

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖRSELENMEMİŞ DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE ÇÖP SUYUNUN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Gürsel DEMİR**

**Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı: DEPREM MÜHENDİSLİĞİ**

HAZİRAN 2008

**ÖRSELENMEMİŞ DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE ÇÖP SUYUNUN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Gürsel DEMİR
(501041210)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ayfer ERKEN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü)
Doç.Dr. Kadir ALP (İ.T.Ü)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu tez konusunu bana öneren ve çalışmam boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda bilgi ve desteği ile yanımda olan sevgili hocam Sayın Prof. Dr. Ayfer ERKEN' e, laboratuvar çalışmam sırasında bilgi birikimleri ile bana yardım eden Araş. Gör. Zülküf KAYA' ya, değerli dostum Araş. Gör. Ahmet ŞENER' e, Zemin Mekaniği laboratuvarı tüm çalışanlarına ve son olarak tüm yaşamım boyunca bana doğru yolu gösteren, desteklerini her zaman üzerimde hissettiğim fedakâr, sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Haziran, 2008

Gürsel DEMİR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. ÇEŞİTLİ KİRLETİCİLERLE KİRLETİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Zemin-Su Sistemini Etkileyen Faktörler	3
2.2.1. Organik Madde	3
2.2.2. pH	4
2.2.3. İyon Değişimi	4
2.3. Zeminin Mekanik Davranışındaki Değişimler	4
2.3.1. Atterberg Limitleri	4
2.3.2. Kayma Mukavemeti	9
2.3.3. Permeabilite	12
2.3.4. Konsolidasyon Davranışı	19
2.4. Zeminin Dinamik Davranışındaki Değişimler	23
2.5. Sonuçlar	29
3. DENEY ALETİ VE DENEYLERDE KULLANILAN ZEMİN	30
3.1. Giriş	30
3.2. Deneylerde Kullanılan Zemin	30
3.3. Çöp Sızıntı Suyunun Özellikleri	32
3.4. Numune Hazırlanması	33
3.5.Çöp Sızıntı Suyu İle Karıştırılmış Zemin Numunelerinin Hazırlanması	33
3.6. Atterberg Limitleri	37
3.6.1. Likit Limit Deneyi	37
3.6.2. Plastik Limit Deneyi	39
3.7. Kesme Kutusu Deneyi	40
3.7.1. Kesme Kutusu Deney Aleti	40
3.7.2. Numune Hazırlanması	41
3.7.3. Deneyin Yapılışı	42

3.8. Ödometre Deneyi	43
3.8.1. Ödometre Aleti	43
3.8.2. Numune Hazırlanması	44
3.8.3. Deneyin Yapılışı	44
3.9. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi	45
3.9.1. Dinamik Üç Eksenli Dinamik Basınç Deney Sistemi	45
3.9.1.1. Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre	46
3.9.1.2. Elektriksel Ölçüm Birimi	48
3.9.2. Deney Sisteminin Kalibrasyonu	50
3.9.3. Numune Hazırlanması	51
3.9.4. Deneyin Yapılışı	52
3.9.5. Verilerin Toplanması	54
3.10. Sonuçlar	55
4. DENEY SONUÇLARI	56
4.1. Giriş	56
4.2. Kür Oranının Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi ($t=0$)	57
4.3. Kür Süresinin Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi	59
4.4. Statik Yükler Altında Zeminlerin Gerilme Şekil Değiştirme Davranışı ve Kayma Direnci	62
4.4.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranının Etkisi	62
4.4.2. Kayma Direnci Üzerinde Kür Oranının Etkisi	68
4.5. Ödometre Deney Sonuçları	71
4.5.1. Boşluk Oranı Değişimi Üzerinde Kür Oranının Etkisi	73
4.5.2. Permeabilite Katsayı Üzerinde Kür Oranının Etkisi	74
4.5.3. Konsolidasyon Katsayısı Üzerinde Kür Oranının Etkisi	77
4.6. Zeminin Dinamik Davranışları Üzerinde Kür Oranının Etkisi	78
4.6.1. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Oranının Etkisi	79
4.6.1.1. Temiz Zeminin Elastisite Modülü	81
4.6.1.2. Çöpsuyu Katılmış Zeminlerin Maksimum Elastisite Modülü	86
4.7. Sonuçlar	88
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	94
EKLER	97
ÖZGEÇMİŞ	128

KISALTMALAR

TKM	: Toplam katı madde
TUKM	: Toplam uçucu katı madde
TÇM	: Toplam çözünmüş madde
TUÇM	: Toplam uçucu çözünmüş madde
TAM	: Toplam askıda madde
TUAM	: Toplam askıda uçucu madde
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
BOİ	: Biyolojik oksijen ihtiyacı
Çöz.KOİ	: Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı
TP	: Toplam fosfor
TKN	: Toplam kjeldahl azotu

TABLO LİSTESİ**Sayfa No**

Tablo 2.1	: Fosforik Asit Katkılı Killerin Kıvam Limitleri	6
Tablo 2.2	: Fosfatın Zeminin ϕ ve c Değerleri Üzerine Etkisi	10
Tablo 2.3	: Kireç ve Sülfürik Asit Zeminin Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi	11
Tablo 2.4	: Ön Konsolidasyon Basıncının Kür Süresi İle Değişimi	23
Tablo 3.1	: Deney Numunesinin Endeks Özellikleri	31
Tablo 3.2	: K.Burgaz Çöp Sızıntı Suyu Bileşenlerine Ait Analiz Sonucu	32
Tablo 3.3	: Çamur Konsolidasyon Deneyi Verileri	35
Tablo 4.1	: Kür Oranı ve Kür Süresinin Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi.....	60
Tablo 4.2	: Kesme Kutusu Deneyi $w-\gamma_k$ Değerleri	64
Tablo 4.3	: Kesme Kutusu Deneyi $\tau_{maks}-\sigma$ Değerleri	67
Tablo 4.4	: Kesme Kutusu Deneyi ϕ Değerleri	70
Tablo 4.5	: Ödometre Deneyi $w-\gamma_k$ Değerleri	71
Tablo 4.6	: Ödometre Deney Sonuçları Hesaplanan c_v ve k Değerleri	72
Tablo 4.7	: Konsolidasyonsuz Drenajsız Dinamik Deney $w-\gamma$ Değerleri(UU)	80
Tablo 4.8	: Konsolidasyonlu Drenajsız Dinamik Deney $w-\gamma$ Değerleri (CU)..	81
Tablo 4.9	: Kür Oranı En Büyük Elastisite Modülü Değerleri	86
Tablo A.1	: Çamur Konsolidasyon Deneyi Oturma Değerleri	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Delektrik Sabitinin Likit Limite Etkisi	5
Şekil 2.2	: Fosfat Adsorbsiyonun Kaolinit İçindeki Dane Dağılımına Etkisi ..	6
Şekil 2.3	: Kimyasal Atıkların Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi	7
Şekil 2.4	: Uçucu Külün Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi	8
Şekil 2.5	: Atterberg Limiti Üzerine Çimento İçeriğinin ve Kür Süresinin Etkisi	9
Şekil 2.6	: Kireç ve Sülfürik Asittin c Üzerine Etkisi	11
Şekil 2.7	: Kireç ve Sülfürik Asittin ϕ Üzerine Etkisi	12
Şekil 2.8	: Boşluk Sıvısının Boşluk Oranı-Permeabilite Üzerine Etkisi	13
Şekil 2.9	: Küre Bırakılmamış Numunelerin Permeabilite Katsayısının Kireç İçeriği İle Değişimi	14
Şekil 2.10	: Kür Süresi ve Kireç İçeriği İle Permeabilite Katsayısının Değişimi	15
Şekil 2.11	: Permeabilitenin Kür Süresi İle Değişimi	16
Şekil 2.12	: Çöp Sızıntı Suyu İçindeki Askıda Madde Miktarının Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi	17
Şekil 2.13	: Geçirimsizlik Katsayısının Katkı Oranı İle Değişimi	18
Şekil 2.14	: Tuzun Permeabilite Üzerindeki Etkisi	19
Şekil 2.15	: Bentonit ve Na^+ Kaolinitte Sıkışabilirlik Eğrileri.....	20
Şekil 2.16	: Farklı Boşluk Sıvılarında Tek Yönlü Konsolidasyon Eğrileri	22
Şekil 2.17	: Şişme Yüzdesi-Sönmüş Kireç Katkısı İlişkisi	23
Şekil 2.18	: Konsolidasyon Basıncının Çimento Katkısı İle Değişimi	24
Şekil 2.19	: Kireç İçeriğinin G Üzerine Etkisi	25
Şekil 2.20	: Kireç İçeriğinin Sönüm Üzerine Etkisi	26
Şekil 2.21	: Kireç İçeriğinin G- γ Üzerine Etkisi	26
Şekil 2.22	: Kireç İçeriğinin G- γ Üzerine Etkisi	27
Şekil 2.23	: Kireç İçeriğinin G- γ Üzerine Etkisi	28
Şekil 2.24	: Kayma Modülü- Kireç Yüzdesi Arasındaki İlişki	28
Şekil 2.25	: Lif Katkısının Sönümlenme Oranına Etkisi	29
Şekil 2.26	: Lif Katkısının Dinamik Kayma Modülü Üzerine Etkisi	29
Şekil 2.27	: Lif Katkısının Young Modülü Üzerine Etkisi	31
Şekil 3.1	: Plastisite Kartı	31
Şekil 3.2	: Granülometri Eğrisi	34
Şekil 3.3	: Konsolidasyon Deney Aleti	36
Şekil 3.4	: Deney Sonu Konsolidasyon Numunesi	38
Şekil 3.5	: Casagrande Aleti	40
Şekil 3.6	: Kesme Kutusu Deney Aleti	42
Şekil 3.7	: Kesme Kutusu İçin Numune Hazırlanması	43
Şekil 3.8	: Ödometre Deney Aleti	44
Şekil 3.9	: Konsolidasyon Deney Numunesinin Hazırlanması	46
Şekil 3.10	: Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi	

Şekil 3.11	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Yandan ve Önden Görünüşü	47
Şekil 3.12	: Dinamik Yükleme Ölçüm ve Kayıt Birimi	49
Şekil 3.13	: Ölçüm Sistemi Dijital Panosu	50
Şekil 3.14	: Tıraşlama Aleti Kullanılarak Numune Hazırlanması	52
Şekil 4.1	: Çöp Sızıntı Suyu Oranın Likit Limit Üzerine Etkisi	57
Şekil 4.2	: Çöp Sızıntı Suyu Oranın Plastik Limit Üzerine Etkisi	58
Şekil 4.3	: Çöp Sızıntı Suyu Oranın Plastisite İndisi Üzerine Etkisi	59
Şekil 4.4	: Kür Süresinin Likit Limit Üzerine Etkisi	61
Şekil 4.5	: Kür Süresinin Plastik Limit Üzerine Etkisi	61
Şekil 4.6	: Kür Süresinin Plastisite İndisi Üzerine Etkisi	62
Şekil 4.7	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (Temiz Zemin)	63
Şekil 4.8	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi ($\sigma = 100$ kPa, $t = 30$) ...	65
Şekil 4.9	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi ($\sigma = 200$ kPa, $t = 30$) ...	66
Şekil 4.10	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi ($\sigma = 300$ kPa, $t = 30$) ...	66
Şekil 4.11	: Kür Oranının τ_{maks} Üzerine Etkisi ($t = 30$ gün)	67
Şekil 4.12	: Kırılma Zarfı (Temiz Zemin)	68
Şekil 4.13	: Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, $t = 30$ gün)	69
Şekil 4.14	: Kırılma Zarfı ($t = 30$ gün).....	69
Şekil 4.15	: Kür Oranın ϕ Üzerine Etkisi ($t = 30$ gün)	70
Şekil 4.16	: e-log P ($t = 30$ gün)	73
Şekil 4.17	: Konsolidasyon Basıncı İle Permeabilite Katsayısındaki Değişim ..	75
Şekil 4.18	: Kür Oranının Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi	76
Şekil 4.19	: Konsolidasyon Basıncı İle Konsolidasyon Katsayısındaki Değişim	78
Şekil 4.20	: Kür Oranının Konsolidasyon Katsayısı Üzerine Etkisi	79
Şekil 4.21	: Tekrarlı Yükleme İle Elde Edilen Histeresis İlmiği	80
Şekil 4.22	: En Büyük Elastisite Modülü Ölçüm Sonucu (Temiz Zemin).....	81
Şekil 4.23	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu Temiz Zemin)	82
Şekil 4.24	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonlu Temiz Zemin).....	82
Şekil 4.25	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz Temiz Zemin)	84
Şekil 4.26	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonsuz Temiz Zemin).....	84
Şekil 4.27	: Kür Oranının Maksimum Elastisite Modülü Üzerine Etkisi	86
Şekil 4.28	: Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi Konsolidasyonlu...	87
Şekil 4.29	: Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi Konsolidasyonsuz	88
Şekil A.1	: Çamur Konsolidasyon Deneyi Oturma – Zaman Eğrisi	98
Şekil A.2	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Temiz Zemin, $t = 30$ gün)	99
Şekil A.3	: Kırılma Zarfı (Temiz Zemin, $t = 30$ gün)	99
Şekil A.4	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 5, $t = 30$ gün)	100
Şekil A.5	: Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, $t = 30$ gün)	100
Şekil A.6	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 20, $t = 30$ gün)	101

Şekil A.7	: Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 30gün)	101
Şekil A.8	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 30gün)	102
Şekil A.9	: Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 30gün)	102
Şekil A.10	: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 30gün)	103
Şekil A.11	: Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 30gün)	103
Şekil B.1	: e-log P (Temiz Zemin, t: 30gün)	104
Şekil B.2	: e-log P (Çöp S: % 5, t: 30 gün)	104
Şekil B.3	: e-log P (Çöp S: % 20, t: 30 gün)	105
Şekil B.4	: e-log P (Çöp S: % 50, t: 30 gün)	105
Şekil B.5	: e-log P (Çöp S: % 100, t: 30 gün)	106
Şekil C.1	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu Temiz Zemin, t: 30 gün)	107
Şekil C.2	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonlu Temiz Zemin, t: 30 gün)	107
Şekil C.3	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	108
Şekil C.4	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonlu % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	109
Şekil C.5	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	110
Şekil C.6	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonlu % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	111
Şekil C.7	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	112
Şekil C.8	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonlu % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	113
Şekil C.9	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	114
Şekil C.10	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonlu % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	115
Şekil C.11	: Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonlu Zeminler, t: 30 gün), t: 30 gün)	116
Şekil C.12	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz Temiz Zemin, t: 30 gün)	117
Şekil C.13	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonsuz Temiz Zemin, t: 30 gün)	117
Şekil C.14	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	119
Şekil C.15	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonsuz % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	119
Şekil C.16	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	121

Şekil C.17	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonsuz % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	121
Şekil C.18	: Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	123
Şekil C.19	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonsuz % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	123
Şekil C.20	:Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	125
Şekil C.21	: Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Konsolidasyonsuz % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)	125
Şekil C.22	: Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Konsolidasyonsuz Zeminler, t: 30 gün).....	127
Şekil C.23	: Kür Oranının Maksimum Elastisite Modülü Üzerine Etkisi	127

SEMBOL LİSTESİ

γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ_{kmaks}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
w	: Su muhtevası
e	: Boşluk oranı
LL	: Likit limit
PL	: Plastik limit
PI	: Plastisite indisi
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
c	: Kohezyon
P	: Konsolidasyon basıncı
P_c	: Ön konsolidasyon basıncı
k	: Permeabilite katsayısı
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
σ	: Normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{maks}	: Maksimum kayma gerilmesi
ΔL	: Yatay deplasman
γ	: Yatay deformasyon
ϵ	: Eksenel boy değişimi
σ_d	: Dinamik tekrarlı gerilme
σ_c	: Çevre basıncı
$\pm \sigma_d/2\sigma_c$	: Dinamik kayma gerilme oranı
E	: Elastisite modülü
N	: Çevrim sayısı

ÖRSELENMEMİŞ DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE ÇÖP SUYUNUN ETKİSİ

ÖZET

Günümüzde, büyük şehirlerdeki artan nüfusa paralel olarak yeni yerleşim alanlarına duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. Bunun sonucunda ise yeni yapılar, ya kentsel dönüşüm projeleri ile mevcut eski çöp alanlarına doğru ilerlemeye ya da daha önce kirlenmiş mevcut su havzalarındaki zeminler üzerine inşa edilmeye başlamıştır. Yine artan nüfusla birlikte ortaya çıkan şehir atıkları ve kimyasal atıkların çevreye zarar vermeden uzaklaştırılması ve değerlendirilmesi amacı ile “Geri Kazanma, Değerlendirme, Yakma, Kompostlaştırma ve Düzenli Katı Atık Depolama” yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde ve diğer birçok ülkede katı atıkların depolanması için düzenli katı atık depolama tesisleri en ekonomik ve çevre için en uygun yöntem olarak kabul edilmektedir.

Katı atık depolama tesislerinde en önemli sorun yeraltı suyu kalitesini etkileyen sızıntı çöp sızıntı suyu oluşumudur. Çöp sızıntı suyunun bu zararlı etkilerini engellemek amacı ile permeabilitesi düşük malzemeden geçirimsiz kil şilte tabakaları oluşturulur. Oluşturulan şilte tabakalarının çöp sızıntı suyunu geçirme riskini en aza indirmek için çöp sızıntı suyu içindeki kimyasal maddeler ile zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü zeminin geoteknik özellikleri üzerinde organik maddeler, pH ve iyon değişimi genel olarak etkili olmaktadır. Örneğin iyon konstrasyonundaki bir artışla veya iyon boyutu ve dielektrik sabitindeki bir azalış ile difüze çift tabaka bastırılır ve permeabilite katsayısı artar.

Bu çalışmada düşük plastisiteli killerin farklı oranlarda sızıntı suyuna maruz kalması ve sızıntı suyu ile kil tabakanın etkileşim süresinin zeminin endeks özellikleri, statik ve dinamik davranışları üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Zeminin statik davranışları olarak; Atterberg limitleri, gerilme-şekil değiştirme, kayma mukavemeti parametreleri ve permeabilite konuları esas alınmıştır. Dinamik davranışlar olarak dinamik yükler altında zeminin gerilme-şekil değiştirme ve elastisite modülü incelenmiştir. Bu amaçla CL (düşük plastisiteli kil) sınıfı zemine, optimum su muhtevasının altında % 5, 20, 50 ve % 100’ ü oranında çöp sızıntı suyu katılarak örselenmemiş numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı küre bırakılmadan hemen deneye alınırken diğerleri 30 gün küre bırakılmıştır.

Sızıntı suyunun Atterberg Limitleri üzerindeki etkisini belirlemek amacı ile zemine % 5, 20, 50 ve % 100 oranında çöp sızıntı suyu karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı küre bırakılmadan hemen deneye alınmıştır. Diğer numuneler ise 1, 7, 30, 90 gün süre ile küre bırakılmıştır. Bu kür süreleri sonunda numuneler üzerinde likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır.

Likit limit deney sonuçları göstermiştir ki zemin içindeki çöp sızıntı suyu oranı arttıkça likit limit artmaktadır. Likit limit tüm çöp sızıntı suyu oranlarında kür süresindeki artışla artarak 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra, kür süresindeki artışla likit limit düşmeye başlamıştır. 90 günlük kür süresi sonunda ise likit limit başlangıç değerlerine geri dönmüştür. Plastik limit deneyleri sonucunda ise; çöp sızıntı suyu katkılı zemin numunelerinin plastik limit değerlerinin temiz zeminden daha yüksek olduğu görülmüştür. Çöp sızıntı suyu katılmış numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde çöp sızıntı suyu oranındaki artışla plastik limit değerinin arttığı gözlenmiştir. Plastik limit değeri de küre bırakılmamış numunelere göre kür süresindeki artışla artmıştır. Zeminin plastisite indisi de kür oranındaki artışla artmıştır. Kür süresindeki artışla likit limit de olduğu gibi 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra ise düşerek 90 günlük kür sonunda başlangıç değerlerine geri dönmüştür.

Çöp sızıntı suyunun zeminin statik yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve kayma direnci davranışı üzerine etkilerinin incelenmesi amacı ile kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bütün zemin numuneleri 1 gün konsolidasyona bırakılarak kesilmişlerdir. Bu deneyler için % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin bir kısmı küre bırakılmadan, bir kısmı ise 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakıldıktan sonra kesme kutusu deneyine alınmıştır. Bu deneylerde normal gerilme seviyeleri 100, 200 ve 300 kPa olarak alınmıştır. 100 kPa normal gerilme seviyesinde % 20 çöp sızıntı suyu içeren numunenin kayma mukavemeti temiz zemin numunesinden daha yüksektir. Çöp sızıntı suyu içeren numunelerde en büyük kayma gerilmesine temiz zemine göre daha yüksek deformasyon seviyelerinde ulaşılmıştır. Sonuç olarak, bütün normal gerilme seviyelerinde, çöp sızıntı suyu içeren tüm numunelerin maksimum kayma mukavemetleri kür oranındaki artışla artmıştır.

Kesme kutusu deney sonuçları kullanılarak zeminin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) üzerine çöp sızıntı suyunun etkisi incelenmiştir. Kür süresindeki artışla c ve ϕ deki değişim incelendiğinde ϕ nin kür süresindeki artışla arttığı, c nin ise sıfır olduğu görülmüştür.

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış numuneler ödometre deneyine tabi tutularak zeminin permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı üzerine çöp sızıntı suyu oranının ve 30 gün kür süresinin etkisi ile araştırılmıştır. Permeabilite küre bırakılmamış % 5 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinde temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise permeabilite % 5 çöp suyu oranına göre azalmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuca göre ise, çöp sızıntı suyu oranı arttıkça, permeabilite ve konsolidasyon katsayısı değerlerinin arttığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında son olarak zeminin dinamik elastisite modülü ve gerilme şekil değiştirme davranışı üzerine kür oranı ve 30 gün kür süresinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla % 5, 20 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında Çamur

konsolidemetre deney aleti ile hazırlanmış numuneler 30 gün süre ile küre bırakılarak dinamik üç eksenli deney sisteminde azalım deneylerine tabi tutulmuştur. Dinamik deney uygulamalarında birinci set numuneler ile konsolidasyonlu ve ikinci set numuneler ile konsolidasyonsuz olarak deneyler yapılmıştır. Numune içinden su geçirilmeyerek su geçişi sırasında numunenin yıkanarak çöp sızıntı suyunun etkisinin yok olmasının önüne geçilmiştir. Deney sonuçlarının karşılaştırılabilir olması için tüm deneylerde aynı dinamik yükler uygulanmıştır.

Elastisite modülü üzerinde kür oranının ve kür süresinin etkisinin belirlenmesi için en büyük elastisite modülü ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sırasında gerilme oranları plastik şekil değiştirmelere izin vermeyecek şekilde 5 çevrimde bir kademeli olarak arttırılarak uygulanmıştır. Zemine çöp sızıntı suyu katılması ile en büyük elastisite modülü temiz zemin numunesine ait değere göre azalmıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda başlangıç en büyük elastisite modülü üzerinde çöp sızıntı suyu oranının kür süresine göre daha etkin olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışmada çöp sızıntı suyunun kimyasal yapısı içindeki organik ve inorganik maddeler geçirimsiz kil tabakaların mühendislik özellikleri üzerinde etkilidir.

THE EFFECT OF LANDFILL LEACHATE ON THE DYNAMIC BEHAVIOURS OF UNDISTURBED LOW PLASTICITY CLAYS

SUMMARY

Today, the necessity for the new settlements is rising very fast cause of the increasing population in the big cities. As a result of this, the new buildings are started to build on the field of old garbage dump or around the water basins which were soiled before with the new urban transformation projects. Again, the methods of “Recycling, evaluation, burning, composting and regular solid waste land-fill” are widely used to utilise and remove normal and chemical wastes that are rising with increasing population, without harming the environment. Regular solid waste landfill is known as the most economic and the most suitable method for the environment in our country and many other countries.

The most important problem for the landfill foundations is leachate wastewater which affects the quality of groundwater. For the purpose of impeding the harmful effects of leachate wastewater, impermeable clay mattress layers are made up of materials with low permeability. Chemical substances in the wastewater and geotechnical properties of the soil must be determined to minimise the risk of waste water permeability of the mattress layers since organic substances, pH and ion change generally affect the geotechnical properties of soils. For example, with an increase ion concentration or a decrease in ion dimension and dielectric constant diffuse double layer is pressed and consequently permeability coefficient increases.

In this study, the confrontation of low plasticity clays with wastewater in different rations and the effects of the interaction time of the waste water with the clay layer on the static and dynamic behaviour of soil were investigated. Atterberg limits, stress-strain, shear strength parameters and permeability values were studied as the static behaviours of soil. Stress-strain and elasticity module of soil under dynamic load were studied as the dynamic behaviours. For this purpose; wastewater, which is 5 %, 20%, 50% and 100 % under optimum moisture content was added to CL (low plasticity clay) class soil and undisturbed samples were prepared with the consolidometer. While some of the prepared samples were immediately tested without leaving for curing, the others were released into curing for 30 days.

Wastewater were mixed with soil with 5 %, 20%, 50% and 100 % ratios and samples were prepared to determine the effect of wastewater on Atterberg limits. Some of the prepared samples were immediately tested without releasing into curing. The other samples were released into curing for 1, 7, 30, 90 days. At the end of this curing time, liquid limit and plastic limit testes were made. The results of liquid limit test

showed that the increase of waste water ratio in the soil causes the increase of liquid limit. Liquid limit increased with the increase of curing time for all of the wastewater ratios and reached maximum value at the end of 30 days-curing. After this curing time, liquid limit began to decrease with the increase of curing time. At the end of 90-days curing time, liquid limit returned to its initial value. From the results of plastic limit tests, it was seen that plastic limit values of wastewater added soil samples were higher than that of clear soil. When the wastewater added samples evaluated between them, it was observed that plastic limit value increased with the increase of wastewater ratio. Plastic limit value increased with the increase of curing time when compared with the samples that hadn't been released into curing. Plasticity index of the soil increased with the increase of curing ratio. At the end of the 30 days-curing, it reached its maximum value with the increase of curing time like the liquid limit. After this curing time, it decreased and returned to its initial value at the end of the 90 days-curing.

Direct shear tests have been conducted to examine the effects of wastewater on stress-strain and shearing resistance behaviour of soil under static loads. 5 %, 20%, 50% and 100 % wastewater ratio samples were prepared for these testes. Some of the prepared samples weren't released into curing and some were released into curing for 1, 7, 30 and 90 days. Then all of them were loaded during shear box test. In these tests, normal stress levels were taken as 100, 200 and 300 kPa. Shear strengths of 20% wastewater contained samples at 100 kPa normal stress level were higher than that of clear soil sample. Maximum shear stress of waste water contained samples was reached at higher deformation levels when compared to clear soil. In conclusion, maximum shear strengths of all waste water contained samples increased with the increase of curing ratio at all of the three stress levels.

The effect of wastewater on the cohesion (c) and angle of internal friction (ϕ) of soil were examined by the execution shear box tests. When the changes of c and ϕ with the increase of curing time, it was seen that ϕ increased and c was zero with the increase of curing time.

The samples which were prepared with 5 %, 20%, 50% and 100 % wastewater ratios subjected to odometer test and the effect of wastewater ratio and 30 days curing time on the permeability and consolidation coefficients of soils were investigated. Permeability of soil samples, which weren't released into curing and contain 5 % wastewater increased when compared to clear soil. At 20 % wastewater ratio, permeability decreased according to 5 % wastewater. In conclusion, at the end of all these tests; The permeability and consolidation coefficient of the samples increased with the increase of curing ratio.

In this study finally the effects of curing ratio and 30 days curing time on the dynamic elasticity module and stress-strain behavior of soil were studied. For this purpose, part of 5 %, 20%, 50% and 100 % wastewater ratio samples which were prepared with the consolidometer, were released into 30 days curing and subjected to

degradation tests in the three axial testing system. First set of the samples are not consolidated and the second set are consolidated during the dynamic tests. No water was passed through the sample. So as to preserve wastewater affect. The same dynamic loads were used in all of the tests in order to compare test results.

Maximum elasticity module measurement was made to determine the effect of curing ratio and curing time on the elasticity module. Stress ratios applied gradually (one at five cycles) without allowing plastic strain occurrence. When wastewater was added to soil, maximum elasticity module decreased with respect the value of clear soil sample. According to these data, it was seen that wastewater ratio was more effective than curing time on the initial maximum elasticity module.

Consequently, it has been determined in this study that organic and inorganic matters in the chemical composition of leachate wastewater affect the engineering properties of the impermeable clay layer.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde özellikle büyük şehirlerdeki nüfus artışına paralel kentlerdeki yerleşim alanlarının daralması ile yeni yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaç artmıştır. Bunun sonucunda ise yeni yapılar ya kentsel dönüşüm projeleri ile mevcut eski çöp alanlarına doğru genişlemiş ya da daha önce kirlenmiş mevcut su havzalarındaki zeminler üzerinde inşa edilmeye başlanmıştır. Ayrıca yine artan nüfusla birlikte ortaya çıkan şehir atıkları ve kimyasal atıkların çevreye zarar vermeden uzaklaştırılması ve değerlendirilmesi amacı ile “Geri Kazanma ve Düzenli Katı Atık Depolama” yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Katı ve sıvı atıkların depolanması günümüzün çevre problemlerinin başında gelmektedir. Atık maddelerin yanlış depolanması yeraltı ve yerüstü su kalitesinde büyük tehlikelere neden olmaktadır. Bu nedenle atıkların bertaraf edilmesi ve değerlendirilmesi için “Geri kazanma, Değerlendirme, Yakma, Kompostlaştırma ve Düzenli Katı Atık Depolama” yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekonomik ve uygulama tekniği nedeni ile “Düzenli Katı Atık Depolama” en çok tercih edilen yöntemdir.

Katı atık depolama tesislerinde en önemli sorun sızıntı çöp sızıntı suyu oluşumudur. Sızıntı suyu, ekolojik dengeye ve yeraltı suyu kalitesine etki etmektedir. Sızıntı suyunun bu tür etkilerini engellemek için şilte tabakaları kullanarak, tesis tecrit edilmektedir. Seçilen şilte tabakasının sızıntı suyunu geçirme riskini en aza indirmek amacı ile sızıntı suyunun kimyasal yapısı ve kullanılan şilte malzemesinin geoteknik özellikleri belirlenir.

Bu çalışmada Kemerköy Katı Atık Depolama Tesislerinde sızdırmazlık için kullanılan düşük plastisiteli kilden laboratuvarında çamur konsolidasyon alatinde farklı oranlarda sızıntı suyuna maruz kalarak hazırlanmış örselenmemiş zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde sızıntı suyu ile etkileşim süresinin etkileri incelenmiştir. Bu amaçla zemine farklı oranlarda çöp sızıntı suyu karıştırılıp hemen

ya da belirlenen kür süresi sonunda deneye alınmıştır. Hazırlanan zemin numunelerinin statik ve dinamik yükler etkisi altında davranış değişimlerini belirlemek amacı ile kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışma konusu ve amacı belirtilmiştir. İkinci bölümde ise çalışma konusu ile ilgili genel bilgileri edinmek amacı ile kirletici maddeler ve özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde çeşitli kirletici maddeler kullanılarak zeminin statik ve dinamik yükler etkisi altında davranışındaki değişimleri inceleyen çalışmalara yer verilmiştir. Zeminin kıvam limitleri, kayma mukavemeti parametreleri, konsolidasyon davranışı, permeabilite katsayısındaki değişimler ele alınmıştır. Zeminin dinamik davranışının incelendiği çalışmalar dahilinde ise en büyük elastisite modülü değişimi konularına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümün ilk konusu olarak Kemberburgaz Katı Atık Depo Tesisinden getirilen dolgu malzemesi ve sızıntı çöp sızıntı suyunun özellikleri verilmiştir. Daha sonra ise deney numunelerinin hazırlanma teknikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Son olarak kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney aletleri ile deneylerin yapılış teknikleri açıklanmıştır.

Deney sonuçlarının yer aldığı dördüncü bölümde ise ilk olarak kıvam limitleri deney sonuçlarından yararlanılarak çöp sızıntı suyu ve kür süresi ile zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisindeki değişimler ele alınmıştır. Zeminin kayma mukavemeti parametreleri olan içsel sürtünme açısı ve kohezyon ise kesme kutusu sonuçlarından yararlanılarak incelenmiştir. Konsolidasyon deney sonuçları kullanılarak zeminin şişme basıncı, ön konsolidasyon basıncı, permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı üzerine çöp sızıntı suyu oranının ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. Son olarak dinamik üç eksenli deney sonuçları kullanılarak en büyük elastisite modülü üzerinde çöp sızıntı suyu oranı ve kür süresinin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Sonuç bölümünde ise diğer bölümlerde yer alan bilgiler doğrultusunda 4. bölümdeki deney sonuçları arasındaki ilişkiler yorumlanmaya çalışılmıştır.

2. ÇEŞİTLİ KİRLETİCİLERLE KİRLETİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

Killi zeminler inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım sırasında zemin çeşitli maddelerin etkisinde kalmaktadır. Bu maddelerin başında sıvı ve katı atıklar ile zemin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan katkı malzemeleri gelmektedir. Bu maddeler zeminin mekanik ve dinamik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır.

Bu bölümde sıvı ve katı atıklar ile çeşitli katkı malzemelerinin zeminin mekanik ve dinamik davranışı üzerine etkisini inceleyen çalışmalar ele alınmıştır. Bu amaçla Atterberg limitleri, permeabilite, konsolidasyon davranışı, kayma mukavemeti ve dinamik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir.

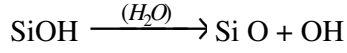
2.2. Zemin-Su Sistemlerini Etkileyen Faktörler

2.2.1. Organik Madde

Genel olarak organik maddelerin varlığı mühendislik özellikleri üzerinde zararlı etkiye sahip kabul edilmektedir. Zeminde mevcut organik madde kimyasal ve fiziksel olarak kompleks olup yaşa ve orjine göre değişebilir organik maddeler zemin içinde; karbonhidratlar, proteinler, yağlar, reçineler ve hidrokarbonlar olarak bulunabilir. Zemin içindeki organik maddeler; yüksek plastisiteye, yüksek derecede rötreye, yüksek derecede sıkışabilirliğe, düşük permeabiliteye ve düşük mukavemete neden olabilir. Atterberg limitleri üzerinde büyük miktarda düşmeye neden olabilir. Organik madde kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç dayanımını süratle düşürür, optimum su muhtevasını artırır.

2.2.2. pH

pH değeri, killi çözeltilerin davranışları üzerinde büyük öneme sahiptir (Yılmaz, 1992). Düşük pH ortamında flok yapı oluşur. Stabl süspansiyonlar ise yüksek pH şartlarına ihtiyaç duyarlar. Kil-su sisteminin davranışı pH etkisi düşünülmeden açıklanamaz. Kil partiküllerinin üzerine yapışık olan OH⁻ iyonun



Şeklinde ayrışma eğilimi içinde olup bu reaksiyon pH değerinden önemli derecede etkilenir. pH artışı ile H⁺ iyonun karışıma girme miktarı artar. Bu durumda partikülün net negatif yükü artar.

pH' ın etkisi kaolinitte maksimum, illitte daha az olup montmorillinitte ise oldukça azdır. Kaolinitte süspansiyondan oluşan yapıyı tayin eden en önemli etken pH olarak kabul edilir.

2.2.3. İyon Değişimi

Katyonların zemin özellikleri üzerine etkisi kilin artan aktivitesi ile artar. Katyonların en önemli özellikleri değerlikleri ile boyutlarıdır. Şişebilen kil mineralleri içeren zeminlerde katyonun çeşidi, şişme miktarı üzerinde etkilidir. Örneğin, Na⁺ ve Li⁺ montmorillinit su mevcut iken sınırsız şişebilirken 2 veya 3 değerlikli katyonlar durumunda şişme miktarı 18⁰A dan fazla olamaz. Şişmeyen kil minerallerinden oluşan zeminlerde ise adsorbe katyonun çeşidi süspansiyon davranışında ve oluşacak yapının belirlenmesinde büyük öneme sahiptir.

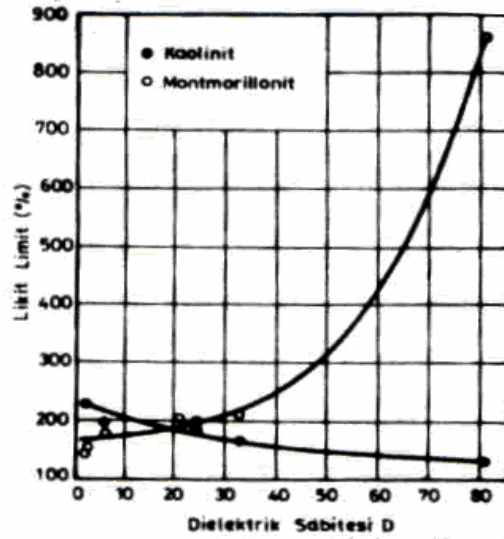
Tek değerlikli katyonlar deflikasyon oluştururken iki veya üç değerlikli katyonlar killerde flokülasyon oluştururlar.

2.3. Zeminin Mekanik Davranışındaki Değişimler

2.3.1. Atterberg Limitleri

Likit Limit (LL) ve Plastik Limit (PL) değerleri belirli herhangi bir kil minerali ve belirli bir adsorbe katyonu için geniş bir aralıkta değişim gösterir. LL değer aralığı PL değer aralığına göre daha büyüktür ve farklı kil mineralleri için LL' deki değişebilirlik PL' deki değişebilirliğe göre daha fazladır.

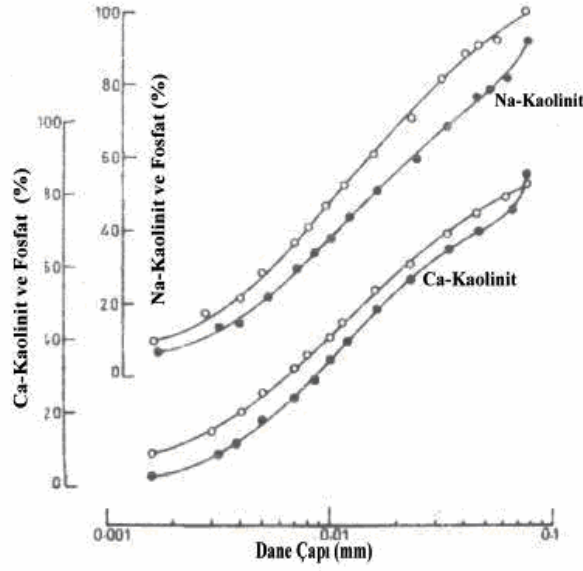
Boşluk sıvısının dielektrik sabitinin likit limit üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Sridharan ve Rao (1975) konik penetrometre ile farklı organik çözelti içindeki kaolinit ve montmorillonit türü killerin likit limit değerlerini belirlemişlerdir. Şekil 2.1’ de bu deneye ait sonuçlar gösterilmiştir. Dielektrik sabitindeki artım kaolinit kilinin likit limitinde azalmaya neden olurken, montmorillonit kilinin likit limitinde ise artışa neden olmaktadır.



Şekil 2.1 : Dielektrik Sabitinin Likit Limite Etkisi (Sridharan ve Rao, 1975)

Rao (1982) tarafından yapılan çalışma sonucunda fosfat katılmış killerin modifiye olmuş davranışları özetlenirse;

1. Kaolinit türü killerde katyon etkisi ihmal edilebilirken, montmorillonit türü killerde katyon etkisi oldukça önemlidir.
2. Fosfat adsorbsiyonu özgül ağırlığın azalmasına neden olur.
3. Fosfat adsorbsiyonu ile kaolinit türü kil daneleri büyür (Şekil 2.2)
4. Fosfat adsorbsiyonu sonucunda kaolinit türü killerde kil danelerinin flokülasyonu nedeni ile likit limitin yanı sıra yüzey alanı ve serbest şişme artar. Na-Montmorillonit kilinde ise agregasyon nedeni ile likit limit ve serbest hacimsel şişme azalır. Ca-Montmorillonit kilinde ise iki değerlikli katyonun tek değerlikli ile değişmesi sonucunda başlangıçta alınan değerler azalmış ve daha sonra artmıştır.
5. Anyon adsorbsiyonu ile tüm killer daha az plastik olmuştur.



Şekil 2.2 : Fosfat Adsorbsiyonunun Kaolinit İçindeki Dane Çapı Dağılımına Etkisi (Rao, 1982)

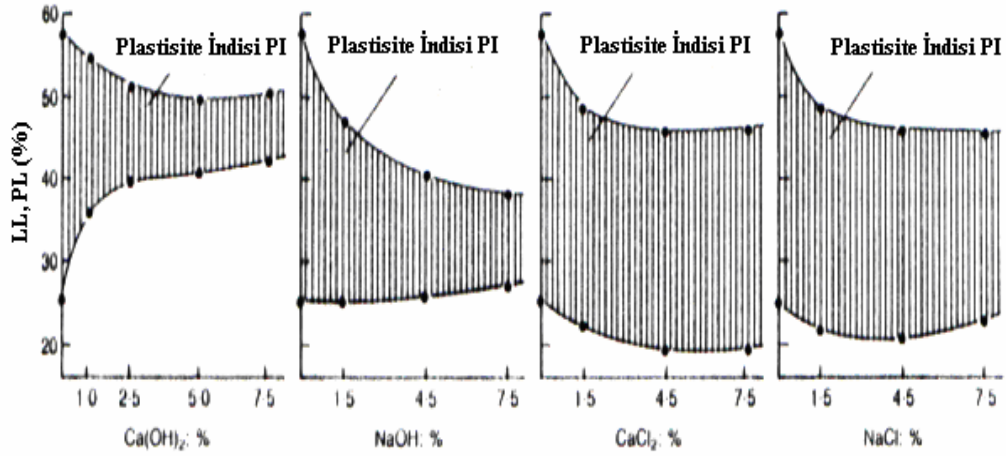
Tablo 2.1' de Fosforik asit karıştırılmış Montmorillinit ve kaolinit killeriine ait fizikokimyasal özellikler gösterilmiştir.

Tablo 2.1 : Fosforik Asit Katkılı Killerin Kıvam Limitleri (Rao, 1982)

Kil cinsi	Kür Süresi	LL (%)	PL (%)
Na Kaolinit			
1	0	52	39,3
2	1000	90	NP
Ca Kaolinit			
3	0	48	35
4	1000	93	NP
Na Montmorillonit			
5	0	354	52
6	1000	73	NP
Ca Montmorillonit			
7	0	114	49
8	1000	106	NP

Brandl (1992) kimyasal atıkların depo alanlarındaki geçirimsiz kil tabakaların Atterberg limitleri üzerine etkilerini ve plastisite indisi ile permeabilite arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu amaçla siltli zemin $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , CaCl_2 ve NaCl ile karıştırılarak 60 gün küre bırakılmıştır. Kür süresinin sonunda likit limit ve plastik limit deneylerine tabi tutulmuştur. Şekil 2.3' de dört kimyasal maddenin farklı

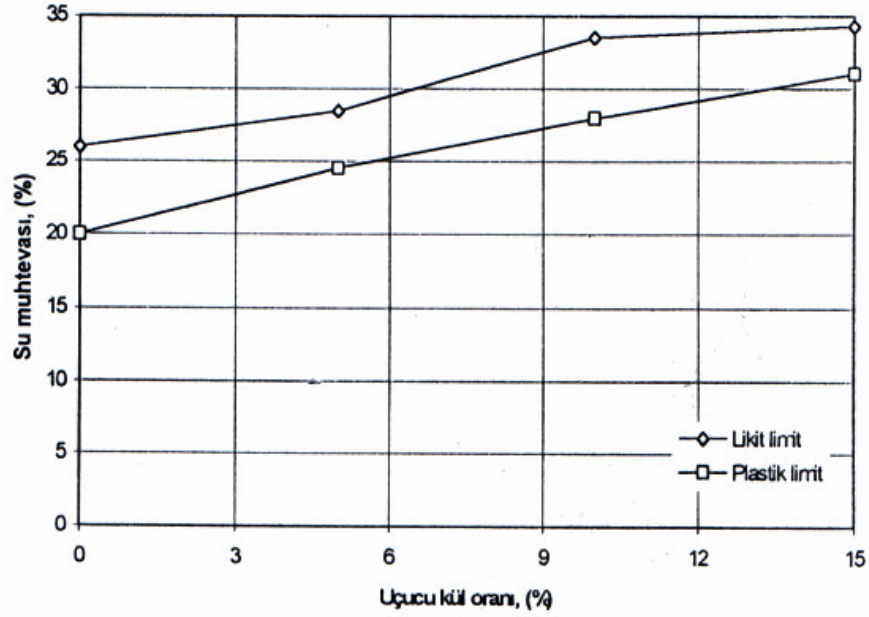
oranlarda karıştırılması ile Atterberg limitlerindeki değişimler verilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre likit limit değerindeki önemli azalmalardan dolayı plastisite indisi azalmaktadır.



Şekil 2.3 : Kimyasal Atıkların Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi (Brandl, 1992)

Bell (1996) yaptığı çalışmada kirecin montmorilinit türü zeminin plastisitesini düşürdüğünü, kaolinit ve kuvars türü killerin ise plastisitesini arttırdığını belirlemiştir. Ayrıca her üç zeminde optimum su muhtevasının arttığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını gözlemlemiştir.

Erşan (1996) uçucu kül katkısının zeminin kıvam limitleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla zemine farklı oranlarda uçucu kül katılarak hazırlanmış numuneler üzerinde likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Şekil 2.4' de görüldüğü gibi uçucu kül oranı arttıkça zeminin likit limit ve plastik limit değerleri artmaktadır. Likit limitteki artış oranı % 32 olurken plastik limitteki artış % 55 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık plastisite indisi uçucu kül oranındaki artışla azalmıştır.

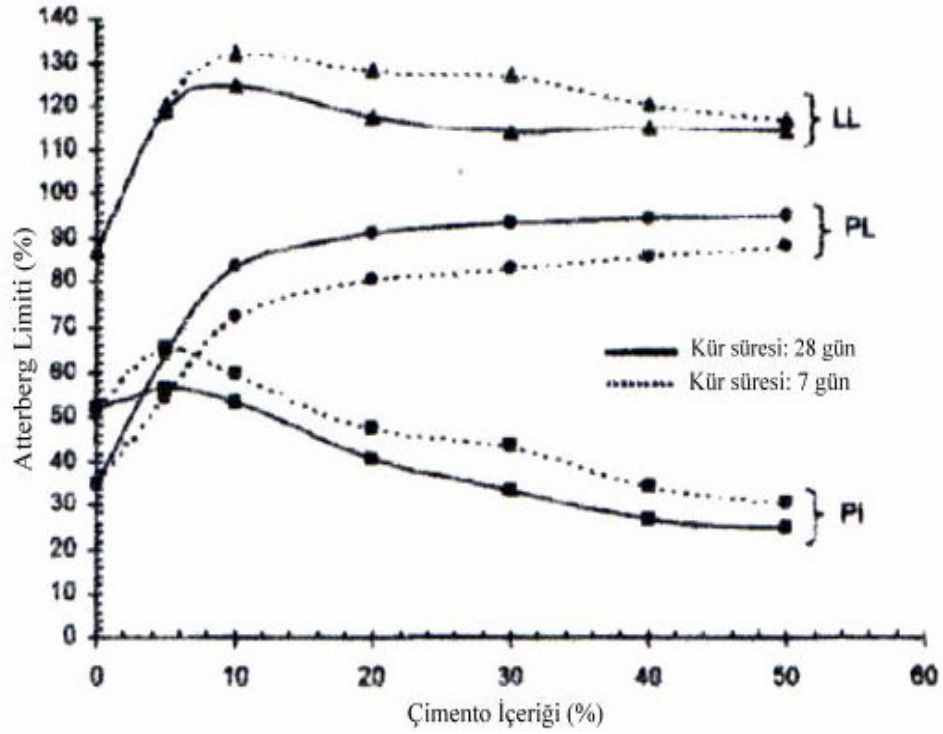


Şekil 2.4 : Uçucu Külün Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi (Erşan, 1996)

Chew ve diğ. (2004) kireç katkısının deniz killерinin mühendislik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Deneylerde kullanılan zeminin likit limiti % 87, plastik limiti % 35 ve plastisite indisi % 52 olarak belirlenmiştir. 105 C⁰ etüvde kurutulmuş zemin numunesi içine su eklenerek su içeriği % 90 ve % 120 olan numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra bu karışım içine su/kireç oranı 1 olarak hazırlanan çimento şerbeti eklenerek 10 dakika karıştırılarak üniform bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Numunelerin likit limitinin belirlenmesinde düşen koni penetrasyon deneyi uygulanmıştır.

Şekil 2.5’ de kireç içeriği ve kür süresinin kıvam limitlerine olan etkisi görülmektedir. Plastisite indisi (PI) % 5 çimento içeriğine kadar artmıştır. Bu değerden sonra plastisite indisi düşmüştür. Plastik limit (PL) çimento içeriğindeki artışla artmıştır. Kür süresi 28 gün olan numunelerin PL değeri kür süresi 7 gün olan numunelerden büyüktür.

Likit limit % 10 ve daha düşük çimento içeriklerinde önemli miktarda artarken, daha büyük çimento içeriklerinde düşmektedir. Likit limit değeri kür süresi ve çimento miktarındaki artışla düşmektedir.



Şekil 2.5 : Atterberg Limiti Üzerine Çimento İçeriğinin ve Kür Süresinin Etkisi
(Chew ve diğ, 2004)

2.3.2. Kayma Mukavemeti

Kil zeminlerin kayma mukavemeti üzerinde katkı maddelerinin etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Bu bölümde konu ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

Rao (1982) fosfatla hemoiyonize edilen doymun killen üzerinde yaptıkları çalışma sonucunda anyon adsorbsiyonunun killerin kayma mukavemetini arttırdığını doğrulamışlardır. Çalışmalar sonucunda elde edilen tipik sonuçlar Tablo 2.2' de belirtilmiştir.

Tablo 2.2 : Fosfatın Zeminin ϕ ve c Değerleri Üzerine Etkisi
(Rao, 1982)

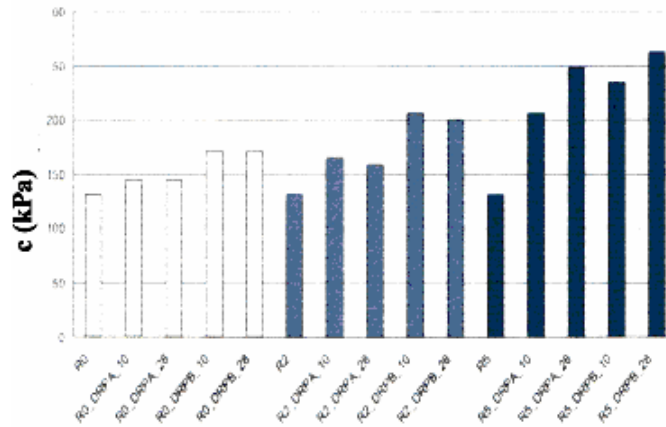
Zemin Cinsi	c (kg/cm²)	ϕ (°)
Na Kaolinit Doğal halde İşlenmiş halde	0,02 0,27	30,5 38
Ca Kaolinit Doğal halde İşlenmiş halde	0 0	22 41
Na Montmorillonit Doğal halde İşlenmiş halde	0,07 0,07	18,5 39,5
Ca Montmorillonit Doğal halde İşlenmiş halde	0,03 0,16	18,5 44

Puppala ve Hanchanloet (1999) farklı katkı maddelerinin zemin davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacı ile kireç ve sülfürik asit ile karıştırılmış siltli kil numuneleri üzerinde incelemeler yapmışlardır. Tablo 2.3’ de bu çalışma sonucunda elde edilen fiziksel özelliklere ait değerler verilmiştir. Sülfürik asit ile kimyasal tepkimeye girmiş zeminin optimum su muhtevası artarken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmıştır. Kireç ve sülfürik asitle hazırlanmış her iki numunede de likit limit ve plastik limit biraz düşüş göstermiştir. Sülfürik asitle hazırlanmış zemin numunesinin serbest basınç dayanımı % 70–120 oranında artarken, kireçle hazırlanmış numunede ise % 30–50 oranında artmıştır. Yapılan UU deneyleri sonucunda kohezyondaki artış % 10–98 ve içsel sürtünme açısı da benzer oranda artış göstermiştir. Şekil 2.6’ da sülfürik asit ve kireç oranına bağlı olarak zeminin kohezyon değişimi, Şekil 2.7’ de içsel sürtünme açısının değişimi görülmektedir.

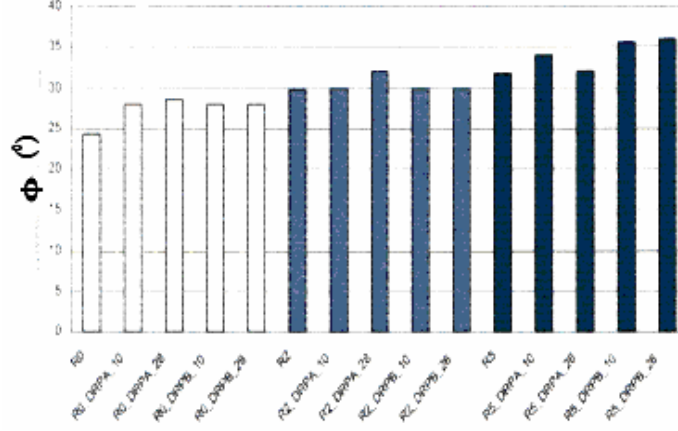
Tablo 2.3 : Kireç ve Sülfürik Asittin Zeminin Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi
(Puppala ve Hanchanloet, 1999)

Zemin Türü	W_L (%)	PI (%)	γ_{maks} (kN/m ³)	W_{opt} (%)
R0	26.6	9.4	20.2	9.4
R0-DRPA-10	23.6	7.4	20.4	9.7
R0-DRPA-28	23.6	7.7	20.0	10.1
R0-DRPB-10	24.1	7.3	20.6	9.1
R0-DRPB-28	24.1	7.4	20.4	9.3
R2	23.0	3.0	19.0	12.3
R2-DRPA-10	21.4	2.0	18.7	12.9
R2-DRPA-28	21.2	2.0	18.7	13.4
R2-DRPB-10	21.1	2.0	19.1	13.1
R2-DRPB-28	21.6	2.0	19.0	13.1
R5	21.0	2.0	17.7	15.5
R5-DRPA-10	20.0	1.0	17.9	15.7
R5-DRPA-28	20.0	1.0	17.6	16.0
R5-DRPB-10	20.0	0.6	17.8	15.9
R5-DRPB-28	19.0	0.7	17.4	16.7

* R0: Saf zemin, R2: % 2 kireç+ saf zemin, R5: % 5 kireç+ saf zemin, DRPA: 1: 200 sülfürik asit + kireç (%) + saf zemin, B: 1:300 sülfürik asit + kireç (%) + saf zemin.



Şekil 2.6 : Kireç ve Sülfürik Asittin c Üzerine Etkisi (UU Deneyi)
(Puppala ve Hanchanloet, 1999)



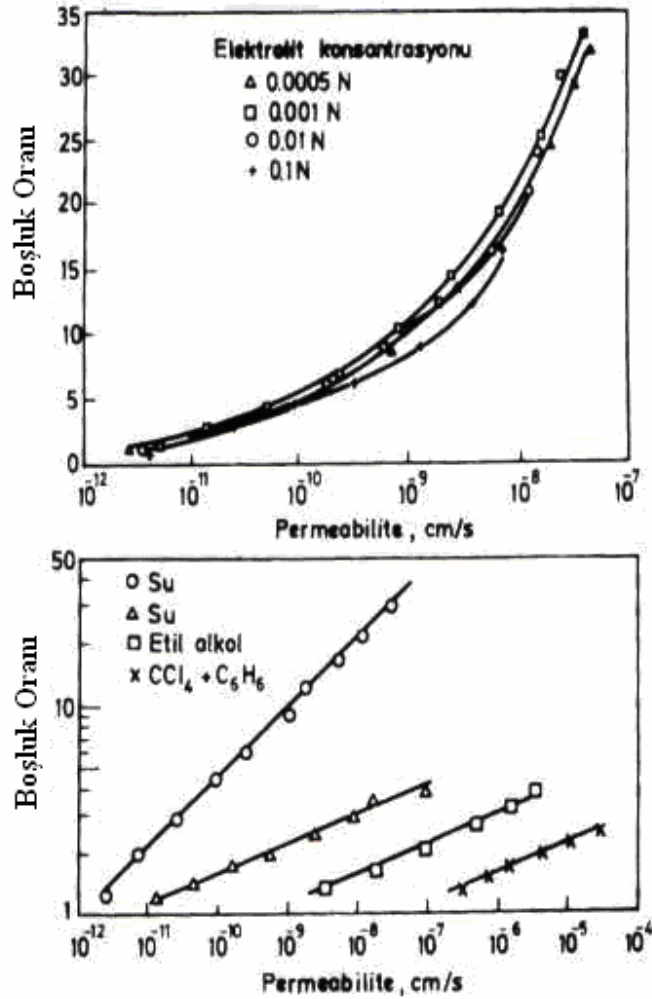
Şekil 2.7 : Kireç ve Sülfürik Asit'in ϕ Üzerine Etkisi (UUDeneyi)
(Puppala ve Hanchanloet, 1999)

Erken ve diğ. (2006), Kaya ve diğ. (2006) Kemerköy çöp sahasından elde edilen çöp suyu ile şiltede kullanılan yüksek plastisiteli siltten karıştırılarak hazırlanan zemin numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Temiz zemin ve çöp suyu % 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100 olmak üzere değişik oranlarda karıştırılarak standart proktor deney aleti ile hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde kıvam limiti, ödometre ve kesme kutusu deneyleri yapılmış ve zeminlerin kıvam limitleri, permeabilitesi ve kayma direnci parametreleri üzerinde çöp suyu oranı ile 1, 7, 30 ve 90 gün olan kür sürelerinin etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre zemin içindeki çöp sızıntı suyu oranı arttıkça likit limit ve plastisite indisi artmaktadır. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla zeminin kohezyonu artmış, içsel sürtünme açısı (ϕ) ise azalmıştır. % 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış zemin numunelerinin permeabilite katsayısı düşük basınçlar altında temiz zeminin permeabilitesine oranla artış göstermiştir.

2.3.3. Permeabilite

Yüzeysel kirlenme probleminde en önemli zemin parametresi permeabilite katsayısıdır. Çünkü kirleticilerin zemine sızması ancak zeminin permeabilitesine bağlıdır. Bu nedenle atık depo alanlarında yeraltı suyunun kimyasal kirleticiler tarafından kirletilmesini önlemek için permeabilitesi düşük kil malzemeden geçirimsiz tabakalar yapılmaktadır.

Sridharan ve Jayadeva (1982) Killerin permeabilitesi difüze çift tabakanın kalınlığına, iyon valansına, iyonik konstrasyona ve boşluk sıvısının yapısına bağlıdır. İyon konstrasyonundaki ve/veya valans değerindeki bir artış ile veya iyon boyutu ve dielektrik sabitindeki bir azalış ile difüze çift tabaka bastırılır ve permeabilite katsayısı artar. Şekil 2.8' de montmorillonit türü kilin farklı dielektrik sabitlerine sahip olan sıvılar için boşluk oranı- permeabilite ilişkisi verilmektedir.

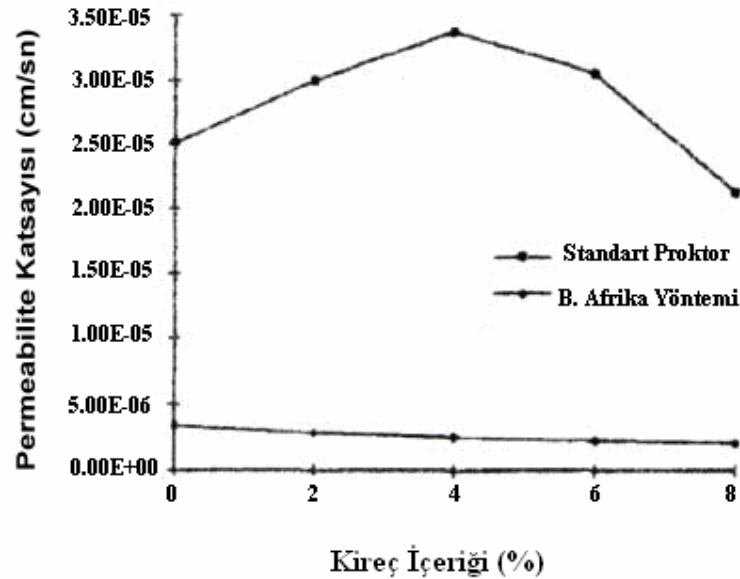


Şekil 2.8 : Boşluk Sıvısının Boşluk Oranı- Permeabilite Üzerine Etkisi
(Sridharan ve Jayadeva, 1982)

Osinubi (1998) tortul zeminlerin permeabilitesinin kireç oranı, kür süresi ve kompaksiyon enerjisi ile değişimini incelemiştir. Deneylerde likit limiti % 44, plastik limiti % 24 ve plastisite indisi % 20 olan düşük plastisiteli kil (CL) kullanmıştır. Kompaksiyon enerjisinin permeabiliteye etkisini araştırmak için numuneler Standart

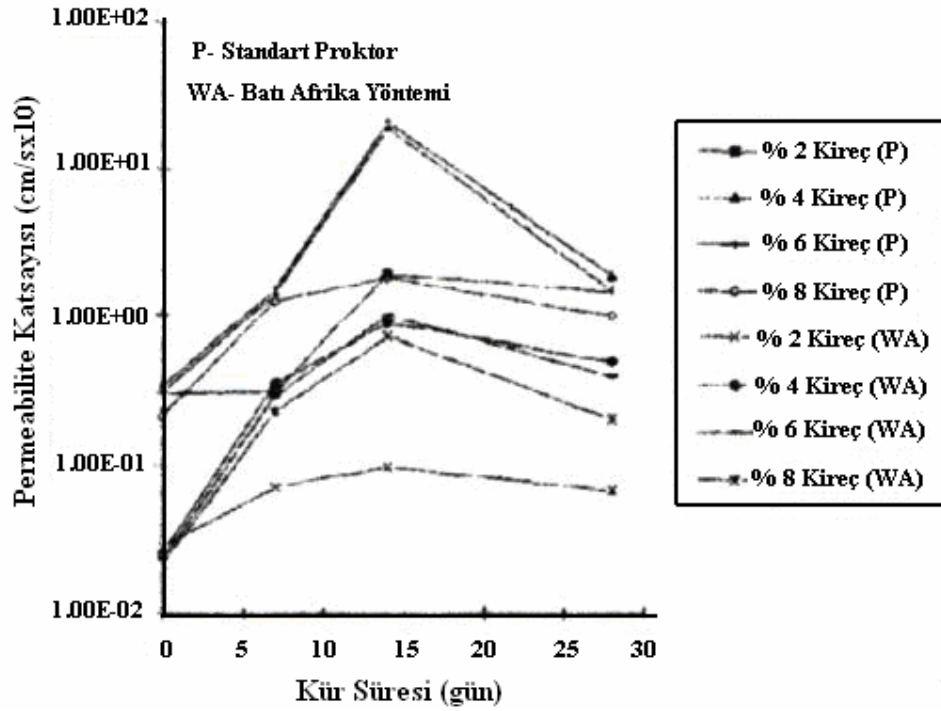
Proktor ve Batı Afrika standartlarına göre iki grup olarak hazırlanmıştır. Standart Proktor yönteminde zemin üç tabaka olarak serilir ve 30.5 cm yükseklikten 2.5 kg'lık tokmak her tabakaya 25 kez düşürülerek tabakaların kompaksiyonu sağlanır. Batı Afrika standartlarına göre tabaka sayısı beş, tokmak ağırlığı 4.5 kg ve düşüş yüksekliği 45 cm'dir. Her bir tabaka için tokmak 45 cm yükseklikten düşürülerek kompaksiyon sağlanır. Kireç oranı % 0, % 2, % 4, % 6 ve % 8 olan numuneler hazırlanarak iki Proktor yöntemi kullanılarak numuneler kompakte edilmiştir. Hazırlanan numuneler 0, 7, 14 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Numunelerin permeabilite değişimlerini belirlemek için düşen seviyeli permeabilite yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 2.9'da kireç içeriği ile permeabilitenin değişimi küre bırakılmamış numuneler için verilmiştir. Standart Proktor ile hazırlanmış numunelerde % 4 kireç içeriğinde permeabilite katsayısı (3.38×10^{-5} cm/s) maksimum değerine ulaşmıştır. Bu değer üstündeki kireç içeriklerinde ise permeabilite düşmüştür. Batı Afrika yönteminde ise kireç katkısı olmayan numunenin permeabilite katsayısı (3.38×10^{-6} cm/s) maksimumdur ve kireç içeriği arttıkça permeabilite düşmüştür.



Şekil 2.9 : Küre Bırakılmamış Numunelerin Permeabilite Katsayısının Kireç İçeriği İle Değişimi (Osinubi, 1998)

Şekil 2.10' da ise kür süresi ve kireç içeriği ile permeabilite katsayısının değişimi verilmiştir. Standart Proktor ile hazırlanan numunelerde maksimum permeabiliteye % 4 kireç içeriğinde ulaşılmıştır. Batı Afrika Standartlarına göre hazırlanan numunelerde ise % 6 kireç içeriğinde maksimum değere ulaşılmıştır. Her iki kompaksiyon yönteminde de 14 gün kür süreli numunelerin permeabilitesi en yüksektir ve kür süresi 28 gün olan numunelerin permeabilitesi düşmüştür.



Şekil 2.10 : Kür Süresi ve Kireç İçeriği İle Permeabilite Katsayısının Değişimi (Osinubi, 1998)

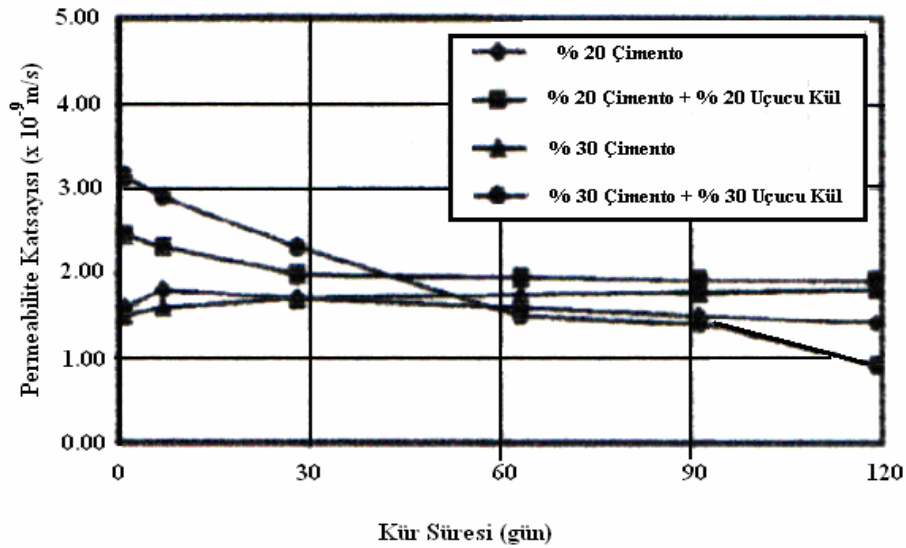
Aytekin (2002) şişen killi zeminin değirmen artığı ile belli oranlarda (% 5, % 15 ve % 25) karıştırılması ile zeminin geçirimliliğindeki değişimi incelemiştir. Değirmen artığı, klinker üretiminde kullanılan kalker, tras ve kireçtaşının çimento fabrikalarında işlenmesi sonucu oluşan atık maddeler olarak adlandırılmaktadır.

Permeabilite deneyleri sonucunda görülmüştür ki değirmen artığı oranı arttıkça geçirimlilik katsayısı artmaktadır. % 15 katkı oranında en büyük geçirimlilik katsayısı elde edilmektedir. % 15 katkı için geçirimlilik 2.25×10^{-7} cm/s olmakta, bu da katkısız durumdaki zeminin geçirimlilik katsayısı olan 1.10×10^{-7} cm/s değerine göre 1.25×10^{-7} cm/s artış demektir.

Show ve diğerleri (2003) evsel katı atıkların yakılması ile elde edilen uçucu kül ve çimento katkısının kil zeminin permeabilitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla % 20 çimento, % 20 çimento + % 20 uçucu kül, % 30 çimento ve % 30 çimento + % 20 uçucu kül kullanarak numuneler hazırlamışlardır. Hazırladıkları bu numuneleri 1, 7, 30, 90 ve 120 gün küre bırakarak kür süresi ve uçucu kül oranının permeabiliteye olan etkisini araştırmışlardır.

Şekil 2.11’ de konsolidasyon deneyi sonunda permeabilite değerlerinin kür süresi ile olan değişimi gösterilmiştir. Sadece çimento katkılı zemin numunelerinin permeabilitesi kür süreleri ile fazla değişim göstermemiştir. Çimento ve uçucu kül katkılı zemin numunelerinin permeabilitesi kür süresi ile düşmektedir. Uçucu kül konsolidasyon deneyi başında boşlukları artırır ve puzolanik reaksiyonun artması ile boşlukları doldurur. Reaksiyonun tamamlanması ile permeabilite düşer.

Katkısız zemine ait permeabilite değeri 1.97×10^{-10} m/s’ dir. Bu değer deney sonuçları ile karşılaştırıldığında evsel atık uçucu külün drenaj özelliklerini artırıcı role sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca evsel uçucu kül çimentoya oranla daha fazla permeabilite değerini düşürmektedir.



Şekil 2.11 : Permeabilitenin Kür Süresi İle Değişimi (Show ve diğ., 2003)

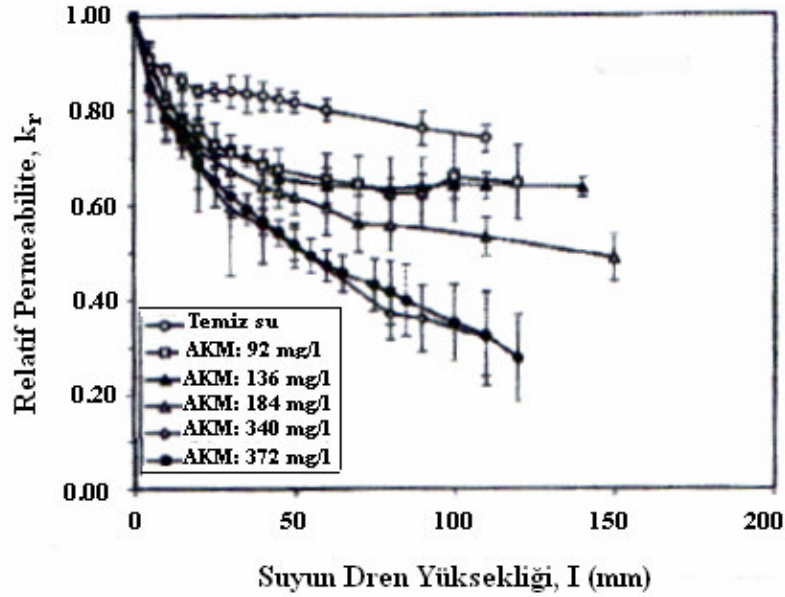
Viviani ve Iovino (2004) çöp sızıntı suyu içindeki askıda katı madde miktarının permeabilite katsayısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla farklı oranlarda askıda katı madde oranına sahip evsel atıklara ait sızıntı suları kullanılarak kil

numuneler üzerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde permeabilite katsayısı denklem 2.1’ de gösterildiği gibi relatif olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda Şekil 2.12’ de gösterilen grafik elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi askıda katı madde miktarındaki artışla permeabilite katsayısı azalmıştır.

$$k_r = \frac{k_s}{k_{s0}} \quad (2.1)$$

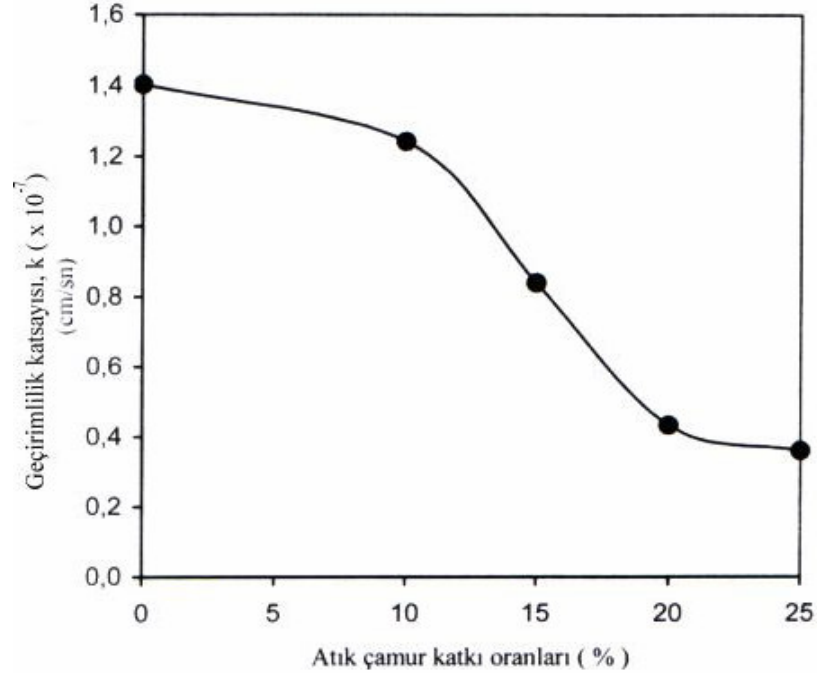
k_{s0} : Numunenin doymun haldeki permeabilite katsayısı

k_s : Suyun ölçülen bir dren yüksekliğine karşı gelen permeabilite katsayısı



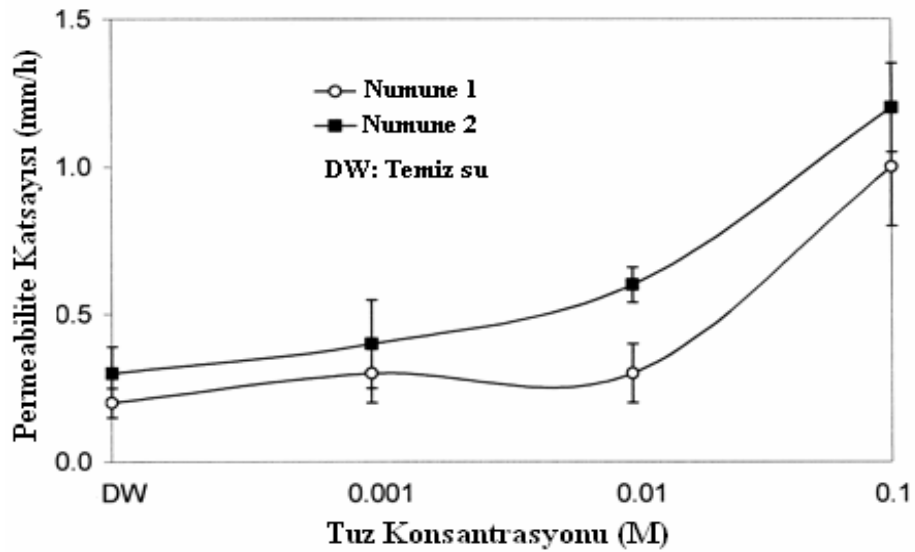
Şekil 2.12 : Çöp Sızıntı Suyu İçindeki Askıda Madde Miktarının Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi (Viviani ve Iovino, 2004)

Angın ve Üçüncü (2004) tarafından düşük plastisiteli kil (CL) zemine farklı oranlarda (% 10, % 15, % 20, % 25) atık çamur katılarak permeabilitedeki değişimler incelenmişlerdir. Geçirimlilik (permeabilite) katsayısının belirlenmesinde düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmış ve deney öncesinde katkılı zemin tamamen doymun hale geldikten sonra deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen geçirimsizlik katsayılarının atık çamur katkı oranı ile değişimi Şekil 2.13’ de görülmektedir. Katkı oranı arttıkça permeabilite katsayıları azalmaktadır.



Şekil 2.13 : Geçirimlik Katsayısının Katkı Oranına Göre Değişimi (Aydın ve Üçüncü, 2004)

Aydın ve diğ. (2004) tuz (NaCl) çözeltisi kullanarak Japonya (Numune 1) ve Kazakistan (Numune 2) killeri üzerinde yaptıkları permeabilite deneyleri sonucunda tuz oranındaki artışla permeabilitenin arttığı belirlenmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 : Tuzun Permeabilite Üzerindeki Etkisi (Aydın ve diğ., 2004)

2.3.4. Konsolidasyon Davranışı

Zeminin hacim değıştirme davranışı oturma ile direkt ilişkili olduğu için oldukça önemlidir. Hacim değıştirme zeminin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde de değışime neden olur. Saf killerin sıkışabilirliği niceliksel olarak çift tabakadaki iyon değışimlerinden kaynaklanan itim kuvvetleri ile ilgilidir. Guoy-Chapman elektriksel çift tabaka teorisi sıkışabilirlik davranışını açıklamada kullanılır.

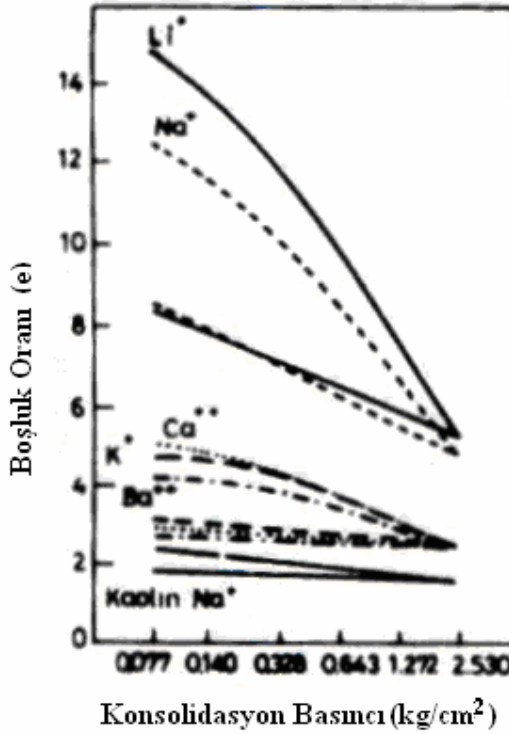
Montmorillonit türü killerin konsolidasyon özellikleri kil-su sistemindeki katyon boyutlarına bağlıdır. Boşluk sıvısının elektrolit konstrasyonundaki değışimin, e - $\log \sigma$ ilişkisine etkisi su için Ca-montmorillinitte azdır. Çünkü çift tabakanın etkisi klasik teori tarafından önerilenden daha küçüktür.

Bentonit için sıkışabilirlik sırası katyonlara göre;

$$Li^+ > Na^+ > K^+ > Ca^{++} > Ba^{++}$$

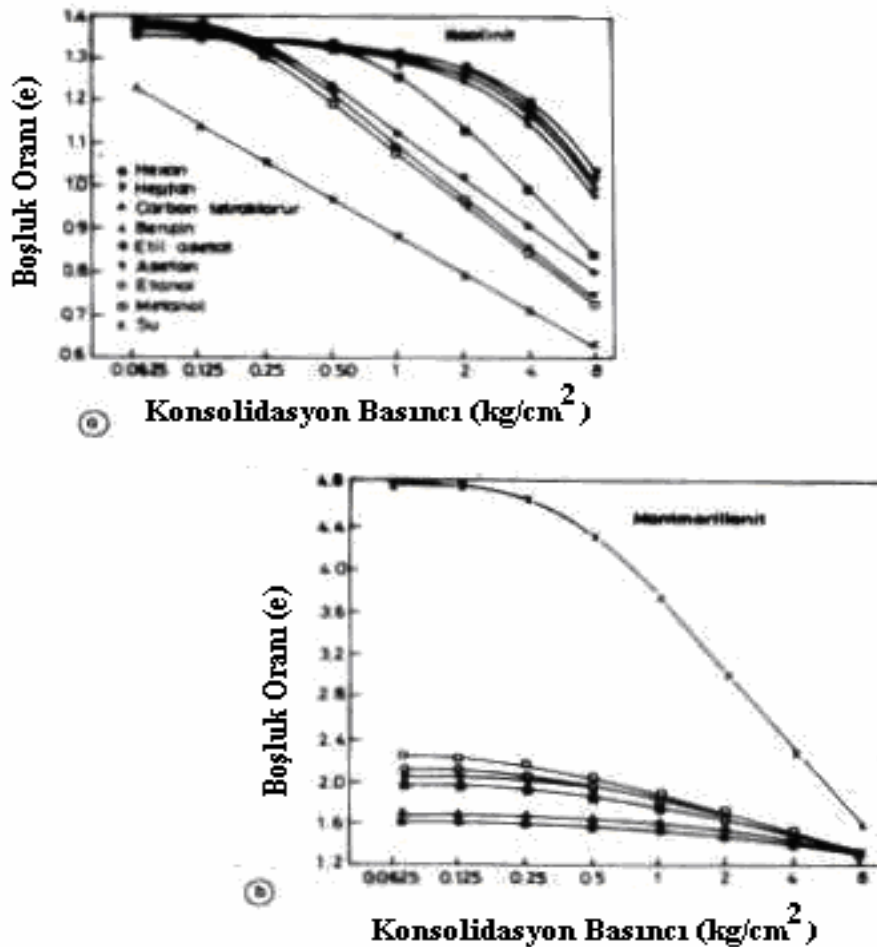
Olarak verilmektedir. (Mitchell, 1976)

Şekil 2.15' de Bentonit ve Na^+ Kaolinit sıkışabilirlik eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : Bentonit ve Na^+ Kaolinitte Sıkışabilirlik Eğrileri (Mitchell, 1976)

Sridharan ve Rao (1973), farklı organik sıvıları kullanarak dielektrik sabitinin etkisinin montmorillinit ve kaolinit türü killeri için sıkışabilirlik davranışı üzerinde farklı olduğunu göstermişlerdir. Montmorillinit türü kilde, sabit dış yük altında dielektrik sabitindeki artım nedeni ile önemli oranda şişme davranışı görülürken, kaolinit türü kil de ise hacimsel azalma görülür (Şekil 2.16). Bu davranış iki mekanizma ile açıklanmaktadır. Mekanizma 1' e göre, hacim değişimi iç yüzeydeki partiküllerdeki kayma direnci tarafından yönetilir ve mekanizma 2' ye göre, hacim değişimi çift difüze tabakadaki itici kuvvet tarafından yönetilmektedir. Bu iki mekanizmanın çalışması eş zamanlı olmasına rağmen, mekanizma 1 kaolinit gibi genleşmeyen kil zeminlerin hacim değişimini kontrol eder. Mekanizma 2 ise montmorillinit gibi genleşebilen kil zeminlerin hacim değişimini kontrol eder.



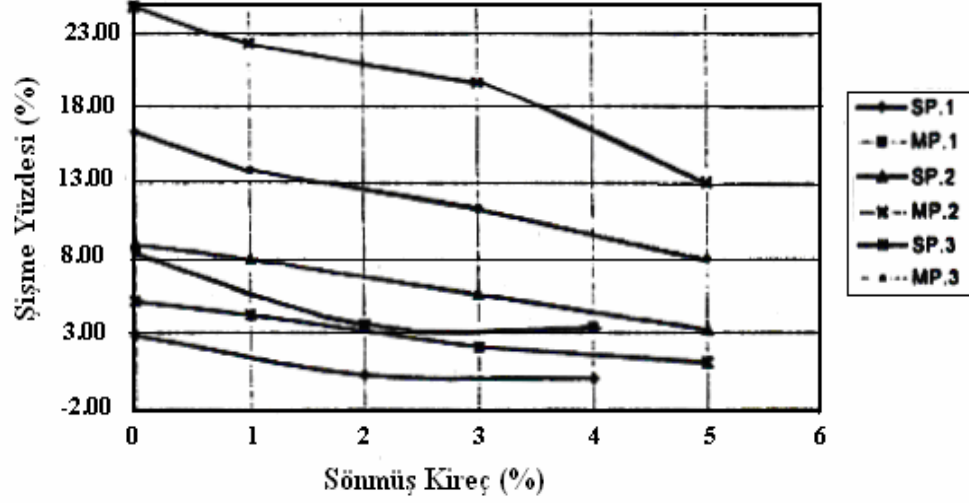
Şekil 2.16 : Farklı Boşluk Sıvılarında Tek Yönlü Konsolidasyon Eğrileri (Sridharan ve Rao, 1973)

Sridharan ve Sivapullaiah (1987) tarafından fosfat adsorbsiyonun hacim değiştirme davranışı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirlenmiştir. Fosfat adsorbe edilmiş Ca-kaolinitler Na-kaolinitlere göre daha fazla şişme davranışı gösterirler.

Killerin hacim değiştirme davranışı üzerinde boşluk sıvısının özellikleri ile dielektrik sabitindeki değişimler etkili olmaktadır. Dış yükler hiç değiştirilmediği halde sadece boşluk sıvısının değiştirilmesi ile aynı kilin sıkışma veya şişme davranışı gösterebileceği ispatlanmıştır. Boşluk sıvısı dielektrik sabiti ve iyon konstrasyon parametreleri ile karakterize edilir.

Tosun ve Trkz (2000) tarafından snmş kirecin zeminin şişme davranışı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla üç ayrı bölgeden numuneler alınmıştır. Numunelerin likit limit ve plastik limit değerleri sırası ile % 56.2- 70.2 ve % 28.9-30.0 aralığında değişmektedir. Bütünüyle ince daneli olan numuneler “yüksek plastisiteli kil (CH) ve silt-kil (CH-MH)” olarak sınıflandırılmıştır. Araştırmanın ilk aşamasında numuneler Standart Proktor sıklığında ve farklı snmş kireç katkı seviyelerinde (% 0, 1, 3 ve 5) hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin şişme yüzdeleri ödometre aleti ile belirlenmiştir. İkinci aşamada ise aynı kireç katkı içerikleri kullanılarak Modifiye Proktor sıklığında numuneler hazırlanıp şişme yüzdeleri ödometre aleti ile belirlenmiştir.

şişme yüzdesi ile kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi olarak snmş kireç katkısı arasındaki ilişki; altı ayrı seri için şekil 2.17’ de sunulmaktadır. Bu şekilden de görülebileceği gibi, snmş kireç katkısının artması ile serbest şişme yüzdesi azalmaktadır. Özellikle katkısız halde yüksek şişme değerleri veren Modifiye Proktor sıklığındaki numunelerde, kireç katkısının serbest şişme yüzdesinin kontrolünde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu araştırma sonunda görülmüştür ki; sıkıştırılmış numunelerin serbest şişme yüzdesi, yüksek enerji seviyesinde daha fazladır. Bu serilerde yüksek kireç katkı oranlarında nispi olarak daha üniform ve yüksek performans elde edilmiştir. Ayrıca katkılı numunelerde nihai olarak şişme miktarının büyük bir kısmı kısa sürede meydana gelmektedir. Fakat katkısız serilerde bu süre nispi olarak daha uzundur. Bu etkinin nedeni olarak, katkının yarattığı hidratasyon reaksiyonu gösterilmektedir.



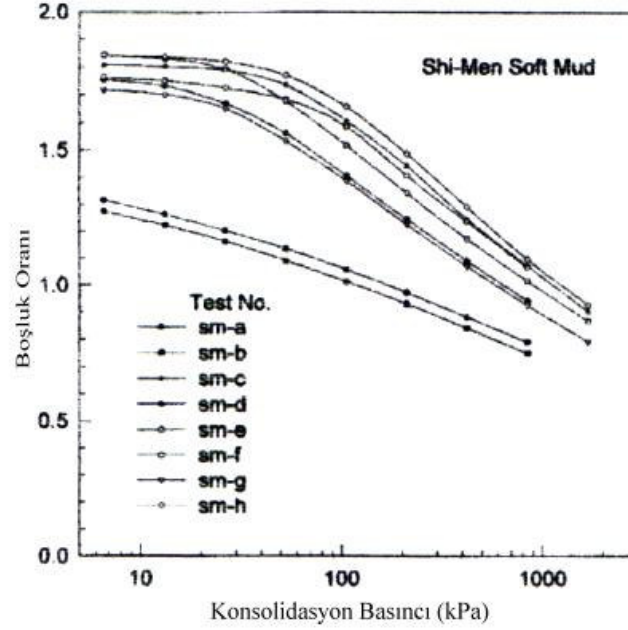
Şekil 2.17 : Şişme Yüzdesi-Sönmüş Kireç Katkısı İlişkisi
(Tosun ve Türköz, 2000)

Tao ve diğ. (2001) düşük çimento içeriğinin yumuşak kıvamdaki zeminlerin konsolidasyon davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada likit limiti % 47, plastik limiti % 22 olan CL sınıfı Shi-Men bataklık zemini ve katkı maddesi olarak portland çimentosu kullanmışlardır. Çimento miktarının ve kür süresinin konsolidasyon davranışına olan etkisini iyi gözlemleyebilmek için üç tür numune hazırlamışlardır. İlk numuneler (sm-a, sm-b) kireç katkısız olarak hazırlanmıştır. Diğer grup numuneler (sm-d, sm-e, sm-f, sm-g) ise zemin içine su/çimento oranı 0.6 olan su-çimento karışımı ilave edilerek hazırlanan karışımdan alınarak hazırlanan numunelerdir. Son grup numuneler (sm-c, sm-h) ise çimento içeriği % 6 olacak şekilde tek tek hazırlanmışlardır.

Hazırlanan numuneler konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 2.18' de çimentolu ve çimentosuz numunelere ait boşluk oranı-konsolidasyon basıncı grafiği verilmiştir. Bu şekle göre, çimento katkısı ön konsolidasyon basıncının artmasına neden olmuştur. Tablo 2.4' de görüldüğü gibi % 6 çimento katkılı zemin numunelerinin ön konsolidasyon basıncı kür süresi ile artmaktadır. sm-d, sm-e, sm-f, sm-g numunelerinde ise ön konsolidasyon basıncı 36–90 kPa arasında değişmekte ve kür süresi ile küçük bir artım görülmektedir. Bu numunelerdeki bu davranış numunelerin üniform olmamasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma sonunda ön konsolidasyon basıncının ve konsolidasyon katsayısının düşük çimento içeriği ve zamanla arttığı görülmüştür. Ayrıca, düşük çimento katkısı

ön konsolidasyon basıncı seviyesindeki yüklemelerde zemindeki oturma miktarının katkısız halden daha düşük olmasını sağlamıştır.



Şekil 2.18 : Konsolidasyon Basıncının Çimento Katkısı İle Değişimi
(Tao ve diğ, 2001)

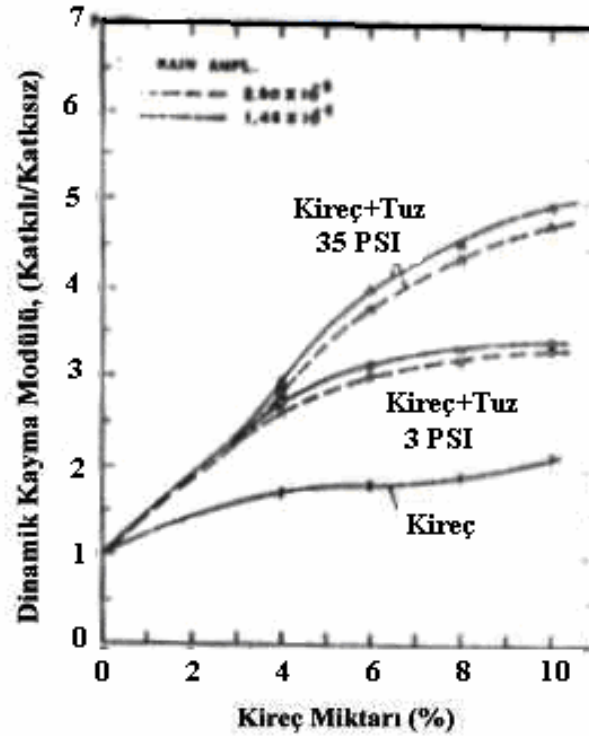
Tablo 2.4 : Önkonsolidasyon Basıncının Kür Süresi İle Değişimi (Tao ve diğ, 2001)

Test No	Kür Süresi (Gün)	Önkonsolidasyon Basıncı (kPa)
sm-c	3	80
sm-h	7	85
sm-d	7	40
sm-e	40	90
sm-f	47	36
sm-g	52	36

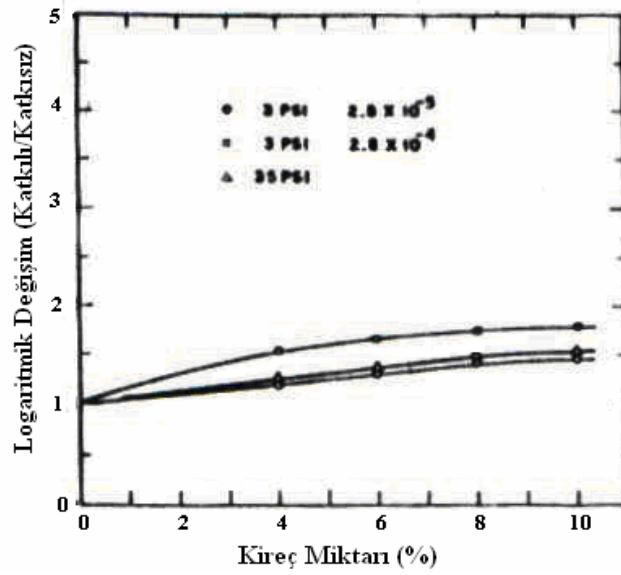
2.4. Zeminin Dinamik Davranışındaki Değişimler

Chae ve Au (1980) kireç ve tuzun şişen zeminlerin dinamik kayma modülü (G) ve sönüm özelliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla optimum su muhtevası % 24.3 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) 12.6 kN/m³ olan bentonit kiline

% 4, 6, 8 ve % 10 tuz (S), kireç (L) ve kireç-tuz (L+S) karışımı ilave ederek numuneler hazırlamışlardır. Hazırlanan bu numuneler rezonant kolon deneyine tabi tutularak katkı miktarı ile zeminin dinamik davranışlarındaki değişimler incelenmiştir. Şekil 2.19’ da görüldüğü gibi katkı oranı arttıkça zeminin dinamik kayma modülü artmaktadır. Kireç-tuz karışımı şişen zeminin rijitliğini arttırarak kirece göre dinamik kayma modülünün daha fazla artmasına neden olmaktadır. Şişen bu zeminin sönüm kapasitesi de Şekil 2.20’ de görüldüğü gibi kireç katkısındaki artışla artmaktadır. Kireç-tuz karışımında kireç katkısının etkisi tek kireç katkısına göre daha düşüktür. Yaptıkları bu çalışma sonucunda şişen zeminlerin dinamik özelliklerinin iyileştirilmesinde kireç-tuz karışımının sadece tuz veya kireç katkısına göre daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

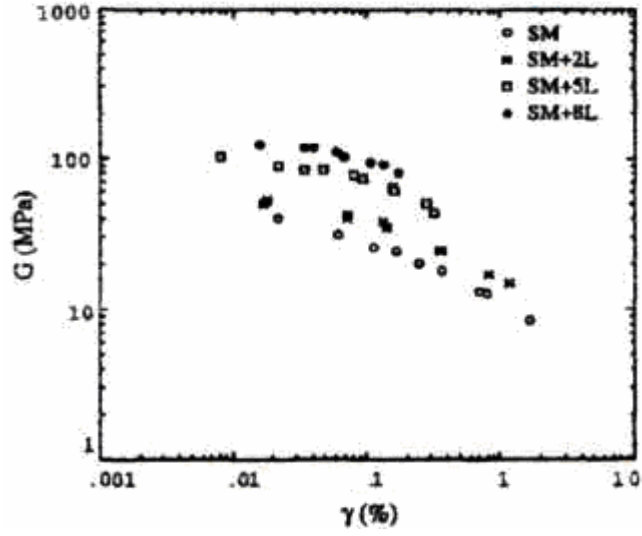


Şekil 2.19 : Kireç İçeriğinin G Üzerine Etkisi (Chae ve Au, 1980)



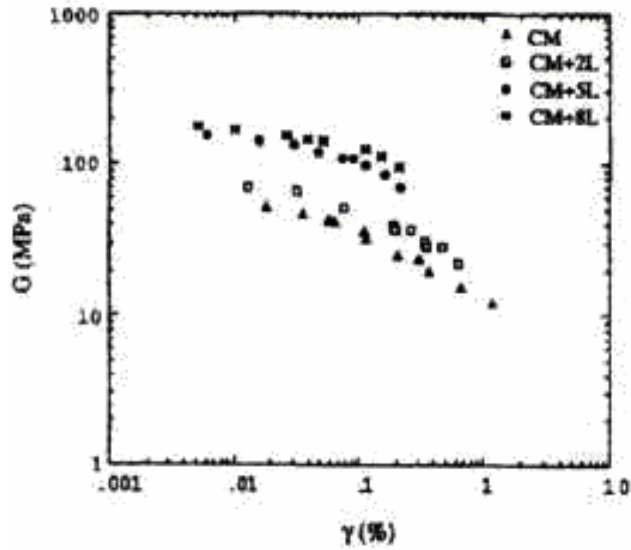
Şekil 2.20 : Kireç İçeriğinin Sönüm Üzerine Etkisi (Chae ve Au, 1980)

Fahom ve diğerleri (1996) tarafından kirecin kohezyonlu zeminlerin dinamik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada kaolinit (PI: % 18), sodyum montmorilinit (PI: % 514) ve kalsiyum montmorilinit (PI: % 35) türü zeminler kullanılmıştır. Numuneler Standart Proktor enerjisine eşit bir enerji ile sıkıştırılarak otomatik üç eksenli sistemde deneye tabi tutulmuştur. Şekil 2.21' de sodyum montmorilinit (SM) ait kayma modülü (G)-kayma deformasyonu (γ) eğrisi verilmiştir. Kayma modülü, kayma deformasyonu ile azalmaktadır. Dinamik yüke maruz kalmış zeminin beklenen davranışı olan; kayma modülünün kayma deformasyonu ile azalması görülmektedir. Örneğin deformasyon oranı % 0.1 iken G değeri % 240 oranında artış göstermektedir. SM numunesine % 8 kireç katılması durumunda diğer katkı oranlarına göre en büyük G değerlerine ulaşılır. Bu durum kireç ile zemin arasında oluşan puzulonik reaksiyon ile açıklanmaktadır.

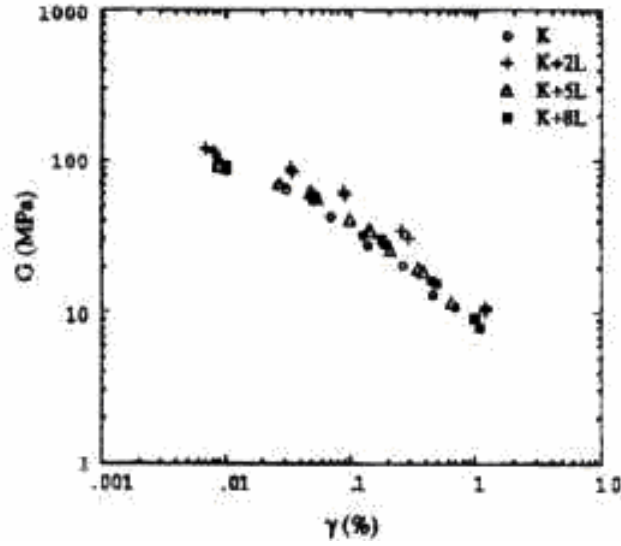


Şekil 2.21 : Kireç İçeriğinin G - γ Üzerine Etkisi (SM, $\sigma_3=150$ kPa)
(Fahom ve diğ, 1996)

Şekil 2.22’ de kalsiyum montmorilinit (CM) için G - γ grafiği gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi SM numunesine benzer davranış görülmektedir. G deformasyonla azalır ve % 8 kireç katkısında G değerleri diğer kireç oranlarına göre en yüksektir.



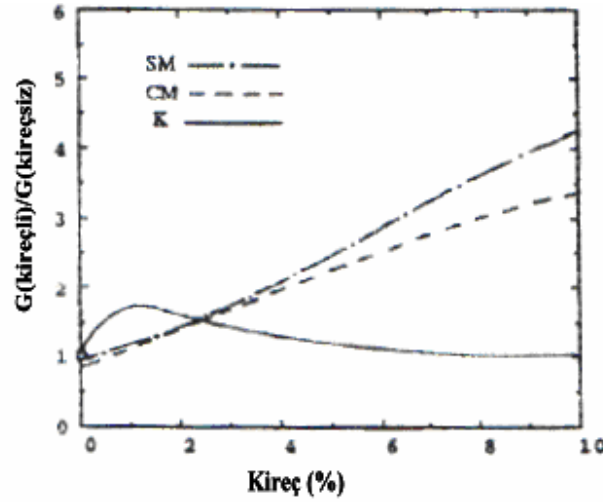
Şekil 2.22 : Kireç İçeriğinin G - γ Üzerine Etkisi (CM, $\sigma_3=150$ kPa)
(Fahom ve diğ, 1996)



Şekil 2.23 : Kireç İçeriğinin G- γ Üzerine Etkisi (K, $\sigma_3=150$ kPa)
(Fahom ve diğ, 1996)

Şekil 2.23' de kaolinit (K) ait G- γ grafiği verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yine G değeri deformasyonla azalır fakat G' nin en büyük değerlerine % 2 kireç katkısında ulaşılır.

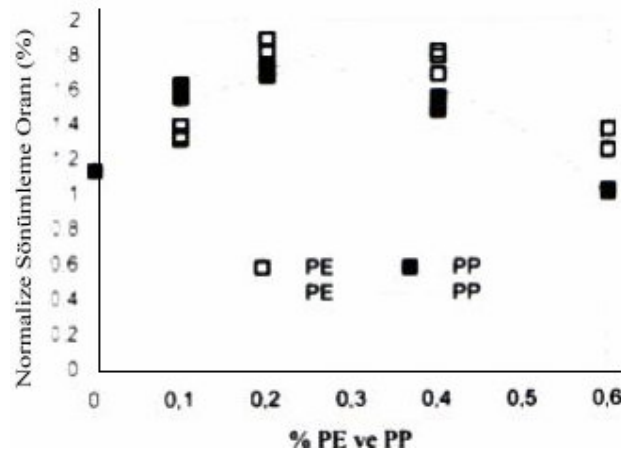
Kireç katkılı ve katkısız numunelere ait tüm değerler normalize edilerek Şekil 2.24' de görülen grafik elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sodyum montmorilinittin kayma modülü kireç oranı arttıkça artar. Sodyum montmorilinittin kayma modülündeki maksimum artış oranı kireç miktarının % 7–8 olduğu durumda maksimumdur. Kayma modülündeki artış oranının maksimum olduğu kireç miktarı dinamik optimum kireç içeriği (DOLC) olarak tanımlanır. Buna göre sodyum montmorilinittin DOLC değeri % 7–8' dir. Benzer davranışlar kalsiyum montmorilinitte de görülmektedir ve DOLC % 3–4 arasındadır. Kaolinit için DOLC % 1–2 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile zemine kireç katılarak zeminin dinamik özelliklerinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.



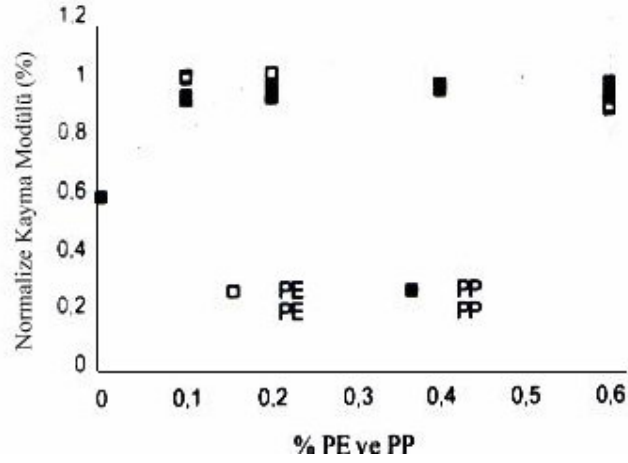
Şekil 2.24 : Kayma Modülü- Kireç Yüzdesi Arasındaki İlişkisi
(Fahom ve diğ., 1996)

Akbulut ve Arasan (2004) tarafından sentetik liflerin kil zeminlerin dinamik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Kil zeminin toplam kuru ağırlığının % 0.1, 0.2, 0.4 ve 0.6' sı oranında sentetik lifler (polipropilen ve polietilen) katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde sönümleme, boyuna ve burulma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları normalize edilerek Şekil 2.25, 2.26 ve 2.27' de görülen grafikler elde edilmiştir.

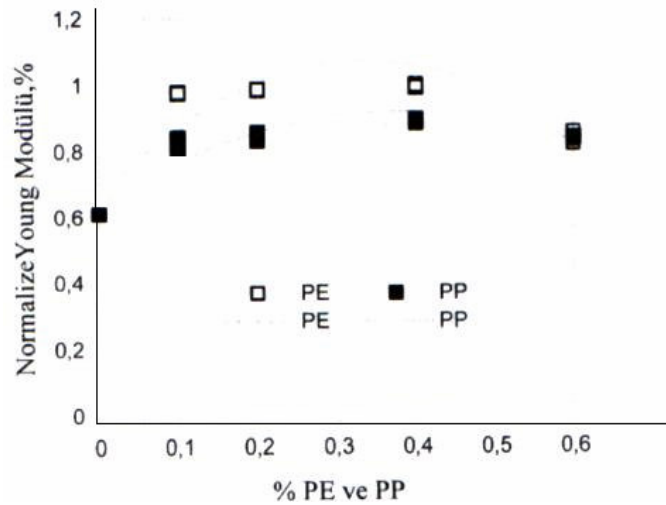
Deney sonuçlarına göre; lif katkısı dinamik özellikler üzerinde olumlu etki yapmaktadır ve en iyi sonucu % 0.2 oranında polietilen lif katkısı sağlamaktadır. Bu katkı oranında polietilen lif katkısı sönüm oranı, dinamik kayma modülü ve Young modülü değerlerinde sırası ile % 67, % 75, % 64 oranlarında artışlar sağlamıştır.



Şekil 2.25 : Lif Katkısının Sönümleme Oranına Etkisi
(Akbulut ve Arasan, 2004)



Şekil 2.26 : Lif Katkısının Dinamik Kayma Modülü Üzerine Etkisi
(Akbulut ve Arasan, 2004)



Şekil 2.27 : Lif Katkısının Young Modülü Üzerine Etkisi
(Akbulut ve Arasan, 2004)

2.5. Sonuçlar

Bu bölümde kimyasal atıklar, kireç ve uçucu kül gibi kirletici maddelerin zeminin statik ve dinamik yükler etkisi altında davranışındaki değişimleri inceleyen çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmalar dahilinde zeminin kıvam limitleri, kayma mukavemeti parametreleri, konsolidasyon davranışı, permeabilite katsayısındaki değişimler ele alınmıştır. Zeminin dinamik davranışının incelendiği çalışmalar dahilinde ise dinamik kayma modülü ve elastisite modülü konularına yer verilmiştir.

3. DENEY ALETİ VE DENEYLERDE KULLANILAN ZEMİN

3.1. Giriş

Katı atık depo alanlarında geçirimsizlik amacı ile oluşturulan kil tabakalarında iklim, hidrolojik döngü, buharlaşma, kapiler basınç ve atık sızıntı sularının etkisi ile ıslanma kuruma çevrimleri oluşmaktadır. Bu olaylar sonucunda geçirimsizlik şiltesi olan kilin geoteknik, mikroyapısal ve kimyasal özellikleri değişmekte olup bu tabakanın altında yeralan kil tabakaları ve yeraltı suyu sızıntı çöp suyu ile kirlenerek etkilenmektedir.

Bu çalışmada atık sızıntı sularından etkilenmiş örselenmemiş zemin tabakalarının mekanik ve dinamik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla killi zemin farklı oranlarda (% 0, 5, 20, 50 ve % 100) çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış ve daha sonra hazırlanan zemin numuneleri farklı kür sürelerinde (0, 1, 7, 30 ve 90 gün) bekletilmiş ve kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Çamur konsolidasyon deney alatinde hazırlanan numuneler kullanılarak zeminin konsolidasyonu, permeabilitesi, kayma mukavemeti ve dinamik özelliklerinin çöp sızıntı suyu miktarı ve kür süresi ile değişimi incelenmiştir.

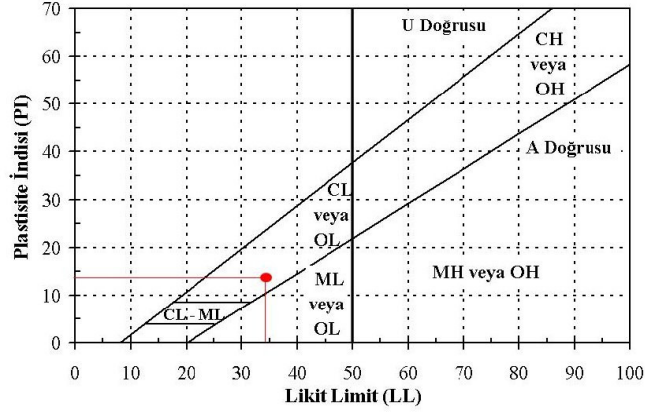
Bu bölümde zemin numunelerinin hazırlanma yöntemi, kullanılan malzemenin mühendislik özellikleri, Atterberg kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney sistemleri ve uygulama teknikleri ele alınmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Zemin

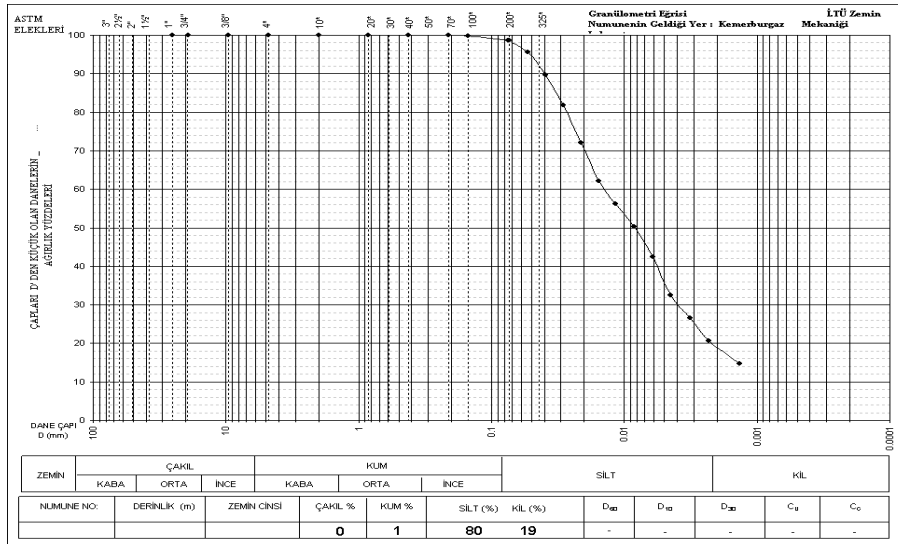
Deneylerde Kemerburgaz Katı Atık Depo Tesis Alanından temin edilmiş olan Casagrande Plastisite kartında düşük plastisiteli inorganik killer ve siltli killer (CL) sınıfına giren zemin kullanılmıştır. Şekil 3.1' de bu zeminin Plastisite kartı üzerindeki yeri, Tablo 3.1' de ise endeks özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 3.1 : Deney Numunesinin Endeks Özellikleri

Zemin Sınıfı	LL (%)	PL (%)	PI (%)	γ_s (kN/m ³)
CL	34	20	14	27.0

**Şekil 3.1 : Plastisite Kartı**

Zemin numunesinin granülometrik özelliği ise elek ve hidrometre (ıslak analiz) deneyleri yapılarak tespit edilmiştir. Danelerin tamamına yakını 200 nolu elekten (0.0042 mm) geçtiği için numuneye ait dane dağılım eğrisi, hidrometre analiziyle belirlenmiştir. Sonuçlara ait Granülometri eğrisi Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, malzemenin % 1’i Kum, % 19’ u Kil, % 80’ i Silt olarak belirlenmiştir.

**Şekil 3.2 : Granülometri Eğrisi**

3.3. Çöp Sızıntı Suyunun Özellikleri

Deneylerde kullanılmak üzere Kemerburgaz Düzenli Katı Atık Depo tesisinden getirilmiş olan sızıntı suyu üzerinde İ.T.Ü. Çevre Mühendisliği Laboratuvarında yapılan analiz sonuçları Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2 : K.Burgaz Çöp Sızıntı Suyu Bileşenlerine Ait Analiz Sonucu

Leachete Analizleri		
Parametreler	Birimler	Numune
pH		6.73
TKM	mg/l	51932
TUKM	mg/l	21522
TÇM	mg/l	10980
TUÇM	mg/l	2790
Alkalinite	mg/l CaCO ₃	7250
KOİ	mg/l	65230
Çöz.KOİ	mg/l	7500
BOİ	mg/l	3935
T.P	mg/l	16.2
TKN	mg/l	2510
NH ₃ -N	mg/l	2112
Klorür	mg/l	2850
Sülfat	mg/l	165
Ca.Sertliği	mg/l CaCO ₃	660
T.Sertlik	mg/l CaCO ₃	1700
Ca	mg/l	264
Mg	mg/l	249.6
Na	mg/l	2054
K	mg/l	1240
Fe	mg/l	253
Ni	mg/l	1.73
Cr	mg/l	0.461
Zn	mg/l	2.1

Numune : Deney başı çöp sızıntı suyu

3.4. Numune Hazırlanması

Deneylerde kullanılmak üzere İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına Kemerburgaz Düzenli Katı Atık Depo tesisinden 8 çuval zemin numunesi getirilmiştir. Getirilen tüm numuneler birleştirilip tepsilere alınarak, homojen bir karışım oluşması sağlanmıştır. Ardından, öncelikli olarak zemin numunesinin bir kısmı, 105⁰ C etüvde 24 saat kurutulup, elek ve hidrometre analizleri yapılarak, zeminin endeks ve granülometri özellikleri belirlenmiştir. Kalan numunenin tamamı yine 105⁰ C etüvde 24 saat kurutulup, öğütülerek, 40 no'lu elekten elenmiştir. Elenen tüm numuneden homojen bir karışım oluşturulup, bu karışımın bir kısmı ile Atterberg Kıvam Limitleri deneyi yapılmış ve temiz numunenin kıvam limitleri belirlenmiştir. Bundan sonra tez çalışması süresince yapılan tüm deneylerde, 40 no'lu elek altına elenen bu toz zemin numunesi kullanılmıştır.

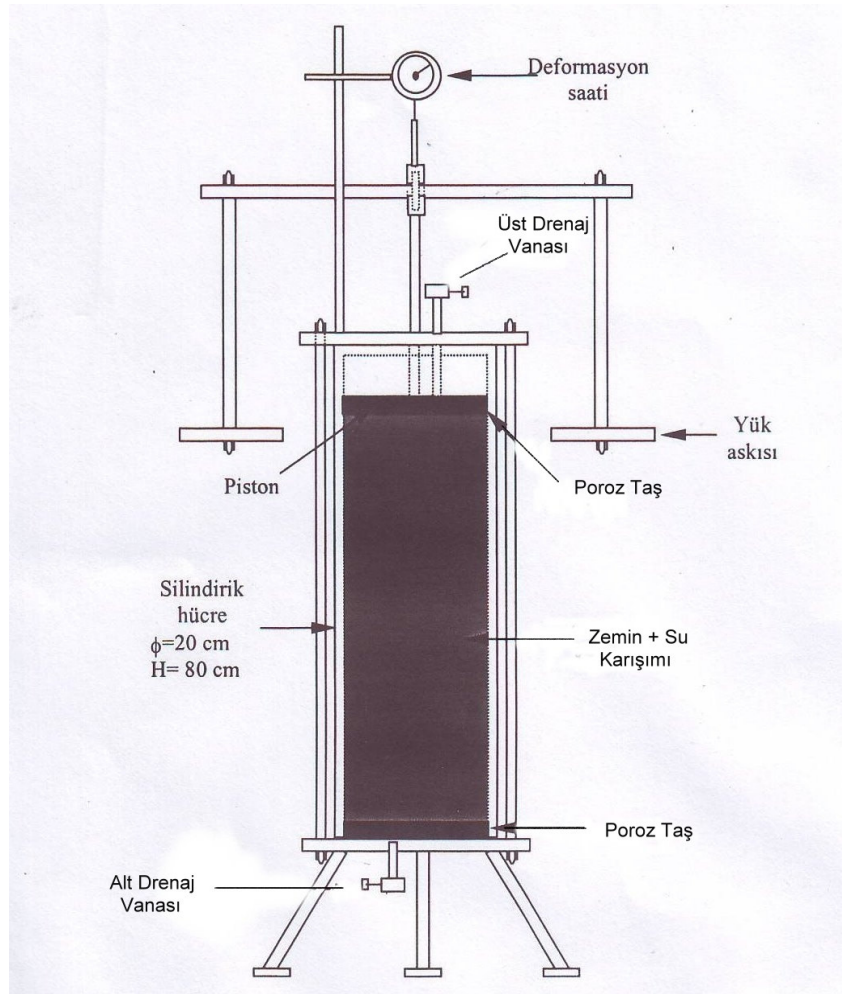
3.5. Çöp Sızıntı Suyu İle Karıştırılmış Zemin Numunelerinin Hazırlanması

Temiz toz halindeki zemin numunesinin hazırlanmasının ardından, içerisine belli oranlarda çöp sızıntı suyu karıştırılarak oluşturulacak zemin numunelerinin hazırlanmasına geçilmiştir. İlk olarak 105⁰ C etüvde kurutulmuş temiz zemine % 5, 20, 50 ve % 100 kür oranlarında çöp sızıntı suyu karıştırarak, temiz zeminin kıvam limitlerinin çöp suyu (kür) oranı ile değişimi incelenmiştir.

Ardından zeminin kıvam limitlerinin çöp suyu oranı ve kür süresi ile değişimini belirlemek amacıyla, zemin numunesinden her deney için 600 gr ağırlığında numune alınarak torbalara konmuştur. Bu torbalardaki zemine, tabii zeminin likit limit değerinin altında (ağırlıkça % 25'i oranında) çöp suyu muhtevası içerecek şekilde, % 5, 20, 50 ve % 100 kür oranlarında çöp sızıntı suyu karıştırılıp bir tepsi içinde yoğurularak, 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür süreleri sonunda deney yapılmak üzere toplam 20 adet deney seti oluşturulmuştur. Hazırlanan bu numuneler plastik folyo ile sarılarak, kür odasında kür süresini tamamlayıncaya kadar su muhtevalarını kaybetmeyecek şekilde bekletilmiştir. Kür süresi 0 gün olan numunelerin hemen, diğer numunelerin ise kür süreleri dolduğu gün, kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır.

Kıvam limitleri deneylerinin numuneleri hazırlandıktan sonra, yapılacak kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Bu deneyleri aynı tip özelliklere sahip zemin numuneleri üzerinde yapabilmek için,

laboratuvarında Şekil 3.3' de görülen hazne çapı $\phi = 20$ cm ve yüksekliği 80 cm olan sert plastikten yapılmış çamur konsolidasyon deney aleti kullanılmıştır. Çamurun hazırlanmasında ise, 105°C etüvde kurutulmuş temiz toz halindeki zemin ile damıtılmış su ve % 5, 20, 50 ve % 100 kür oranlarında çöp sızıntı suyu kullanılmıştır. Çamur karışımı, temiz zeminin likit limitinin 1.5 katı, bir başka deyişle % 51 su muhtevasında, karışımın homojen bir süspansiyon olması amacıyla toz zemine, çöp suyu ve damıtılmış suyun mikserle karıştırılması ile elde edilmiştir.



Şekil 3.1 : Konsolidasyon Deney Aleti

Hazırlanan numunelerin karışım oranları, kür süreleri, çıkan numunelerin boy ve çap değerleri ile deney başlangıç ve bitiş tarihleri Tablo 3.3’ de verilmiştir.

Tablo 3.3 : Çamur Konsolidasyon Deneyi Verileri

Çöp Suyu Oranı (%)	Toz Numune Ağırlığı (kg)	Çöp Suyu Miktarı (mL)	Temiz Su Miktarı (mL)	Çıkan Numune Boy (cm)	Çıkan Numune Çapı (cm)	Deney Başlangıç Tarihi	Deney Bitiş Tarihi	W_n (%)	γ_n (kN/m ³)
0	16	0	8160	30.8	20.0	10/12/07	10/01/08	30	19.91
5	16	408	7752	31.0	20.0	07/01/08	07/02/08	30	19.52
20	16	1632	6528	31.4	20.0	25/01/08	25/02/08	29	20.46
50	16	4080	4080	31.2	20.0	18/02/08	18/03/08	28	20.40
100	16	8160	0	31.4	20.0	05/03/08	05/04/08	28	20.65

Hazırlanan bu karışım, çamur konsolidasyon deney aletine, alt başlık ve drenaj vanası kapalı vaziyette dökülmüştür. Çamur konsolidasyon deney aletinin alt başlığında ve ağırlıkların oturduğu, sıkıştırıcı piston üzerinde, su geçirime özelliğine sahip, poroz taşlar ve drenaj kanalları yer alır. Alt başlık ve üst pistonda yer alan poroz taşlarının gözeneklerinin çamur karışımı ile dolmasını önlemek amacıyla poroz taşlarının üzeri iki kat filtre kağıdı ile kaplanmıştır. Karışımın dökülmesi sonrasında numune içerisinde kalması muhtemel havanın, bir karıştırıcı kullanarak veya konsolidasyon aletine titreşim uygulayarak dışarı çıkarılması sağlanmıştır.

Üst başlığın kapatılması ile piston hafifçe itilerek numune ile sadece teması sağlanmış ve numuneye ek yük gelmemesine özen gösterilmiştir. Bundan sonra pistonun yatay yönde hareketini engelleyen ve ortasında piston kolu çapına eşit delik ile üst başlıktan suyun drenajını sağlayan hortum bağlantısı bulunan plaka, 4 adet vida yardımıyla çamur konsolidasyon deney aletine sabitlenmiştir. Son olarak numuneyi konsolide etmek için simetrik yük uygulamasına imkan veren yük askısı, üst başlık pistonun üst ucuna sabitlenip, tüm drenaj vanaları açılmıştır. Böylece sistem konsolidasyon basınçlarının uygulanması için hazır hale gelmiştir.

Çamur konsolidasyon deney aletinde 25 kPa değerinden başlayarak 50 kPa, 75 kPa ve 100 kPa düşey efektif gerilme değerlerine, yük askısına her hafta eşit oranlarda ağırlık yüklenerek çıkmıştır. Her konsolidasyon basıncında oturmalar sabitlendikten sonra diğer yükleme kademesine geçilmiştir. Konsolidasyonun 1 ay sonra tamamlanması ile yükler yük askısından indirilerek, numuneye ilave yüklerin

gelmemesine özen gösterilmiştir. Alt başlık çıkarıldıktan sonra, aletin üst başlık pistonu, numunenin örselenmesini önlemek amacıyla çok yavaş itilerek numune bir bütün olarak çıkarılmıştır. Deney sonucu çıkan konsolidasyon numunesi Şekil 3.4’ de görülmektedir. Deney süresince deney aletinden okunan oturma değerleri, tablo olarak Ek A ‘da verilmiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.4 : Deney Sonu Konsolidasyon Numunesi

Elde edilen numuneler, yapılacak Kesme Kutusu, Ödometre ve Dinamik Üç Eksenli deneyleri için gerekli ölçülerde tel testere ile bölünmüştür. Bölünen numunelerin hem mevcut su muhtevasını kaybetmesini önlemek, hem de hava ile temasını kesmek için, numuneler ince plastik folyo ile sarılarak, deneyler yapılan kadar nem odasında, desikatörler içerisinde saklanmıştır.

3.6. Atterberg Limitleri

Bu çalışmada sızıntı suyu miktarının ve sızıntı suyu ile zeminin etkileşim süresinin zeminin likit limit ve plastik limiti üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla zemin numunesi çöp sızıntı suyu içeriği % 5, 20, 50 ve 100 olacak şekilde çöp sızıntı suyu ile karıştırılarak 1, 7, 30, ve 90 gün süre ile küre bırakılmıştır. Kür süresinin bitiminde likit ve plastik limit deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca küre bırakılmadan aynı çöp sızıntı suyu içeriğine sahip su karışımı ile zemin karıştırılarak likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır.

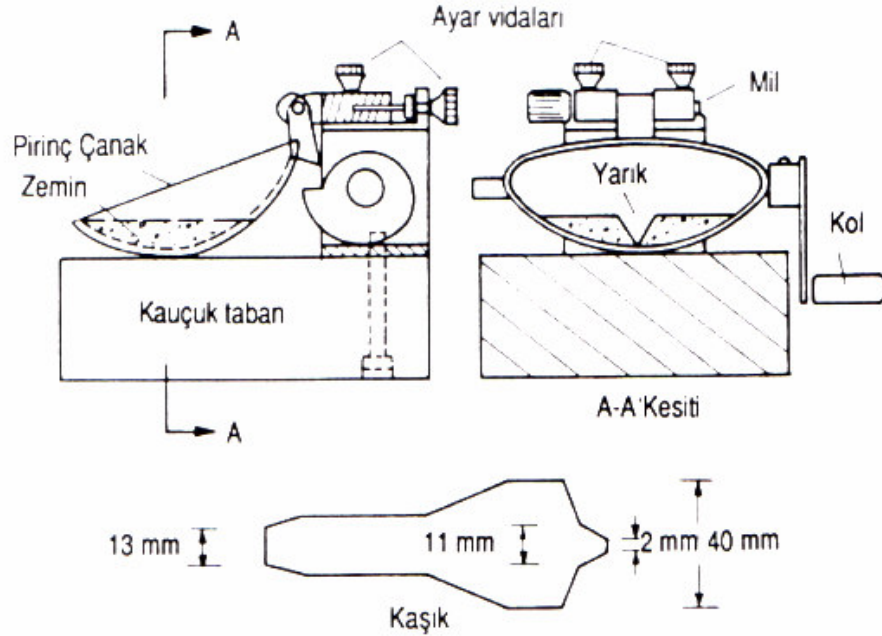
3.6.1. Likit Limit Deneyi

Likit limit deneyinde ASTM D 4318–2000 standartları uygulanmıştır. İlk olarak likit limit deneyi küre bırakılmamış numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla çöp sızıntı suyu ile karıştırılmamış temiz zemin 105 °C ‘ deki etüvde 24 saat kurutulur. Etüvden çıkarılan numune lastik tokmak kullanılarak öğütülür. 40 no’ lu elekten elenir. Hazırlanan malzemeden her deney için 250 g ağırlığında numune alınır. Karışım suyunun % 0, 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu olacak şekilde temiz ve çöp suyu karıştırılarak deney suları hazırlanır. Porselen kap içindeki numuneye hazırlanmış olduğumuz çöp sızıntı suyu ve damıtık su karışımından ilave edilir. Homojen bir karışım elde edinceye kadar spatula ile iyice karıştırılır. Çöp sızıntı suyunun zemin üzerindeki kimyasal etkisi nedeni ile hemen deneye başlanır.

Deneye başlamadan önce Casagrande aletinin düşüş yüksekliğinin 1 cm olup olmadığı oyuk açma bıçağı kullanılarak kontrol edilir. Şekil 3.5’ de gösterilen Casagrande aletinin içine hazır durumdaki numuneden spatula ile bir miktar alınarak tasın içerisine yerleştirilir. Yerleştirme sırasında numunenin içinde hava kabarcıkları kalmamasına özen gösterilir. Kap içerisine yerleştirilen numunenin yüzeyi yatay olacak şekilde düzeltilir. Kap içine yerleştirilen numunenin en kalın kısmı yaklaşık olarak 1 cm olmalıdır. Kap içine yerleştirilen numunenin ortasından standart oyuk açma bıçağı ile bir yarık açılır. Numune içerisinde yarık açılırken özen gösterilmeli ve yarığın düzgün olması sağlanmalıdır. Bu işlem oldukça çabuk yapılmalı ve numunenin kurumasına izin verilmemelidir. Krank kolu saniyede iki düşüş yapacak şekilde çevrilir ve düşüşler sayılır. Bu sırada numune ortasında açılmış olan yarığın tabanındaki kapanma dikkatle izlenmeli ve kapanmanın 13 mm olması durumunda çevirme işlemi durdurulmalıdır. 13 mm’ lik kapanmanın olduğu bölgeden bir miktar

numune alınarak tartılır. Bu numune 105 C⁰ de etüvde 24 saat kurutulur (Irene, 2003). Kurutulmuş numune tartılır ve su muhtevası belirlenir. Aynı numune kullanarak ve su içeriği gittikçe artırılarak aynı işlemler en az üç kez tekrarlanır.

Seçilen başlangıç su içeriği ve deney sırasında eklenen su miktarları elde edilen düşüş sayılarının 10 ile 50 arasında eşit aralıklarla dağılmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Deney, kesinlikle numunenin su içeriği artırılarak yürütülmelidir. Numuneye su eklemek amacıyla likit limit kabından her alınışında kap ve oyuk açma bıçağı yıkanıp kurutulmalıdır.



Şekil 3.5 : Casagrande Aleti (Toğrol ve Özüdoğru, 1992)

Deney sonunda elde edilen su muhtevası ve ilgili düşüş sayısı, yarı logaritmik bir grafik üzerinde işaretlenir. Bu işlem için su muhtevaları doğrusal olarak ordinat eksenini boyunca, düşüş sayıları ise logaritmik olarak apsis eksenini boyunca işaretlenir. Elde edilen noktalara en uygun doğru çizilir. Bu doğru üzerinde 25 düşüş karşısındaki su muhtevası zeminin likit limitini verir.

Likit limit ve plastik limit değerlerinin, 1, 7, 30 ve 90 gün sonunda, kür süresi ve kür oranı ile değişimini belirlemek amacıyla, temiz zeminin likit limit değerinin altında bir su muhtevası içeriğine sahip çöpsü numuneler hazırlanmıştır. Kür süresini

tamamlayan numuneler, lastik tokmak yardımı ile öğütölüp 40 no' lu elekten elenir. Hazırlanan numuneler çöp sızıntı suyu içeriği % 5, 20, 50 ve 100 olan çöp sızıntı suyu ve temiz su karışımı kullanılarak küre bırakılmamış numuneler gibi likit limit deneyine tabi tutulur.

3.6.2. Plastik Limit Deneyi

Likit limit deneyinde ASTM D 4318–2000 standartları uygulanmıştır. Bu deney, zeminin henüz plastikliğini kaybetmediği en düşük su içeriğini kapsar. Likit limit deneyi için hazırlanmış numuneden bir miktar alınır. Numunenin cam levha üzerine konularak avuç içi ile yuvarlayarak zemin çubukları haline getirilmesine çalışılır. Zemin çubukları 3 mm çapında silindirik çubuklar haline gelmeden çatlamalar oluşursa numune üzerine biraz daha su ilave edilerek yoğrulur ve avuç içi ile yuvarlanarak 3 mm çapında silindirler yapılmaya çalışılır. Zemin çubukları 3 mm çapında silindirik çubuklar haline geldiğinde çatlamalar hala oluşmamışsa numune parmaklar arasında yoğrularak havalandırılıp su muhtevası azaltılır. Aynı işlemler zemin çubuklarının 3 mm çapında çubuklar haline geldiğinde çatlamalar oluşuncaya kadar tekrarlanır. Numunenin kopmaya başladığı andaki kıvam, plastik limit kıvamıdır. İki ayrı kaba 3 mm çapa ulaşınca kopan numuneler konularak yaş ağırlıkları tespit edilir ve numuneler 105 C ' deki etüvde 24 saat kurutulur. Kuru numune ağırlığı belirlenir. Kuru ve ıslak ağırlıklar kullanılarak numunelerin su muhtevası bulunur. Elde edilen su muhtevalarının ortalaması alınarak plastik limit değeri belirlenir. Su muhtevasının belirlenmesi için yaş numune ağırlığının en az 5 g olması gerekir. Aynı işlemler hazırlanmış olan tüm zemin numuneleri için tekrarlanır.

Likit limit (LL) ve plastik limitin (PL) belirlenmesinin ardından zemin numunelerine ait plastisite indisi 3.1 bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

$$PI=LL-PL \quad (3.1)$$

3.7. Kesme Kutusu Deneyi

3.7.1. Kesme Kutusu Deney Aleti

Zeminlerin kayma direncini belirlemek için en basit, en eski ve en yaygın yöntem kesme kutusu deneyidir. Deney Şekil 3.6' da gösterilmiş olan kare ya da dairesel kesitli kesme kutusunda yapılır. Alet sabit bir üst çene ve yatay hareket edebilen bir alt çeneden oluşmaktadır. Uygulanan bir kesme kuvveti altında, üst parçanın sabit tutulması ve alt parçanın yatay bir düzlem boyunca hareket edebilmesi nedeni ile numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır. Numune iki poroz taş arasına yerleştirilir. Bu poroz taşlar suya doymuş numune konsolide edilirken dren görevi yaparlar. Numune ile poroz taşlar arasındaki temas yüzeyleri dişli yapılmıştır. Böylece numune ve taşlar arasındaki kayma engellenmiş olur.



Şekil 3.6 : Kesme Kutusu Deney Aleti

Numune kesilmeden önce, üst taşın birim alanına (P) düşey kuvvet uygulanır. Gerek yükün uygulanışı, gerekse bunu takip eden kesme kuvvetinin uygulanması numunenin boşluk oranını değiştirir. Eğer numunenin boşlukları hava ile doluyorsa bu değişiklik hemen meydana gelir, öte yandan eğer numune suya doygunsa, suyun zemin boşluklarından çıkarken gördüğü direnç bu değişikliği geciktirir. Zeminin kırılma anındaki su muhtevası, kesme kuvveti uygulanmadan düşey yük altında

numunenin erişmiş olduğu konsolidasyon yüzdesine, zeminin permeabilitesine, kesmenin artma hızına ve drenaj şartlarına bağlıdır. Bu değişkenlerin, düşey kuvvet ile kayma direnci arasındaki bağıntıya etkisini incelemek için yapılan deneylere yavaş deneyler, konsolidasyonlu hızlı deneyler ve hızlı deneyler denir. Yavaş deneyde gerek yük gerekse kesme kuvveti öyle yavaş uygulanır ki düşük permeabiliteli suya doymuş killerin su muhtevaları bile bu gerilme değişimine uyar.

Konsolidasyonlu hızlı deneyde numune, düşey yük altında tamamen konsolide olduktan sonra sabit su muhtevasında kesilir. Konsolidasyonsuz hızlı deneyde ise numunenin su muhtevası gerek düşey yükün uygulanması sırasında, gerekse kesme esnasında sabit kalır.

Numunenin konsolidasyonu, üstteki poroz taşın düşey hareketini gösteren bir deformasyon saati ile izlenir. Kesme deneyi sırasında aynı saat kesme kuvvetinin bir hacim değişimi meydana getirip getirmediğini gösterir.

Kesme kuvvetini kademeli uygun bir hızla arttırarak uygulamak için gerekli önlemler alınmış kesme kutusuna gerilme kontrollü, yer değiştirme belli bir şekilde arttırılırsa, bu artımı temin etmek için gerekli çekme veya itme kuvvetini ölçebilen alete deformasyon kontrollü denir.

Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarını ölçmenin mümkün olmaması, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin sınırlayıcı yönlerini oluşturmaktadır. Ayrıca kayma kırılması potansiyel kayma yüzeyinin her noktasında aynı anda meydana gelmez. İki uçtan başlar ortaya doğru ilerler. Bu nedenle deney sonunda elde edilen maksimum değer gerçek maksimum değerden daha küçüktür.

3.7.2. Numune Hazırlanması

Kesme kutusu deneyinde kullanılmak üzere numune hazırlanması için önce, çamur konsolidasyon deney aletinden çıkarılan, 30 gün kür süreli örselenmemiş kil zemin numunesi üç ayrı parçaya bölünür. Şekil 3.7' de görüldüğü gibi parçalardan biri üzerine 60x60x25mm boyutlarındaki kesme kutusu ringi yerleştirilir ve bıçak yardımı ile numunenin fazla kısımları kesilir. Daha sonra ring numune içine batırılır ve ring içindeki numunenin her iki yüzeyi düzeltilir. Aynı işlem diğer parçalar üzerinde de uygulanır.



a)

b)



c)

d)

Şekil 3.7 : Kesme Kutusu Deneyi İçin Numune Hazırlanması

3.7.3. Deneyin Yapılışı

Deneye başlamadan önce ring içindeki numune kuru birim hacim ağırlığının bulunabilmesi için hassas terazide tartılır. Numune ağırlığı deney föyüne yazılır. Kesme kutusunun alt ve üst vidaları birbirine tespit edilir. Ring içindeki numune ahşap çekiç yardımı ile kesme kutusu içine dikkatli bir şekilde yerleştirilir. Numunenin üst kısmına üzerinde poroz taş olan yükleme başlığı yerleştirilir. Yatay ve düşey deformasyonları ölçebilmek için iki tane okuma saati bağlanır. Yükleme başlığı vasıtasıyla numuneye, düşey yük uygulanarak 1 gün konsolide edilir ve numunede oluşan düşey deplasmanlar deney föyüne kaydedilir. 24 saat sonra mevcut numunenin konsolidasyonu biter bitmez, kesme kutusunun üst parçasını alt parçasına tespit eden vidalar çıkarılır ve numune kesilir.

Yatay yük uygulanır ve kuvvet halkasındaki değerler okunur. Bu sırada yatay ve düşey deformasyon saatlerinden de okumalar alınır. Yatay kuvvet uygulandığı halde

kuvvet halkasında yük değeri artmıyorsa ya da aniden bir azalma olmuşsa numune kesilmiştir. Kesilen numune deney sonu su muhtevasının belirlenmesi için tartılır. Tartılan numune 105 C⁰ de 24 saat etüvde kurutulur. Etüvden çıkarılan numune tartılır ve deney sonu su muhtevası hesaplanır.

3.8. Ödometre Deneyi

3.8.1. Ödometre Aleti

Şekil 3.8’ de görülen ödometre deney aleti yükleme askısı ve yükleme kirişinden oluşan yükleme elemanları ve konsolidasyon hücresinden oluşmaktadır. Yükleme elemanları numuneye eksenel yük uygulamaktadır. Bu nedenle yükün uygulanması sırasında dikkat edilmesi gereken yükleme kirişinin yatay olmasıdır. Kirişin yataylığı kiriş üzerindeki su düzeci ile kontrol edilmektedir. Eğer yataylık bozulmuşsa hareket çarkı çevrilerek yükleme kirişi yatay konuma getirilir. Yaygın olarak kullanılan iki tür konsolidasyon hücresi bulunmaktadır: sabit ringli hücre ve Şekil 3.8’ de görüldüğü gibi sabit olmayan (seyyar) ringli hücredir. Sabit ringli hücreye numune yerleştirilmesi sırasında ring yan duvarlarında sürtünme direnci oluşmaktadır. Seyyar ring hücresinde ise numune ile ring duvarları arasında oluşan sürtünme çok daha azdır. Bu çalışmada 50 mm çapında, 20 mm boyunda seyyar ring kullanılmıştır.



Şekil 3.8 : Ödometre Deney Aleti

3.8.2. Numune Hazırlanması

Ödometre deneyinde kullanılmak üzere numune hazırlanması için önce, çamur konsolidasyon deney aletinden çıkarılan, 30 gün kür süreli örselenmemiş kil zemin numunesinden yaklaşık 25 mm kalınlığında bir parça kesilir. Şekil 3.9’ de görüldüğü gibi parça üzerine 50 mm çapında 20 mm yüksekliğindeki ring yerleştirilir. Numunenin ring dışında kalan kısımları bıçak ile kesilir. Daha sonra ring numune içine batırılır ve ring içindeki numunenin her iki yüzeyi düzeltilir.



a)

b)



c)

d)

Şekil 3.9 : Konsolidasyon Deney Numunesinin Hazırlanması

3.8.3. Deneyin Yapılışı

Ödometre deneyinde ASTM D 2435–2004 standartları uygulanmıştır. Deneye başlamadan önce ring içindeki numunenin kalınlığı ve çapı ölçülür. Numune kuru birim hacim ağırlığının belirlenebilmesi için hassas terazide tartılır. Numuneye ait başlangıç değerleri deney föyüne yazılır. Poroz taşlar damıtık su içine konularak

birkaç dakika beklenerek doymun hale getirilir. Böylece zemin numunesinden su emmeleri engellenir. Ödometre hücresinin tabanına poroz taş konur ve üzerine filtre kağıdı yerleştirilir. Ring içindeki numune yerleştirilir ve üzerine filtre kağıdı konur. Numunenin alt ve üst yüzeylerine filtre kağıdının konulmasının sebebi; poroz taşların gözeneklerinin dolmasını engellemektir. Yükleme halkası poroz taşın üzerine yerleştirilir. Okuma saati düşey oturmaları ölçebilecek şekilde yükleme halkasının üzerine yerleştirilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta zeminin deneye başlamadan yüklenmemesidir. Zemin numunesi doymun durumda deneye tabi tutulacağı için hazne daha önce belirlenmiş olan çöp sızıntı suyu (% 0, 5, 20, 50 ve 100) ve temiz su karışımı ile doldurulur.

Deneyin ilk aşaması olarak zemin numunesine 0.25 kgf/cm^2 düşey gerilme uygulanmış ve 24 saatlik konsolidasyon oturmaları kaydedilmiştir. Bu yüklemeyi takip eden her gün, ödometrenin yük askısına bir önceki günün iki katı kadar yük eklenerek, 0.50 kgf/cm^2 , 1.00 kgf/cm^2 , 2.00 kgf/cm^2 , 4.00 kgf/cm^2 , 8.00 kgf/cm^2 yük kademelerine çıkılmıştır. Bahsedilen yük kademelerinde ağırlıklar yüklenerek, okuma saatinden 1/4, 1/2 ve 1, 2, 4, 8, 15, 30 dakikalarında ve 1, 2, 4, 8, 16, 24 saatlerinde okuma alınır. Yükleme aşaması 8 kgf/cm^2 gerilme kademesine kadar aynı zaman aralıklarında okuma alınarak devam ettirilir. Zemin numunesinin yük kalktıktan sonraki davranışını belirlemek amacı ile uygulanan gerilmeler aynı yük kademeleri kullanılarak boşaltılır.

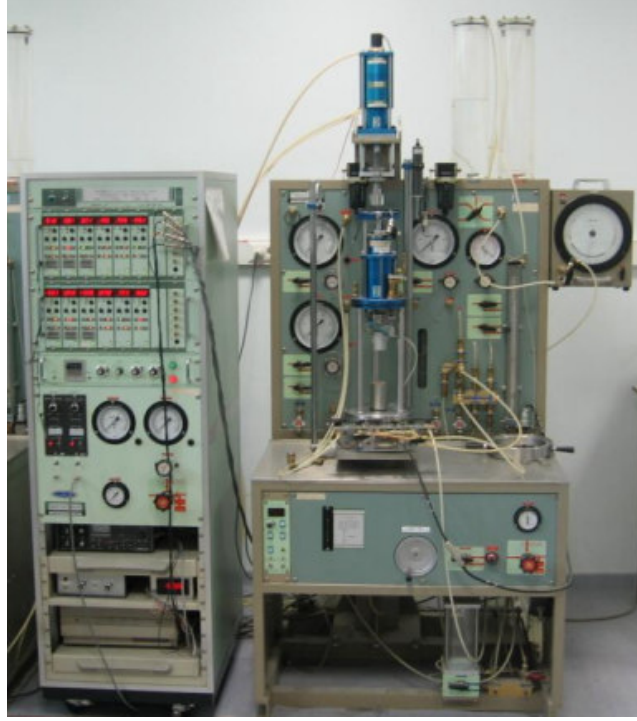
Uygulanan gerilme kademeleri tamamlandıktan sonra yükler kaldırılır. Ring ve numune birlikte alınır, üzerinde bulunan sular uzaklaştırılarak zemin numunesinin ıslak ağırlığı belirlenir. Sonra numune 105°C deki etüvde 24 saat kurutulur. Etüvden çıkarılan numune tartılarak kuru ağırlığı bulunur ve su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır.

3.9. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi

3.9.1. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

Bu araştırmada dinamik deneylerin yapıldığı deney sistemi klasik üç eksenli dinamik basınç deney sisteminin Japon “Seiken Inc” şirketi tarafından geliştirilmiş bir modeli olup İ.T.Ü-JICA projesi (Japonya Uluslararası İşbirliği Kuruluşu) kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği laboratuvarına getirilmiştir.

Şekil 3.10’ da görüldüğü gibi deney sistemi iki ana üniteden oluşmaktadır. Bunlar ünite A ölçüm ve ünite B yükleme birimi olarak isimlendirilmiştir.

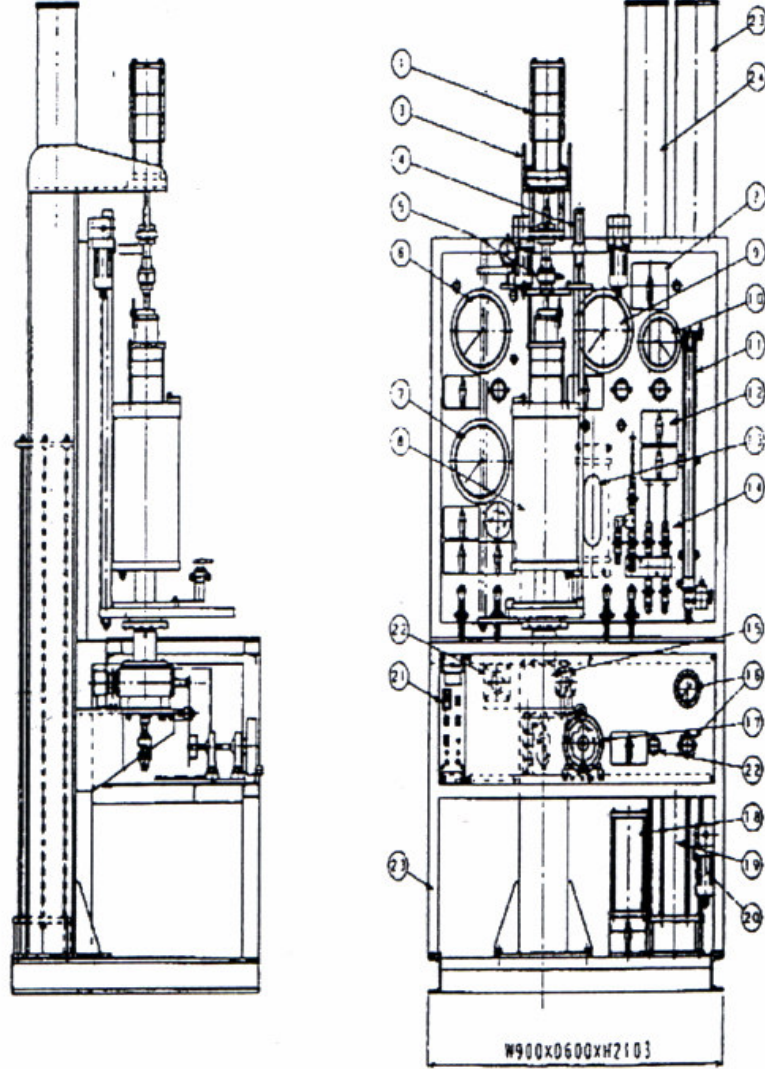


Şekil 3.10 : Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

3.9.1.1. Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre

Şekil 3.11’ da dinamik üç eksenli deney sisteminin yandan ve önden görünüşü ile üniteleri görülmektedir. Numunenin yerleştirildiği üç eksenli hücrenin 500 kgf düşey yük kapasitesi, 10 kg/cm² lik yatay yük kapasitesi veya hücre basıncı kapasitesi mevcuttur. Üst ve alt başlık parçaları değiştirilerek $\phi = 50, 60, 75$ mm çaplarında ve 100, 120, 150 mm yüksekliğinde numuneler ile deney yapılması mümkün olmaktadır. Düşey yük yükleme aletinin 200 kgf dinamik yük kapasitesi mevcuttur.

1 Pnömatik yükleme	13 Üst ters basınç tankı: 1.5 Litre
2 Ana vana valfi	14 Numuneye su giriş sistemi
3 Yükleme çerçevesi	15 Mekanik kol: Kapasite:500 kgf
4 Düşey deplasman ölçer : ± 20 mm	16 Ana basınç saati ve basınç regülatörü
5 Yük hücresi alt kısmı	17 Manuel kol
6 Düşey basınç saati: maks: 10 kgf/cm ²	18 Alt ters basınç tankı: 1.5 Litre
7 Çevre basıncı saati: maks: 10 kgf/cm ²	19 Su tankı: 10 Litre
8 Hücre	20 Hava fitresi
9 Ters basınç saati: maks: 10 kgf/cm ²	21 Hız kontrol ünitesi
10 Vakum saati: maks:-1 kgf/cm ²	22 Hava kaydırma regülatörü
11 Çift tüplü büret: 25 ml	23 Vakum tankı: 5 Litre
12 Açma kapama vanası	24 Havası alınmış su tankı: 5 Litre



Şekil 3.11 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Yandan ve Önden Görünüşü
(Özay, 2002)

Yükleme çerçevesinin içerisinde düşey yönde hareket eden piston vasıtası ile düşey dinamik yük üst başlığa aktarılmaktadır. Statik üç eksenli basınç deneyinin uygulamasında ise yükleme kapasitesi 500 kgf ve yükleme hızı 0.002 -2 mm/dak'

dır. Bu sistemin güç kaynağı 100 V' tur. Hava-Su ölçüm sistemi 0 ile 10 kg/cm² basınç ayarlanmasına uygundur. Çevre basıncı ile ters basıncın 0–10 kg/cm² değerleri arasında verilmesi regülatör yardımı ile düzenlenmektedir. Ayrıca bias vana yardımı ile düşey basınç, ters basınç ve çevre basıncı aynı anda arttırılabilmektedir. Alt ve üst başlıktan gelen drenaj kanallarına bağlı 25 ml' lik buretten hacim değişimi ölçülmekte ve ters basınç uygulanmaktadır. Sistemde 5 litrelik su tankı ve 5 litrelik damıtık vakum tankı mevcuttur. Basınç ayarlamaları SI ve metrik sisteme göre yapılabilmektedir.

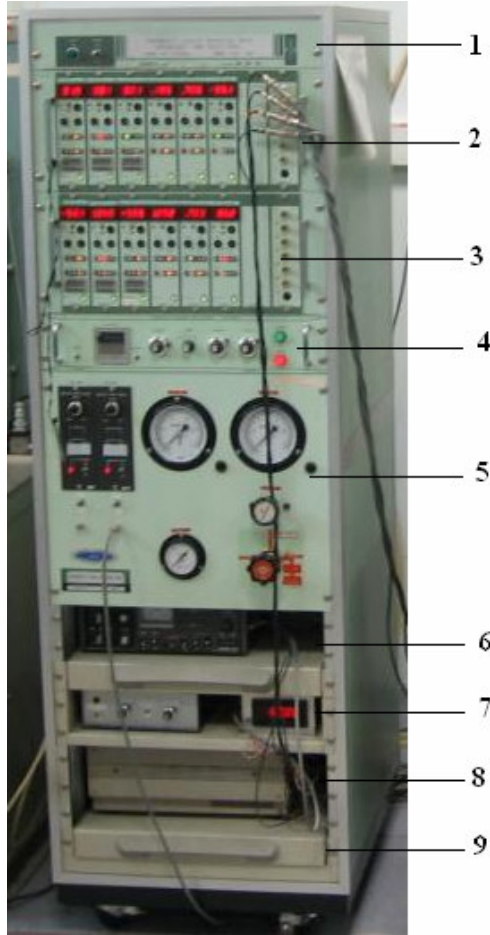
3.9.1.2. Elektriksel Ölçüm Birimi

Şekil 3.12' de dinamik yükleme ölçüm ve kayıt ünitesi görülmektedir. Elektriksel ölçüm ve kayıt birimi hem yüklemeyi kontrol etmekte hem de verilerin toplanıp aktarılmasında kullanılmaktadır. Pnömatik sinüzoidal yükleme birimi hem bir deprem kaydını yüklemeye hem de değişik frekanslarda sinüzoidal yük yüklemeye göre tasarlanmıştır. Sinüzoidal yüklerin frekansları 0.001 ile 2 Hz arasında değişebilecek şekilde ayarlanabilir. Elektriksel ölçüm ünitesi düşey yükleme transdüseri, düşey yer değiştirme transdüseri, boşluk suyu basıncı transdüseri, küçük yer değiştirme transdüseri, hacim değiştirme transdüserleri olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır.

Elektriksel voltaj değişimine göre çalışan bu ünitelerde yük uygulandığı zaman sistemde voltlar değişir. Yük kaldırıldığı zaman sistem otomatik olarak ilk denge durumuna getirilir.

Düşey dinamik yük üç değişik maksimum değerde uygulanmaktadır. Bu değerler 200 kgf, 100 kgf ve 40 kgf' ten ibarettir. Kullanılan zemin özelliğine göre uygulanacak düşey yük aralığı belirlenir. Düşey yer değişiminin ölçümü için de 20 mm, 10 mm ve 4 mm' olmak üzere üç seçenek bulunmaktadır. Boşluk suyu basıncı transdüserinden de üç değişik aralıkta ölçüm yapma imkanı vardır. Bu aralıklar 10 kgf/cm², 5 kgf/cm² ve 2 kgf/cm² dir. Küçük deplasmanlar ise hücre içerisinde üst başlığın bağlı olduğu düşey mile monte edilen biri sağda biri solda olmak üzere iki adet ACE–55 PAN model Gap-Sensor vasıtası ile algılanmaktadır. Üst başlığın çok küçük düşey yer değiştirme yapması buradaki algılayıcıları etkilemekte ve bunun sonucunda Gap-Sensorun çıkış voltajında bir değişiklik meydana gelmektedir. Bu sistemin klasik üç eksenli sistemlerden farkı budur. Maksimum çıkış voltajı 0.5 olan bu transdüserler de

1 mm, 0.5 mm ve 0.2 mm aralıklarında küçük deformasyon ölçümü yapmaya olanak sağlamaktadır. Üst başlığın iki yanında bulunan dairesel metal parçaları çok küçük yer değiştirme olması halinde bile sinyal almakta ve alınan sinyaller çıkış voltajını değiştirmektedir. Oluşan voltaj değişimi bir yer değiştirme sonucu olduğundan sistemin de yer değiştirmeden önceki denge durumu bilindiğinden ne kadar yer değiştirme olduğu iki pozisyon farkından hesaplanabilir. Ayrıca 25 mm' lik burete bağlı bir transdüser ile hacim değişimleri de elektriksel olarak ölçülmektedir. Deney sisteminde üst başlığa bağlı deformasyon mikrometresinden düşey yer değişimleri ve bürette oluşan su seviyesi değişiminden de hacimsel değişimler elde edilmektedir. Ölçülen bu değerler kişisel bilgisayara Virtuel Bench Logger programı aracılığı ile aktarılıp kaydedilmektedir. Aynı zamanda sisteme bağlı grafik çizici yardımı ile değerler grafik olarak kaydedilebilmektedir.



1	1 Ana elektrik kaynağı
2	2 Amplifikatörler CH1: Düşey yük, 200 kgf CH2: Düşey deplasman, ± 20 mm CH3: Boşluk suyu basıncı ölçer, 10 kgf/cm ² CH4: Düşey deplasman ölçer, ± 1 mm CH5: Düşey deplasman ölçer, ± 1 mm CH6: Hacim değişimi ölçer, 25 ml 6 kanal veri çıkış ünitesi
3	3 Amplifikatörler CH1: Düşey yük, 200 kgf CH2: Düşey deplasman, ± 20 mm CH3: Boşluk suyu basıncı ölçer, 10 kgf/cm ² CH4: Düşey deplasman ölçer, ± 1 mm CH5: Düşey deplasman ölçer, ± 1 mm CH6: Hacim değişimi ölçer, 25 ml 6 kanal veri çıkış ünitesi
4	4 Dinamik yükleme kontrol birimi
5	5 Dinamik yükleme basınç birimi
6	6 Veri kayıt birimi
7	7 Direkt akım amplifikatör
8	8 Kayıt cihazı (8 kanal)
9	9 Elektrik ölçüm birimleri

Şekil 3.12 : Dinamik Yükleme Ölçüm ve Kayıt Birimleri

3.9.2. Deney Sisteminin Kalibrasyonu

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

Dinamik üç eksenli deney aletinde kalibrasyonlar dijital panodaki deformasyon verilerinin karşılaştırılması ve panodaki değerlerin kontrolleri ile sağlanmaktadır. Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri Şekil 3.13’ de görülmektedir.



Şekil 3.13 : Ölçüm Sistemi Dijital Panosu

Panonun kalibrasyonu başlangıç olarak sistem çalıştırıldığında kazanç düğmesi, ATT5 düğmesi ve CAL.µε düğmelerinin ışıklarının yandığının kontrolü ile başlar. ATT düğmesi ölçümlerin hassaslığını kontrol eden bu düğmelerden 5’e basıldığında sistem 5 kez hassalaşır. Hassaslık düzeyi ATT 2 ve 1 içinde aynı şekilde ayarlanabilir. CAL.µε anahtarı ise giriş kalibrasyon anahtarı olarak adlandırılır ve CALL.ON anahtarına basıldığında kalibrasyon başlar. AUTO anahtarına basılarak voltmetredeki “0.00” okuması sağlanır ve CALL. ON düğmesine basılır GAIN kontrol düğmesi kullanılarak dijital voltmetre değeri “5.00” değerine ayarlanır. GAIN düğmesi amplifikatörün hassaslığını kontrol eder ve ATT düğmesi ile birlikte çalışır. Ölçüm değişim anahtarı olan ZERO-C-BAL anahtarı ZERO pozisyonundayken köprü denge direnci ZERO CONTROLLER ayarı kullanılarak voltmetre göstergesi “0.00”değerine getirilir. ZERO-C-BAL anahtarı C-BAL

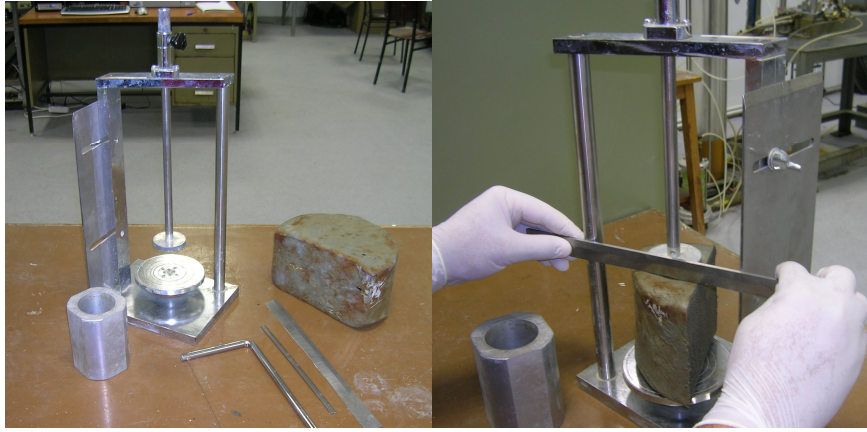
pozisyonundayken sabit tutulur ve voltmeter göstergesi C-BAL kontrolü kullanılarak “0.00” değerine ayarlanmalıdır. Sistemde ZERO-C-BAL anahtarı her iki durumda da “0.00” değerini gösterene kadar yukarıda anlatılan adımlar tekrar edilmelidir. Bu arada ölçümün hassalığının ayarlanması için ATT1,2 ya da 5 anahtarlarından biri seçilir ve kalibrasyon anahtarı olan CAL’ın MEAS yada GAIN durumunda olmasının önemi olmadan seçilen ATT ve altındaki anahtar devreye sokulmalıdır. GAIN anahtarı devrede iken voltaj çıkışını göstermektedir ve MEAS anahtarı da açıldığında ölçülen voltaj değeri başlangıçta ayarlanan gerçek büyüklüğü gösterecektir. Yani eğer yük hücresinde 5 volt 200kgf değerine ayarlanmışsa, gösterge GAIN konumunda 5 volt gösteriyor ise MEAS konumunda 200kgf göstermelidir. Örneğin ATT-1 anahtarına basıldığında CAL 10 anahtarına da basılmalıdır. AUTO anahtarına basılarak değerler “0.00” a ayarlanmalı ve CALL-ON anahtarına basılarak ve GAIN kontrolü kullanılarak voltmeter değeri “5.00” değerine getirilir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra AUTO anahtarına tekrar basılır ve değerlerin “0.00” a gelmesi sağlanır, daha sonra CAL anahtarı açılır ve GAIN kontrolü kullanılarak voltmeter değeri “5.00” a ayarlanır ve CAL anahtarı devreden çıkarılır. Böylelikle deneye hazır hale getirilen pano kayıt almaya hazır hale getirilmiş olur.

Dijital değerlerin kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçüm panosundaki dijital deformasyon okumalarının kalibrasyonu sistemin üzerine yerleştirilen mekanik deformasyon saatlerinden aynı anda alınan okumaların arasındaki bağıntının belirlenmesiyle yapılmaktadır. Mekanik saat okumaları sık okuma aralıkları belirlenir ve bu deformasyon miktarlarında düşey deformasyon ve küçük deformasyon okumaları dijital sayaçlardan kayıt edilir. Daha sonra bu verilerin mekanik saat verileri ile ilişkisi belirlenir ve kayıta alınan değerler bu katsayılarla çarpılarak deney sonuçlarının hazırlanması sırasında kullanılır.

3.9.3. Numune Hazırlanması

Dinamik deney uygulaması için, çamur konsolidasyon deney aletinden çıkarılan, çöp sızıntı suyu içeriği % 0, 5, 20, 50 ve 100 olan, 30 gün kür süreli örselenmemiş kil numunesi kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerden herbiri için, konsolidasyonlu ve konsolidasyonsuz olmak üzere iki adet dinamik deney yapılmıştır. Çöpsulu zeminlerin konsolidasyonu harici bir hücrede, 1 kgf/cm² çevre basıncı altında, numunenin alttan ve üstten drenajına izin verilerek 1 günde tamamlanmıştır.

Çamur konsolidasyon deney aletinde hazırlanmış numunelerin dinamik deney için hazırlanmasında, JGS T 520–1990 standartlarına uyulmuştur. Numunelerin deney için uygun çapa getirilmesi için tıraşlama aleti kullanılmıştır. Şekil 3.14’ de görüldüğü gibi numune tıraşlama aletine yerleştirilir ve tıraşlama bıçağı kullanılarak numune istenilen çapa (50 mm) getirilir. İstenilen çapa göre tıraşlanan numune aynı çapta boyu standart (100 mm) olan metal kalıplar arasına yerleştirilerek standart boyu aşan kısımları ince tel testere ile kesilir. Böylece çapı ve boyu mm hassasiyetinde silindirik numune kısa sürede hazırlanmış olur.



a) Tıraşlama aleti, tıraşlama bıçağı b) Numunenin tıraşlanması

Şekil 3.14 : Tıraşlama Aleti Kullanılarak Numune Hazırlanması

3.9.4. Deneyin Yapılışı

Deneye başlamadan önce numunenin çapı şerit mikrometre ile üstten, ortadan ve alttan olmak üzere üç farklı yerden ölçülür ve kaydedilir. Numunenin boyu, boy kompası ile ölçülür. Numunenin birim hacim ağırlığının bulunabilmesi için hassas terazide tartılır. Daha sonra 5 cm çapında, 10 cm yüksekliğindeki kalıp içine membran geçirilir ve membranın içine numune yerleştirilir. Alt piston üzerine suya doymun hale getirilmiş filtre kağıdı konularak membran içindeki numune buraya yerleştirilir. Membran alt pistonu O-ring ile sabitlenir. Sonra şerit şeklinde kesilip hazırlanan membran bantı ile başlık üzerindeki membran sıkıca çevrelenerek bağlanır. Bu işlem yapılırken arada boşluk kalmamasına, membranın düzgün ve gergin durmasına özen gösterilmelidir. Membran alt başlığa bu şekilde tespit edildikten sonra üst başlığın bulunduğu üç düşey kolonlu parça alt düzlem üzerine getirilip üç kolon ayağı da ilgili yerlere vidalanarak alt düzleme bağlı hale getirilir.

Piston vidası gevşetilerek üst başlığın numune üzerine değmesi sağlanır. Üst başlığın ağırlığından dolayı numunenin şişmemesini engellemek için başlık numuneye değer değmez daha önce gevşetilen başlığın düşey yönde hareket etmesini engelleyen vida sıkılır. Numune üzerine suya doygun hale getirilmiş filtre kağıdı konur. Üstteki kıvrılmış membran uçları üst başlığa geçirilir ve O-ring de membran üzerine getirilir. Alt başlıkta yapıldığı gibi plastik membran şeridi ile üst başlık etrafına sarılarak membran içerisine hava ve hücreden su girişi engellenir. Fleksiglas malzemeden yapılmış olan hücre alt düzlem üzerindeki yerine yerleştirilir. Hücre altından su sızıntı olmaması için silindirin O-ring üzerine iyice oturması ve arada toz, kum danesinin olmamasına özen gösterilmelidir. Hücre üst başlığı yerine tespit edilir ve üç adet vida sıkılarak hücre ile montajı sağlanır. Hücre grubu hava basıncı yardımı ile kaydırılarak yerine itilir. Yükleme pistonu aksı ile düşey yükü pistonu aktaran elemanın aynı hizaya gelmesi sağlandıktan sonra iki yandaki kelepçeler sıkılarak sistemin stabil hale gelmesi sağlanır. Düşey deformasyonların ölçülebilmesi için yükleme pistonuna tespit edilmiş iki adet elemanın soldakine mikrometre bağlanır. Sağdaki elemana ise elektrikli amplifikatörün 2 no' lu kanalından gelen dial gage bağlanır. Su tankına düşük basınç uygulanarak ve hücreye su temin eden musluk açılarak hücre damıtık su ile doldurulur. Hücre içindeki su seviyesi üst kotu üst başlık ortası civarındadır. Anlatılan bu işlemler sırasında tüm drenaj muslukları kapalı olmalıdır. Hücre su ile dolduktan sonra su tankındaki basınç sıfıra indirilir.

Elektrikli amplifikatörden gelen 1, 2, 3, 4 no' lu data hatları hücre üzerindeki ilgili soketlerine bağlanır. 1 no' lu kanal düşey yükleme kanalıdır. Numunenin kıvamına göre uygulanacak yükleme aralığı seçilir Ör, ATT 1 seçilirse 5 volt = 200 kgf bağlantısı geçerlidir. Bu durumda numune orta katı veya katı kıvamda ise seçilen aralık uygundur. Bu aralık seçildikten sonra gain ve zero dengeleme tuşları ile kanalın kalibrasyonu yapılır ve otomatik dengeleme ile sıfırlanır. Sonra ikinci kanal olan düşey yer değiştirme kanalının çalışma aralığı seçilir ve benzer şekilde kalibrasyonu yapılır. Boşluk suyu basıncı ölçümleri için 3 no' lu kanalın kalibrasyonu yapılır ve sıfırlanır. Küçük deformasyonların ölçüldüğü 4 no' lu kanalın kalibrasyonu yapılır ve sıfırlanır.

Çevre basıncı ve düşey basınç vanası açılarak hücre içerisine 0.1 kg/cm^2 lik basınç uygulanır. Yükleme pistonunu tutan vida gevşetilerek numunenin düşey yöndeki

hareketi serbest bırakılır. Çevre basıncı ve düşey basıncı 1 kg/cm^2 değerine getirilir ve düşey deformasyon saatinden boy değişimi kaydedilir.

Tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra panodaki değerler herhangi bir kalibrasyon yapmadan sadece AUTO anahtarı ile sıfırlanır. STATİK Dial düğmesi saat ibresi yönünde yavaşça döndürülerek düşey yükleme pistonunun numunenin üzerine değmesi sağlanır. Bu işlemin ardından, düşey basınç düğmesi yavaşça eksoz durumuna getirilir. Böylece düşey yükün pistonu aktarımı sağlanır. Bu işlem sırasında numunede boy değişiminin olmamasına özen gösterilmelidir. Yük aktarımından sonra birinci kanaldaki DV değeri '0.00'dan biraz değişmişse statik düğmenin çok az sağa veya sola döndürülmesi ile bu değer '0.00' a getirilir. Bu işlemlerin ardından ana panodan istenen yük değeri, frekans ayarlanır ve bilgisayarda verinin kayıt edilme aralığı, verinin saklanacağı dosya ismi belirlendikten sonra verilerin kaydını sağlayan programda başla butonuna basılarak kayıt almaya başlanır. Hemen ardından sistem son kez kontrol edilir ve ana panodan yüklemeyi başlatmak için "Başla" butonuna basılarak yüklemenin başlaması sağlanır. Sistem başlatılana kadar kayıt edilen datalar sonuçların değerlendirilmesi sırasında dikkate alınmaz. Deneyin ilk kısmı olan başlangıç Elastisite modülü değerlerinin belirlenmesinin ardından deneyin ikinci kısmına geçilir. Önce kanallardaki DV gösterge değerleri Auto tuşlarından sıfırlanır. Virtuel Bench Logger programında yeni bir dosya açılır. Programda kayıt almaya başlanır ve ardından deney aletindeki start düğmesine basılarak yükleme başlatılır. Yükleme bitince deneyin ilk kısmında olduğu gibi önce yükleme panosundaki stop düğmesine basılır. Bilgisayar kaydı durdurulur. Sıra ile önce dinamik yük sıfırlanır. Sonra düşey çevre basıncı uygulanarak statik düşey yük de kaldırılır. Hücredeki su basınç yardımı ile boşaltıldıktan sonra tüm basınçlar sıfıra indirilerek numune hücreden alınır. Numunede hiç kayıp olmayacak şekilde membran içindeki numune çıkarılır. Numunenin su muhtevasının belirlenmesi için hemen tartılır. 24 saat süre ile 105 C^0 deki etüve konur.

3.9.5. Verilerin Toplanması

Dinamik üç eksenli deney sisteminden tekrarlı düşey sinüzoidal yük, düşey yer değiştirmeler, boşluk suyu basınçları ve küçük yer değiştirmeler sayısal volt olarak kişisel bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Deneye başlamadan önce amplifikatörün data alınan kanallarının ATT butonları yardımı ile çalışma aralıkları seçilir. Örneğin

1. kanalda ATT 5' e 2. kanalda ATT 1' e 3. kanalda ATT 2' ye ve 4. kanalda ATT 5' e basılırsa sırası ile 1.kanal değeri 5 volt = 40 kgf, 2.kanal değeri 5 volt = 200 mm, 3. kanal değeri 5 volt = 5 kg/cm² ve 4. kanal değeri 0.5 volt = 0.2 mm olur. Bu kanallardaki değerler data hatları yardımı ile Virtuel Bench programına aktarılır. Hardware' den gelen bu 4 kanal kişisel bilgisayarın software' ine bağlanmıştır. Bu softwair 12 kanallıdır. Virtuel Bench programının deneye başlamadan önce veri toplamaya hazır hale getirilmesi gerekir. Bunun için Programın Loger dosyasına girilerek kanallar seçilir. Bu kanalların yukarıdaki örnekteki ölçeğe göre volt ayarları yapılır. Dosya bölümünden log uzantılı deney adını belirten dosya seçilir. Scan konfigürasyonu bölümünden saniyede kaç veri alınacağı seçilir. Eğer deneyin hızı küçükse saniyedeki veri alma aralığını büyük seçmek gerekir. Aksi takdirde hafıza çabuk dolar ve deney sırasında veri almaya devam edilemez. Filtre ayarı ve deneye başlayınca data almaya başlama ayarı yapılır. Bu ayarlardan sonra ekranda grafik olarak veri alma şekli gelir. Deneyin start tuşuna basmadan önce logon'a basılır. Önce bilgisayarın start tuşuna sonra dinamik deney aletinin start tuşuna basılarak deney başlatılır. Virtuel-Bench programında açtığımız dosyada kaydedilen bu dataalar Microsoft Office Excel programından açılarak log dosyası xls dosyası olarak kaydedilir. Burada dört kolon halindeki veriler kalibrasyon ile elde edilen katsayılarla çarpılarak fiziksel büyüklükler haline getirilir.

3.10. Sonuçlar

Bu bölümde yapılan çalışma kapsamında deneylerde kullanılan numune özellikleri, Atterberg limitleri, kesme kutusu, konsolidasyon ve dinamik üç eksenli deney yöntemleri ele alınmıştır. Bölüm 4' te ise deney sonuçları incelenecektir.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Giriş

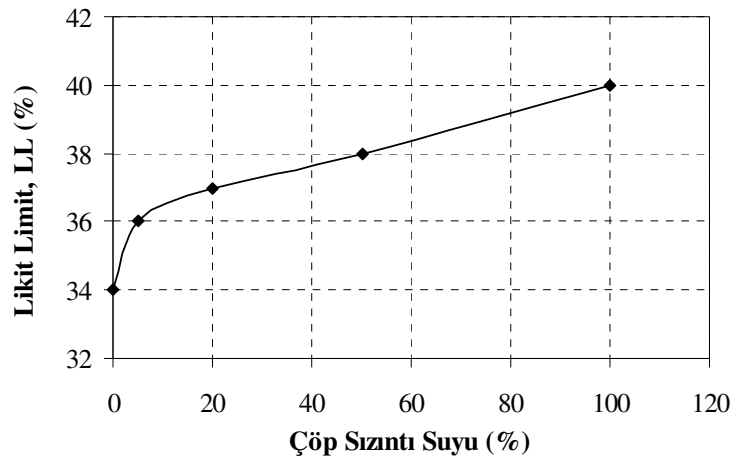
Bu bölümde çöp suyu oranının ve bu suyun zeminle etkileşim süresinin örselenmemiş zeminin statik ve dinamik yükler altındaki davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Atterberg kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney sonuçları detaylı şekilde ele alınmıştır. Atterberg kıvam limitleri deneylerinde zemine % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu katılarak kür oranının kıvam limitleri üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca aynı kür oranlarında hazırlanmış numuneler 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakılarak kür süresi ile kıvam limitlerindeki değişimler incelenmiştir. Kesme kutusu deneylerinde de kür oranının zeminin statik yükler altında şekil değiştirme ve kayma direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla zemine % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu katılarak 30 günlük kür süresi sonunda deneye tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin aynı özellikte olmasını sağlamak amacı ile tüm deney numuneleri aynı karışım oranlarında çamur konsolidasyon deney aleti kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca, çöp suyu içermeyen temiz zemin numunesi de yine, çöp suyu karışım oranları ile aynı oranda temiz su içerecek şekilde çamur konsolidasyon deney aleti ile hazırlanmıştır. Ödometre deneyinde de yine çamur konsolidasyon deney aleti ile hazırlanmış, çöp sızıntı suyu oranları % 5, 20, 50 ve % 100 olan, kür süresi 30 günlük numuneler ile temiz zemin numunesi ele alınmıştır. Bu deney ile 30 günlük kür süresi içerisinde, kür oranının zeminin hacim değiştirme davranışı, permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı üzerine etkisi incelenmiştir. Son olarak % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında, kür süresi 30 gün olan numunelerin dinamik üç eksenli deney sonuçları ele alınmıştır. Bu deney sonuçları ile 30 günlük kür süresi içerisinde, kür oranının zeminin dinamik yükler altında şekil değiştirme davranışı ve Elastisite modülü üzerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bütün bu deney sonuçları

da yine, çamur konsolidasyon deney aleti ile hazırlanmış kirlenmemiş temiz zeminle yapılan kıvam limiti, kesme kutusu, ödometre ve dinamik deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçlarının gerçekçi ve güvenilir olması için deneylerde Kemberburgaz Katı Atık Tesis alanından getirilen dolgu malzemesi ve çöp sızıntı suyu kullanılmıştır. CL (Düşük plastisiteli inorganik killeri) sınıfı bu zeminin LL= (%) 34, PL (%)= 20 ve PI (%)= 14 olarak belirlenmiştir.

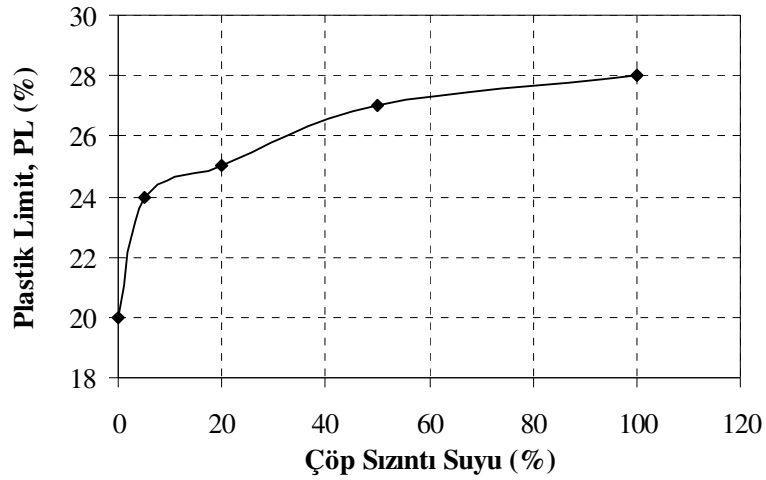
4.2. Kür Oranının Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi (t= 0)

Zemine farklı oranlarda çöp sızıntı suyu katılarak zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin çöp sızıntı suyu oranına ve kür süresi t=0 olmasına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Şekil 4.1’ de likit limit deney sonuçları görülmektedir. Buna göre zeminin temiz (çöp sızıntı suyu: % 0) olması durumunda likit limit % 34 olarak belirlenmiştir. Zemine % 5 oranında çöp sızıntı suyu katılması ile LL= % 36 değerine yükselir. Çöp sızıntı suyu oranı % 20’ ye çıkarıldığında LL= % 37’ e yükselmiştir. Çöp sızıntı suyu oranındaki artışla birlikte likit limit değeri de artmıştır. % 50 çöp sızıntı suyu oranında likit limit % 38, % 100 çöp sızıntı suyu oranında % 40 değerine ulaşmıştır. Görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu oranı arttıkça likit limit değeri artmaktadır. Çünkü çöp sızıntı suyu içindeki organik maddeler likit limit değerini arttırmaktadır. Bu nedenle en çok organik madde içeren % 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış zemin numunesinin likit limit değeri maksimum olmaktadır.



Şekil 4.1 : Çöp Sızıntı Suyu Oranının Likit Limit Üzerine Etkisi (t=0)

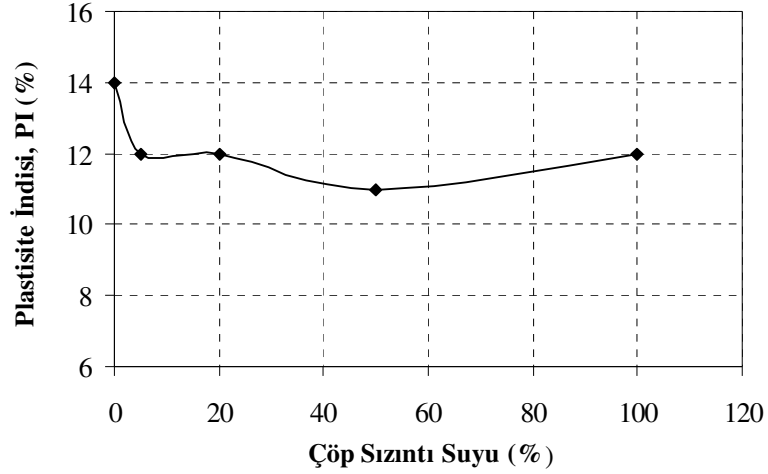
Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi plastik limit (PL) değeri çöp sızıntı suyu katılmamış zemin için (PL= % 20) minimumdur. % 5 çöp sızıntı suyu oranında ise plastik limit % 24 değerindedir. % 20 çöp sızıntı suyu oranında plastik limit % 5 çöp sızıntı suyu oranına göre artarak % 25 değerine ulaşmıştır. Bu artış % 50 çöp sızıntı suyu oranında da devam ederek plastik limit % 27 olmuştur. % 100 çöp sızıntı suyu oranında da yine plastik limit değeri artarak % 28 değerine ulaşmıştır. Çöp sızıntı suyu katkılı zemin numunelerinin plastik limit değeri temiz zemin numunesine göre daha yüksektir. Fakat çöp sızıntı suyu katılmış numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde çöp sızıntı suyu oranı arttıkça plastik limit değerinin bir miktar artış gösterdiği görülür.



Şekil 4.2 : Çöp Sızıntı Suyu Oranının Plastik Limit Üzerine Etkisi (t= 0)

Plastisite indisi (PI) ise Şekil 4.3’ de görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu miktarındaki artışla düşme eğilimi göstermiş ve daha sonra sabit kalmıştır. Temiz zeminin plastisite indisi (PI= % 14) çöp sızıntı suyu katılmış numunelere göre daha büyüktür. % 50 çöp sızıntı suyu oranında plastisite indisi (PI= % 11) minimum değerine ulaşmış, diğer çöp suyu oranlarında ise sabit kalarak, başlangıç değerine göre bir miktar azalmıştır.

Sonuç olarak plastisite indisi, zeminlerin plastik davranış gösterdiği su muhtevaları aralığının genişliğini göstermektedir. Likit limit ve plastisite indisinin birlikte değerlendirilmesi zeminin plastisitesinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.3 : Çöp Sızıntı Suyu Oranının Plastisite İndisi Üzerine Etkisi (t=0)

Bilindiği gibi organik maddeler zeminin Atterberg limitlerini arttırmaktadır. Bunun neticesinde kür süresinin sıfır olması durumunda, organik içerikli çöp sızıntı suyu oranı arttıkça zeminin likit limit ve plastik limit değerleri artmış, plastisite indisi ise sabit kalmıştır.

4.3. Kür Süresinin Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi

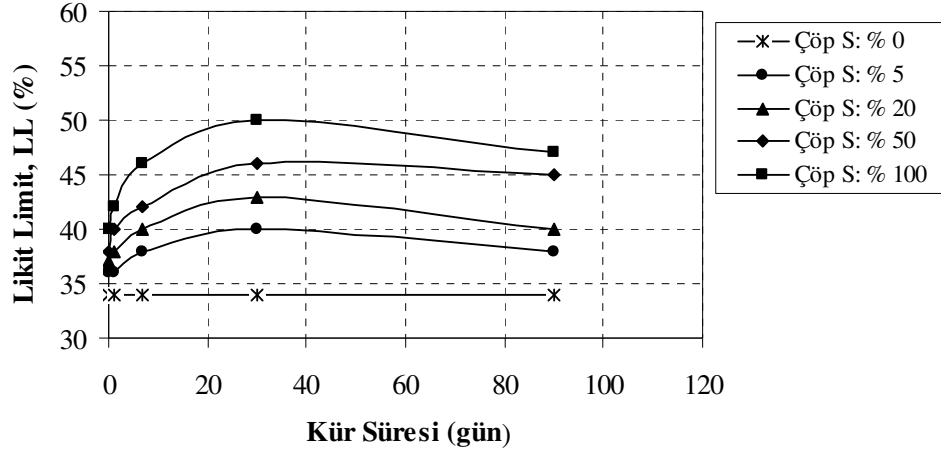
Çöp sızıntı suyu oranı % 5, 20, 50 ve % 100 numuneler 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakılarak kıvam limitleri deneylerine tabi tutulmuştur (Tablo 4.1). Bu deneylere ait sonuçlar kür süreleri ve kür oranları dikkate alınarak verilmiştir. Bu sonuçların incelenmesi sırasında ilk olarak likit limitteki (LL) değişim ele alınmıştır. Daha sonra sırası ile plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) incelenmiştir. Bu amaçla her çöp sızıntı suyu oranını kapsayan likit limit-kür süresi, plastik limit-kür süresi ve plastisite indisi-kür süresi grafiklerinden yararlanılmıştır.

Ayrıca farklı kür süreleri içinde, tüm çöp suyu oranları için elde edilen kıvam limiti değerleriyle karşılaştırmak üzere, temiz zemin numunesinin kür süresiz, kıvam limiti deneyi sonucu elde edilen likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerine de yer verilmiştir. Temiz zeminin kıvam limiti değerleri Tablo 4.1’ de en üstte belirtilmiştir.

Tablo 4.1 : Kür Oranı ve Kür Süresinin Kıyım Limitleri Üzerine Etkisi

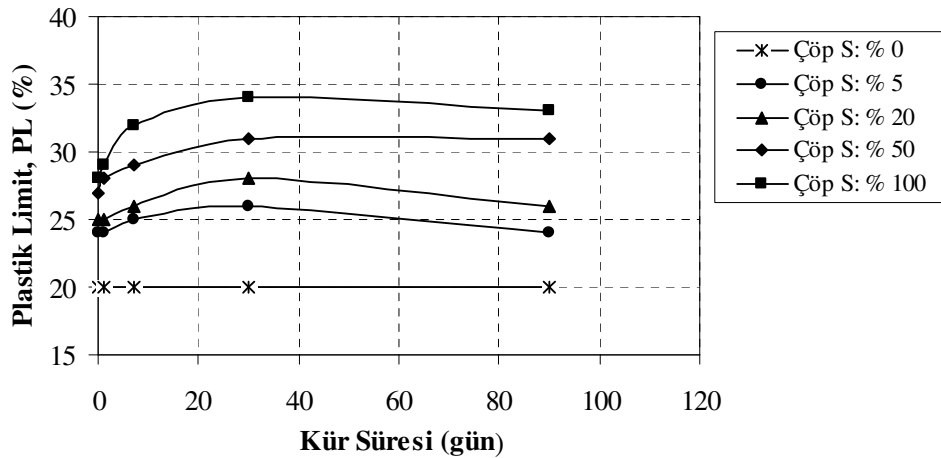
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
0	0	34	20	14
5	0	36	24	12
	1	36	24	12
	7	38	25	13
	30	40	26	14
	90	38	24	14
20	0	37	25	12
	1	38	25	13
	7	40	26	14
	30	43	28	15
	90	40	26	14
50	0	38	27	11
	1	40	28	12
	7	42	29	13
	30	46	31	15
	90	45	31	14
100	0	40	28	12
	1	42	29	13
	7	46	32	14
	30	50	34	16
	90	47	33	14

Şekil 4.4.’ de temiz zemin ile % 5, 20, 50 ve % 100 kür oranlarında çöp suyu içeren numunelerin, 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür sürelerindeki likit limit değerlerinin değişimi görülmektedir. Buradan tüm çöp sızıntı suyu oranlarında, likit limit değerlerinin kür süresi artıkça artarak 30 günlük kür sonunda maksimum değerlere ulaştığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu 30 günlük kür süresinden sonra 90. güne kadar ise, likit limit değerleri tüm çöpsuyu içeren numuneler için, Şekil 4.4.’ den de anlaşılabacağı gibi azalmıştır. Ancak 90 günlük kür süresindeki bu azalmaya rağmen, çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin likit limit değerleri, temiz zemin numunesinden daha yüksektir. Ayrıca çöp sızıntı suyu oranındaki artışla birlikte, likit limit değerleri artarak % 100 çöp sızıntı suyu oranında maksimum değere ulaşmıştır.



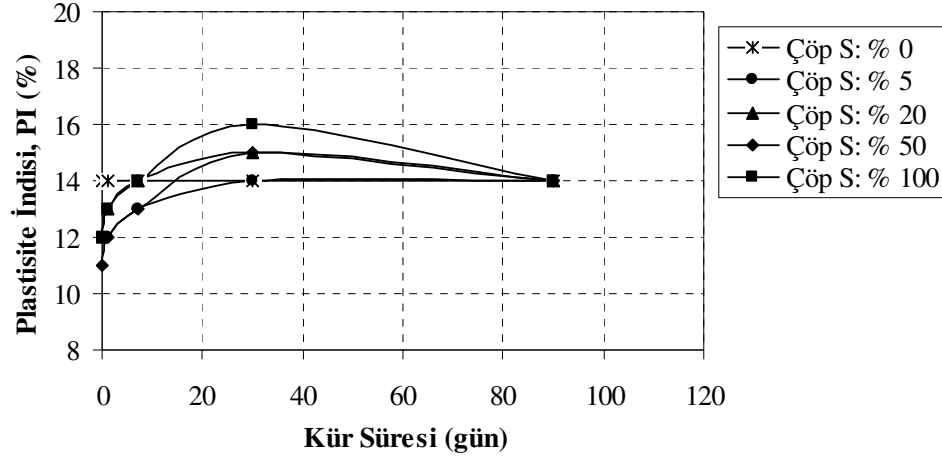
Şekil 4.4 : Kür Süresinin Likit Limit Üzerine Etkisi t= 0–90 gün

Şekil 4.5’ de görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastik limit benzer davranış göstermektedir. Çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunelerinin plastik limit değerleri temiz zemine göre daha yüksektir. Ayrıca çöp sızıntı suyu oranı arttıkça plastik limit değeri artmaktadır. % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin plastik limit değerleri, diğer numunelerden daha yüksektir. Şekil 4.5.’ den görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastik limit değerleri, 7 gün de dahil olmak üzere kür süresi arttıkça artmıştır. 30 günlük kür sonunda da plastik limit değerleri 7 güne göre artmıştır. 90 günlük kür süresi sonunda ise tüm çöp sızıntı suyu oranlarında bu sefer plastik limit azalmıştır. Ancak 90. gündeki düşmelere rağmen plastik limit değerleri temiz zemine göre daha büyüktür.



Şekil 4.5 : Kür Süresinin Plastik Limit Üzerine Etkisi t= 0–90 gün

Çöp sızıntı suyu katılmış zemin numuneleri, Şekil 4.6’ daki plastisite indisi grafiğinde yine, likit limit ve plastik limittekinе benzer davranış göstermiştir. Tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastisite indisi artarak, 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra Şekil 4.6.’dan görüldüğü gibi plastisite indisinde 90 günlük kür süresi ile birlikte bir azalma gözlenmiş ve son değerler başlangıç değerlerine yaklaşmıştır.



Şekil 4.6 : Kür Süresinin Plastisite İndisi Üzerine Etkisi t= 0–90 gün

4.4. Statik Yükler Altında Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı ve Kayma Direnci

4.4.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranının Etkisi

Değişik kür oranlarında kirlenmiş örselenmemiş zeminlerin statik yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve kayma direnci davranışının incelenmesi amacı ile konsolidasyonlu-drenajsız deneyler yapılmış ve davranış biçimleri kirlenmemiş örselenmemiş zeminin davranışları ile karşılaştırılmıştır. Zeminin farklı yükler altındaki davranışının belirlenmesi amacı ile her bir numuneye 100, 200 ve 300 kPa normal gerilme uygulanarak kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Deney sırasında kaydedilen kuvvet halkası ve yatay deplasman okumaları (4.1) kullanılarak kayma gerilmesi-yatay deplasman eğrileri çizilir. Şekil 4.7’ de bu eğrilere örnek vermek amacı ile küre bırakılmamış çöp sızıntı suyu içermeyen numuneye ait grafik verilmiştir. Diğer kür oranlarına ait grafikler Ek A’ da verilmiştir.

$$\tau = \frac{P}{A_c} \quad (4.1)$$

τ = Kayma gerilmesi, P kayma kuvveti,

A_c ise numunede kaymanın meydana geldiği düzeltilmiş alanı göstermektedir.

Düzeltilmiş alanın hesaplanabilmesi için aşağıdaki gibi öncelikle yatay deformasyonların hesaplanması gerekir.

$$\Delta L = \text{Yatay deformasyon saat okuması} \times \text{Saat katsayısı} \quad (4.2)$$

Yatay deplasmanların hesaplanmasının ardından alan düzeltmesine geçilir.

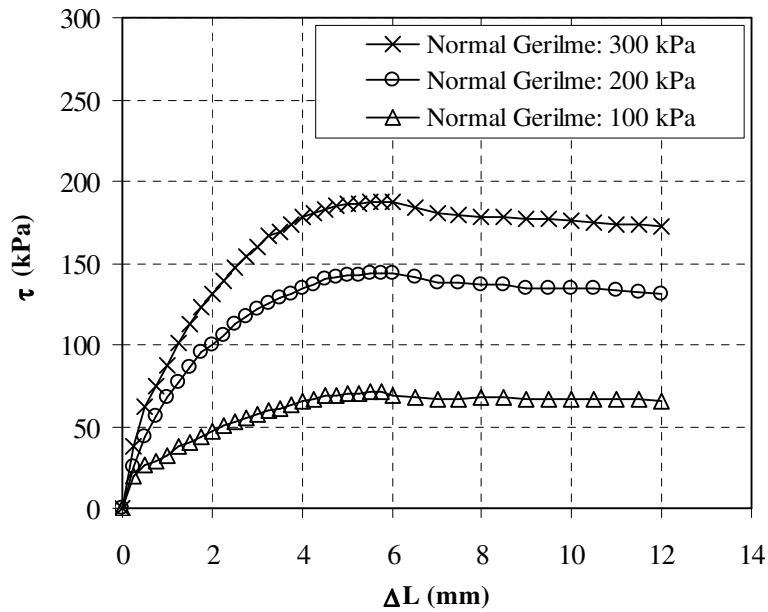
$$A_c = L(W - \Delta L) \quad (4.3)$$

L , W = Kesme kutusunun kenar uzunlukları

Aynı alandaki normal gerilme ise:

$$\sigma = \frac{N}{A_c} \quad (4.4)$$

Olarak elde edilir. Burada N normal kuvveti göstermektedir.



Şekil 4.7 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (Temiz Zemin)

Şekil 4.7' den görüldüğü gibi eğri başlangıç kısımlarında oldukça lineer olup daha sonra bir maksimum noktaya ulaşır. Bu noktadan sonra kayma gerilmelerinde bir miktar azalma görülür ve kırılma meydana geldiği kabul edilir. Eğrinin maksimum olduğu noktadaki kayma gerilmesi zeminin belli bir normal gerilme altında kayma mukavemetini vermektedir. Örneğin bu grafik için 100 kPa normal gerilme için kayma mukavemeti 71.2 kPa olarak belirlenmiştir. Normal gerilmenin artması ile kayma mukavemeti değerleri artmaktadır. Çünkü numune oturmakta boşluk oranı azalmakta ve birim hacim ağırlığı artmaktadır. Bu deney için en büyük kayma direncine normal gerilmenin en yüksek olduğu 300 kPa' da ulaşılmıştır.

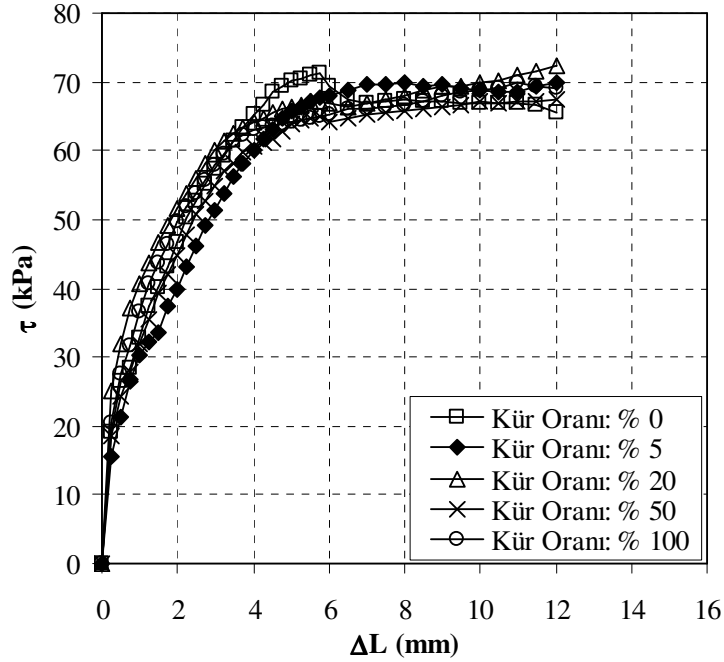
Şekil 4.7' dekine benzer grafiklerden yararlanılarak çöp sızıntı suyu oranının gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi incelenmiştir. Ancak burada öncelikle küre bırakılmamış, temiz numuneye ait grafikler ele alınmıştır. Diğer kür oranlarına ait çalışmaların grafiklerine Ek A' de yer verilmiştir.

Tablo 4.2' de farklı kür oranlarına ve 30 günlük kür süresine sahip deney numunelerine ait su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerlerine yer verilmiştir. Numunelere ait deney sonuçlarının doğru değerlendirilebilmesi için her bir numuneye ait su muhtevası değerleri belirlenmiştir.

Tablo 4.2 : Kesme Kutusu Deneyi w - γ_k Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	σ_n (kPa)	Deney Başı γ_n (kN/m ³)	Deney Başı w_{ilk} (%)	Deney Sonu w_{son} (%)	Deney Başı γ_{ilk} (kN/m ³)	Deney Sonu γ_{son} (kN/m ³)
0	30	100	19.94	30	25.25	15.34	15.92
		200	19.84	30	23.69	15.26	16.04
		300	19.88	30	19.49	15.29	16.64
5	30	100	19.66	30	26.18	15.12	15.58
		200	19.64	30	24.54	15.11	15.77
		300	19.66	30	24.08	15.12	15.84
20	30	100	19.83	29	25.29	15.37	15.83
		200	19.58	29	24.51	15.18	15.73
		300	19.61	29	23.65	15.20	15.86
50	30	100	19.70	28	25.68	15.39	15.67
		200	19.43	28	25.11	15.18	15.53
		300	20.24	28	24.04	15.81	16.32
100	30	100	19.83	28	25.90	15.49	15.75
		200	19.56	28	24.23	15.28	15.74
		300	20.22	28	22.76	15.80	16.47

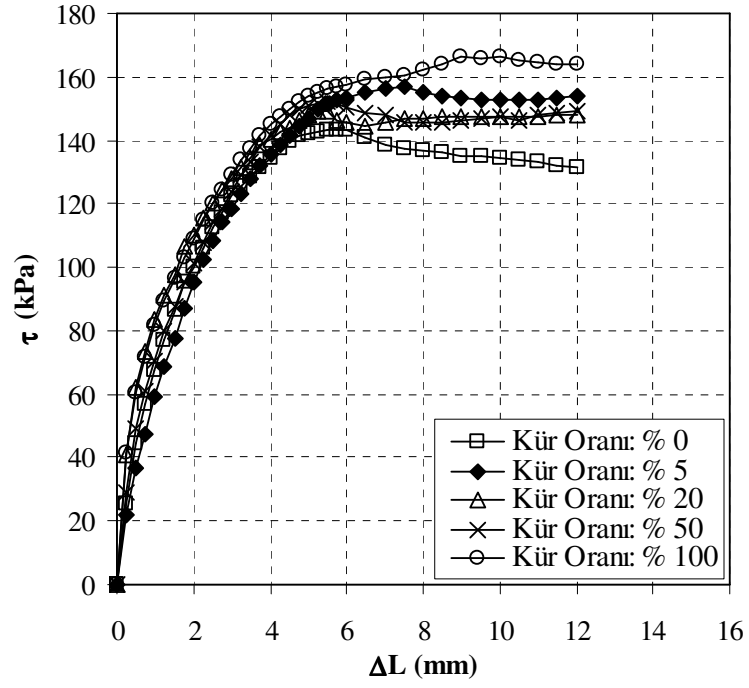
Şekil 4.8, 4.9 ve Şekil 4.10’ da farklı oranlarda çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinin 100, 200 ve 300 kPa normal gerilme kademelerine ait kayma gerilmesi-yatay deplasman eğrileri verilmiştir. Şekil 4.8’ de $\sigma = 100$ kPa değerinde grafikten, % 20 çöp sızıntı suyu oranında τ_{maks} en büyük ve % 50’ de en küçüktür.



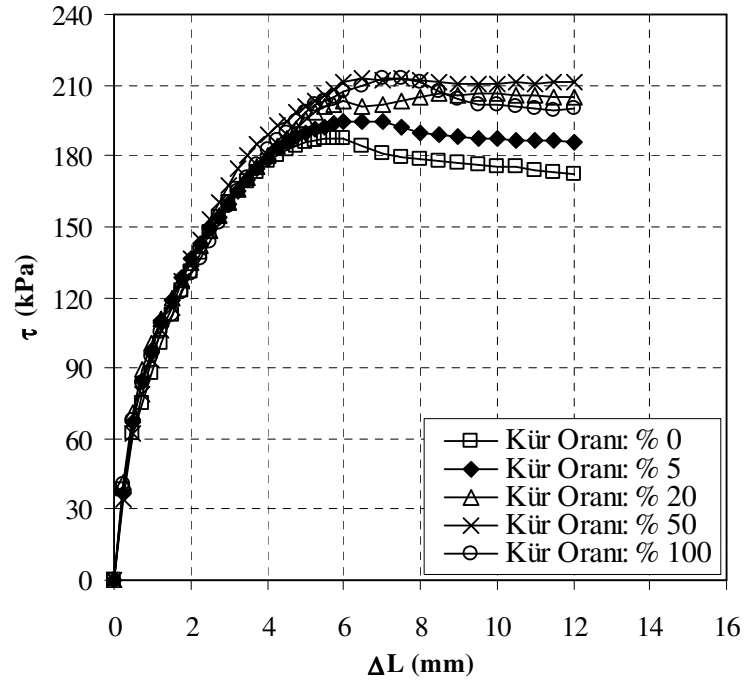
Şekil 4.8 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi ($\sigma = 100$ kPa, $t= 30$ gün)

Şekil 4.9’ da $\sigma = 200$ kPa’ a ait eğriler görülmektedir. $\sigma = 200$ kPa değerinde grafikten, % 100 çöp sızıntı suyu oranında τ_{maks} en büyük ve temiz zeminde ise en küçüktür. Pik noktalara ulaşılan deformasyon seviyeleri incelendiğinde; % 100 çöp sızıntı suyu oranında deformasyon seviyesinin en yüksek, temiz zeminde ise en düşük olduğu görülür.

Şekil 4.10’ da $\sigma = 300$ kPa’ a ait eğriler görülmektedir. Her çöp sızıntı suyu oranına ait τ_{maks} değerleri incelendiğinde; % 100 çöp sızıntı suyu oranında bu değer maksimum, temiz zeminde ise minimum olduğu görülür. Pik noktalara ulaşılan deformasyon seviyeleri incelendiğinde; % 100 çöp sızıntı suyu oranında deformasyon seviyesinin en yüksek, temiz zeminde ise en düşük olduğu görülür.



Şekil 4.9 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi ($\sigma = 200$ kPa, $t = 30$ gün)

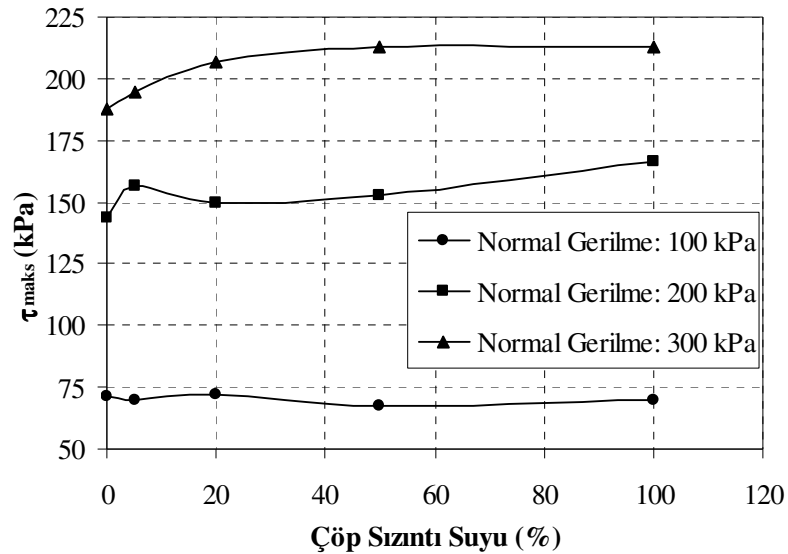


Şekil 4.10 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi ($\sigma = 300$ kPa, $t = 30$ gün)

t= 30 gün için hazırlanmış olan $\tau - \Delta L$ grafiklerinden yararlanarak, kür oranı ile zeminin kayma mukavemeti değişimleri Şekil 4.11’ de gösterilmiştir. Tablo 4.3’ de kesme kutusu deneyine ait, maksimum kayma gerilmesi ve normal gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo 4.3 : Kesme Kutusu Deneyi τ_{maks} - σ Değerleri

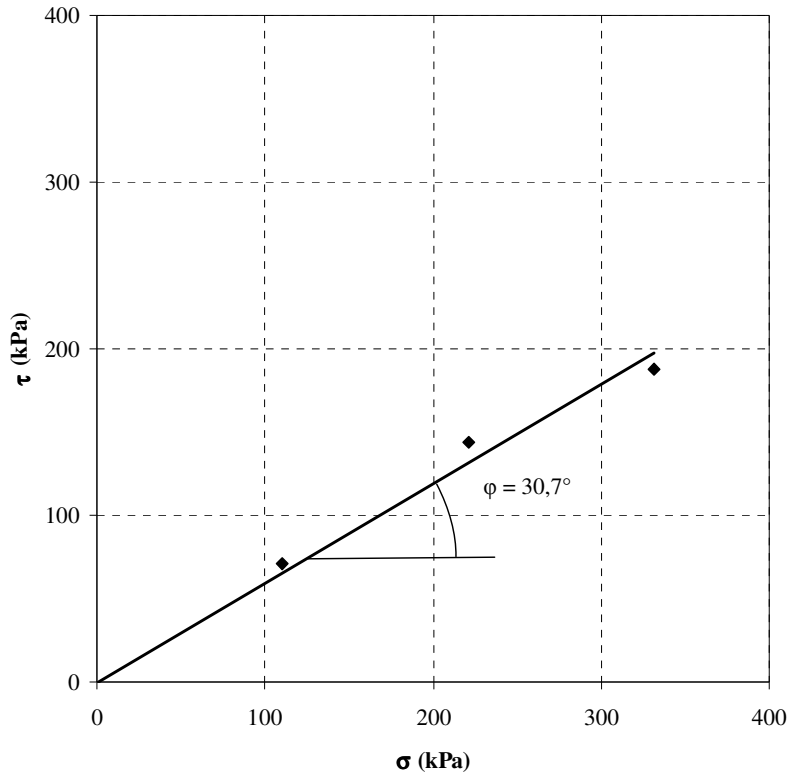
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	σ_n (kPa)	τ_{maks} (kPa)	σ (kPa)
0	30	100	71.2	110.6
		200	143.5	221.2
		300	187.5	331.8
5	30	100	70.0	125.0
		200	156.9	228.6
		300	194.7	339.6
20	30	100	72.4	125.0
		200	149.4	220.2
		300	206.7	349.5
50	30	100	67.4	125.0
		200	152.3	220.2
		300	212.8	342.9
100	30	100	69.9	122.4
		200	166.5	250.0
		300	213.2	342.9



Şekil 4.11 : Kür Oranının τ_{maks} Üzerine Etkisi (t= 30gün)

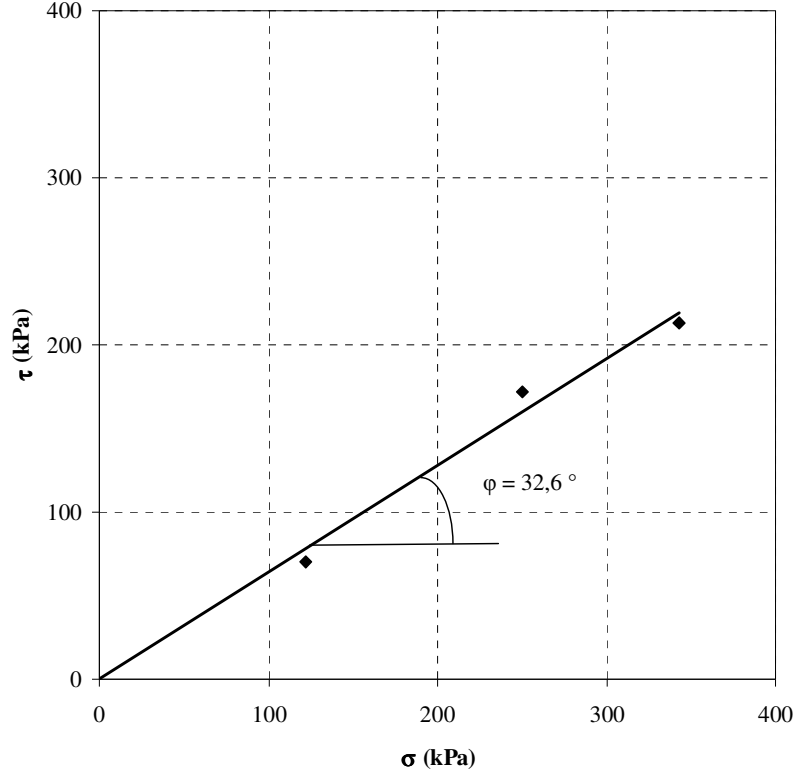
4.4.2. Kayma Direnci Üzerinde Kür Oranının Etkisi

Örselenmemiş zemine farklı oranlarda çöp sızıntı suyu karıştırılarak hazırlanmış zemin numunelerinin kayma mukavemeti parametrelerinin (c , ϕ) çöp sızıntı suyu miktarı ile değişimi bu bölümde ele alınacaktır. Zeminler normal konsolide kil özelliği gösterdiğinden kohezyon değerleri sıfırdır. Bu nedenle kırılma zarfları eğrileri sıfır değerinden başlamaktadır. Şekil 4.12’ de örselenmemiş temiz zeminin kırılma zarfı görülmektedir. Diğer kür oranlarına ait grafikler Ek A’ da verilmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak ϕ değerleri hesaplanmıştır.



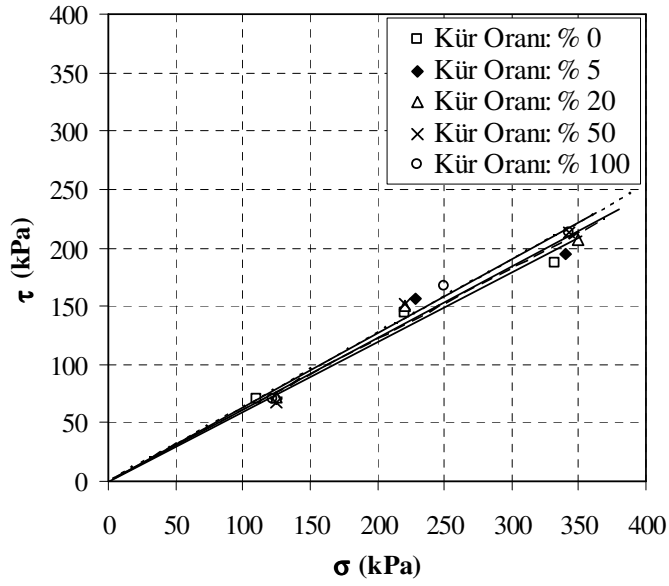
Şekil 4.12 : Kırılma Zarfı (Temiz Zemin)

Şekil 4.13’ de 30 günlük kür süreli, % 100 çöp suyu içeren örselenmemiş numuneye ait kırılma zarfı görülmektedir. Bu grafiklerden, temiz zemin ile % 100 çöp suyu içeren numunenin kayma mukavemeti açısı değerleri karşılaştırıldığında aşırı bir artış olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.13 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 30gün)

Şekil 4.14' de ise 30 günlük kür süresinde, ϕ değerlerinin kür oranı ile değişimi görülmektedir.



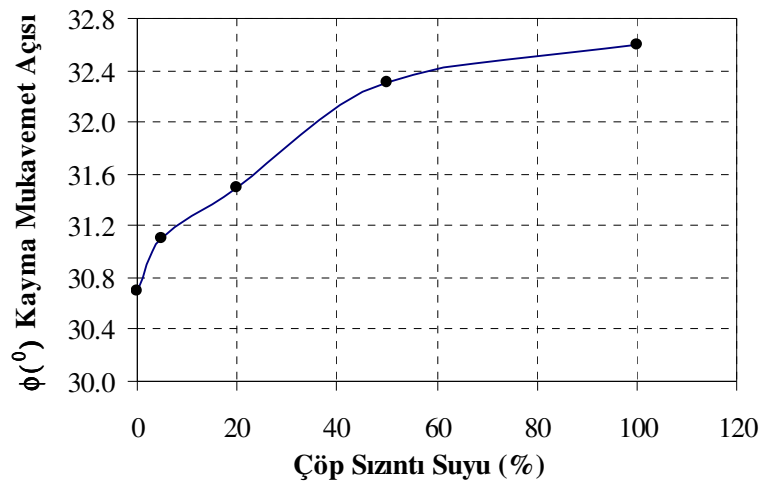
Şekil 4.14 : Kırılma Zarfı (t=30gün)

Şekilden anlaşıldığı gibi, temiz zeminin kayma mukavemeti açısı (ϕ) minimumdur. Zemine çöp sızıntı suyu katılması ile ϕ artmıştır. % 100 çöp sızıntı suyu oranında ise kayma mukavemeti açısı ϕ ' de en fazla artış görülür. Buna göre % 100 çöp sızıntı suyu oranında ϕ maksimumdur. Çöp sızıntı suyu katılmış numuneleri kendi aralarında incelersek; ϕ değeri % 5, % 20 ve % 50 çöp sızıntı suyu oranlarında temiz zemine göre artmıştır. Tablo 4.4' de ise kesme kutusu deneyine ait ϕ değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.4 : Kesme Kutusu Deneyi ϕ Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	$\phi (^{\circ})$
0	30	30.7
5	30	31.1
20	30	31.5
50	30	32.3
100	30	32.6

30 gün kür süreli numuneler, normal konsolide oldukları için kohezyon değerleri ($c=0$) sıfırdır. Şekil 4.15' de $t= 30$ günlük kür sürelerine ait ϕ değerlerinin kür oranı ile değişimi görülmektedir. Bu grafiklerinden elde edilen sonuca göre; temiz zeminden başlayarak % 100 çöp suyu oranına kadar, çöp sızıntı suyu oranındaki artışla ϕ artmıştır.



Şekil 4.15 : Kür Oranının ϕ Üzerine Etkisi ($t=30$ gün)

4.5. Ödometre Deney Sonuçları

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranı ile çamur konsolidasyon numune hazırlama deney aletinde hazırlanmış numuneler standart kademeli yüklemeli ödometre deneyine tabi tutularak zeminin hacim değiştirme davranışı ve permeabilite katsayısı üzerine çöp sızıntı suyu oranının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla elde edilen deney sonuçları iki aşamada ele alınacaktır. İlk olarak konsolidasyon katsayısındaki değişim daha sonra ise permeabilite katsayısındaki değişim ele alınacaktır. Tablo 4.5’ de ödometre deneyine ait w ve γ değerleri belirtilmiştir. Tablo 4.6’ de ise ödometre deney sonuçlarına göre hesaplanan, konsolidasyon katsayısı (c_v) ve permeabilite katsayısı (k) değerleri verilmiştir. Diğer kür oranlarına ait grafikler Ek B’ de verilmiştir.

Tablo 4.5 : Ödometre Deneyi w ve γ Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Deney Başı w_{ilk} (%)	Deney Sonu w_{son} (%)	Deney Başı γ_{ilk} (kN/m ³)	Deney Sonu γ_{son} (kN/m ³)
0	30	30	22.77	19.91	22.02
5	30	30	22.62	19.52	21.14
20	30	29	21.92	20.46	21.63
50	30	28	22.10	20.40	21.57
100	30	28	21.87	20.65	22.42

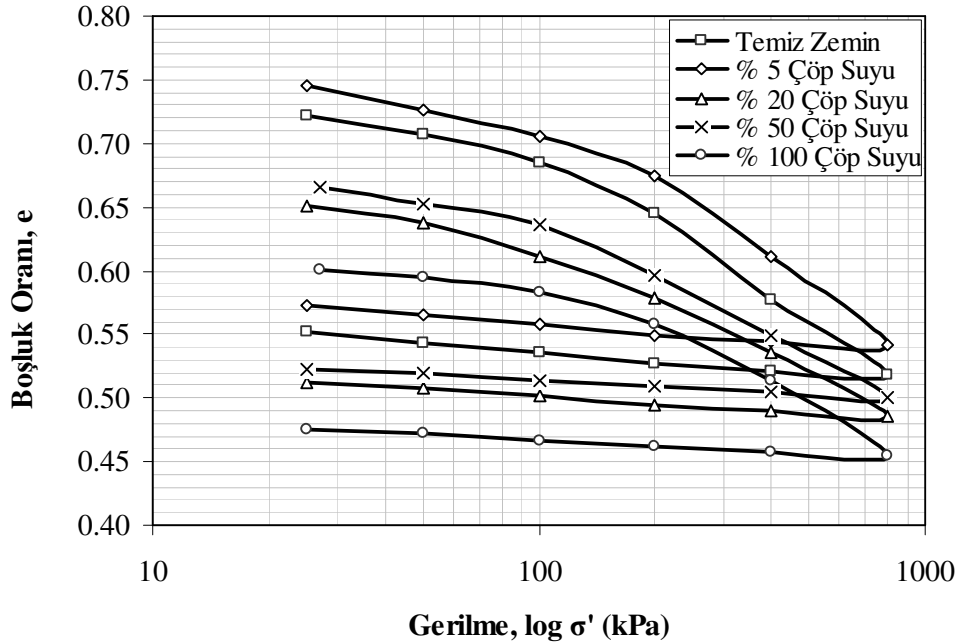
Tablo 4.6 : Ödometre Deney Sonuçları Hesaplanan c_v ve k Değerleri

Çöp sızıntı suyu(%)	P (kPa)	Kür S: 30 gün	
		c_v (cm ² /sn) 10^{-4}	k (cm/sn) 10^{-8}
0	25	19.94	24.2
	50	9.932	15.71
	100	20.24	21.12
	200	11.74	9.134
	400	25.48	15.68
	800	33.44	13.85
5	25	33.02	33.22
	50	25.07	36.21
	100	60.46	58.82
	200	35.19	23.8
	400	12.16	6.63
	800	52.65	20.76
20	25	30.93	33.04
	50	20.82	29.41
	100	31.21	32.23
	200	38.7	28.36
	400	46.09	23.66
	800	47.21	16.39
50	25	48.54	21.87
	50	30.28	25.69
	100	44.63	26.85
	200	38.52	21.15
	400	37.06	16.02
	800	24.6	7.418
100	25	42.84	67.39
	50	29.77	72.49
	100	35.41	50.09
	200	70.18	61.49
	400	38.32	22.64
	800	45.16	18.4

4.5.1. Boşluk Oranı Değişimi Üzerinde Kür Oranının Etkisi

Zeminin boşluk oranı, oturma ile olan direkt ilişkisinden dolayı önemlidir. Hacim değiştirme davranışı zeminin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde etkilidir. Bu nedenle farklı oranlarda çöp sızıntı suyu ile kirletilmiş ve küre bırakılmış zemin numunelerinin hacim değiştirme davranışındaki değişimler incelenmiştir. Bu amaçla ödometre deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Şekil 4.16' da kür süresi $t=30$ gün olan 100 kPa ön konsolidasyon basıncına sahip numunelere ait boşluk oranı-konsolidasyon grafikleri verilmiştir.

Küre bırakılmış numunelere ait e -log P (Şekil 4.16) grafiğinden yararlanarak çöp sızıntı suyu oranı ile boşluk oranı değişimi incelenmiştir. Konsolidasyon basıncı değerlerine karşı gelen boşluk oranlarına göre % 5 çöp sızıntı suyu oranında en az oturma olmuştur. Deney sonrasında oluşan tüm oturmalarla bakıldığında, % 5 çöp suyundan sonra temiz zemin, % 50 çöp suyu ve % 20 çöp suyu numunelerindeki oturma oranları gelmiştir. En çok oturma ise, % 100 çöp sızıntı suyu oranında gözlenmiştir.



Şekil 4.16 : e -log P ($t=30$ gün)

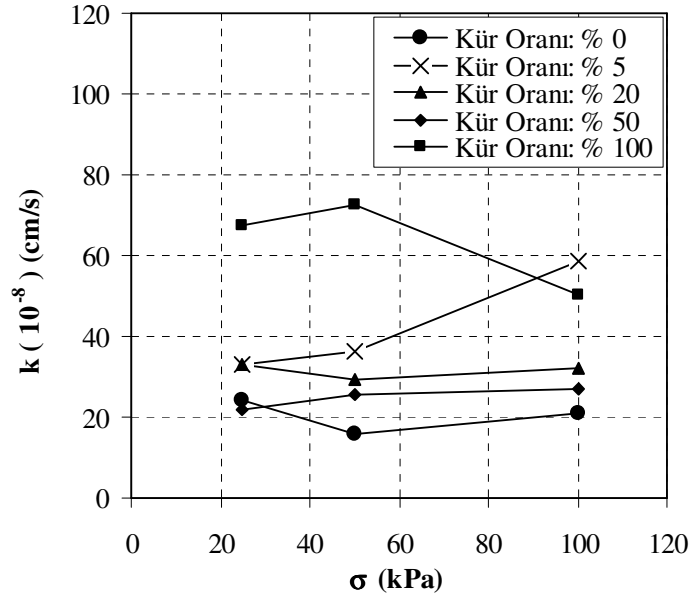
4.5.2. Permeabilite Katsayısı Üzerinde Kür Oranının Etkisi

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanan numuneler 30 gün kür süresi sonunda ödometre deneyine tabi tutularak permeabilite üzerinde kür oranı ve kür süresinin etkisi araştırılmıştır.

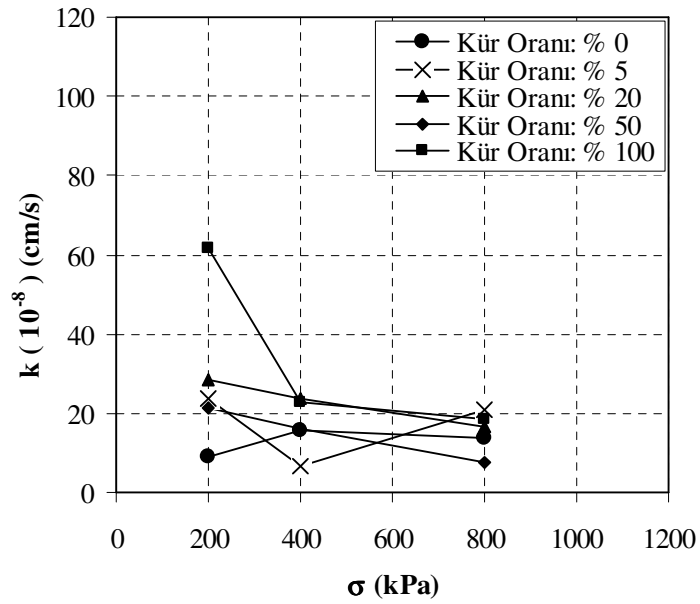
Çöp sızıntı suyu ile hazırlanan numuneler üzerinde sabit seviyeli veya düşen seviyeli permeabilite deney yöntemleri uygulanması halinde numune içinden sadece temiz su geçişi yapılabilecek ve numune yıkanarak çöp sızıntı suyunun etkisi kaybolacaktı. Bu nedenle çöp sızıntı suyunun etkisinin yok olmasını engellemek için ödometre deney yöntemi uygulanmıştır. Deneylerin uygulanması sırasında su haznesine numunenin içerdiği çöp sızıntı suyu oranında su katılarak deneyin amacına uygun yapılması sağlanmıştır.

Permeabilite katsayısı 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa yük kademeleri için Logaritma Zaman Yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntemle Şekil 4.17.a, Şekil 4.17.b ve Şekil 4.17.c' de elde edilmiş permeabilite katsayılarının 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa konsolidasyon basınçlarında değişimleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi konsolidasyon basıncı arttıkça permeabilite katsayısı değerleri azalmıştır.

Şekil 4.18' de ise 30 günlük kür süresi sonunda altı ayrı yük kademesinde permeabilite katsayıları arasındaki değişim, kür oranlarındaki değişim de dikkate alınarak incelenmiştir. Bu şekilden anlaşıldığı üzere permeabilite katsayısı, % 5 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinde temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise permeabilite azalmıştır. % 50 çöp sızıntı suyu oranında yine % 20 çöp sızıntı suyu oranına göre permeabilite azalmıştır. Son olarak % 100 çöp suyu oranında ise permeabilite temiz zemine ve diğer tüm çöp suyu oranlarına göre daha büyük bir değer almıştır. Ancak yine bu grafiğin tamamında da, gerilme değeri arttıkça permeabilite katsayısının düştüğü gözlenmektedir. Genel olarak bakıldığında ise şu sonuç elde edilebilmektedir; Örselenmemiş numunelerin uygulanan gerilme değerleri arttıkça permeabilite katsayılarının düştüğü, çöp sızıntı suyu oranları arttığında ise numunelerin permeabilite katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir.

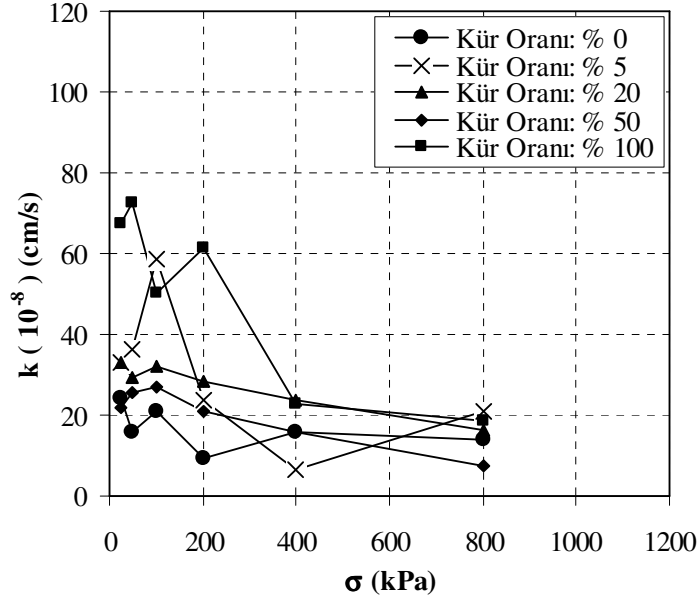


a) 25, 50, 100 kPa t= 30 gün



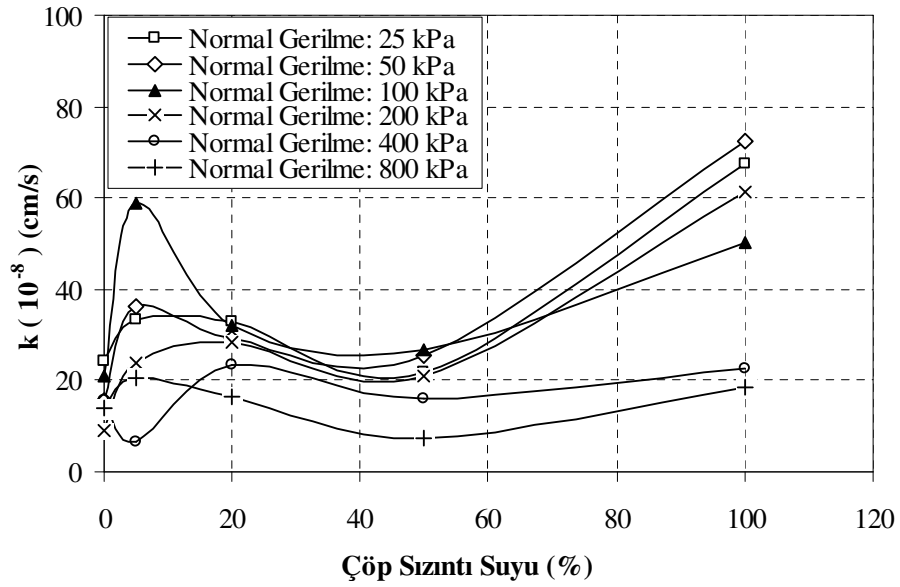
b) 200, 400 ve 800 kPa t= 30gün

Şekil 4.17 : Konsolidasyon Basıncı İle Permeabilite Katsayısındaki Değişim



c) 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa t= 30gün

Şekil 4.17 (devam): Konsolidasyon Basıncı İle Permeabilite Katsayısındaki Değişim



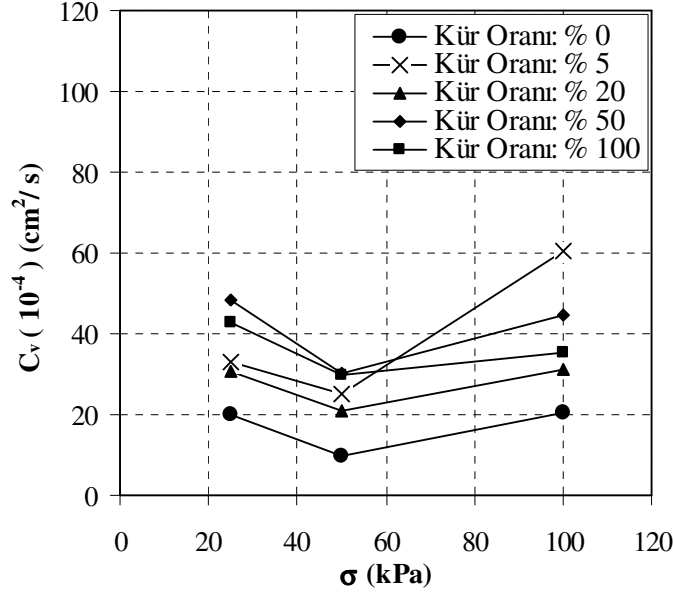
Şekil 4.18 : Kür Oranının Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi

4.5.3. Konsolidasyon Katsayısı Üzerinde Kür Oranının Etkisi

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanan numuneler 30 günlük kür süresi sonunda ödometre deneyine tabi tutularak konsolidasyon katsayısı (c_v) üzerinde kür oranının etkisi araştırılmıştır. Konsolidasyon katsayısı 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa yük kademeleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

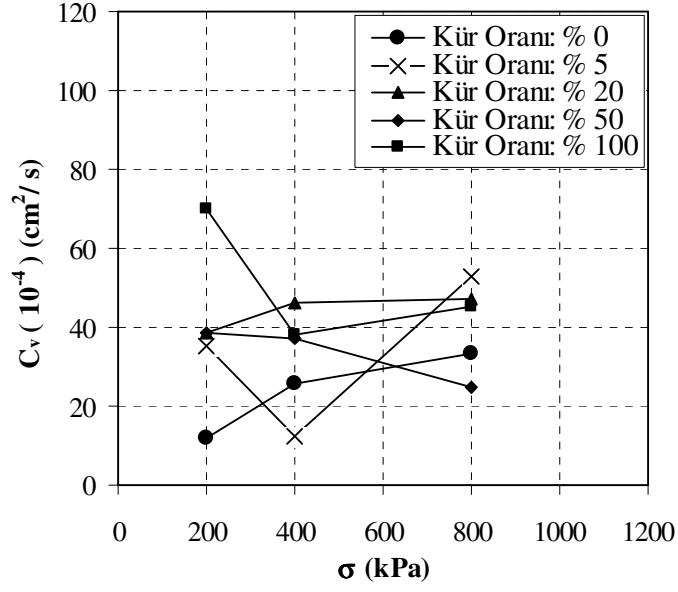
Konsolidasyon katsayısı ise her yük kademesi için Logaritma Zaman Yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.19.a, Şekil 4.19.b ve Şekil 4.19.c’ de bu yöntemle elde edilmiş konsolidasyon katsayılarının konsolidasyon basıncı ile değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi konsolidasyon basıncı arttıkça konsolidasyon katsayısı azalmıştır.

Şekil 4.20’ de ise 30 günlük kür süresi sonunda altı ayrı yük kademesinde permeabilite katsayıları arasındaki değişim, kür oranlarındaki değişim de dikkate alınarak incelenmiştir. Sonuç olarak şekilden de anlaşılacağı üzere; kür oranındaki artışla konsolidasyon katsayıları artmaktadır.

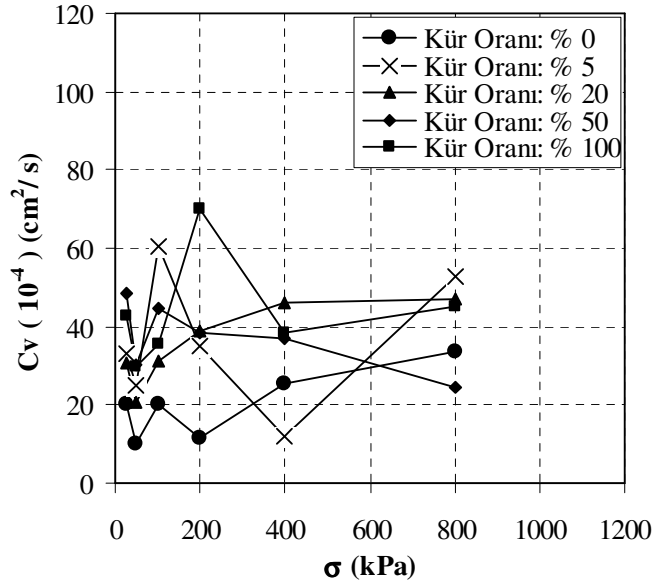


a) 25, 50, 100 kPa t= 30 gün

Şekil 4.19 : Konsolidasyon Basıncı İle Konsolidasyon Katsayısındaki Değişim

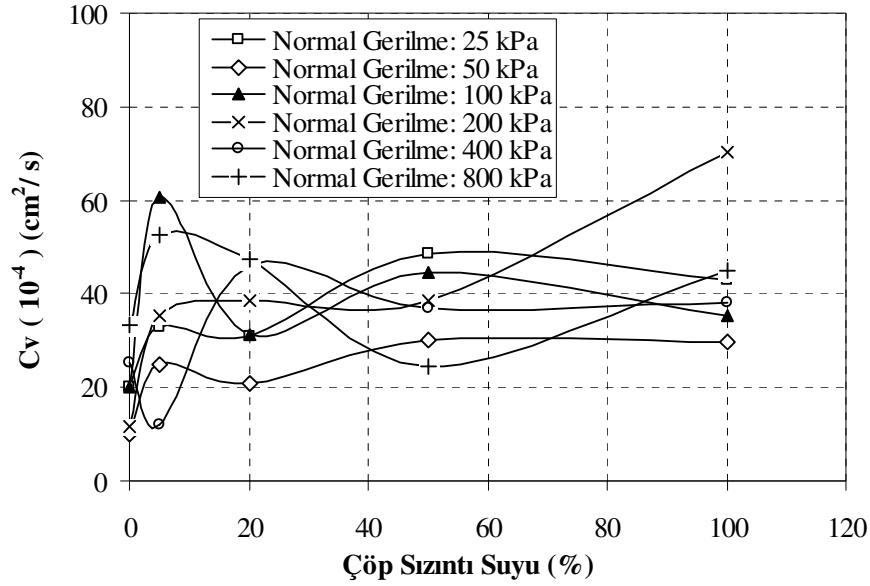


b) 200, 400, 800 kPa $t = 30$ gün



c) 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa $t = 30$ gün

Şekil 4.19 : Konsolidasyon Basıncı İle Konsolidasyon Katsayısındaki Değişim

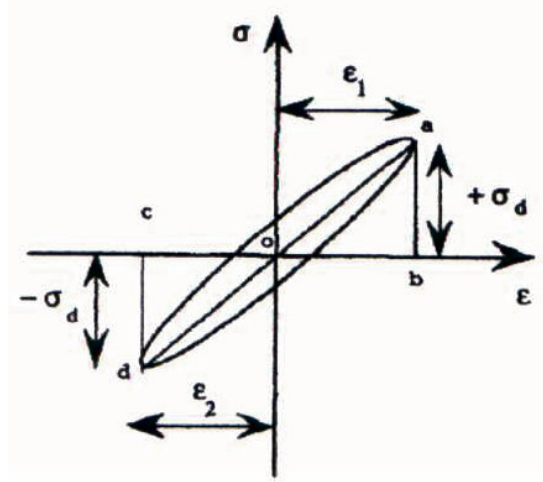


Şekil 4.20 : Kür Oranının Konsolidasyon Katsayısı Üzerine Etkisi

4.6. Zeminin Dinamik Davranışları Üzerine Kür Oranının Etkisi

4.6.1. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Oranının Etkisi

Bu çalışmada zeminin elastisite modülü üzerinde kür oranının etkisinin belirlenmesi için en büyük elastisite modülü ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sırasında gerilme oranları plastik şekil değiştirmelere izin vermeyecek şekilde 5 çevrimde bir kademeli olarak artırılarak uygulanmıştır. Daha sonra tekrarlı gerilme (σ) ve eksenel boy değişimi (ϵ) 3. Bölümde anlatılan hesaplama yöntemine benzer şekilde hesaplanarak histerisis ilmkleri çizilmiştir. (Şekil 4.21). Elastisite modülünün hesaplanması sırasında Şekil 4.21' de gösterildiği gibi histerisis ilmklerinin eğimi hesaplanır. Bağıntı 4.5' de görüldüğü gibi gerilme eksenel boy değişimine bölünerek eğim hesaplanır. Bu çalışmada 30 gün kür süreli % 0, 5, 20 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanmış numuneler konsolidasyonsuz ve konsolidasyonlu olarak dinamik üç eksenli deney sisteminde azalım deneylerine tabi tutulmuştur. Dinamik deney uygulamalarında numunelerin bir seti çamur konsolidasyon deney aletinden çıktığı şekilde konsolidasyonsuz ve drenajsız olarak, ikinci setleri ise harici bir hücrede 1 kgf/cm² çevre basıncı altında 1 gün süreyle konsolide edilip tekrar üç eksenli deney sistemine alınarak drenajsız koşullarda deney yapılmışlardır.



Şekil 4.21 : Tekrarlı Yükleme İle Elde Edilen Histerisis İlmîği (Fahoum, 1996)

$$E = \frac{2\sigma_d}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (4.5)$$

σ_d = deviatör gerilme

ε_1 ve ε_2 = eksenel deformasyon

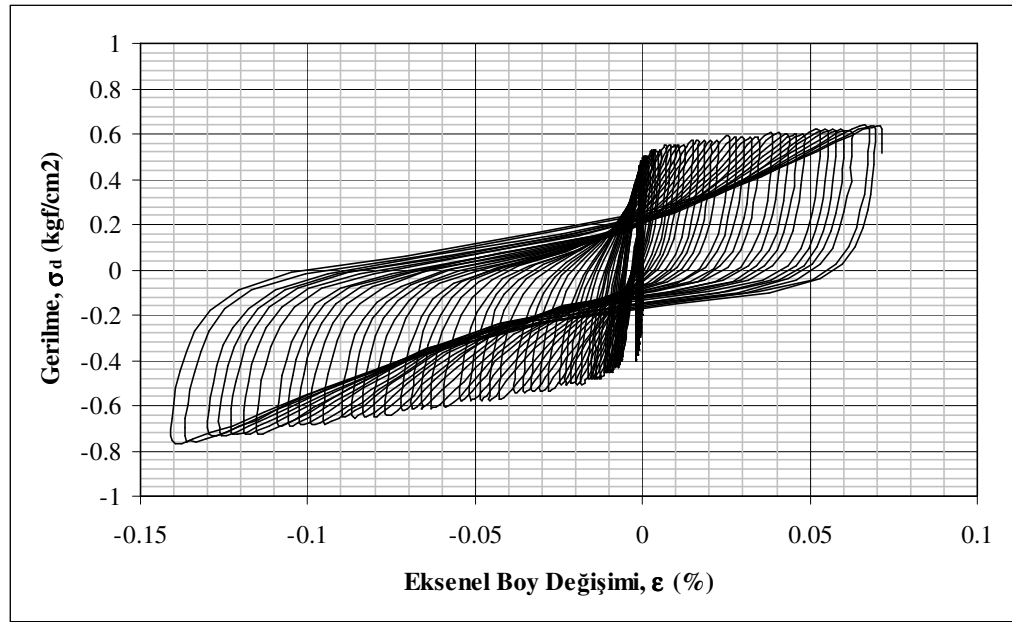
Dinamik deney uygulamaları ile konsolidasyonsuz ve konsolidasyonlu deney numunelerinin en büyük elastisite modülü ölçümleri yapılmış, temiz zemine ait grafikte Şekil 4.22’ de belirtilmiştir. Bu ölçümlerin ardından elde edilen elastisite modülleri ile her iki durum arasında bir karşılaştırma yapılmaya çalışılmıştır. Tüm çöp sızıntı suyu oranlarına ait dinamik deney sonuç grafikleri Ek C’ de verilmiştir. Numune içinden su geçirilmeyerek su geçişi sırasında numunenin yıkanarak çöp sızıntı suyunun etkisinin yok olmasının önüne geçilmiştir. Tablo 4.7’ de dinamik deneylere ait deney başı ve deney sonu γ ve w değerleri verilmiştir.

Tablo 4.7 : Kondolidasyonsuz Drenajsız Dinamik Deney w - γ Değerleri (UU)

Çöp sızıntı	Kür Süresi	w_{ilk} (%)	w_{son} (%)	γ_{ilk} (kN/m ³)	γ_{son} (kN/m ³)
0	30	30	28.33	19.91	21.04
5	30	30	25.89	19.52	20.76
20	30	29	25.60	20.46	21.32
50	30	28	26.67	20.40	21.27
100	30	28	25.54	20.65	21.42

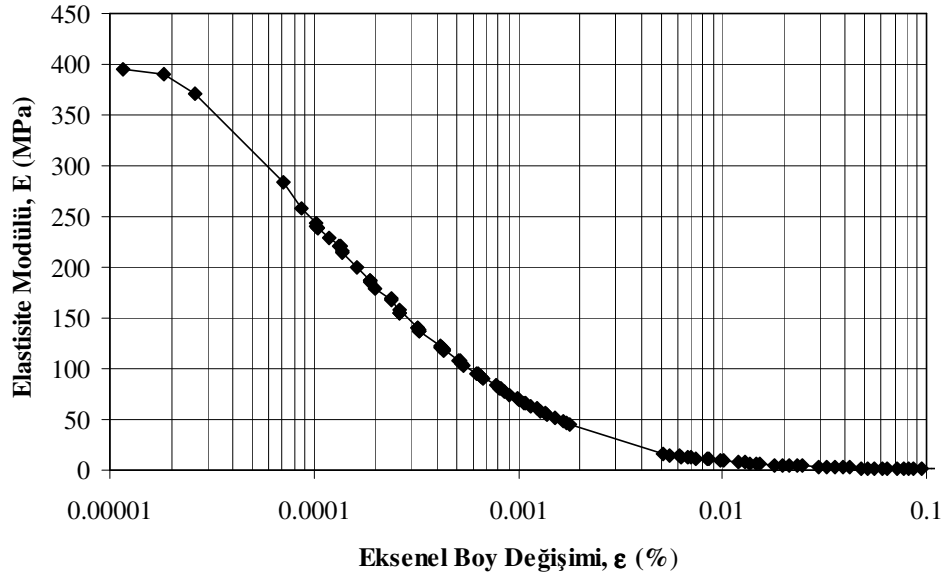
Tablo 4.8 : Kondolidasyonlu Drenajsız Dinamik Deney w- γ Değerleri (CU)

Çöp sızıntı	Kür Süresi	w _{ilk} (%)	w _{son} (%)	γ_{ilk} (kN/m ³)	γ_{son} (kN/m ³)
0	30	30	24.65	19.91	21.49
5	30	30	26.39	19.52	21.27
20	30	29	24.40	20.46	21.85
50	30	28	23.55	20.40	21.79
100	30	28	23.37	20.65	21.90

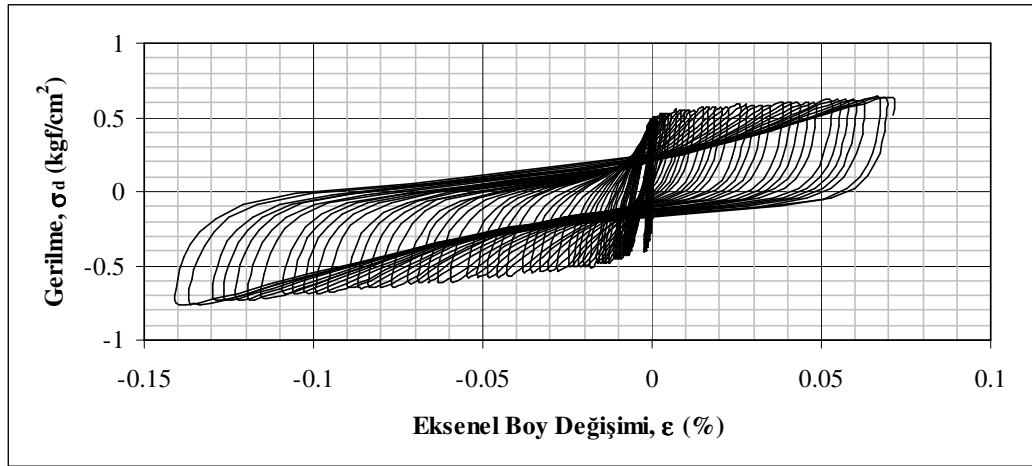
**Şekil 4.22 : En Büyük Elastisite Modülü Ölçüm Sonucu (Temiz Zemin)**

4.6.1.1 Temiz Zeminin Elastisite Modülü

Şekil 4.23’ de farklı dinamik yüklere maruz kalmış çöp sızıntı suyu katılmamış konsolidasyonlu temiz zeminin elastisite modülü grafiği görülmektedir. Çamur konsolidasyon deney aletinde hazırlanmış olan çöp sızıntı suyu katılmamış temiz zemin numunesinden biri ile konsolidasyonsuz olarak, diğeri ile de 1 kgf/cm² çevre basıncı altında dinamik deney aletinde 1 gün konsolide edilerek iki adet deney yapılmıştır. Numunelerden elde edilen deney sonucunda, konsolidasyona uğrayan temiz zeminin elastisite modülü, konsolidasyonsuz temiz zemine göre çok yüksektir. Şekil 4.24’ de ise dinamik deney sonucu konsolidasyonlu temiz zemin için elde edilen deney sonuçlarına yer verilmiştir.

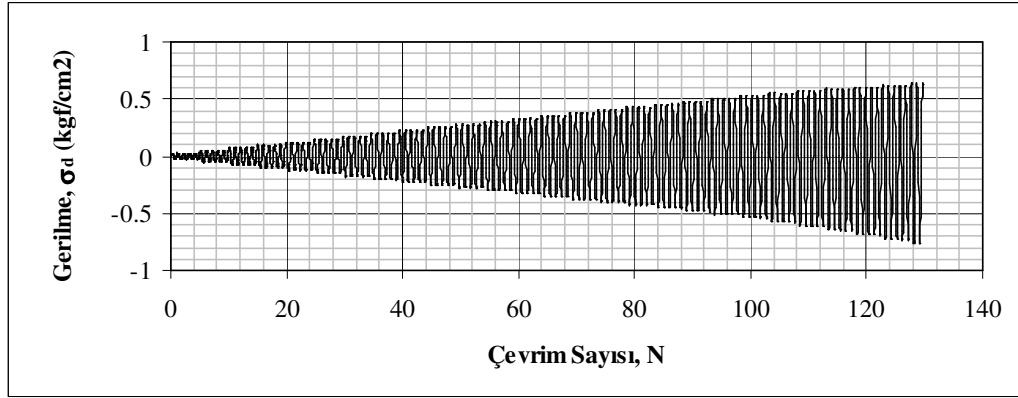


Şekil 4.23 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu Temiz Zemin)

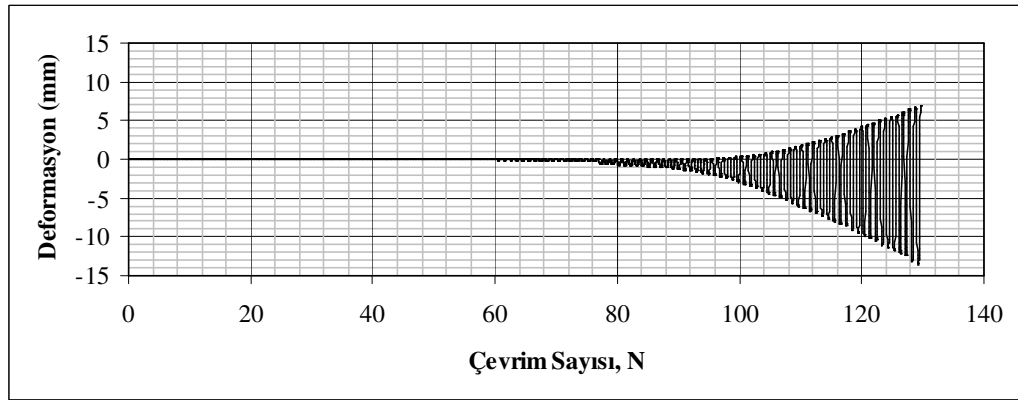


a) Gerilme- Şekil Değiştirme Davranışı t= 30gün

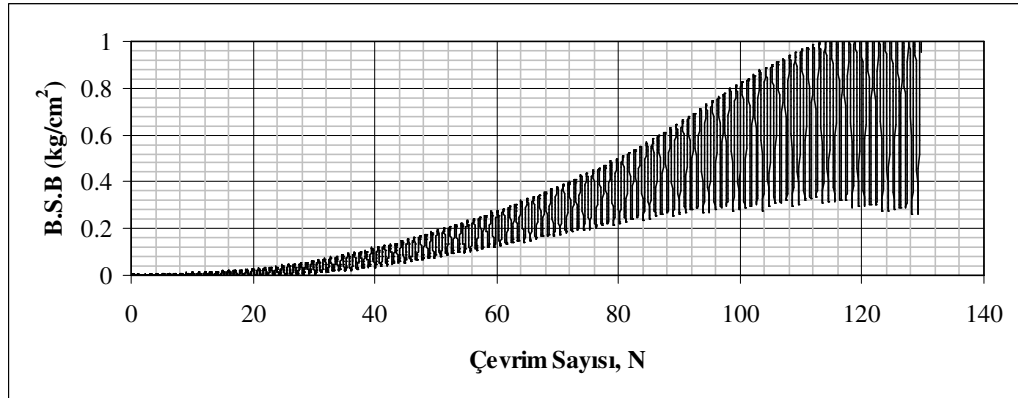
Şekil 4.24 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu Temiz Zemin)



b) Gerilme- Çevrim Sayısı t= 30gün



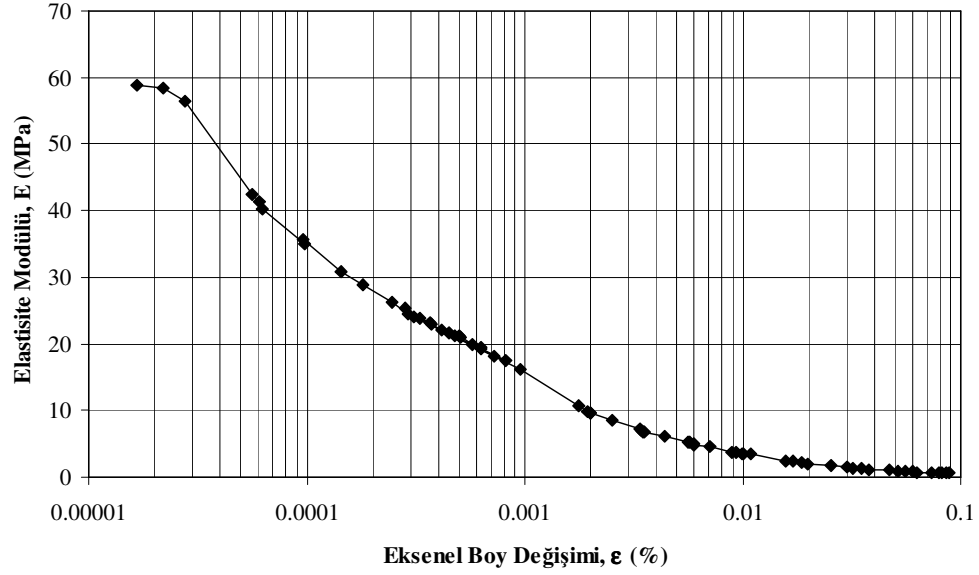
c) Deformasyon- Çevrim Sayısı t= 30gün



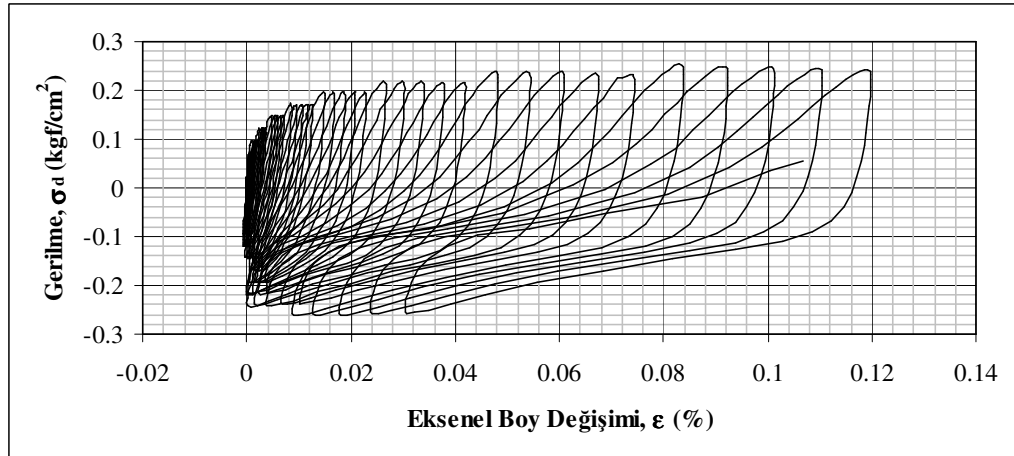
d) Boşluk Suyu Basıncı-Çevrim Sayısı t= 30gün

Şekil 4.24 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu Temiz Zemin)

Şekil 4.25’ de ise dinamik deney sonucu konsolidasyonsuz temiz zeminin dinamik deney ile elde edilen elastisite modülü- eksenel boy değişimi grafiği görülmektedir. Şekil 4.26’ da ise dinamik deney sonucu konsolidasyonsuz temiz zemin için elde edilen deney sonuçlarına yer verilmiştir.

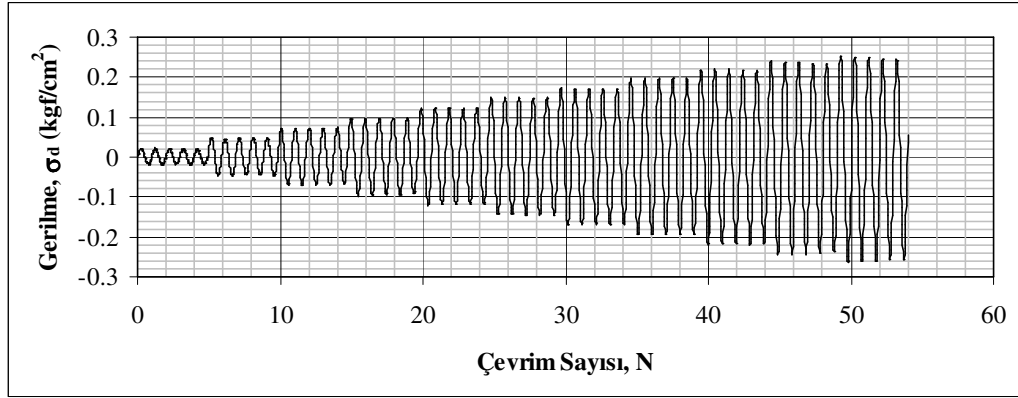


Şekil 4.25 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz Temiz Zemin)

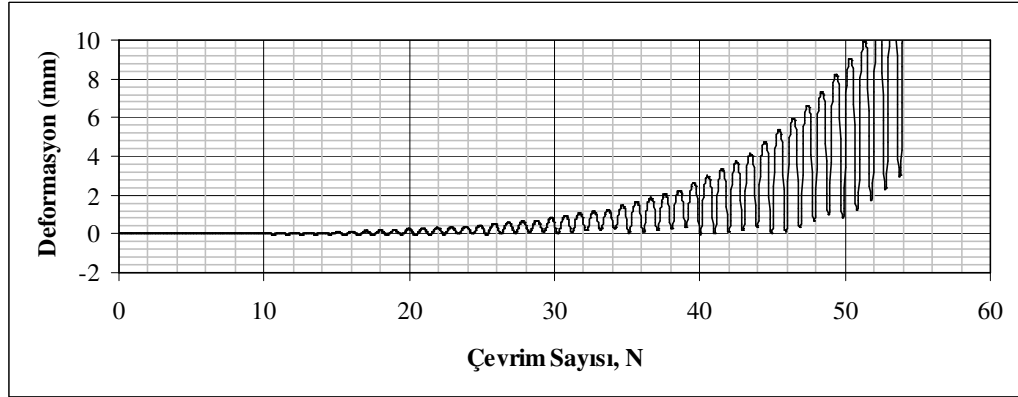


a) Gerilme- Şekil Değiştirme Davranışı t= 30gün

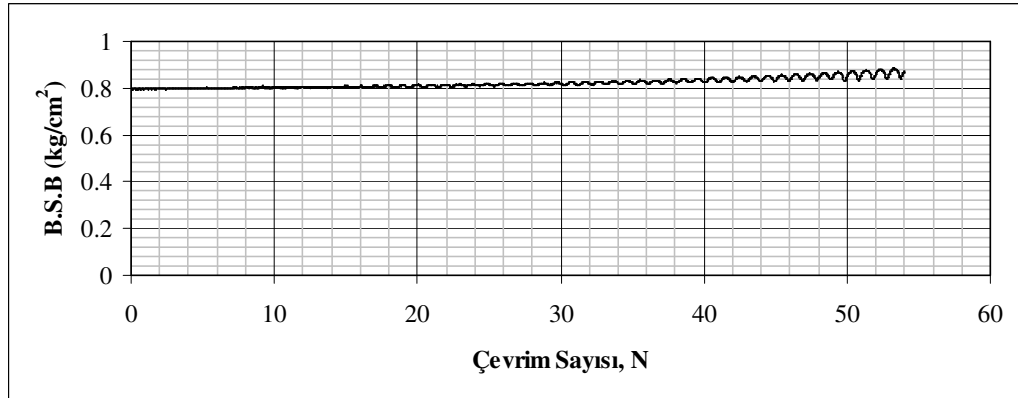
Şekil 4.26 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz Temiz Zemin)



b) Gerilme- Çevrim Sayısı $t=30$ gün



c) Deformasyon- Çevrim Sayısı $t=30$ gün



d) Boşluk Suyu Basıncı-Çevrim Sayısı $t=30$ gün

Şekil 4.26 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz Temiz Zemin)

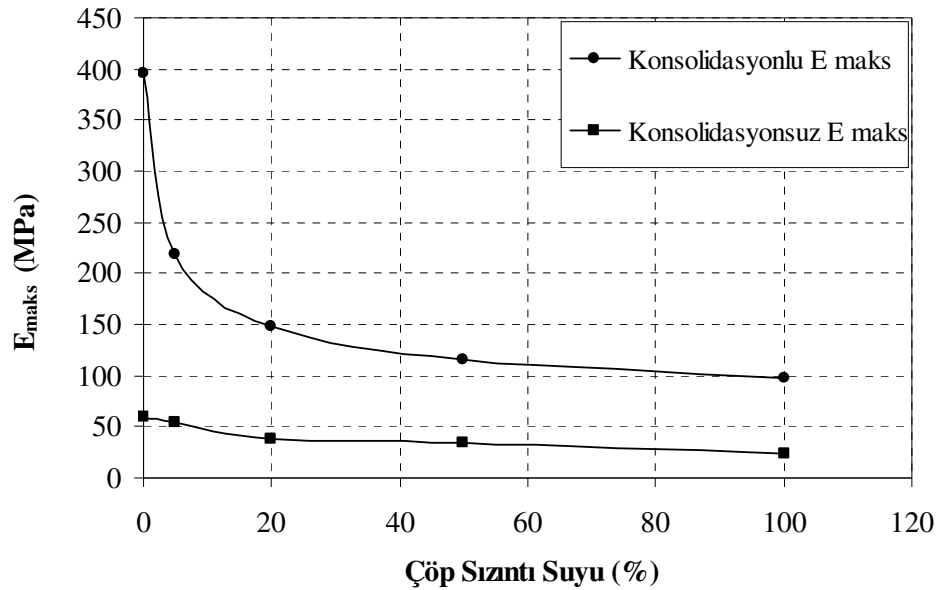
4.6.1.2. Çöpsuyu Katılmış Zeminlerin Maksimum Elastisite Modülü

Kür oranının elastisite modülü üzerine etkisini incelemek için 30 gün kür süreli, kür oranları değiştirilmiş numunelere ait sonuçlardan yararlanılmıştır. Bu amaçla 30 gün kür süreli numunelerin elastisite modülü (E)-eksenel boy değişimi (ϵ) grafiklerinden yararlanılmıştır.

Şekil 4.27’ de $t = 30$ gün için en büyük elastisite modülü değerlerinin çöp sızıntı suyu oranı ile değişimi görülmektedir. Tablo 4.8’ de ise dinamik deneyler sonucu farklı kür oranlarındaki numuneler için elde edilen maksimum elastisite modülü değerleri gösterilmiştir. Buna göre hem konsolidasyonlu drenajsız hem de konsolidasyonsuz drenajsız deneylerde zemin numunelerinin elastisite modülleri çöp sızıntı suyu oranı arttıkça azalmaktadır.

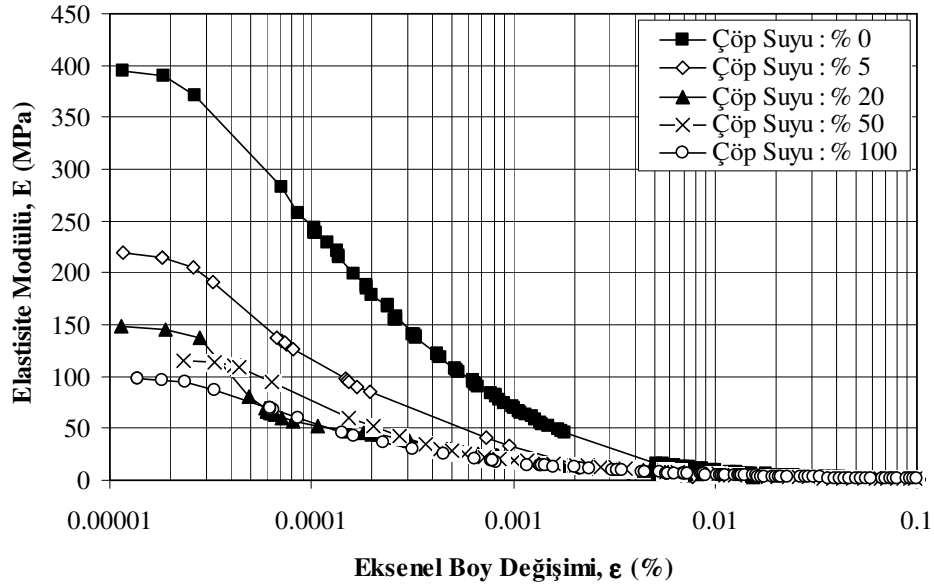
Tablo 4.9 : Kür Oranı – En Büyük Elastisite Modülü Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Konsolidasyonlu E (MPa)	Konsolidasyonsuz E (MPa)
0	30	395.13	58.91
5	30	219.31	53.57
20	30	147.88	37.22
50	30	115.03	35.15
100	30	98.12	23.07



Şekil 4.27 : Kür Oranının Maksimum Elastisite Modülü Üzerine Etkisi

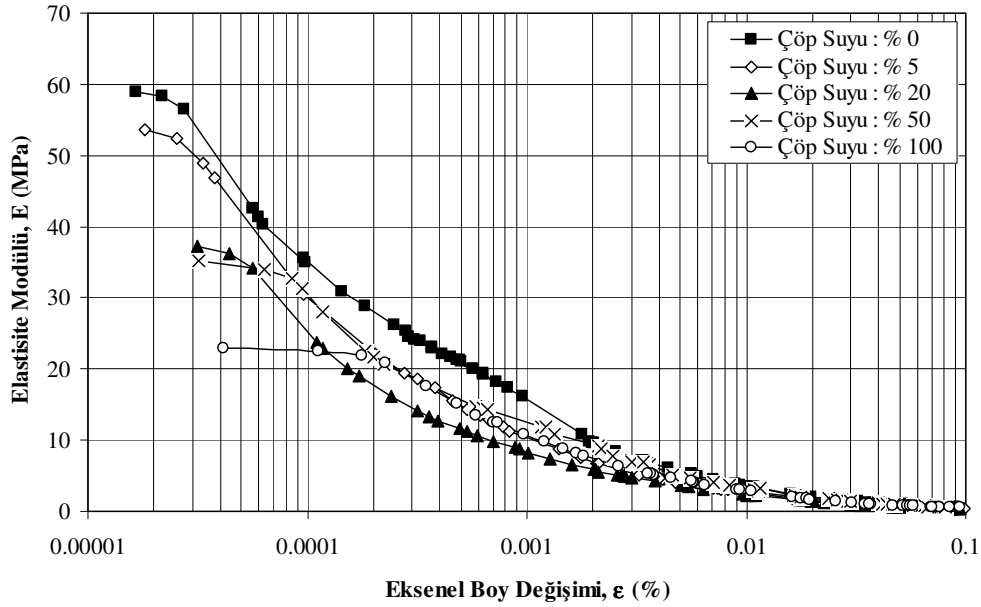
Şekil 4.28’ de 30 gün süreli küre bırakılmış konsolidasyonlu çöpsü numuneler ile temiz zemin numunesine ait elastisite modülü-eksenel boy değişimi grafiği görülmektedir. Grafiğin yorumlanması sırasında 0.0001 eksenel boy değişimine karşı gelen elastisite modül değerleri esas alınmıştır. Bu eksenel boy değişiminde temiz zemine göre % 5 çöp sızıntı suyu oranında elastisite modülü % 44 azalmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında elastisite modülü % 33 azalmıştır. % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında elastisite modülü % 22 ve % 15 azalmıştır. Görüldüğü gibi konsolidasyonlu numunelerde çöp sızıntı suyu oranı arttıkça elastisite modülü azalmaktadır. Buna göre elastisite modülü temiz zemin için maksimum, % 100 çöp sızıntı suyu içeren numune için ise minimumdur.



Şekil 4.28 : Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu, Drenajsız, CU)

Şekil 4.29’ da 30 gün süreli küre bırakılmış konsolidasyonsuz çöpsü numuneler ile temiz zemin numunesine ait elastisite modülü-eksenel boy değişimi grafiği görülmektedir. Grafiğin yorumlanması sırasında 0.0001 eksenel boy değişimine karşı gelen elastisite modül değerleri esas alınmıştır. Bu eksenel boy değişiminde temiz zemine göre % 5 çöp sızıntı suyu oranında elastisite modülü % 10 azalmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında elastisite modülü % 30 azalmıştır. % 50 ve % 100 çöp

sızıntı suyu oranlarında elastisite modülü % 5 ve % 34 azalmıştır. Görüldüğü gibi konsolidasyonsuz numunelerde de çöp sızıntı suyu oranı arttıkça elastisite modülü yine azalmaktadır. Buna göre elastisite modülü temiz zemin için maksimum, % 100 çöp sızıntı suyu içeren numune için ise minimumdur.



Şekil 4.29 : Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz, Drenajsız, UU)

4.7. Sonuçlar

Bu bölümde çalışma kapsamında yer alan kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney sonuçlarına yer verilmiştir.

Kıvam limitleri deney sonuçlarında görülmüştür ki çöp sızıntı suyu oranı ve kür süresi arttıkça likit limit, plastik limit ve plastisite indisi artmıştır. Kesme kutusu deney sonuçlarından yararlanılarak çöp sızıntı suyunun zeminin c ve ϕ değerleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çöp sızıntı suyu katılarak hazırlanan numuneler kendi aralarında incelendiğinde ϕ genel olarak temiz zemine göre çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numunelerde daha yüksektir. Ödometre deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı üzerinde çöp sızıntı suyu oranının etkisi incelenmiştir. Çöp sızıntı suyu oranı arttıkça, permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı çöp suyu oranındaki artışla artmıştır.

Aynı dinamik yükler altında çöp sızıntı suyu oranının zeminin elastisite modülü üzerine etkisini araştırmak amacı ile dinamik üç eksenli basınç deney sisteminden yararlanılmıştır. Hem konsolidasyonlu hem de konsolidasyonsuz drenajsız dinamik deney sonuçları göstermiştir ki; çöp sızıntı suyu katılmamış numunelere göre çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin elastisite modülleri daha düşüktür. Çöp sızıntı suyu oranı arttıkça elastisite modülü azalmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çöp sızıntı suyu oranının ve zeminle etkileşim süresinin örselenmemiş zeminin statik ve dinamik davranışları üzerine etkileri ele alınmıştır. Zeminin statik davranışları olarak; gerilme-şekil değiştirme, kayma mukavemeti parametreleri, zeminin hacim değiştirme davranışı, konsolidasyon ve permeabilite katsayıları ele alınmıştır. Dinamik davranışlar olarak dinamik yükler altında zeminin gerilme-şekil değiştirme ve dinamik elastisite modülü incelenmiştir. Bu amaçla düşük plastisiteli kile (CL) likit limit değerinin altında su muhtevasında % 5, 20, 50 ve % 100 oranlarında çöp sızıntı suyu katılarak çamur konsolidasyon deney aletinde örselenmemiş zemin numuneleri hazırlanmıştır. Çamur kıvamda hazırlanan numuneler 30 gün sonunda 100kPa basınç altında konsolide olmuş ve daha sonra ödometre, kesme kutusu deneyleri ve dinamik deneylere geçilmiştir. Kıvam limit deneyleri için % 5, 20, 50 ve % 100 oranlarında çöp sızıntı suyu katılarak hazırlanan zeminlerin bir kısmı küre bırakılmadan hemen deneye alınırken diğerleri 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakılmıştır.

Çöp sızıntı suyu ile yapılan bu çalışmada kıvam limitlerinin değişimi üzerinde kür oranı etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Likit limit deney sonuçlarından görüldüğü üzere temiz zeminden, %100 çöpsülu numunelere doğru kür oranı arttıkça likit limit değeri artmıştır. Likit limit üzerinde çöp sızıntı suyu oranının yanı sıra kür süresi de etkilidir. Kür süresindeki artışla likit limit artarak 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra, kür süresindeki artışla likit limit düşmeye başlamıştır. 90 günlük kür süresi sonunda ise likit limit başlangıç değerlerine doğru yaklaşmıştır. Plastik limit deneyleri sonucunda; çöp sızıntı suyu katkılı zemin numunelerinin plastik limit değerlerinin temiz zeminden daha yüksek olduğu görülmüştür. Çöp sızıntı suyu katılmış numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde de çöp sızıntı suyu oranındaki artışla plastik limit değerinin arttığı gözlenmiştir. Plastik limit değeri de küre bırakılmamış numunelere göre kür süresindeki artışla artmıştır. 90 günlük kür sonunda ise plastik limit düşerek likit

limit de olduğu gibi başlangıç değerlerine geri dönmüştür. Zeminin plastisite indisi kür oranındaki artışla artarak % 100 çöp sızıntı suyu oranında en büyük değere ulaşmıştır. Plastisite indisi kür süresindeki artışla önce artış göstererek 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra ise düşerek 90 günlük kür sonunda başlangıç değerlerine geri dönmüştür.

% 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren, örselenmemiş numunelerin statik yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve kayma direnci davranışının incelenmesi amacı ile kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Zeminin farklı yükler altındaki davranışının belirlenmesi amacı ile her bir numuneye 100, 200 ve 300 kPa normal gerilme uygulanıp 1 gün konsolide edilerek, daha sonra kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda; 100 kPa normal gerilme seviyesinde, %20 çöp sızıntı suyu içeren numunenin kayma mukavemeti değeri, temiz zemin numunesinden ve diğer çöpsulu numunelerden daha büyüktür. Yine bu normal gerilme değerinde, çöp sızıntı suyu içeren numunelerde en büyük kayma gerilmesine, temiz zemine göre daha yüksek deformasyon seviyelerinde ulaşılmıştır. Çöp sızıntı suyu içeren numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde, 100 kPa gerilme altında % 20 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla kayma mukavemetinin arttığı, bu orandan daha yüksek çöp sızıntı suyu oranlarında ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla kayma mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Fakat 200 kPa ve 300 kPa gerilme seviyelerinde ise, tüm çöp sızıntı suyu içeren örselenmemiş numunelerde, temiz zemine göre kayma mukavemeti değerleri kür oranı ile artmıştır. Örselenmemiş bu numuneler için kesme kutusu deney sonuçları göstermiştir ki; çöp sızıntı suyu oranındaki artışla zeminin kohezyonu (c) sabitken, içsel sürtünme açısı (ϕ) artmıştır.

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış numunelere ait ödometre deney sonuçlarına göre, 30 gün kür süreli % 5 çöp sızıntı suyu içeriğine sahip numunede en az konsolidasyon oturması olmuştur. En çok oturma ise en düşük sodyum ve klorür içeriğine sahip olan % 100 çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numunede gözlenmiştir.

Ödometre deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı üzerinde çöp sızıntı suyu oranının etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuca göre ise, çöp sızıntı suyu oranı arttıkça, permeabilite ve konsolidasyon katsayısı değerlerinin arttığı görülmüştür.

Zeminin dinamik elastisite modülü ve gerilme şekil değiştirme davranışı üzerinde kür oranı ve kür süresinin etkisini incelemek amacı ile dinamik üç eksenli basınç deney sisteminden yararlanılmıştır. % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanmış numuneler 30 gün süre ile küre bırakılarak dinamik üç eksenli deney sisteminde azalım deneylerine tabi tutulmuştur. Dinamik deney uygulamalarında numuneler konsolidasyonlu ve konsolidasyonsuz olarak deneye tabi tutulmuştur. Numune içinden su geçirilmeyerek su geçişi sırasında numunenin yıkanarak çöp sızıntı suyunun etkisinin yok olmasının önüne geçilmiştir. Deney sonuçlarının ilişkilendirilebilmesi için tüm deneylerde aynı dinamik yükler uygulanmıştır.

Elastisite modülü üzerinde kür oranının ve kür süresinin etkisinin belirlenmesi için en büyük elastisite modülü ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sırasında gerilme oranları plastik şekil değiştirmelere izin vermeyecek şekilde 5 çevrimde bir kademeli olarak arttırılarak uygulanmıştır. Zemine çöp sızıntı suyu katılması ile en büyük elastisite modülü temiz zemin numunesine ait değere göre azalmıştır. Bu azalma en çok % 100 çöp sızıntı suyu oranında olmuştur. Çöp sızıntı suyu içeren numunelere ait analiz sonuçları kullanılarak elastisite modülü üzerinde nitratin etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Çöp suyu oranındaki artışla nitrat miktarı azalmıştır. Bunu sonucunda zeminin elastisite modülünde azalma gözlenmiştir.

Bu çalışmada görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu kompleks bir yapıdadır. Bu nedenle zemin davranışına etki eden asıl maddenin belirlenmesi esas sorundur. Bu amaçla ilk olarak çöp sızıntı suyu bileşimindeki maddeler belirlenmelidir. Ardından çöp sızıntı suyunun yapısı bozulmadan zeminin geoteknik özellikleri incelenmelidir. Daha sonra ise çöp sızıntı suyu bünyesindeki organik maddeler uzaklaştırılarak inorganik maddelerin tek başına zemine olan etkisinin belirlenmesi için aynı deneyler tekrarlanmalıdır. Çöp sızıntı suyunun bu iki haline ait sonuçlar karşılaştırılarak zemin davranışında organik maddelerin mi yoksa inorganik maddelerin mi daha etkin olduğu belirlenebilir. Ayrıca laboratuvar ortamında temsili çöp sızıntı suyu hazırlanıp, çöp sızıntı suyu içindeki maddelerin miktarları değiştirilerek zemin davranışındaki değişimler izlenerek etkin maddelerin tayini yapılabilir. Bunlara ek olarak temiz zeminin yanı sıra çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış numunelerin mineralojik yapıları belirlenebilir. Çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış numunelerin belirlenen kür süreleri sonunda mineralojik yapıları tekrar incelenerek çöp sızıntı suyunun mineralojik

yapıya etkisi belirlenebilir. Bu sayede çöp sızıntı suyu ile zemin arasındaki ilişkinin anlaşılması kolaylaşacaktır.

KAYNAKLAR

- Akbulut, S. ve Arasan, S.**, 2004. Atık Liflerle Güçlendirilmiş Kil Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Araştırılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 397–406.
- Angın, A. ve Üçüncü, O.**, 2004. Atık Çamur İle Stabilize Olan Killerde Geçirimsizlik ve Konsolidasyon Analizi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 189–198.
- Aydın, M., Yano, T. ve Kılıç, Ş.**, 2004. Dependence of Zeta Potential and Soil Hydraulic Conductivity on Adsorbed Cation and Aqueous Phase Properties *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:450-459.
- Aytekin, M.**, 2002. Zeminlerin Değirmen Artığı Malzeme İle Stabilizasyonu *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, s. 718– 724.
- Bell, F.G.**, 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils *Engineering Geology* V. 42, Issue 4, pp 223–237
- Brandl, H.**, 1992. Mineral Liners for Hazardous Waste Containment, *Geotechnique* V. 42.1, pp. 57–61.
- Chae S. and Au W.**, 1980. Dynamic Shear Modulus and Damping in Additive-Treated Expansive Soils, *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, İstanbul, Turkey, pp. 57–64
- Chew, S.H.**, 2004. Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V. 130, No 7, pp. 696–706.
- D4318**, 2000. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, *ASTM*, United States.
- D2435**, 2004. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, *ASTM*, United States.
- Erşan, H.** 1996. Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerindeki Etkisi, *Y.Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Erken, A., Alp, K., Er, N., Yıldırım, H., Eldem, N.Ö., Kaya, Z., Taşköy, A.,**2006. İnce Daneli Zeminlerin Davranışları Üzerinde Çöp Suyunun Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Fahoum, K., Aggour M.S. and Amini, F.,** 1996. Dynamic Properties of Cohesive Soils Treated With Lime *Journal of Geotechnical Engineering* pp. 382-389.
- Güler, E., Avcı, C.B., ve Çığızoğlu, H.K.,** 1992 Atık Depo Alanlarında Kullanılan Toprak Kaplamaların Geçirgenlik Tasarımları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 207–226.
- Goh, A.T.C., and Tay, J.H.,** 1993. Municipal Solid-Waste Incinerator Fly Ash for Geotechnical Applications, *Journal of Geotechnical Engineering* V. 119, No 5, pp. 598.
- Instruction Manual,** Pneumatic Cyclic Triaxial Test Apparatus, Two Unit Type, Model DTC–311.
- Irene, M.,** 2003. Innovative Waste Containment Barriers for Subsurface Pollution Control Practice Preodical of Hazardous, *Toxic and Radioactive Waste Management*, ASCE, V. 7, No 1, pp. 37–45.
- Keskin, S.N., Tekinsoy, M.A. ve Uzundurukan, S.,** 2004. Sudaki İyonların ve Sıcaklık Değişiminin Killerin Kıvam Limitlerine Etkisi, *Süleyman Demirel Ün. Fen. Bil. Ens. Dergisi*, Isparta, 8-1, s. 94–101.
- Mitchell, J.K.,** 1976. Fundamataals of Soil Behavior, Universty of California, Berkeley.
- Osinubi, K.J.,** 1998. Permeability of Lime Treated Lateritic Soil *Journal of Transportation Engineering*, V. 124, No 5, pp. 465–469.
- Özay, R.,** 2002. Örselenmemiş Killi Zeminlerin Statik Mukavemetine Deprem Yüklerinin Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Puppla, A. J. and Hanchanloet, S.,** 1999. Evaluation of a New Chemical (SA–441 ls–40) Treatment Method on Strenght and Resilient Properties of a Cohesive Soil *Transportation Research Board 78 th Annual Meeting*, Washington, D.C. Paper No 990389.

- Rao, S.M.**, 1982. Physicochemical Properties and Engineering Behaviour of Anion Adsorbed Clay Ph. Thesis of Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Show, K. Y., Tay J.H. and Goh T.C.A.**, 2003. Reuse of Incinerator Fly Ash in Soft Soil Stabilization *Journal of Materials in Civil Engineering*, July/August 2003 pp. 335–343, ASCE.
- Sridharan, A. and Jayadeva, M.S.**, 1982. Double layer Theory and Compressibility of Clays, *Geotechnique* V. 32, pp. 133.
- Sridharan, A. and Rao, G.V.**, 1973. Mechanisms Controlling Volume Change of Saturated Clays and the Role of the Effective Stress Concept, *Geotechnique* V. 23, pp. 359.
- Sridharan, A. and Rao, G.V.**, 1975. Mechanisms Controlling the Liquid Limit of Clays, *Prof. Int. Conference on SM & FE*, İstanbul, 1: 65–75.
- Sridharan A; Sivapullaiah P.V.**, 1987 Engineering Behaviour of Soils Contaminated with Different Pollutants, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks. Et. Al. (eds) Balkema, Rotterdam, pp. 165–178.
- Tao, T.W., Lee J.Y. and Lee, Y.J.**, 2001. Consolidation Behaviour of a Soft Mud Treated with Small Cement Content *Engineering Geology* V. 59, pp. 327-335.
- Toğrol, E. ve Özüdoğru K.**, 1992. Deniz Geotekniği, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, s. 11
- Tosun, H. ve Türköz, M.**, 2000 Şişen Killerin Sönmüş Kireç Katkısı İle Stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 196–201
- Yılmaz, R.**, 1992. Çeşitli Sıvı Atıklar Tarafından Kirletilen Killi Zeminlerde Gözlenen Parametre ve Davranış Değişiklikleri Üzerine Bir Araştırma, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 227- 246.

EKLER

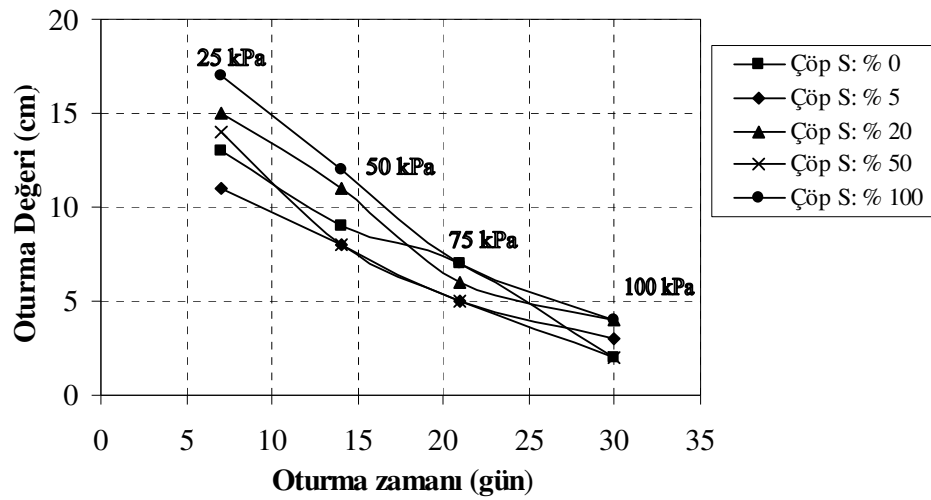
EK A. KONSOLİDOMETRE VE KESME KUTUSU DENEYİ GRAFİKLERİ

EK B. ÖDOMETRE DENEYİ GRAFİKLERİ

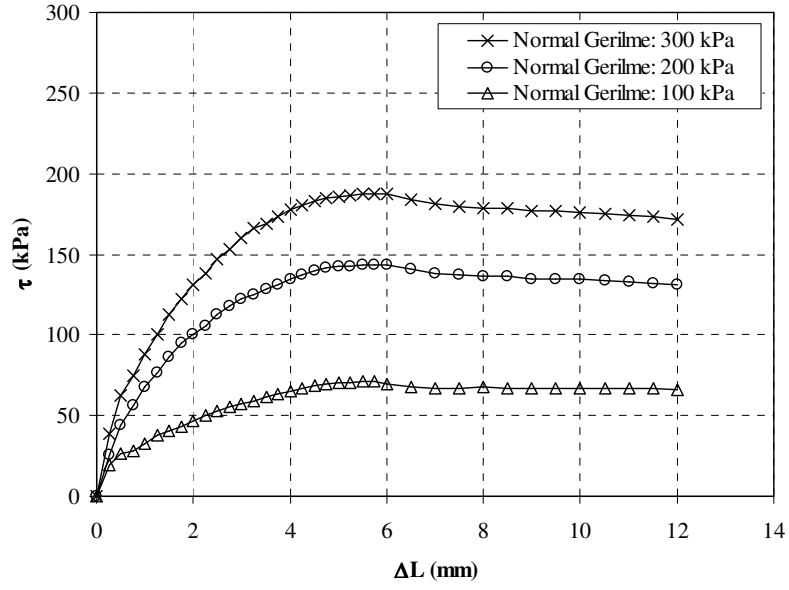
EK C. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ GRAFİKLERİ

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Oturma Zamanı (gün)	Oturma Değerleri (cm)
0	30	7	13
	30	14	9
	30	21	7
	30	30	2
5	30	7	11
	30	14	8
	30	21	5
	30	30	3
20	30	7	15
	30	14	11
	30	21	6
	30	30	4
50	30	7	14
	30	14	8
	30	21	5
	30	30	2
100	30	7	17
	30	14	12
	30	21	7
	30	30	4

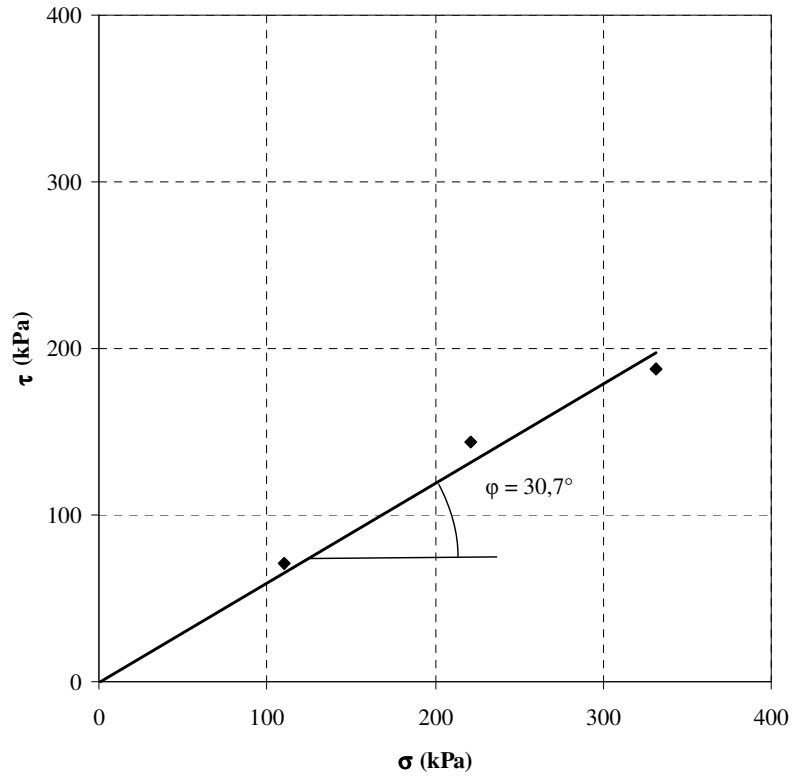
Tablo A.1 : Çamur Konsolidasyon Deneyi Oturma Değerleri



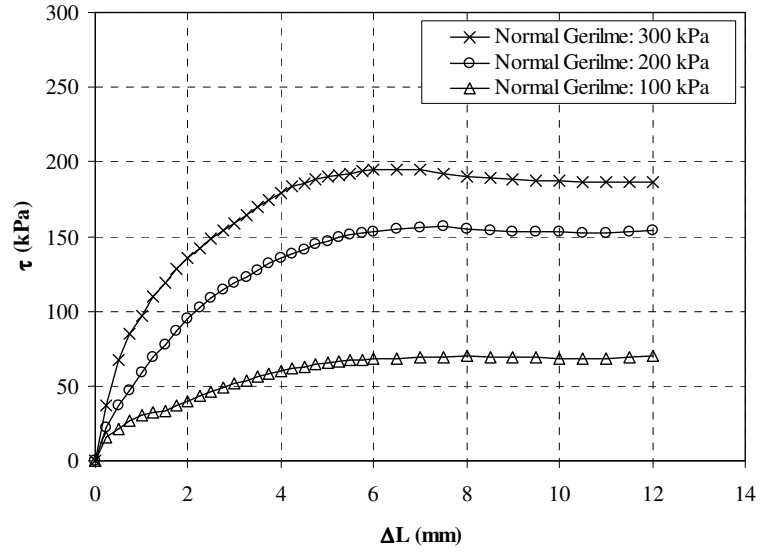
Şekil A.1 : Çamur Konsolidasyon Deneyi Oturma – Zaman Eğrisi



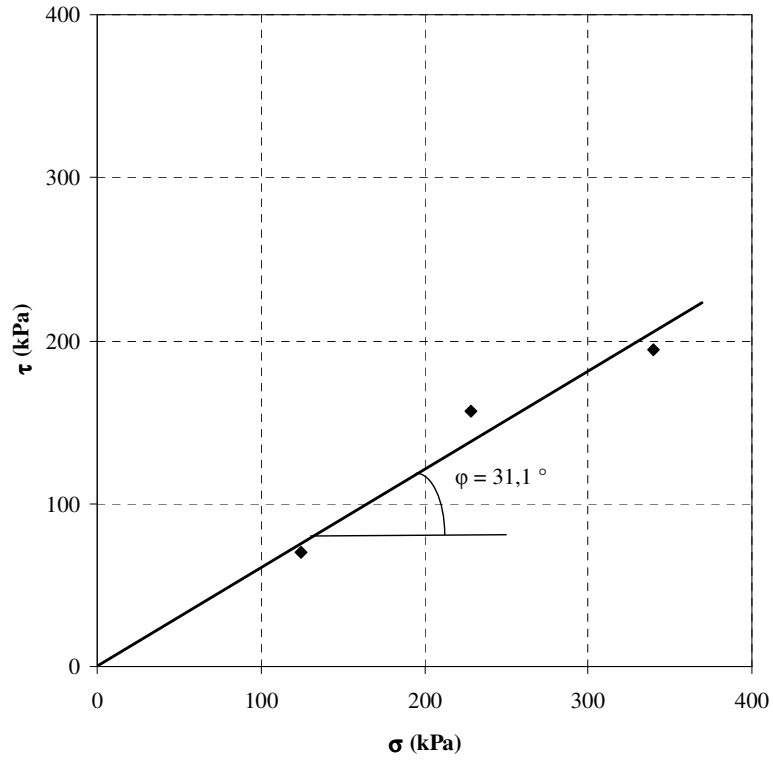
Şekil A.2 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Temiz Zemin, t: 30 gün)



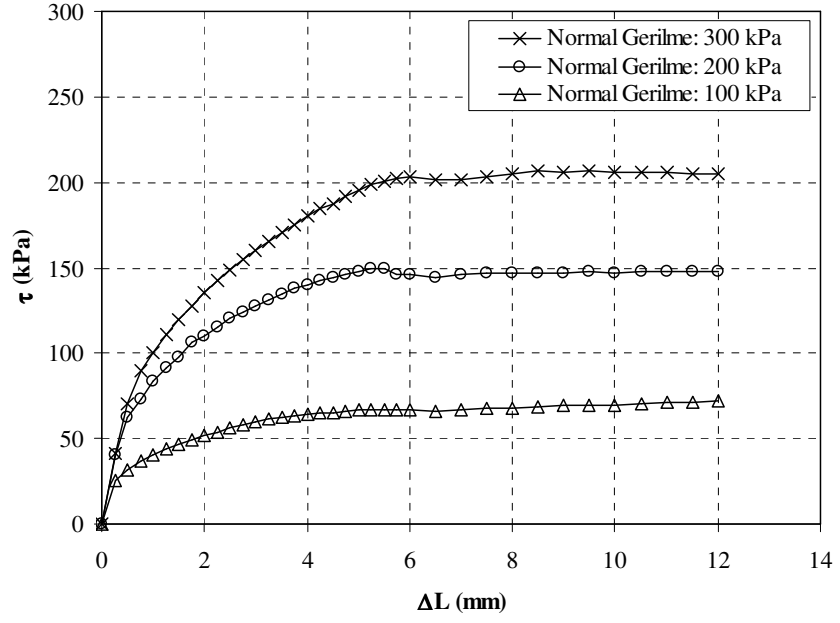
Şekil A.3 : Kırılma Zarfı (Temiz Zemin, t=30gün)



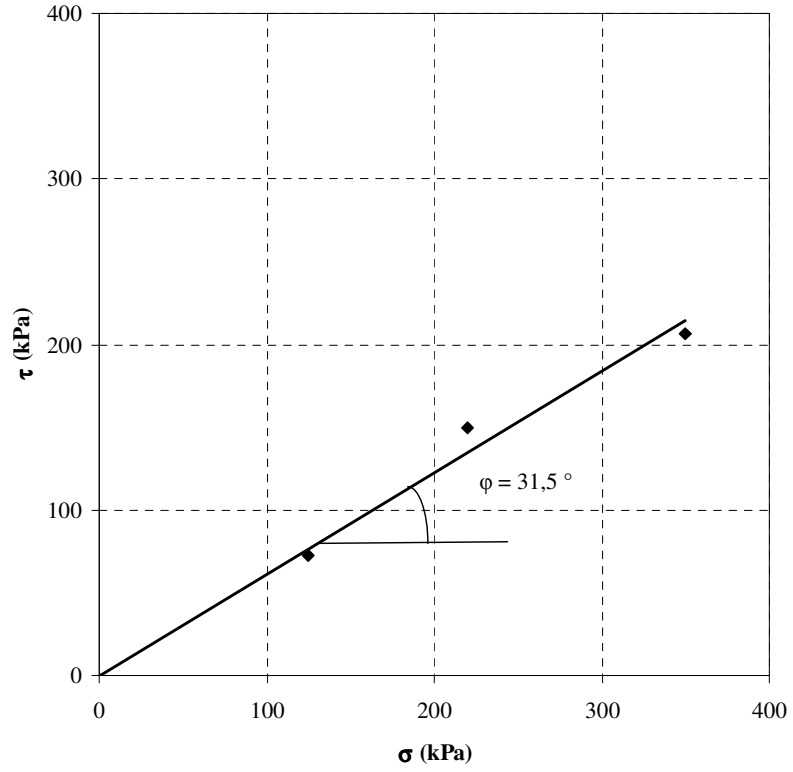
Şekil A.4 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 5, t: 30 gün)



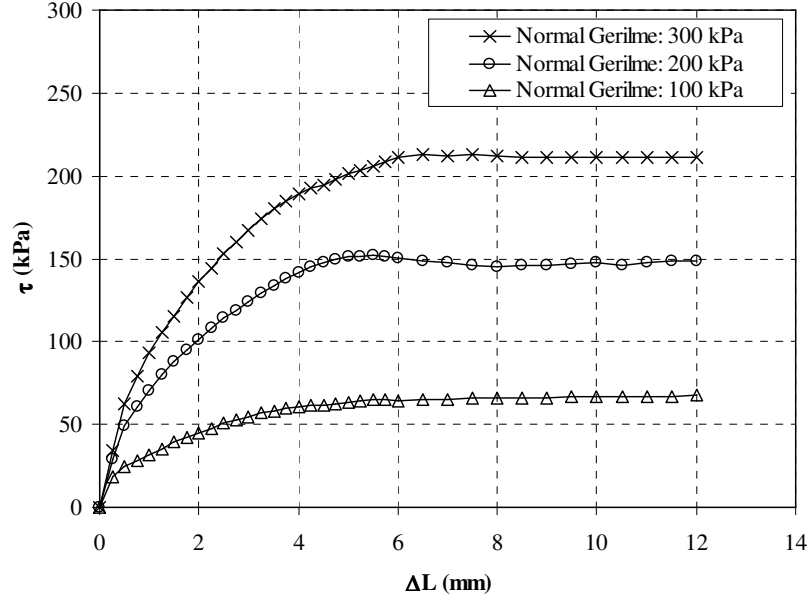
Şekil A.5 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 30gün)



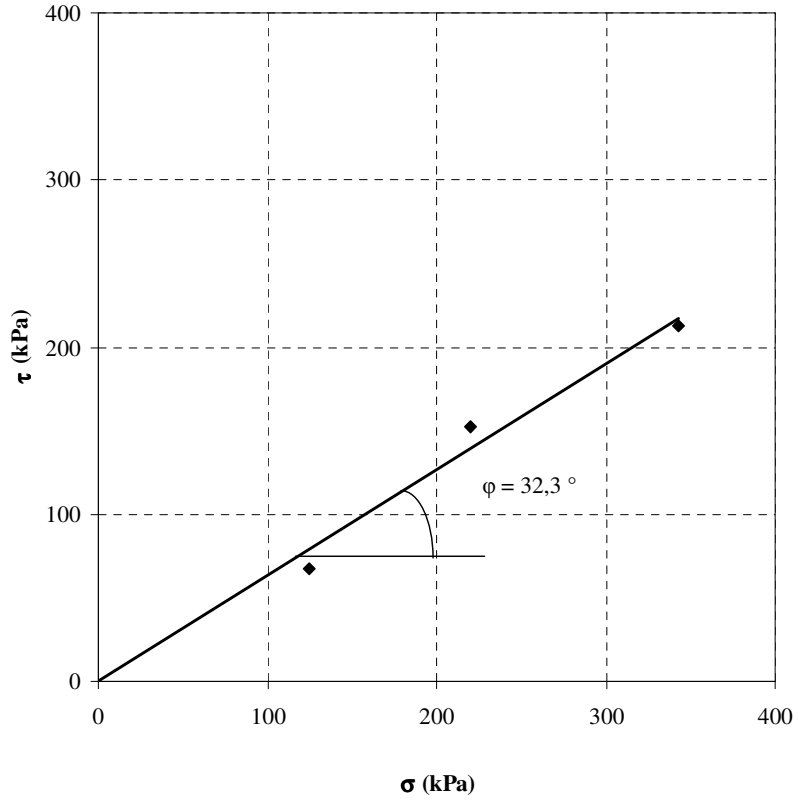
Şekil A.6 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 20, t: 30 gün)



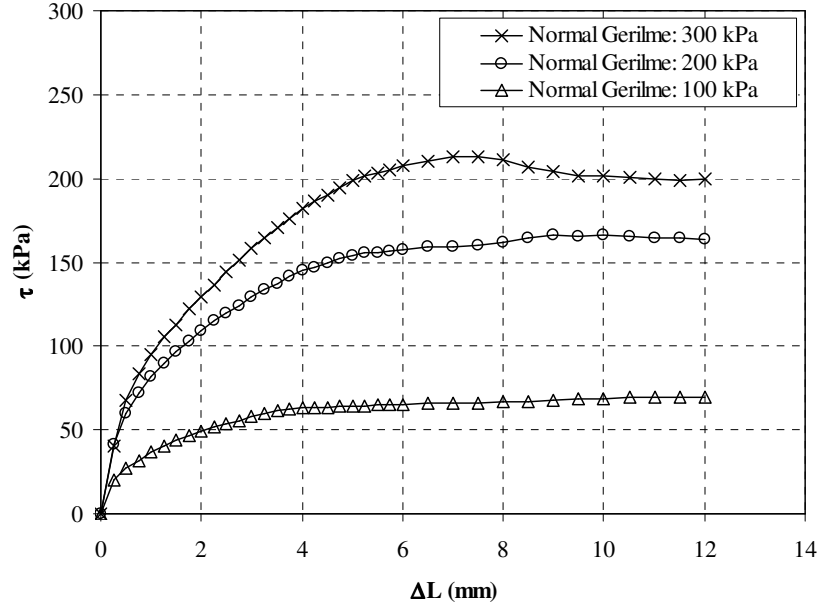
Şekil A.7 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 30gün)



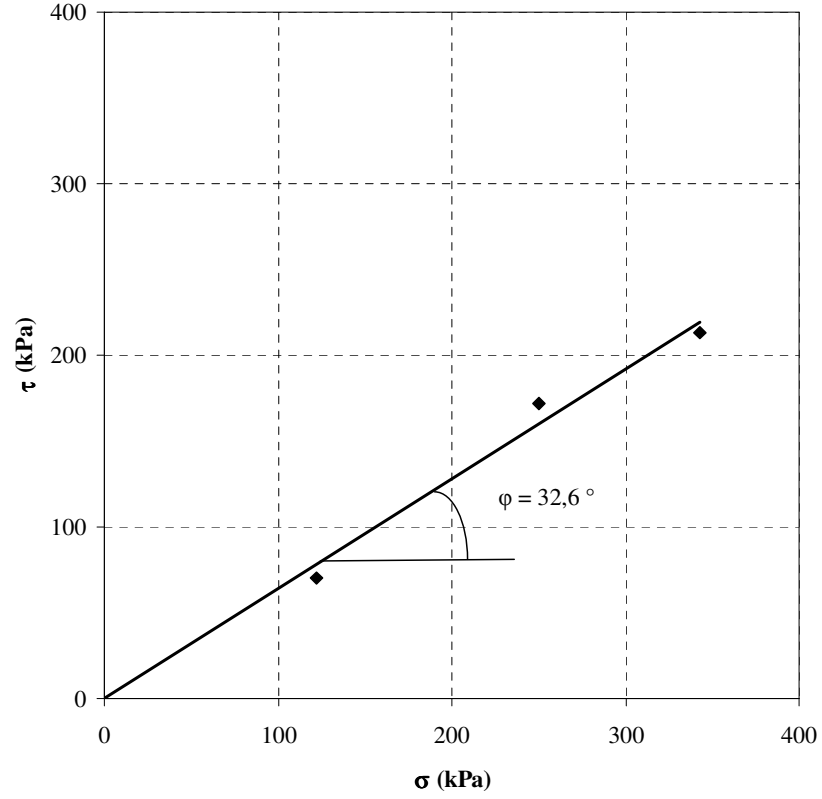
Şekil A.8 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 50, t: 30 gün)



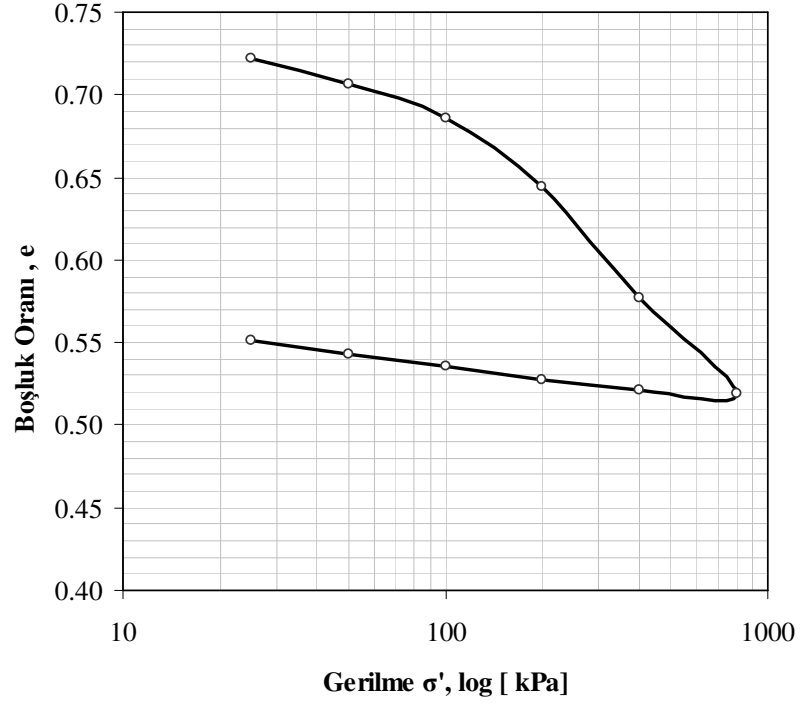
Şekil A.9 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 30gün)



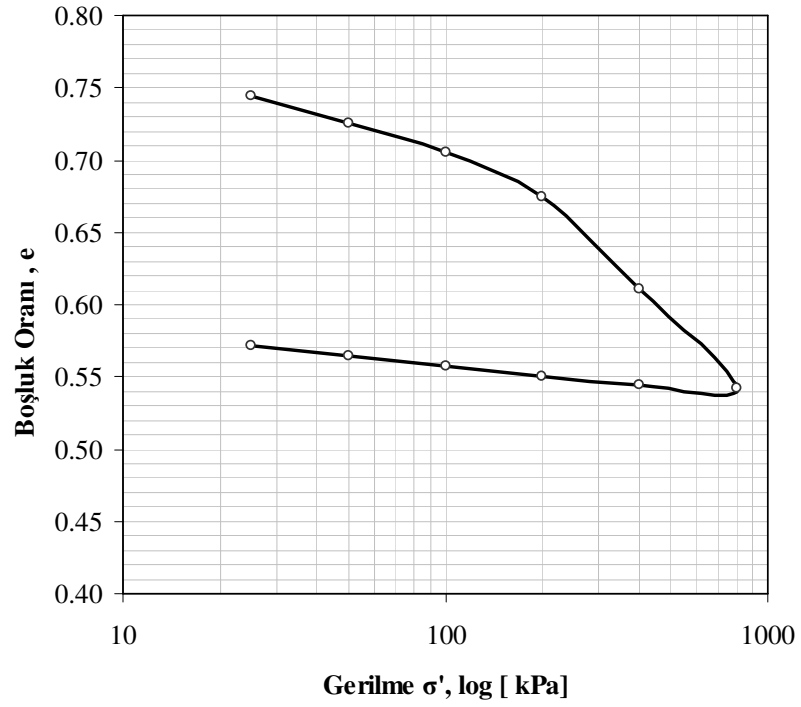
Şekil A.10 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 100, t: 30 gün)



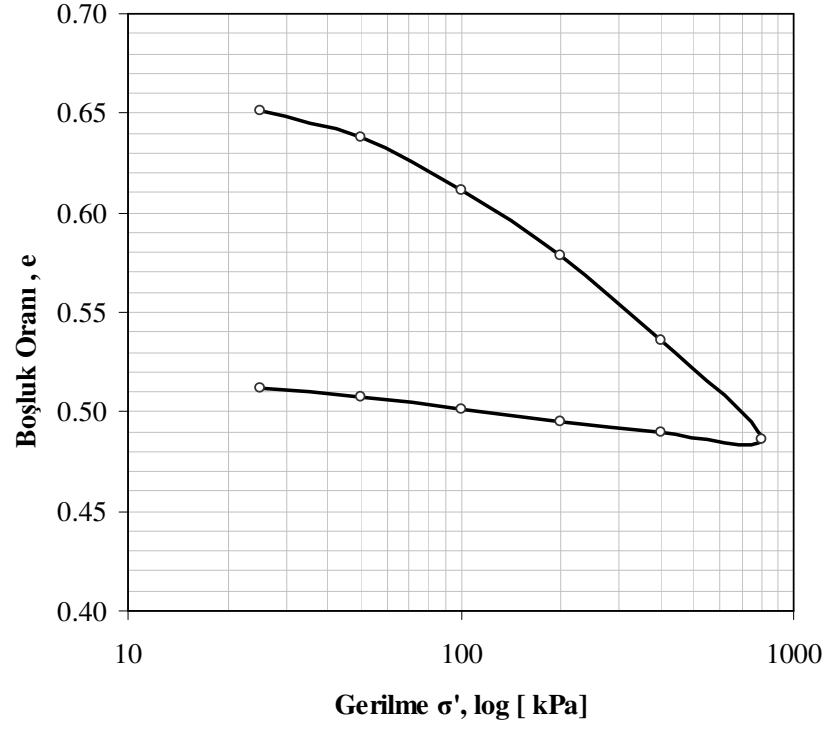
Şekil A.11 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 30gün)



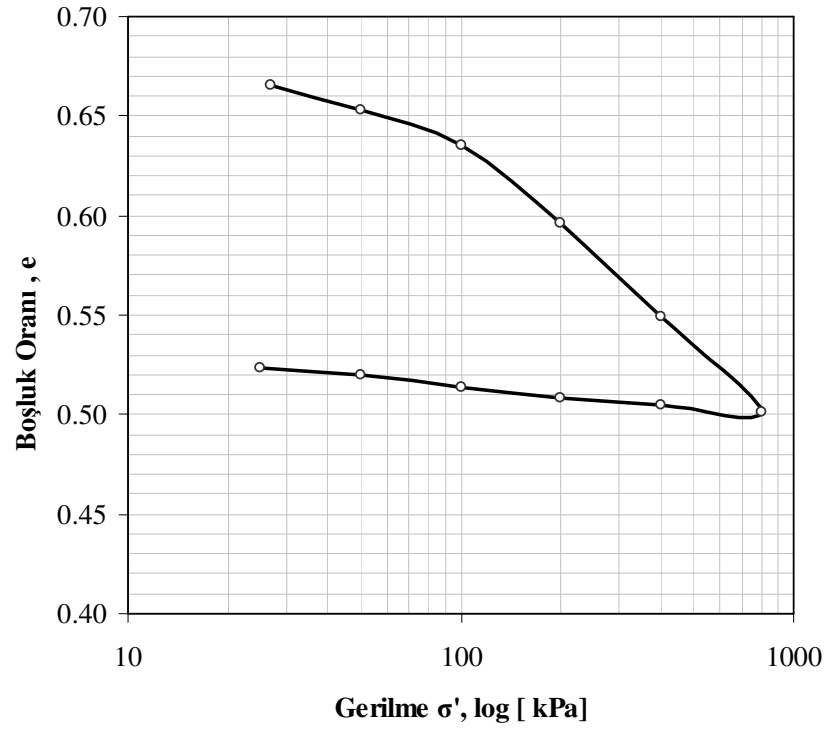
Şekil B.1 : e-log P (Temiz Zemin, t: 30 gün)



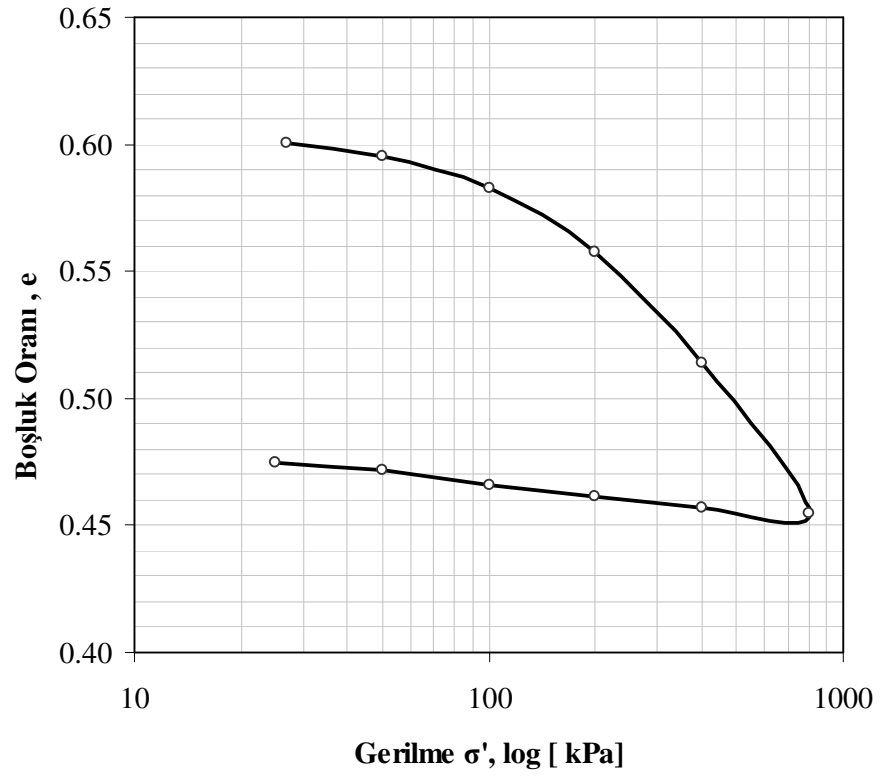
Şekil B.2 : e-log P (Çöp S: % 5, t: 30 gün)



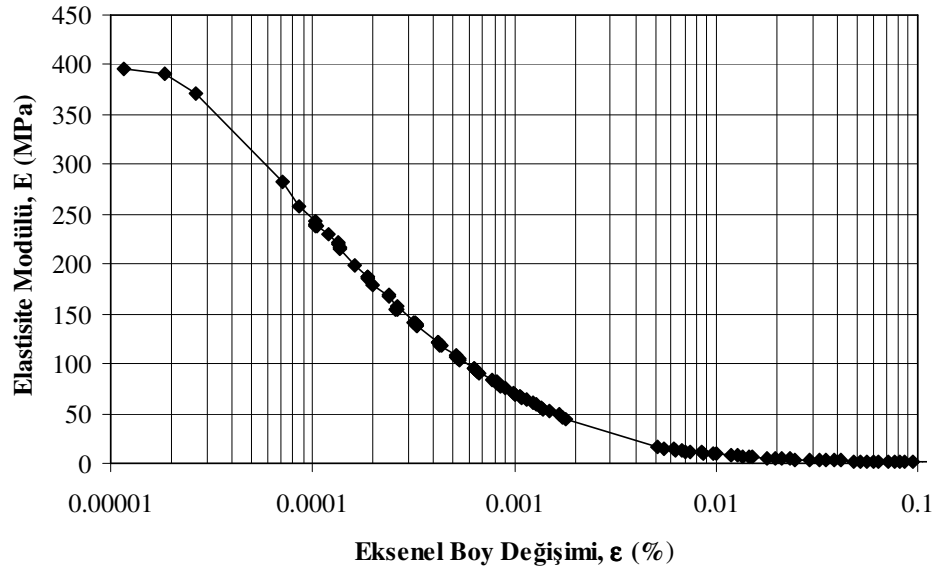
Şekil B.3 : e-log P (Çöp S: % 20, t: 30 gün)



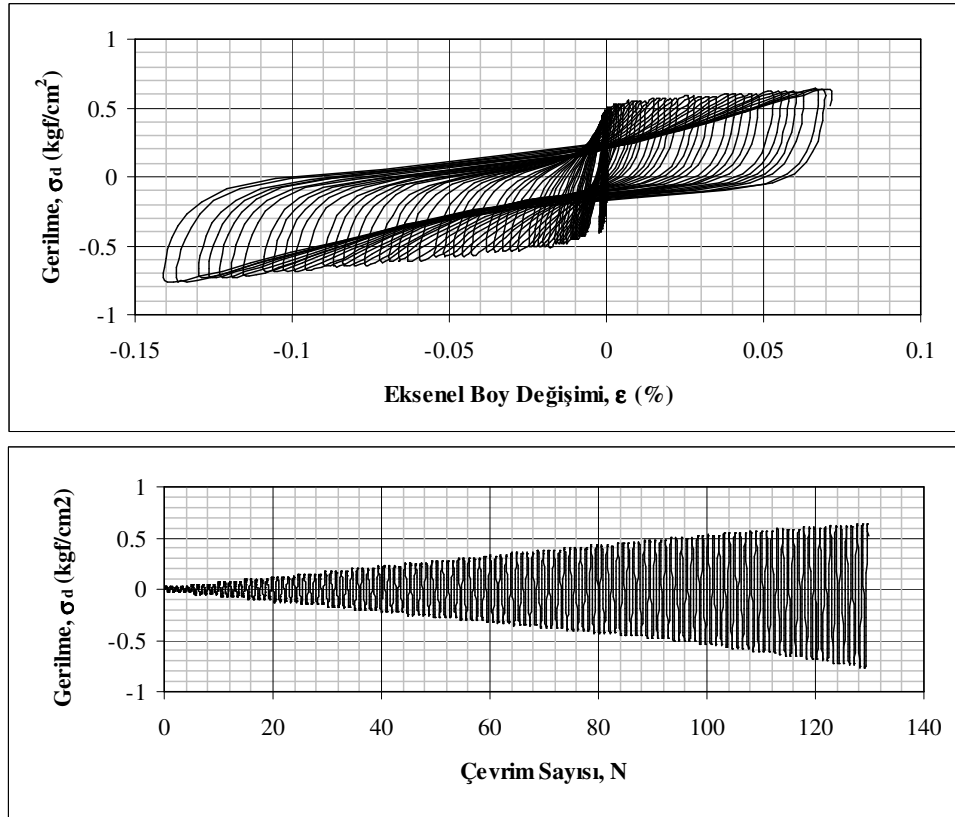
Şekil B.4 : e-log P (Çöp S: % 50, t: 30 gün)



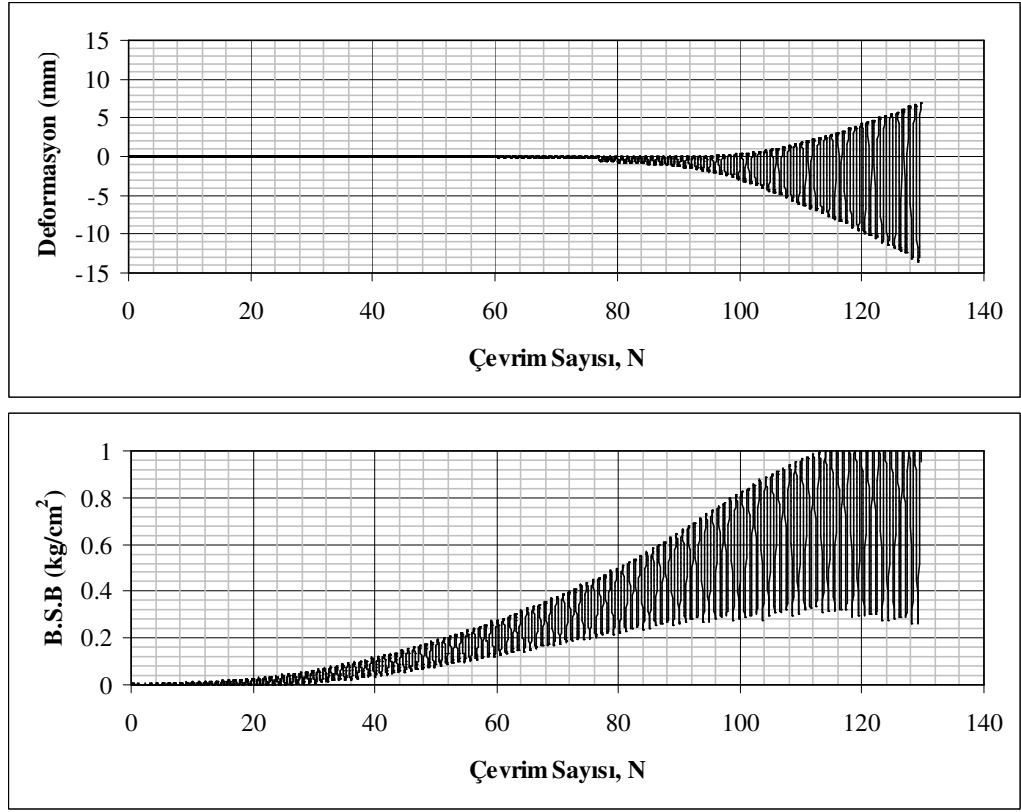
Şekil B.5 : e-log P (Çöp S: % 100, t: 30 gün)



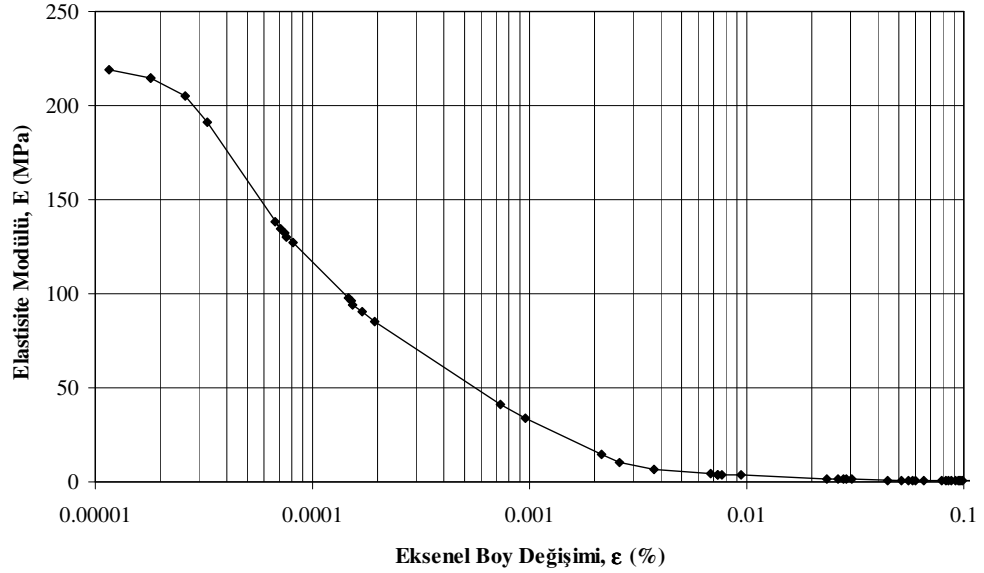
Şekil C.1 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu Temiz Zemin, t: 30 gün)



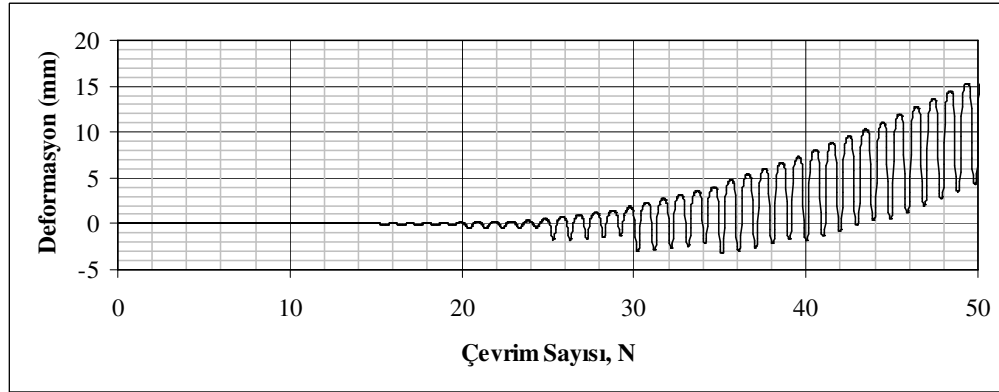
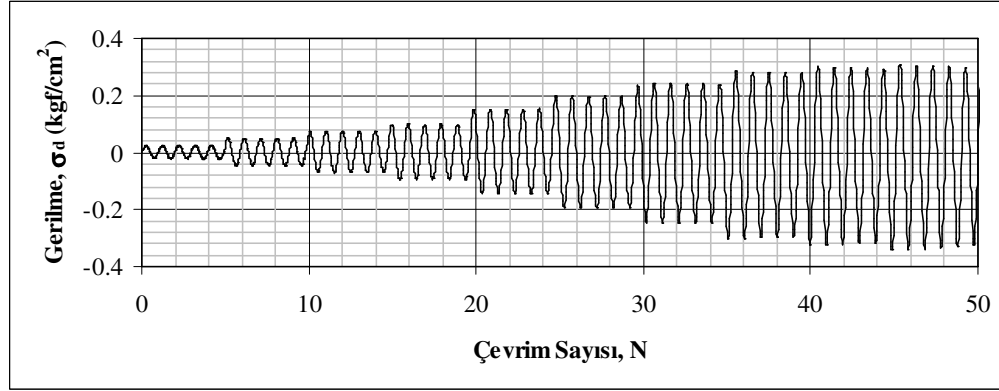
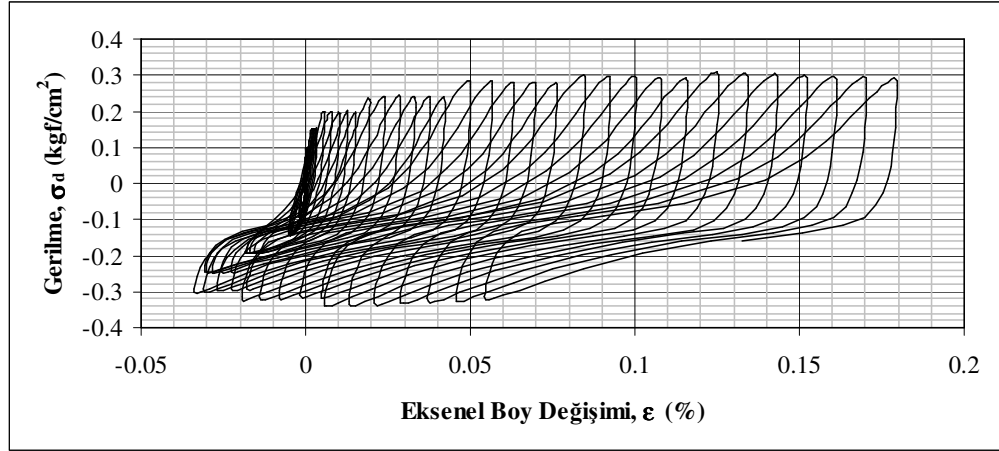
Şekil C.2 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu Temiz Zemin, t: 30 gün)



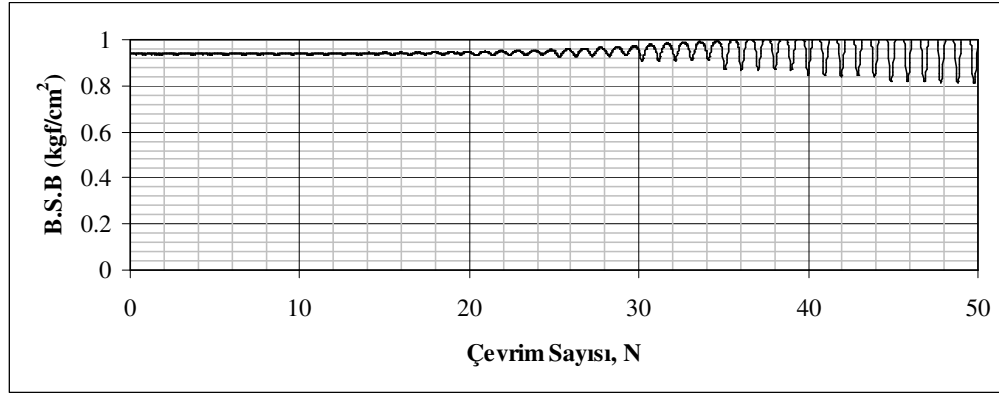
Şekil C.2 (devam): Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu Temiz Zemin, t: 30 gün)



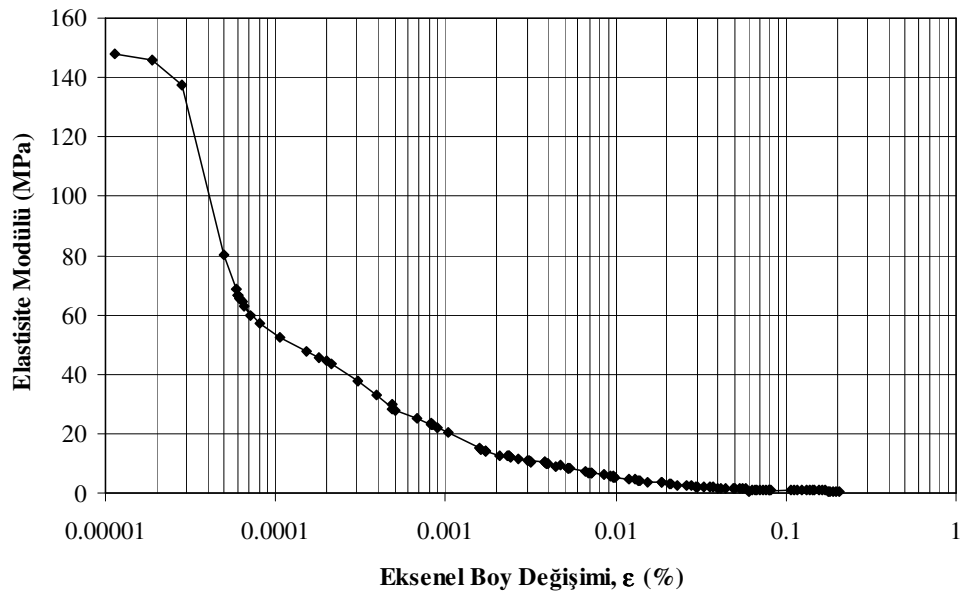
Şekil C.3 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



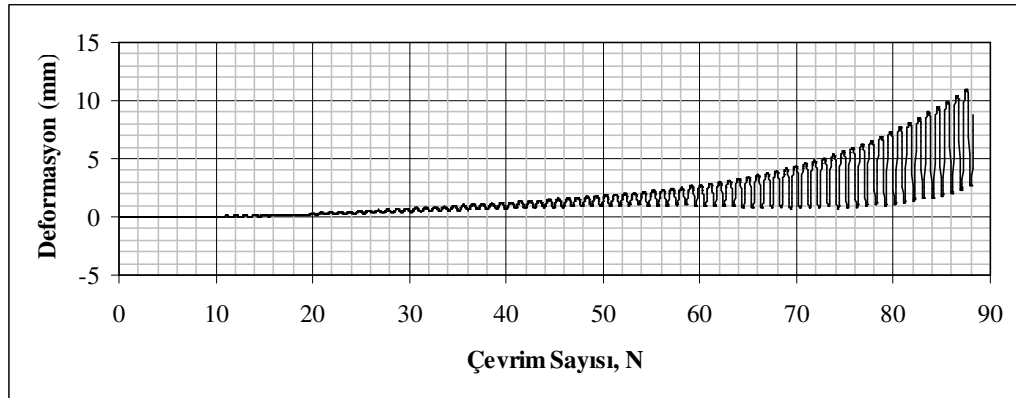
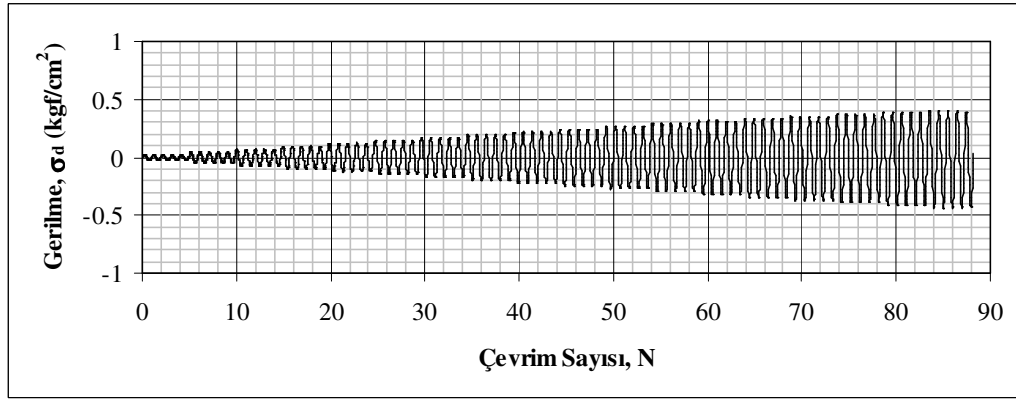
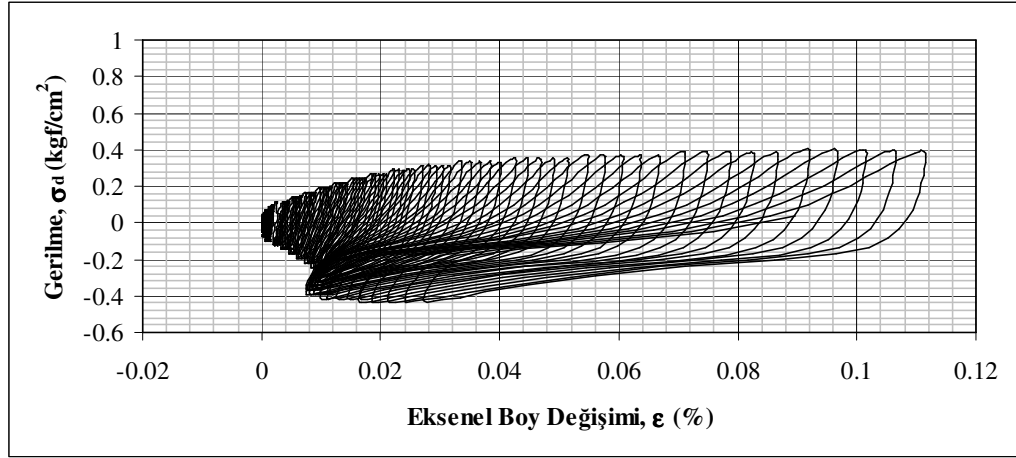
Şekil C.4 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



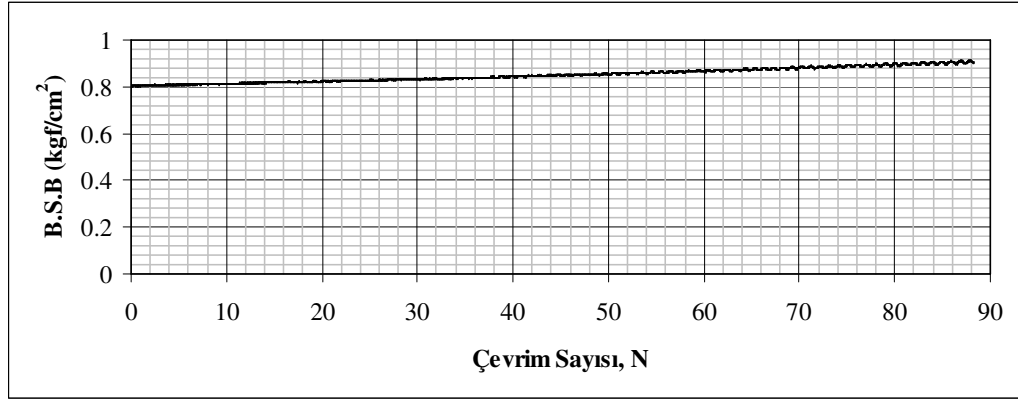
Şekil C.4 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



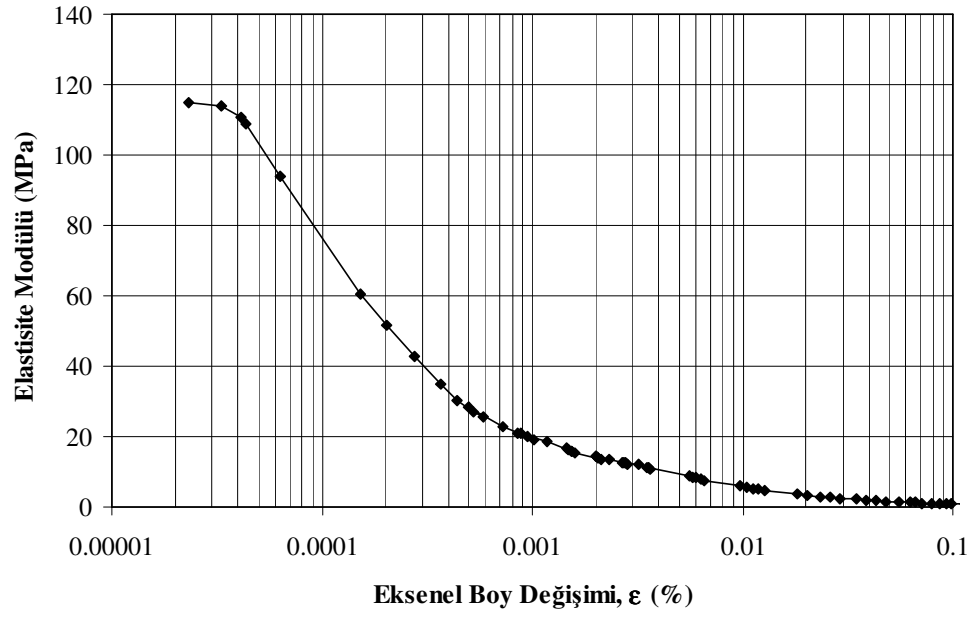
Şekil C.5 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



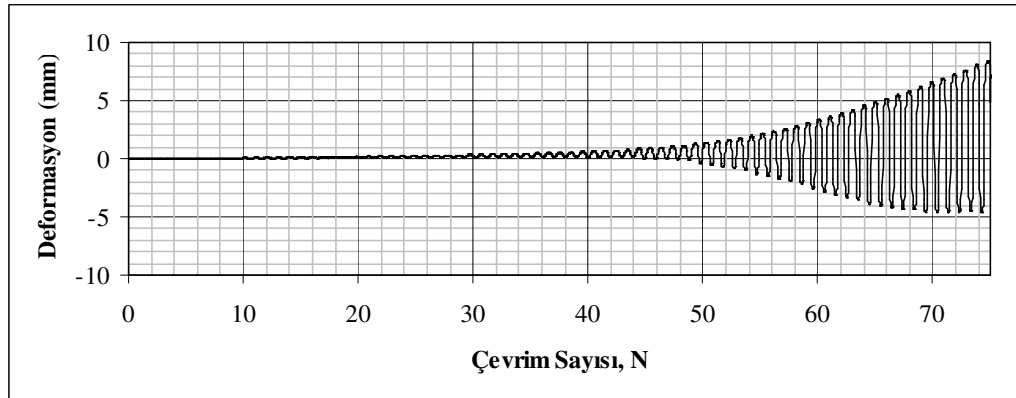
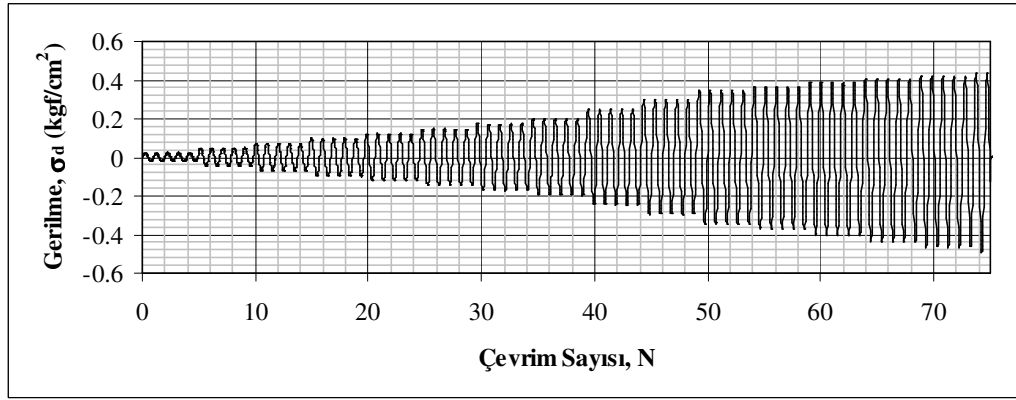
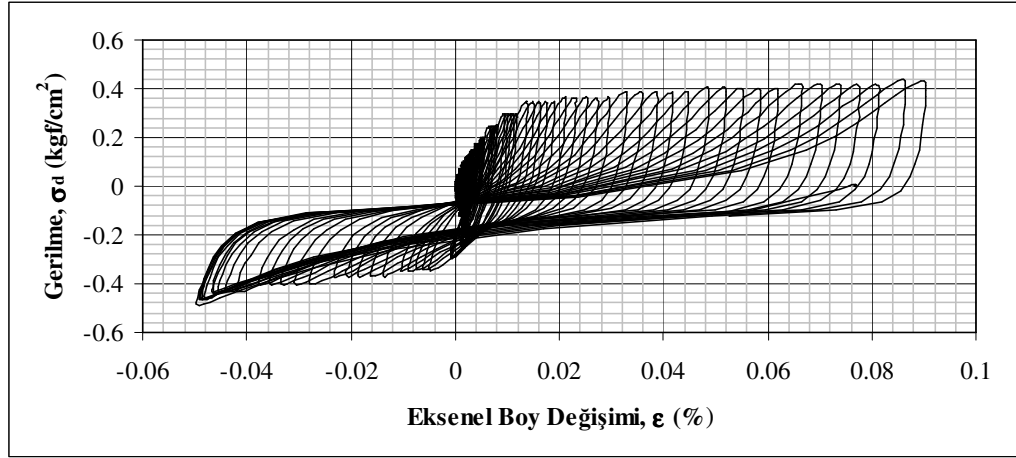
Şekil C.6 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



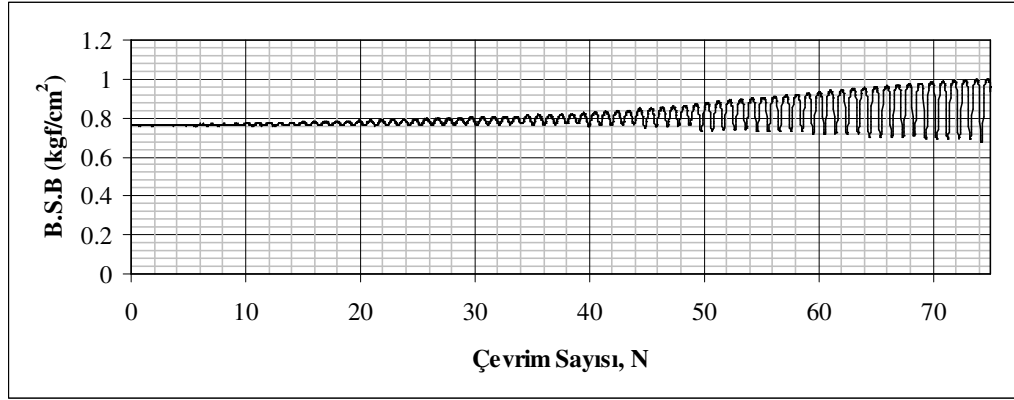
Şekil C.6 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



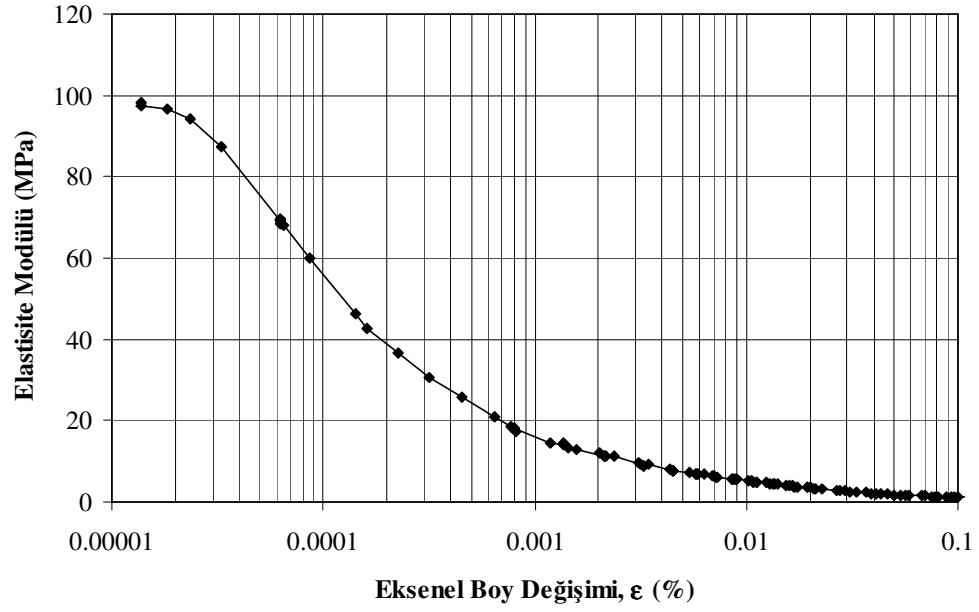
Şekil C.7 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



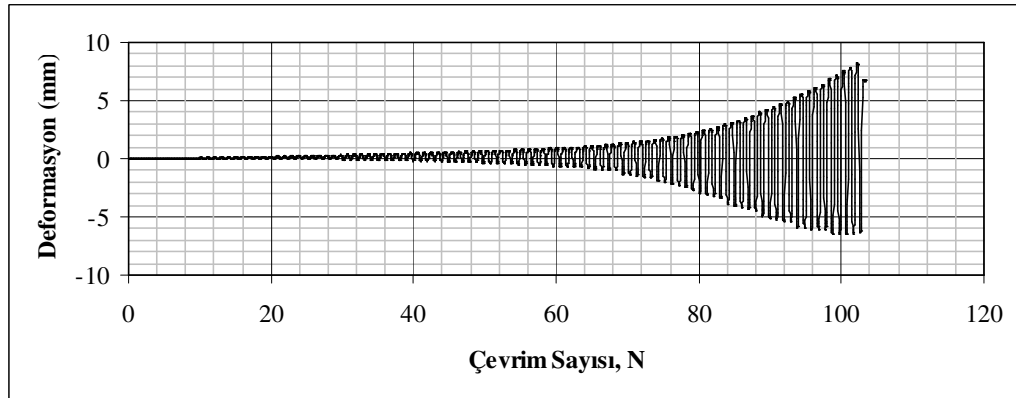
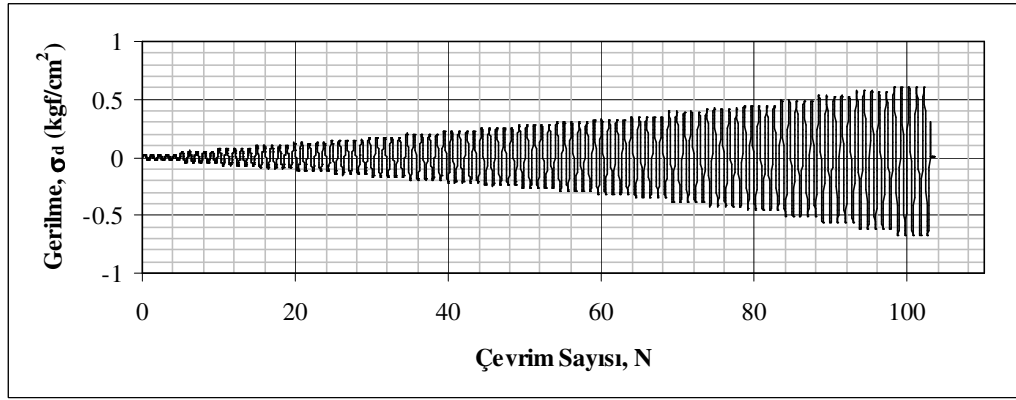
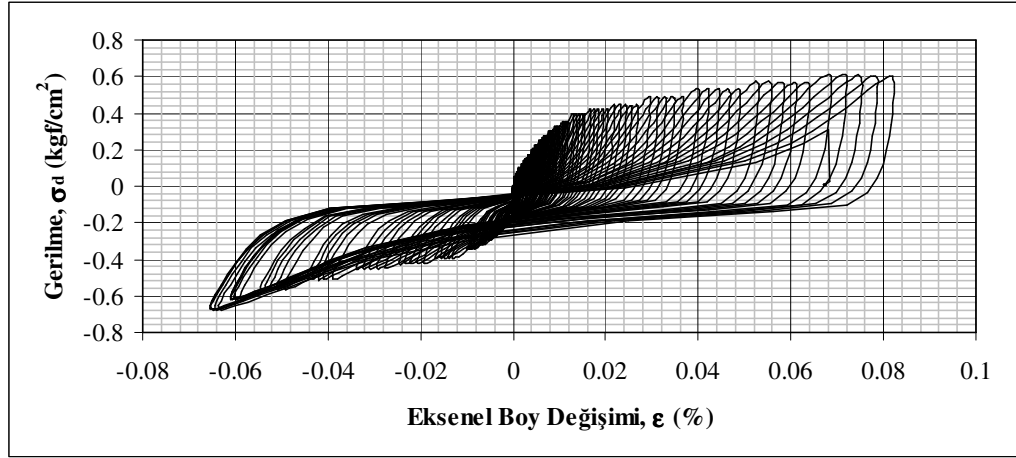
Şekil C.8 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



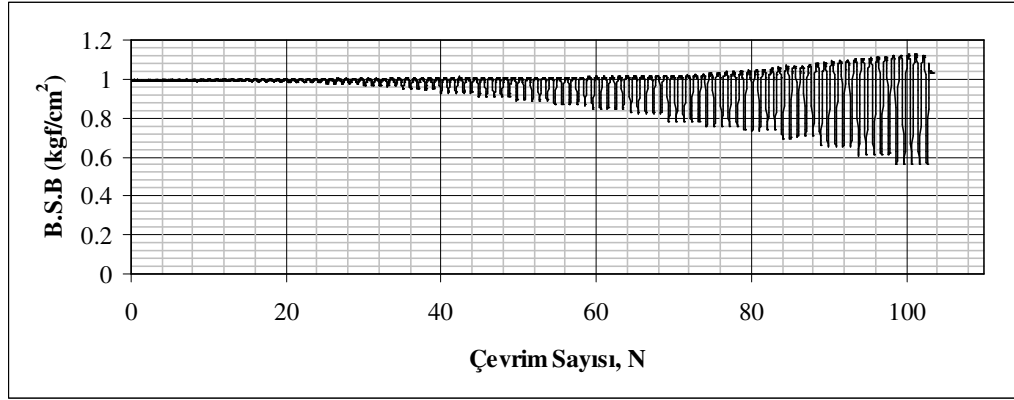
Şekil C.8 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



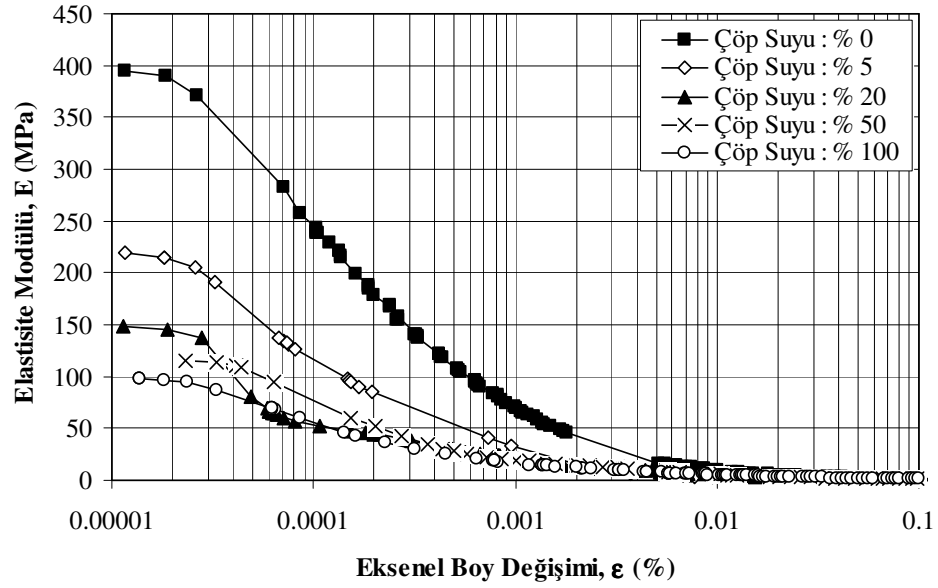
Şekil C.9 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



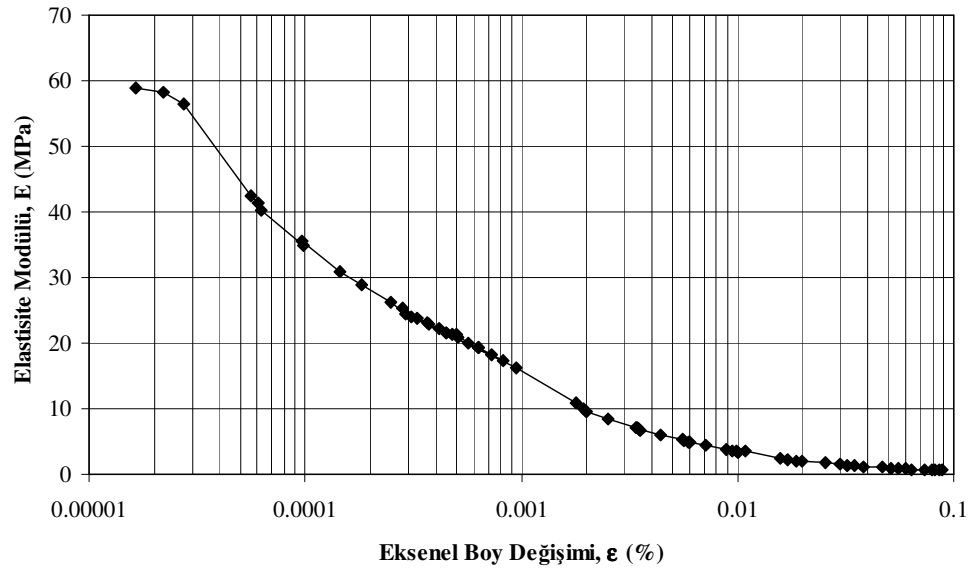
Şekil C.10 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



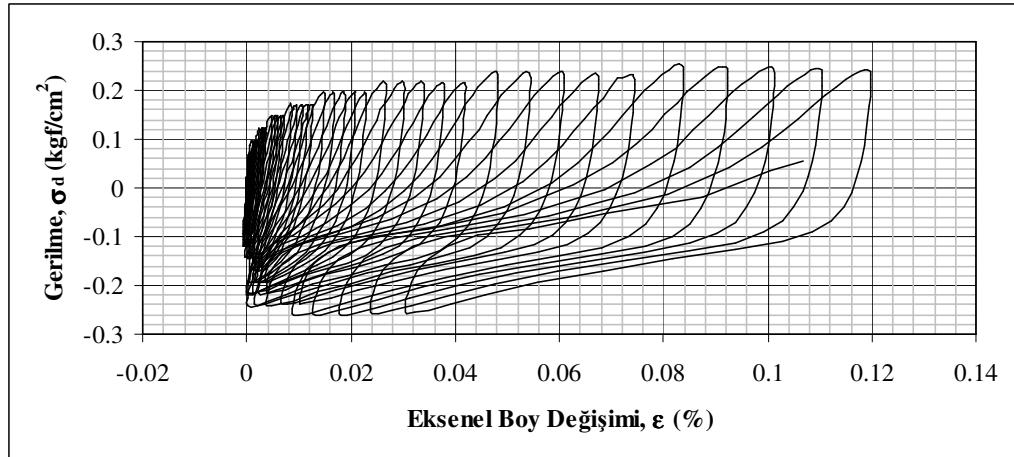
Şekil C.10 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonlu % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



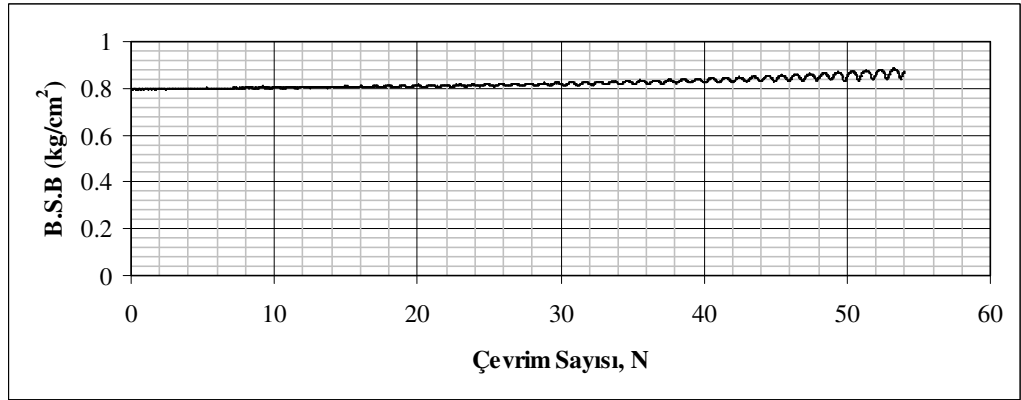
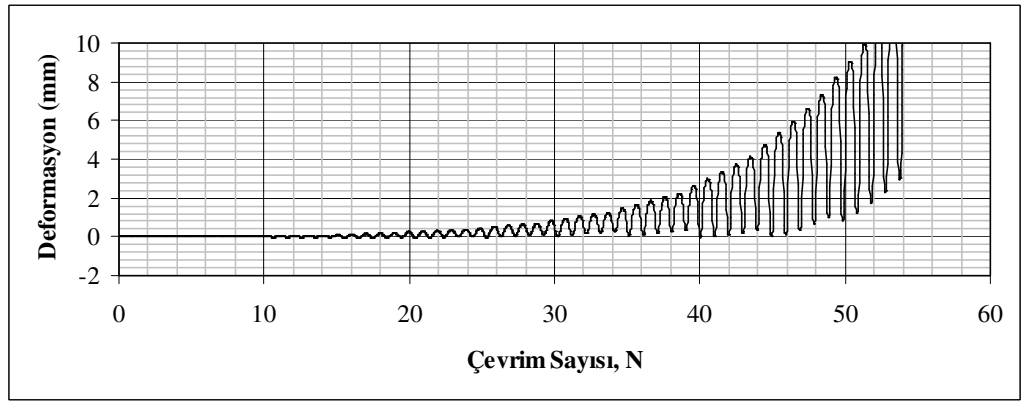
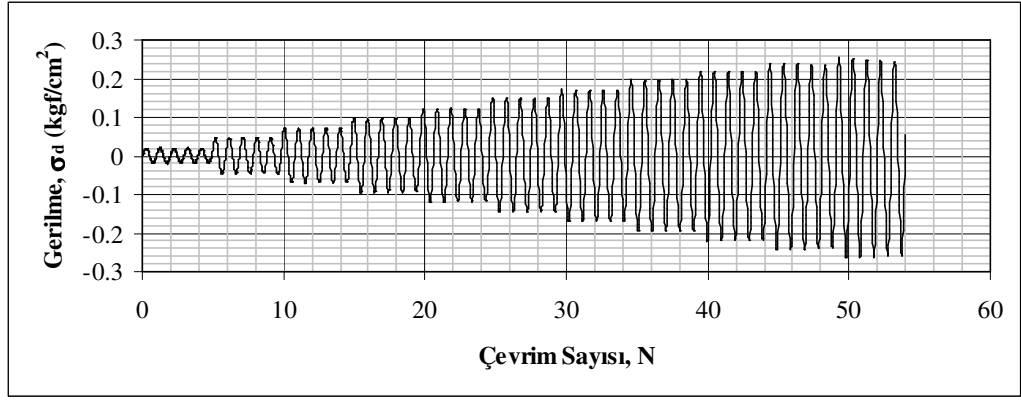
Şekil C.11 : Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonlu Zeminler, t: 30 gün)



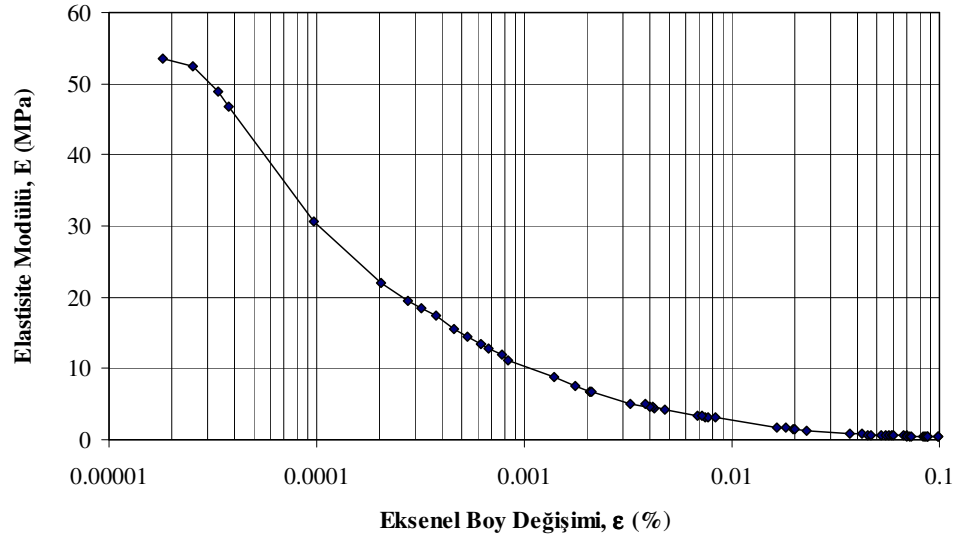
Şekil C.12 : Dinamik Yüklemin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz Temiz Zemin, t: 30 gün)



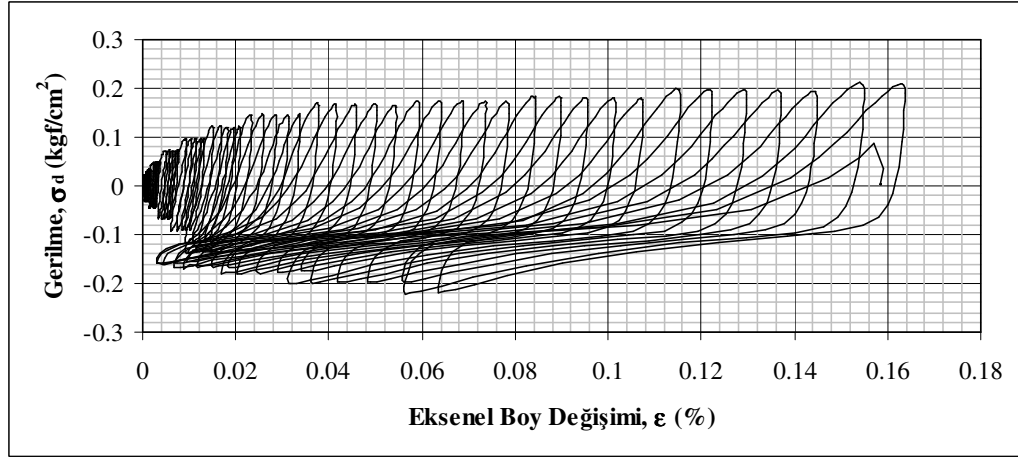
Şekil C.13 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz Temiz Zemin, t: 30 gün)



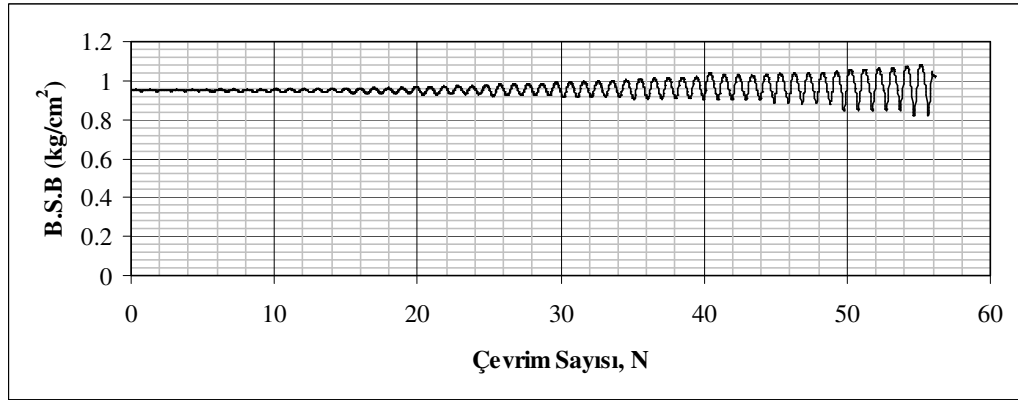
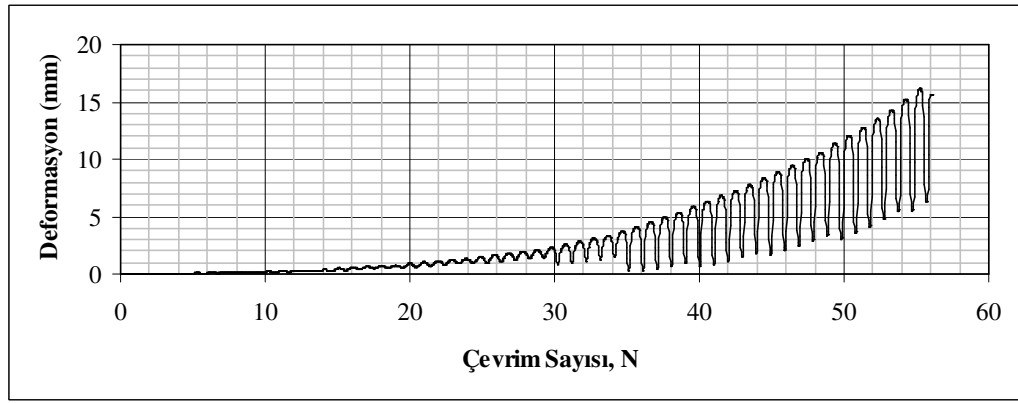
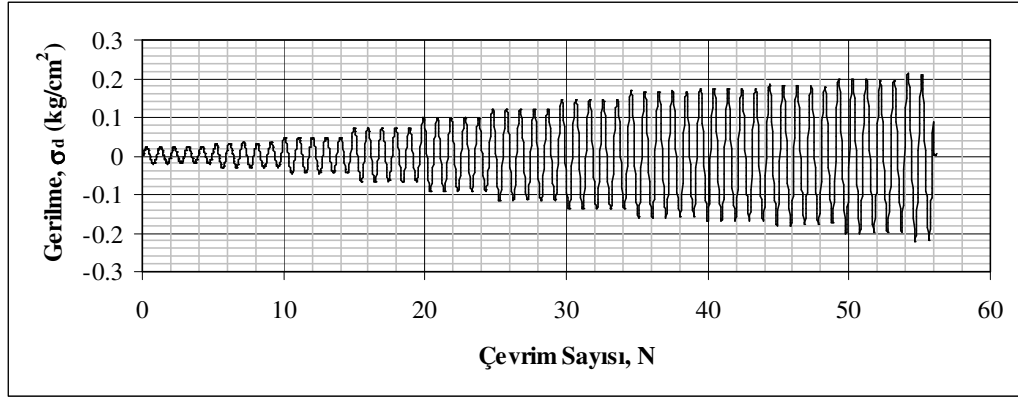
Şekil C.13 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz Temiz Zemin, t: 30 gün)



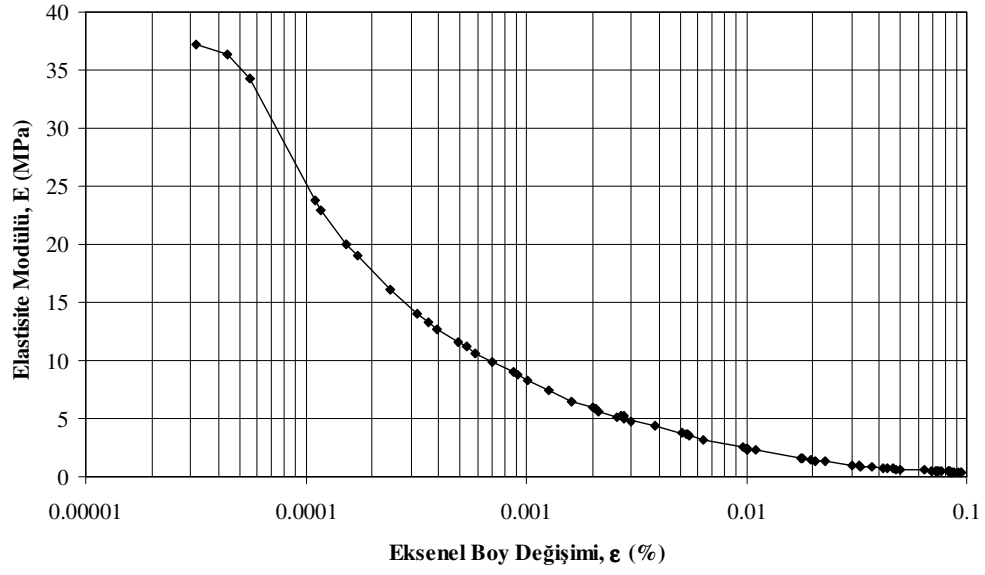
Şekil C.14 : Dinamik Yüklemin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



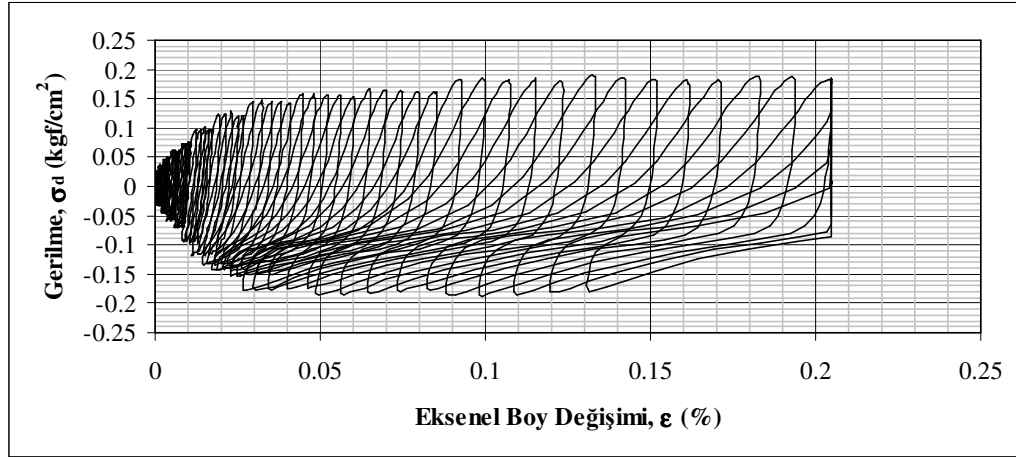
Şekil C.15 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



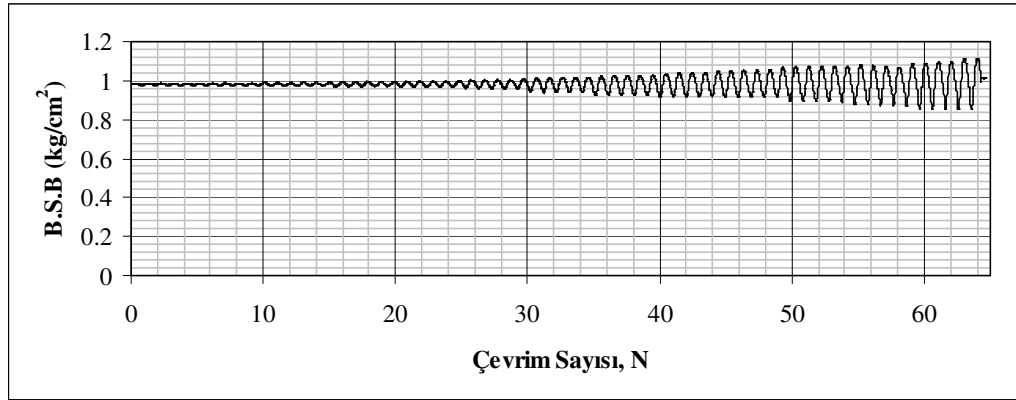
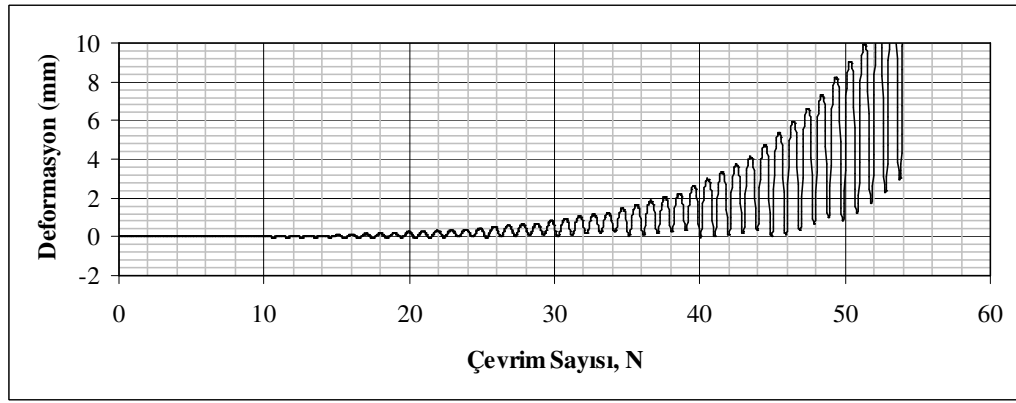
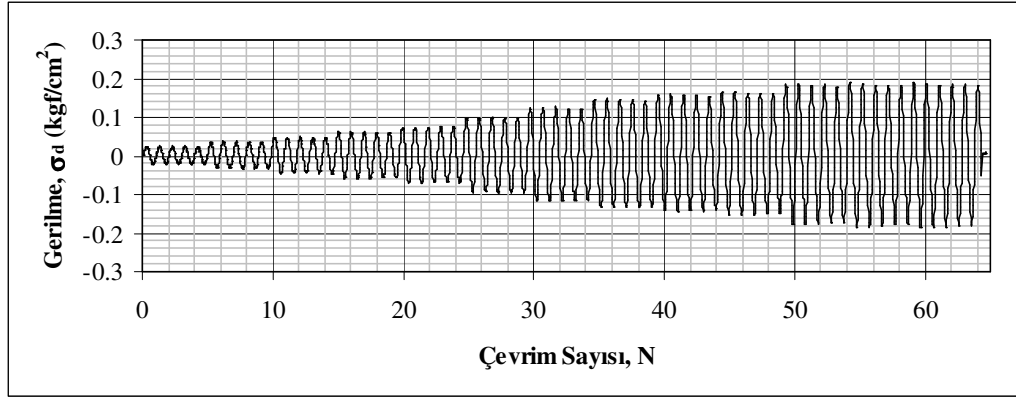
Şekil C.15 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 5 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



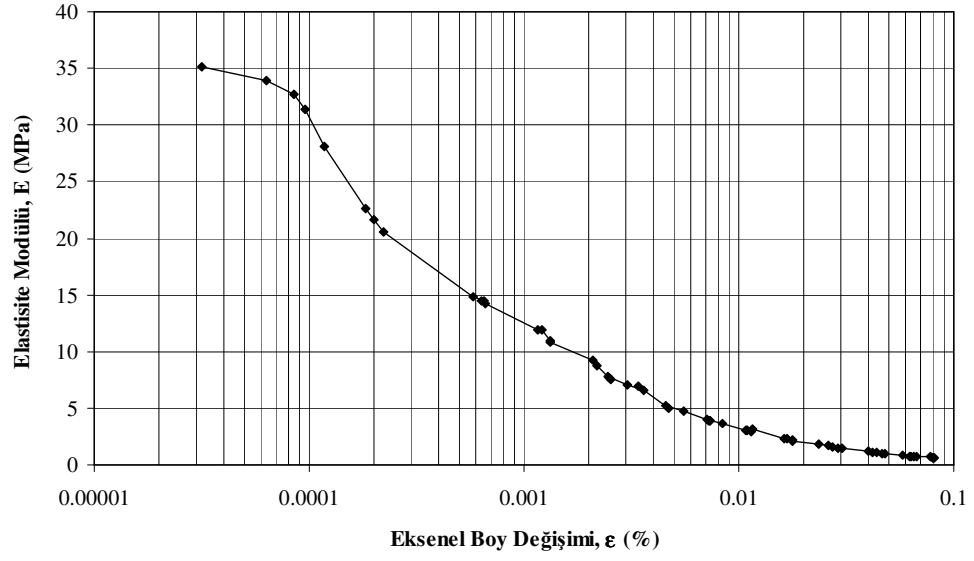
Şekil C.16 : Dinamik Yüünün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



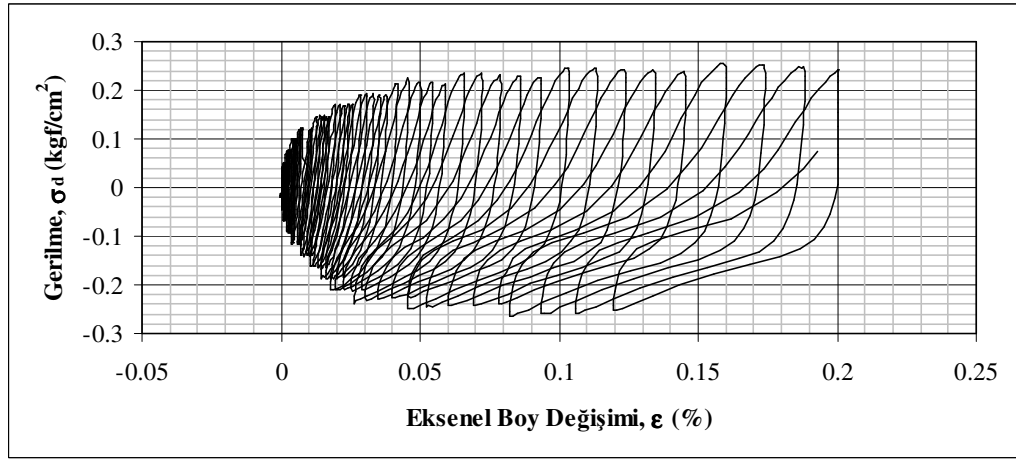
Şekil C.17 : Dinamik Üç Aksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



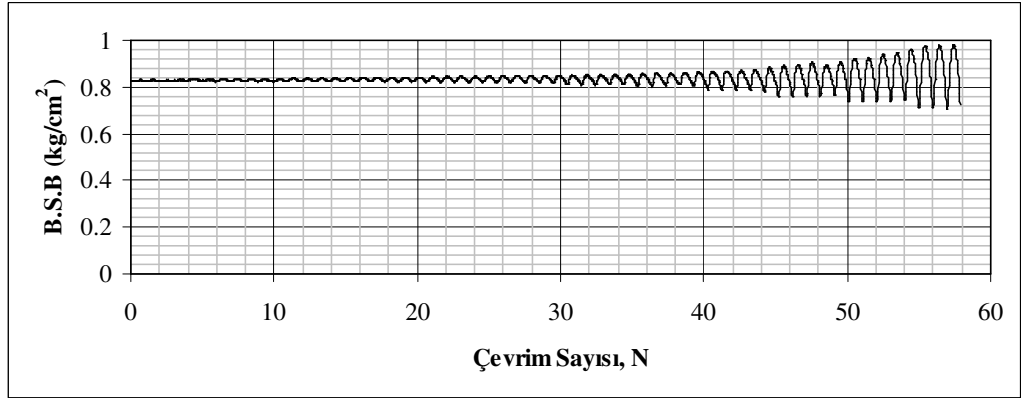
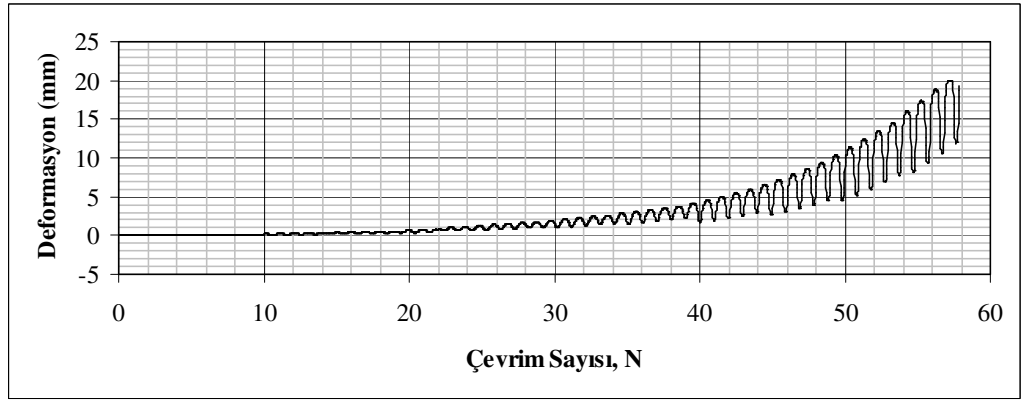
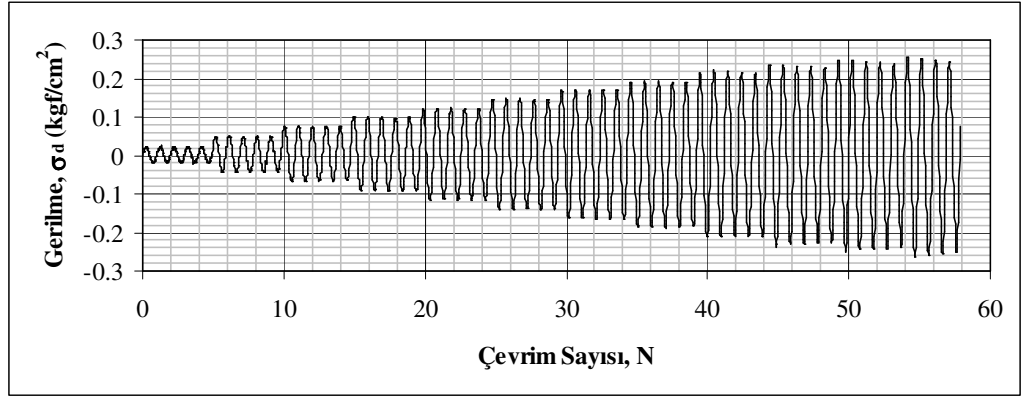
Şekil C.17 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 20 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



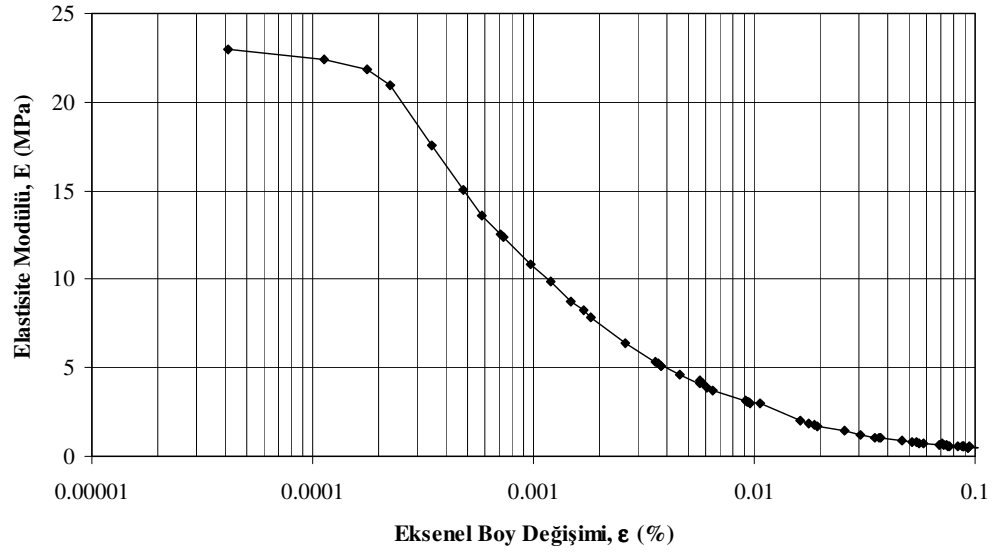
Şekil C.18 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



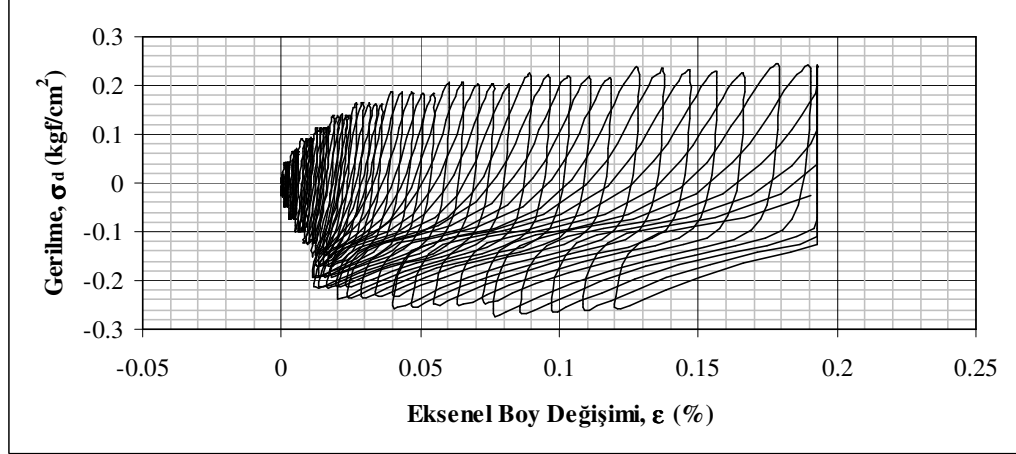
Şekil C.19 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



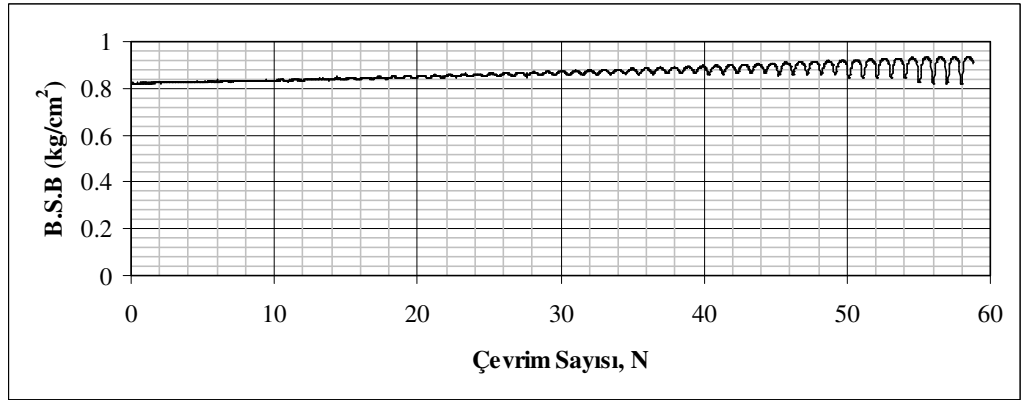
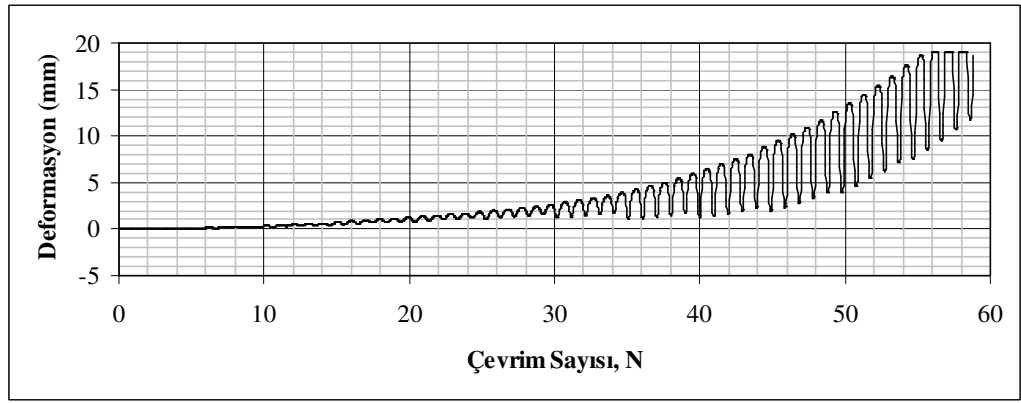
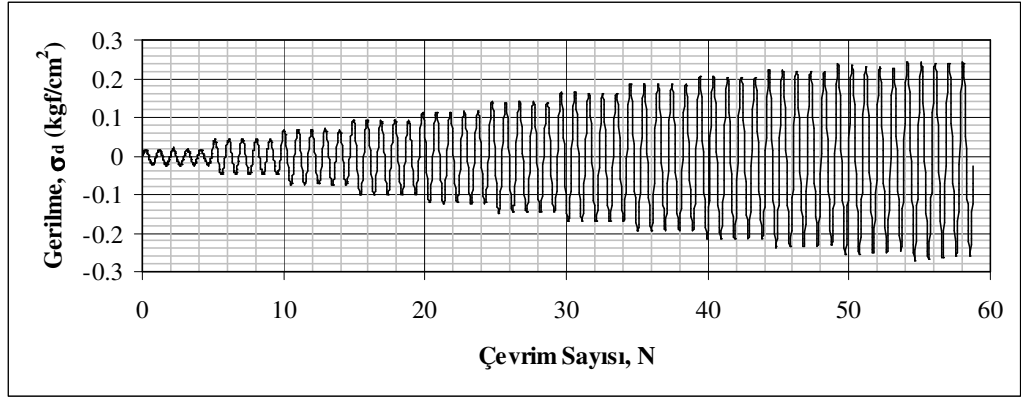
Şekil C.19 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 50 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



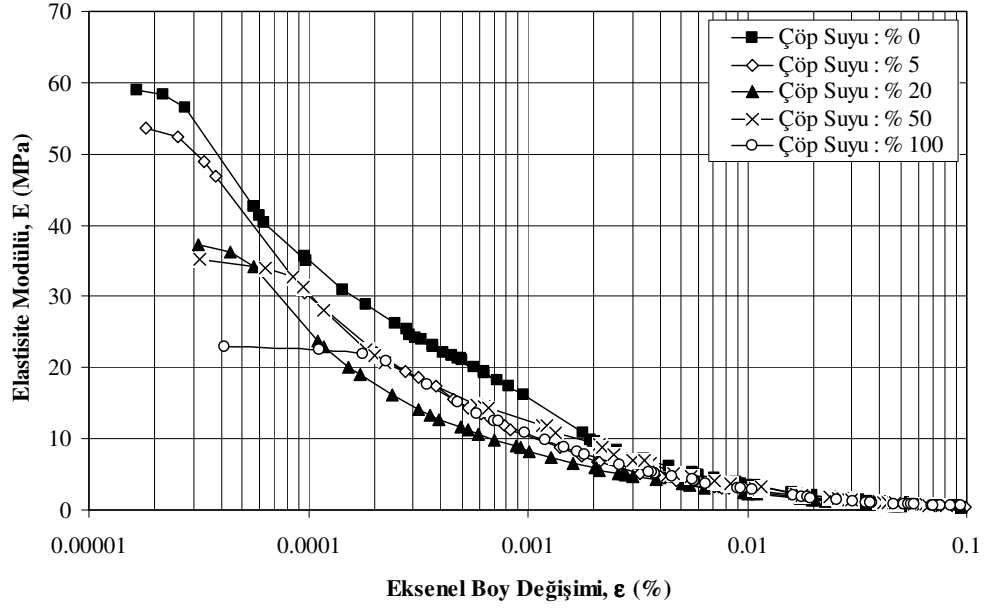
Şekil C.20 : Dinamik Yüklemin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



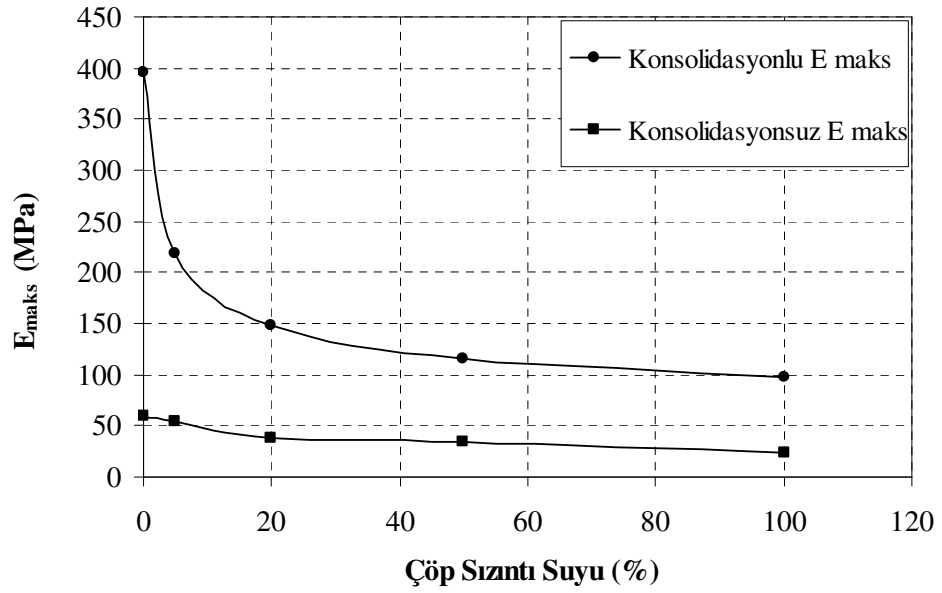
Şekil C.21 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



Şekil C.21 (devam) : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Konsolidasyonsuz % 100 Çöp Sulu Zemin, t: 30 gün)



Şekil C.22 : Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi
(Konsolidasyonsuz Zeminler, t: 30 gün)



Şekil C.23 : Kür Oranının Maksimum Elastisite Modülü Üzerine Etkisi

ÖZGEÇMİŞ

01.09.1981 tarihinde İstanbul'da doğdu. 1999 yılında Fenerbahçe Süper Lisesi'ni bitirdi. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden iyi derece ile mezun oldu. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen bu bölümde öğrenimini sürdürmektedir.