay, Stabilization, Dynamic Properties, Damping Ratio, Dynamic Shear Modulus



1.1 Literatür Özeti

Killerin hacimsel değişimleri, kil formasyonların üzerinde veya içerisinde bulunan mühendislik yapılarına zarar verirken, yine killerin kendisinin bir mühendislik yapısı (kil şilte, toprak baraj, sıkıştırılmış kil dolgular vb.) oluşturması durumunda bir stabilite problemi (kayma direncinin azalması, şişme, zemin yumuşaması, vb) oluşturduğu bilinmektedir.

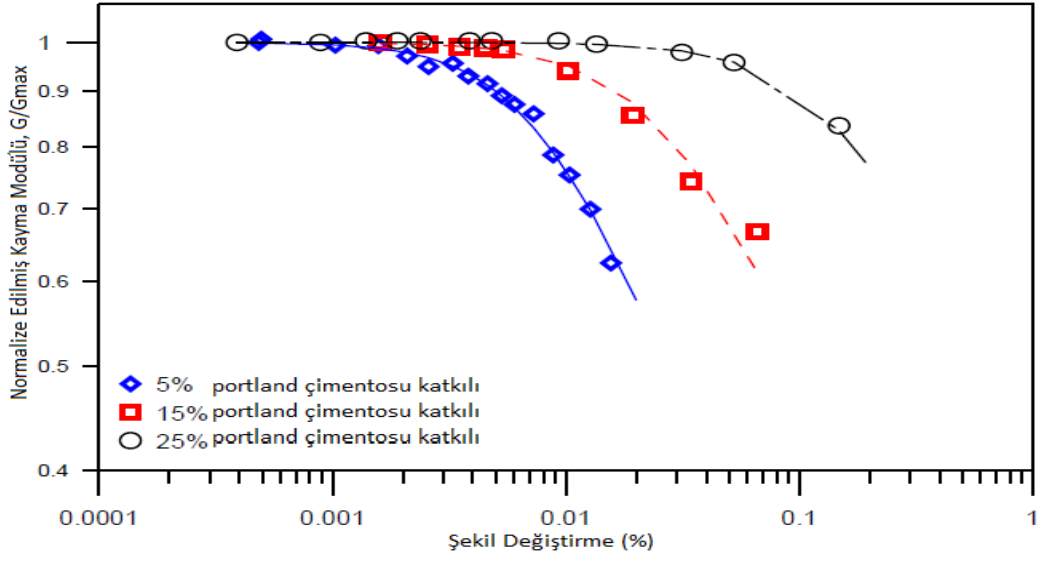
Zeminlerin üzerinde yapılan stabilizasyon/iyileştirme işlemleri sonucunda, hacimsal stabilite, geçirimsizlik, kayma mukavemeti parametreleri ve konsolidasyon gibi mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler (pozitif değerler) elde edildiği literatürden bilinmektedir. Bunların yanında zeminin dinamik parametrelerinin (kayma modülü ve sönüm oranı) belirlenmesi makine titreşimi, trafik yükleri, deprem ve inşaat yükü gibi dinamik yükler altında zemin davranışının analizi için gereklidir [1]. Katkı malzemeleri kullanılarak stabilize edilmiş kil zeminlerin dinamik özelliklerinin değişiminin belirlenmesi için çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tsaia ve Nib [1], Kim vd. [2], Subramaniam ve Banerjee [3], Yuan-qiang ve Xu [4] çimento ile stabilize edilen kil zeminlerin dinamik parametrelerini belirlemek üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Fahoum vd. [5] katkı malzemesi olarak kireç kullanırken, Liu vd. [6] çimento-kil ve kireç-kil karışımlarının donma-çözülme etkisi altında dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Dutta ve Saride [7] ile Han-bing vd. [8] uçucu kül ile stabilizasyon sağlayıp zeminin dinamik parametrelerini incelemişlerdir. Gao vd. [9], Akbulut vd. [10] ve Kalıpçılar vd. [11] katkı malzemesi olarak fiberler kullanarak dinamik deneyler yapmışlardır. Hoyos vd. [12] ise

çalışmasında çimento katkılı kil, uçucu kül katkılı kil ve kireç-fiber katkılı kil zeminler kullanarak resonant kolon deneyleri gerçekleştirmiştir.

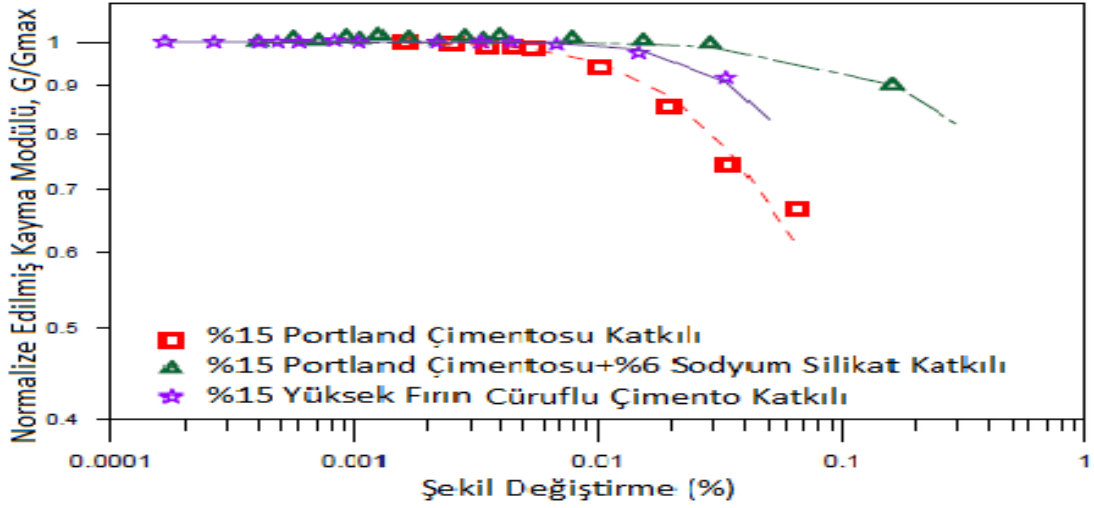
Tsaia ve Nib [1], portland çimentosu-kil, yüksek fırın cürüflu çimento-kil, portland çimentosu-sodyum silikat-kil karışımları için resonant kolon deneyleri gerçekleştirmiştir. Deney için kullanılan zemin Taipei Basin bölgesinde 15m derinlikteki bir zemin tabakasından alınmış olup, gri siltli ve içerisinde bir miktar kum bulunduran bir kildir ve USCS'ye göre düşük plastisiteli olarak (CL) sınıflandırılmıştır. Portland çimentosu ile hazırladığı karışımlarda zeminin ağırlıkça %5, %15 ve %25'i olmak üzere 3 farklı oranda çimento zemine eklenmiştir. Portland çimentosu ve sodyum silikat- ile oluşturduğu karışımda ise %15 portland çimentosu+%6 sodyum silikat+kil olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Yüksek fırın cürüflu çimento ile hazırlanan numunelerde ise zeminin ağırlıkça %15'i çimento olarak yine tek bir oran kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda doğal zemin ve katkılı zeminlerin G_{maks} ve sönüm oranı değerleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına ait veriler Çizelge 1.1, Şekil 1.1, Şekil 1.2, Şekil 1.3, Şekil 1.4, Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da verilmiştir.

Çizelge 1.1 Ortalama rijitlik iyileşme faktörleri [1]

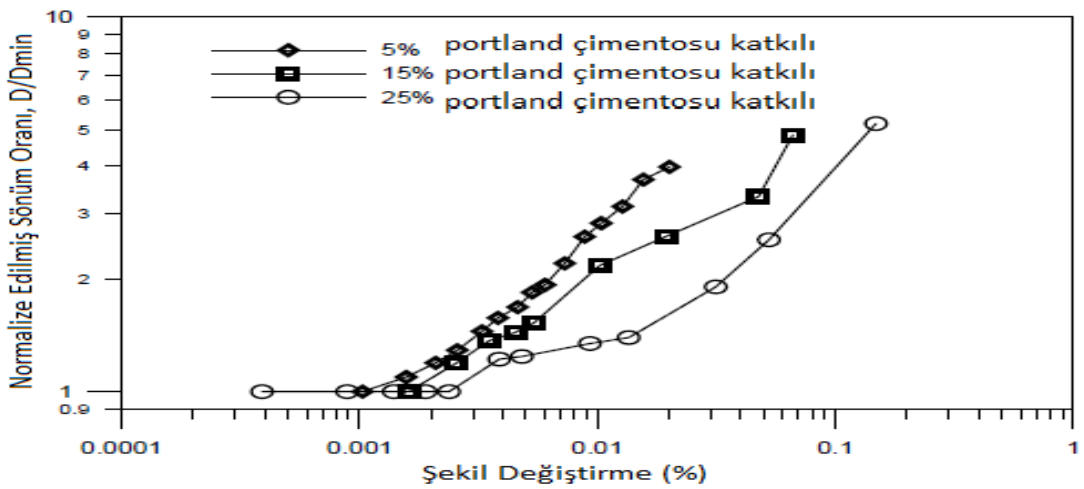
Numune Tipi	G_{maks} (kPa)	İyileşme Faktörü
Katkısız Numune	71490.9	-
%5 Portland Çimentosu Katkılı Numune	179230	2.5
%15 Portland Çimentosu Katkılı Numune	504180	7.1
%25 Portland Çimentosu Katkılı Numune	1704100	23.8
%15 Portland Çimentosu ve %6 Sodyum Silikat Katkılı Numune	965230	13.5
%15 Yüksek Fırın Cürüflu Çimento Katkılı Numune	1571200	22



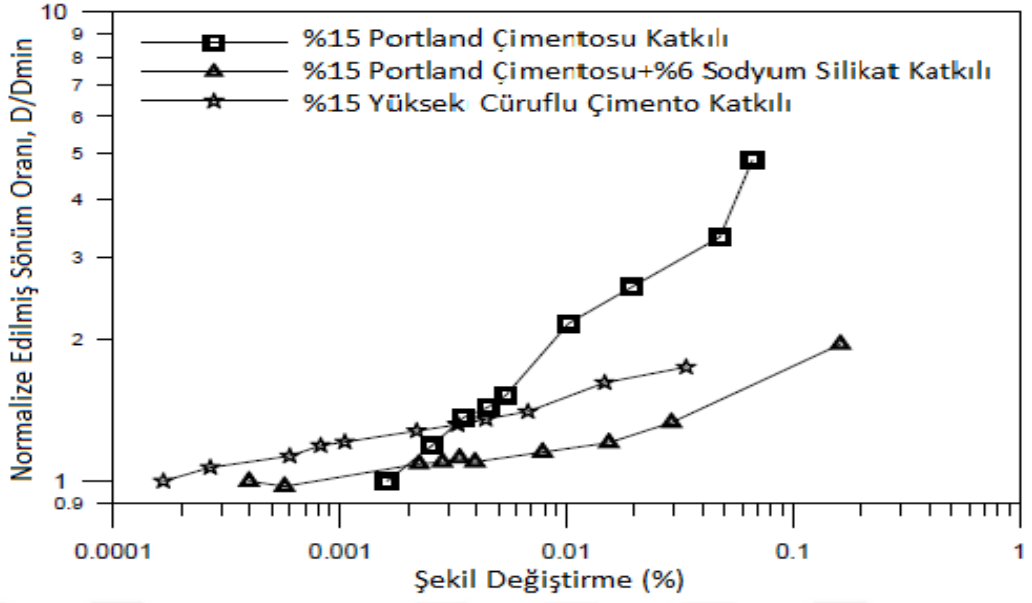
Şekil 1.1 Çimento katkı oranının G/G_{maks} - Şekil Değişirme grafiğine etkisi [1]



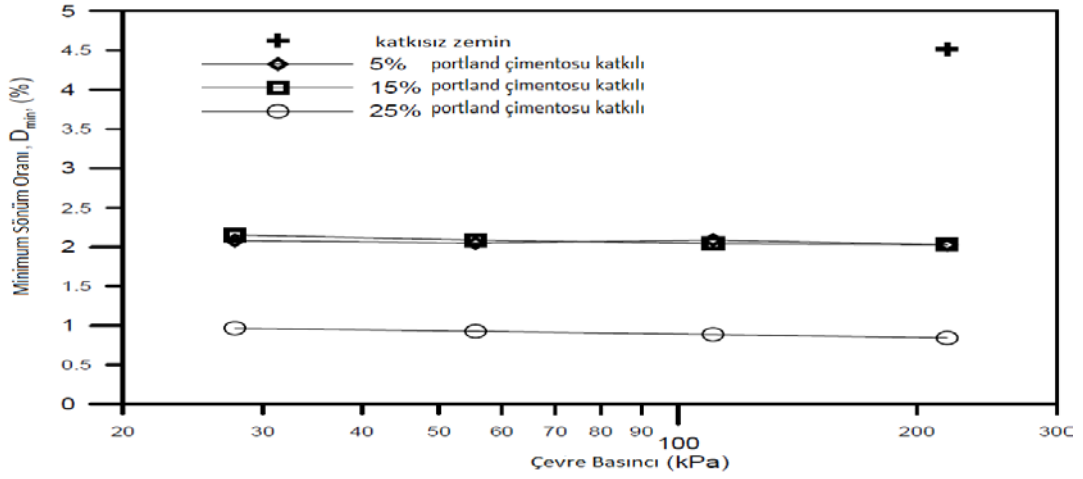
Şekil 1.2 Çimento tipinin G/G_{maks} - Şekil Değişirme grafiğine etkisi [1]



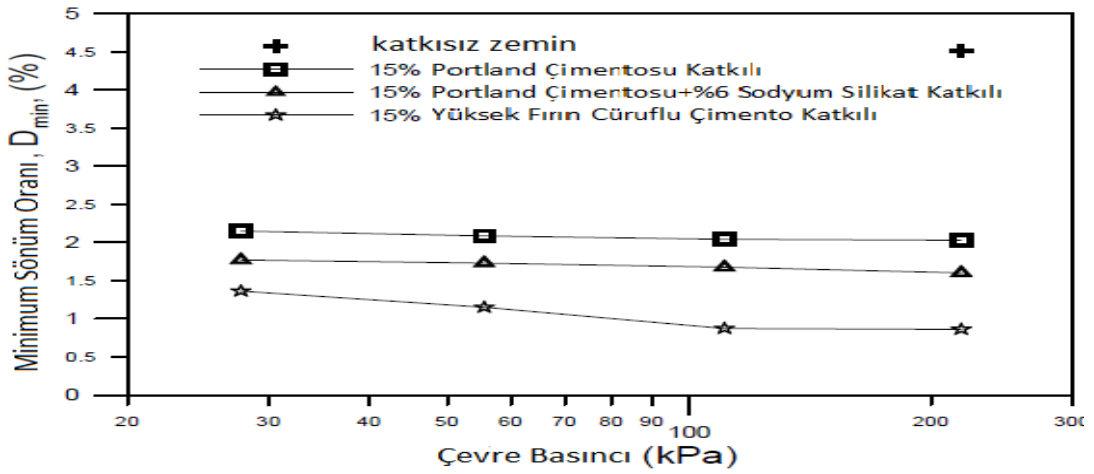
Şekil 1.3 Çimento katkı oranının D/D_{min} - Şekil Değişirme grafiğine etkisi [1]



Şekil 1.4 Çimento tipinin D/D_{min} - Şekil Değişirme grafiğine etkisi [1]



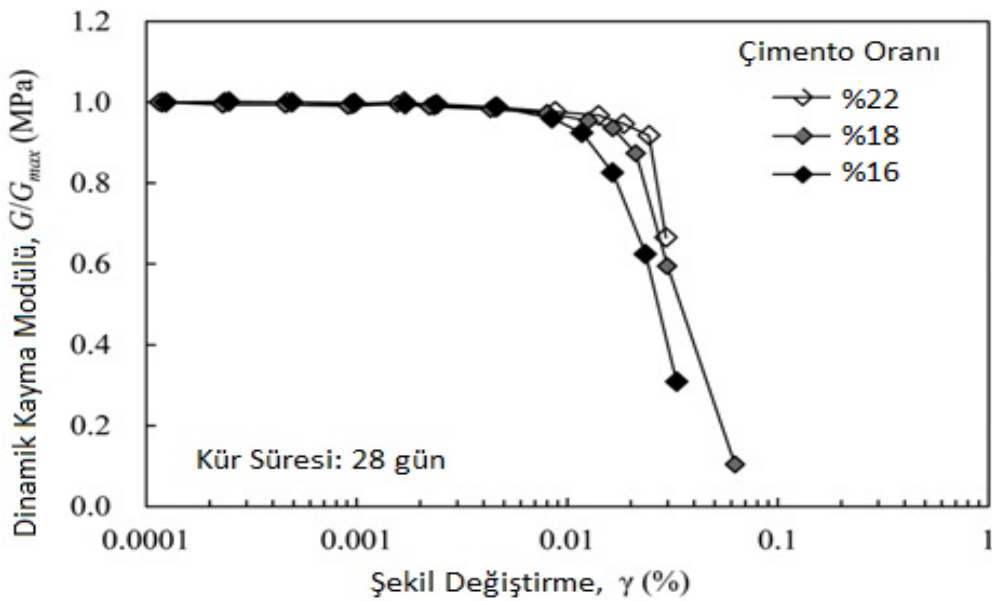
Şekil 1.5 Çimento katkısının sönüm oranına etkisi [1]



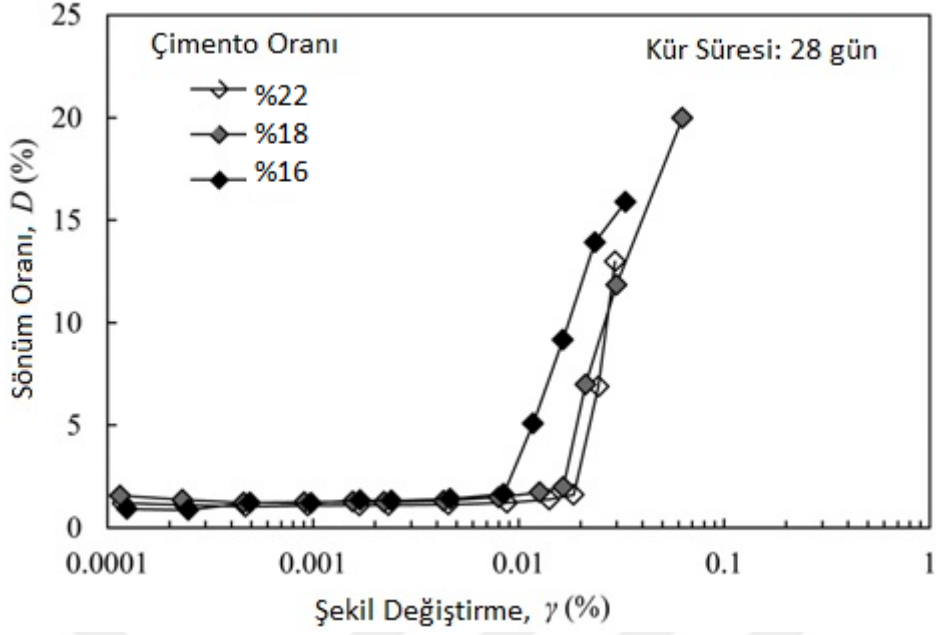
Şekil 1.6 Çimento tipinin sönüm oranına etkisi [1]

[1]'e göre G_{maks} değerleri çimento oranının artmasına bağlı olarak artmıştır. Çimento tipleri kendi içinde kıyaslandığında ise en yüksek G_{maks} değeri yüksek fırın cürufllu çimento katkısı ile elde edilmiştir. D_{min} değerleri ise katkı malzemesi eklenmesi ile azalmıştır. Çimento oranlarına bağlı kıyaslama yapıldığında katkısız zeminin sönüm oranı en yüksek, %5 ve %15 portland çimentosu katkılı zeminlerde sönüm oranları birbirine yakın iken %25 oranında en düşük sönüm oranı değerleri elde edilmiştir. Katkı tipine bağlı olarak değerlendirildiğinde en yüksek sönüm oranı değeri portland çimentosu ile stabilizasyondan elde edilmişken, yüksek fırın cürufllu çimento katkısında en düşük sönüm oranı değeri belirlenmiştir.

Kim vd. [2] çalışmalarında DCM methodu ile iyileştirilmiş Kore deniz killerinin statik ve dinamik davranışlarını ve geoteknik mühendisliği tasarım parametrelerini elde etmek için serbest basınç ve resonant kolon deneyleri yapmışlardır. DCM pek çok ülkede liman ve açık deniz yapılarında yerinde güçlendirme için kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. [2] Deneyler için kullanılan zemin örnekleri Güney Kore'nin güneyinde bulunan Ulsan ve Busan şehirlerinin yeni limanlarını korumak amacıyla yapılan 2 adet dalgakıranın oturduğu deniz tabanına ait kil depolarından alınmıştır. Daha sonra sahada uygulanan DCM methoduna uygun olarak laboratuarda Ulsan kili için %16, %18, %22 Busan kili için ise %10, %13, %16 oranlarında (zeminin sahadaki su muhtevasına göre hazırlanmış ıslak ağırlığına göre) çimento-kil karışımları oluşturulmuştur.



Şekil 1.7 Çimento oranına göre G/G_{maks} - Şekil Değişirme grafiği [2]



Şekil 1.8 Çimento oranına göre Sönüm Oranı - Şekil Değişirme grafiği [2]

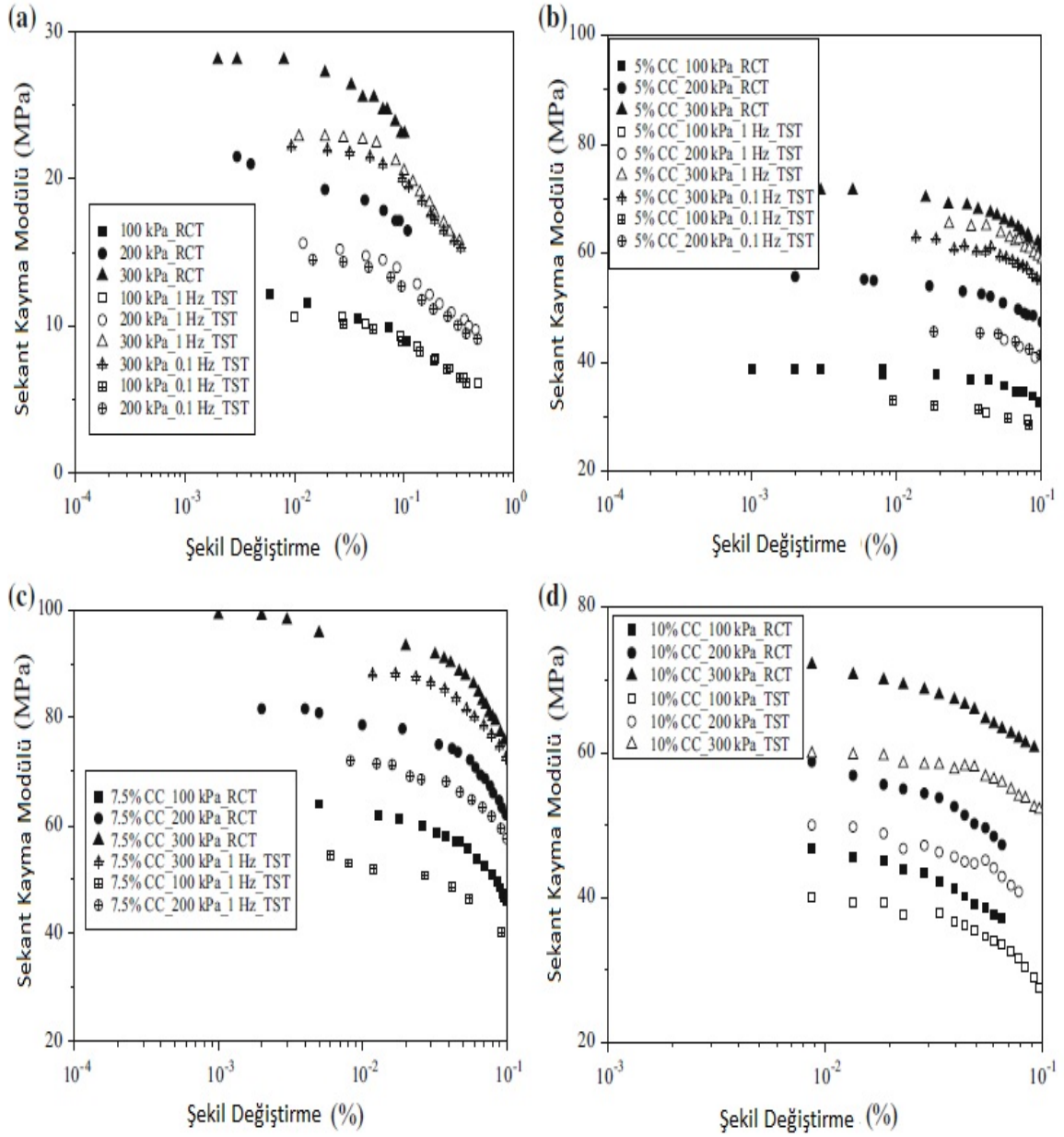
28 gün kür edilmiş Ulsan kilinin dinamik davranışları incelendiğinde (Şekil 1.7 ve Şekil 1.8) DCM yöntemi ile iyileştirilmiş Kore deniz kilinin normalize edilmiş kayma rijitliği değişimi (G/G_{maks}) çimento oranı artışıyla birlikte daha yüksek şekil değişirme duyarlılığı (başka bir deyişle şekil değiştirmeye bağlı G degradasyonu) gösterir bu, çimentodaki hidrasyon reaksiyonunun bir sonucu olarak Pf 'deki bir azalmaya bağlı olarak çimento katkılı zeminin gevrekleştiğine işaret eder killer. Daha yüksek çimento oranına sahip numuneler ise daha düşük sönüm oranı değerlerine sahiptirler ve bu da çimento katkı oranının yükselmesinin C-S-H jelleri ve kil partikülleri arasındaki bağlantıların artmasına neden olup ve daha gevrek olması ile sonuçlanması ile açıklanabilir. [2]

Subraminiam ve Banerjee [3] çalışmalarında farklı oranlarda çimento kullanmalarının yanında, farklı frekanslarda ve farklı çevre basınçları altında resonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri yaparak tüm bu etkilerin sekant kayma modülünü ve sönüm oranını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Deneysel program için deniz kili örnekleri Chennai, Hindistan Ennore sahilinde zemin yüzeyinin 1.5 m altından taranmıştır. Deney numuneleri %0, %5, %7.5, %10 çimento katkılı olarak oluşturulmuş 100-200-300 kPa çevre basınçlarında, 0.1 ve 1 Hz frekanslarda RK ve BK deneylerine tabii tutulmuştur. Çimento katkılı numuneler CC ile kodlanmıştır ve numuneler 28 günlük küre tabii tutulmuşlardır.

Çizelge 1.2 Çalışmadaki deney programının özeti [3]

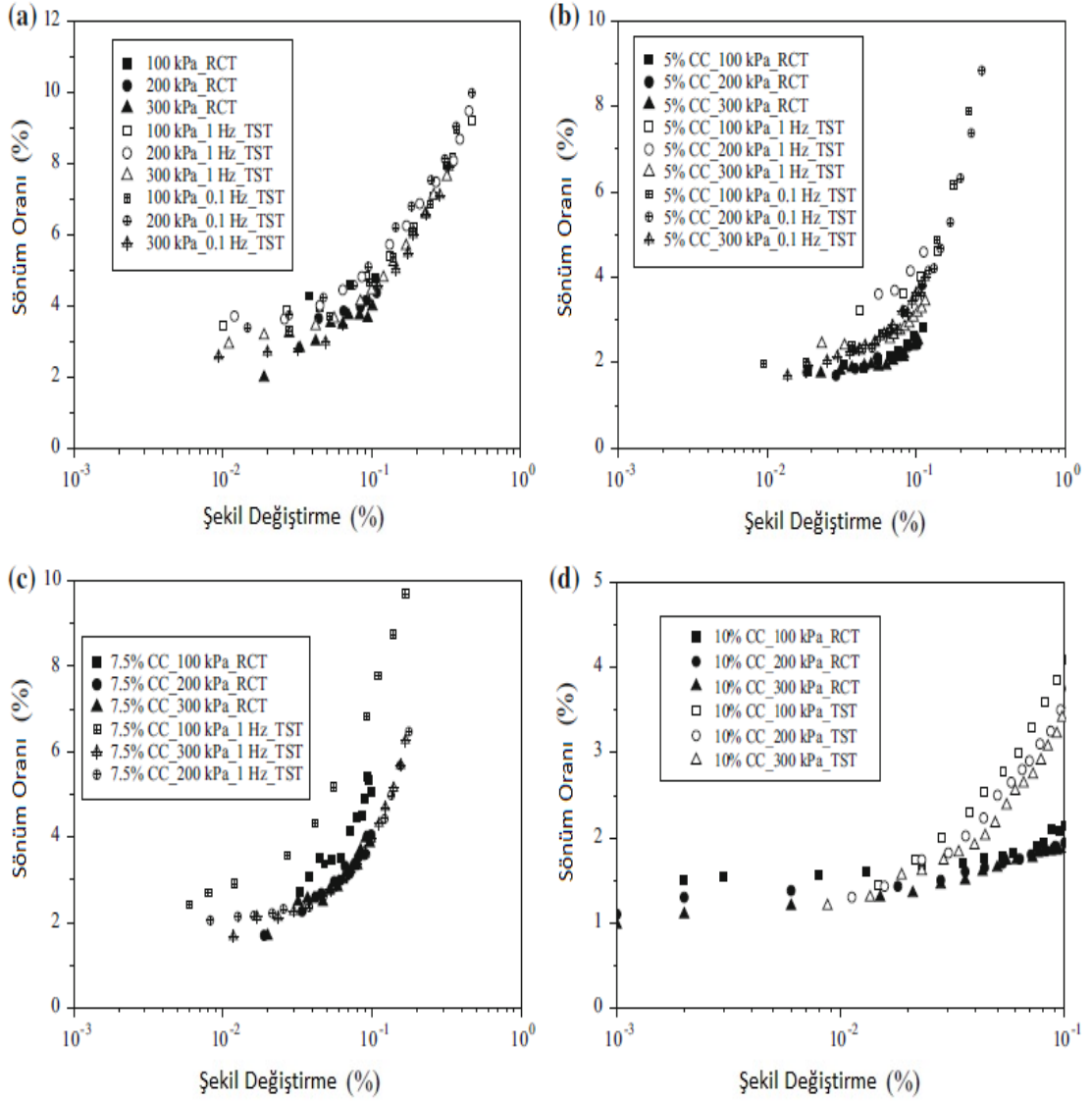
Test Tipi	Çimento Oranı (%)	Çevre Basıncı (kPa)	f (Hz)	Test Tipi	Çimento Oranı (%)	Çevre Basıncı (kPa)	f (Hz)
RCT	-	100	-	RCT	5	300	-
TST	-	100	0.1	TST	5	300	0.1
TST	-	100	1	TST	5	300	1
RCT	-	200	-	RCT	7.5	100	-
TST	-	200	0.1	TST	7.5	100	0.1
TST	-	200	1	RCT	7.5	200	1
RCT	-	300	-	TST	7.5	200	-
TST	-	300	0.1	RCT	7.5	300	0.1
TST	-	300	1	TST	7.5	300	1
RCT	5	100	-	RCT	10	100	-
TST	5	100	0.1	TST	10	100	0.1
TST	5	100	1	RCT	10	200	1
RCT	5	200	-	TST	10	200	-
TST	5	200	0.1	RCT	10	300	0.1
TST	5	200	1	TST	10	300	1

Tüm bu deneyler sonucunda RK deneylerinden BK deneylerine göre daha yüksek G_{sek} değerleri elde edilmiştir. Çevre basıncının artmasına bağlı olarak her iki deneyde de G_{sek} değerleri artmıştır. Aynı şekilde çimento oranlarının artması ile G_{sek} değerlerinde artış gözlemlenmiştir. (Şekil 1.9)



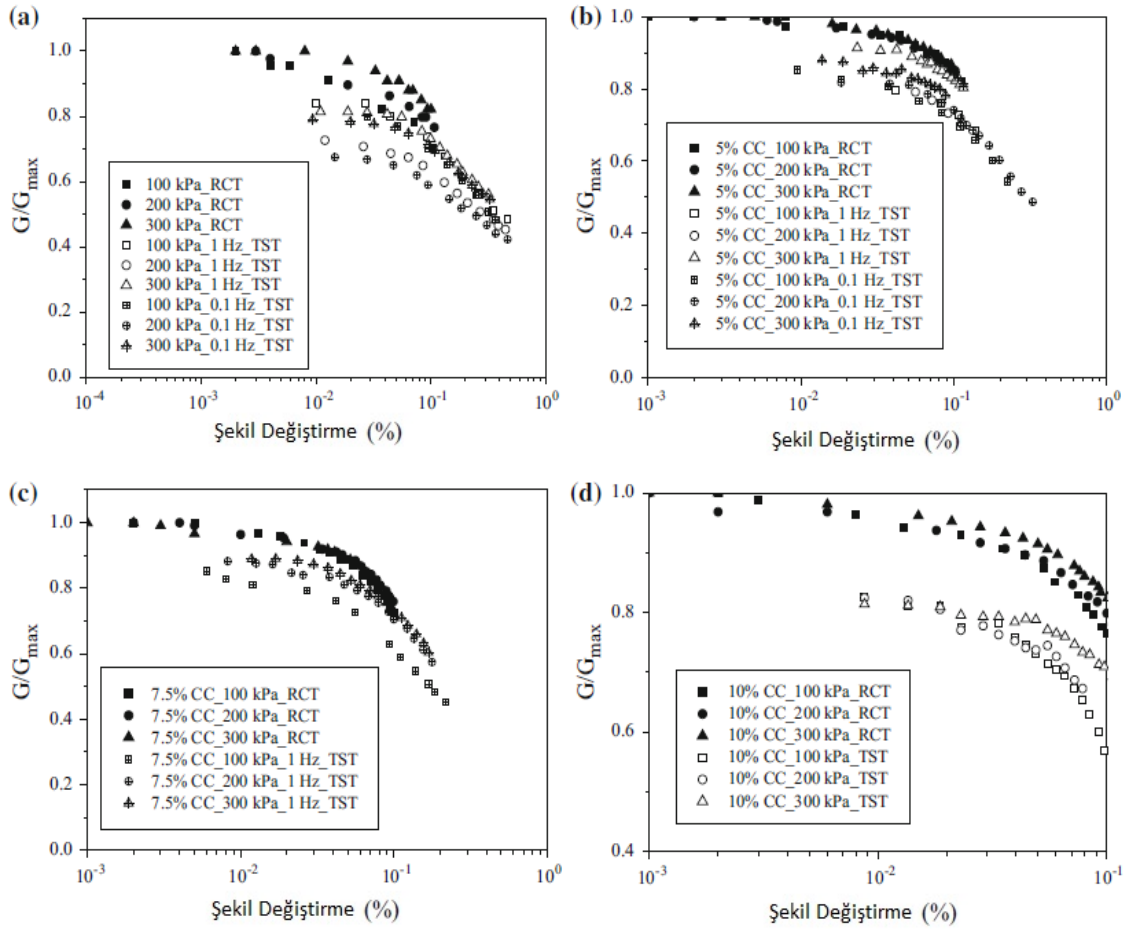
Şekil 1.9 a) Katkısız kil b) %5 çimento katkılı c) %7.5 çimento katkılı d) %10 çimento katkılı numunelerin kayma modülü karşılaştırmaları [3]

Sönüm oranı ise genel olarak çevre basıncının artmasıyla beraber azalma göstermiştir. Maksimum sönüm oranı (%0.1 şekil değişirme esas alındığında) %7.5 çimento katkılı numunede görülmektedir ve yaklaşık %7 olarak bulunmuştur. (100 kPa-BK deney sonuçlarına göre) (Şekil 1.10) [3]



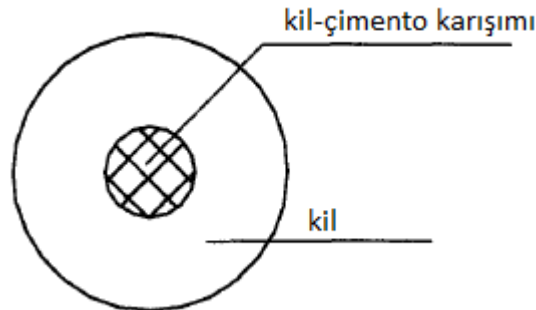
Şekil 1.10 a) Katksız kil b) %5 çimento katkı c) %7.5 çimento katkı d) %10 çimento katkı numunelerin sönüm oranlarının karşılaştırmaları [3]

G_{maks} değerleri RK deneylerinden elde edilmiş olup, katksız kilde %0.001 şekil değiştirme seviyelerinde gözlemlenirken, çimento katkıli kil zemin numunelerde %0.003 şekil değiştirme gözlemlenmiştir. Normalize edilmiş kayma modülü değerleri BK deneylerinde RK deneylerine kıyasla daha düşük bulunmuştur. Frekans ve çevre basıncının etkisi şekil değiştirmelerin artmasıyla azalmıştır. Bununla beraber normalize edilmiş kayma modüllerinde, %10 katkı oranı ve düşük çevre basıncı ile yapılan deneylerde daha yüksek azalmalar yaşanmıştır. Bunun nedeni çimento katkısıyla artan boşluk oranı olabilir. (Şekil 1.11) [3]



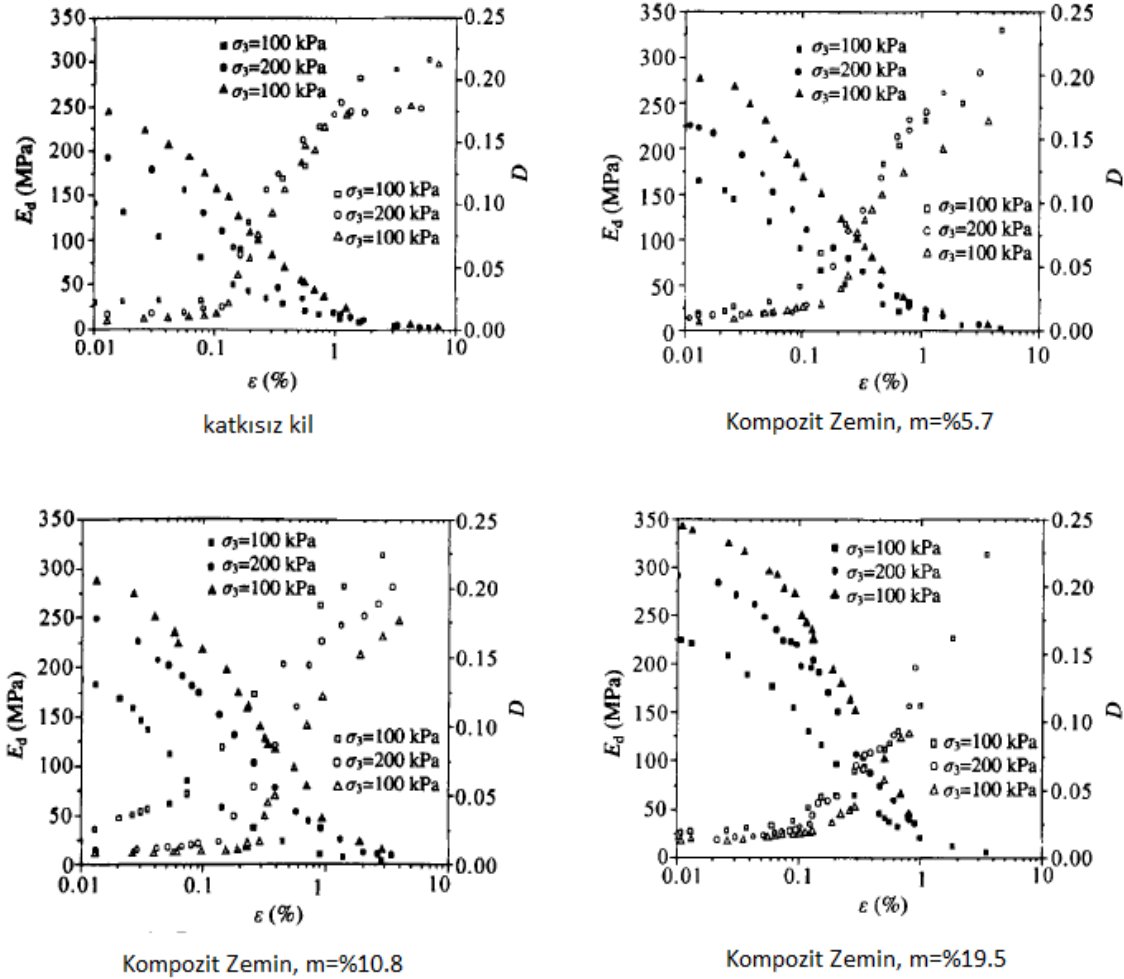
Şekil 1.11 a) Katkısız kil b) %5 çimento katkı c) %7.5 çimento katkı d) %10 çimento katkıli numunelerin G/G_{maks} grafiklerinin karşılaştırmaları [3]

Yuan-qiang ve Xu [4] çalışmalarında kompaksiyon ile sıkıştırılmış kil bir zemin içerisine farklı çaplarda (1.48 cm, 2.04 cm, 2.74 cm, alan oranları sırasıyla $m=\%5.7$, $m=\%10.8$, $m=\%19.5$) boşluklar oluşturarak (Şekil 1.12) bu boşlukların içine, kil-çimento karışımını eklemiştir, karışımın çimento katkı oranı %15'tir.



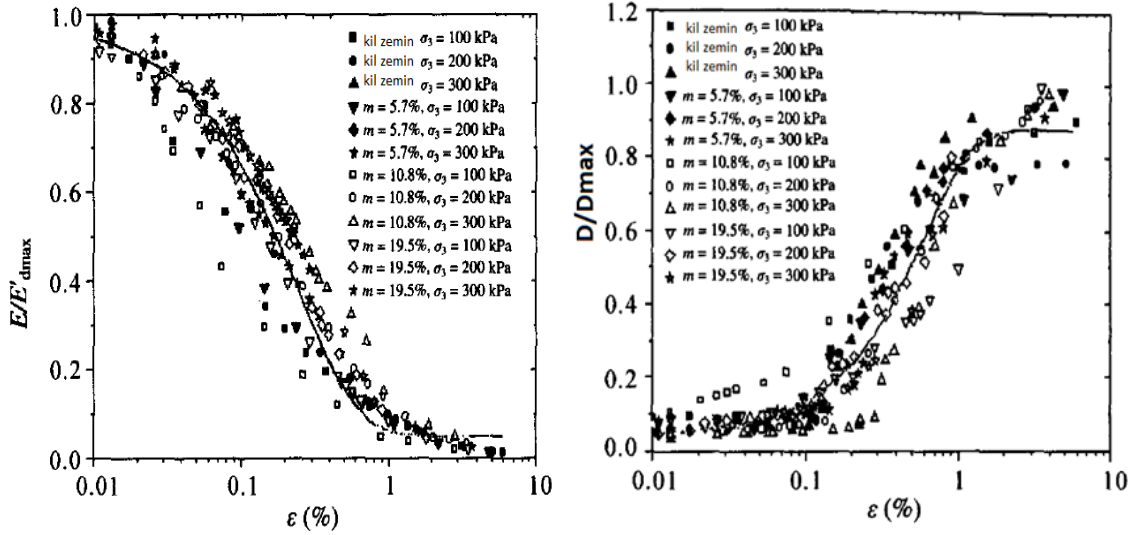
Şekil 1.12 Kompozit kil/kil-çimento karışım modeli [4]

Daha sonra numuneleri 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa çevre basınçlarında dinamik üç eksenli deneye tabii tutmuş, katkısız kil ve katkılı zemin numuneler arasında E_d , E_d/E_{dmax} , D kıyaslaması yaparken, kil-çimento karışımı alan oranının ve çevre basıncının etkisini de araştırmışlardır.



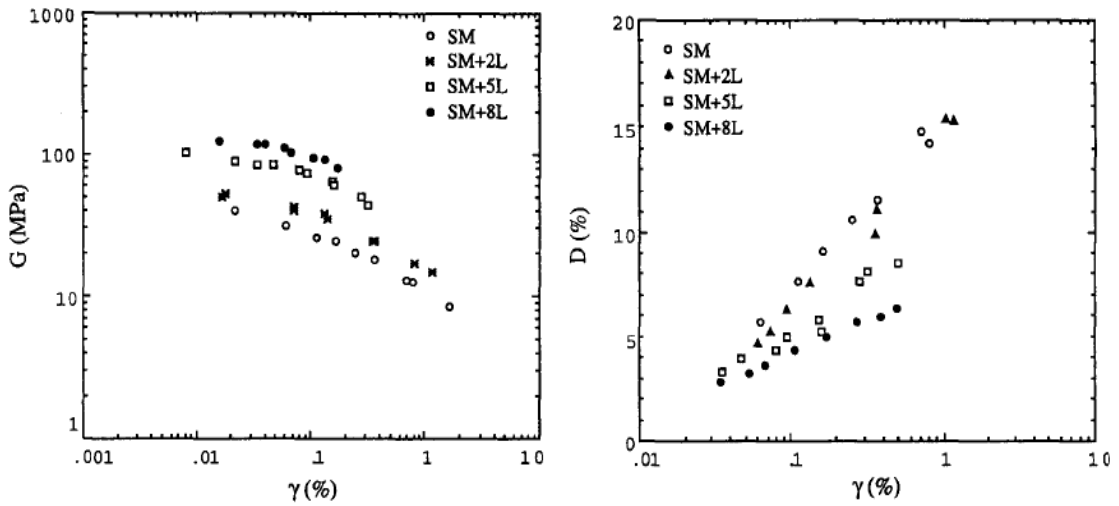
Şekil 1.13 Kil ve farklı alan oranlarına sahip kompozit numunelerin şekil değiştirmeye bağlı E_d ve D grafikleri [4]

[4] sonuçlarına bakıldığında çimento katkılı kompozit numuneler için E_d ve D değerlerinin şekil değiştirmeye bağlı değişimi grafiklerle gösterilmiştir. Alan oranları arttıkça E_d değerleri de artış göstermiştir. D eğrilerine bakıldığında ise tam tersi bir durum gözlenmektedir, katkı eklenmesi ile D değerleri azalmıştır. Çevresel basınç artışına bağlı olarak E_d artarken, D azalmıştır. (Şekil 1.13 ve Şekil 1.14)



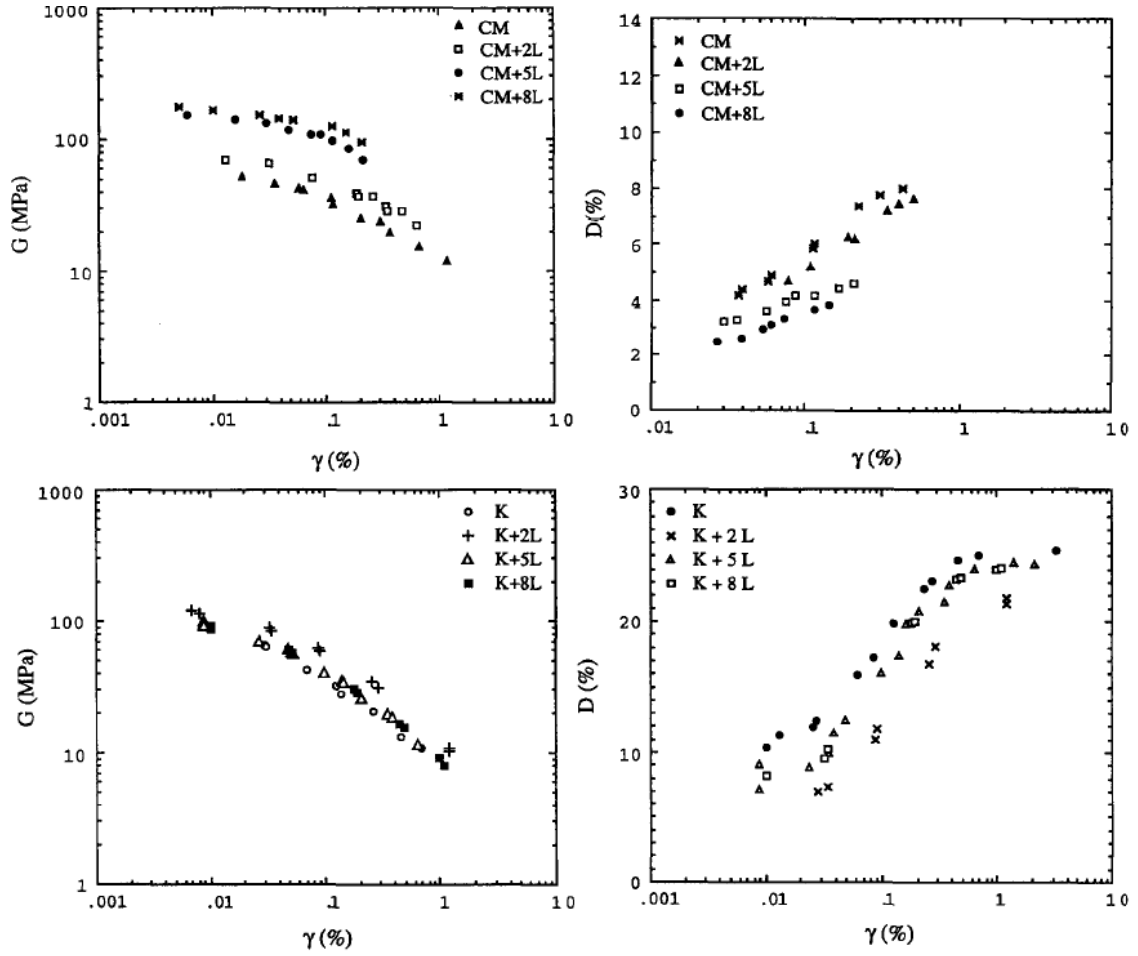
Şekil 1.14 Kil ve farklı alan oranlarına sahip kompozit numunelerin normalize edilmiş E_d ve D grafikleri[4]

Fahoum vd. [5] üç farklı tür kohezyonlu zemine %2, %5, %8 katkı oranlarında kireç eklemiş ve numuneleri dinamik üç eksenli testlere tabii tutarak dinamik özelliklerini belirleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Seçilen kohezyonlu zeminler, Kaolinite (K), Calsium Montmorillonite (CM) ve Sodium Montmorillonite (SM) olup eklenen katkı oranına göre örneğin; K+2L: Kaolin + %2 Kireç olacak şekilde kodlanmıştır.



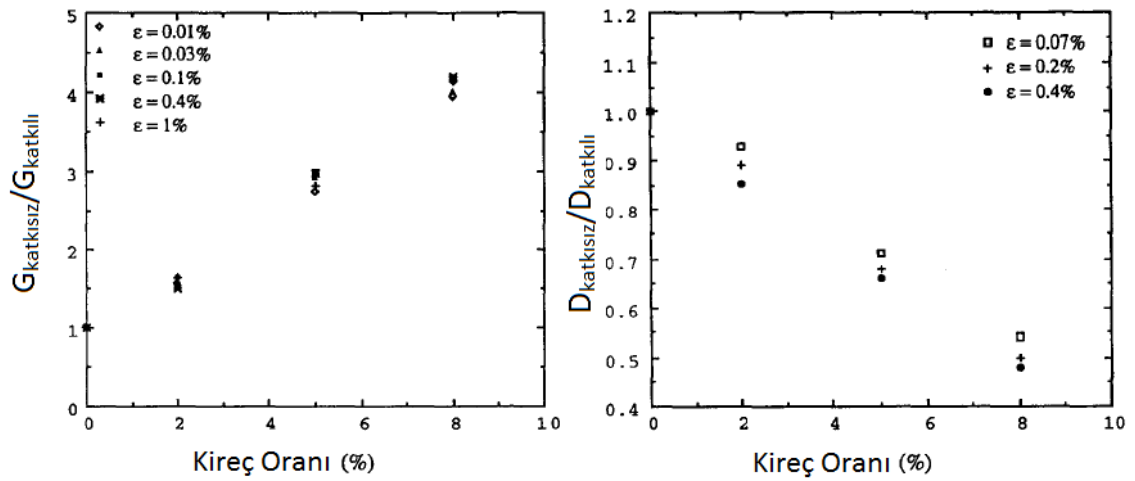
Şekil 1.15 SM zemininin kireç oranına bağlı olarak G - γ ve D - γ grafikleri [5]

Şekil 1.15 ve Şekil 1.16 incelendiğinde üç zeminde de geçerli olmak üzere herhangi bir şekil değiştirme genliğine bakılacak olursa katkı oranının artması ile G artış gösterirken, D azalma göstermektedir.



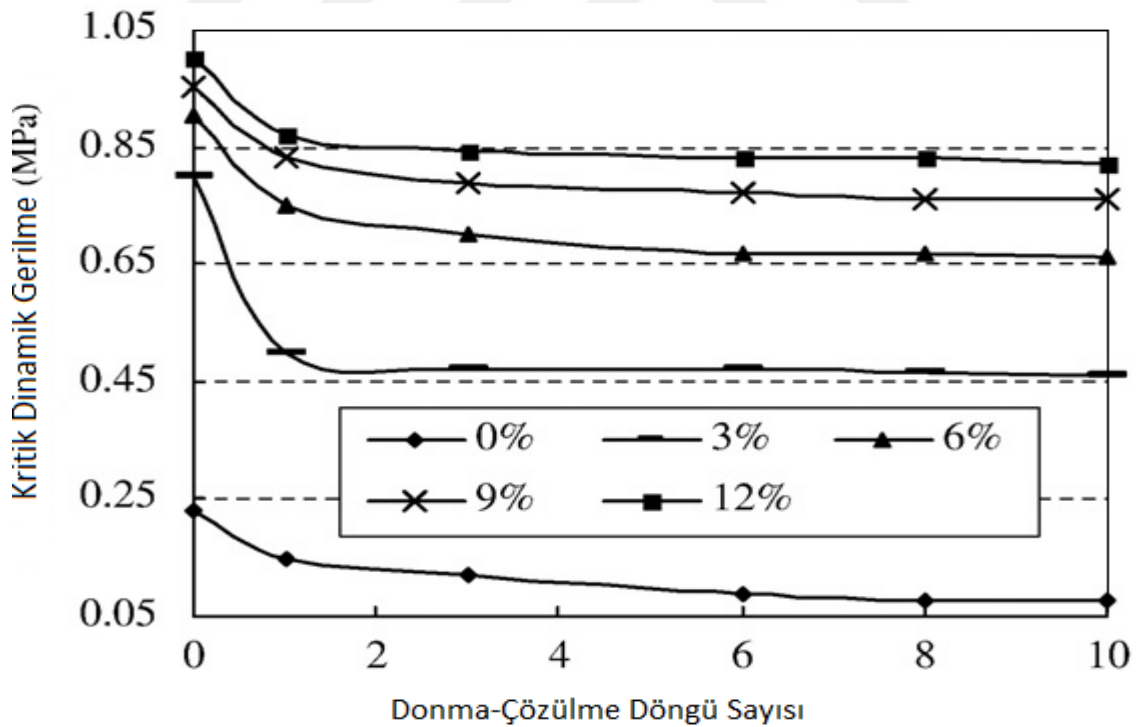
Şekil 1.16 CM ve K zemininin kireç oranına bağlı olarak G- γ ve D- γ grafikleri [5]

Karşılaştırmaların daha etkili olabilmesi için belirli şekil değiştirme genliklerinde katkılı G ve D değerleri katkısız G ve D değerlerine bölünmüş, Şekil 1.17’de kireç oranına bağlı olarak $G_{\text{katkılı}}/G_{\text{katkısız}}$ ve $D_{\text{katkılı}}/D_{\text{katkısız}}$ grafikleri çizilmiştir.



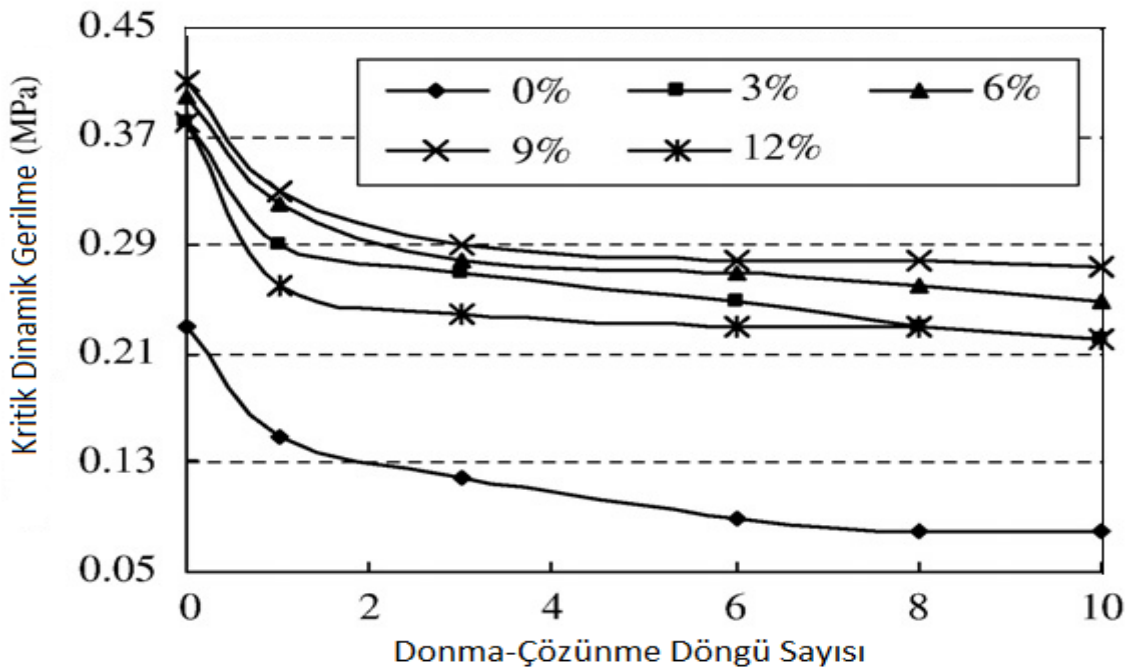
Şekil 1.17 SM zemininin normalize edilmiş G ve D grafikleri [5]

Liu vd. [6] çalışmalarında farklı karışım oranlarına sahip çimento ve kireç modifiyeli kil zeminler için dinamik üç eksenli testler yapmıştır. Bu zeminler donma-çözülme döngülerine maruz bırakılmış kritik dinamik gerilmeler belirlenerek karşılaştırılmıştır. Hem kireç hem de çimento katkı oranları 0, %3, %6, %9 ve %12 olarak belirlenmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra 7 gün kürede bekletildikten sonra su muhtevasını korumak için kauçuk kılıflar ile kaplanmıştır. 1 döngünün sağlanması için numuneler önce -15°C 'de 12 saat daha sonra 5°C 'de 12 saat bekletilmiştir. 0, 1, 3, 6, 8, 10 döngü için dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda her bir numunenin kritik dinamik gerilmesi hesaplanarak katkı türünün, oranının ve donma-çözülme döngü sayısının kritik dinamik gerilmeye etkisi gözlemlenmiştir. Heath vd. [13] kohezyonlu zeminler için, belirli bir yükün üstünde tekrarlanan uygulamalarının büyük kalıcı deformasyonlara neden olduğu ve bu belirli yükün altında kalıcı deformasyonların küçük ve sonlandırıcı olduğu bir gerilme seviyesi buldular ve bu gerilme seviyesini kritik dinamik gerilmesi olarak tanımladılar. [6] farklı dinamik gerilmeler için ϵ_p -logN grafikleri çizerek kritik dinamik gerilmeleri bulmuştur. ϵ_p plastik şekil değiştirme, N ise sarsılma sayısıdır.



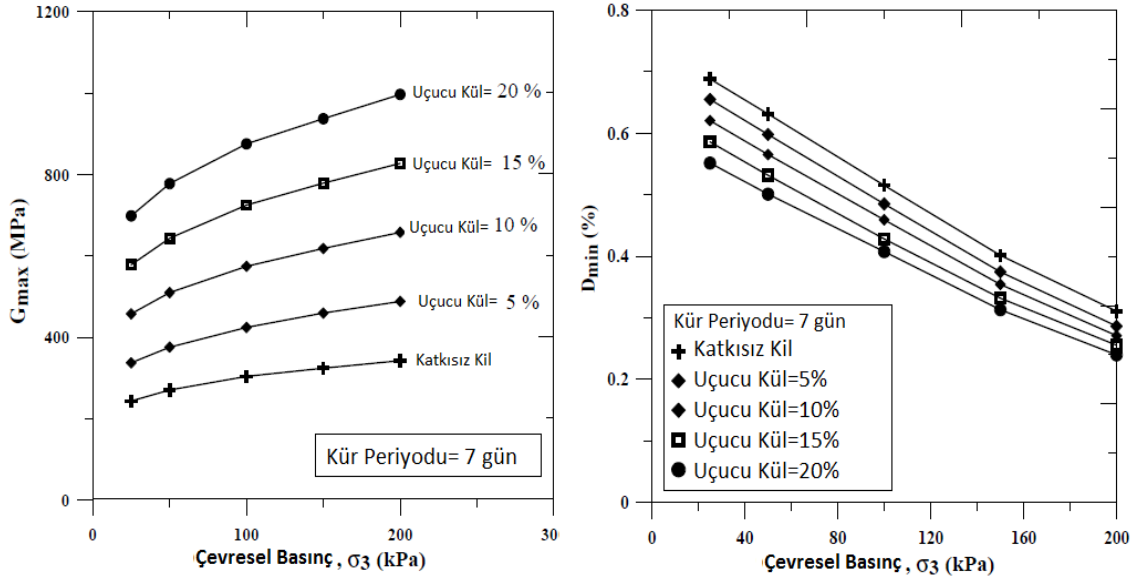
Şekil 1.18 Çimento katkısının kritik dinamik gerilme/donma-çözülme döngü sayısı grafiğine etkisi [6]

Kritik dinamik gerilmeler genel olarak çimento ve kireç katkı oranlarının artmasına bağlı olarak artmıştır. Katkısız zemin ile kıyaslandığında kritik dinamik gerilmelerde çimento ile modifiye edilmiş zeminde %200 seviyelerinde, kireç ile modifiye edilmiş zeminde %60 seviyelerinde artış gözlemlenmiştir. Sonuçlar çimento ve kireç ilavesinin zeminin donma-çözülme dayanıklılığını arttırdığını göstermektedir. Örnek olarak kritik dinamik gerilme çevrim sayısının artmasıyla birlikte azalmıştır ve katkısız numuneler için bu azalma oranı 10. döngü sonunda %65 olarak bulunmuştur. %6 çimento katkılı numune için bu azalma %27 olmuştur. %9 kireç katkılı katkılı numune için bu azalma %33'tir. [6]

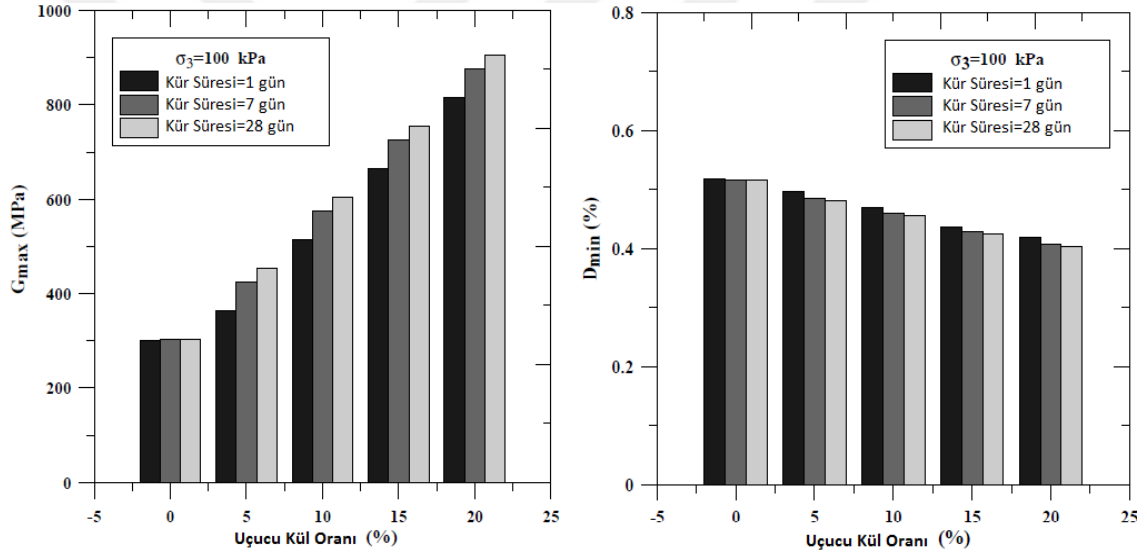


Şekil 1.19 Kireç katkısının kritik dinamik gerilme/donma-çözülme döngü sayısı grafiğine etkisi [6]

Dutta ve Saride [7] uçucu kül ile stabilize edilmiş kil zeminlerin dinamik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. %5, %10, %15, %20 oranlarında eklenerek hazırlanan numuneleri 1-7 ve 28 gün kür sürelerine tabii tuttuktan sonra farklı çevre basınçlarında rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çevre basıncının, uçucu kül katkı oranının ve kür süresinin G_{maks} ve D üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 1.20 ve Şekil1.21'de görüldüğü üzere uçucu kül oranının artmasıyla birlikte G_{maks} artarken, D_{min} değerleri azalmıştır. Şekil 1.21'de görüldüğü üzere dinamik kayma modülü artarken, sönüm oranları azalmıştır.



Şekil 1.20 Farklı uçucu kül oranlarında çevresel basınca bağlı G_{maks} ve D grafiği [7]



Şekil 1.21 Farklı uçucu kül oranlarında kür süresine bağlı G_{maks} ve D grafiği [7]

Liu vd. [8] çalışmalarında siltli bir kil zemine 1:1, 1:2, 1:4 oranlarında uçucu kül katarak dinamik üç eksenli deneyler uygulayarak dinamik kayma modülü değerlerini kıyaslamıştır. Çizelge 1.3'teki deney sonuçlarına bakıldığında 1:2 oranlı numune diğerlerinden daha iyi iyileşme sağlamıştır. Bunun nedeni ise belirli bir yüzdeden fazla uçucu kül eklenmesi boşluklarda çok fazla uçucu kül bulunmasına bu da zeminin mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır şeklinde ifade edilmiştir.

Çizelge 1.3 Dinamik deneylerin sonuçları [8]

Uçucu Kül Oranı	Dinamik Kayma Modülü (kPa)
1:1	146.26
1:2	171.64
1:4	158.32

Gao vd. [9] çalışmalarında Nanjig, Çin’de bir inşaat sahasından temin ettikleri kil zemine katkı malzemesi olarak 15 mm uzunluklu karbon fiberler kullanmıştır. % 0, % 0.05, % 0.10 ve % 0.15 lif içeriği ile farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelere resonant kolon deneyleri yapmıştır. (Çizelge 1.4)

Çizelge 1.4 Çalışmadaki deney programı [9]

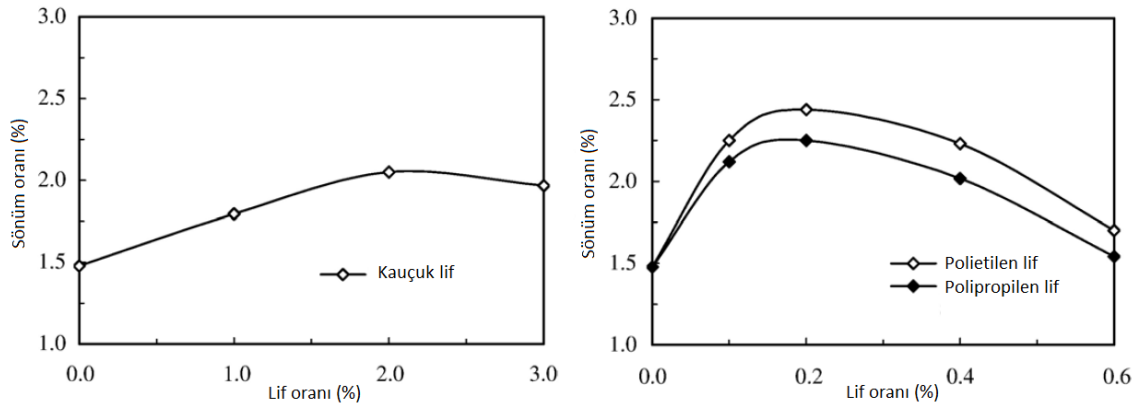
Numune Numarası	Fiber Oranı (%)	Su Muhtevası (&)	Numune Numarası	Fiber Oranı (%)	Su Muhtevası (&)
S1	0.00	12	S7	0.10	16
S2	0.05	12	S8	0.15	16
S3	0.10	12	S9	0.00	20
S4	0.15	12	S10	0.05	20
S5	0.00	16	S11	0.10	20
S6	0.05	16	S12	0.15	20

Yapılan deneyler sonucunda G_{maks} ve D_{maks} değerleri bulunmuş ve hem katkı oranlarına hem de su muhtevalarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Belirli bir su muhtevasında fiber oranı arttıkça D_{maks} artmış, G_{maks} önce artmış daha sonra azalmıştır. Sabit bir fiber oranında ise su muhtevası artışına bağlı olarak G_{maks} artarken, D_{maks} azalmıştır. Optimum fiber oranı ise Çizelge 1.5’teki deney sonuçlarına bakıldığında %0.1 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1.5 Resonant kolon deney sonuçları [9]

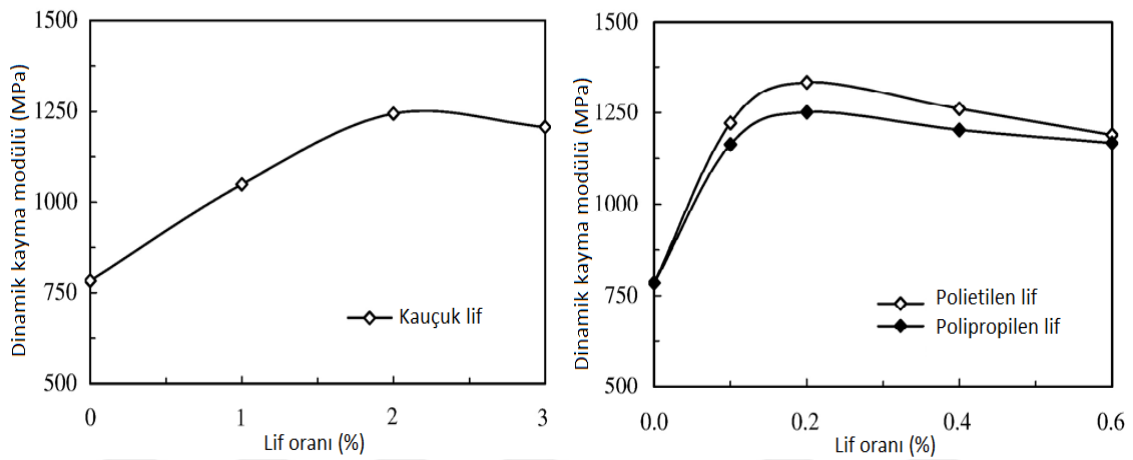
Numune Numarası	G_{maks} (MPa)	D_{maks}	Numune Numarası	G_{maks} (MPa)	D_{maks}
S1	60.66	0.250	S7	67.03	0.280
S2	70.56	0.256	S8	65.62	0.325
S3	71.48	0.270	S9	50.15	0.270
S4	70.28	0.305	S10	58.76	0.270
S5	54.10	0.258	S11	60.11	0.287
S6	66.34	0.264	S12	57.56	0.354

Akbulut vd. [10] çalışmalarında hurda kamyon lastiği atığı olan kauçuk lif, polietilen lif ve polipropilen lif ile modifiye edilmiş killi zeminler üzerinde resonant frekans deneyler gerçekleştirmiştir. Kauçuk lif %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında, sentetik polietilen ve polipropilen lifler ise %0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 oranlarında zemine eklenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sönüm oranı ve dinamik kayma modülü değerleri bulunarak bu değerlere katkı türünün ve oranının etkisi karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.22 Lif oranına bağlı sönüm oranı değişimi [10]

Sönüm oranı değerleri kıyaslandığında lif ile modifiye edilmiş zeminlerin sönüm oranları katkısız zeminden daha yüksek hesaplanmıştır ancak belirli bir yüzdeye kadar lif katkısı ile artan sönüm oranı değerleri daha sonra azalmıştır. Şekil 1.22 incelendiğinde kauçuk lif için optimum oran %2 ve optimum sönüm oranı %2.05 iken polietilen ve polipropilen lifler için ise optimum oran %0.2 olarak değerlendirilebilir ve optimum sönüm oranları sırasıyla %2.43 ve %2.25 olarak bulunmuştur. Buna göre polietilen ve polipropilen lifler ile güçlendirilmiş zeminler katkısız zemine göre sırasıyla 1.6 ve 1.5 kat daha yüksek sönüm oranı değerine sahiptir.

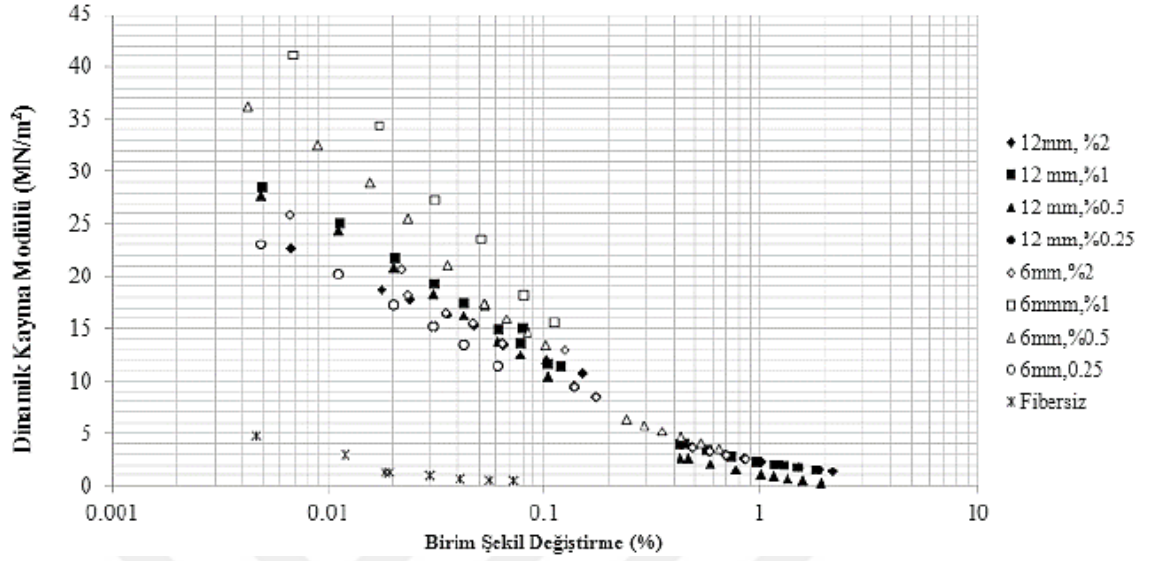


Şekil 1.23 Lif oranına bağlı dinamik kayma modülü değişimi [10]

Dinamik kayma modülleri incelendiğinde ise lif ile modifiye edilmiş zeminlerin dinamik kayma modülleri katkısız zeminden daha yüksek hesaplanmıştır. Ancak belirli bir yüzdeye kadar lif katkısı ile dinamik kayma modülleri daha sonra azalmıştır. Şekil 1.23 incelendiğinde kauçuk lif için en yüksek dinamik kayma modülü katkı oranı %2 iken 1243 MPa bulunmuştur. Polietilen ve polipropilen lifler için ise en yüksek dinamik kayma modülü katkı oranı %0.2 iken sırasıyla 1334 ve 1251 MPa olarak bulunmuştur. Katkısız zemin ile kıyaslandığında kauçuk lif, polietilen ve polipropilen lifler ile güçlendirilmiş zeminlerin dinamik kayma modülü sırasıyla 1.5, 1.6, 1.5 kat daha yüksek bulunmuştur.

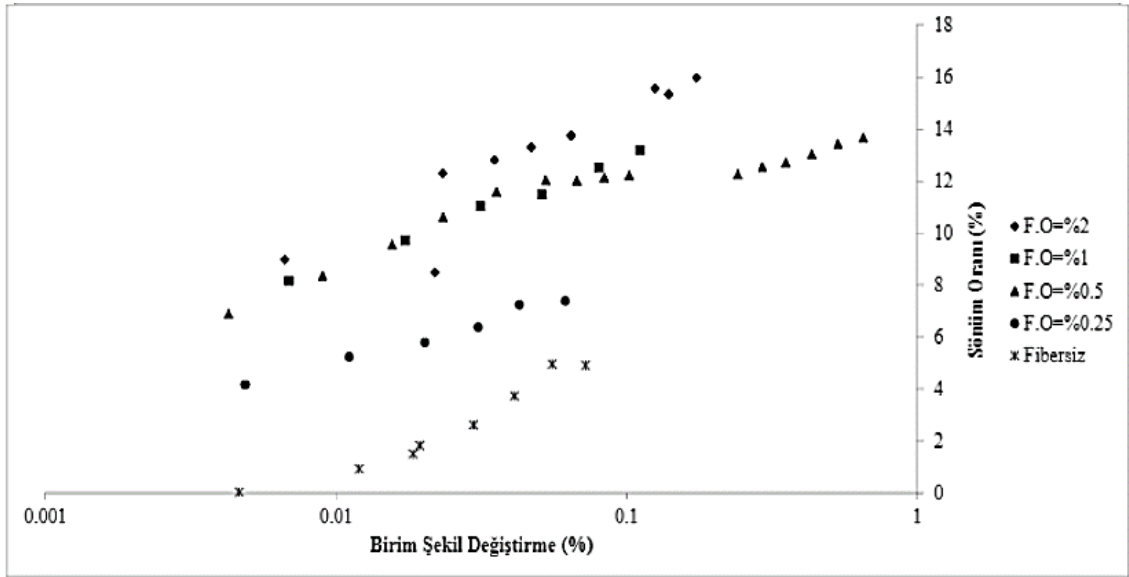
Kalıpcılar vd. [11] çalışmalarında polipropilen fiberler ile güçlendirdikleri kil zemin üzerinde 100 kPa çevresel basınçta ve 0.1 Hz frekansta dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Katkı oranlarını %0, %0.25, %0.5, %1, %2 olarak fiber

uzunluklarını ise 6 mm ve 12mm olarak seçmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda dinamik kayma modülü ve sönüm oranları katkıli-katkısız kil zeminler karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.24 Fiber oranı ve uzunluğuna bağlı Dinamik Kayma Modülü – Birim Şekil Değiştirme grafiği [11]

Dinamik üç eksenli basınç deneyi sonuçları incelendiğinde fiber oranının artmasıyla birlikte dinamik kayma modülleri önce artarken, %1 katkı oranı geçildikten sonra azalmalar gözlemlenmiştir. (Şekil 1.24) 6 mm uzunluklu fiber katkısının 12 mm uzunluklu fiber katkısından daha iyi sonuçlar vermiştir.



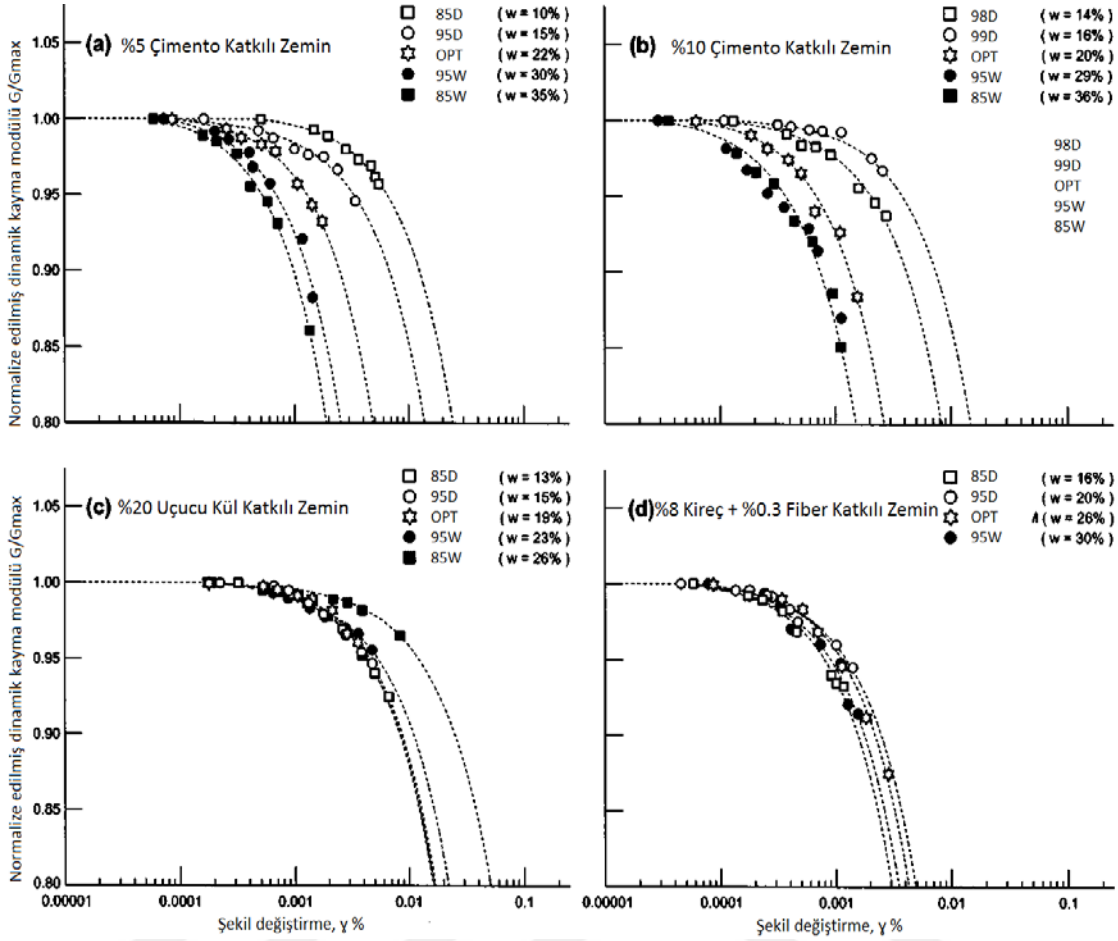
Şekil 1.25 Fiber uzunluğu 6 mm olan katkıli zeminler için fiber oranına bağlı Sönüm Oranı – Birim Şekil Değiştirme grafiği [11]

Şekil 1.25 incelendiğinde ise [11]'de yapılan deneyler sonucu fiber oranlarının artmasıyla birlikte sönüm oranı değerlerinde artış gözlemlendiği görülmektedir.

Hoyos vd. [12] çalışmalarında tip %5 ve %10 V portland çimentosu katkı, %20 uçucu kül katkı, %8 kireç + %0.3 fiber katkı kil zeminler üzerinde rezonant kolon deneyleri yapmışlardır. Çizelge 1.6'da gösterilen deney programı uygulanmıştır. Burada V çimentoyu, FA uçucu külü, LF kireç+fiber karışımını temsil etmektedir. 85D, 85W, OPT ifadeleri ise sırasıyla $\gamma_{k,max}$ 'ın %85'ine karşılık gelen w_{opt} 'un kuru tarafındaki su muhtevasını, ıslak tarafındaki su muhtevasını ve proktor sonucu $\gamma_{k,max}$ değerine karşılık gelen w_{opt} su muhtevasını temsil etmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda en yüksek G_{maks} değerinin %10 çimento katkı zeminin optimum su muhtevasının %95 ıslak tarafında kompakte edilen (10V-95W) numunede elde edildiği görülmüştür. Genellikle optimumun ıslak tarafında kalan numuneler daha yüksek G_{maks} değerleri vermişlerdir. Uçucu kül haricinde bütün katkılarda, her su muhtevasında olmasa da, G_{maks} değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 1.6 Deney programı ve $\sigma_0=100$ kPa iken G_{maks} değerleri [12]

Numune	G_{maks} (MPa)	Numune	G_{maks} (MPa)
Doğal Zemin-OPT	288	10V-85W	4677
5V-85D	24	FA-85D	70
5V-95D	524	FA-95D	263
5V-OPT	794	FA-OPT	317
5V-95W	1621	FA-95W	224
5V-85W	1737	FA-85W	269
10V-98D	467	LF-85D	38
10V-99D	1148	LF-95D	153
10V-OPT	2345	LF-OPT	631
10V-95W	5496	LF-95W	1621



Şekil 1.26 Farklı numunelere ait G/G_{maks} - γ grafikleri [12]

1.2 Tezin Amacı

Zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesi makine titreşimleri, trafik yükleri, bina yükleri, depremler gibi dinamik yüklere maruz kalan zeminlerin bu yükler altındaki davranışının incelenmesi için önemlidir. [1] Bu çalışmada ise daneli katkı ile stabilize edilmiş zeminler standart proktor yöntemi ile her biri kendi optimum su muhtevasında sıkıştırılarak farklı katkı türleri ve farklı katkı oranları ile hazırlanan numunelere dinamik basit kesme deneyleri yapılarak dinamik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada yüksek plastisiteli bir kil ile silis dumanı, uçucu kül, kırmızı çamur olmak üzere üç adet katkı malzemesi kullanılmıştır. Öncelikle katkısız numune ve katkılı numuneler için optimum su muhtevaları bulunmuş, daha sonra optimum su muhtevalarında kompakte edilen numuneler üzerinde serbest basınç ve dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır.

1.3 Hipotez

Farklı katkı maddelerinin ve bu katkı maddelerinin farklı oranlarda eklenmesinin, zeminin dinamik parametrelerine etkisi gerçekleştirilen deney sonuçlarına bağlı olarak incelenecek, literatürde yer alan benzer çalışmalar ile mukayese edilerek değerlendirilecektir.



ZEMİNLERİN DİNAMİK PARAMETRELERİ VE DİNAMİK BASİT KESME DENEYİ

2.1 Zeminlerin Dinamik Parametrelerini Belirleme Yöntemleri

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi için çeşitli arazi ve/veya laboratuvar deneyleri yapılarak dinamik parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler sönüm oranı, dinamik kayma modülü, kayma dalgası hızı gibi parametrelerdir. Bu parametrelerin belirlenmesi ile zeminin mukavemet özellikleri değerlendirilebilir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için laboratuvarda yapılan dinamik üç eksenli, rezonant kolon, dinamik burulmalı kesme ve dinamik basit kesme deneylerinden faydalanılır.[45] Arazi deneylerinin sıkça kullanılanları ise standart penetrasyon deneyi, sismik kırılma deneyi, kuyudan-kuyuya sismik deneyi, kuyu aşağı (yukarı) sismik deneyi, Rayleigh dalgası deneyleridir. Arazi deneylerinde daha büyük ölçeklerde ve daha az örselenmiş numuneler üzerinde çalışılabilir. Laboratuvar deneylerinde ise arazi şartlarının sağlanması gerekir ancak daha kısa sürelerde ve daha ekonomik koşullarda deneylerin tamamlanması nedeniyle avantajlıdır. Hem arazi deneyleri hem de laboratuvar deneyleri düşük şekil değiştirme ve yüksek şekil değiştirme deneyleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşük şekil değiştirme deneylerinde zeminin 10^{-6} - 10^{-3} aralığındaki deformasyonlarda dinamik parametreleri belirlenebilirken yüksek şekil değiştirme deneylerinde zeminin 10^{-3} 'ten büyük deformasyonlardaki dinamik parametreleri belirlenebilmektedir. Şekil 2.1'de laboratuvar ve arazi deneylerinin zeminlerde oluşturacağı şekil değiştirmelere bağlı olarak karşılaştırıldığı şema gösterilmektedir.

Dinamik Arazi Deneylei		Dinamik Üç Eksenli ve Dinamik Kesme Deneylei				
Rezonant Kolon Deneylei						
Sarsma Tablası Deneylei						
Statik Plaka Yükleme Deneylei						
Depremler						
10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
Kayma Deformasyon Seviyesi, γ (%)						

Şekil 2.1 Arazi ve laboratuvar deneylelerinin uygulanmasına ilişkin şema [14]

2.1.1 Arazi Deneylei

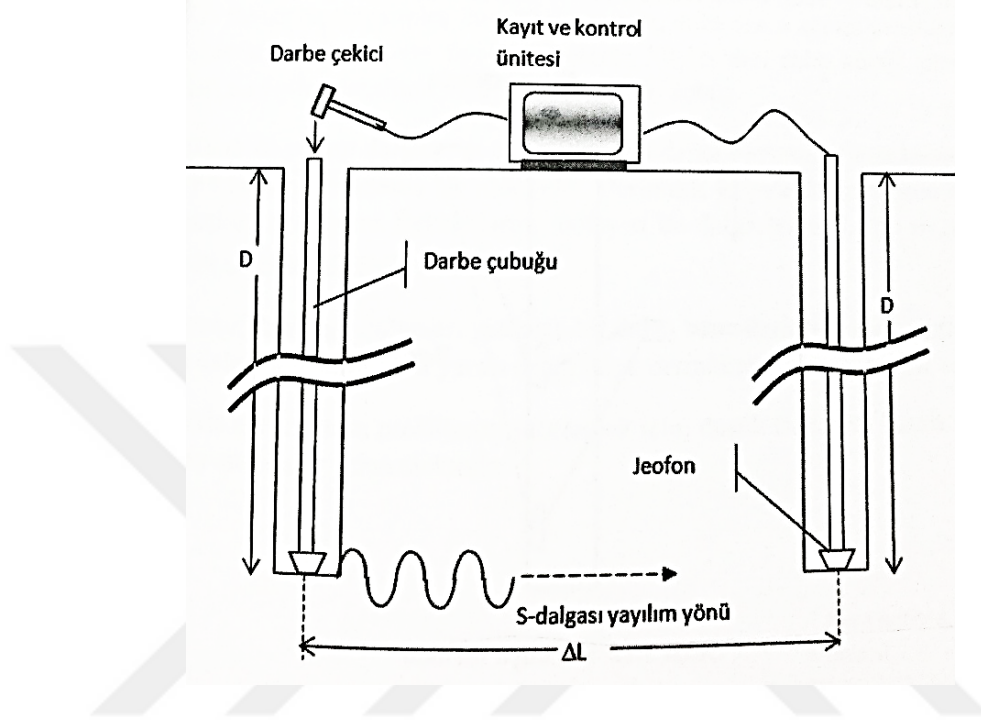
Arazi deneylei içerisinde sismik yansıma ve sismik kırılma deneylei, Rayleigh dalgası deneylei, kuyudan-kuyuya sismik deneylei ve kuyu aşağı (yukarı) sismik deneylei gibi deneyleiler düşük şekil değıştirme deneyleileridir. [15] Bu deneyleilerde 10⁻⁵ ve daha düşük kayma birim deformasyonları uygulanarak zeminlerin deformasyon modülleri yardımıyla kayma dalgası hızı belirlenir. [16] Arazide gerçekleştirilen yüksek şekil değıştirme deneylei ise standart penetrasyon ve kuyuda burulma deneylei ile jetomografi yöntemidir. SPT kolay uygulanması açısından genellikle tercih edilen yaygın bir yöntemdir.

2.1.1.1 Sismik Kırılma ve Yansıma Deneylei

Deneyleilerde zemin yüzeyindeki bir kaynak vasıtası ile meydana getirilen P ve S dalgalarının varış zamanlarının sensörlere kaydedilmesi yöntemi ile dalga hızlarının belirlenmesi yöntemidir. Daha yaygın olarak V_c , P- dalgası hızının bulunması için kullanılır. [17]

2.1.1.2 Karşıt Kuyu Deneyi

Bu deneyde iki farklı kuyu kullanılması suretiyle, kuyulardan birinde S- dalgası yaratılarak diğer kuyudan dalganın varış süresinin tespit edilmesi ile V_s dalga hızının bulunması amaçlanır.



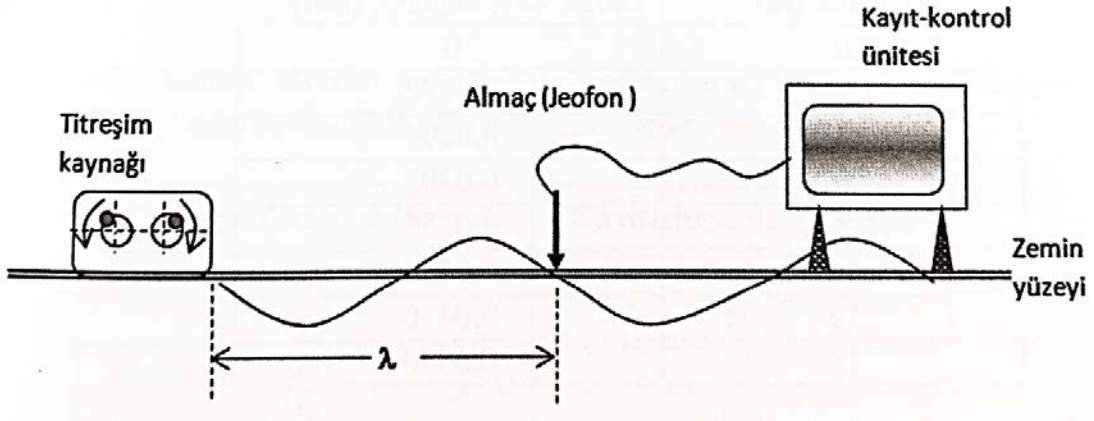
Şekil 2.2 Karşıt kuyu methodu [17]

2.1.1.3 Alt Kuyu – Üst Kuyu Deneyleri

Alt kuyu deneyinde zemin yüzeyinde oluşturulan bir dalganın kuyu içerisindeki jeofonlara ulaşma süresinin belirlenmesiyle, üst kuyu deneyinde ise kuyu içinde dalga oluşturulup zemin yüzeyindeki jeofonlara ulaşma süresinin belirlenmesiyle dalga hızının hesaplanması sağlanır.

2.1.1.4 Rayleigh Dalgası Deneyi

Bu deneyde zemin yüzeyine yerleştirilen bir titreşim kaynağı ile harmonik dalgalar oluşturularak (Rayleigh dalgaları) bu dalgaların hızının belirlenmesi ile dinamik kayma modülü bulunur. Rayleigh dalga hızı V_R , $\nu < 10^{-4}$ birim deformasyonlar için kayma dalgası hızı V_s 'e eşit kabul edilir. Şekil 2.3'te deneyin yapılışına dair bir şema verilmiştir.



Şekil 2.3 Kararlı titreşim metodu [17], [18]

2.1.1.5 Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)

Geoteknik mühendisliğinde sıkça kullanılan SPT deneyinde bilindiği üzere 450 mm uzunluklu çelik bir tüpün zemine üç aşamada 150 mm+150 mm+150 mm=450 mm girmesini sağlamak için darbeler uygulanır. Her 150 mm giriş için darbe sayısının kaydedilip, ilk 150 mm giriş için darbe sayısının deney dışı bırakılıp ikinci ve üçüncü 150 mm'ler için darbe sayılarının toplanarak SPT-N değeri bulunur.

Geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir başka deney ise koni penetrasyon deneyidir. Bu deney ise bir konik uç zemine belli bir hızda itilerek zeminin gösterdiği direnç kaydedilerek yapılır. [17]

İyisan [19] tarafından SPT ve CPT deney sonuçları ile V_s kayma dalgası hızının bulunmasına dair çeşitli ampirik formüllerin özetlendiği çalışma Çizelge 2.1'de verilmiştir. Burada N standart penetrasyon darbe sayısı, σ'_v efektif düşey gerilme (ton/m^2), D_{50} ortalama dane çapı, q_c koni penetrasyon direnci (kg/cm^2), N_{10} 10 cm penetrasyon için darbe sayısı, H derinlik (m) olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1 SPT darbe sayısı ve konik penetrasyon deneyi uç direnci ile kayma dalga hızı korelasyonları [19], [17].

Değişken parametre	Zemin tipi	Korelasyon, V_s (m/sn)	Korelasyon Katsayısı, (%)
N	Tüm zeminler	$51.5N^{0.516}$	81
σ'_v	Tüm zeminler	$1158 (\sigma'_v)^{0.367}$	72
N ve σ'_v	Tüm zeminler	$61N^{0.267}(\sigma'_v)^{0.283}$	83
	Kil	$43.7N^{0.324}(\sigma'_v)^{0.270}$	90
	Kum	$54N^{0.332}(\sigma'_v)^{0.221}$	64
	Çakıl	$205.7N^{0.074}(\sigma'_v)^{0.177}$	53
D_{50}	Kum	$408(D_{50})^{0.247}$	54
D_{50} ve σ'_v	Kum	$205.7(\sigma'_v)^{0.409} (D_{50})^{0.289}$	78
N_1	Tüm zeminler	$71.2(N_1)^{0.440}$	56
q_c	Kil ve kum	$55.3(q_c)^{0.377}$	80
		$0.70q_c+218$	75
q_c ve σ'_v	Tüm zeminler	$41 (q_c)^{0.212} (\sigma'_v)^{0.461}$	82
N_{10}	Tüm zeminler	$86.4 (N_{10})^{0.367}$	70
H		$79.8 H^{0.675}$	71

2.1.2 Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneylerinden rezonant kolon deneyi ve bender eleman deneyi düşük şekil değiştirme deneyleri olarak tanımlanırken; dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme, dinamik burulmalı kesme deneyleri yüksek şekil değiştirme deneyleri olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.4'te bu deneylerin kullanılması yoluyla ölçülebilen dinamik parametreler özetlenmiştir.

2.1.2.1 Dinamik Üç Eksenli Deney

Dinamik üç eksenli deneyi çevrimsel yüklemeler sonucu zemin numunesinin gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin ölçülmesi ile sönüm oranı ve dinamik kayma modülü değerlerinin bulunmasına olanak sağlar. Dinamik üç eksenli deneyler deformasyon kontrollü ya da gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir.

Çizelge 2.2 Laboratuvar deneyleri ile ölçülebilen parametreler [14]

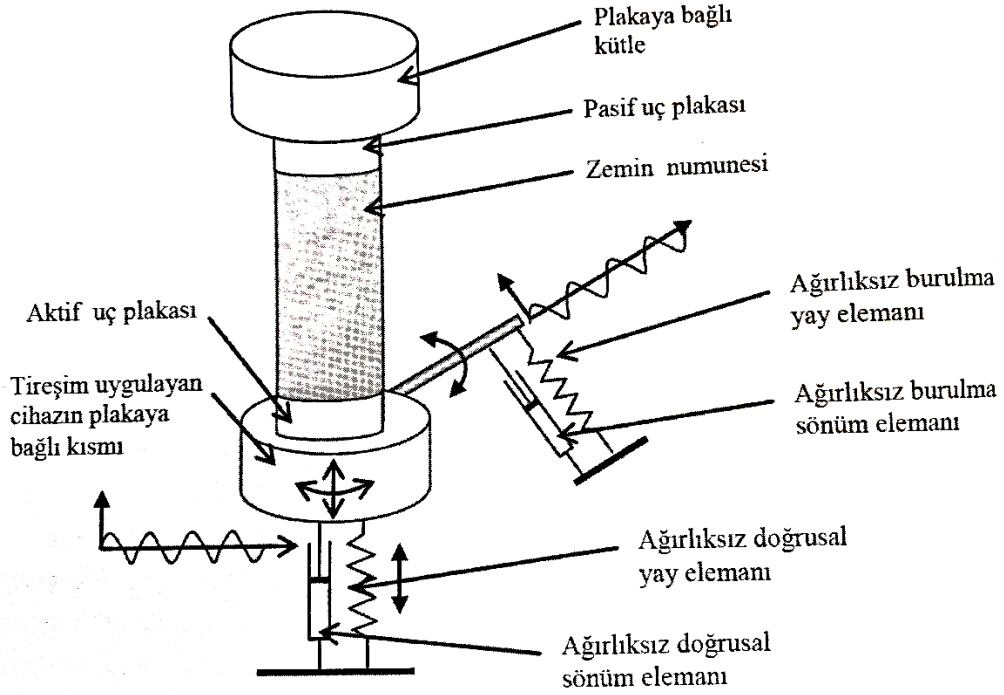
		Rezonant Kolon Deneyi	Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	Burulmalı Kesme Deneyi
	Yük	Rezonans Frekansı	Eksenel Yük	Yatay Yük	Burulma
Deformasyon	Eksenel	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon
	Kesme	İvme	Ölçülmez	Yatay Deformasyon	Dönme
	Yatay	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Ölçülmez
	Hacimsel	Drenajsız testlerde ölçülmez (Drenajlı testlerde numuneden çıkan ve giren sıvı hacmi ölçülür)			
Boşluk Suyu Basıncı	Genellikle Ölçülmez	Sınır Koşullarında Ölçülür	Sınır Koşullarında Ölçülür	Sınır Koşullarında Ölçülür	

2.1.2.2 Rezonant Kolon Deneyi

Rezonant kolon, 10^{-6} - 10^{-3} aralığındaki birim şekil değiştirmelerde zeminin dinamik parametrelerini hesaplamayı sağlar. Deney silindirik bir numunenin alt kısmının sabit tutulup, yukarıdan eksenel ya da burulmalı titreşimler uygulanması ile gerçekleştirilir. Titreşimler elektromanyetik yükleme sistemi kullanılarak uygulanır. Zeminin verdiği tepki rezonant frekansı olarak ölçüldükten zeminin dinamik kayma modülü ve kayma dalgası hızı hesaplanır. Şekil 2.5'te deneyin şematik olarak gösterimi verilmiştir.

2.1.2.3 Bender Eleman Deneyi

Bender eleman deneyinde iki piyezoelektrik malzemenin arasına yerleştirilen zemin numunesine kayma dalgası uygulanır ve bu dalğanun hızı bulunur ve böylece zeminin G_{maks} değerininin hesaplanması sağlanır [16].



Şekil 2.4 Rezonant kolon deney cihazının şematik temsili [20], [17]

2.1.2.4 Burulmalı Kesme Deneyi

Burulmalı kesme deneyi de hem deformasyon kontrollü hem de gerlime kontrollü olarak yapılabilmektedir. Burulmalı kesme deneyinde deney numunesi üstten çevrimsel bir burulma yüklemesine tabii tutulurken numunenin alt kısmında meydana gelen yer değiştirmenin belirlenmesi ile gerilme-şekil değiştirme ilişkisi oluşturularak dinamik kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanır.

2.1.2.5 Dinamik Basit Kesme Deneyi

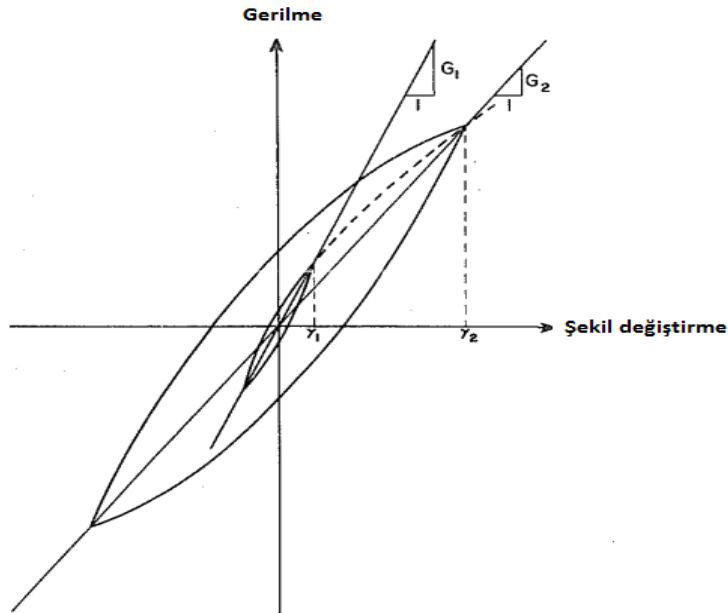
Dinamik basit kesme deneyi ise zemin numunesine düşey bir konsolidasyon basıncı uygulanırken aynı anda yatay olarak tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanması ile zeminin

yer değiştirmesi ve tepki kuvvetlerinin ölçülmesi sonucu gerilme-şekilde değiştirme ilişkisi bulunarak dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin hesaplanması yöntemidir. Bu deney sadece gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Dinamik basit kesme deneyinde tekrarlı yükler yatay kayma gerilmeleri olarak uygulandığı için deprem yüklemelerinin ve arazi koşullarının daha iyi modellenmesine imkân sunmaktadır.

2.2 Dinamik Kayma Modülü

Zeminin tekrarlı yükler altındaki davranışının açıklanabilmesi için en önemli parametrelerden biri dinamik kayma modülüdür. Zemin tekrarlı yüklerle maruz kaldığındaki davranışını belirlemek amacıyla yapılan deneyler sonucunda Şekil 2.6'da gösterildiği gibi histerisis ilmeği olarak tanımlanan grafikler elde edilir. Histerisis ilmeklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi dinamik kayma modülü olarak tanımlanmaktadır ve (2.1)'de bulunan bağıntı yardımıyla hesaplanabilir. Burada τ kayma gerilmesini, γ kayma deformasyonunu temsil etmektedir.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.1)$$

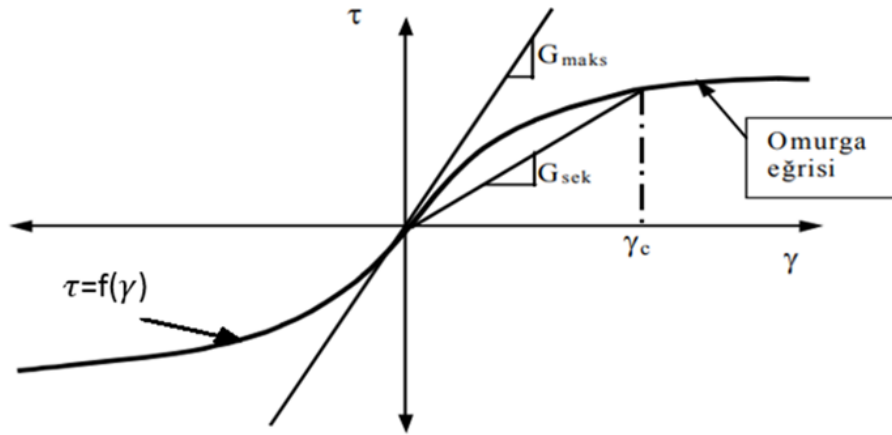


Şekil 2.5 Farklı deformasyon genliklerindeki histeristik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [21]

Dinamik kayma modülünün tek bir değeri yoktur. Bu nedenle dinamik kayma modülü için literatürde G_{tan} , G_{maks} , G_{sek} gibi farklı tanımlamalar yapılmıştır. Histerisis ilmeğinin

herhangi bir noktasındaki tanjant değeri G_{tan} olarak tanımlanmaktadır. Bir çevrim süresince bu değer sürekli değişeceğinden G_{sek} olarak, sekant kayma modülü, tanımlanan ortalama bir değer tanımlanmıştır. Histerisis ilmeğinin ortalama eğimi Şekil 2.4'te görüldüğü üzere G_{sek} 'tir.

G_{maks} ise küçük şekil değiştirmelere karşılık gelen (genellikle % 10^{-3} 'den az) dinamik kayma modülü olarak tanımlanmaktadır [22] ve Şekil 2.7'deki omurga eğrisine teğet olarak orjinden geçen doğrunun eğimidir. Omurga eğrisi lineer olmayan zemin davranışını daha iyi anlayabilmemizi sağlayan, doğal frekansı, sönümleme veya zorlama olmadığında sistemin tepkisinin genliğinin bir fonksiyonu olarak tanımlayan bir araçtır [23].



Şekil 2.6 G_{maks} , G_{sek} , omurga eğrisi [23]

G_{maks} 'ı bulmak için

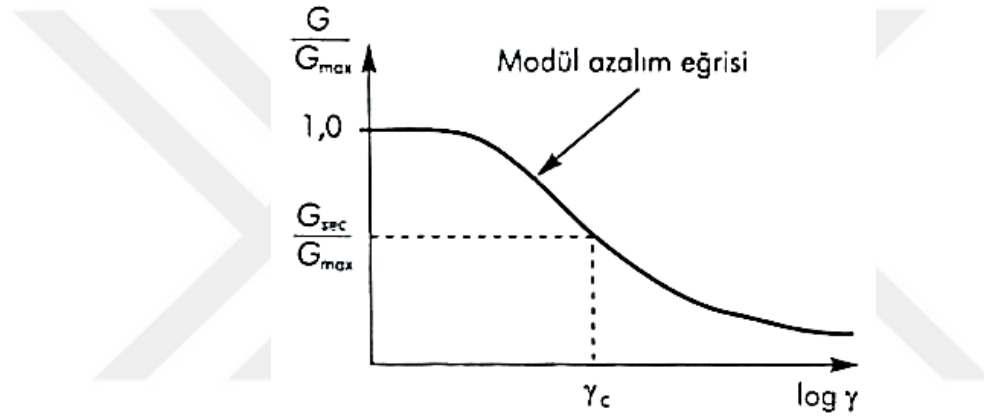
$$G_{maks} = \rho * Vs^2 \quad (2.2)$$

denklemden faydalanılır. ρ zeminin yoğunluğunu, Vs ise kayma dalgası hızını temsil eder. Burada kayma dalgası hızının kullanılmasının nedeni, dalgalar zemin içerisinde ilerlediğinde yapıların veya temellerin büyük deformasyonlarına neden olan burulma veya kayma dalgalarıdır, basınç dalgaları değil. Bu nedenle zemin dinamiğinde Young modülü (Elastisite modülü) yerine kayma modülü kullanılır. Elastisite teorisinden, kayma modülü ile elastisite modülü arasında denklem (2.3)'te verilen ilişki kurulabilir. [24]

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.3)$$

Burada ν poisson oranıdır.

Birim deformasyonun artmasıyla beraber kayma modülünde azalma meydana gelir. Şekil 2.5'te bu azalma gözlenebilir. Burada görülen modül azalım eğrisi ya da diğer bir deyişle normalize edilmiş kayma modülü grafiği belirli bir deformasyona karşılık gelen G 'nin G_{maks} 'a bölünmesi ile oluşturulur. Şekil 2.8'deki $G/G_{maks} - \gamma$ grafiğine bakıldığında G/G_{maks} sıfır deformasyonda 1'e eşittir ve bu değer birim deformasyon arttıkça azalır. Modül azalım eğrisi, kayma birim deformasyonunun artmasıyla azalmaya başlamadan önce başlangıçta düzdür. Doğrusal eğrinin doğrusal olmamaya başladığı nokta lineer dinamik eşik kayma birim deformasyonu (γ_c) olarak adlandırılır. [15]



Şekil 2.7 Birim şekil değiştirme ile modül azalma eğrisi [15]

Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda G_{maks} , G/G_{maks} ve D' 'yi etkileyen birçok faktör olduğu bulunmuştur. Hardin ve Black [25] tarafından denklem (2.4)'te verilen fonksiyonla bu faktörleri ifade etmişlerdir.

$$G_{maks}=f(\sigma', e, S, H, \tau_0, C, A, F, T, \theta, K) \quad (2.4)$$

Fonksiyondaki σ' çevresel basıncı, e boşluk oranını, S doygunluk oranını, H jeolojik geçmişi, τ_0 kayma gerilmesini, C dane özelliklerini, A titreşim genliğini, F frekansı, T zamana bağlı etkileri (ikincil konsolidasyon), θ zemin yapısını, K sıcaklığı temsil etmektedir [26]. Kohezyonlu zeminlerde ise bunların dışında PI ve AKO dinamik kayma modülünü etkileyen önemli faktörlerdendir. Hardin ve Drnevich [27] bu konuda yaptıkları çalışma sonucunda etki G ve D' 'ye etki eden faktörlerin en önemlilerini çevrim sayısı, efektif gerilme, gerilme genliği, boşluk oranı ve doygunluk derecesi olarak

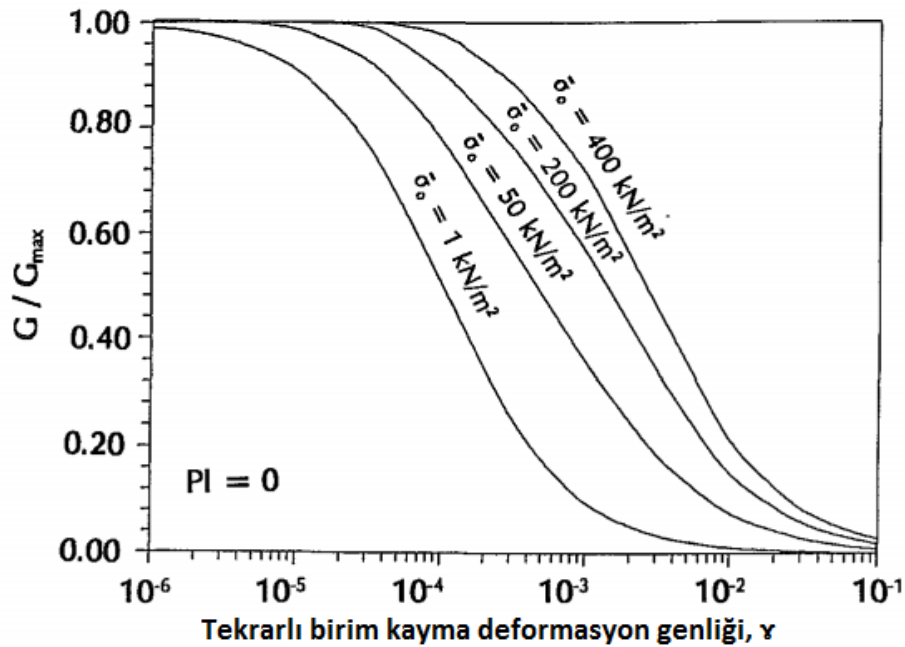
tanımlamışlardır. Dobry ve Vucetic [28] çalışmalarında kohezyonlu zeminlerde G ve D'yi etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Literatürde yapılan bu çalışmalara istinaden oluşturulan hangi faktörün nasıl bir etki yarattığını gösteren özet bir tabloyu ise Çizelge 2. 3'te görmek mümkündür. Çizelge 2. 3 haricinde G_{maks} üzerinde etkili olan bir başka faktör ise örselenmedir [26],[29]. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda maksimum kayma modülleri karşılaştırıldığında %50 mertebesinde farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Buna karşılık numuneler yüksek kalitede alınır ve konsolidasyon aşaması arazi gerilme değerlerine eşit olacak şekilde uygulanır ise bu farklılıklar önemli ölçüde giderilebilir.

Çizelge 2.3 Normal konsolide ve aşırı konsolide kilerde G_{maks} , G/G_{maks} ve D'nin farklı faktörlerle değişimi [31], [32].

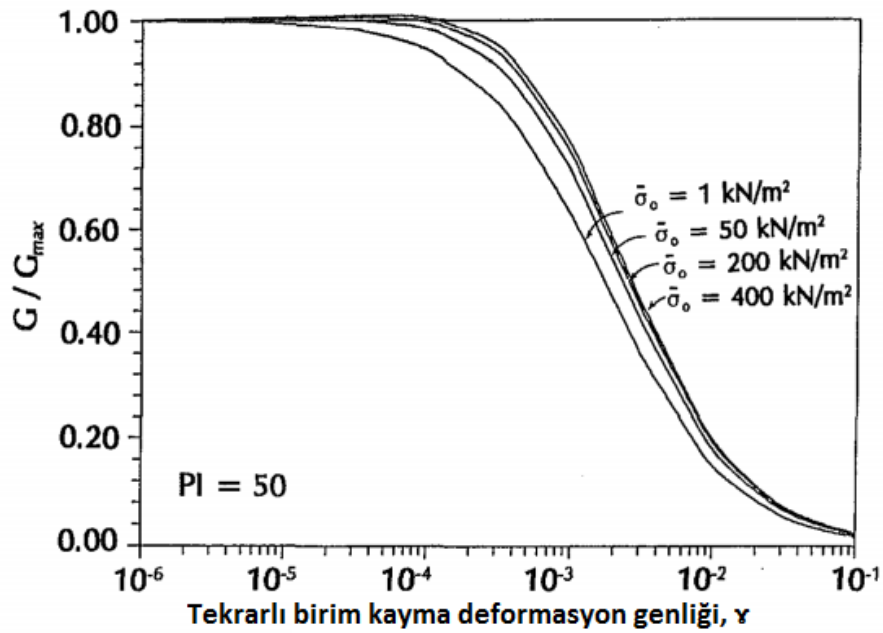
Etkileyen Faktörler	G_{maks}	G/G_{maks}	D
Çevre Basıncı, σ_0	Artar	Sabit kalır ya da artar	Sabit kalır ya da azalır
Boşluk Oranı, e	Azalır	Artar	Azalır
Jeolojik Geçmiş, t	Artar	Artabilir	Azalır
Çimentolanma, c	Artar	Artabilir	Azalabilir
Aşırı Konsolidasyon Oranı, AKO	Artar	Etkilemez	Etkilemez
Plastisite İndisi, PI	AKO > 1 Artar AKO = 1 Sabit kalır	Artar	Azalır
Tekrarlı Birim Deformasyon, γ_c	-	G artar, G ve G_{maks} etkilenmez ise G/G_{maks} sabit kalır	Artar
Birim Boy Deformasyonu, γ	Artar	Azalır	Sabit kalır ya da artabilir
Çevrim Sayısı, N	Büyük γ_c 'lerin N kez tekrarından sonra azalır. Fakat daha sonra zamanla toplar.	Azalır	Orta derecede γ_c ve N değerlerinde önemli değildir

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da çevre basıncının granüler ve yüksek plastisiteli zeminlerin normalize edilmiş dinamik kayma modülünü nasıl etkilediği görülmektedir. Ishibashi'nin

çalışmasındaki [30] bu grafiklere bakıldığında, çevre basıncının normalize edilmiş kayma modülü üzerindeki daha net iken, yüksek plastisiteli zeminlerde grafikler daha yakındır. Bununla birlikte her iki zemin tipi için de çevre basıncı artışının normalize edilmiş dinamik kayma modülü değerlerini arttırdığı söylenebilir.

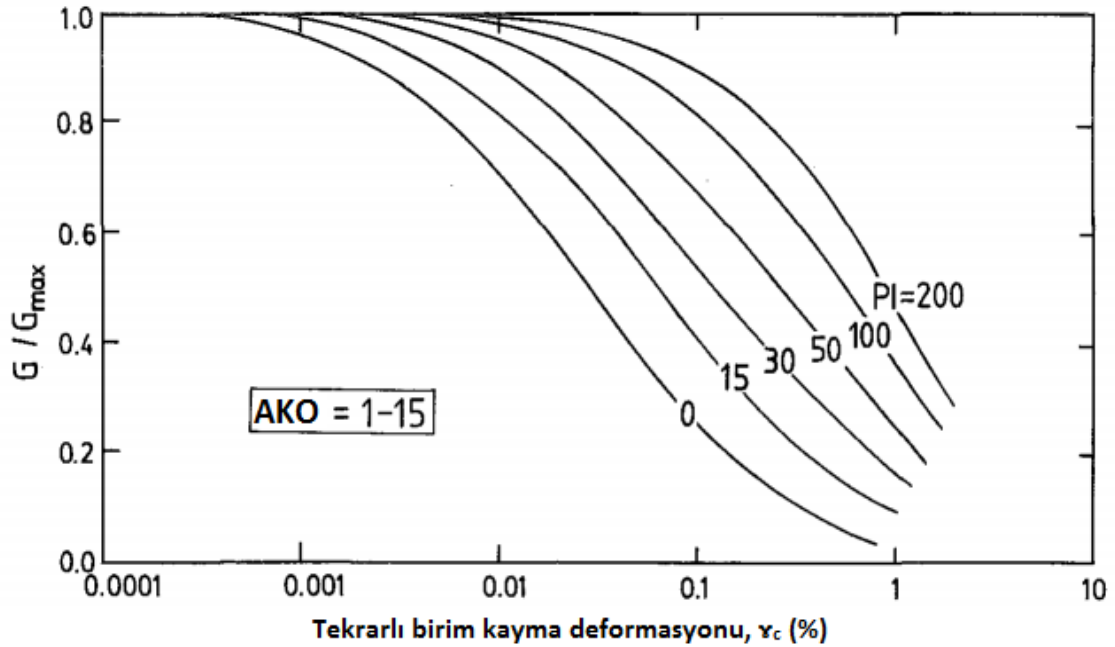


Şekil 2.8 Çevre basıncına bağlı olarak plastik olmayan zeminlere ait G/G_{maks} - γ grafikleri [30], [24]



Şekil 2.9 Çevre basıncına bağlı olarak yüksek plastisiteli zeminlere ait G/G_{maks} - γ grafikleri [30], [24]

Kohezyonlu zeminlerin normalize edilmiş dinamik kayma modülüne PI'nin etkisi ise Şekil 2.11'de Vucetic ve Dobry [33] tarafından yapılan çalışmada gösterilmiştir. Normal ve orta aşırı konsolide ince daneli zeminler için yapılan çalışmada görüldüğü üzere PI arttıkça doğrusal eşik kayma birim deformasyonu (γ_c) da artış göstermektedir.



Şekil 2.10 Normal ve aşırı konsolide ince daneli zeminler için PI'nin $G/G_{maks-\gamma_c}$ grafiklerine etkisi [33], [24]

Çizelge 2.3'te ASSHTO'nun yayınladığı yapılan deneyler sonucu bulunan dinamik kayma modülü sonuçlarına bağlı olarak farklı zemin tipleri için dinamik kayma modülü değerleri gösterilmiştir.

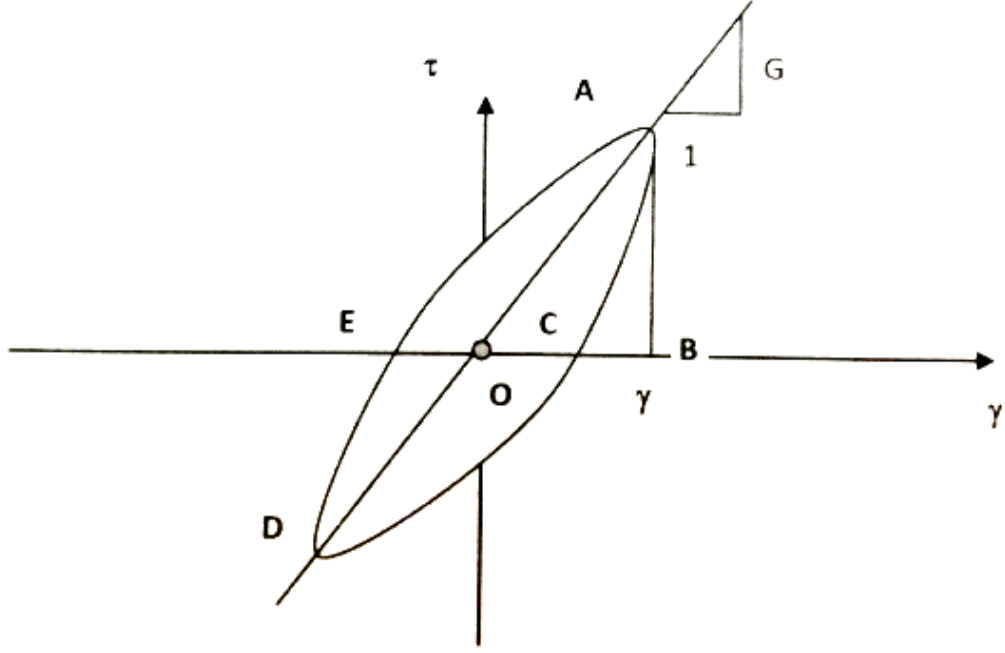
Çizelge 2.4 Farklı zemin tipleri için yaklaşık kayma modülü değerleri [34], [26]

Zemin Tipi	Kayma Modülü (kPa)
Sıkı Kum & Çakıl	69000 – 345000
Siltli Kum	27600 – 138000
Orta Katı Kil	6900 – 34500
Yumuşak Kil	2750 - 13750

2.3 Sönüm Oranı

Sönüm oranı ise tekrarlı yüklere maruz kalan zemin elemanlarında meydana gelen enerji kaybı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.12'deki histerisis ilmeklerinden faydalanılarak, (2.5) bağıntısı sayesinde hesaplanabilir.

$$G = \frac{1}{4\pi} \frac{(ACDEA) \text{ Mekik alanı}}{(ABO) \text{ Üçgen alanı}} \quad (2.5)$$

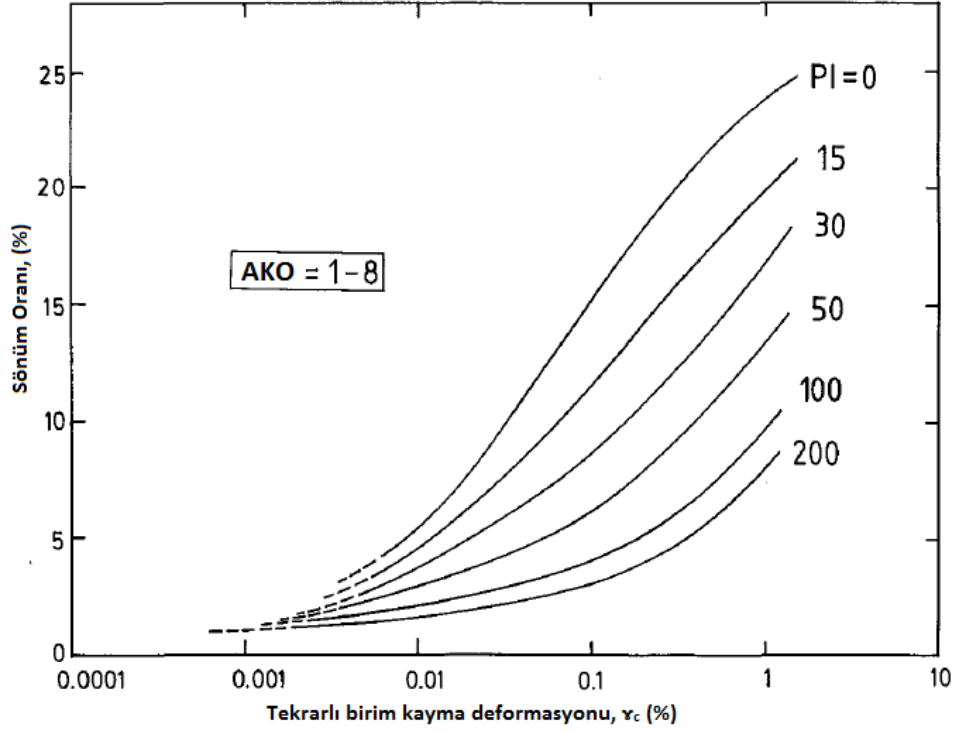


Şekil 2.11 Gerilme birim deformasyon eğrisi [17]

Histerisis ilmeğinin alanı W_D yutulan enerji, üçgen alanı maksimum birim kayma W_S olarak tanımlanırsa eşitlik (2.6)'daki şekle dönüşebilir [35], [36].

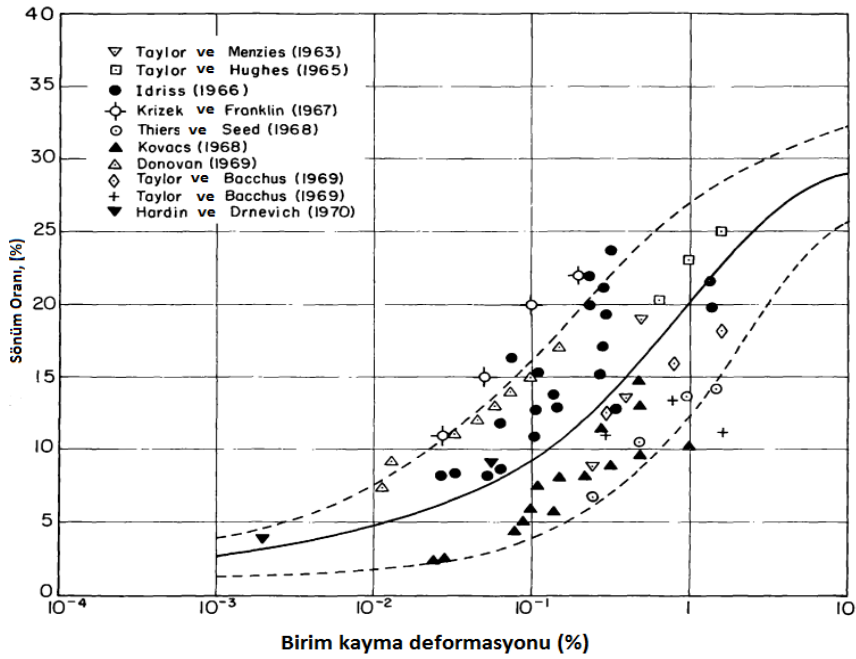
$$D = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{W_D}{W_S} \right) \quad (2.6)$$

Sönüm oranını etkileyen faktörlerin özetlendiği Çizelge 2. 2'ye bakıldığında çevre basıncı, boşluk oranı, plastise indisi, çimentolanma oranı, çevrim sayısı gibi faktörlerden etkilendiği görülmektedir. Şekil 2.13 incelendiğinde ise Vucetiv ve Dobry [33] tarafından yapılan çalışma ile plastisite indisinin sönüm oranı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu çalışmaya göre plastisite indisindeki artış sönüm oranında azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 2.12 Normal ve aşırı konsolide ince daneli zeminler için PI'nin Sönüm Oranı- γ_c grafiklerine etkisi [33], [24]

Seed ve Idriss'in yapmış olduğu çalışmada [29] suya doymun kil zeminlerin sönüm oranlarının bulunduğu daha önceki çalışmaları içeren sönüm oranı-birim kayma deformasyonu grafiği Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Suya doymun killer için sönüm oranları [29]

MALZEME VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında katkısız ve %5, %10, %15 oranlarında katkı malzemesi eklenmiş uçucu kül-kil, silis dumanı-kil, kırmızı çamur-kil numuneleri elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde kıvam limitlerini belirlemek için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Daha sonra standart proktor enerji seviyesinde kompaksiyon deneyleri yapılarak optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen optimum su muhtevalarında kompakte edilmiş numuneler hazırlanmış bu numuneler üzerinde önce serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Daha sonra aynı şekilde numuneler hazırlanarak dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde kullanılan malzemelerin geoteknik özellikleri ve bunların belirlenmesi için yapılan deneyler bu bölümde anlatılmıştır.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Kil

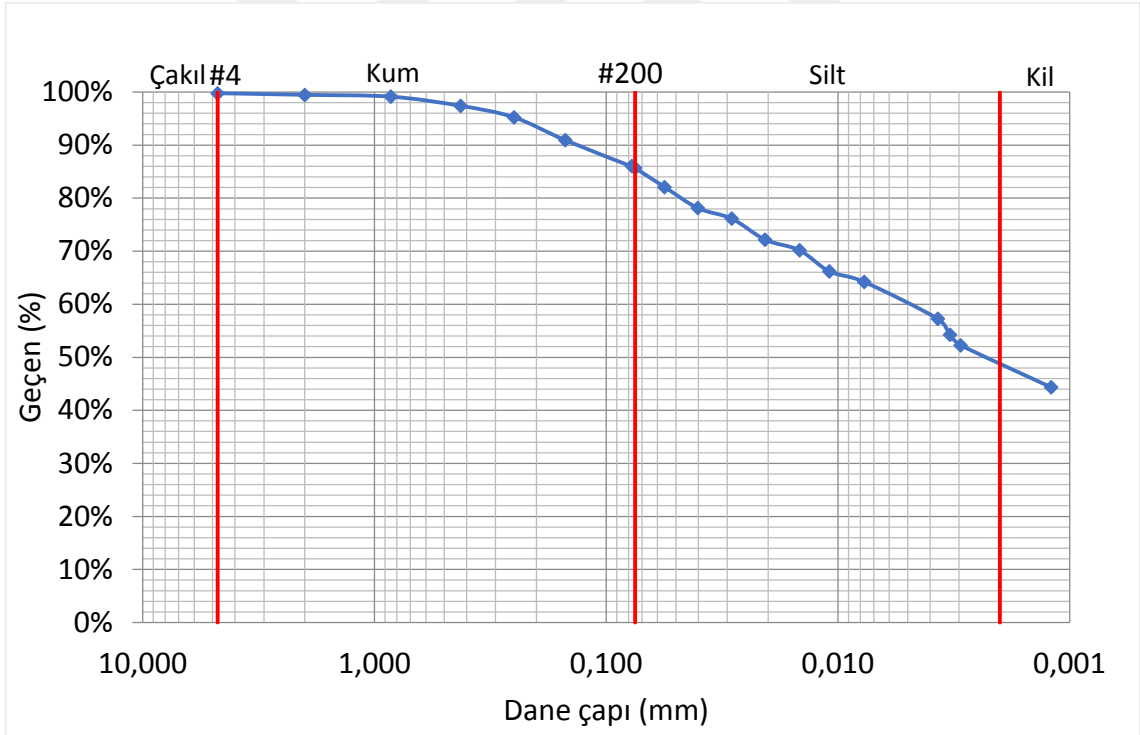
Çalışma kapsamında kullanılan kil Erzurum Oltu bölgesindeki bir kil depozit alanından temin edilmiştir. Malzeme doğal koşullarda kil taşı formunda olup kahverengimsi sarı bir renge sahiptir ve doğal su muhtevası %5 olarak bulunmuştur.

Zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için ilk olarak piknometre deneyi yapılmış, daha sonra elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.1 Kil numunesine ait görsel.

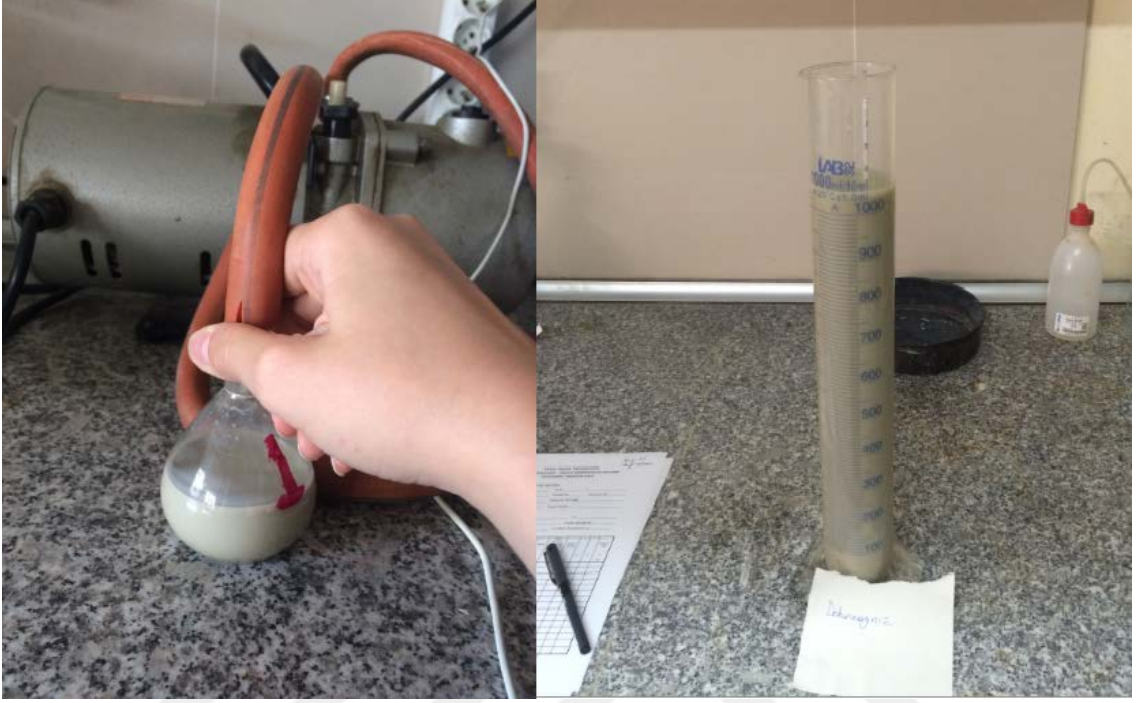
Zemin üzerinde yapılan hidrometre deneyi (Şekil 3.2) sonucu incelendiğinde %86 oranında ince daneli olduğu ve %48 kil içeriğine ve % 38 silt içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.2 Numunenin dane çapı dağılımı

Piknometre deneyinin sonucunda ise özgül ağırlık G_s 2.68 olarak bulunmuştur. Piknometre ve hidrometre deneylerine ait görseller Şekil 3.3'te verilmiştir. Hidrometre

deneyi ASTM D422, piknometre deneyi ise ASTM D854 standartları na uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3.3 Piknometre ve hidrometre deneylerine ait görseller.

3.1.2 Kırmızı Çamur

Çalışmada kullanılan kırmızı çamur Konya'da bulunan Etibank Seydişehir Alüminyum Tesisinden temin edilmiştir. Kırmızı çamur, boksitten alüminyum üretimi esnasında meydana gelen Bayer prosesi sonucunda yan ürün olarak ortaya çıkan, içerisindeki demir oksitler nedeniyle Şekil 3.4'te görüldüğü üzere kahverengimsi kırmızı renge sahip atık bir maddedir.



Şekil 3.4 Kırmızı çamur katkı malzemesinin görseli.

Boksitten alüminyum üretilmesi prosesinde boksitin yaklaşık %35-%40 oranında kırmızı çamur açığa çıkar. Kırmızı çamurun kimyasal bileşenlerinin gösterildiği Çizelge 3.1 incelendiğinde ana bileşenleri demir oksit, alimünyum oksit ve silika formudur.

Çizelge 3.1 Kırmızı çamurun kimyasal bileşenleri [37]

Bileşen	Kırmızı çamurdaki yüzdesi
Al_2O_3	20.20
Fe_2O_3	35.04
CaO	5.30
MgO	0.33
TiO_2	4.00
Na_2O	9.40
K_2O	0.39
SiO_2	13.50

3.1.3 Uçucu Kül

Çalışmada Kahramanmaraş'ta bulunan Afşin-Elbistan Termik Enerji Santrali'nden temin edilen ve Şekil 3.5'te görseli bulunan uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül taş ya da linyit kömürünün yanması sonucu ortaya çıkan atıklardan biridir.



Şekil 3.5 Çalışmada kullanılan uçucu kül katkı malzemesine ait görsel.

Afşin-Elbistan Termik Santrali'nde enerji üretimi için linyit kömürü kullanılmaktadır, linyit kömürünün ağırlıkça %20-%50'si kadar kül atık elde edilmektedir. Ortaya çıkan bu külün %75-%80'i baca gazları ile birlikte kazandan çıkar ve bu atıklar uçucu kül olarak adlandırılır. [38] Çizelge 3.2'de uçucu külün bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 Uçucu külün kimyasal bileşenleri [39]

Bileşenler	Uçucu küldeki yüzdesi
Al_2O_3	4.6-9.2
Fe_2O_3	2.5-3.3
CaO	53.8-54.4
MgO	1.5-1.7
SiO_2	9.3-18.3
SiO_3	11.2-24.3

3.1.4 Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanı Antalya'da bulunan Ferrokrom Fabrikası'ndan temin edilmiştir ve Şekil 3.6'da görseli verilmiştir. Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. [40]



Şekil 3.6 Ferrokrom Fabrikası'ndan temin edilen silis dumanı.

Silis dumanının kimyasal bileşenleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Silis dumanının kimyasal bileşenleri [41]

Bileşenler	Silis dumanındaki yüzdesi
Al_2O_3	1-3
Fe_2O_3	1-2
CaO	0.5-1
MgO	0.8-1.2
SiO_2	85-95

3.2 Yöntem

3.2.1 Katkılı Numunelerin Hazırlanması

Karışımlar hazırlanmadan önce kil numune ve katkı maddeleri 105°C sıcaklığındaki etüve deney yapılmasından bir önceki gün atılmış ve en az 24 saat etüvde kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra malzemeler etüvden çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır. Numune hazırlamak için kilin kuru ağırlığı tartılmış ve bu kuru ağırlığın %5, %10 ve %15'i oranlarında uçucu kül, kırmızı çamur ve silis dumanı kile eklenerek homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Çizelge 3.4'te çalışma kapsamında hazırlanan numuneler görülmektedir. Katkısız numuneler 'K', uçucu kül katkılı numuneler 'K-UK', kırmızı çamur katkılı numuneler 'K-KÇ', silis dumanı katkılı numuneler 'K-SD' olarak isimlendirilmiştir.

Çizelge 3.4 Deneylerde kullanılan numuneler.

Numune	Uçucu kül yüzdesi (%)	Numune	Kırmızı çamur yüzdesi (%)	Numune	Silis dumanı yüzdesi (%)
K	0	K	0	K	0
K-5UK	5	K-5KÇ	5	K-5SD	5
K-10UK	10	K-10KÇ	10	K-10SD	10
K-15UK	15	K-15KÇ	15	K-15SD	15

3.2.2 Kıvam Limitlerinin Tayini

Likit limit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesi için ASTM D4318'de belirtilen standartlar uygulanmıştır. Numunelerin likit limit değerleri Casagrende deneyi ile belirlenmiştir. 40 numaralı elekten elenmiş malzemeye su ilave edilerek yoğurulmuş ve casagrande kabına yerleştirilerek orta kısmında bir oluk açılmış ve manuel bir şekilde kol çevrilerek düşüşler sağlanmasıyla birlikte oluğun yaklaşık 1 cm kapandığı düşüş sayısı (N) not edilerek, bu kapanma yerinden alınan numune etüve atılmıştır. Bu işlem su miktarı artırılarak tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar su muhtevası-logN grafiği oluşturmak için kullanılmış ve 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası numunelerin likit limit değeri olarak kaydedilmiştir.

Plastik limit deneyinde de aynı şekilde su ilave edilerek yoğurulmuş numuneden bir miktar alınarak 3 mm çapında üzerinde çatlakların bulunduğu bir çubuk elde edilinceye kadar yuvarlanmıştır. Bu numuneler etüve atılarak su muhtevası hesaplanmış, bu değer plastik limit değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.7 Likit limit ve plastik limit deneylerine ait görseller.

Katkısız ve katkılı numuneler için likit limit ve plastik limit deneyleri tekrarlanarak bütün numunelerin kıvam limitleri belirlenmiştir. Şekil 3.7’de deneylere ait görseller verilmiştir.

3.2.3 Kompaksiyon Deneyi

Numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası değerlerinin bulunması ve daha sonraki deneylerde kullanılacak numunelerin hazırlanması amacıyla katkısız ve katkılı numuneler üzerinde ASTM D698 standardına uygun olarak standart proktor deneyleri yapılmıştır. Katkısız kil ve katkılı numune karışımları hazırlandıktan, belirli bir miktarda su eklenmiştir. Malzemelerin topaklanmasını önlemek amacıyla ıslatma işlemi sprej yardımıyla yapılmıştır. Daha sonra kompaksiyon kabı içerisine bir tabaka numune eklenerek 25 vuruş yapılmış, bu işlem 3 tabaka olacak şekilde tekrarlanarak numuneler sıkıştırılmıştır. Daha sonra numuneye su eklemek suretiyle farklı su muhtevaları için bu aşamalar tekrarlanmıştır. Bu aşamalardan elde edilen

verilerle kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği çizilerek, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri saptanmıştır. Deney katkısız ve katkılı numuneler için tekrarlanmıştır. Şekil 3.8’de kompaksiyon deneyinin yapılmasına dair aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Standart Proktor deneyine ait görsel.

3.2.4 Serbest Basınç Deneyi

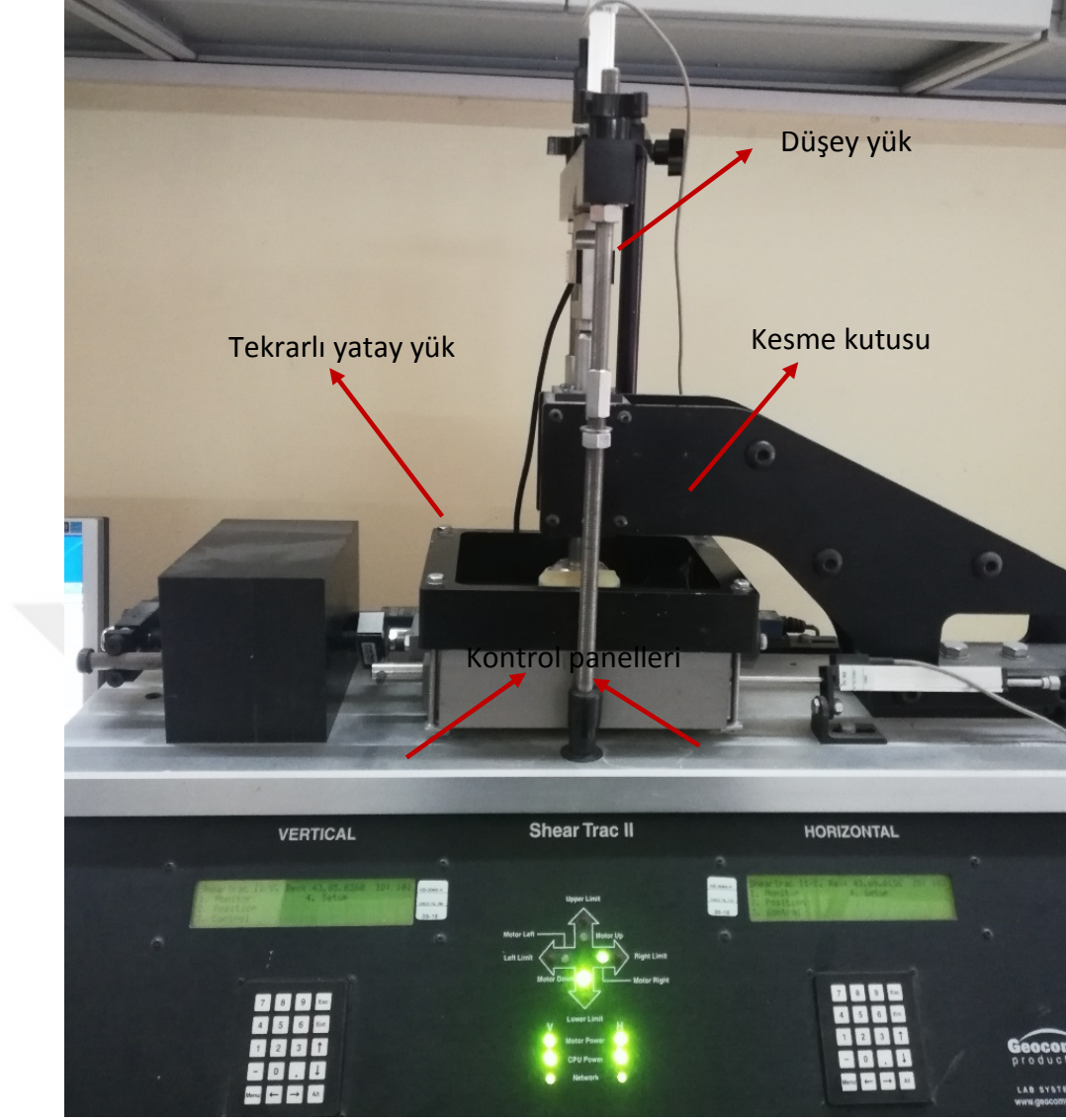
Serbest basınç deneylerinin yapılmasında ASTM D2166 yönetmeliği esas alınmıştır. Katkısız kil ve katkılı karışımlar optimum su muhtevasında kompakte edilmiş ve 37 mm çapındaki silindir borular yardımıyla silindirik numuneler alınmış ve bu numuneler boyu çapının en az iki katı olacak şekilde (en az 74 mm) tıraşlanmıştır. Bu numuneler serbest basınç deney aletine yerleştirilen numunelere düşey ekseninde yüklenerek deformasyon saatindeki her 10 birimde (0,1 mm) yük saati okuması yapılmış ve numunenin daha fazla yük alamadığı kırılma anına kadar okumalar devam ettirilmiştir. Serbest basınç deneyinin aşamalarına ait görsel Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Serbest basınç deneyinin aşamalarına ait görsel.

3.2.5 Dinamik Basit Kesme Deneyi

Çalışma kapsamında yapılan dinamik deneylerde Geocomp firmasına ait Shear Trac-II DSS isimli Şekil 3.10'da gösterilen deney aleti kullanılmıştır. Deneyler YTÜ Kutay Özyayın Laboratuvar'ında gerçekleştirilmiştir. Bu deney aletinde Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) tarafından numunenin yatay genişlemesini sınırlamak için geliştirilen metot kullanılmaktadır. Bu metotta dairesel biçimdeki numune çevresinde kauçuk bir membran bulunması suretiyle üst üste teflon ringler içerisinde kesilmektedir.



Şekil 3.10 Dinamik basit kesme deney aleti.

Drenajsız yükleme testleri bu ringler yardımıyla sabit hacim altında gerçekleştirilir. Sabit bir hacim testinde numune yüksekliği ve çapı sabittir ve numunenin üstü sabitlenmişken numunenin altı kesme yönünde sabit bir oranda hareket eder. Kuru bir numunedeki düşey gerilme değişikliğinin, suya doymun bir numune gerçek drenajsız koşullar altında test edildiğinde oluşan fazla boşluk suyu basıncına eşdeğer olduğu varsayılır [42].

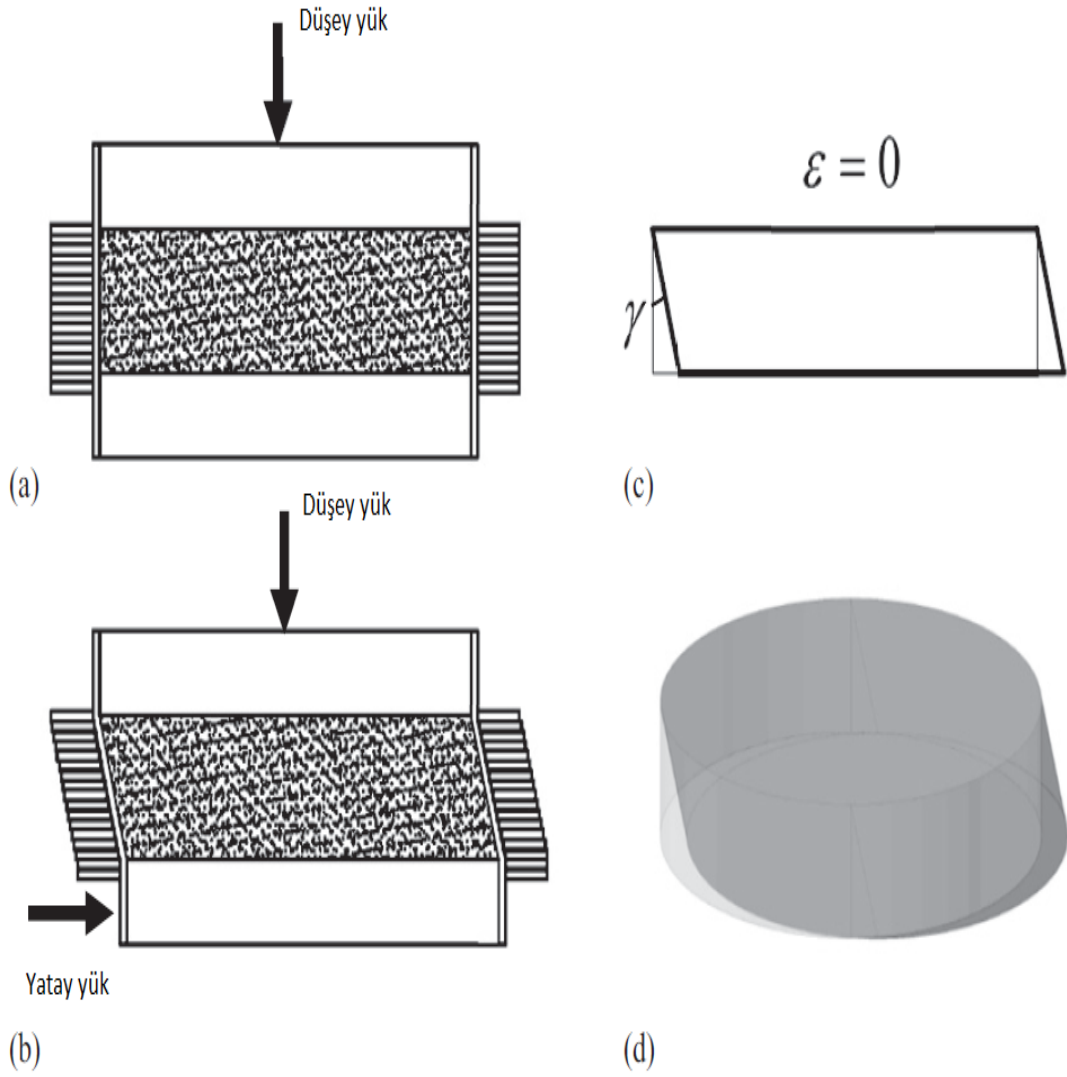
Bu durum ise eşitlik 3.1'de Dyvik vd. [43] tarafından ifade edilmiştir.

$$\Delta\sigma_v = -\Delta u$$

3.1

Gerilme kontrollü olarak deneylerin gerçekleştirildiği Shear Trac-II DSS deney aletinin teknik özellikleri Geocomp kullanıcı manuelinden [44] alınmıştır. Bu manuele göre deney

aleti 4.5 kN yükleme kapasitesine sahiptir. 0.00003mm/dk ile 15 mm/dk arasında hassas deplasman olanağına, 1 Hz'e kadar yükleme frekansına (f) sahiptir. Yapılan deneylerden elde edilebilen minimum deformasyon 10^{-3} olması nedeniyle deney aleti ile küçük deformasyon seviyelerine denk gelen dinamik kayma modülleri elde edilememektedir.



Şekil 3.11 Dinamik basit kesme deney aletindeki bir numunenin şematik gösterimi. a) konsolidasyon aşaması, b) drenajsız koşullar altında yatay yükleme, c) drenajsız koşullar altında şekil değiştirme, d) numunenin 3 boyutlu şekil değişimi gösterimi. [42]

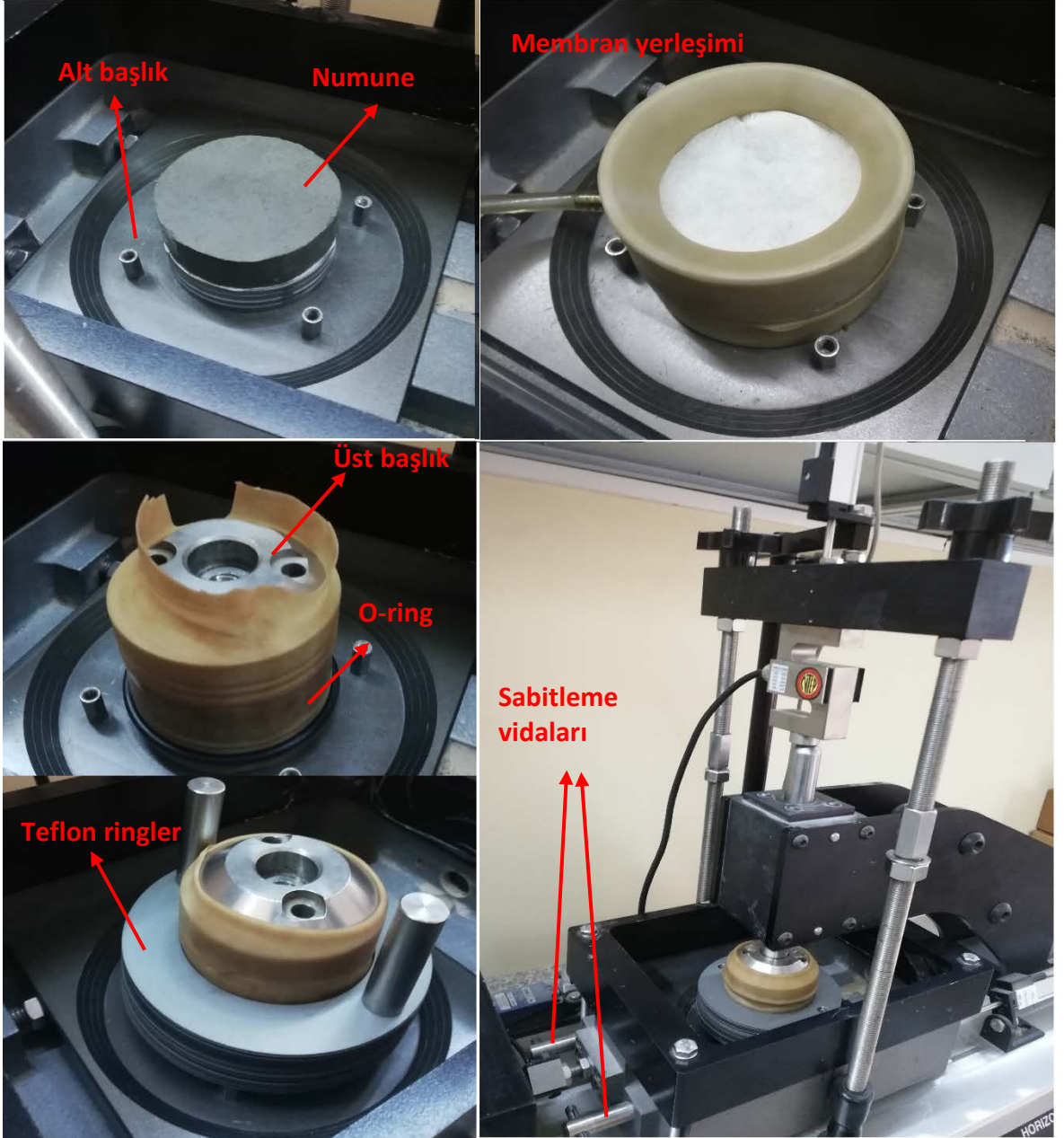
Li vd. [42] tarafından yapılan çalışmada deney sisteminin çalışma prensibi Şekil 3.11de gösterilmiştir. Şematik olarak bir numunenin düşey ve yatay yönde aldığı yükler ve hacim değişiminin olmadığı ve deney esnasında üst taraf sabit tutulduğu için numunenin alt tarafında meydana gelen deplasman bu şekilde gösterilmiştir.

Bu deney için numuneler öncelikle optimum su muhtevasında kompakte edilmiş daha sonra 65 mm çapında, 30 mm yüksekliğindeki daire şeklinde borular kompakte edilmiş numuneye batırılarak daire şeklindeki numuneler çıkarılmıştır. Daha sonra bu numuneler 63.5 mm çapında ve 20-25 mm yüksekliğine getirmek için tıraşlanmıştır.



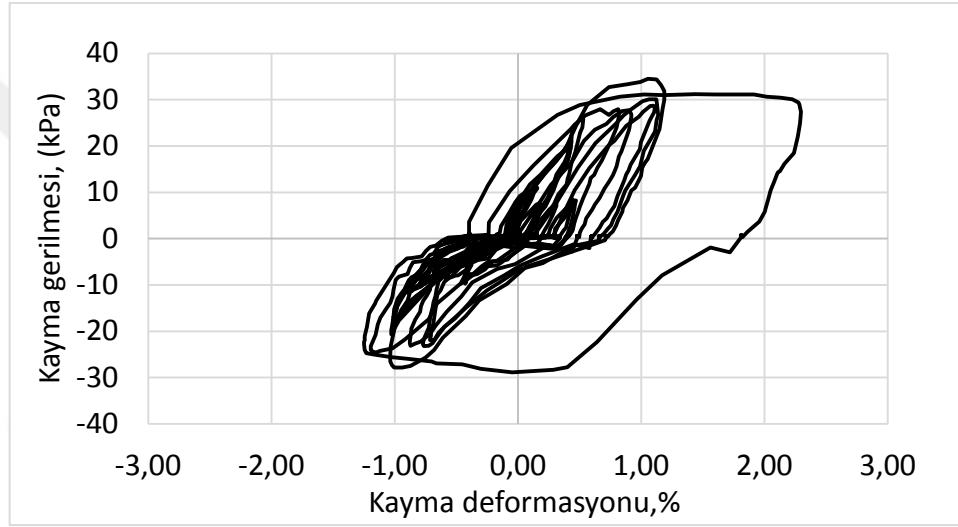
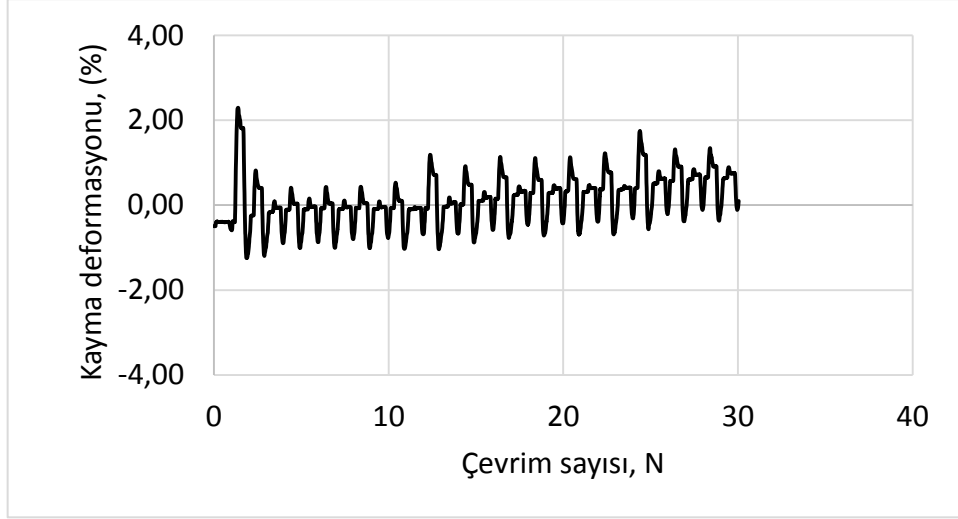
Şekil 3.12 Dinamik basit kesme için numune hazırlanması.

Numunelerin hazırlanmasından sonra deney sistemine numunenin yerleştirilmesi aşaması Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Deney sonuçlarının güvenilirliği açısından bu aşama önem teşkil etmektedir. Bu aşamada öncelikle tıraşlanarak deney için uygun boyutlara getirilen numune deney aletinin alt başlığına yerleştirilmiştir ve düşey yük başlığı üzerine konularak kesme kutusu konumu ayarlanarak numune ve yük başlığının uygun bir ekseninde olması sağlanmıştır. Daha sonra numunenin etrafına membran geçirilmesi için kullanılan bir alet yardımıyla membran numunenin etrafına yerleştirildikten ve o ring yardımıyla numune alt başlığa sabitlenir. Bir sonraki adımda teflon ringler membran geçirilmiş numunenin etrafına yerleştirilir ve üst başlık da numunenin üzerine yerleştirilir. Alt başlığın da deney düzeneğindeki vidalarla sabitlenmesi sağlandıktan sonra deney hazırlığı tamamlanmış olur.



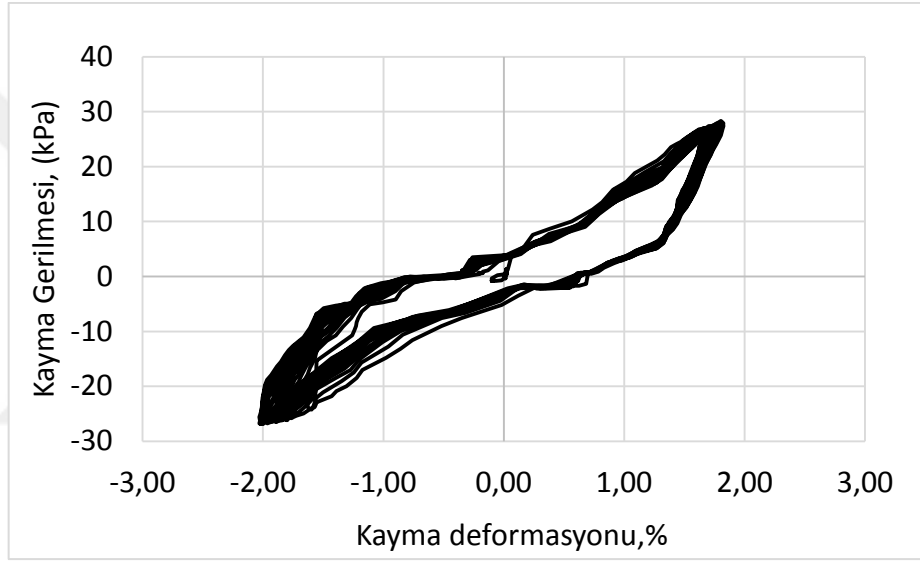
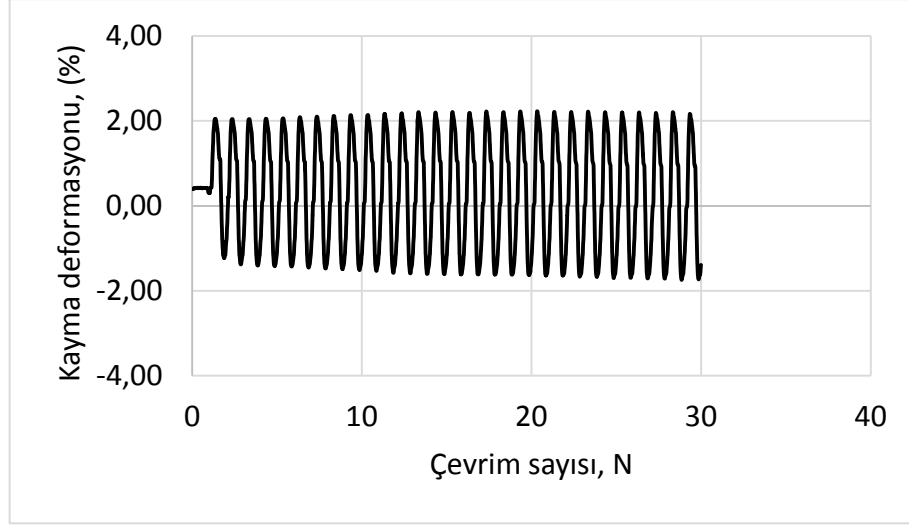
Şekil 3.13 Dinamik basit kesme deneyi için yapılan hazırlık.

Deneme amacıyla yapılan deneylerde karşılaşılan sorunlardan biri olan eksen kayması probleminin yaşanmaması için numunenin hazırlık aşamasındaki adımlar düzenli bir şekilde uygulanmalıdır. Eksen kayması durumunda Şekil 3.14'de gösterilen durum meydana gelmektedir.



Şekil 3.14 Numune hazırlık aşamasında yapılan yanlışlık nedeniyle meydana gelen eksen kayması

Bu durum dinamik kayma modülünün hesaplanması aşamasında kullanılacak olan kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu değerlerinin yanlış olmasına ve deney sonuçlarının hatalı olmasına neden olmaktadır. Bu durumun bir nedeni deney aletinin alt başlığının sabitlenmemesi iken diğer bir nedeni ise deney aletinin üst başlığının ve numunenin üzerine konulduğu alt başlığın dolayısıyla numunenin aynı orijinde olmamasından kaynaklıdır. Bu sorun aşıldıktan sonra elde edilen grafikler Şekil 3.15’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deformasyon ve kayma gerilmesinin daha tutarlı bir biçime geldiği görülmektedir. Eksendeki kayma problemi böylece çözülmüştür.



Şekil 3.15 Eksen kayması problemi çözüldükten sonra deney grafikleri.

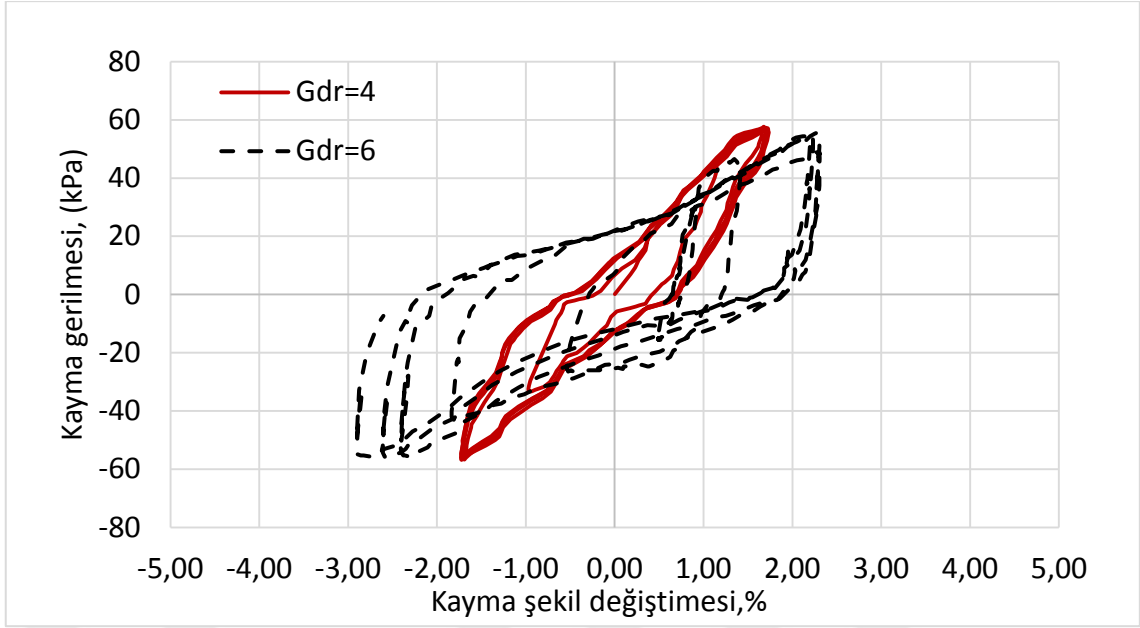
Deneye hazırlık aşamasının ardından bilgisayardaki 'shear.cyclic' isimli yazılım aracılığı ile deney için gerekli verilerin girilmesi işlemi yapılır. Sher.cyclic uygulamasını ilk açtığımızda karşımıza çıkan pencere Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil incelenirse Project sekmesi deneye ait bilgilerin girildiği kısımlardan oluşmaktadır. Specimen sekmesi deney yapılan numunenin boy, çap, ağırlık, LL, PL gibi özelliklerinin girildiği bir sekmedir. Water Content deney numunesinin deney öncesi ve sonrası su muhtevası verilerini girmemizi sağlar. Read Table sekmesinde deney okumalarının hangi parametreye göre kaydedileceği (zaman, yerdeğiştirme, hacim, deformasyon) belirlenir.

Şekil 3.16 Dinamik basit kesme programı shear.cyclic başlangıç penceresi.

Test Parameters kısmında deneyin hangi aşamadan (konsolidasyon, dinamik, kesme) başlayacağı seçilir. Ayrıca burada A parametresi olarak numunenin ve deneyin koşullarına göre belirlenen bir parametre mevcuttur. Bu parametrenin formülleştirilmiş hali denklem 3.2’de verilmiştir. Denkleme bakıldığında h numune yüksekliğini, Fc ve Km deney aletine ait kalibrasyon katsayılarını, An deney numunesi kesit alanını, f yükleme frekansını, Gdr ise numunenin rijitliğine göre 1-10 arasında değişen (malzeme çok katı ise 1, çok yumuşak ise 10) bir katsayıdır. Gdr katsayısının deney kitapçığında da belirtildiği üzere deneme yanılma yöntemi ile belirlenmesi esas alınmıştır.

$$A \text{ parametresi} = \frac{h * Fc * Gdr}{Km * An} * 2 * \pi * f \quad 3.2$$

Gdr katsayısının belirlenmesi için 200 kpa konsolidasyon yüklemesi altında yapılan deneme deneylerinden, çalışmada kullanılan numuneler için en uygun değer 4 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.13’de farklı Gdr değerleri ile değişen farklı A parametreleri ile katkısız numuneler üzerinde yapılan 200 kPa ve 0.3 CSR (tekrarlı kayma gerilmesi oranı) değerinde yapılmış deneylerin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Farklı Gdr değerlerine göre değişen deney sonuçları.

Shear.cyclic programı ekrandaki sekmelere devam edersek, Consolidation Table sekmesinde konsolidasyon aşamasına ait bilgiler (normal gerilme, konsolidasyon süresi) girilir. Cyclic Table sekmesinde dinamik deneyler için gerekli verilerin girildiği kısımdır.

	Stress Ratio Amplitude	Maximum Peak-Peak Strain (%)	Cycle Period (sec)	Maximum Number of Cycles	Number of Readings per Cycle
1	0.1	15.	1.	1000	100
2	0.	0.	0.	0	0
3	0.	0.	0.	0	0
4	0.	0.	0.	0	0
5	0.	0.	0.	0	0
6	0.	0.	0.	0	0
7	0.	0.	0.	0	0
8	0.	0.	0.	0	0
9	0.	0.	0.	0	0
10	0.	0.	0.	0	0

Şekil 3.18 Dinamik kesme deneyi cyclic table sekmesi.

Şekil 3.12’de gösterilen bu sekmede tekrarlı kayma gerilmesi oranı (stress ratio amplitude), maksimum pikten pike deformasyon, çevrim periyodu (frekansın seçimi için bu kısım kullanılır), maksimumu çevrim sayısı, çevrim başına istenilen okuma sayısı gibi yapılacak olan deneye ait bilgiler girilmektedir. Shear Table sekmesinde ise dinamik deney sonrasında kesme deneyi uygulanacaksa bu aşama için yükleme hızı, izin verilen maksimum deplesman, maksimum kuvvet gibi veriler girilebilmektedir.

Deneye ait bütün verilerin gerekli yerlere girilmesinden sonra program penceresinin üst kısmında bulunan ‘Run’ komutuna tıklanır ve deney başlatılır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde konsolidasyon ve dinamik aşamalar tamamlandıktan sonra deneyler sonlandırılmış, kesme aşaması yapılmamıştır. Deney verileri bilgisayara yüklü yazılım aracılığı ile anlık olarak kontrol edilebilmekte, üst bardan ‘File=>Dump=>Engineering’ yolu izlenerek excel dosyası olarak kaydedilerek hesaplamalar için kullanılabilir. Deney aleti üzerindeki bütün kontroller gerçekleştirildikten sonra çalışma için deney programı planlanmıştır. Çalışmadaki bütün deneyler için frekans 1 Hz, düşey efektif gerilme ise 200 kPa seçilmiştir. Değişen kayma deformasyonu değerlerinde dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının belirlenebilmesi için farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında (CSR) katkısız ve katkılı numuneler için deneyler yapılmıştır.

$$CSR = \frac{\tau}{\sigma_v'} \quad 3.3$$

Denlem 3.3’te τ kayma gerilmesini, σ_v' ise düşey efektif gerilmeyi temsil etmektedir. CSR değerleri değiştirilerek numunelere farklı kayma gerilmeleri uygulanmış ve bu kayma gerilmelerine karşılık gelen farklı deformasyonlardaki dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının bulunması amaçlanmıştır.

Çizelge 3.5 Dinamik basit kesme deney programı

Numune	σ_v' (kPa)	CSR	τ kPa)
K	200	0.09	18
	200	0.2	40
	200	0.4	80
	200	0.5	100
K-5UK	200	0.05	20
	200	0.3	60
	200	0.5	100
	200	0.8	160

Çizelge 3.5 Dinamik basit kesme deney programı (devamı)

Numune	σ'_v (kPa)	CSR	τ kPa)
K-10UK	200	0.03	6
	200	0.09	18
	200	0.3	60
	200	0.5	100
	200	0.55	110
K-15UK	200	0,05	10
	200	0.1	20
	200	0.2	40
	200	0.3	60
	200	0.5	100
	200	0.6	120
K-5KÇ	200	0.05	10
	200	0.2	40
	200	0.4	80
	200	0.5	100
	200	0.6	120
K-10KÇ	200	0.1	20
	200	0.2	40
	200	0.4	80
	200	0.5	100
	200	0.6	120
K-15KÇ	200	0.05	10
	200	0.1	20
	200	0.5	100
	200	0.6	120
	200	0.7	140
	200	0.8	160
	200	0.9	180
K-5SD	200	0.1	20
	200	0.3	60
	200	0.4	80
	200	0.5	100
	200	0.6	120
	200	0.8	160
	200	0.9	180
K-10SD	200	0.1	20
	200	0.2	40
	200	0.3	60
	200	0.4	80
	200	0.5	100
	200	0.6	120
	200	0.8	160
K-15SD	200	0.05	10
	200	0.07	14
	200	0.1	20
	200	0.2	40
	200	0.3	60
	200	0.4	80
	200	0.5	100

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde çalışma kapsamında katkı malzemelerinin ve bu malzemelerin farklı oranlarda kullanımının geoteknik özelliklere etkisini incelemek amacıyla yapılan deney sonuçlarına yer verilmiştir. Zemine katkı malzemelerinin karıştırılması ile kıvam limitlerinde, kompaksiyon parametrelerinde, serbest basınç dayanımında, dinamik parametreler olan sekant kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinde meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla likit limit, plastik limit, standart proktor, serbest basınç ve dinamik basit kesme deneyleri ile araştırılmıştır. Bu bölümde numelerin kompaksiyon eğrileri, likit limit ve plastik limitlerin katkı oranlarına göre değişim grafikleri, serbest basınç deneyine bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri, dinamik basit kesme deneyleri sonucu kayma deformasyonuna bağlı G_{sek} ve D değişimi eğrileri sunulmuştur.

4.1 Katkı Malzemelerinin Kıvam Limitlerine Etkisi

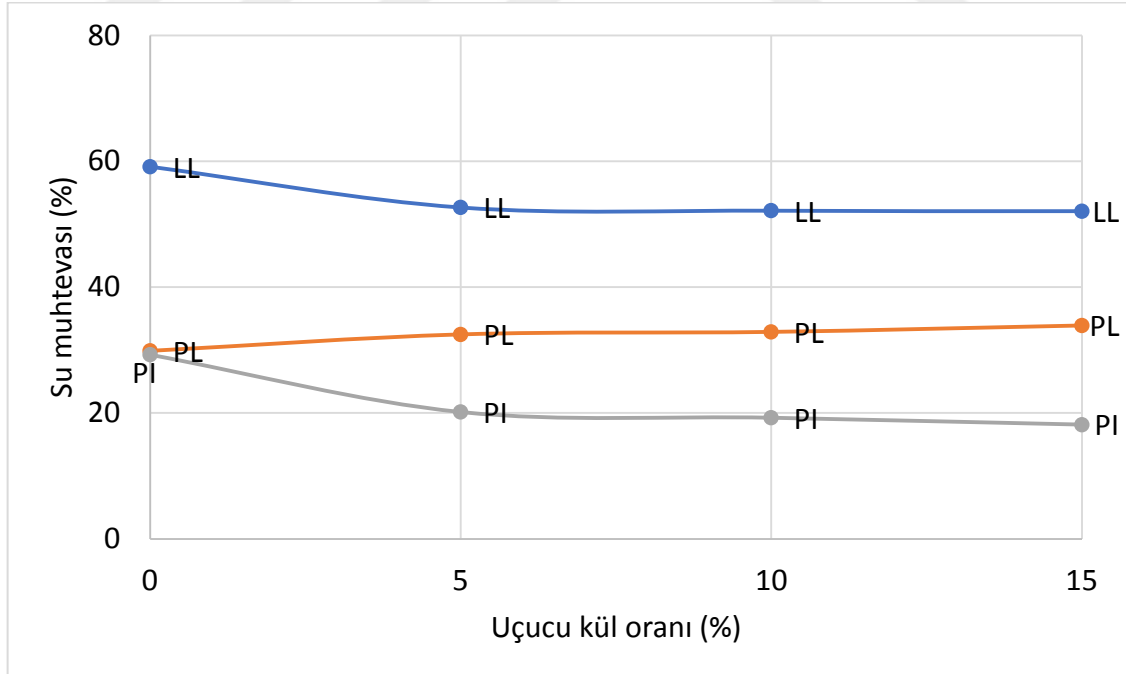
Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan likit limit ve plastik limit deneylerine ait sonuçlar bu başlık altında incelenmiştir. Her katkı numunesi kendi içinde değerlendirilmiş ve katkısız zeminin kıvam limitleri değerleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te katkısız kil ve %5, %10 ve %15 oranında katkı eklenmiş numuneler üzerinde yapılan likit limit ve plastik limit ve plastisite indisinin değişimini gösteren grafikler verilmiştir.

Çizelge 4.1'de ise katkısız ve katkılı numuneler ile yapılan kıvam limitleri deneylerinin sonuçları olan likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Katkısız ve katkılı numunelerin kıvam limit değerleri.

Numune	LL	PL	PI
K	59	30	29
K-5UK	53	32	21
K-10UK	52	33	19
K-15UK	52	34	18
K-5SD	52	34	18
K-10SD	51	34	17
K-15SD	51	35	16
K-5KÇ	56	31	25
K-10KÇ	51	34	17
K-15KÇ	50	36	14

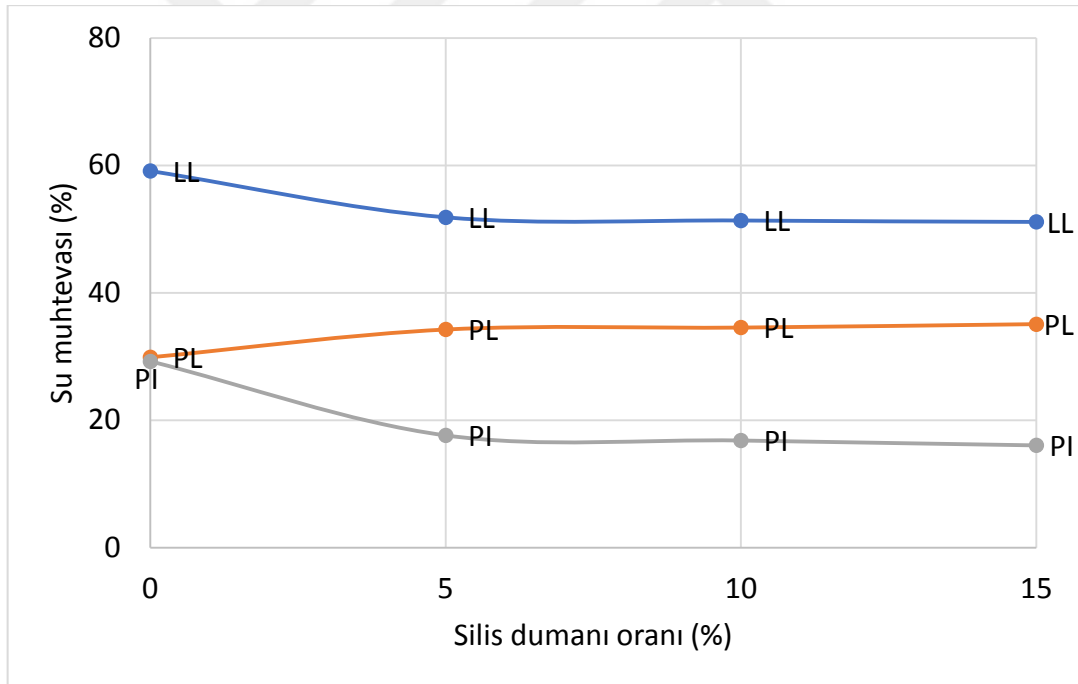
Çizelge 4.1 incelendiğinde görüleceği üzere %5 ve %10 uçucu kül katkısı ile birlikte likit limit değerleri azalmış, %15 uçucu kül katkı oranında ise %10 uçucu kül katkılı ile aynı değerde bulunmuştur. Plastik limit değerleri bir miktar artış göstermiştir. Bunlara bağlı olarak plastisite indisi değerleri ise katkısız kil ile kıyaslandığında azalmıştır. Şekil 4.1’de uçucu kül oranının kıvam limitlerine etkisi grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Uçucu kül oranının kıvam limitlerine etkisi.

Katkısız kilin likit limit değeri %59 iken %5, %10 ve %15 uçucu kül katkısı ile sırasıyla %10, %12 ve %12 oranında azalmıştır. Katkısız kilin plastik limit değeri %30 iken %5, %10 ve %15 uçucu kül katkısı ile sırasıyla %7, %10 ve %13 artış meydana gelmiştir. Katkısız kilin plastisite indisi değeri %29 iken %5, %10 ve %15 uçucu kül katkısı ile sırasıyla %28, %34 ve %38 oranında azalma olmuştur.

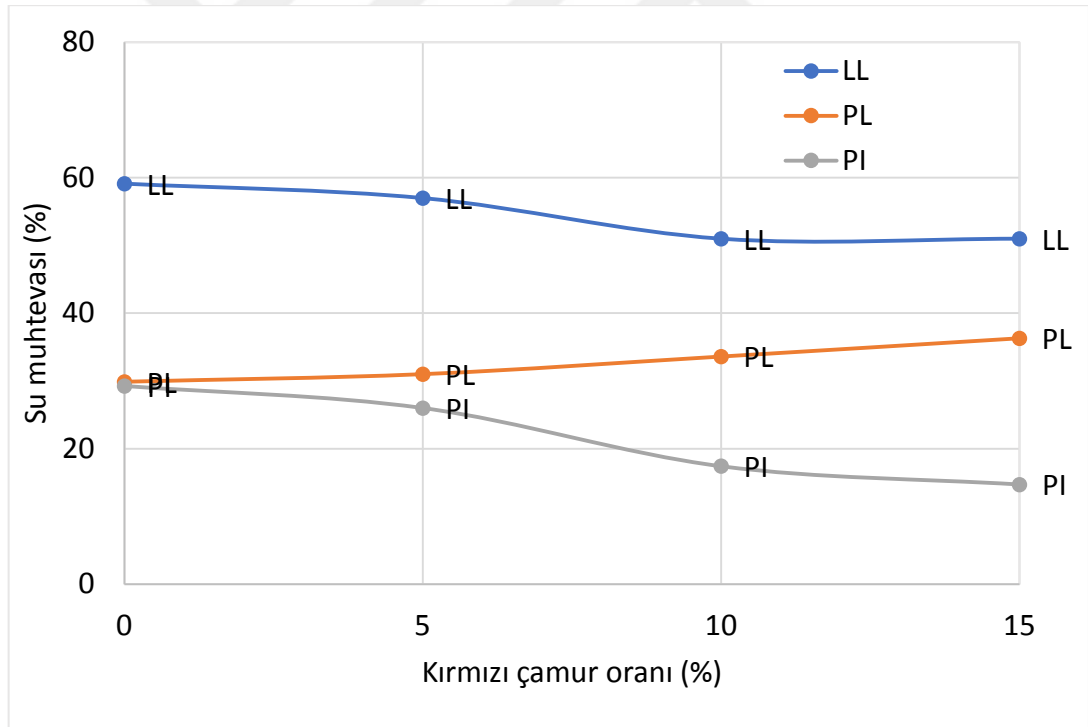
Çizelge 4.1 incelendiğinde görüleceği üzere %5 ve %10 silis dumanı katkısı ile plastik limit değerleri eşit miktarda katkısız kile oranla artmış, %15 silis dumanı oranında ise çok az bir artış olmuş, grafik neredeyse sabit devam etmiştir. %5 ve %10 silis dumanı katkısı ile birlikte likit limit değerleri azalmış, %15 silis dumanı katkılı numunede ise %10 silis dumanı katkılı numune ile aynı değerde bulunmuştur. Plastisite indisi değerleri ise %5 silis dumanı katkısı ile önemli miktarda azalmış, daha sonraki oranlarda ise ufak miktarda azalmalar devam etmiştir. Şekil 4.2'de silis dumanı katkı oranına bağlı olarak kıvam limitlerinin değişimi grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Silis dumanı oranının kıvam limitlerine etkisi.

Katkısız kilin likit limit değeri %59 bulunmuş ve %5, %10 ve %15 silis dumanı katkısı ile sırasıyla %12, %14 ve %14 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Katkısız kilin plastik limit değeri %30 iken %5, %10 ve %15 silis dumanı katkısı ile sırasıyla %13, %13 ve %17 oranlarında artış olmuştur. Katkısız kilin plastisite indisi değeri %29 iken %5, %10 ve %15 silis dumanı katkısı ile sırasıyla %38, %41 ve %45 oranlarında azalmıştır.

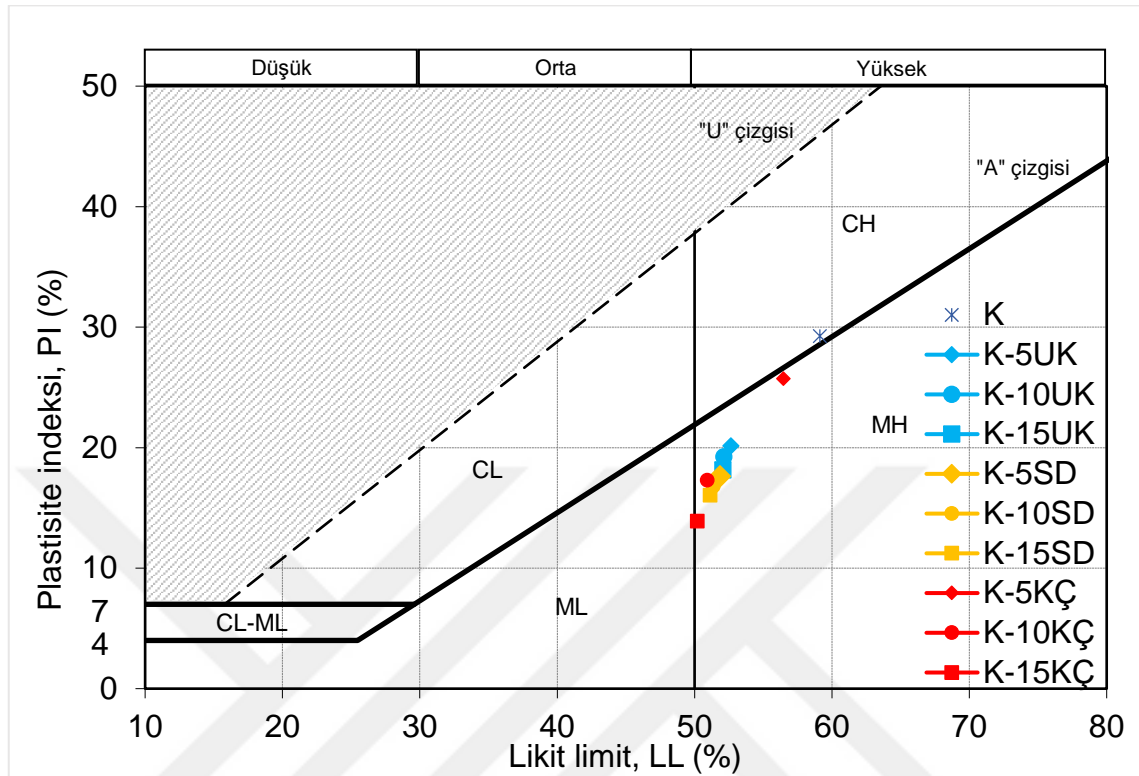
Şekil 4.3 incelendiğinde görüleceği üzere kırmızı çamur katkısı ile birlikte likit limit değerleri azalmıştır, plastik limit değerleri ise artış göstermiştir. LL ve PL değerlerindeki değişimlere bağlı olarak, katkı oranları arttıkça plastisite indisi değerleri olarak azalmıştır. %59 olarak bulunan katkısız kilin likit limit değeri %5, %10 ve %15 kırmızı çamur katkısı ile sırasıyla %5, %14 ve %15 oranlarında azalmıştır. Katkısız kilin plastik limit değeri %30 iken %5, %10 ve %15 kırmızı çamur katkısı ile sırasıyla %3, %13 ve %20 oranlarında artış meydana gelmiştir. Katkısız kilin plastisite indisi değeri %29 iken %5, %10 ve %15 kırmızı çamur katkısı ile sırasıyla %14, %41 ve %52 oranlarında azalma görülmüştür.



Şekil 4.3 Kırmızı çamur oranının kıvam limitlerine etkisi.

Şekil 4.4'te katkısız kil ve katkılı numunelerinin casagrande kartındaki gösterimleri verilmiştir. Bu gösterime bakıldığında katkısız kilin zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil olan

CH iken (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre) katkı malzemelerinin eklenmesi ile numunelerin zemin sınıfı MH olmuştur.

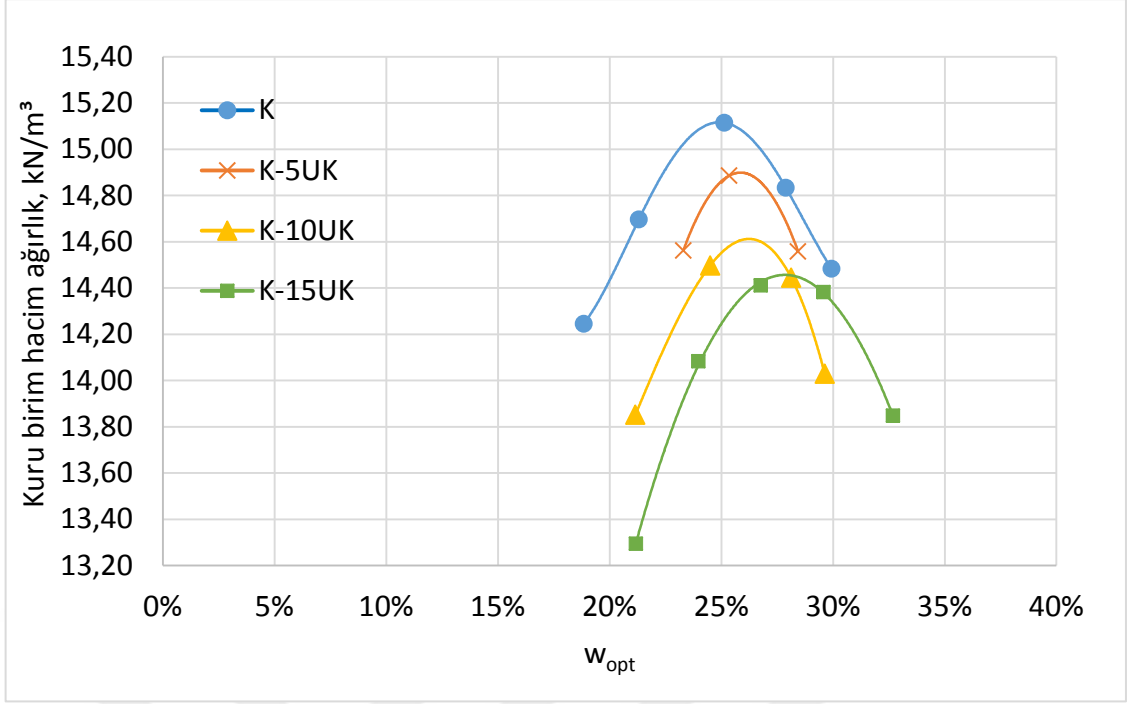


Şekil 4.4 Katkısız kil ve katkılı numunelerin plastisite kartında gösterimi

4.2 Katkı Malzemelerinin Kompaksiyon Parametrelerine Etkisi

Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan standart proktor deneylerine ait sonuçlar bu başlık altında incelenmiştir. Her katkı numunesi kendi içinde değerlendirilmiş ve katkısız zeminin kompaksiyon parametreleri ile kıyaslanmıştır.

Şekil 4.5'te katkısız kil ve %5, %10 ve %15 uçucu kül katkılı numuneler üzerinde yapılan standart proktor deneylerinin sonuçları verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde görüleceği üzere uçucu kül katkısı ile birlikte optimum su muhtevalarında artış gözlenirken, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar azalmıştır.



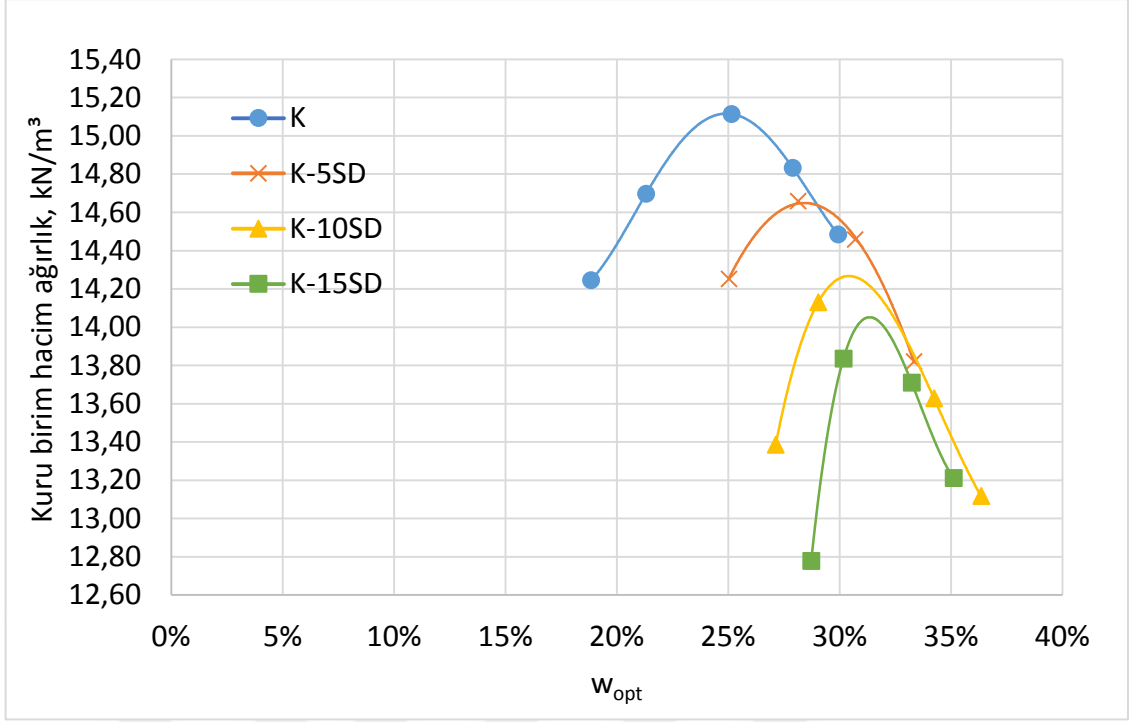
Şekil 4.5 Farklı oranlarda uçucu kül katkıli numunelerin kompaksiyon eğrileri.

Çizelge 4.2’de verildiği üzere katkısız kilin optimum su muhtevası değeri %24,8 iken uçucu kül katkısı ile %27,9 değerine kadar yükselmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri katkısız kil için 15,12 kN/m³ bulunmuşken uçucu kül katkısı sonucunda 14,46 kN/m³ değerine kadar düşmüştür.

Çizelge 4.2 Kompaksiyon parametrelerine uçucu kül katkısının etkisi.

Numune	W_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)
K	24,8	15,12
K-5UK	25,9	14,89
K-10UK	26,2	14,62
K-15UK	27,9	14,46

Şekil 4.6’da katkısız kil ve %5, %10 ve %15 silis dumanı katkıli numuneler üzerinde yapılan standart proktor deneylerinin sonuçları verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde görüleceği üzere silis dumanı katkısı ile birlikte optimum su muhtevalarında artış gözlenirken, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar azalmıştır.



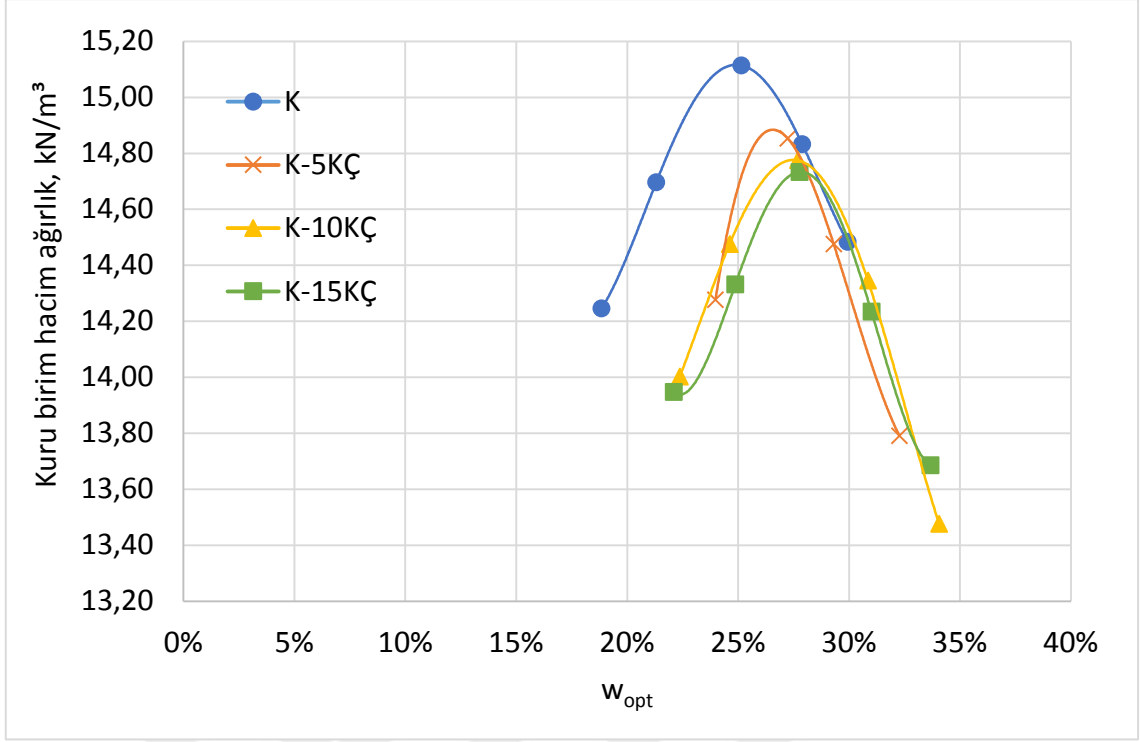
Şekil 4.6 Farklı oranlarda silis dumanı katkıli numunelerin kompaksiyon eğrileri.

Çizelge 4.3'te verildiği üzere katkısız kilin optimum su muhtevası değeri % 24,8 iken silis dumanı katkısı ile %31,6 değerine kadar yükselmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri katkısız kil için 15,12 kN/m³ bulunmuşken silis dumanı katkısı sonucunda 14,05 kN/m³ değerine kadar düşmüştür.

Çizelge 4.3 Kompaksiyon parametrelerine uçucu kül katkısının etkisi.

Numune	W_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)
K	24,8	15,12
K-5SD	28,4	14,67
K-10SD	30,4	14,27
K-15SD	31,6	14,05

Şekil 4.7'de katkısız kil ve %5, %10 ve %15 kırmızı çamur katkıli numuneler üzerinde yapılan standart proktor deneylerinin sonuçları verilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde görüleceği üzere kırmızı çamur katkısı ile birlikte optimum su muhtevalarında artış gözlenirken, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar azalmıştır.



Şekil 4.7 Farklı kırmızı oranlarda çamur katkıli numunelerin kompaksiyon eğrileri.

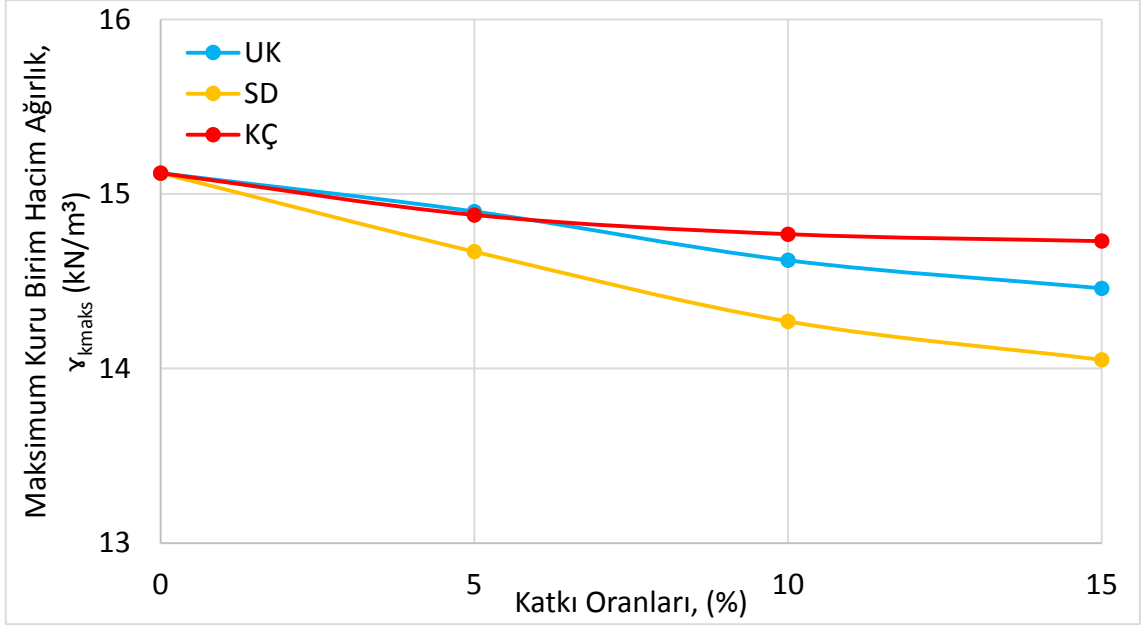
Çizelge 4.4'te verildiği üzere katkısız kilin optimum su muhtevası değeri % 24,8 iken kırmızı çamur katkısı ile %27,8 değerine kadar yükselmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri katkısız kil için 15,12 kN/m³ bulunmuşken kırmızı çamur katkısı sonucunda 14,73 kN/m³ değerine kadar düşmüştür.

Çizelge 4.4 Kompaksiyon parametrelerine kırmızı çamur katkısının etkisi.

Numune	W_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)
K	24,8	15,12
K-5KÇ	26,6	14,88
K-10KÇ	27,4	14,77
K-15KÇ	27,8	14,73

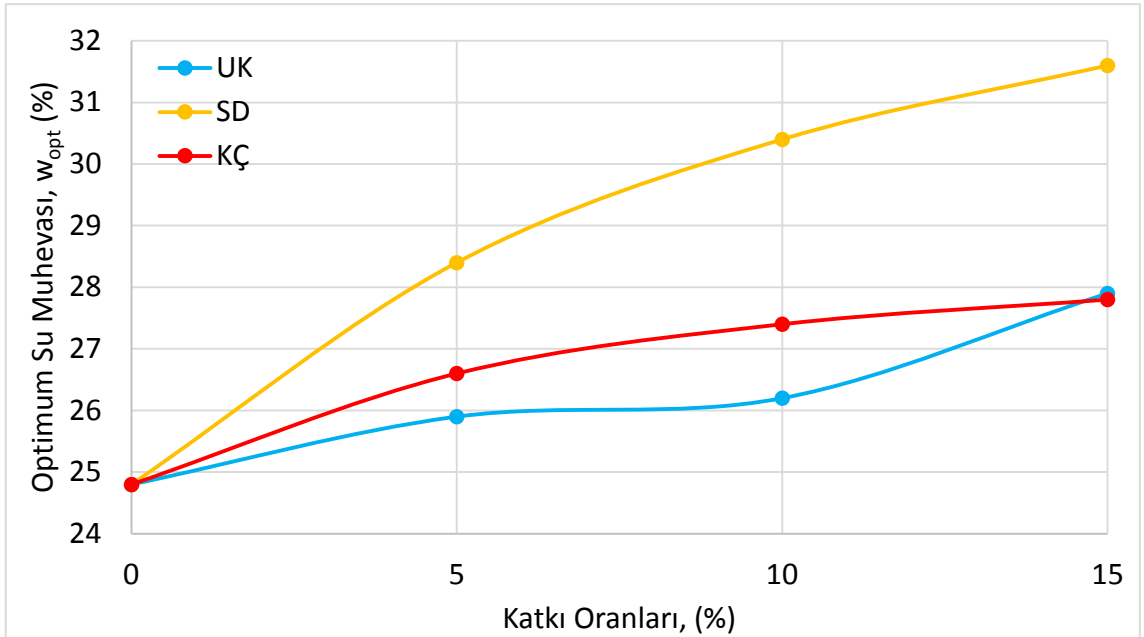
Katkı oranındaki değişime bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Uçucu kül katkı oranları %5, %10 ve %15 iken katkısız kil ile karşılaştırıldığında sırasıyla %2, %3 ve %4 oranlarında azalmıştır. %5, %10 ve %15 silis dumanı katkıli numunelerin γ_{kmax} değerleri katkısız kil ile kıyaslandığında sırasıyla %3, %6 ve %7 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Katkısız kile kırmızı çamur katkısı ile

γ_{kmax} değerindeki değişimler incelendiğinde ise katkı oranları %5, %10 ve %15 için sırasıyla %2, %2 ve %3 oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Maksimum kuru birim ağırlık değerinde en yüksek oranda azalma silis dumanında meydana gelmiştir.



Şekil 4.8 Katkı yüzdesine bağlı maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi.

Şekil 4.9'da katkı yüzdelerindeki değişime bağlı olarak w_{opt} değerlerindeki değişim görülmektedir.



Şekil 4.9 Katkı yüzdesine bağlı optimum su muhtevası değişimi.

Katkısız kil ile %5, %10 ve %15 uçucu kül katkıli numunelerin optimum su muhtevası değerleri kıyaslandığında sırasıyla %4, %6 ve %13 oranında artış görülmektedir. Aynı karşılaştırma silis dumanı katkıli numuneler için yapıldığında %5, %10 ve %15 oranlarında silis katkısının w_{opt} değerinde sırasıyla %15, %23 ve %27 oranlarında artışa neden olduğu görülmüştür. Kırmızı çamur için katkısız kil ile kıyaslama yapıldığında ise katkı oranı %5, %10 ve %15 iken optimum su muhtevalarında sırasıyla %7, %10 ve %12 oranlarında artış olmuştur. Optimum su muhtevasındaki artışın en yüksek olduğu katkı silis dumanıdır.

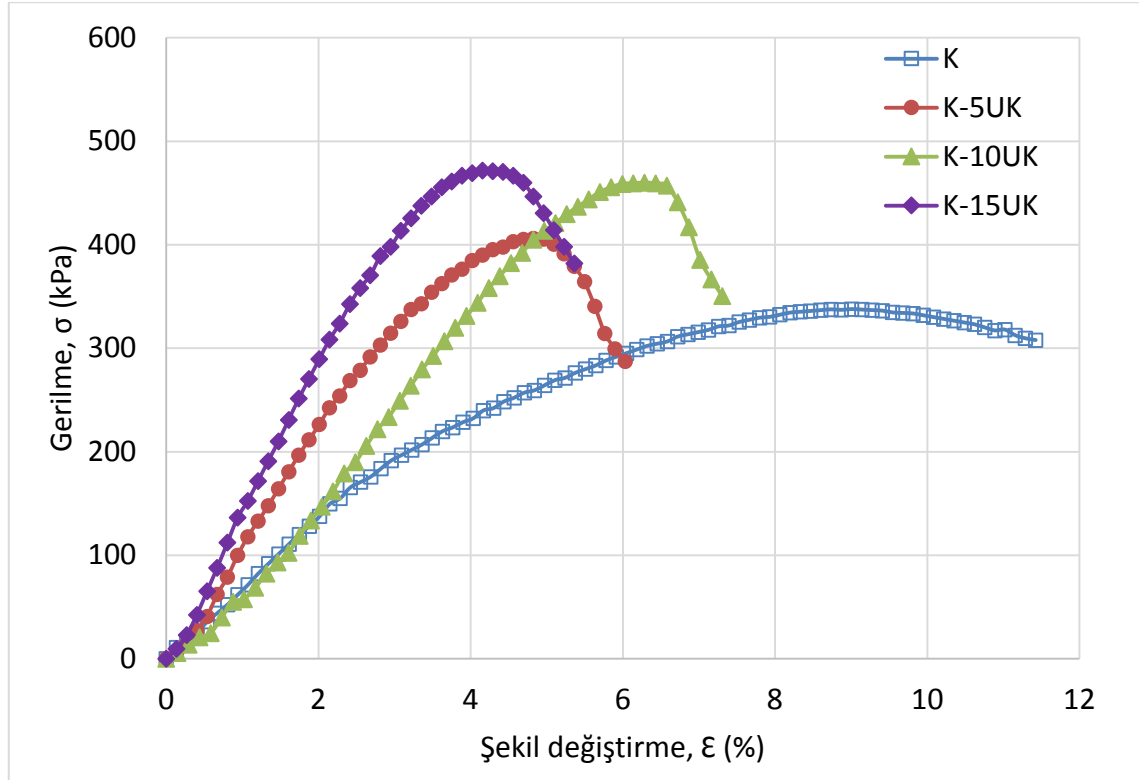
4.3 Katkı Malzemelerinin Serbest Basınç Dayanımlarına Etkisi

Katkısız ve katkıli numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerine ait sonuçlar bu başlık altında incelenmiştir. Her katkı numunesi kendi içinde değerlendirilmiş ve katkısız kilin serbest basınç deneyi sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.5 Katkısız kil ve katkıli kil numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinin sonuçları.

Numune	Serbest basınç dayanımı (kPa)	Konsolidasyonsuz-Drenajsız Kohezyoncu, kPa	Kayma Mukavemeti τ , kPa	İyileşme Oranı (%)
K	337.90	168.95	168.95	-
K-5UK	406.24	203.12	203.12	20
K-10UK	460.10	230.05	230.05	36
K-15UK	471.88	235.94	235.94	40
K-5SD	432.47	216.24	216.24	28
K-10SD	492.56	246.28	246.28	46
K-15SD	406.73	203.37	203.37	20
K-5KÇ	495.91	252.96	252.96	50
K-10KÇ	531.89	260.95	260.95	54
K-15KÇ	552.42	276.21	276.21	63

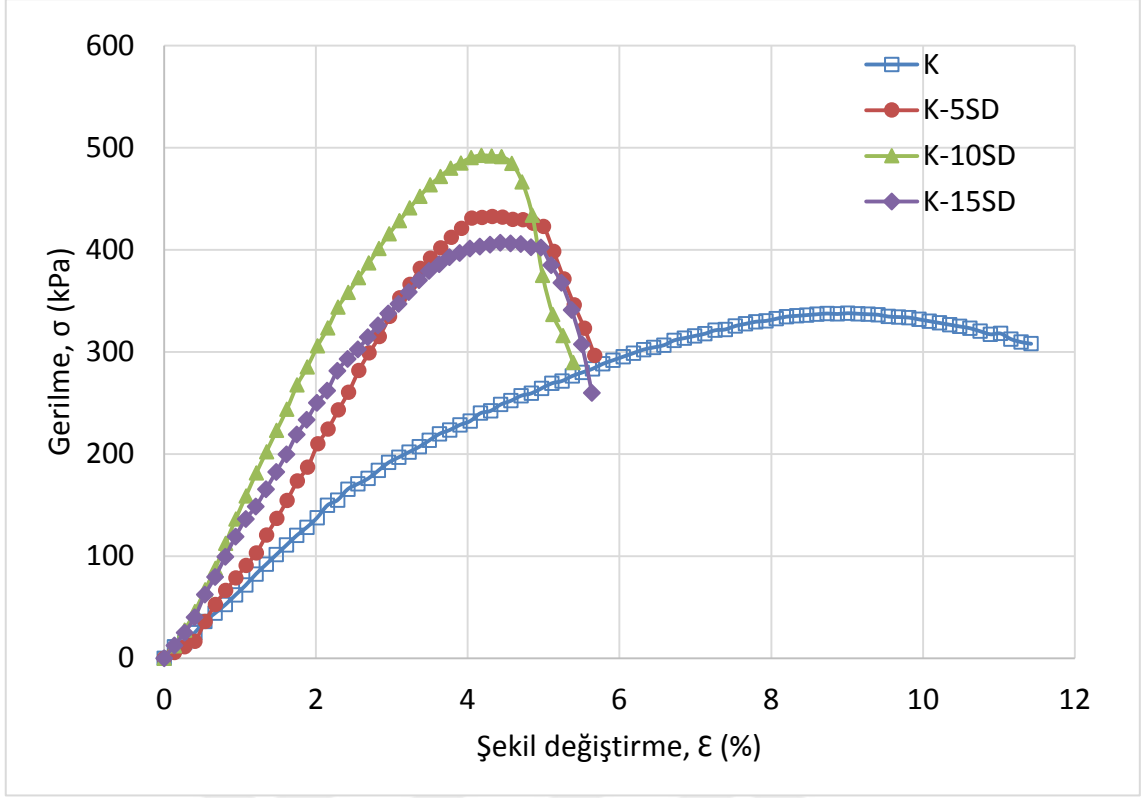
Şekil 4.10'da katkısız kil ve uçucu kül katkıli numunelerin serbest basınç deneyleri sonuçlarına bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.5'te verilen deney verileri incelendiğinde katkısız kilin serbest basınç mukavemetinde uçucu kül katkı oranları %5, %10 ve %15 olduğunda sırasıyla %20, %36 ve %40 iyileşme meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.10 Katkısız kil ve uçucu kül katkıli numunelerin serbest basınç deney grafikleri.

Uçucu kül katkısı ile zeminin davranışında meydana gelen değişim Şekil 4.10'da görülmektedir. Katkısız kil oldukça sünek bir davranış gösterirken uçucu kül eklenmesi ile numuneler gevrek bir hal almıştır.

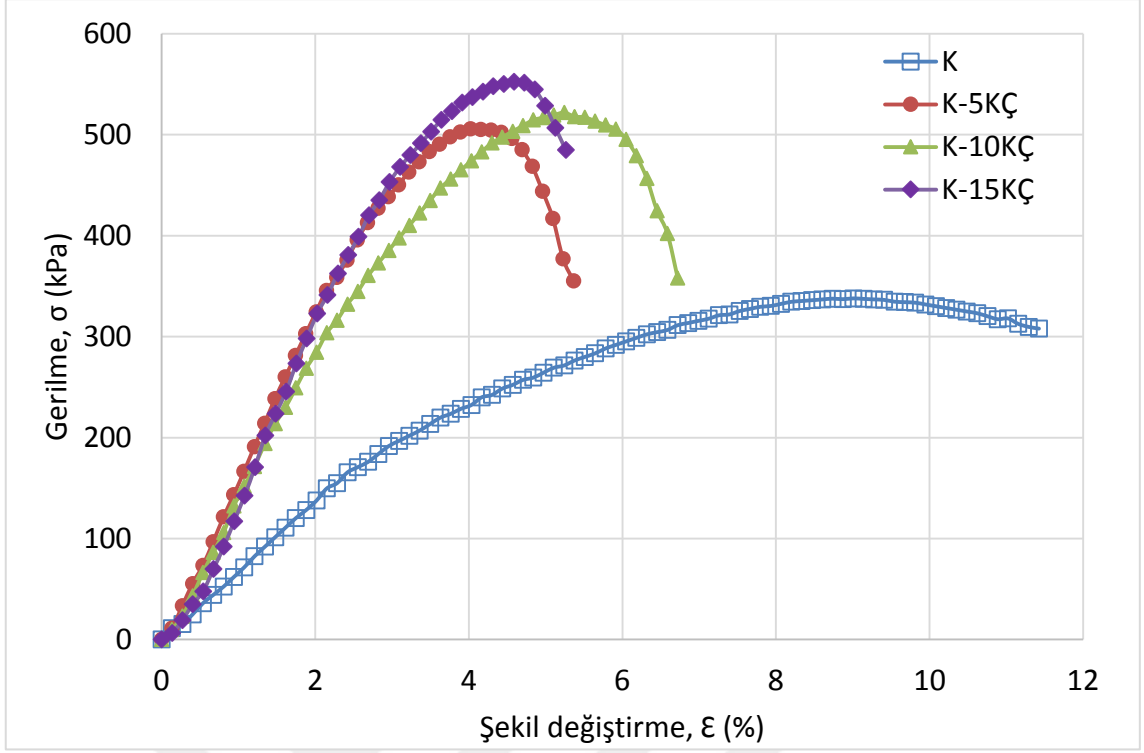
Şekil 4.11'de katkısız kil ve silis dumanı katkıli numunelerin serbest basınç deneyleri sonuçlarına bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.5'te verilen deney sonuçları incelendiğinde görüleceği üzere katkısız kilin serbest basınç mukavemetinde silis dumanı katkı oranları %5, %10 ve %15 olduğunda sırasıyla %28, %46 ve %20 artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.11 Katkısız kil ve silis dumanı katkılı numunelerin serbest basınç deney grafikleri.

Şekil 4.11 incelendiğinde görüldüğü üzere uçucu kül katkısı ile benzer bir şekilde sünek bir davranış gösteren katkısız kil, silis dumanı eklenmesi ile gevrek bir hal almıştır. Silis dumanı zeminin davranışının değişmesine neden olmuştur.

Şekil 4.12'de katkısız kil ve kırmızı çamur katkılı numunelerin serbest basınç deneyleri sonuçlarına bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.5'te verilen deney verileri incelendiğinde katkısız kilin serbest basınç mukavemetinde kırmızı çamur katkı oranları %5, %10 ve %15 olduğunda sırasıyla %50, %54 ve %63 artış meydana geldiği görülmektedir.

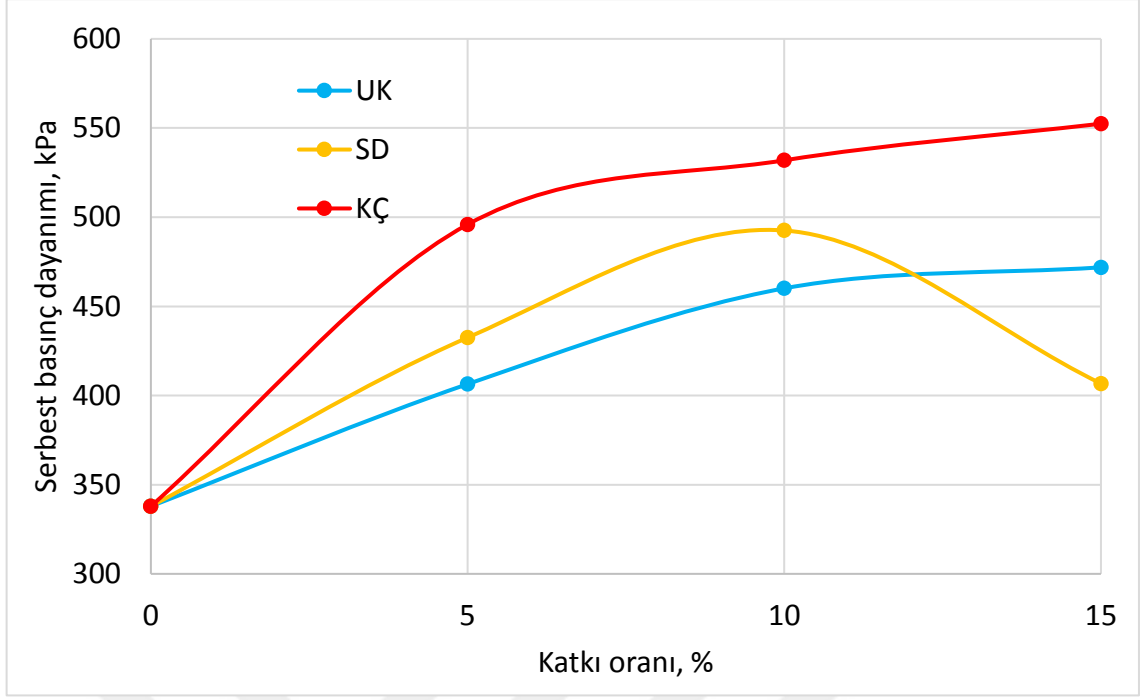


Şekil 4.12 Katkısız kil ve kırmızı çamur katkı numunelerinin serbest basınç deney grafikleri.

Diğer katkı malzemeleri ile zeminin davranışında meydana gelen değişim kırmızı çamur katkısının eklenmesi ile de oluşmuş, Şekil 4.12 incelendiğinde görüldüğü üzere sünek bir davranış gösteren katkısız kil, kırmızı çamur katkısı ile gevrek bir hal almıştır.

Şekil 4.13'te katkısız kil ve %5, %10 ve %15 katkı oranlarında uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur katkı numunelere ait serbest basınç deneylerinin sonuçları tek bir grafikte toplanarak farklı katkı malzemelerinin katkı oranına bağlı serbest basınç dayanımına etkisi gösterilmiştir.

Tüm serbest basınç deney sonuçları karşılaştırıldığında şekil 4.13'te de görüleceği üzere serbest basınç dayanımındaki en yüksek artış K-15KÇ numunesinde, %63 oranıyla elde edilmiştir. Uçucu kül ve kırmızı çamur katkı numunelerde katkı oranı arttıkça serbest basınç dayanımı artarken, silis dumanı katkı numunelerde %10 katkı oranına kadar serbest basınç dayanımı artmış, %15 silis dumanı katkı numunede %5 ve %10 silis katkı numunelere oranla bir azalma meydana gelmiştir.



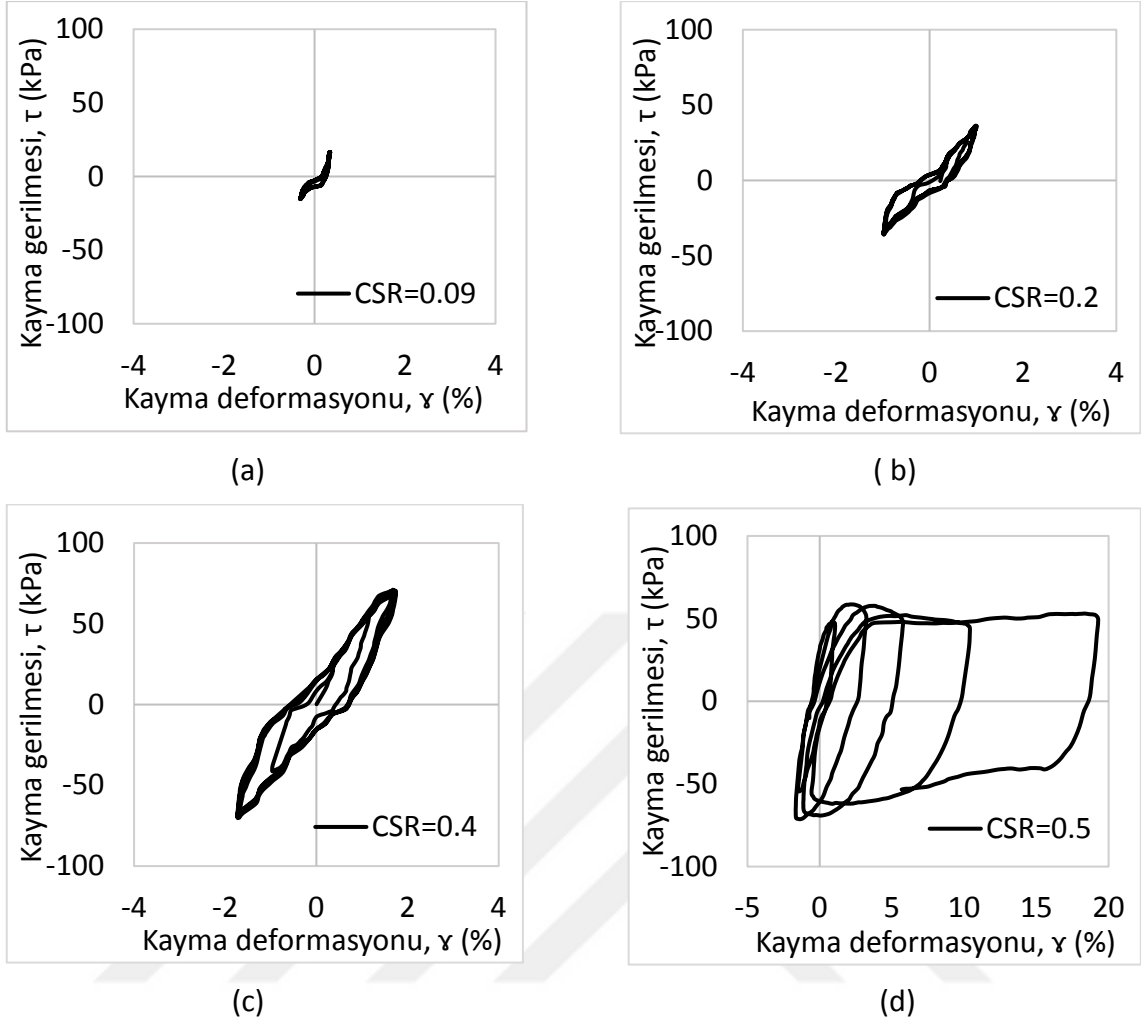
Şekil 4.13 Katkı yüzdesinin serbest basınç dayanımına etkisi.

4.4 Deney Numunelerinin Dinamik Basit Kesme Deneylerine Bağlı Olarak Histeritik Grafikleri

Bu başlık altında katkı malzemelerinin zeminlerin dinamik parametrelerine etkisini araştırmak amacıyla katkısız kil ve katkılı numuneler üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneylerine ait veriler kullanılarak çizilen, numunelerin histeritik ilmeklerini gösteren grafiklere yer verilmiştir. Farklı deformasyon seviyelerindeki bu histeristik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak numunelerin kayma modülü ve sönüm oranı değerleri hesaplanmakta, böylece numunelerin deformasyon değişimine bağlı kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrileri çizilmektedir.

4.4.1 Katkısız Kil Numunesinin Histeritik Grafikleri

Katkısız kil numunesinin dinamik davranışının belirlenebilmesi için deney programında belirtildiği üzere farklı kayma gerilmesi oranlarında dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı deformasyon seviyelerinde kayma modülü ve sönüm oranlarında meydana gelen değişimlerin görülebilmesi için farklı CSR (tekrarlı kayma gerilmesi oranı) değerlerinde yapılan deneylere ait histeritik ilmekleri gösteren kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkisi Şekil 4.14'te verilmiştir.

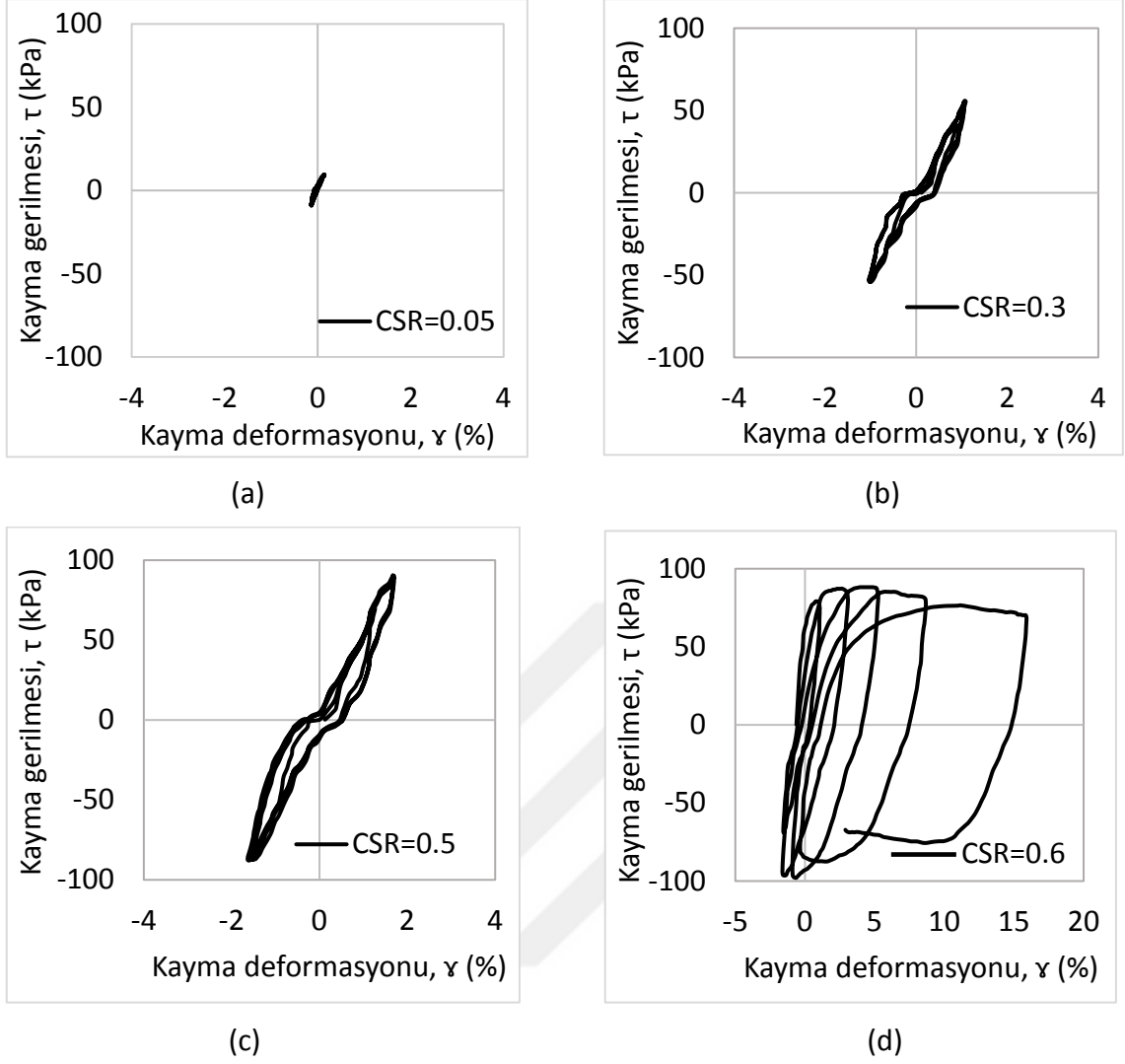


Şekil 4.14 Katkısız kil için farklı CSR değerlerindeki a)0.09 b)0.2 c)0.4 d)0.5 histeritik ilmekleri.

Yapılan deneyler sonucunda CSR değerlerinin artması ile birlikte numunelerde meydana gelen deformasyonlar artmış ve numunelerin dinamik kayma modülü değerleri azalmıştır. Başka bir şekilde ifade edilecek olursa malzemenin rijitliği azalmıştır. Elde edilen bu sonuçlar Kurt, Z. N., ve Akbulut, S. [46] çalışmasıyla ve literatür özetinde yer verilen Subramaniam ve Banerjee [3], Fahoum vd. [5], Kalıpçılar vd. [11] gibi çalışmaların deney sonuçları ile uyumludur.

4.4.2 %5 Uçucu Kül Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri

Şekil 4.15'te %5 uçucu kül katkıli numunelerin kayma modülü ile sönüm oranı değerlerini hesaplamak için kullanılan histeritik ilmekleri gösteren kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkisi verilmiştir.

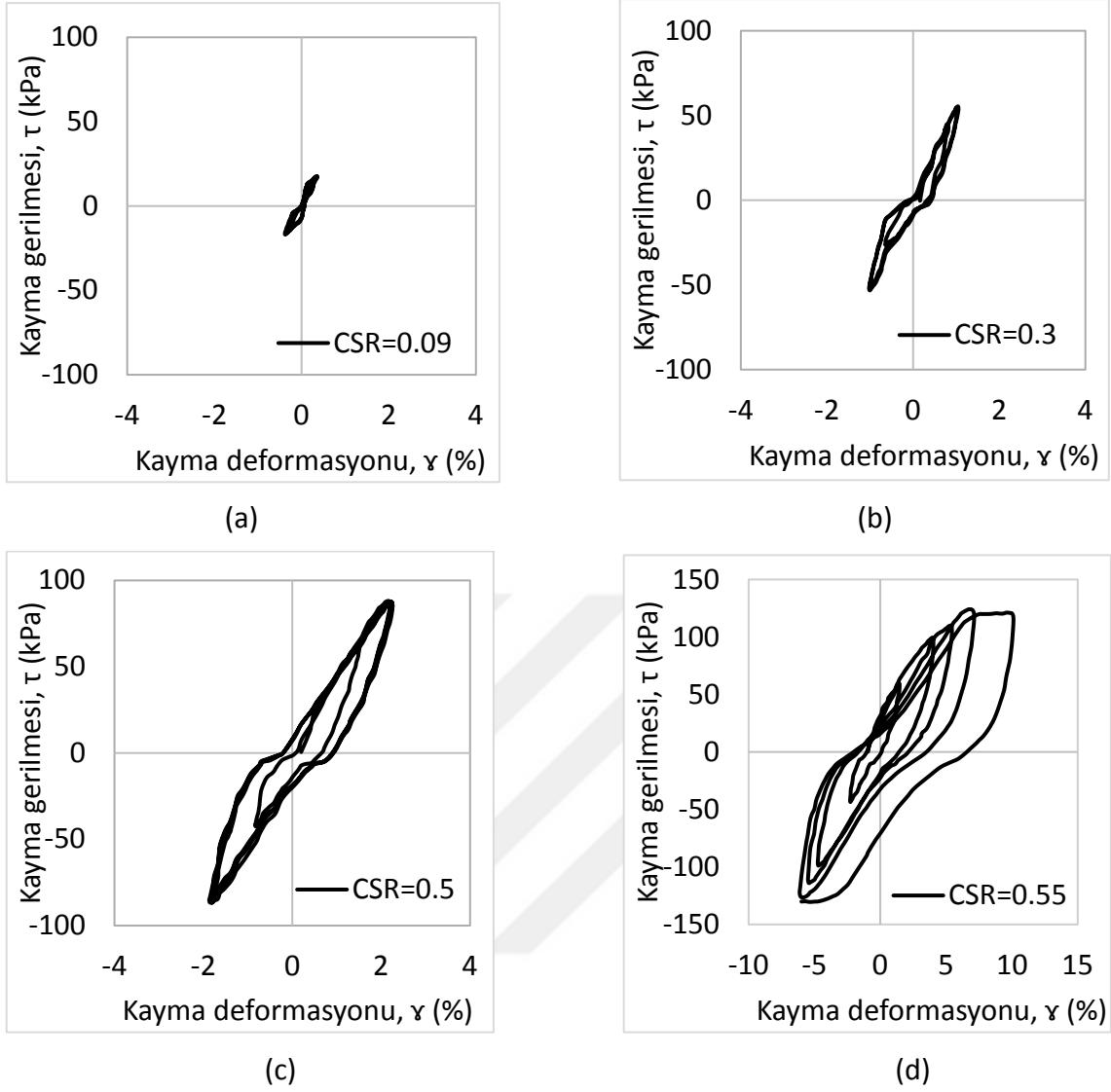


Şekil 4.15 %5 uçucu kül katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.05 b)0.3 c)0.5 d)0.6 histeritik ilmekleri.

%5 uçucu kül katkıli numunelerin deneyler için oluşturulan kayma deformasyonu-kayma gerilmesi grafikleri incelendiğinde görüldüğü üzere CSR değerlerinin artması ile deformasyonları artmış ve rijitlik azalmıştır.

4.4.3 %10 Uçucu Kül Katkıli Numunelerin Histeritik Grafikleri

%10 uçucu kül katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü ve sönüm oranı değişimi eğrilerini elde etmek amacıyla farklı CSR değerlerindeki dinamik basit kesme deney sonuçlarına göre kayma gerilmesi - kayma deformasyonu grafikleri Şekil 4.16'da verilmiştir.

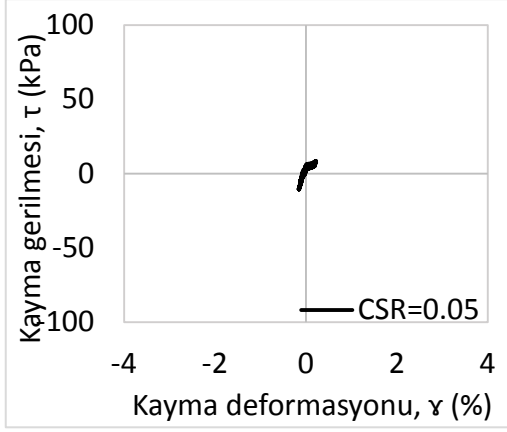


Şekil 4.16 %10 uçucu kül katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.09 b)0.3 c)0.5 d)0.55 histeritik ilmekleri.

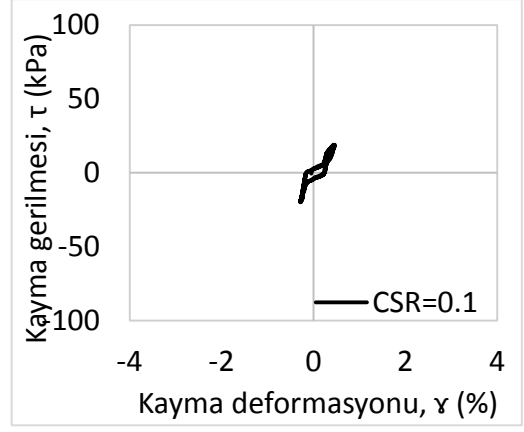
CSR değerlerindeki artış numunelerin deformasyonlarının artmasına neden olmuştur. Tekrarlı yüklemelere tabii tutulmuş %10 uçucu kül katkıli numunelerin dinamik kayma modülü değerleri deformasyon arttıkça azalmıştır.

4.4.4 %15 Uçucu Kül Katkıli Numunelerin Histeritik Grafikleri

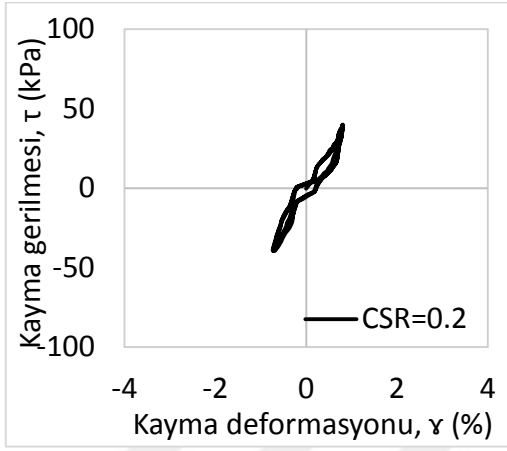
Değişen tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında, %15 uçucu kül katkıli numuneler üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneylerine ait sonuçlar Şekil 4.17'de gösterilen gerilme şekil değiştirme grafikleri ile verilmiştir.



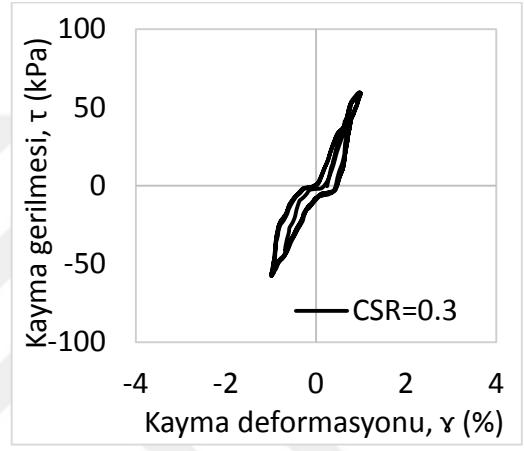
(a)



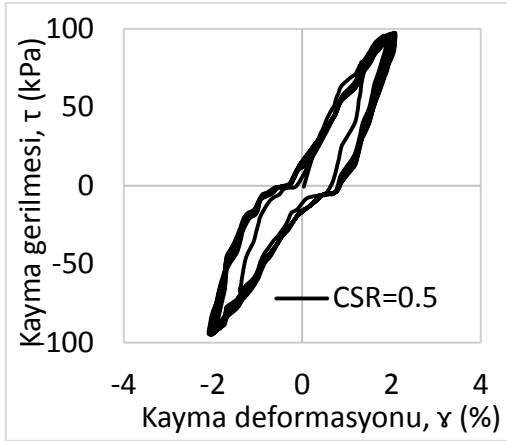
(b)



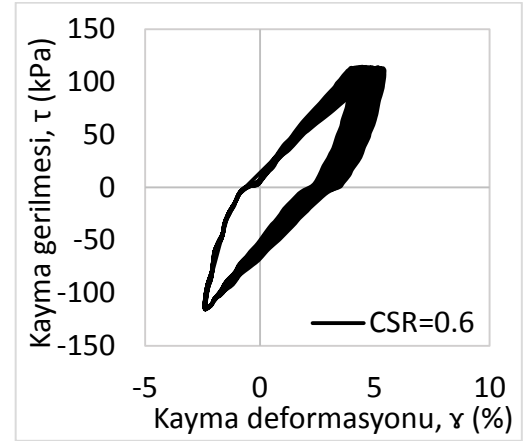
(c)



(d)



(e)



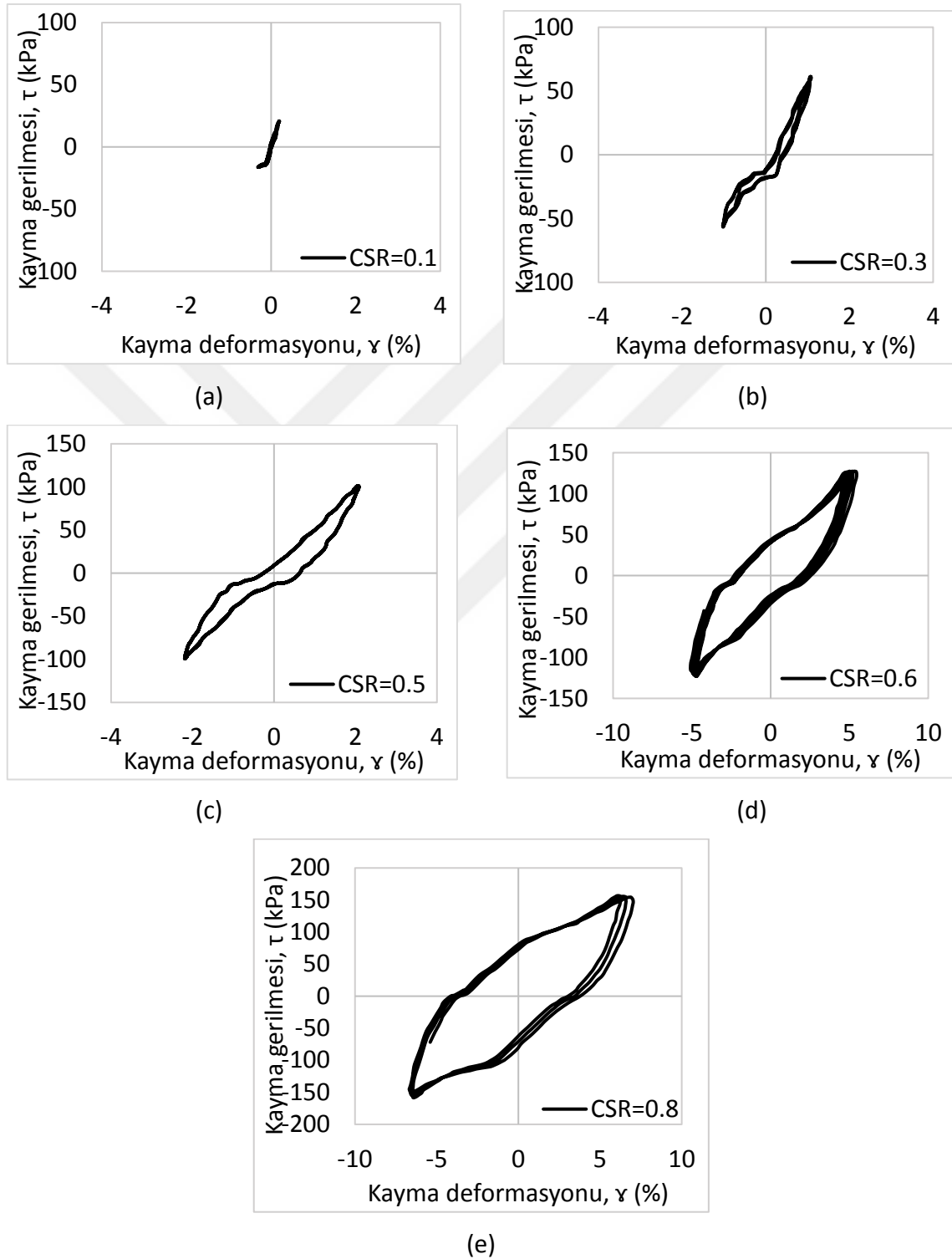
(f)

Şekil 4.17 %15 uçucu kül katkılı numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.05 b)0.1 c)0.2 d)0.3 e)0.5 f)0.6 histeritik ilmekleri.

Diğer deney sonuçları ile uyumlu olarak tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış ile numunenin maruz kaldığı yatay kesme gerilmeleri artmış bunun sonucunda ise birim

deformasyonlarda artış meydana gelmiştir. Dinamik kayma modülü değerleri, artan deformasyonlar ile azalmış yani rijitliklerde kayıp olmuştur.

4.4.5 %5 Silis Dumanı Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri

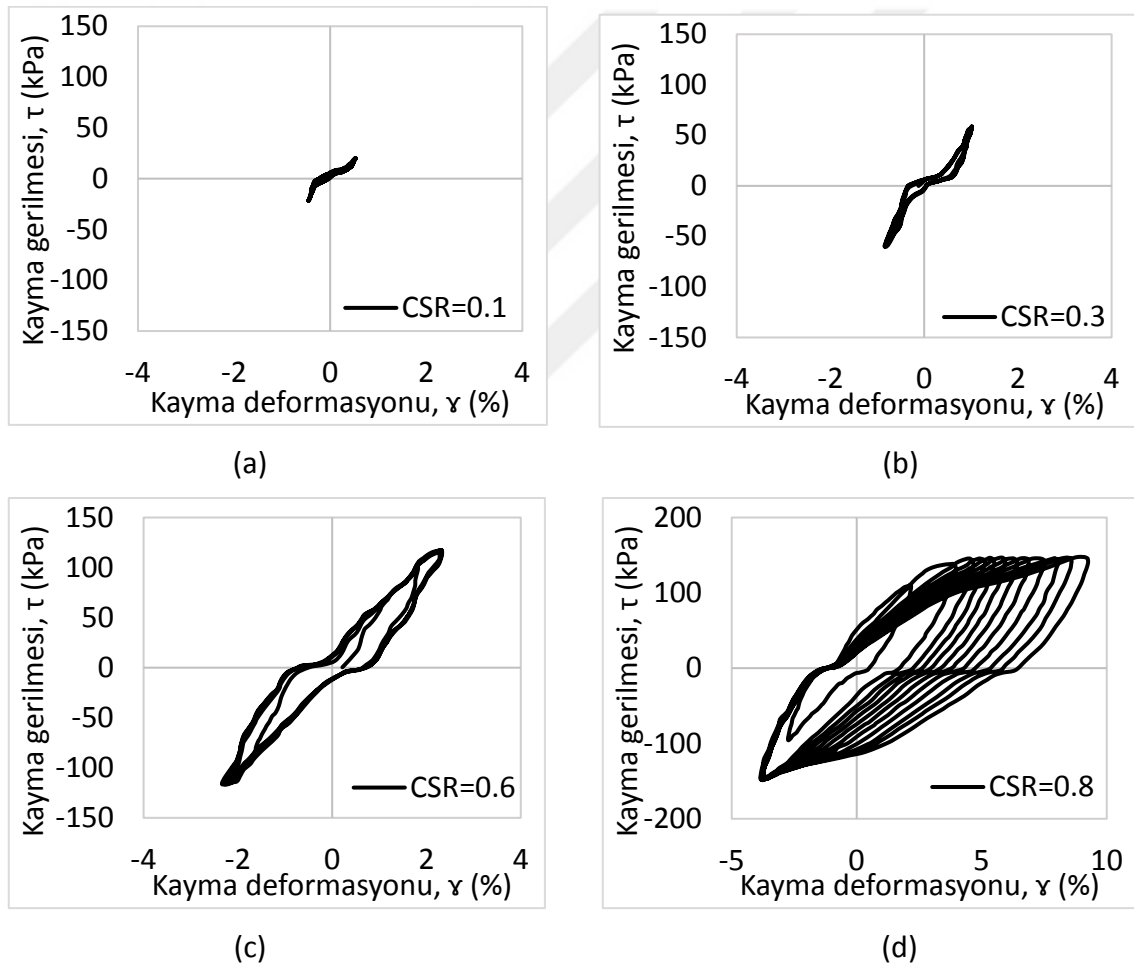


Şekil 4.18 %5 silis dumanı katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.3 c)0.5 d)0.6 e)0.8 histeritik ilmekleri.

Farklı deformasyon seviyelerinde dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarında meydana gelen değişimleri incelemek adına %5 silis dumanı katkıli numuneler için farklı CSR değerlerinde yapılan dinamik basit kesme deneylerine ait histeritik ilmeklerini gösteren kayma gerilmesi - kayma deformasyonu grafikleri Şekil 4.18’de verilmiştir.

%5 silis dumanı katkıli numunelerin deney sonuçları (Şekil 4.18) incelendiğinde görüldüğü üzere CSR değerlerindeki artış ile numunelerde meydana gelen deformasyonlar artmış, ilmeklerin eğimi azalmış yani dinamik kayma modülü değerleri artan deformasyonlara bağlı olarak azalmıştır.

4.4.6 %10 Silis Dumanı Katkıli Numunelerin Histeritik Grafikleri



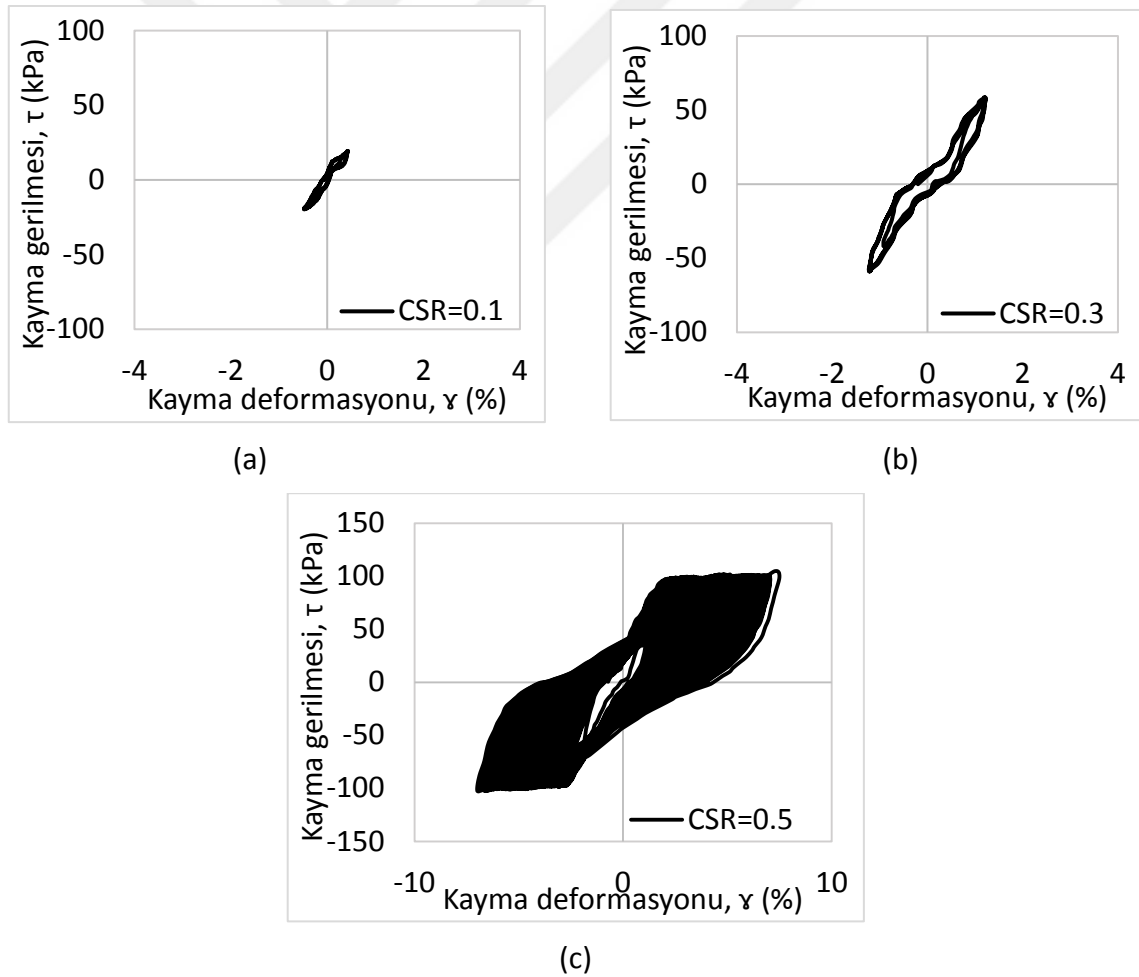
Şekil 4.19 %10 silis dumanı katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.3 c)0.6 d)0.8 histeritik ilmekleri.

%10 silis dumanı katkılı numuneler için yapılan dinamik deneylere ait kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisini gösterir histeritik ilmekler Şekil 4.19'da sunulmuştur. Deneyler farklı CSR değerleri için tekrarlanmıştır.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde tekrarlı yüklemelere maruz kalan %10 silis katkılı numunelerde CSR değerlerindeki artışa bağlı olarak deformasyonlar artmış, dinamik kayma modülü değerleri azalmıştır.

4.4.7 %15 Silis Dumanı Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri

Şekil 4.20'de %15 silis dumanı katkılı numuneler için değişen tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında yapılan deney sonuçları verilmiştir. Farklı deformasyon mertebelerindeki dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının değişimini incelemek için bu sonuçlardan yararlanılmıştır.

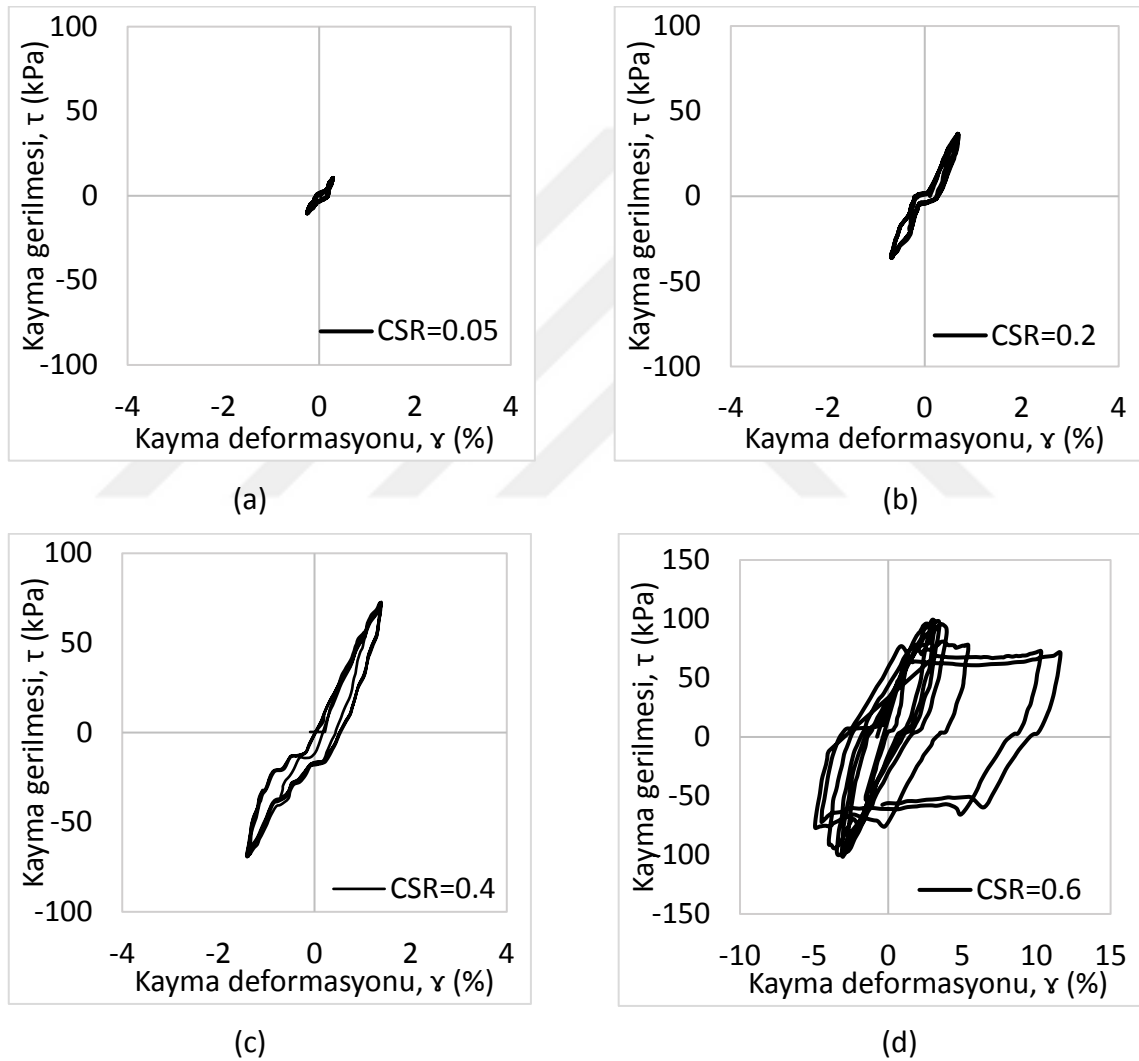


Şekil 4.20 %15 silis dumanı katkılı numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.3 c)0.5 histeritik ilmekleri.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranlarındaki artış ile diğer numunelerde olduğu gibi %15 silis katkılı numunelerde de deformasyonlar artmış, artan deformasyon seviyelerinde hesaplanan dinamik kayma modülü değerlerinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

4.4.8 %5 Kırmızı Çamur Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri

Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin farklı deformasyon seviyelerinde belirlenmesi için %5 kırmızı çamur katkılı numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları Şekil 4.21’de verilmiştir.

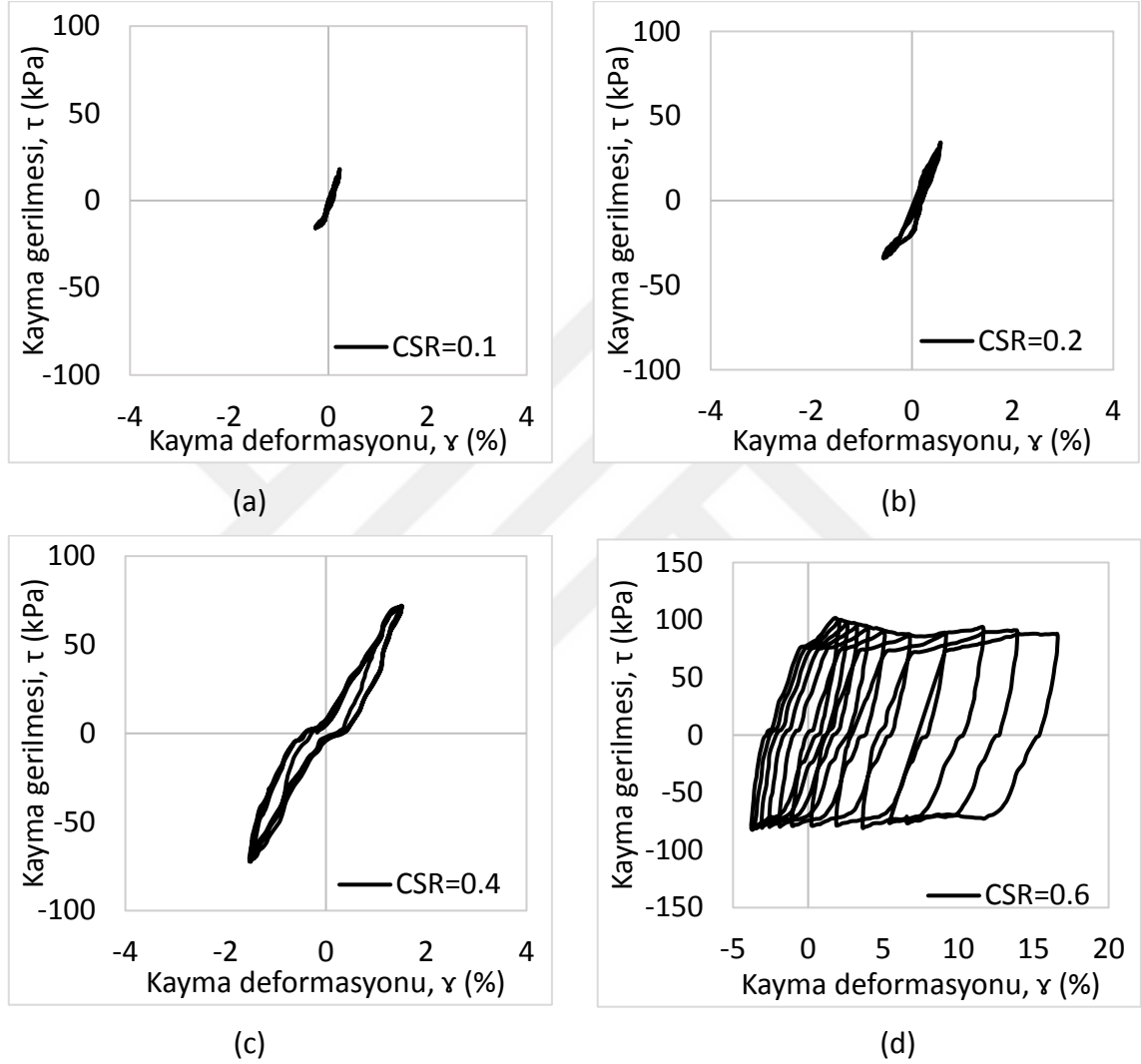


Şekil 4.21 %5 kırmızı çamur katkılı numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.05 b)0.2 c)0.4 d)0.6 histeritik ilmekleri.

Artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına bağlı olarak numunelerde oluşan deformasyonlar artmış, hesaplanan dinamik kayma modülü değerlerinin azalması ile rijitliklerin azaldığı belirlenmiştir.

4.4.9 %10 Kırmızı Çamur Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri

Farklı deformasyon seviyelerinde %10 kırmızı çamur katkıli numunelerin kayma modülü ve sönüm oranlarında meydana gelen değişimlerin görülebilmesi için farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında yapılan deneylere kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkisi Şekil 4.22'de verilmiştir.

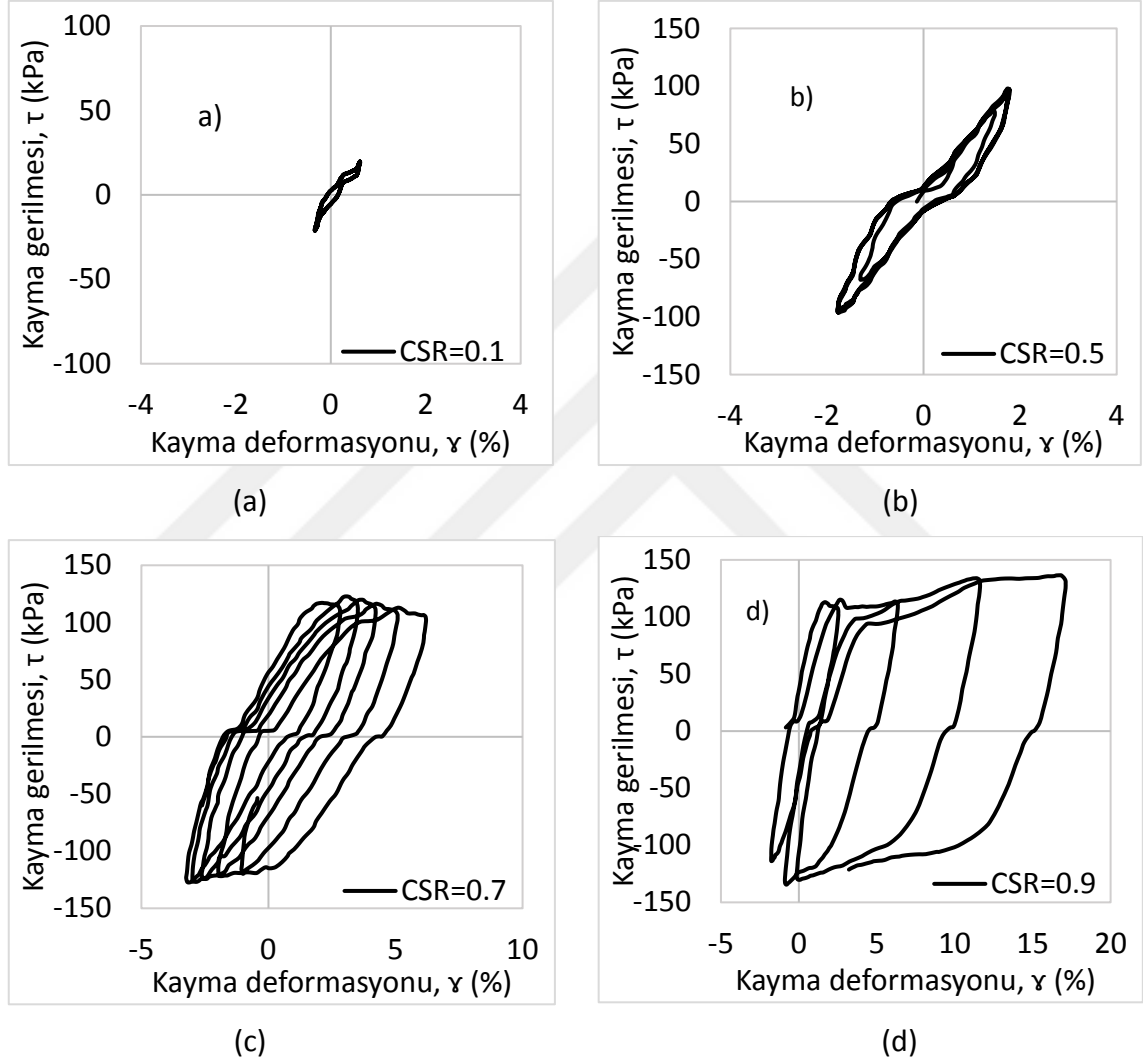


Şekil 4.22 %10 kırmızı çamur katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.2 c)0.4 d)0.6 histeritik ilmekleri.

CSR değerlerindeki artış ile birlikte %10 kırmızı çamur katkıli numunelerin deformasyonlarında artış olmuştur. Dinamik kayma modülü değerlerinde ise azalma olduğu hesaplanmıştır.

4.4.10 %15 Kırmızı Çamur Katkılı Numunelerin Histeritik Grafikleri

%15 kırmızı çamur katkıli numunelerin değişen deformasyon seviyelerinde kayma modülü ve sönüm oranı değerlerini hesaplamak amacıyla farklı CSR değerlerinde dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.23’de deney sonuçlarından elde edilen histeritik ilmekleri gösteren kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkisi grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.23 %15 kırmızı çamur katkıli numunelerin farklı CSR değerlerindeki a)0.1 b)0.5 c)0.7 d)0.9 histerisis ilmekleri.

Elde edilen bütün deney sonuçları ile uyumlu bir şekilde tekrarlı kayma gerilmesi oranları arttıkça kayma deformasyonlarında artış meydana gelmiştir. Farklı deformasyon seviyelerinde tekrarlı yükler altında numunenin rijitliğini tanımlayan dinamik kayma modülü değerlerinin deformasyon arttıkça azaldığı belirlenmiştir.

4.4.11 Histeritik İlmeklerine Bağlı Olarak Kritik Gerilme Seviyelerinin Belirlenmesi

Katkısız kil ve katkılı numuneler için yapılan dinamik basit kesme deneylerine ait histeritik ilmekler her bir numune için ayrı başlık altında verilmiştir. Bu histeritik ilmekleri incelendiğinde görüldüğü üzere numuneler belirli CSR değerine kadar tekrarlı yükleme altında sabit kayma deformasyonu gösterirken, kritik bir gerilme seviyesi aşıldıktan sonra göçme meydana gelmiş ve kayma deformasyonu her bir çevrimde artarak bazı numuneler için %10 mertebelerine kadar ulaşmıştır.

Çizelge 4.6 Katkılı ve katkısız numuneler için dinamik yükler altında kritik kayma gerilmeleri ve CSR değerleri

Numune	Kritik Kayma Gerilmesi	Kritik CSR değerleri
K	100	0,5
K-5UK	100	0,5
K-10UK	110	0,55
K-15UK	120	0,6
K-5SD	140	0,7
K-10 SD	160	0,8
K-15 SD	100	0,5
K-5KÇ	120	0,6
K-10KÇ	120	0,6
K-15KÇ	180	0,8

Çizelge 4.6'da dinamik deney sonuçlarına göre belirlenen kritik kayma gerilmesi seviyeleri ve bu kayma değerlerinin elde edilmesi için gereken tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR) değerleri verilmiştir.

4.5 Katkı Malzemelerinin Sekant Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi

Zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesi için yapılan dinamik basit kesme deneyleri ile numunelere ait farklı deformasyon seviyelerindeki histeritik ilmekleri belirlenmiştir. Bu histerisis ilmeklerinin kullanılması ile numunelerin sekant kayma modülü ve sönüm oranı değerleri belirli deformasyon mertebelerinde belirlenerek, deformasyona bağlı sekant kayma modülü (G_{sek}) ve sönüm oranı (D) eğrileri her bir

numune için oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğriler katkı malzemelerinin etkisini anlayabilmek adına katkısız kil ve uçucu kül katkılı numuneler, katkısız kil ve silis dumanı katkılı numuneler, katkısız kil ve kırmızı çamur katkılı numuneler bir arada olmak üzere farklı grafiklerde bir araya getirilmiştir.

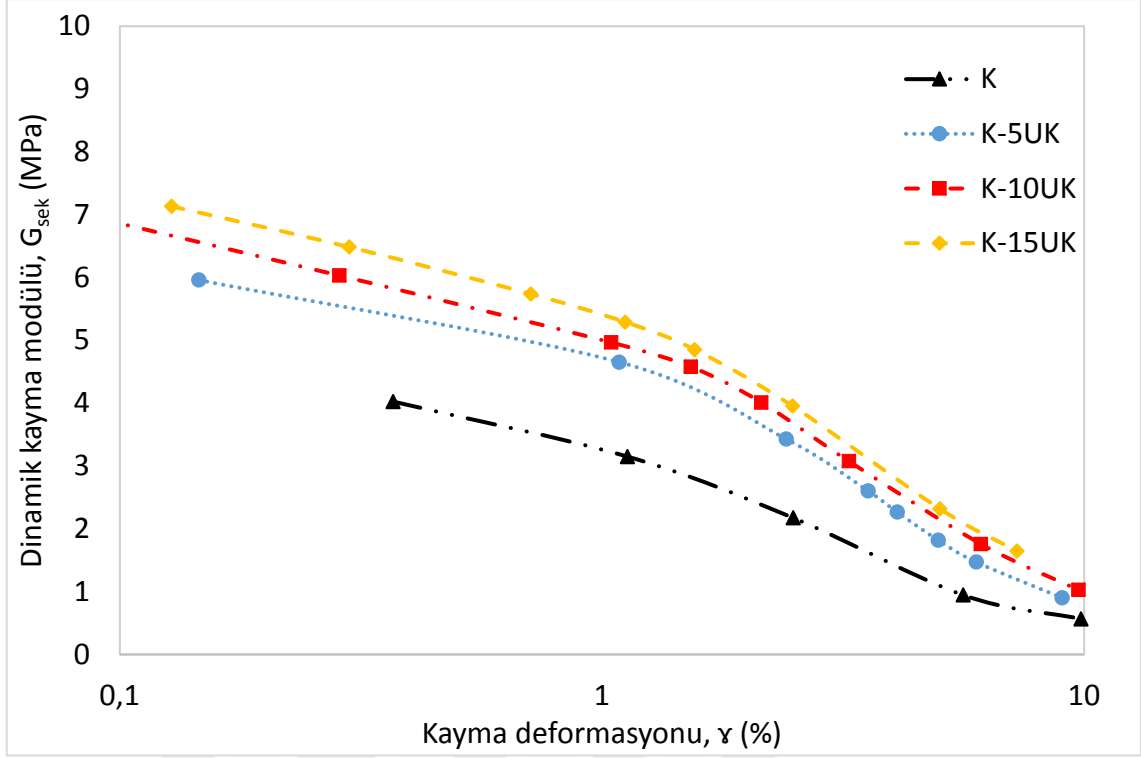
Çizelge 4.7’de deney sonuçlarının kıyaslanabilmesi için belirli bir kayma deformasyonu mertebesi belirlenerek, bu deformasyon seviyesindeki kayma modülü ve sönüm oranı değerleri katkısız ve katkılı numuneler için verilmiştir. Çizelgedeki veriler katkısız kile ile kıyaslama yapılırken her bir katkı malzemesi için ilgili başlık altında ayrıca değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.7 %1 kayma deformasyonu mertebesinde numunelerin G_{sek} ve D değerleri.

Numune	G_{sek} (MPa)	D (%)
K	3.30	8.5
K-5UK	4.70	5.7
K-10UK	5.00	4.2
K-15UK	5.40	3.3
K-5SD	5.70	6.3
K-10 SD	6.35	5.2
K-15 SD	5.10	6.8
K-5KÇ	4.50	7.4
K-10KÇ	5.20	7.0
K-15KÇ	6.00	5.5

4.5.1 Uçucu Kül Katkısının Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi

Uçucu kül katkısının dinamik parametrelere etkisinin araştırılması amacıyla katkısız kil, %5, %10 ve %15 uçucu kül katkılı numuneler için yapılan dinamik basit kesme deneyleri sonucunda değişen kayma deformasyonlarındaki sekant kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’te verilmiştir.

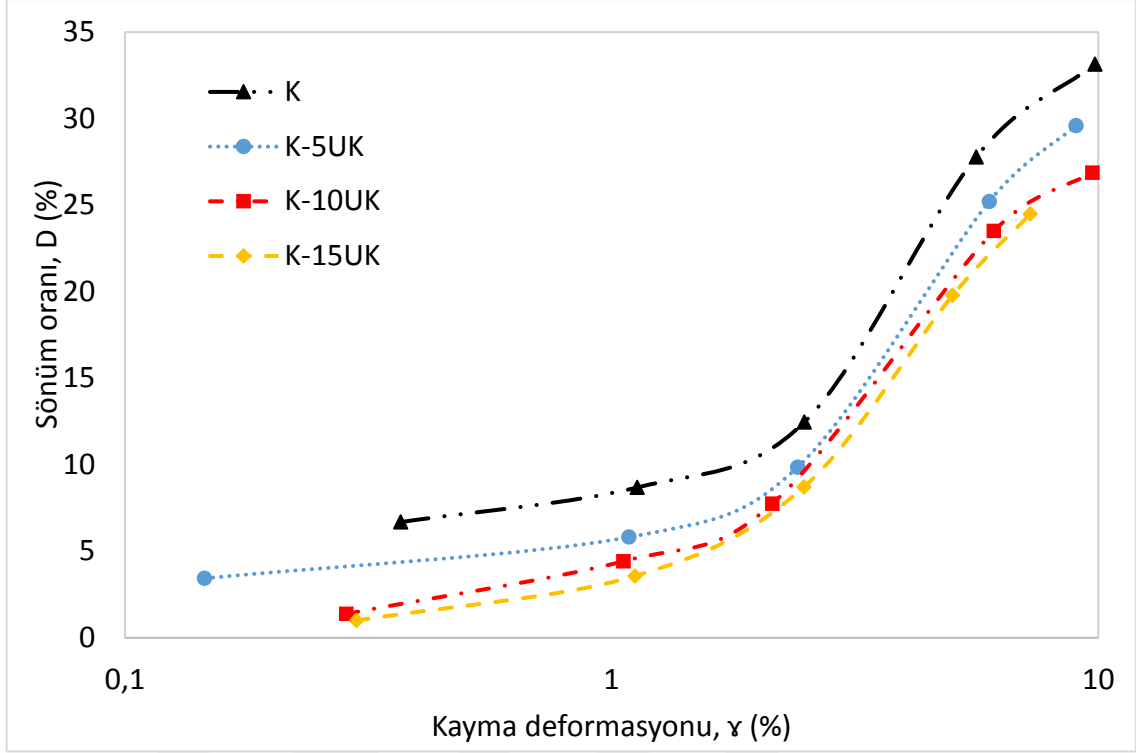


Şekil 4.24 Katkısız kil ve uçucu kül katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü eğrileri.

Şekil 4.24 incelendiğinde kayma deformasyonlarındaki artış ile birlikte numunelerin sekant kayma modülü değerlerinin azaldığı görülmektedir. Literatürle uyumlu bir şekilde artan kayma gerilmesi oranları ile bağlantı olarak kayma gerilmelerinin artması tekrarlı yüklemeye maruz kalan numunenin rijitliğinde azalmaya neden olmuştur.

Kayma modülü eğrileri incelendiğinde uçucu kül oranının artmasına bağlı olarak G_{sek} değerleri artmıştır. Literatür özetinde sunulmuş olan uçucu kül ile ilgili çalışmalara bakıldığında Dutta ve Saride [7], Liu vd. [8] ve Hoyas vd. [12] ile deney sonuçlarının da bu yönde olduğu, uçucu kül katkı oranındaki artışla maksimum dinamik kayma modülleri ve normalize edilmiş dinamik kayma modüllerinin arttığı gösterilmiştir. Ayrıca Liu vd. [8] belirli bir yüzdeden fazla uçucu kül eklenmesinin boşluklarda çok fazla uçucu kül bulunmasına bu da zeminin rijitliğinin azalmasına neden olduğunu belirtmiştir. Artan statik mukavemet artışı ile birlikte dinamik mukavemetin de arttığı görülmüştür.

En yüksek G_{sek} değerlerinin %15 uçucu kül katkılı numunelerde olduğu belirlenmiştir. Katkısız kilin %1 deformasyon seviyesindeki sekant kayma modülü değeri (Çizelge 4.7) ile kıyaslandığında K-5UK numunesinde %42, K-10UK numunesinde %52, K-15UK numunesinde %64 artış olmuştur.



Şekil 4.25 Katkısız kil ve uçucu kül katkıları numunelerinin deformasyona bağlı sönüm oranı eğrileri.

Şekil 4.25 incelendiğinde artan kayma deformasyonları değerleri ile birlikte sönüm oranı değerlerinin arttığı görülmektedir. Literatür özeti kısmında sunulan Tsaia ve Nib [1], Kim vd. [2], Subramaniam ve Banerjee [3], Yuan-qiang ve Xu [4], Fahoum vd. [5] ve Kalıpçılar vd. [11] tarafından yapılan çalışmalar da kayma deformasyonu artışıyla sönüm oranı değerlerinin arttığını göstermektedir.

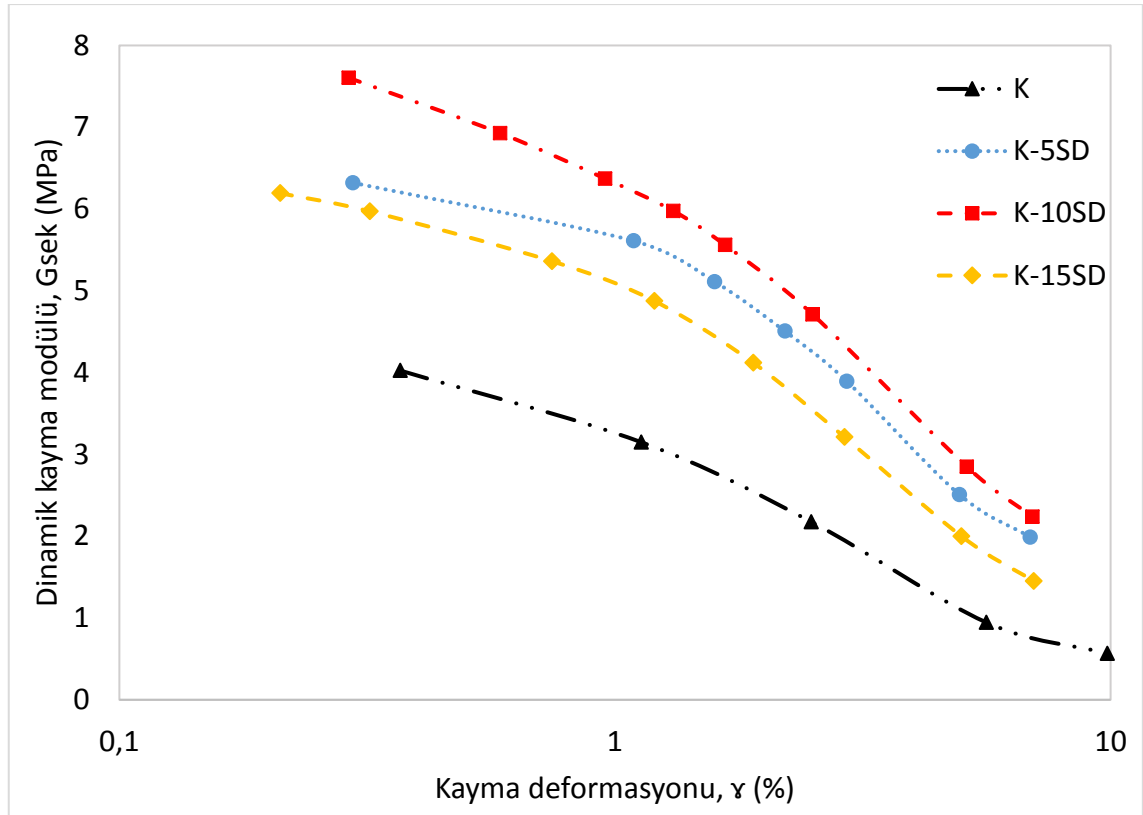
Farklı numuneler için sönüm oranı değerleri incelendiğinde ise belirli bir kayma deformasyonu seviyesinde uçucu kül oranındaki artışa bağlı olarak sönüm oranı değerleri azalmıştır. Uçucu kül katkı oranı arttıkça sönüm oranının azaldığı Dutta ve Saride [7], Liu vd. [8] çalışmalarında verilen sonuçlar ile uyumludur.

En düşük sönüm değerlerinin %15 uçucu kül katkıları numunelerde olduğu belirlenmiştir. Katkısız kil ile kıyaslandığında (Çizelge 4.7'de) sönüm oranlarında K-5UK, K-10UK ve K-15UK numunelerinde sırasıyla %33, %51 ve %61 azalma olduğu belirlenmiştir.

4.5.2 Silis Dumanı Katkısının Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi

Katkısız kil, %5, %10 ve %15 silis dumanı katkılı numuneler için yapılan dinamik basit kesme deneyleri sonucunda deformasyona bağlı G_{sek} ve D eğrileri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir.

Artan kayma deformasyonlarına bağlı olarak sekant kayma modülü değerlerinde meydana gelen azalmalar Şekil 4.26 incelendiğinde görülmektedir. Bu sonuçların literatürle uyumlu olduğu -[15], [24], [31] gibi daha önce sunulan çalışmalara istinaden artan deformasyonlarla numunelerin rijitliğinin azaldığı belirlenmiştir.

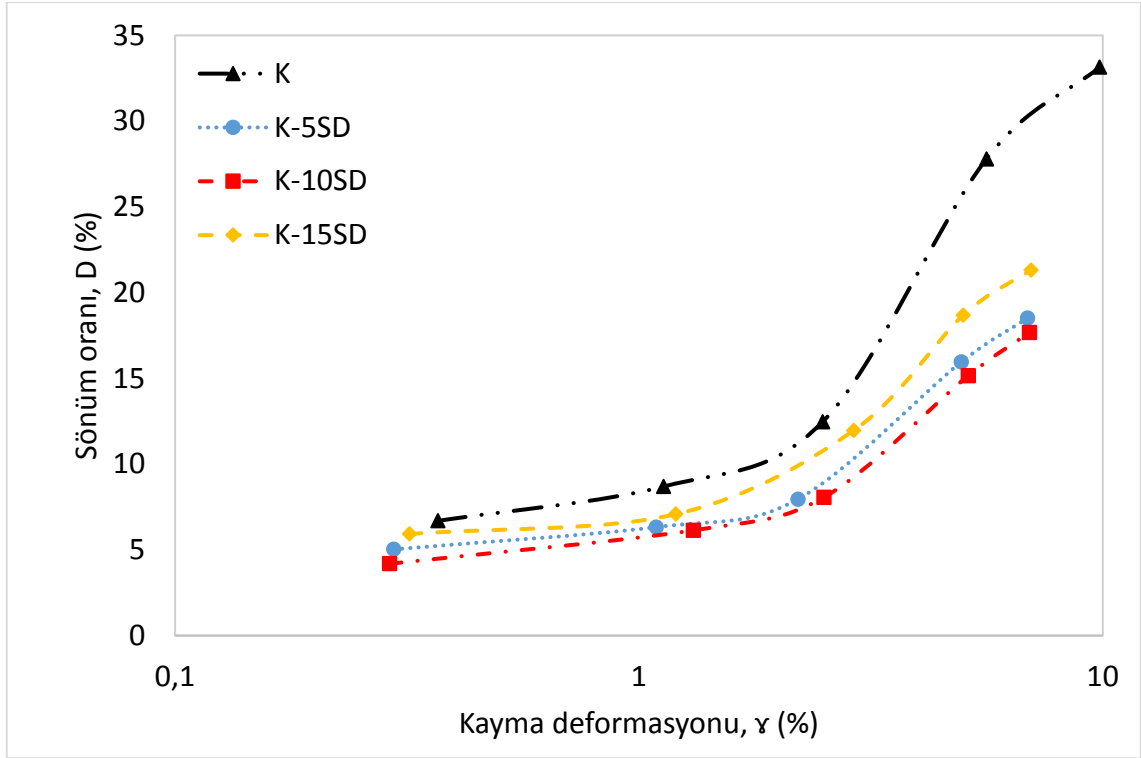


Şekil 4.26 Katkısız kil ve silis dumanı katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü eğrileri.

Kayma modülü eğrileri incelendiğinde silis dumanı katkısı ile birlikte %5, %10 ve %15 silis dumanı katkılı numunelerde katkısız kil ile kıyaslandığında G_{sek} değerlerinde artış olmuştur. %15 silis dumanı katkılı numunede ise yine katkısız kilden yüksek olmakla birlikte G_{sek} değerleri %5 ve %10 silis dumanı katkılı numunelerden düşük bulunmuştur. Liu vd. [8] çalışmalarında belirli bir yüzdeden fazla katkı eklenmesinin boşluklarda çok fazla katkı bulunmasına ve zeminin rijitliğinin azalmasına neden olduğunu belirtmiştir.

Katkısız kile oranla artan statik mukavemet artışı ile birlikte katkılı numunelerin dinamik mukavemetinin de arttığı görülmüştür.

%15 silis dumanı katkılı numunenin statik mukavemetinin %5 ve %10 katkılı numunelere kıyasla azaldığı, dinamik mukavemetinin de aynı şekilde %5 ve %10 katkılı numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. En yüksek G_{sek} değerlerinin %10 silis dumanı katkılı numunelerde olduğu belirlenmiştir. Katkısız kile kıyasla K-5SD, K-10SD ve K-10SD numunelerinin sekant kayma modüllerinde sırasıyla %73, %92 ve %55 oranlarında artış olmuştur.



Şekil 4.27 Katkısız kil ve silis dumanı katkılı numunelerin deformasyona bağlı sönüm oranı eğrileri.

Şekil 4.27'de verilen katkısız kil ve silis dumanı katkılı numunelerin kayma deformasyonuna bağlı sönüm oranı eğrileri incelendiğinde artan kayma deformasyonları ile birlikte sönüm oranı değerlerinin arttığı görülmektedir. Kayma deformasyonu seviyesindeki artışa bağlı olarak sönüm oranı değerlerinin artması literatür özeti kısmında sunulan [1], [2], [3],[4], [5] ve [11] araştırmalarıyla uyumludur.

Farklı numuneler için sönüm oranı değerleri incelendiğinde ise, belirli bir kayma deformasyonu seviyesinde silis dumanı oranının artmasına bağlı olarak %5 ve %10 silis

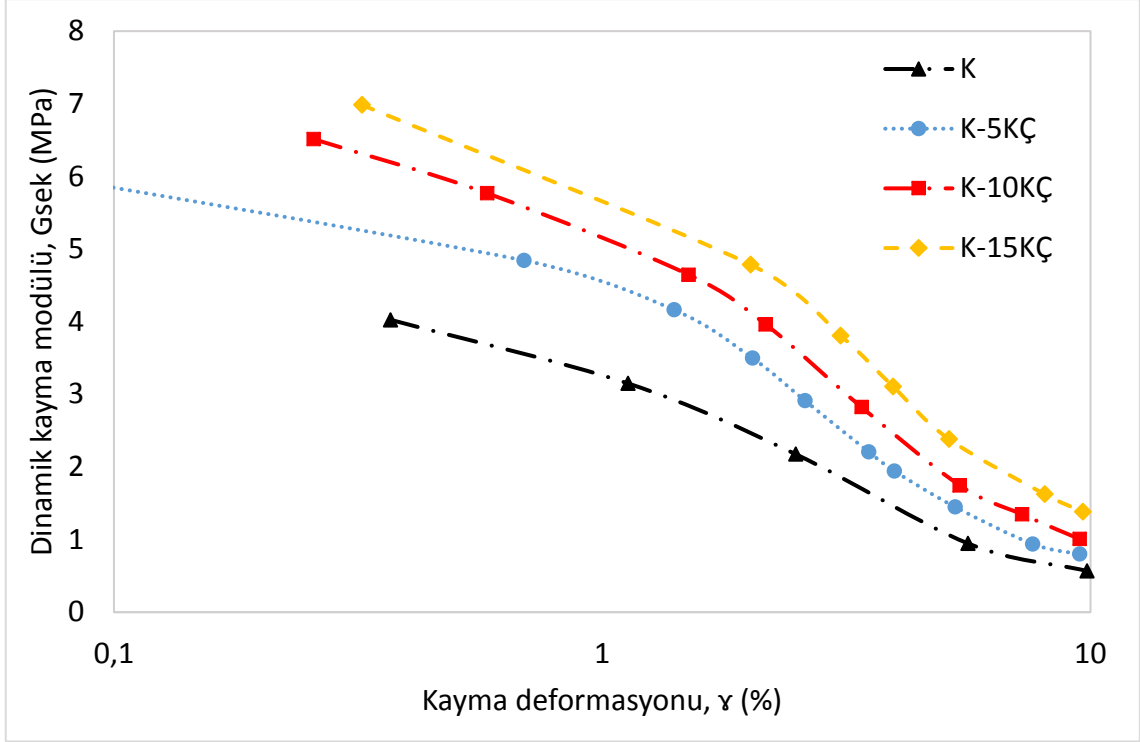
dumanı katkıli numunelerde sönüm oranı değerleri azalmıştır. %15 silis dumanı katkıli numunenin sönüm oranı değerleri ise %5 ve %10 silis dumanı katkıli numunelerden yüksektir fakat katkısız numunenin sönüm oranı değerlerinden düşüktür. Buna benzer bir sonuç Subraminiam ve Banerjee [3] tarafından yapılan çalışmada görölmüştür. Bu durum %15 silis dumanı katkıli numunenin rijitliğinin %5 ve %10 silis dumanı katkıli numunelerden düşük, katkısız kilden ise yüksek olması ile açıklanabilir.

En düşük sönüm oranı değerlerinin %10 silis dumanı katkıli numunelerde olduğu belirlenmiştir. Katkısız kil ile kıyaslama yapıldığında sönüm oranı değerlerinde Çizelge 4.7'de verilen sonuçlara göre K-5SD numunesinde %26, K-10SD numunesinde %39 ve K-10SD numunesinde %20 azalma olmuştur.

4.5.3 Kırmızı Çamur Katkısının Kayma Modülü ve Sönüm Oranına Etkisi

şekil 4.28 ve şekil 4.29'da katkısız kil, %5, %10 ve %15 kırmızı çamur katkıli numuneler için yapılan dinamik deneyler sonuçlarından elde edilen eğriler sunulmuştur. Deformasyona bağlı G_{sek} ve D eğrileri ile kırmızı çamur katkısinin kayma modülü ve sönüm oranı değerlerine etkisi incelenmiştir.

şekil 4.28'de göröldüğü üzere kayma deformasyonlarındaki artış numunelerin sekant kayma modülü değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Daha önceki deney sonuçlarında da belirtildiği üzere sonuçların literatürle uyumlu ([15], [24], [31]) olduğu görölmüştür.

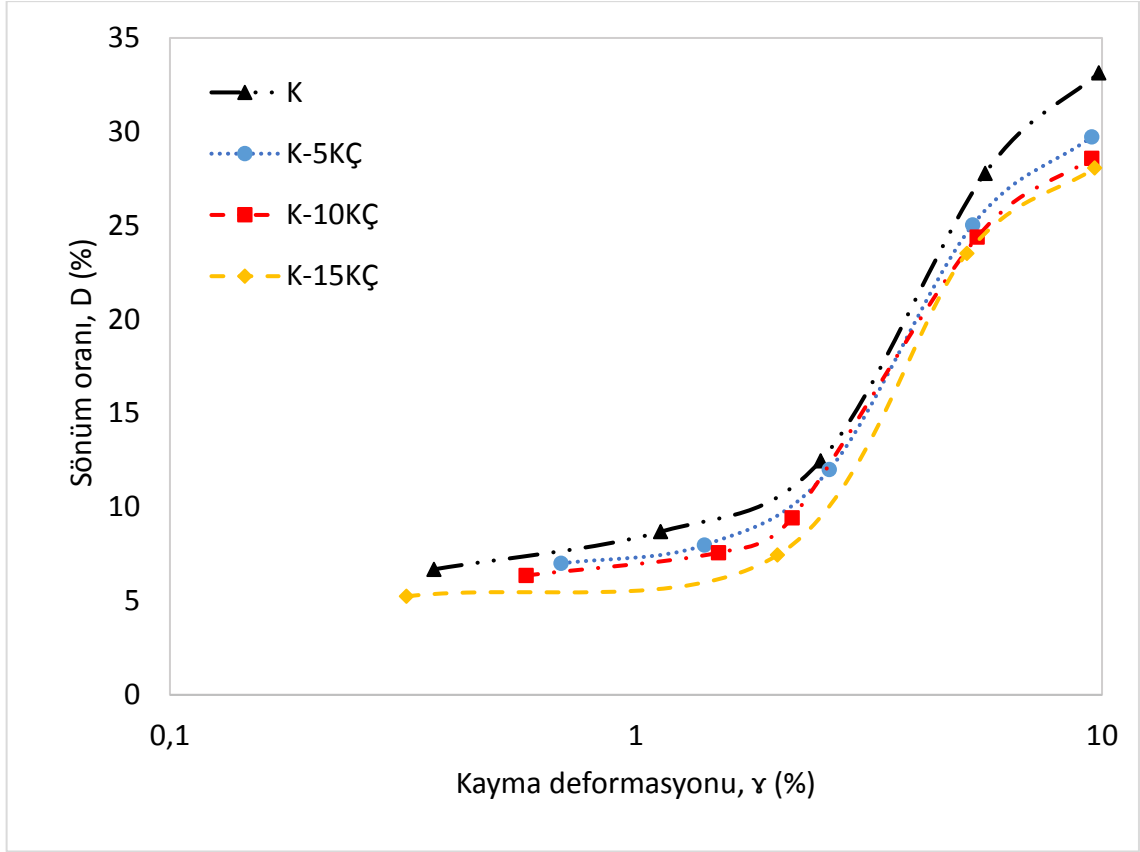


Şekil 4.28 Katkısız kil ve kırmızı çamur katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü eğrileri.

Değişen kayma deformasyonu seviyelerinde uçucu kül oranının artmasına bağlı olarak G_{sek} değerleri artış göstermiştir. Literatürde farklı katkı numuneleri ile yapılan çalışmalarda için benzer sonuçlar elde edilmiştir ([1],[4],[5]). Katkı oranlarının artması ile birlikte meydana gelen statik mukavemet artışı dinamik mukavemette de artış olmasını sağlamıştır.

En yüksek G_{sek} değerlerinin %15 kırmızı çamur katkılı numunelerde olduğu belirlenmiştir. Katkısız kilin sekant kayma modülü değeri ile katkılı numunelerinki kıyaslandığında (Çizelge 4.7) K-5KÇ numunesinde %36, K-10KÇ numunesinde %58, K-15KÇ numunesinde %82 artış olmuştur.

Şekil 4.29'da görüldüğü üzere kayma deformasyonlarındaki artış ile numunelerin sönüm oranı değerleri artmıştır. Sönüm oranı değerlerindeki bu artış sunulan diğer deney sonuçları ve literatürdeki çalışmalarla ([1], [2], [3],[4], [5] ve [11]) paraleldir.



Şekil 4.29 Katkısız kil ve kırmızı çamur katkılı numunelerin deformasyona bağlı sönüm oranı eğrileri.

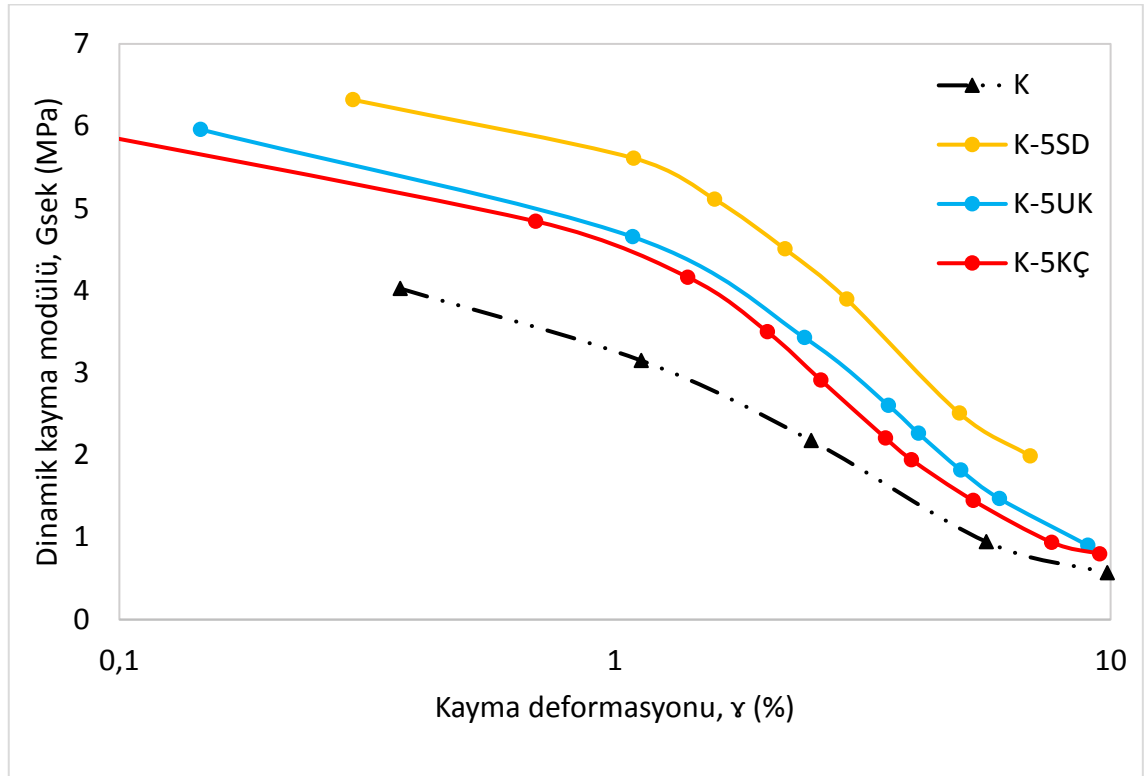
Katkısız kil ve kırmızı çamur katkılı numuneler için bulunan deney sonuçları incelendiğinde sönüm oranı değerleri kırmızı çamur oranının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Katkı miktarının artmasına bağlı olarak sönüm oranlarında meydana gelen azalmalar numunelerin daha gevrek olması ile açıklanabilir [2].

Bütün numuneler kıyaslandığında en düşük sönüm oranı değerlerinin %15 kırmızı katkılı numunelerde olduğu belirlenmiştir. Katkısız kil ile kıyaslandığında (Çizelge 4.7'de) sönüm oranlarında K-5KÇ, K-10KÇ ve K-15KÇ numunelerinde sırasıyla %13, %18 ve %35 azalma olduğu belirlenmiştir.

4.5.4 Katkı Malzemelerinin Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Değerlerine Etkisi

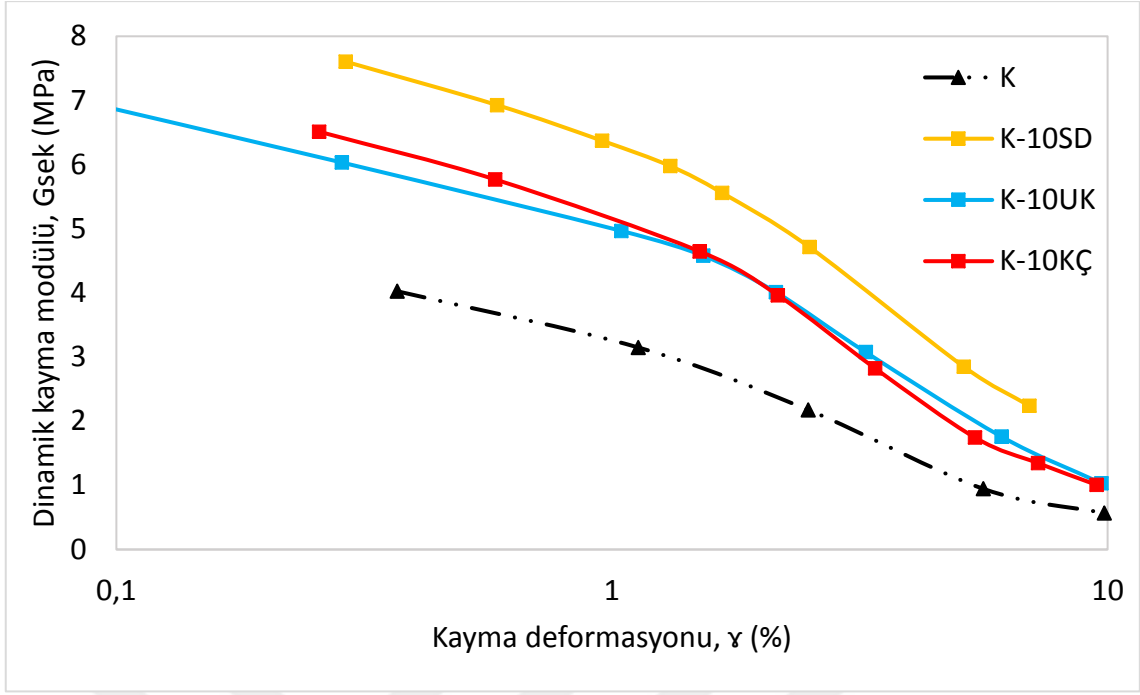
Katkısız kil ve farklı katkı malzemelerine ait aynı katkı oranlarındaki numunelerin kıyaslanması amacıyla %5, %10 ve %15 katkılı numuneler için deformasyona bağlı G_{sek} değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32’de verilmiştir.

Şekil 4.30 incelendiğinde görüldüğü üzere %5 katkı oranında dinamik kayma modülü değerinde en yüksek artış silis dumanı katkısında bulunmuş, onu uçucu kül ve kırmızı çamur takip etmiştir.



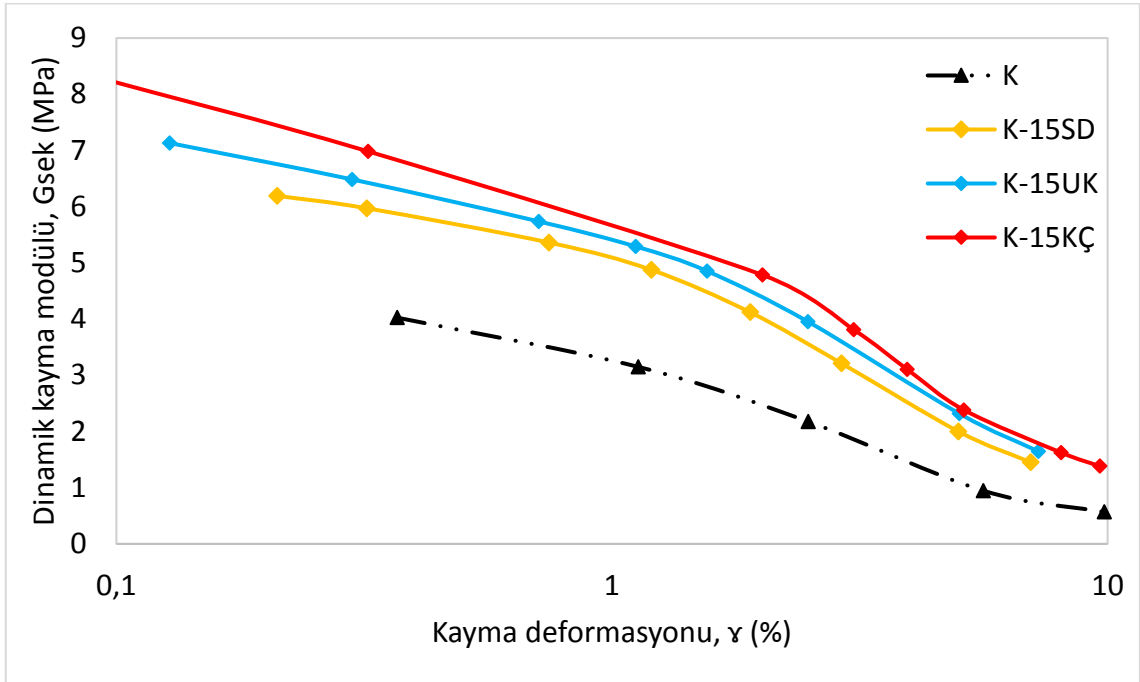
Şekil 4.30 Katkısız kil ve %5 oranında katkılı numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü azalım eğrileri

Şekil 4.31’de verilen grafikte katkısız kil ve %10 katkılı numunelerin dinamik kayma modülü değerleri karşılaştırıldığında en yüksek artışın silis dumanı katkısında bulunduğu görülmüştür. Uçucu kül ve kırmızı çamur katkılarında ise kayma modülü değerlerindeki artış silis dumanından daha az bulunmuştur. %10 oranında uçucu kül ve silis dumanı katkılı numunelerin kayma modülü eğrileri incelendiğinde birbirine çok yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



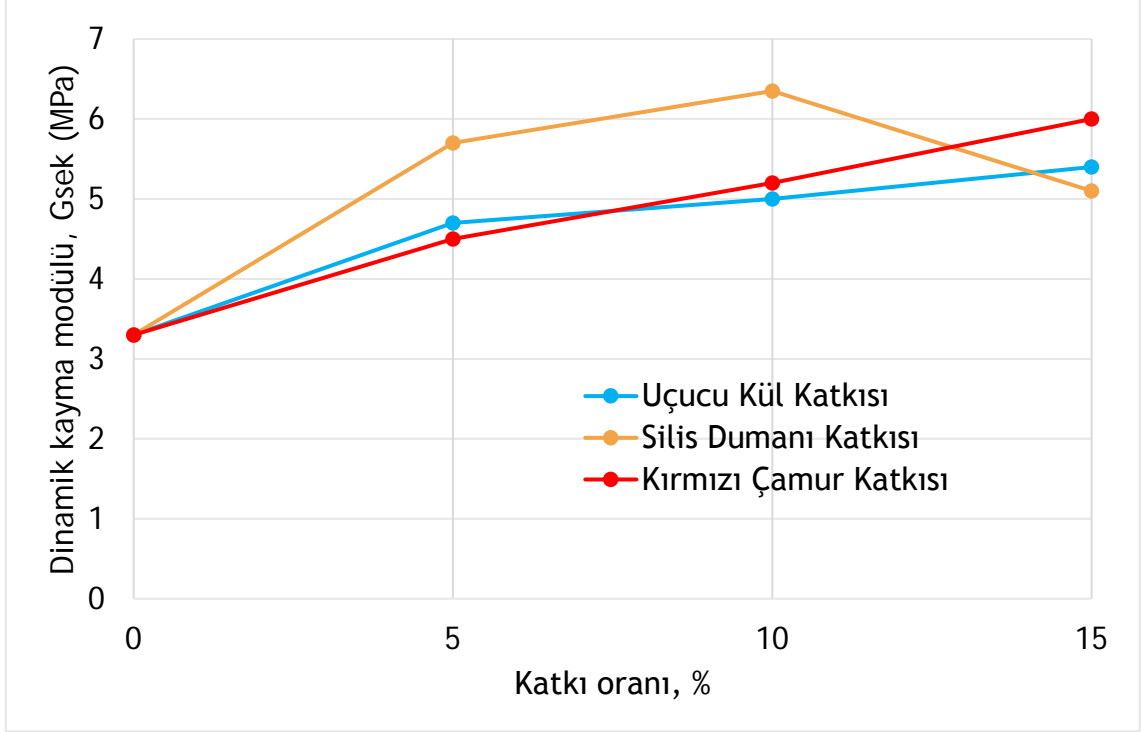
Şekil 4.31 Katkısız kil ve %10 oranında katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü azalım eğrileri

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere katkısız kil ve %15 katkıli numunelere ait dinamik kayma modülü değerleri karşılaştırıldığında en yüksek artış kırmızı çamur katkısında belirlenmiş, daha sonra sırasıyla uçucu kül ve silis dumanı katkıları onu takip etmiştir.



Şekil 4.32 Katkısız kil ve %15 oranında katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma modülü azalım eğrileri

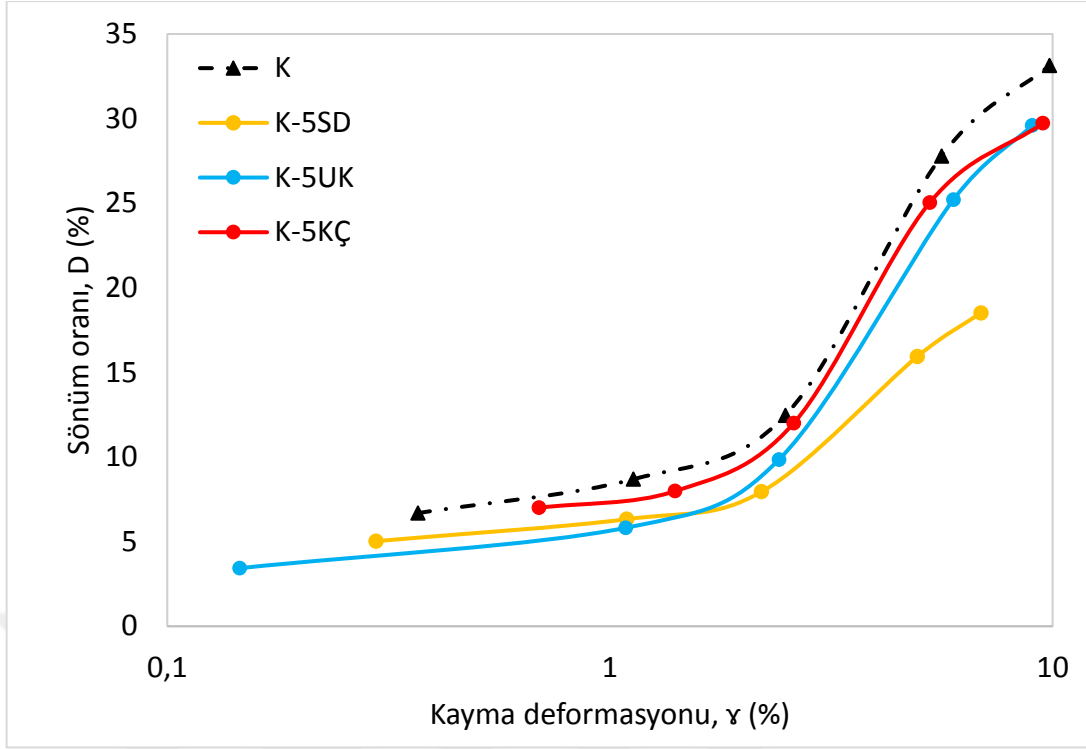
Tüm sonuçları özetlemek amacıyla belirli bir deformasyon seviyesinde (%1) belirlenmiş G_{sek} değerleri ile (Çizelge4.7) Şekil 4.33'te görülen katkı oranına bağlı dinamik kayma modülü değişimi eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.33 Katkı oranına bağlı olarak dinamik kayma modülü değişimi (%1 kayma deformasyonu mertebesinde)

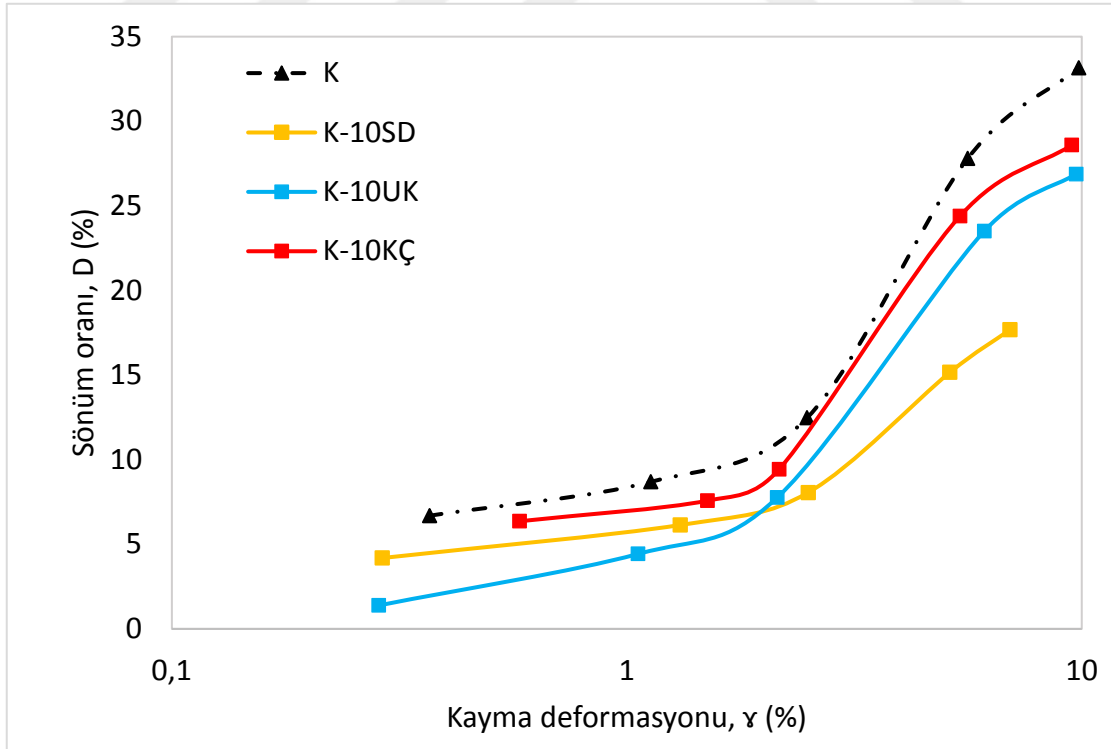
Katkısız kil ve farklı katkı malzemelerine ait aynı katkı oranlarındaki numunelerin sönüm oranlarının kıyaslanması amacıyla %5, %10 ve %15 katkılı numuneler için deformasyona bağlı sönüm oranı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'da verilmiştir.

Şekil 4.34 incelendiğinde %5 katkı oranında eklenmiş numunelerin sönüm oranı değerleri katkısız kile oranla azalmıştır. %5 katkılı numuneler kendi arasında kıyaslandığında en yüksek sönüm oranı değerleri kırmızı çamur katkısında elde edilmiş, uçucu kül ve silis dumanı katkılarında ise daha düşük sönüm oranı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.34 Katkısız kil ve %5 oranında katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma sönüm oranı eğrileri

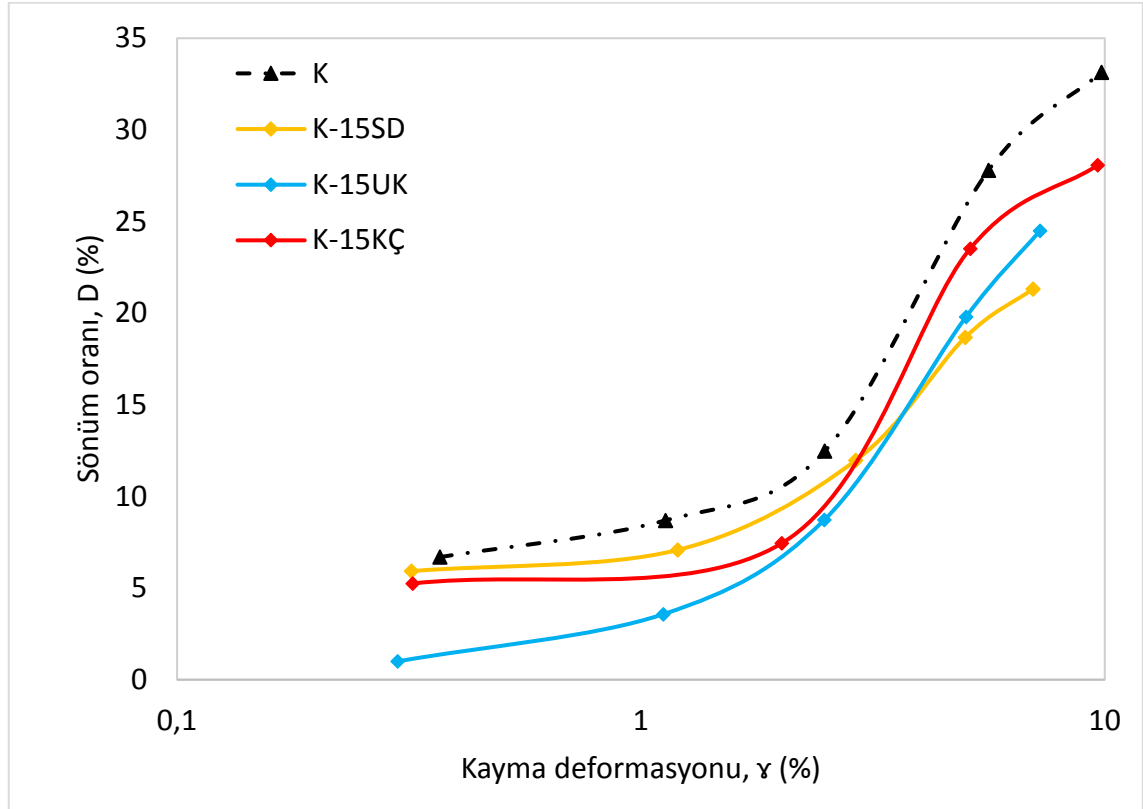
Şekil 4.35'te katkısız kil ve %10 katkıli numunelere ait sönüm oranı eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.35 Katkısız kil ve %10 oranında katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma sönüm oranı eğrileri

En yüksek sönüm oranı değerleri %10 katkıli numuneler kendi arasında kıyaslandığında kırmızı çamur katkısında elde edilmiş, uçucu kül ve silis dumanı katkılarında ise daha düşük sönüm oranı değerleri bulunmuştur.

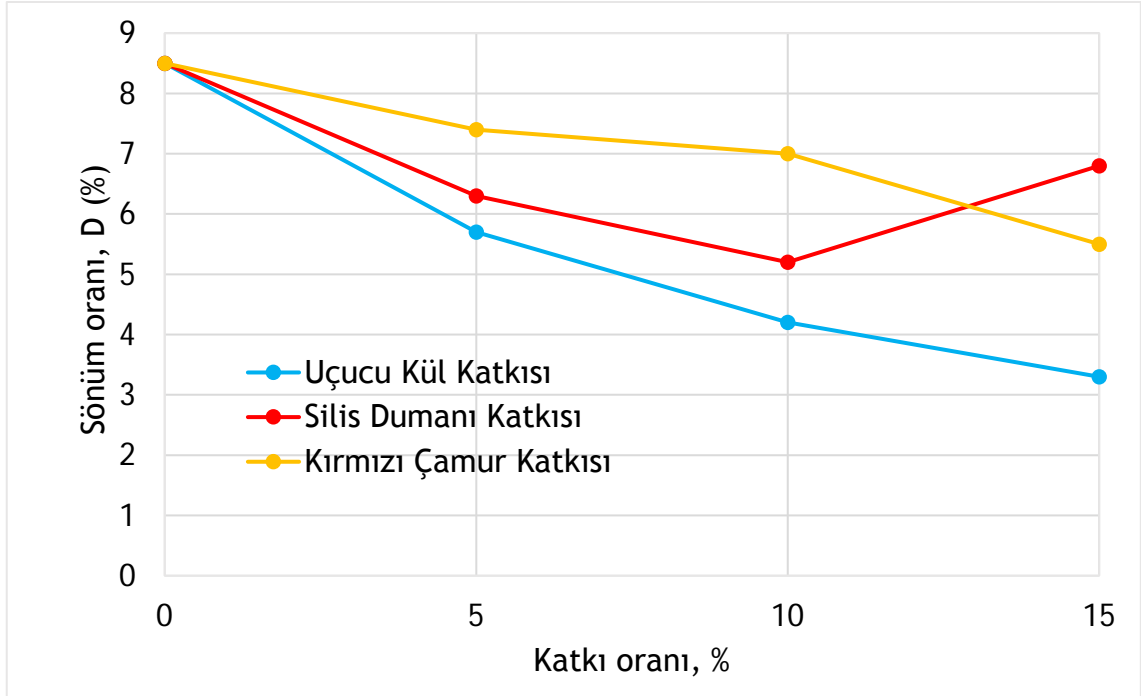
Şekil 4.36'da katkısız kil ve %15 katkıli numunelere ait sönüm oranı eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.36 Katkısız kil ve %15 oranında katkıli numunelerin deformasyona bağlı kayma sönüm oranı eğrileri

Şekil 4.36 incelendiğinde %15 oranında katkı eklenmiş numunelerin sönüm oranı değerleri katkısız kile oranla azaldığı görülmüştür. %15 katkıli numuneler kendi arasında kıyaslandığında en yüksek sönüm oranı değerleri %5 deformasyon mertebesine kadar silis dumanı katkısında bulunmuştur. %5 deformasyon mertebelerinden sonra ise en yüksek kırmızı çamur olmak üzere uçucu kül ve silis dumanı olarak azalmalar belirlenmiştir.

Katkı oranına bağılı olarak sönüm oranındaki değişimin görölmesi için Şekil 4.37'deki grafik verilmiştir. Sönüm oranı değerleri için Çizelge 4.7'de verilen %1 deformasyon mertebesinde hesaplanan sönüm oranı değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.37 Katkı oranına bağılı olarak sönüm oranı değişimi (%1 kayma deformasyonu mertebesinde)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında katkısız kil, %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur katkılı numuneler için kıvam deneyleri, standart proktor deneyleri, serbest basınç deneyleri ve dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde katkı malzemelerinin eklenmesi, katkısız kil sonuçları ile kıyaslama yapıldığında likit limit değerleri azalmış, plastik limit değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak plastisite indislerinde azalma meydana gelmiş ve zemin sınıfı CH iken MH olarak değişmiştir.

Katkı malzemelerinin standart proktor sonuçlarına etkisi incelendiğinde katkı oranındaki artışa bağlı olarak optimum su muhtevalarında artış meydana gelmiş, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ise azalmıştır.

Serbest basınç deneyleri incelendiğinde katkı malzemelerinin eklenmesi ile katkısız kile kıyasla serbest basınç dayanımları genel olarak artış gösterirken, en fazla iyileşme %15 kırmızı çamur katkılı numunede meydana gelmiştir. Silis dumanında ise serbest basınç dayanımı %5 ve %10 katkı oranlarında artış gözlenirken, %15 katkı oranında düşüş yaşanmış bununla beraber katkısız kilin serbest basınç dayanımına kıyasla daha yüksek bir dayanım elde edilmiştir.

Serbest basınç deneylerine ait grafikler ile numunelerin davranışı değerlendirildiğinde katkı malzemelerinin eklenmesi ile kil zeminin davranışında değişim meydana gelmiştir. Katkısız kil oldukça sünek bir davranış gösterirken katkı malzemelerinin eklenmesi ile katkılı numuneler gevrek bir hal almıştır.

Dinamik basit kesme deneylerine ait sonuçlar incelendiğinde katkı malzemelerinin eklenmesi ile birlikte uçucu kül ve kırmızı çamur katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça dinamik kayma modülü G_{sek} değerleri artış göstermiş, sönüm oranı değerleri ise azalmıştır. Silis dumanı katkılı numunelerde ise %5 ve %10 katkılı numunelerde kayma modülü değerleri katkı oranı artışıyla artmış, sönüm oranı değerleri ise katkı oranı arttıkça azalmıştır. %15 katkılı numunede ise %5 ve %10 SD katkılı numunelere kıyasla G_{sek} değeri azalmış, sönüm oranı değeri artmıştır. Buna rağmen % 15 silis dumanı katkılı numunenin G_{sek} değeri katkısız kilden fazla iken, sönüm oranı değeri katkısız kilden az olduğu belirlenmiştir.

Belirli bir deformasyon mertebesi seçilerek (%1) dinamik basit kesme deney sonuçları için kıyaslama yapıldığında ise en yüksek G_{sek} değeri 6.35 MPa değeri ile %10 silis dumanı katkılı numunede, en yüksek sönüm oranı değeri ise katkısız kilde olmak üzere %8.5 olarak bulunmuştur. Katkısız kilden sonra en yüksek sönüm oranı değeri ise %7.4 olarak %5 kırmızı çamur katkılı numunede hesaplanmıştır.

Dinamik parametrelerde meydana gelen değişimler Kim vd. [2] tarafından şöyle açıklanmıştır; katkılar ve kil partikülleri arasındaki reaksiyonlar rijitliğin artmasına buna bağlı olarak dinamik kayma modülünün (G_{sek}) artmasını sağlamıştır. Katkılı numunelerin katkısız kile kıyasla daha gevrek olması ise sönüm oranlarının azalması yönünde sonuçlar elde edilmesine neden olmuştur.

Sonuç olarak bu deneysel çalışma ile uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur katkılarının yüksek plastisiteli bir kile eklenmesi sonucunda kıvam limitlerinde, kompaksiyon parametrelerinde, serbest basınç dayanımlarında ve dinamik parametrelerde meydana gelen değişimler vurgulanmıştır. Çalışmanın amacı olan uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur katkılarının dinamik parametreler üzerindeki etkisi, katkılı numunelerin sekant kayma modüllerinde meydana gelen artış ve sönüm oranlarında meydana gelen azalma ile belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvardaki çalışmalar ile belirlenen kayma modülü ve sönüm oranı eğrilerinin kullanılan dinamik basit kesme deney aletinin sahip olduğu yükleme hızı ve formuna bağlı olması nedeniyle farklı özellikteki deney aletlerinin farklı sonuçlar verebileceği, numunelerin hazırlanması sırasında numunelerde meydana gelen

örslenmelerin sonuçları etkileyebileceği deney sonuçlarını incelerken göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tez çalışması kapsamında laboratuvarda kompaksiyon yöntemi ile hazırlanan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçların desteklenebilmesi adına arazide katkılar ile güçlendirilmiş mühendislik sahalarından yararlanılabilir ve bu sahalardan elde edilen numuneler üzerinde arazi ve/veya laboratuvar deneyleri yapılarak çalışma geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Tsai, P. H. ve Ni, S. H., (2012). "Effects of Types of Additives on Dynamic Properties of Cement Stabilized Soils", *International Journal of Applied Science and Engineering*, 10(2): 131-144.
- [2] Kim, A. R., Chang, I., Cho, G. C. ve Shim, S. H. (2018). "Strength and Dynamic Properties of Cement-Mixed Korean Marine Clays", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4): 1150-1161.
- [3] Subramaniam, P. ve Banerjee, S. (2016). "Torsional Shear and Resonant Column Tests on Cement Treated Marine Clay", *Indian Geotechnical Journal*, 46(2): 183-191.
- [4] Yuan-qiang, C. ve Xu, L. (2004). "Dynamic Properties of Composite Cemented Clay", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 5(3):309-316.
- [5] Fahoum, K., Aggour, M. S. ve Amini, F. (1996). "Dynamic Properties of Cohesive Soils Treated With Lime", *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5): 382-389.
- [6] Liu, J., Wang, T. ve Tian, Y. (2010). "Experimental Study of the Dynamic Properties of Cement- and Lime-Modified Clay Soils Subjected to Freeze–Thaw Cycles", *Cold Regions Science and Technology*, 61(1): 29-33.
- [7] Dutta, T. T. ve Saride, S. (2016). "Dynamic Properties of Moderately Expansive Soil Stabilized with Class C Fly Ash", *Geo-Chicago 2016*, 14–18 August 2016, Illinois, 949-958.
- [8] Liu, H. B., Li, C. Y. ve Wei, H. B. (2009). "Experimental Research on the Mechanical Parameter of Fly Ash Soil", *ICCTP 2009: Critical Issues In Transportation Systems Planning, Development and Management*, 5-9 August 2009, Harbin, 1-8.
- [9] Gao, L., Hu, G., Chen, J., Ren, K., Zhou, Q. ve Yu, X. (2018). "Dynamic Properties of Carbon-Fiber-Reinforced Clay Soil", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 55(5): 317-324.
- [10] Akbulut, S., Arasan, S. ve Kalkan, E. (2007). "Modification of Clayey Soils Using Scrap Tire Rubber And Synthetic Fibers", *Applied Clay Science*, 38(1-2): 23-32.
- [11] Kalıpcılar, İ., Karakan, E., Erdoğan, D.Ş., Sezer, A. ve Altun S., H., (2015). "Artan Tekrarlı Yükler Altında İnce Daneli Zeminlerde Fiber Kullanımının Dinamik

Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim 2015, İzmir, 1-10.

- [12] Hoyos, L. R., Puppala, A. J. ve Chainuwat, P., (2004). “Dynamic Properties of Chemically Stabilized Sulfate Rich Clay”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2): 153-162.
- [13] Heath, D. L., Shenton, M. J., Sparrow, R. W. ve Waters, J. M., (1972). “Design of Conventional Rail Track Foundation”, *Proceedings of the Institute of Civil Engineering*, 51: 251–267.
- [14] Das, B.M. ve Ramana, G.V., (2010). *Principles of Soil Dynamics*, Cengage Learning, Stamford.
- [15] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey
- [16] Onur, M.İ., (2015). *Suya Doygun ve Doygun Olmayan Kum Zeminlerin Dinamik Yükler Altında Davranışlarının Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [17] Özkan, M.Y., (2017). “Zemin Dinamiğine Giriş”, Nobel Yayıncılık, 1. Basım, İstanbul
- [18] Luna, R. ve Jadi, H., (2000). “Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods”, In *Proceedings of The First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, 11-15 December 2000, St. Louis MO.
- [19] İyisan, R., (1996). "Correlations Between Shear Wave Velocity and In-situ Penetration Test", *Turkish Chamber of Civil Engineers, Teknik Dergi*, 96(7): 371-374.
- [20] Drnevich, V. P. ve Hardin, B. O., (1978). “ Modulus and Damping of Soils by Resonant-Column Method, *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 91-125.
- [21] Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. ve Tokimatsu, K., (1986). “Moduli and Damping Factors For Dynamic Analyses Of Cohesionless Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), 1016-1032.
- [22] Sun, J. I., Goleorkhi, R., ve Seed, H. B., (1988). “Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils”, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- [23] Tomlinson, G. R., ve Worden, K., *Nonlinearity in Structural Dynamics: Detection, Identification and Modelling*, IoP Publishing, United Kingdom, 2000.
- [24] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., ve Sheahan, T.C., (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering Second Edition*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [25] Hardin, B.O. ve Black W.L., (1968). “Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, 94: 353-369.

- [26] Okur, V. ve Ansal, A., (2009). "Tekrarlı Yük Etkisinde Kil Zeminlerin Lineer Olmayan Elastik Davranışı", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 1 (22): 169-185.
- [27] Hardin, B. O., ve Drnevich, V. P. (1972). "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement And Parameter Effects", Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 98(sm6).
- [28] Dobry, R., ve Vucetic, M. (1987). "Dynamic Properties And Seismic Response of Soft Clay Deposits", Department Of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [29] Seed H.B. ve Idriss I.M., (1970) "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses", College of Engineering, University of California Technical Report, California.
- [30] Ishibashi, I., (1992). "Discussion of "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response" by Mladen Vucetic and Ricardo Dobry (January, 1991, Vol. 117, No. 1)", Journal of Geotechnical Engineering, 118(5): 830-832.
- [31] Hwang S. K., (1997). Dynamic Properties of Natural Soils, Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin.
- [32] Tip, Ç., Kaya, Z. ve Kara, H. B., (2014). "Kaolin Kilinin Dinamik Mukavemet Özellikleri", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 30(1): 73-79.
- [33] Vucetic, M. ve Dobry, R. (1991). "Effect of Soil Plasticity On Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering, 117(1): 89-107.
- [34] AASHTO, (1996). Standard Specification for Highway Bridges, USA.
- [35] Sitharam, T. G., Govindaraju, L. ve Sridharan, A. (2004). "Dynamic Properties And Liquefaction Potential Of Soils", Current Science, 87(10): 1370-1378.
- [36] Tip, Ç., (2010). "Zeminlerin Dinamik Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [37] Kalkan, E., (2006). "Utilization of Red Mud as a Stabilization Material for the Preparation of Clay Liners", Engineering Geology, 87(3-4): 220-229.
- [38] Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H., (2005). "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları", Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, 09-12 Haziran 2005, İzmir, 419-423.
- [39] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A., (2009). "Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri" TÇMB/AR-GE/Y03.03, 4. Baskı, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- [40] Yeğinobalı, A., (2009). "Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı", TÇMB/AR-GE/Y01.01, 2. Baskı, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- [41] Yarbaşı, N., Kalkan, E. ve Akbulut, S., (2007). "Modification of the Geotechnical Properties, as Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives", Cold Regions Science and Technology, 48(1): 44-54.

- [42] Li, Y., Yang, Y., Yu, H. S., ve Roberts, G., (2016). "Monotonic Direct Simple Shear Tests on Sand Under Multidirectional Loading", International Journal of Geomechanics, 17(1): 04016038.
- [43] Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S. ve Raadim, B., (1987). "Comparison of Truly Undrained and Constant Volume Direct Simple Shear Tests", Geotechnique, 37(1): 3-10.
- [44] Geocomp, (2007). "Cyclic Direct Simple Shear User's Manual: Control and Report Software for Fully Automated Cyclic Direct Simple Shear Tests on Sheartrac II Systems Using MS-Windows 2000 Or XP Software Version 5.0", Boxborough, MA- USA.
- [45] Akbulut, S. ve Pamukcu, S. (2010). "Evaluation of Dynamic Properties of Geosynthetic Reinforced Clay Samples for Environmental Impact Practices", Environmental Earth Sciences, 61(7): 1449-1456.
- [46] Kurt, Z. N. ve Akbulut, S. (2014). "The Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Clay Nanocomposites", Clays and Clay Minerals, 62(4): 313-323.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gözde GERÇEK
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1993, Elazığ
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : gozdegercek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Geoteknik A.B.D	Yıldız Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016-...	YPU Yapı Proje Uygulama ve Tic. A.Ş	İnşaat Mühendisi
2015-2016	Vartaş İnşaat Tah. San. ve Tic. A.Ş.	İnşaat Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

Gerçek, G. ve Akbulut S., (2018). " Comparison of Index Properties and Compressive Strength of Stabilized Clay Samples with Granular Additives". 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering, , 24-27 April 2018, İzmir, 2: 481

