İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PLASTİSİTELİ ZEMİNLERİN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE ÇÖP SUYUNUN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Neşe ER

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PLASTİSİTELİ ZEMİNLERİN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE ÇÖP SUYUNUN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Neşe ER
(501021272)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Şubat 2006

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

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Beni bu çalışmayı yapmaya teşvik eden, karşılaştığım tüm zorluklarda bilgi ve desteği ile yanımda olan sevgili hocam Sayın Doç. Dr. Ayfer ERKEN' e, Sayın Doç. Dr. Kadir ALP' e çalışmam sırasında bilgi birikimleri ile bana yardımcı olan araştırma görevlileri Zülküf Kaya ve Barış Elibol' a, Zemin Mekaniği laboratuar çalışanlarına ve her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Şubat, 2006 **Neşe ER**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **vi**
TABLO LİSTESİ **vii**
ŞEKİL LİSTESİ **viii**
SEMBOL LİSTESİ **xv**
ÖZET **xvi**
SUMMARY **xix**

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 4
2.2.1. Organik Madde 4
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 32
3.5.Çöp Sızıntı Suyu İle Karıştırılmış Zemin Numunelerinin Özellikleri 34
3.6. Atterberg Limitleri 36
3.6.1. Likit Limit 36
3.6.2. Plastik Limit 38
3.7. Kesme Kutusu Deneyi 39
3.7.1. Kesme Kutusu Deney Aleti 39

3.7.2. Numune Hazırlanması 40
3.7.3. Deneyin Yapılışı 41
3.8. Ödometre Deneyi 42
3.8.1. Ödometre Aleti 42
3.8.2. Numune Hazırlanması 43
3.8.3. Deneyin Yapılışı 43
3.9. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi 44
3.9.1. Dinamik Üç Eksenli Dinamik Basınç Deney Sistemi 44
3.9.1.1. Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre 45
3.9.1.2. Elektriksel Ölçüm Birimi 47
3.9.2. Deney Sisteminin Kalibrasyonu 49
3.9.3. Numune Hazırlanması 50
3.9.4. Deneyin Yapılışı 51
3.9.5. Verilerin Toplanması 53
3.10. Sonuçlar 54

4. DENEY SONUÇLARI 55
4.1. Giriş 55
4.2. Kür Oranının Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi (t= 0) 56
4.3. Kür Süresinin Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi 58
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. Gerilme Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Süresinin Etkisi 72
4.4.3. Kayma Direnci Üzerinde Kür Oranın Etkisi 104
4.4.4. Kayma Direnci Üzerinde Kür Süresinin Etkisi 107
4.5. Ödometre Deney Sonuçları 112
4.5.1. Hacim Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 113
4.5.2. Ön Konsolidasyon Basıncı Üzerine Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 116
4.5.3. Permeabilite Katsayı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 118
4.5.4. Konsolidasyon Katsayısı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 121
4.6. Zeminin Dinamik Davranışları Üzerine Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 124
4.6.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 124
4.6.1.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranının Etkisi 126
4.6.1.2. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Süresinin Etkisi 132
4.6.2. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi 142
4.6.2.1. Temiz Zeminin Elastisite Modülü 143
4.6.2.2. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Oranının Etkisi 144
4.6.2.3. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Süresinin Etkisi 148
4.7. Sonuçlar 153

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **155**

KAYNAKLAR **160**

EKLER **163**

ÖZGEÇMİŞ **245**

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

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 Asittin Zeminin Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi ……..	11
Tablo 2.4	**:** Ön Konsolidasyon Basıncının Kür Süresi İle Değişimi ……	23
Tablo 3.1	**:** Deney Numunesinin Endeks Özellikleri …….....	30
Tablo 3.2	**:** K.Burgaz Çöp Sızıntı Suyu Bileşenlerine Ait Analiz Sonucu.…	32
Tablo 3.3	**:** Sızıntı Çöp Suyu İle Karıştırılmış Zemin Numunelerinin Analiz Sonuçları ……...	35
Tablo 4.1	**:** Kür Oranı ve Kür Süresinin Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi……	58
Tablo 4.2	**:** Kesme Kutusu Deneyi w-γ_k Değerleri ……	64
Tablo 4.3	**:** Ödometre Deneyi w-γ_k Değerleri ……	112
Tablo 4.4	**:** Ödometre Deney Sonuçları ……	113
Tablo 4.5	**:** Kür Oranı ve Kür Süresinin $P_{şişme}$ Üzerine Etkisi …….	114
Tablo 4.6	**:** Kür Oranı ve Kür Süresinin P_c Üzerine Etkisi ……	117
Tablo 4.7	**:** Dinamik Deneyi w-γ_k Değerleri ……	124
Tablo 4.8	**:** Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi ……	149
Tablo A.1	**:** Kıvam Limitleri (Temiz Zemin) ……	163
Tablo A.2	**:** Kıvam Limitleri (Çöp S: % 5) ……	164
Tablo A.3	**:** Kıvam Limitleri (Çöp S: % 20) ……	165
Tablo A.4	**:** Kıvam Limitleri (Çöp S: % 50) ……	166
Tablo A.5	**:** Kıvam Limitleri (Çöp S: % 100) ……...	167
Tablo D.1	**:** Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi w-γ_k Değerleri	230

ŞEKİL LİSTESİ

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 : Geçirimlilik Katsayısının Katkı Oranı İle Değişimi …… 18
Şekil 2.14 : Tuzun Permeabilite Üzerindeki Etkisi ……
Şekil 2.15 : Bentonit ve Na^+ Kaolinitte Sıkışabilirlik Eğrileri…… 19
Şekil 2.16 : Farklı Boşluk Sıvılarında Tek Yönlü Konsolidasyon Eğrileri …… 20
Şekil 2.17 : Şişme Yüzdesi-Sönmüş Kireç Katkısı İlişkisi ……. 22
Şekil 2.18 : Konsolidasyon Basıncının Çimento Katkısı İle Değişimi ……... 23
Şekil 2.19 : Kireç İçeriğinin G Üzerine Etkisi …… 24
Şekil 2.20 : Kireç İçeriğinin Sönüm Üzerine Etkisi …….. 25
Şekil 2.21 : Kireç İçeriğinin G-γ Üzerine Etkisi ……. 26
Şekil 2.22 : Kireç İçeriğinin G-γ Üzerine Etkisi ……. 26
Şekil 2.23 : Kireç İçeriğinin G-γ Üzerine Etkisi ……. 27
Şekil 2.24 : Kayma Modülü- Kireç Yüzdesi Arasındaki İlişki ……..... 28
Şekil 2.25 : Lif Katkısının Sönümleme Oranına Etkisi ……..... 28
Şekil 2.26 : Lif Katkısının Dinamik Kayma Modülü Üzerine Etkisi ……..... 29
Şekil 2.27 : Lif Katkısının Young Modülü Üzerine Etkisi ……. 29
Şekil 3.1 : Plastisite Kartı ……..... 31
Şekil 3.2 : Granülometri Eğrisi ……..... 31
Şekil 3.3 : γ_k-w_{opt} Grafiği ……..... 34
Şekil 3.4 : Casagrande Aleti ……..... 37
Şekil 3.5 : Kesme Kutusu Deney Aleti ……..... 39
Şekil 3.6 : Kesme Kutusu İçin Numune Hazırlanması ……..... 41
Şekil 3.7 : Ödometre Deney Aleti ……. 42

Şekil 3.8 : Konsolidasyon Deney Numunesinin Hazırlanması 43
Şekil 3.9 : Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi 45
Şekil 3.10 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Yandan ve Önden Görünüşü 46
Şekil 3.11 : Dinamik Yükleme Ölçüm ve Kayıt Birimi 48
Şekil 3.12 : Ölçüm Sistemi Dijital Panosu 49
Şekil 3.13 : Tıraşlama Aleti Kullanılarak Numune Hazırlanması 51
Şekil 4.1 : Çöp Sızıntı Suyu Oranın Likit Limit Üzerine Etkisi 56
Şekil 4.2 : Çöp Sızıntı Suyu Oranın Plastik Limit Üzerine Etkisi 57
Şekil 4.3 : Çöp Sızıntı Suyu Oranın Plastisite İndisi Üzerine Etkisi 57
Şekil 4.4 : Kür Süresinin Likit Limit Üzerine Etkisi 59
Şekil 4.5 : Kür Süresinin Plastik Limit Üzerine Etkisi 60
Şekil 4.6 : Kür Süresinin Plastisite İndisi Üzerine Etkisi 61
Şekil 4.7 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (Temiz Zemin) 63
Şekil 4.8 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (σ= 100 kPa, t= 0) 67
Şekil 4.9 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (σ= 200 kPa, t= 0) 68
Şekil 4.10 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (σ= 300 kPa, t= 0) 69
Şekil 4.11 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi 70
Şekil 4.12 : Kür Oranın τ Üzerine Etkisi 70
Şekil 4.13 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (σ= 100 kPa) 71
Şekil 4.14 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (σ= 200 kPa) 71
Şekil 4.15 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (σ= 300 kPa) 72
Şekil 4.16 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Temiz Zemim) 73
Şekil 4.17 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Temiz Zemim) 73
Şekil 4.18 : τ-ΔL (Temiz Zemin, σ= 100 kPa) 74
Şekil 4.19 : τ-ΔL (Temiz Zemin, σ= 200 kPa) 74
Şekil 4.20 : τ-ΔL (Temiz Zemin, σ= 300 kPa) 75
Şekil 4.21 : τ-ΔL (Çöp S: % 5, σ= 100 kPa) 76
Şekil 4.22 : τ-ΔL (Çöp S: % 5, σ= 200 kPa) 76
Şekil 4.23 : τ-ΔL (Çöp S: % 5, σ= 300 kPa) 77
Şekil 4.24 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5) 78
Şekil 4.25 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 5) 79
Şekil 4.26 : τ-ΔL (Çöp S: % 10, σ= 100 kPa) 80
Şekil 4.27 : τ-ΔL (Çöp S: % 10, σ= 200 kPa) 80
Şekil 4.28 : τ-ΔL (Çöp S: % 10, σ= 300 kPa) 81
Şekil 4.29 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 10) 82
Şekil 4.30 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 10) 83
Şekil 4.31 : τ-ΔL (Çöp S: % 20, σ= 100 kPa) 84
Şekil 4.32 : τ-ΔL (Çöp S: % 20, σ= 200 kPa) 84
Şekil 4.33 : τ-ΔL (Çöp S: % 20, σ= 300 kPa) 85
Şekil 4.34 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 20) 86
Şekil 4.35 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 20) 87
Şekil 4.36 : τ-ΔL (Çöp S: % 30, σ= 100 kPa) 88
Şekil 4.37 : τ-ΔL (Çöp S: % 30, σ= 200 kPa) 89
Şekil 4.38 : τ-ΔL (Çöp S: % 30, σ= 300 kPa) 89
Şekil 4.39 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 30) 91
Şekil 4.40 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 30) 92
Şekil 4.41 : τ-ΔL (Çöp S: % 40, σ= 100 kPa) 93

Şekil 4.42 : τ-ΔL (Çöp S: % 40, σ= 200 kPa) …… 93
Şekil 4.43 : τ-ΔL (Çöp S: % 40, σ= 300 kPa) …… 94
Şekil 4.44 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 40) …….. 95
Şekil 4.45 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 40) ……..... 96
Şekil 4.46 : τ-ΔL (Çöp S: % 50, σ= 100 kPa) …… 97
Şekil 4.47 : τ-ΔL (Çöp S: % 50, σ= 200 kPa) …… 97
Şekil 4.48 : τ-ΔL (Çöp S: % 50, σ= 300 kPa) …… 98
Şekil 4.49 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 50) …….. 99
Şekil 4.50 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 50) ……..... 100
Şekil 4.51 : τ-ΔL (Çöp S: % 100, σ= 100 kPa) …….. 101
Şekil 4.52 : τ-ΔL (Çöp S: % 100, σ= 200 kPa) …….. 101
Şekil 4.53 : τ-ΔL (Çöp S: % 100, σ= 300 kPa) …….. 102
Şekil 4.54 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 100) …… 103
Şekil 4.55 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 100) …… 104
Şekil 4.56 : Kırılma Zarfı (t= 0) …… 105
Şekil 4.57 : Çöp Sızıntı Suyu Oranın ϕ Üzerine Etkisi (t= 0) …… 106
Şekil 4.58 : Çöp Sızıntı Suyu Oranın c Üzerine Etkisi (t= 0) ……. 107
Şekil 4.59 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5) ……. 108
Şekil 4.60 : Kür Süresinin ϕ Üzerine Etkisi (Temiz Zemin) …….. 108
Şekil 4.61 : Kür Süresinin c Üzerine Etkisi (Temiz Zemin)…… 109
Şekil 4.62 : Kür Süresinin ϕ Üzerine Etkisi …… 109
Şekil 4.63 : Kür Süresinin c Üzerine Etkisi …… 110
Şekil 4.64 : Kür Süresinin ϕ Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5) ……..... 111
Şekil 4.65 : Kür Süresinin c Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5)……... 111
Şekil 4.66 : Kür Oranı ve Kür Süresi İle $P_{şişme}$ Değerindeki Değişim …… 114
Şekil 4.67 : e-log P (t= 0) ……... 115
Şekil 4.68 : e-log P (t= 30 gün) …….. 115
Şekil 4.69 : Ön Konsolidasyon Basıncının Ödometre Eğrisinden Bulunması ... 116
Şekil 4.70 : Kür Oranı ve Kür Süresinin P_c Üzerine Etkisi …… 117
Şekil 4.71 : Konsolidasyo Basıncı İle Permeabilite Katsayısındaki Değişim … 119
Şekil 4.72 : Kür Oranı ve Kür Süresinin Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi……..... 120
Şekil 4.73 : Konsolidasyo Basıncı İle Konsolidasyon Katsayısındaki Değişim …… 122
Şekil 4.74 : Kür Oranı ve Kür Süresinin Konsolidasyon Katsayısı Üzerine Etkisi …… 123
Şekil 4.75 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı …….. 125
Şekil 4.76 : Eksenel Boy Değiştirme-Çevrim Sayısı ……..... 126
Şekil 4.77 : Temiz Zeminin Dinamik Kayma Gerilme Oranı …… 127
Şekil 4.78 : Temiz Zeminin Eksenel Boy Değiştirme Davranışı …… 128
Şekil 4.79 : Temiz Zeminin Dinamik Kayma Gerilme Oranı (N= 100) ……. 128
Şekil 4.80 : Temiz Zeminin Eksenel Boy Değiştirme Davranışı (N= 100) …… 129
Şekil 4.81 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı (Kür S: 0) ……. 129
Şekil 4.82 : ε Üzerine Kür Oranın Etkisi (Kür S: 0) ……..... 130
Şekil 4.83 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı (Kür S: 7 gün) …….. 130
Şekil 4.84 : ε Üzerine Kür Oranın Etkisi (Kür S: 7 gün) …… 131
Şekil 4.85 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı (Kür S: 90 gün) …… 131
Şekil 4.86 : ε Üzerine Kür Oranın Etkisi (Kür S: 90 gün) …….. 132
Şekil 4.87 : Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 5) ……. 133

Şekil 4.88 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 5) ……. 133
Şekil 4.89 **:** Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 5) ……... 134
Şekil 4.90 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 5) ……... 134
Şekil 4.91 **:** Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 20) ……... 135
Şekil 4.92 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 20) ……... 135
Şekil 4.93 **:** Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 20) ……. 136
Şekil 4.94 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 20) ……. 136
Şekil 4.95 **:** Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 50) ……... 137
Şekil 4.96 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 50) ……... 137
Şekil 4.97 **:** Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 50) ……. 138
Şekil 4.98 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 50) ……. 138
Şekil 4.99 **:** Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 100) ……. 139
Şekil 4.100 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 100) ……. 139
Şekil 4.101 **:** Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 100) ……... 140
Şekil 4.102 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 100) ……... 140
Şekil 4.103 **:** Dinamik Gerilme Oranı (N= 100) ……..... 141
Şekil 4.104 **:** ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100) ……..... 141
Şekil 4.105 **:** En Büyük Elastisite Modülü Ölçüm Sonucu ……..... 142
Şekil 4.106 **:** Tekrarlı Yükleme İle Elde Edilen Histerisis İlmiği ……..... 143
Şekil 4.107 **:** Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Temiz Zemin). 144
Şekil 4.108 **:** Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi ……. 145
Şekil 4.109 **:** Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Kür S: 0)…… 146
Şekil 4.110 **:** Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Kür S: 7 gün)……. 147
Şekil 4.111 **:** Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Kür S: 90 gün) ….. 148
Şekil 4.112 **:** Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi ……. 149
Şekil 4.113 **:** Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5)…… 150
Şekil 4.114 **:** Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 20)…. 151
Şekil 4.115 **:** Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 50)…. 152
Şekil 4.116 **:** Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 100)… 153
Şekil A.1 **:** Deney Numunesinin Likit Limit Sonuçları ……. 163
Şekil A.2 **:** Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 5)…….. 164
Şekil A.3 **:** Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 20)…… 165
Şekil A.4 **:** Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 50)…… 166
Şekil A.5 **:** Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 100)…….. 167
Şekil B.1 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Temiz Zemin, t: 0) …….. 168
Şekil B.2 **:** Kırılma Zarfı (Temiz Zemin, t: 0) …….. 168
Şekil B.3 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Temiz Zemin, t: 90 gün) …. 169
Şekil B.4 **:** Kırılma Zarfı (Temiz Zemin, t: 90 gün) …….. 169
Şekil B.5 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 5, t: 0) …….. 170
Şekil B.6 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 0) …….. 170
Şekil B.7 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 5, t: 1 gün) …….. 171
Şekil B.8 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 1 gün) ……... 171
Şekil B.9 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 5, t: 7 gün) …….. 172
Şekil B.10 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 7 gün) ……... 172
Şekil B.11 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 5, t: 30 gün) …..... 173
Şekil B.12 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 30 gün) ……. 173
Şekil B.13 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 5, t: 90 gün) …..... 174
Şekil B.14 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 90 gün) ……. 174
Şekil B.15 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t: 0) ……... 175
Şekil B.16 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 0) …… 175

Şekil B.17 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t: 1 gün) …..... 176
Şekil B.18 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 1 gün) ……. 176
Şekil B.19 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t. 7 gün) …..... 177
Şekil B.20 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 7 gün) ……. 177
Şekil B.21 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t: 30 gün) ….. 178
Şekil B.22 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 30 gün) ……... 178
Şekil B.23 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t: 90 gün) ….. 179
Şekil B.24 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 90 gün) …… 179
Şekil B.25 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 20, t: 0) …… 180
Şekil B.26 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 0) …… 180
Şekil B.27 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 20, t: 1 gün) …..... 181
Şekil B.28 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 1 gün) ……. 181
Şekil B.29 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 20, t: 7 gün) …..... 182
Şekil B.30 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 7 gün) ……. 182
Şekil B.31 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 20, t: 30 gün) ….. 183
Şekil B.32 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 30 gün) ……... 183
Şekil B.33 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 20, t: 90 gün) ….. 184
Şekil B.34 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 90 gün) ……... 184
Şekil B.35 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 30, t: 0) …… 185
Şekil B.36 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 0) …… 185
Şekil B.37 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 30, t: 1 gün) ……. 186
Şekil B.38 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 1 gün) ……. 186
Şekil B.39 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 30, t: 7 gün) …..... 187
Şekil B.40 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 7 gün) ……. 187
Şekil B.41 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 30, t: 30 gün) ….. 188
Şekil B.42 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 30 gün) ……... 188
Şekil B.43 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 30, t: 90 gün) ….. 189
Şekil B.44 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 90 gün) ……... 189
Şekil B.45 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 40, t: 0) …… 190
Şekil B.46 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t. 0) …… 190
Şekil B.47 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 40, t: 1 gün) …..... 191
Şekil B.48 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 1 gün) ……. 191
Şekil B.49 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 40, t: 7 gün) …..... 192
Şekil B.50 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 7 gün) ……. 192
Şekil B.51 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 40, t: 30 gün) ….. 193
Şekil B.52 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 30 gün) ……... 193
Şekil B.53 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 40, t: 90 gün) ….. 194
Şekil B.54 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 90 gün) ……... 194
Şekil B.55 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 0) …… 195
Şekil B.56 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 0) …… 195
Şekil B.57 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 1 gün) …..... 196
Şekil B.58 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 1 gün) ……. 196
Şekil B.59 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 7 gün) …..... 197
Şekil B.60 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 7 gün) ……. 197
Şekil B.61 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 30 gün) ….. 198
Şekil B.62 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 30 gün) ……... 198
Şekil B.63 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 90 gün) ….. 199
Şekil B.64 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 90 gün) ……... 199
Şekil B.65 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 0) …….. 200
Şekil B.66 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 0) …….. 200

Şekil B.67 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 1 gün) ….. 201
Şekil B.68 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 1 gün) ……... 201
Şekil B.69 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 7 gün) ….. 202
Şekil B.70 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 7 gün) ……... 202
Şekil B.71 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 30 gün) 203
Şekil B.72 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t:30 gün) …….. 203
Şekil B.73 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 90 gün) 204
Şekil B.74 **:** Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 90 gün) ……. 204
Şekil B.75 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 0) ……. 205
Şekil B.76 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 0) ……. 205
Şekil B.77 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 0) ……. 206
Şekil B.78 **:** Kırılma Zarfı (t: 0) ……... 206
Şekil B.79 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 1 gün) …….. 207
Şekil B.80 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 1 gün) …….. 207
Şekil B.81 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 1 gün) …….. 208
Şekil B.82 **:** Kırılma Zarfı (t: 1 gün) …… 208
Şekil B.83 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 7 gün) …….. 209
Şekil B.84 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 7 gün) …….. 209
Şekil B.85 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 7 gün) …….. 210
Şekil B.86 **:** Kırılma Zarfı (t: 7 gün) …… 210
Şekil B.87 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 30 gün) …… 211
Şekil B.88 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 30 gün) …… 211
Şekil B.89 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 30 gün) …… 212
Şekil B.90 **:** Kırılma Zarfı (t: 30 gün) …….. 212
Şekil B.91 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 90 gün) …… 213
Şekil B.92 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 90 gün) …… 213
Şekil B.93 **:** Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 90 gün) …… 214
Şekil B.94 **:** Kırılma Zarfı (t: 90 gün) …….. 214
Şekil C.1 **:** e-log P (Temiz Zemin, t: 0) …… 215
Şekil C.2 **:** e-log P (Temiz Zemin, t: 30 gün) …… 215
Şekil C.3 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Temiz Zemin, t: 0) ……. 216
Şekil C.4 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Temiz Zemin, t: 30 gün) ……..... 217
Şekil C.5 **:** e-log P (Çöp S: % 5, t: 0) …… 218
Şekil C.6 **:** e-log P (Çöp S: % 5, t: 30 gün) ……..... 218
Şekil C.7 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 20, t: 0) …….. 219
Şekil C.8 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 20, t: 30 gün) ……..... 220
Şekil C.9 **:** e-log P (Çöp S: % 20, t: 0) …….. 221
Şekil C.10 **:** e-log P (Çöp S: % 20, t: 30 gün) ……. 221
Şekil C.11 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 50, t: 0) …….. 222
Şekil C.12 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 50, t: 30 gün) ……..... 223
Şekil C.13 **:** e-log P (Çöp S: % 50, t: 0) …….. 224
Şekil C.14 **:** e-log P (Çöp S: % 50, t: 30 gün) ……. 224
Şekil C.15 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 50, t: 0) …….. 225
Şekil C.16 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 50, t: 30 gün) ……..... 226
Şekil C.17 **:** e-log P (Çöp S: % 100, t: 0) …… 227
Şekil C.18 **:** e-log P (Çöp S: % 100, t: 30 gün) ……..... 227
Şekil C.19 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 100, t 0) ……. 228
Şekil C.20 **:** Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 100, t: 30 gün) ……..... 229
Şekil D.1 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Temiz Zemin, t: 7 gün)……. 231

Şekil D.2 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Temiz Zemin, t: 90gün) ….. 232
Şekil D.3 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 5, t: 0) ……... 233
Şekil D.4 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 5, t: 7 gün) 234
Şekil D.5 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 5, t: 90 gün) …….. 235
Şekil D.6 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 20, t: 0) 236
Şekil D.7 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 20, t: 7 gün) …….. 237
Şekil D.8 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 20, t: 90 gün) …… 238
Şekil D.9 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 50, t: 0) 239
Şekil D.10 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 50, t: 7 gün) …….. 240
Şekil D.11 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 50, t: 90 gün) …… 241
Şekil D.12 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 100, t: 0) 242
Şekil D.13 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 100, t: 7 gün) …… 243
Şekil D.14 **:** Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu (Çöp S: % 100, t: 90 gün) ….. 244

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

YÜKSEK PLASTİSİTELİ ZEMİNLERİN DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE ÇÖP SUYUNUN ETKİSİ

ÖZET

Atıkların çevreye zarar vermeden uzaklaştırılması ve değerlendirilmesi amacı ile "Geri Kazanma, Değerlendirme, Yakma, Kompostlaştırma ve Düzenli Katı Atık Depolama" yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. 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 kil şiltelerin 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 MH (yüksek plastisiteli silt) sınıfı zemine optimum su muhtevasının % 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100' ü oranında çöp sızıntı suyu katılarak Standart Proktor ile numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı küre bırakılmadan hemen deneye alınırken diğerleri 1, 7, 30 ve 90 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 ve 300 gün sure 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 artıkça 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. 300 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 düşük olduğu görülmüştür. Fakat 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. 30 günlük kür sonunda 7 günlük küre göre plastik limit değerlerinde bir miktar düşme olmuştur. Fakat bu kür süresinden sonra çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin plastik limitleri artarak 90 günlük kür süresi sonunda en büyük değerlerine ulaşmıştır. 300 günde ise plastik limit düşerek likit limit de olduğu gibi başlangıç değerlerine geri dönmüştür. 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 300 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 konsolidasyona bırakılmadan kesilmişlerdir. Bu deneyler için % 5, 10, 20, 30, 40, 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 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin kayma mukavemetleri temiz zemin numunesinden daha düşüktür. 7 güne kadar küre bırakılmış numunelerin kayma mukavemetleri 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde artmıştır. 30 ve 90 gün küre bırakılmış numunelerin kayma mukavemetleri ise üç gerilme seviyesinde de azalmıştır. Çöp sızıntı suyu içeren numunelerde en büyük kayma gerilmesine temiz zemine göre daha düşük deformasyon seviyelerinde ulaşılmıştır. Ayrıca % 20 çöp sızıntı suyu oranından daha düşük çöp sızıntı suyu içeriğine sahip numunelerin kayma mukavemetlerinin çöp sızıntı suyu oranındaki artışla arttığı görülmüştür. Bu orandan daha büyük çöp sızıntı suyu oranlarında ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla kayma mukavemetleri azalmıştır. Fakat % 100 çöp sızıntı suyu oranında % 50 çöp sızıntı suyuna göre 100, 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde bir miktar artış gözlenmiştir. % 20' den daha düşük çöp sızıntı suyu içeren numunelerin en büyük kayma gerilmesine ulaştıkları yatay deformasyon seviyeleri kür süresindeki artışla artmıştır. Bu orandan daha yüksek çöp sızıntı suyu içeriklerine sahip numunelerde en büyük kayma gerilmesine ulaşılan yatay deformasyon seviyeleri kür süresindeki artışla azalmıştır.

Kesme kutusu deney sonuçları kullanılarak zeminin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) üzerine çöp sızıntı suyunun etkisi incelenmiştir. % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla zeminin kohezyonu (c) artmıştır. Zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) ise azalmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla c azalırken, ϕ artmıştır. Kür süresindeki artışla c ve ϕ' deki değişim incelendiğinde ϕ' nin kür süresindeki artışla azaldığı, c' nin ise arttığı 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 kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Permeabilite küre bırakılmamış % 5 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinde temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise permeabilite temiz zemine göre azalmıştır. Küre bırakılmamış % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin permeabiliteleri % 20 çöp sızıntı suyu içeren numuneye göre artmıştır. Fakat bu artışa rağmen permeabilite bu çöp sızıntı suyu oranlarında temiz zeminden daha düşüktür. 30 günlük kür sonunda ise % 5, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin permeabiliteleri temiz zeminden daha yüksektir. % 20 çöp sızıntı suyu oranına sahip numunenin permeabilitesi ise temiz zeminden daha düşüktür. Zeminin konsolidasyon katsayısı permeabiliteye benzer davranış göstermiştir. Yine % 5, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinin konsolidasyon katsayıları temiz zeminden daha yüksektir. % 20 çöp sızıntı suyu içeren numenin konsolidasyon katsayısı temiz zeminden daha düşüktür. Permeabilitede olduğu gibi kür süresindeki artışla konsolidasyon katsayısı artmıştır.

Bu çalışma kapsamında son olarak zeminin dinamik elastisite modülü ve gerilme şekil değiştirme davranışı üzerine kür oranı ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla % 5, 20 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında Standart Proktor ile hazırlanmış numuneler küre bırakılmadan, 7 ve 90 gün süre ile küre bırakılarak dinamik üç eksenli deney sisteminde azalım deneylerine tabi tutulmuştur. Dinamik deney uygulamalarında numuneler doygun hale getirilmemiş ve konsolidasyona bırakılmamıştır. 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. Yapılan bu dinamik deneyler sonucunda zeminin eksenel boy değişiminin çöp sızıntı suyu oranındaki artışla arttığı görülmüştür. Buna ek olarak çöp sızıntı suyu içeren numunelerin eksenel boy değişimlerinin kür süresindeki artışla azaldığı kaydedilmiştir.

Elastisite modülü üzerinde kür oranın ve kür süresinin etkisinin belirlenmesi için en büyük elestisite 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. Elastisite modülü üzerinde çöp sızıntı suyu oranın yanı sıra kür süresinin etkisini belirlemek amacı ile küre bırakılmamış numunelere ait değerler 7 ve 90 gün küre bırakılmış numunelere ait değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda kür süresindeki artışla çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin en büyük elastisite modülü değerlerinin bir miktar arttığı görülmüştür. Elde edilen bu veriler doğrultusunda başlangıç en büyük elastisite modülü üzerinde çöp sızıntı suyu oranın 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 BEHAVIOUR OF HIGH PLASTICITY SOILS

SUMMARY

The methods of "Recycling, evaluation, burning, composting and regular solid waste land-fill" are widely used to utilise and remove the waste 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 clay mattresses 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 %, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and 100 % of optimum moisture content was added to MH (high plasticity silt) class soil and samples were prepared with Standard Proctor compaction. While some of the prepared samples were immediately tested without leaving for curing, the others were released into curing for 1, 7, 30 and 90 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 and 300 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 300-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 lower than that of clear soil. But 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. At the end of the 30 days-curing, plastic limit values decreased with respect to the 7 days-curing. But after these curing times plastic limits of wastewater added samples increased and reached their maximum values at the end of 90 days-curing time. At the end of 300 days, plastic limit decreased and returned to its initial value like the liquid limit. 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 300 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 %, 10%, 20%, 30%, 40%, 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 wastewater contained samples at 100 kPa normal stress level were lower than that of clear soil sample. Shear strengths of the samples, which were in the curing for 7 days, increased at 200 and 300 kPa normal stress levels. Shear strengths of the samples, which were in the curing for 30 and 90 days decreased at all of the three stress levels. Maximum shear stress of waste water contained samples was reached at lower deformation levels when compared to clear soil. Furthermore, it was seen that shear strengths increased for the samples with wastewater ratio lower than 20 %. At wastewater ratios, which were higher than this level, shear strengths decreased with the increase of waste water ratios. But at 100 % wastewater ratio,

increase of strength at 100, 200 and 300 kPa normal stress levels was observed when compared to samples with 50 % wastewater. Horizontal deformation levels of the samples, which contain less than 20 % wastewater, which they reached the maximum shear stress increased with the increase of curing time. In the samples, which contain more wastewater than this ratio, horizontal deformation levels, at which maximum shear stress was reached, decreased with the increase of curing time.

The effect of wastewater on the cohesion (c) and angle of internal friction (ϕ) of soil were examined by the execution shear box tests. Until the 30 % wastewater ratio, cohesion of soil increased with the wastewater ratio. Angle of internal friction of soil decreased. After this wastewater ratio, c decreased, ϕ increased with the increase of wastewater ratio. When the changes of c and ϕ with the increase of curing time, it was seen that ϕ decreased and c increased 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 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 clear soil. The permeability of the samples which weren't released into curing and contain 50 % and 100 % wastewater increased with respect to the samples which contain 20 % wastewater. But despite to this increase, the permeability at these wastewater ratios is lower than that of clear soil. At the end of 30 days-curing, permeability of the samples, which contain 5%, 50% and 100% wastewater are higher than that of clear soil. The permeability of the sample, which contains 20 % wastewater, is lower than that of clear soil. Consolidation coefficient changes of soil were similar to that of permeability. Consolidation coefficients of the samples which contain 5%, 50% and 100% wastewater are higher than that of clear soil. Consolidation coefficient of the sample, which contains 20 % wastewater, is lower than that of clear soil. Consolidation coefficient increased similar to permeability with the increase of curing time.

In this study finally the effects of curing ratio and 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 Standard Proctor compaction weren't released into curing and some of these samples were released into curing for 7 and 90 days and subjected to degradation tests in the three axial testing system. Samples are not saturatiod and are not 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. As a result of these dynamic tests, it was seen that axial strain values of soils increased with the increase of wastewater ratio. In addition to this, axial strain of samples, which contain wastewater, decrease with the increase of curing time.

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. For the purpose of defining the effects of wastewater ratio and curing time on the elasticity module; the values of samples which weren't released into curing were compared with the values of the samples which had been in curing for 7 and 90 days. As a result of this comparison, it was seen that maximum elasticity module values of samples, which contain wastewater increased with the increase of curing time. 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

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 düzenli katı atık depo tesisinde sızdırmazlık amacı ile kullanılan kil şiltenin farklı oranlarda sızıntı suyuna maruz kalması ve sızıntı suyu ile etkileşim süresinin zeminin mühendislik özellikleri üzerine 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 Kemerburgaz 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 oranın 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 arttırır.

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

$$SiOH \xrightarrow{(H_2O)} Si\ O + OH$$

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 18 ^{0}A dan fazla olamaz. Şişmeyen kil minerallerinden oluşan zeminlerde ise adsorbe katyonun çeşidi süspansiyon davranışında ve oluşacak yapının belirlenmesinde büyük öneme sahiptir.

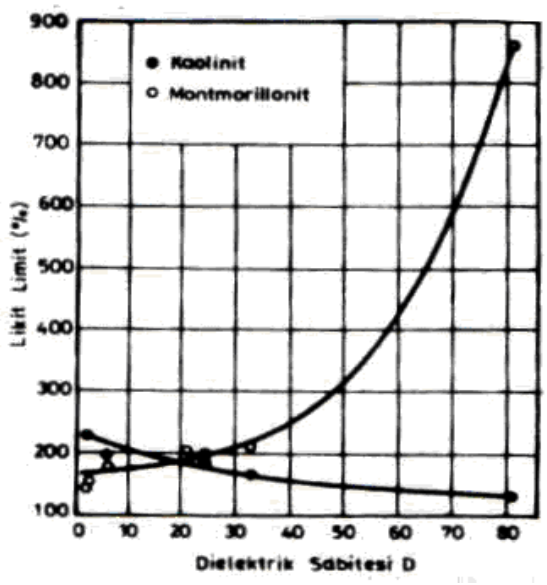
Tek değerlikli katyonlar deflikasyon oluştururken iki veya üç değerlikli katyonlar killerde flokülasyon oluştururlar.

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.

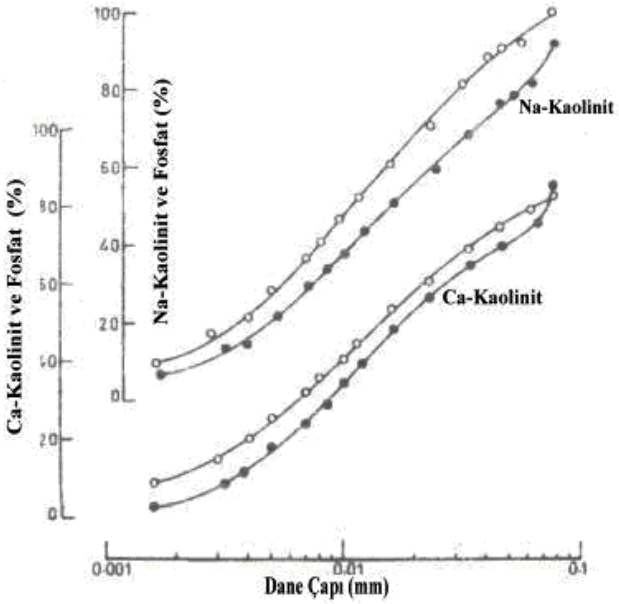
Boşluk sıvısının dielektrik sabitinin likit limit üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Sridharan ve Rao (1975) konik penetrometre ile farklı organik çözelti içindeki kaolinit ve montmorillonit türü killerin likit limit değerlerini belirlemişlerdir. Şekil 2.1' de bu deneye 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, montmorillinit 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 Adsorbsiyonun Kaolinit İçindeki Dane Çapı Dağılımına Etkisi (Rao, 1982)

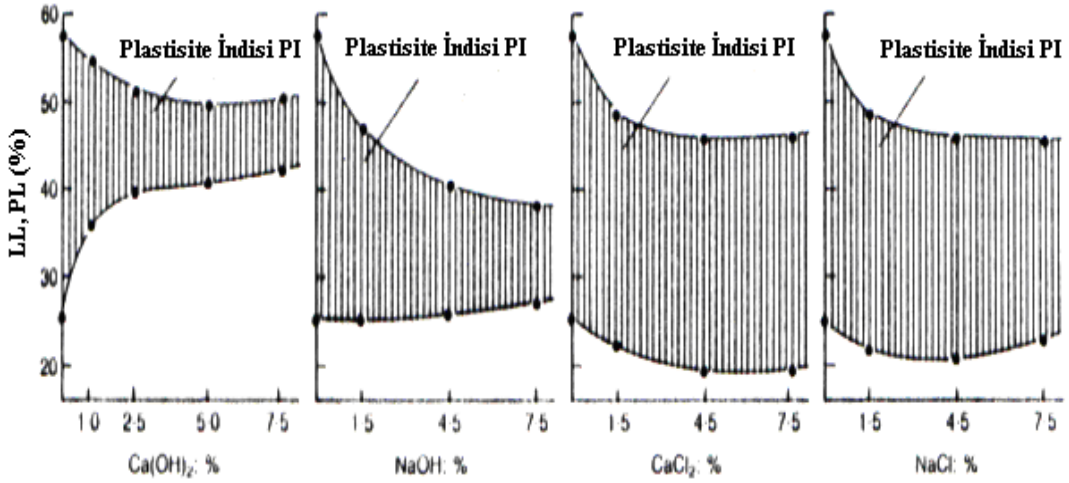
Tablo 2.1' de Fosforik asit karıştırılmış Montmorillinit ve kaolinit killerine ait fizikokimyasal özellikler gösterilmiştir.

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 $Ca(OH)_2$, NaOH, $CaCI_2$ ve NaCI 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

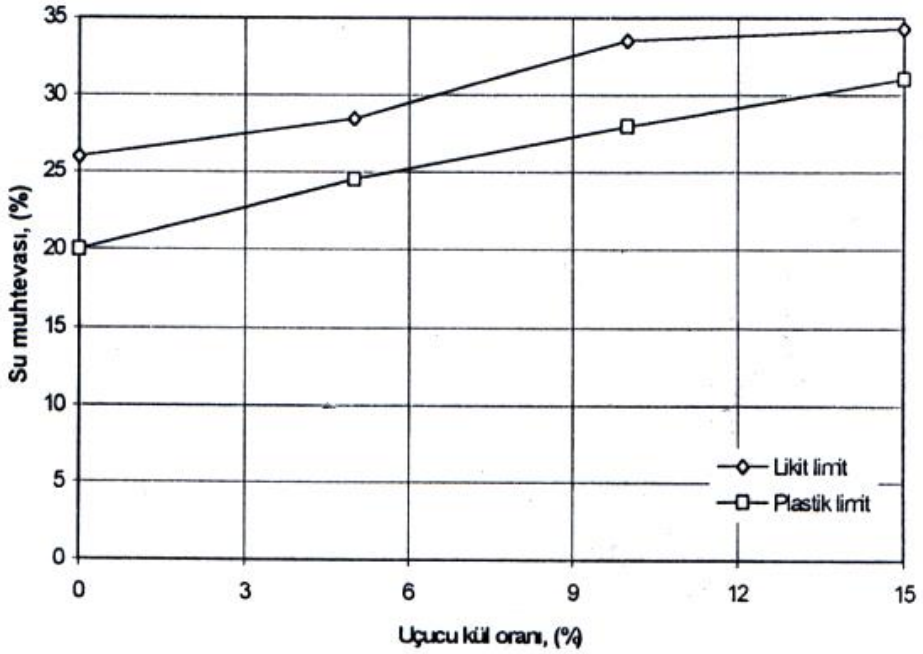
oranlarda karıştırılması ile Atterberg limitlerindeki değişimler verilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre likit limit değerindeki önemli azalmalardan dolayı plastisite indisi azalmaktadır.



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 zemininde 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.

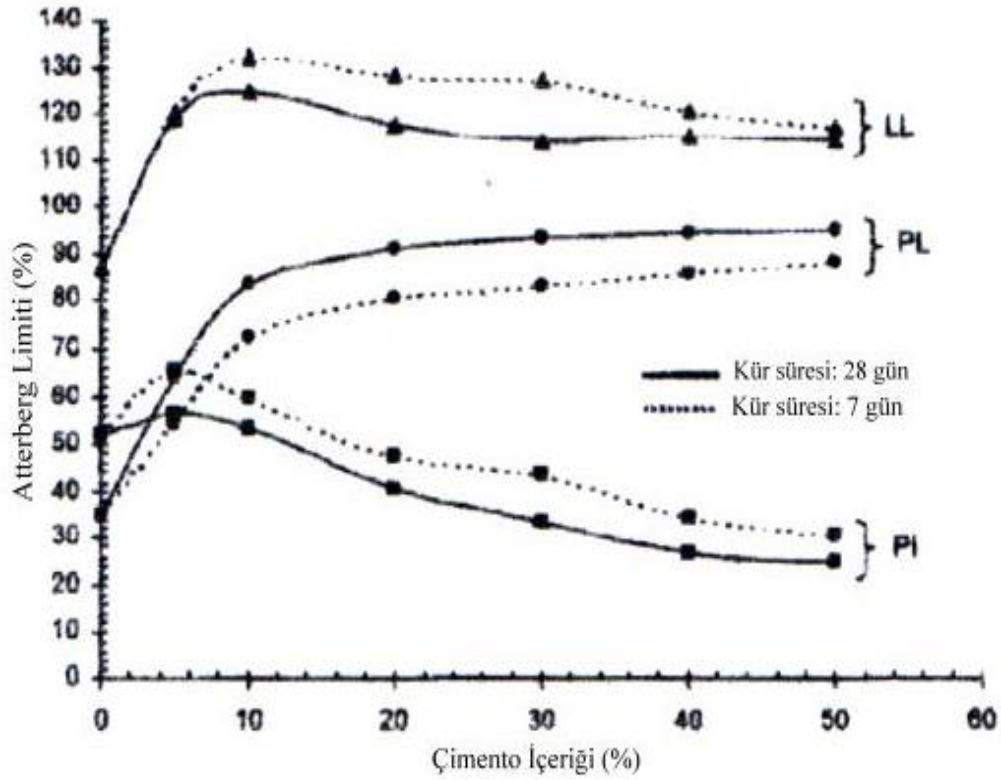


Şekil 2.4 : Uçucu Külün Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi (Erşan, 1996)

Chew ve diğ. (2004) kireç katkısının deniz killerinin mühendislik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlarıdır. Deneylerde kullanılan zeminin likit limiti % 87, plastik limiti % 35 ve plastisite indisi % 52 olarak belirlenmiştir. 105 C^0 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 penatrasyon 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 doygun killer 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)

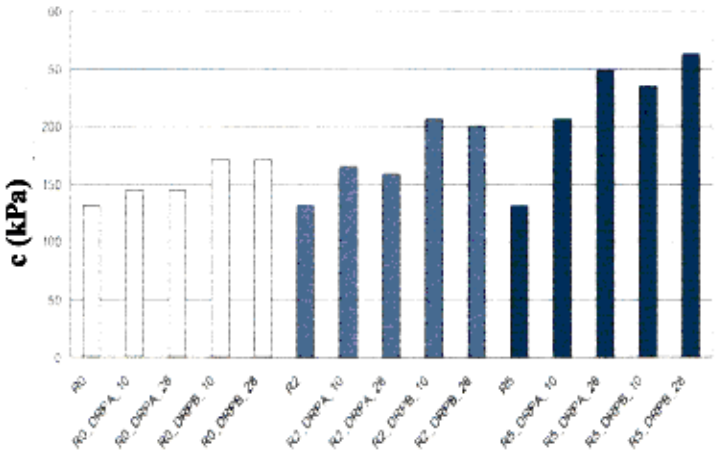
Zemin Cinsi	c (kg/cm^2)	ϕ (^{o})
Na Kaolinit		
Doğal halde	0,02	30,5
İşlenmiş halde	0,27	38
Ca Kaolinit		
Doğal halde	0	22
İşlenmiş halde	0	41
Na Montmorillonit		
Doğal halde	0,07	18,5
İşlenmiş halde	0,07	39,5
Ca Montmorillonit		
Doğal halde	0,03	18,5
İşlenmiş halde	0,16	44

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.

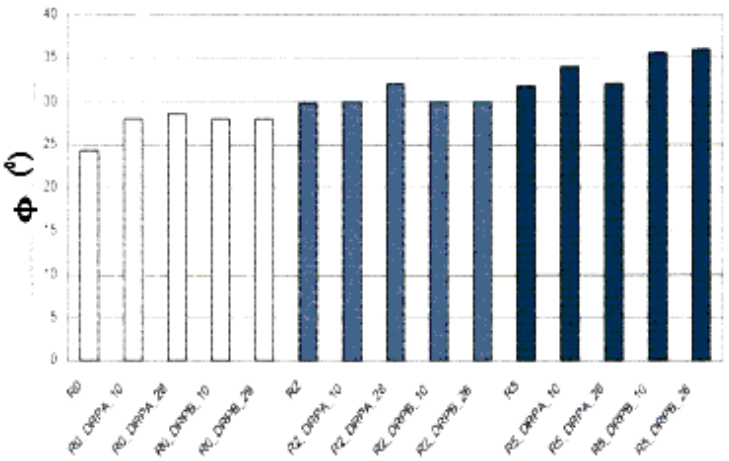
Tablo 2.3 : Kireç ve Sülfürik Asittin Zemininin Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi (Puppala ve Hanchanloet, 1999)

Zemin Türü	W_L (%)	PI (%)	γ_{kmaks} (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)

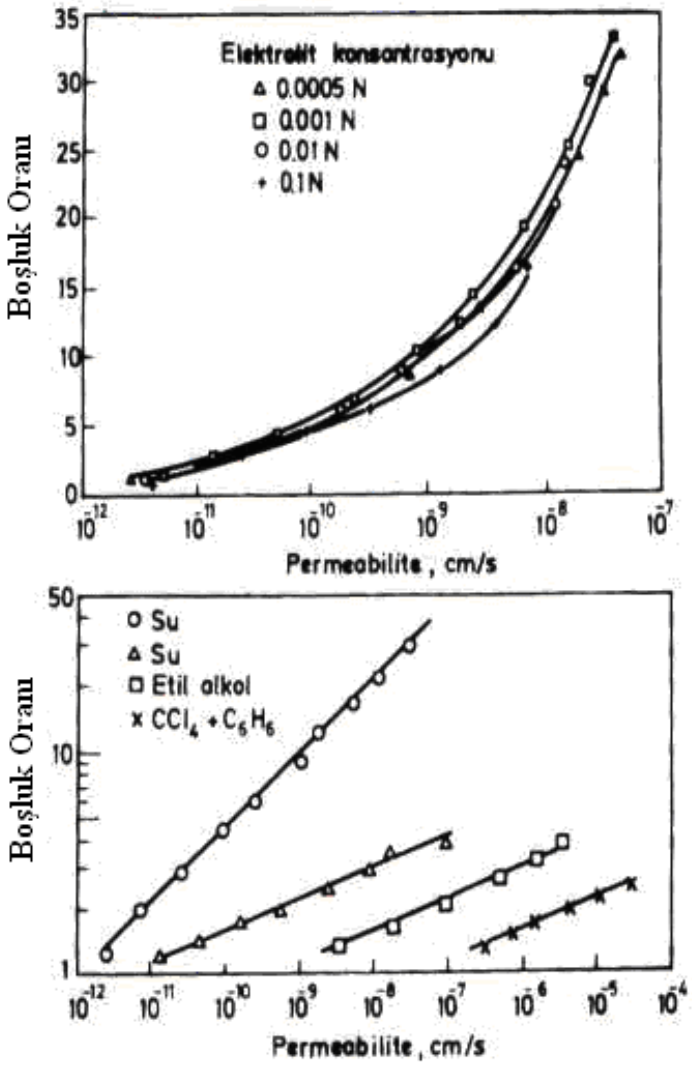


Şekil 2.7 : Kireç ve Sülfürik Asittin ϕ Üzerine Etkisi (UUDeneyi)
(Puppala ve Hanchanloet, 1999)

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.

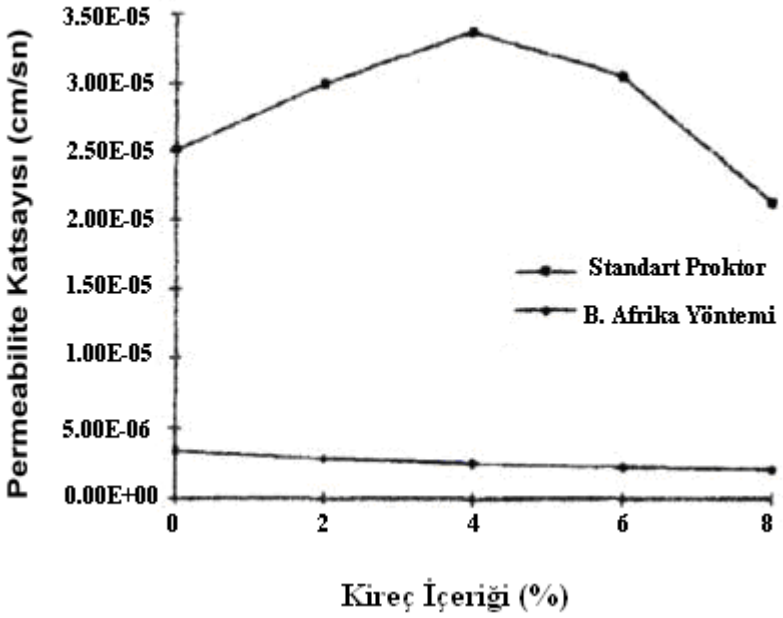


Şekil 2.8 : Boşluk Sıvısının Boşluk Oranı- Permeabilite Üzerine Etkisi (Sridharan ve Jayadeva, 1982)

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.

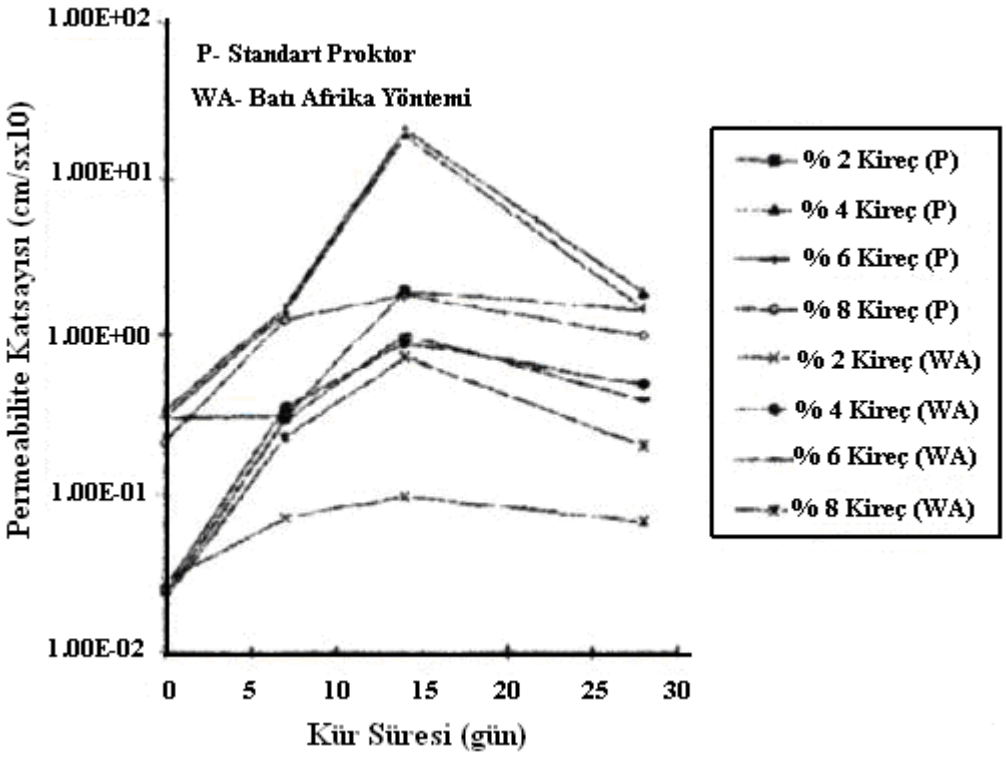
Hazırlanan numuneler 0, 7, 14 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Numunelerin permeabilite değişimlerini belirlemek için düşen seviyeli permeabilite yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 2.9' da kireç içeriği ile permeabilitenin değişimi küre bırakılmamış numuneler için verilmiştir. Standart Proktor ile hazırlanmış numunelerde % 4 kireç içeriğinde permeabilite katsayısı ($3.38x10^{-5}$ cm/s) maksimum değerine ulaşmıştır. Bu değerin üstündeki kireç içeriklerinde ise permeabilite düşmüştür. Batı Afrika yönteminde ise kireç katkısı olmayan numunenin permeabilite katsayısı ($3.38x10^{-6}$ 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 küre sahip 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)

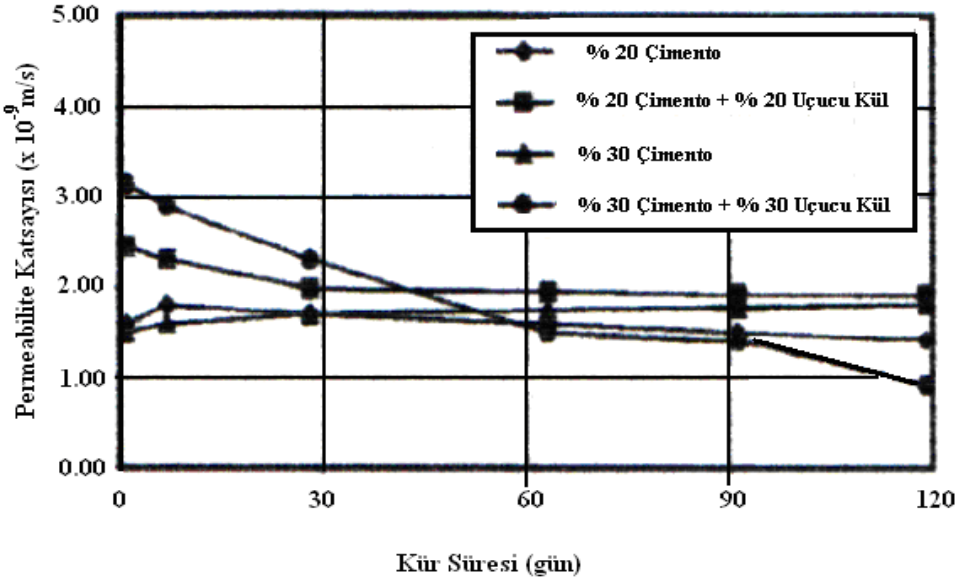
Aytekin (2002) şişen killi zeminin değirmen artığı ile belli oranlarda (% 5, % 15 ve % 25) karıştırılması ile zeminin geçirimliliğindeki değişimi incelemiştir. Değirmen artığı, klinker üretiminde kullanılan kalker, tras ve kireçtaşının çimento fabrikalarında işlenmesi sonucu oluşan atık maddeler olarak 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 oranın 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 arttırır ve puzolanik reaksiyonun artması ile boşlukları doldurur. Reaksiyonun tamamlanması ile permeabilite düşer.

Katkısız zemine ait permeabilite değeri $1.97x10^{-10}$ m/s' dir. Bu değer deney sonuçları ile karşılaştırıldığında evsel atık uçucu külün drenaj özelliklerini arttırıcı role sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca evsel uçucu kül çimentoya oranla daha fazla permeabilite değerini düşürmektedir.



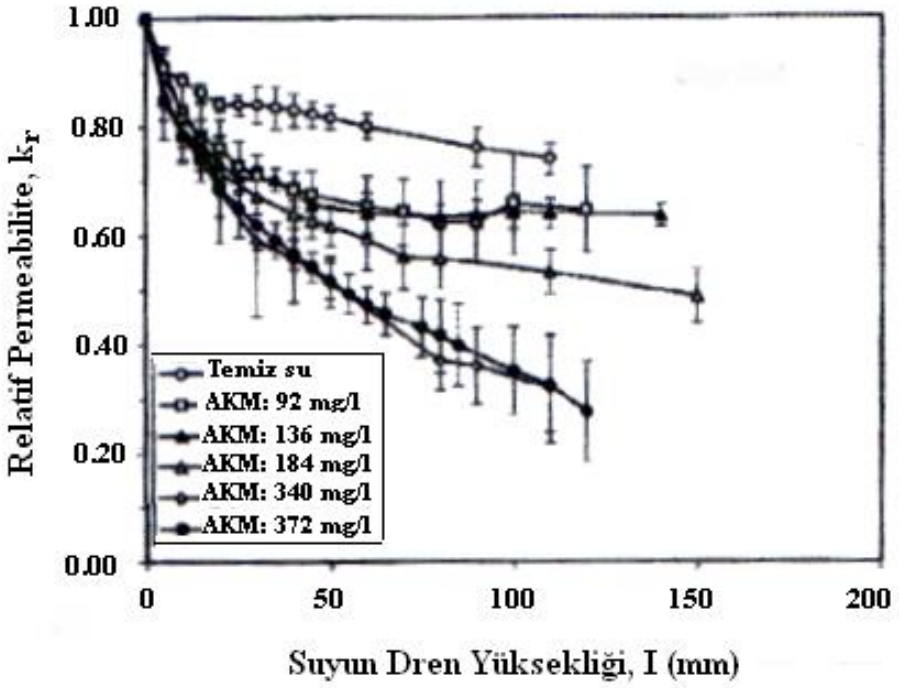
Şekil 2.11 : Permeabilitenin Kür Süresi İle Değişimi (Show ve diğ., 2003)

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.

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

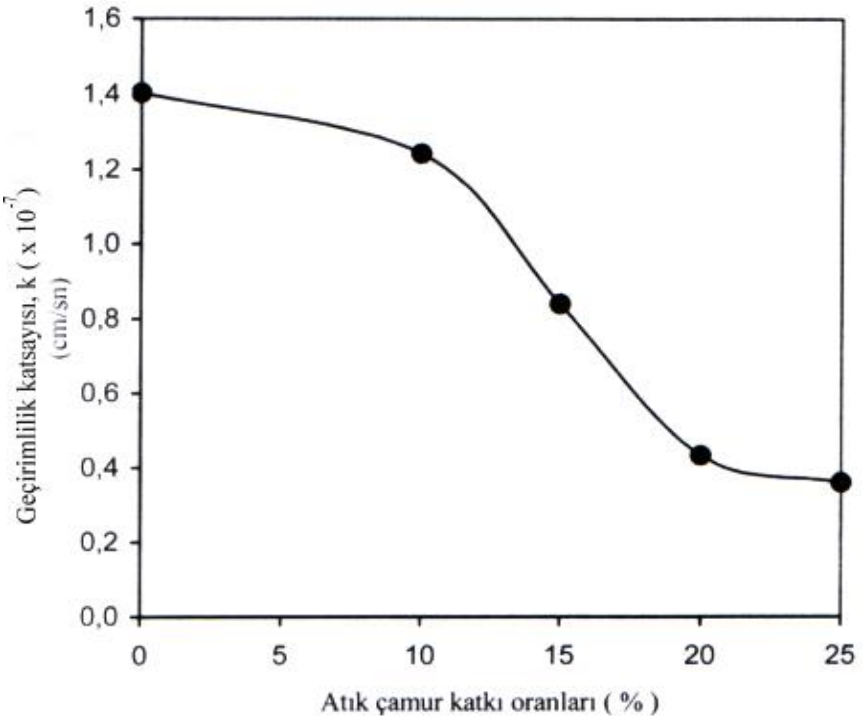
k_{s0}: Numunenin doygun haldeki permeabilite katsayısı

k_s: Suyun ölçülen bir dren yüksekliğine karşı gelen permeabilite katsayısı



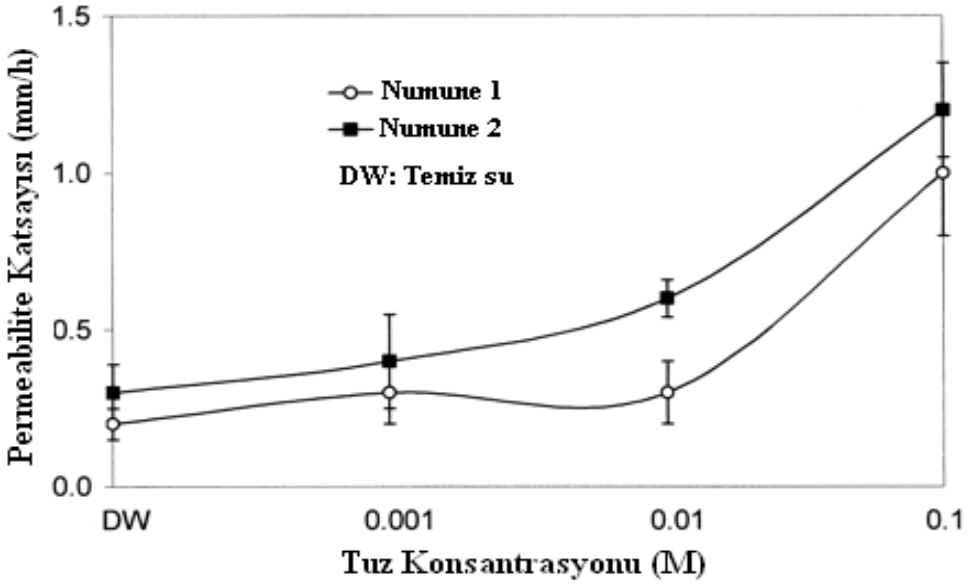
Şekil 2.12 : Çöp Sızıntı Suyu İçindeki Askıda Madde Miktarının Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi (Viviani ve Iovino, 2004)

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 doygun hale geldikten sonra deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen geçirimlilik 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 (Angın ve Üçüncü, 2004)

Aydın ve diğ. (2004) tuz (NaCI) 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

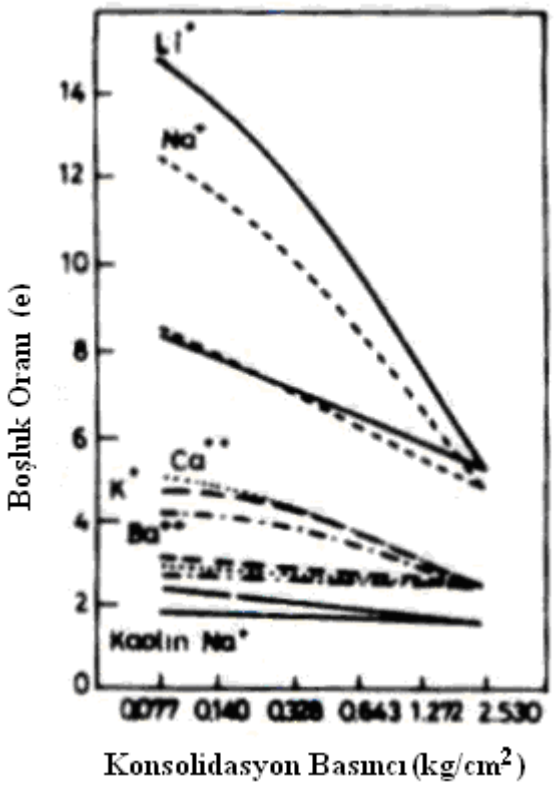
Zeminin hacim değiştirme davranışı oturma ile direkt ilişkili olduğu için oldukça önemlidir. Hacim değiştirme zeminin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde de değişime neden olur. Saf killerin sıkışabilirliği niceliksel olarak çift tabakadaki iyon değişimlerinden kaynaklanan itim kuvvetleri ile 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 değişimin, 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;

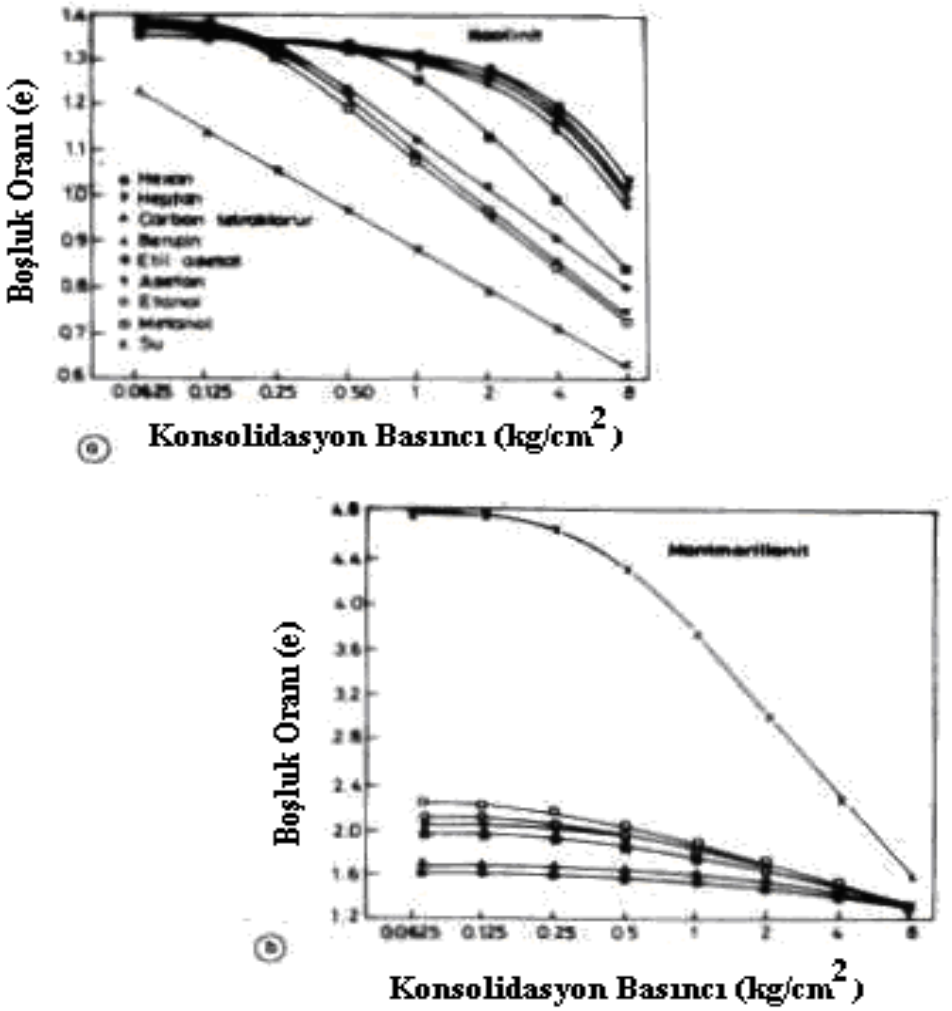
$Li^{+} > Na^{+} > K^{+} > Ca^{++} > Ba^{++}$

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 killer 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.



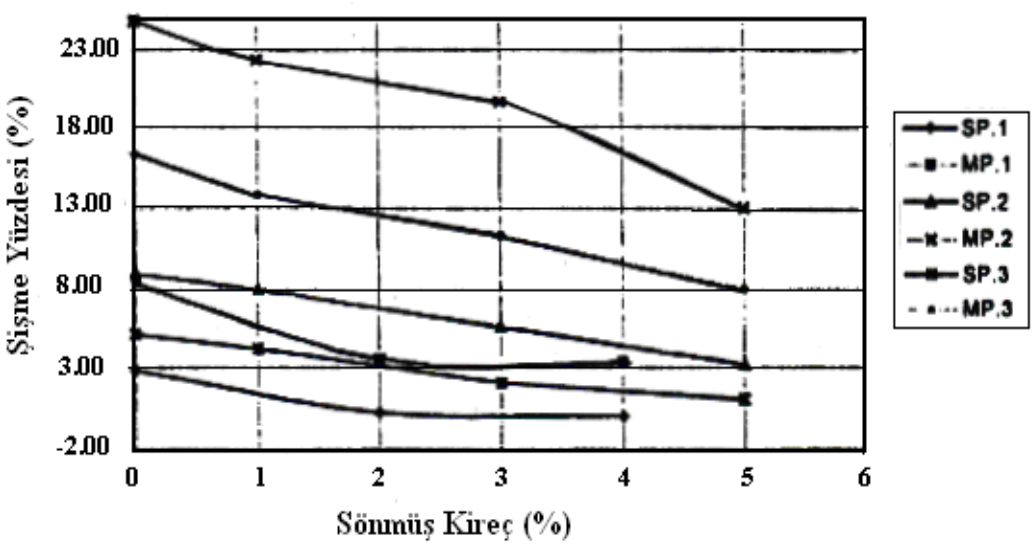
Şekil 2.16 : Farklı Boşluk Sıvılarında Tek Yönlü Konsolidasyon Eğrileri (Sridharan ve Rao, 1973)

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 Türköz (2000) tarafından sönmüş 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 sıkılığında ve farklı sönmüş 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 sıkılığında numuneler hazırlanıp şişme yüzdeleri ödometre aleti ile belirlenmiştir.

Şişme yüzdesi ile kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi olarak sönmüş kireç katkısı arasındaki ilişki; altı ayrı seri için Şekil 2.17' de sunulmaktadır. Bu şekilden de görülebileceği gibi, sönmüş kireç katkısının artması ile serbest şişme yüzdesi azalmaktadır. Özellikle katkısız halde yüksek şişme değerleri veren Modifiye Proktor sıkılığındaki 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.



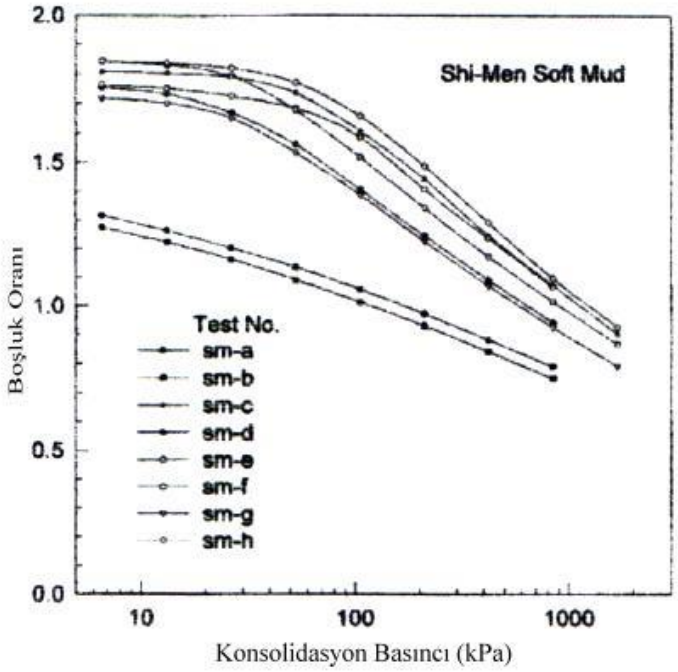
Şekil 2.17 : Şişme Yüzdesi-Sönmüş Kireç Katkısı İlişkisi
(Tosun ve Türköz, 2000)

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)

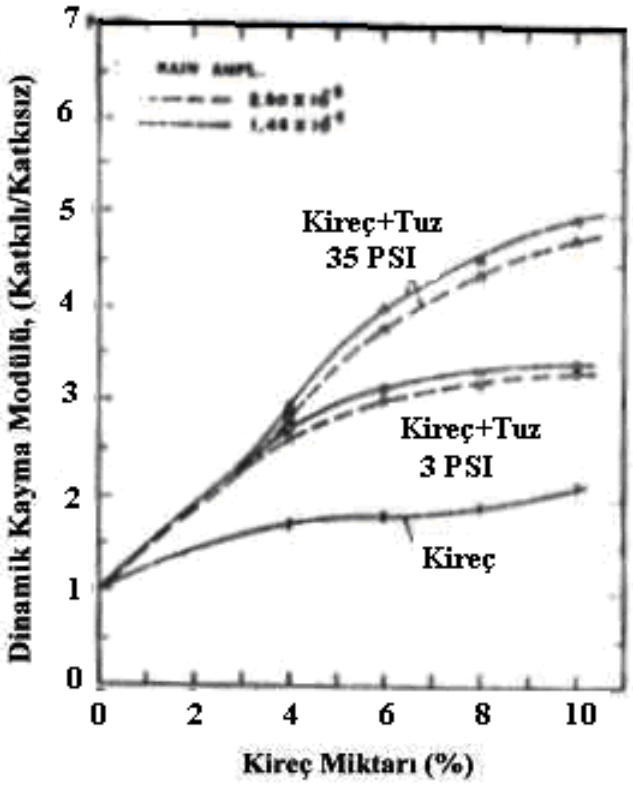
Tablo 2.4 : Önkonsolidasyon Basıncının Kür Süresi İle Değişimi (Tao ve diğ, 2001)

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

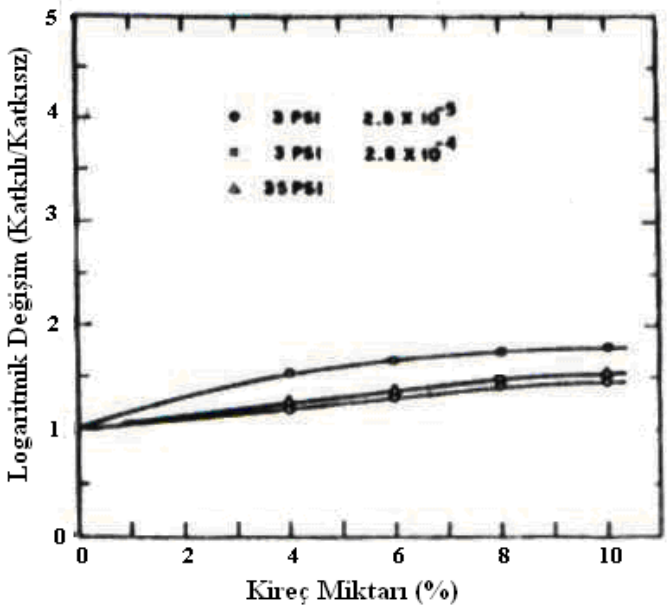
2.4. Zeminin Dinamik Davranışındaki Değişimler

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/m^3 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.

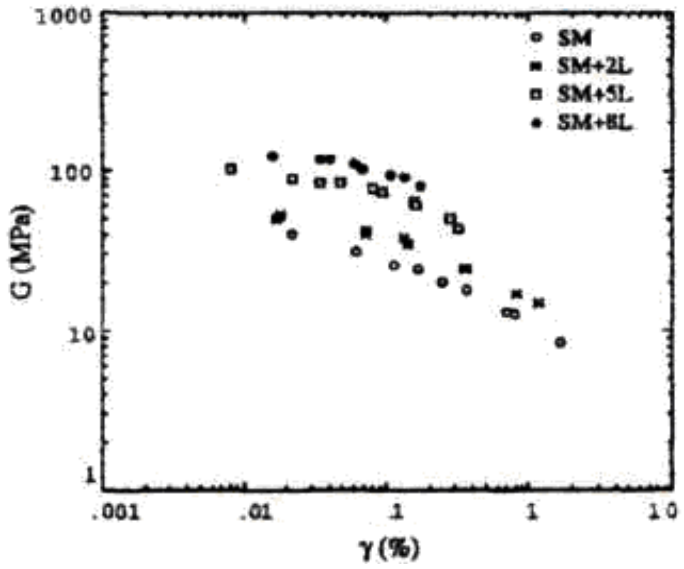


Şekil 2.19 : Kireç İçeriğinin G Üzerine Etkisi (Chae ve Au, 1980)



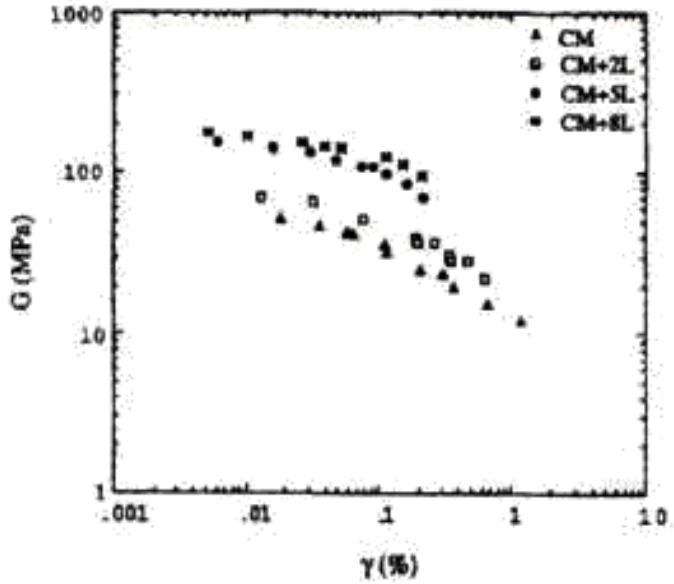
Şekil 2.20 : Kireç İçeriğinin Sönüm Üzerine Etkisi (Chae ve Au, 1980)

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.

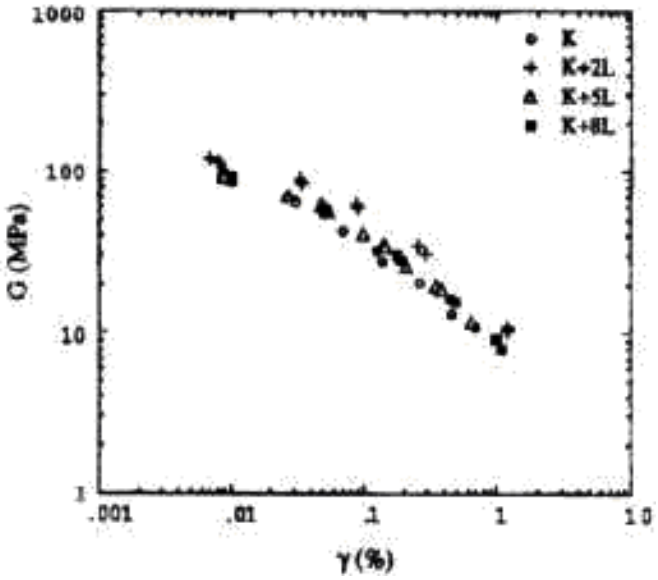


Şekil 2.21 : Kireç İçeriğinin G-γ Üzerine Etkisi (SM, σ_3=150 kPa)
(Fahom ve diğ, 1996)

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.



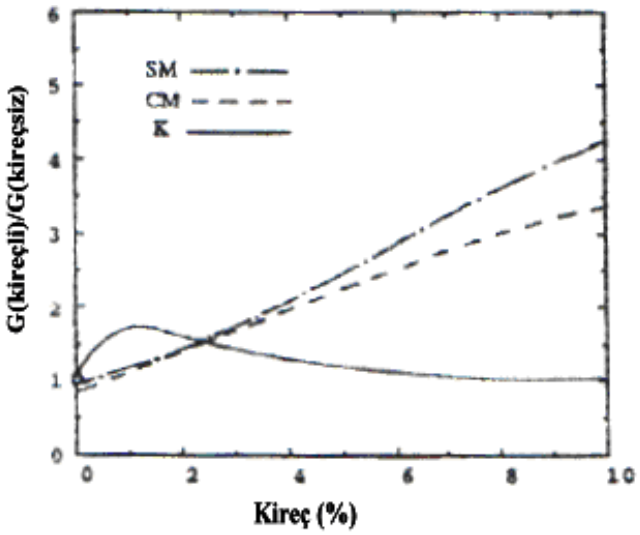
Şekil 2.22 : Kireç İçeriğinin G-γ Üzerine Etkisi (CM, σ_3=150 kPa)
(Fahom ve diğ, 1996)



Şekil 2.23 : Kireç İçeriğinin G-γ Üzerine Etkisi (K, σ_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.

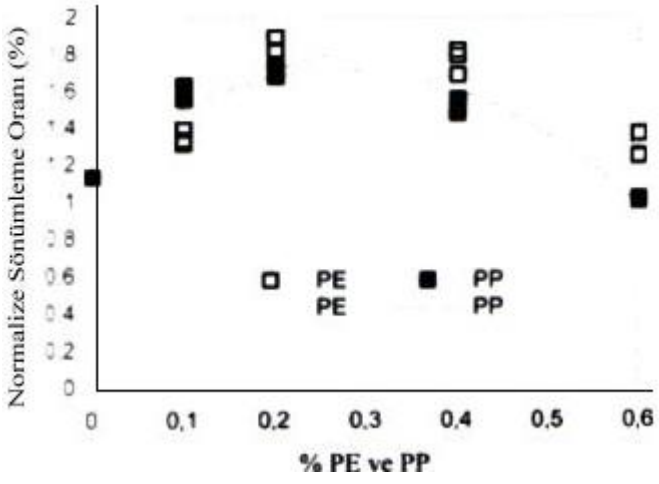
Kireç katkılı ve katkısız numunelere ait tüm değerler normalize edilirek Şekil 2.24' de görülen grafik elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sodyum montmorilinittin kayma modülü kireç oranı arttıkça artar. Sodyum montmorilinittin kayma modülündeki maksimum artış oranı kireç miktarının % 7–8 olduğu durumda maksimumdur. Kayma modülündeki artım 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.



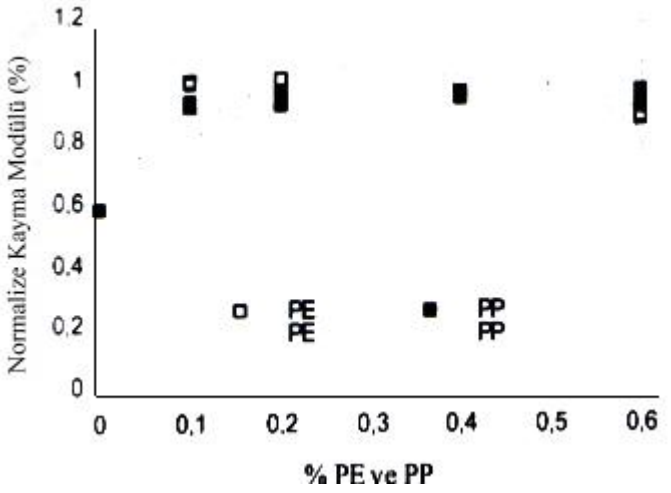
Şekil 2.24 : Kayma Modülü- Kireç Yüzdesi Arasındaki İlişkisi
(Fahom ve diğ., 1996)

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.

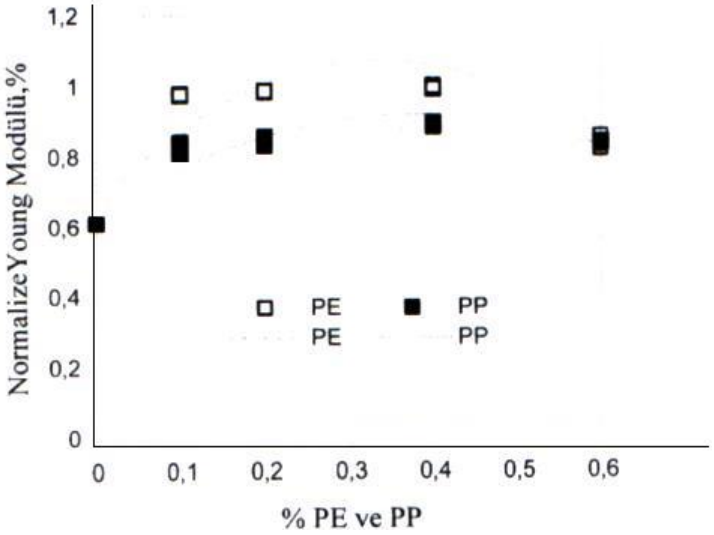
Deney sonuçlarına göre; lif katkısı dinamik özellikler üzerinde olumlu etki yapmaktadır ve en iyi sonucu % 0.2 oranında polietilen lif katkısı sağlamaktadır. Bu katkı oranında polietilen lif katkısı sönüm oranı, dinamik kayma modülü ve Young modülü değerlerinde sırası ile % 67, % 75, % 64 oranlarında 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, kil tabakaları kirlenmekte ve kilin geoteknik, mikroyapısal ve kimyasal özellikleri değişmektedir.

Bu çalışmada atık sızıntı sularının geçirimsiz örtü tabakalarının mekanik ve dinamik özelikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla geçirimsiz örtü tabaka malzemesi farklı oranlarda (% 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100) çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış ve daha sonra hazırlanan zemin numuneleri farklı kür sürelerinde (0, 1, 7, 30 ve 90 gün) bekletilmiştir. Hazırlanan numuneler kullanılarak zeminin kıvam limitleri, permeabilitesi, kayma mukavemeti ve dinamik özelliklerinin çöp sızıntı suyu miktarı ve kür süresi ile değişimi incelenmiştir.

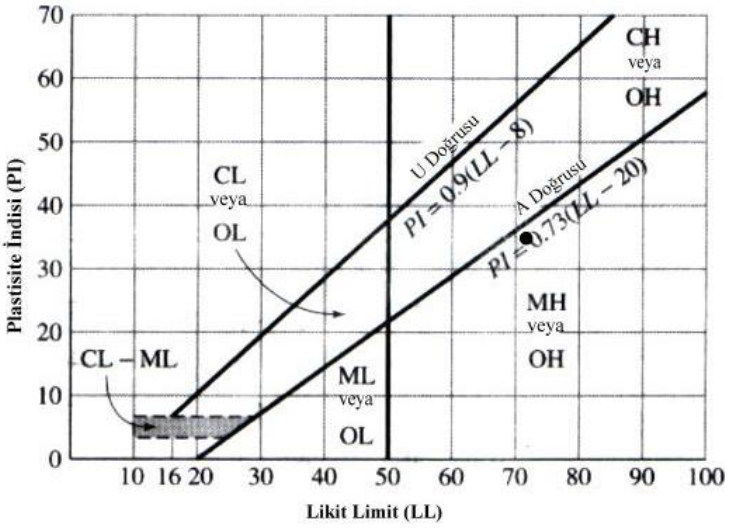
Bu bölümde zemin numunelerinin hazırlanma yöntemi, kullanılan malzemenin mühendislik özellikleri, Atterberg kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney sistemleri ve uygulama teknikleri ele alınmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Zemin

Deneylerde Kemerburgaz Katı Atık Depo Tesis Alanından temin edilmiş olan yüksek plastisteli siltli (MH) zemin kullanılmıştır. Şekil 3.1' de bu zemininin Plastisite kartı üzerindeki yeri, Tablo 3.1' de ise endeks özellikleri belirtilmiştir.

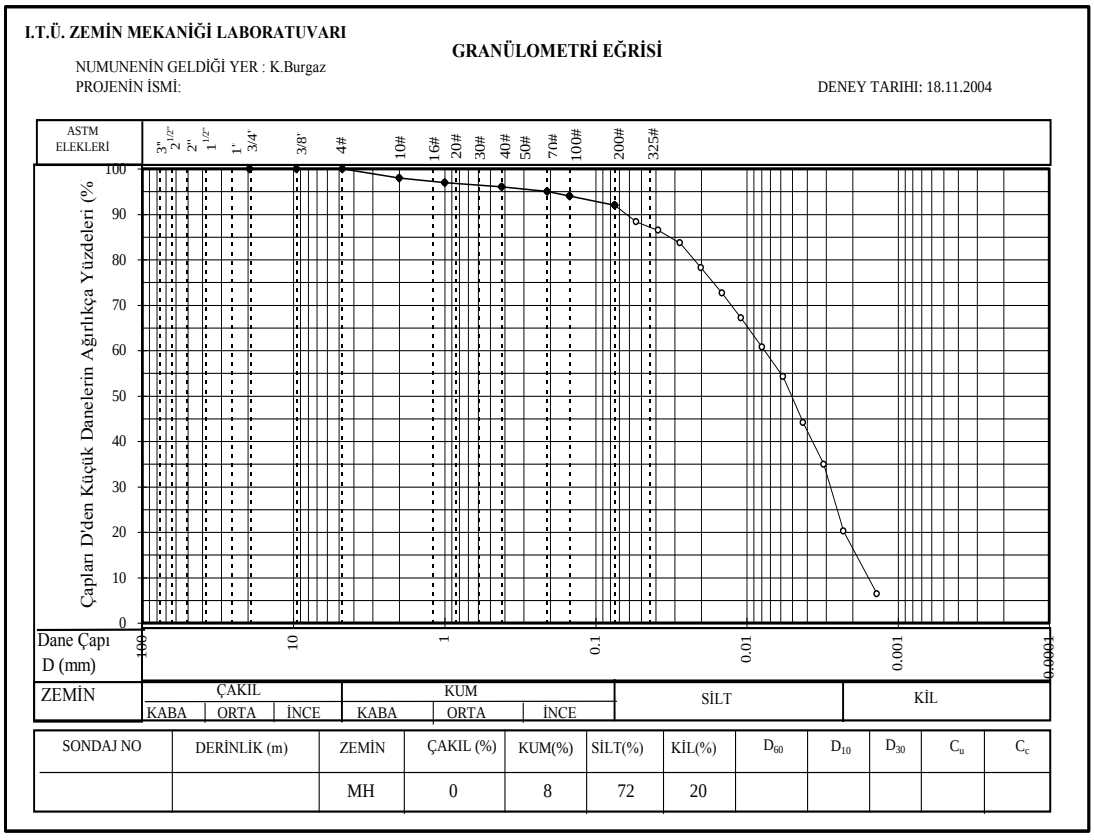
Tablo 3.1 : Deney Numunesinin Endeks Özellikleri

Zemin Sınıfı	**LL (%)**	**PL (%)**	**PI (%)**	**γ_s (kN/m^3)**
MH	72	35	37	27.6



Şekil 3.1 : Plastisite Kartı

Granülometrik özelliği ise elek ve hidrometre (ıslak analiz) deneyleri ile tespit edilmiş olup elde edilen sonuçlara ait Granülometri eğrisi Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



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 Laboratuarında 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 1**	**Numune 2**	**Numune 3**
pH		7.51	8.03	7.72
TKM	mg/l	12250	14590	13930
TUKM	mg/l	4020	2470	2625
TÇM	mg/l	10980	13045	12400
TUÇM	mg/l	2790	1410	1630
Alkalinite	mg/l CaCO3	7250	12450	12050
KOİ	mg/l	8525	3020	2755
Çöz.KÖİ	mg/l	7500	1430	1810
BOİ	mg/l	3935	265	410
T.P	mg/l	78.4	19.4	14.1
TKN	mg/l	1876	2198	1960
NH3-N	mg/l	1602	1971	1764
Klorür	mg/l	2850	4750	4000
Sülfat	mg/l	165	265	30
Ca.Sertliği	mg/l CaCO3	660	260	160
T.Sertlik	mg/l CaCO3	1700	2200	2350
Ca	mg/l	264	104	64
Mg	mg/l	249.6	465.6	525.6
Na	mg/l	2054	3130	2940
K	mg/l	1240	2080	2050
Fe	mg/l	16.5	28.1	22.4
Ni	mg/l	0.27	0.51	0.49
Cr	mg/l	0.99	0.82	0.71
Zn	mg/l	0.68	0.71	0.74

*__Numune 1:__ Deney başı çöp sızıntı suyu (Kasım 2004)
__Numune 2:__ Deney sonu çöp sızıntı suyu (Kasım 2005)
__Numune 3:__ Hava ile temas etmemiş çöp sızıntı suyu (Mayıs 2005)

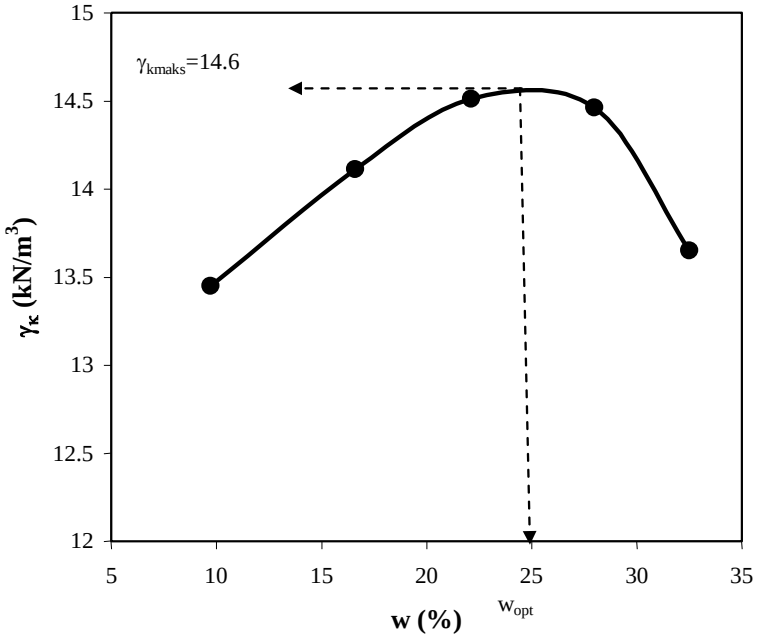
3.4. Numune Hazırlanması

Deneylerde kullanılacak zemin numunelerinin optimum su muhtevasında ve Proktor sıkılığında olması istendiğinden öncelikle zemin numunesi üzerinde Standart Proktor deneyi uygulanarak zemine ait optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı

belirlenmiştir. Standart Proktor deneyinin uygulanabilmesi için zemin 105^0C etüvde 24 saat kurutulur. Örselenmiş dane boyutlarında küçülme meydana getirmeksizin lastik tokmak ile ufalanır. 4 no' lu elekten geçen zeminden 3.0 kg ağırlığında numune alınır. Bu zemin numunesi içine biraz ve belli miktarda su ilave edilerek, üç tabaka halinde 950 cm^3 lük kalıp içinde sıkıştırılır. Sıkıştırma işi, üç tabakanın her biri üzerine 2.5 kg' lık tokmak 30.5 cm yükseklikten 25 kez düşürülerek gerçekleştirilir. Sıkıştırılan zemin numunesi tartılır. Kalıp içindeki numunenin alt ve üstünden numune alınıp tartılır ve etüve konularak su içeriği tayin edilir. Kalıp içindeki numune yeniden çıkarılır ve lastik tokmakla yeniden ezilir ve üzerine yine belli miktarda su eklenir. Homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılır ve yukarıdaki işlemler tekrarlanır. Yaş ağırlığı tartıldığı ve kalıp hacmi belli olduğu için doğal birim hacim ağırlığı ve su muhtevası belirlenir.

Deneyde zemin numunesi içine su eklendikçe ve sıkıştırıldıkça doğal veya yaş birim hacim ağırlığı artar. Yaş birim hacim ağırlık γ_n, kuru birim hacim ağırlık gibi bir maksimumdan geçer ve azalmaya başlar. Düzgün bir eğri elde etmek için yaş birim hacim ağırlığın azalmasından sonra, deney iki kez tekrarlanır ve deneye son verilir. Daha sonra bulunan kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevalarına göre doygunluk eğrileri çizilir. Eğrinin maksimumu bulunur. Bu maksimuma karşı gelen kuru birim hacim ağırlık γ_{kmaks} ve bu kuru birim hacim ağırlığa karşı gelen su muhtevası optimum su muhtevası (w_{opt}) olarak tanımlanır.

Şekil 3.3' de Standart Proktor deneyine ait grafik görülmektedir. Deney sonunda; w_{opt}= (%) 25 ve γ_{kmaks} = 14.6 kN/m^3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3 : γ_k -w_{opt} Grafiği

Standart Proktor deney verileri elde edildikten sonra içerisine belli oranlarda çöp sızıntı suyu karışmış zemin numunelerinin hazırlanmasına geçilmiştir. Önce zemin 105^0C etüvde 24 saat kurutularak lastik tokmak yardımı ile ufalanmıştır ve 4 no' lu elekten elenmiştir. Elekten geçen malzemeden bir numune için 1400 gr alınarak optimum su muhtevasının % 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100' ü çöp sızıntı suyu olacak şekilde zemine su katılarak optimum su muhtevasında numune hazırlanmıştır. Numune Standart Proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi kalıp içinde üç tabaka halinde ve Standart Proktor tokmağının 30.5 cm yükseklikten her tabaka için 25 kez düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler kalıptan çıkarılıp 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür sürelerine bırakılmıştır. Kür süresi 0 gün olan numuneler hemen deneye tabi tutulmuştur. Kür süresi 1, 7, 30 ve 90 gün olan numuneler ise su muhtevalarını kaybetmeyecek şekilde sarılarak nem odasında muhafaza edilmiştir.

3.5. Çöp sızıntı suyu İle Karıştırılmış Zemin Numunelerinin Özellikleri

Çöp sızıntı suyu içermeyen ve farklı oranlarda çöp sızıntı suyu içeren zemin numuneleri İ.T.Ü. Çevre mühendisliği laboratuarında analiz edilmiştir. Tablo 3.3' de analiz sonuçları verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu oranı zemin bünyesindeki maddelerin miktarının değişmesine neden olmaktadır.

Tablo 3.3 : Çöp sızıntı suyu İle Karıştırılmış Zemin Numunelerinin Analiz Sonuçları (t= 1 yıl)

Numune	Numunenin Hazırlandığı Tarih	pH	Flüorür (mg/l)	Klorür (mg/l)	Bromür (mg/l)	Nitrat (mg/l)	Fosfat (mg/l)	Sülfat (mg/l)	Sodyum (mg/l)	Amonyum (mg/l)	Potasyum (mg/l)	Magnezyum (mg/l)	Kalsiyum (mg/l)
Temiz zemin.		7.65	1.39	104.97	0.21	9.55	1.425	77.20	69.14	0.58	5.83	10.99	38.71
Çöp s. % 5	24/01/05	7.65	1.35	148.21	0.29	6.12	6.19	73.06	73.43	0.28	5.39	11.71	41.88
Çöp s. % 10	17/01/05	7.68	1.28	155.56	0.30	5.62	2.07	80.61	74.99	0.54	4.97	11.41	33.18
Çöp s. % 20	25/01/05	7.68	1.15	102.16	0.40	6.01	1.95	75.07	71.87	0.96	5.62	7.86	28.44
Çöp s. % 30	26/01/05	7.73	0.99	102.57	0.27	6.02	1.14	61.532	65.35	2.06	5.63	7.33	27.00
Çöp s. % 40	28/01/05	7.75	1.33	95.66	0.26	7.37	1.76	60.94	82.46	4.46	9.97	9.53	36.08
Çöp s. % 50	03/01/05	7.75	1.26	150.71	0.57	5.05	3.31	77.65	84.89	3.84	8.68	9.64	30.82
Çöp s. % 100	03/01/05	7.83	1.02	217.14	0.34	4.25	1.30	74.41	120.82	10.36	14.53	11.15	32.88

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, 90 ve 300 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.

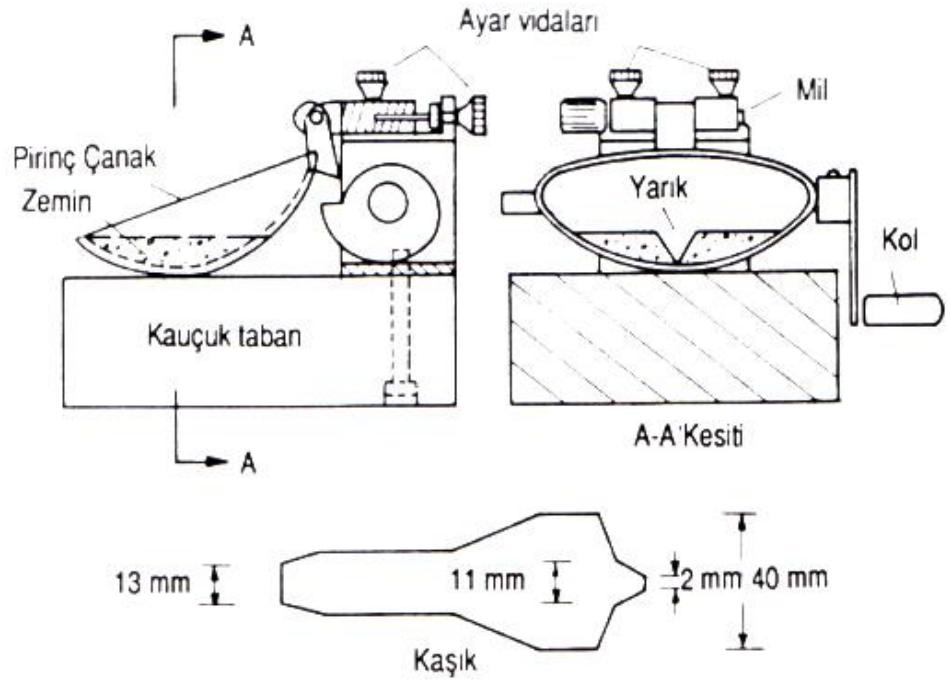
3.6.1. Likit Limit Deneyi

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 ^{0}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 hazırlamış 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 3.4’ 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 C^0 de etüvde 24 saat kurutulur (Irene, 2003). Kurutulmuş numune tartılır ve su muhtevası belirlenir. Aynı numune kullanılarak 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 arttırılarak yürütülmelidir. Numuneye su eklemek amacıyla likit limit kabından her alınışında kap ve oyuk açma bıçağı yıkanıp kurutulmalıdır.



Şekil 3.4 : 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 ekseni boyunca, düşüş sayıları ise logaritmik olarak apsis ekseni boyunca işaretlenir. Elde edilen noktalara en uygun doğru çizilir. Bu doğru üzerinde 25 düşüş karşısındaki su muhtevası zeminin likit limitini verir.

Likit limitin 1, 7. 30 ve 90 gün sonundaki değişimini incelemek amacı ile hazırlanan numuneler optimum su içeriğine sahip olarak hazırlanmıştır. Kür süresini

tamamlayan numuneler 105 C^{0}' lik etüvde 24 saat kurutulur. Etüvden çıkarılan numuneler lastik tokmak yardımı ile öğütülüp 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 limit (PL) belirlenmesinin ardından zemin numunelerine ait plastisite indisi 3.1 bağıntısı kullanılarak hesaplan

$$PI=LL-PL \qquad \textbf{(3.1)}$$

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 3.5' de 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 doygun numune konsolide edilirken dren görevi yaparlar. Numune ile poroz taşlar arasındaki temas yüzeyleri dişli yapılmıştır. Böylece numune ve taşlar arasındaki kayma engellenmiş olur.



Şekil 3.5 : 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 doluysa 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 doygun 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 Standart Proktor kalıbında hazırlanmış zemin numunesi üç parçaya bölünür. Şekil 3.6’ da 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 3.6 : 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. Numene 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. Yükleme başlığı vasıtasıyla düşey yük uygulanır. Kesme kutusunun üst parçasını alt parçasına tespit eden vidalar çıkarılır. Yatay ve düşey deformasyonları ölçebilmek için iki tane okuma saati yerleştirilir.

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 C^{0}' de 24 saat etüvde kurutulur. Etüvden çıkarılan numune tartılır ve deney sonu su muhtevası hesaplanır.

3.8. Ödometre Deneyi

3.8.1. Ödometre Aleti

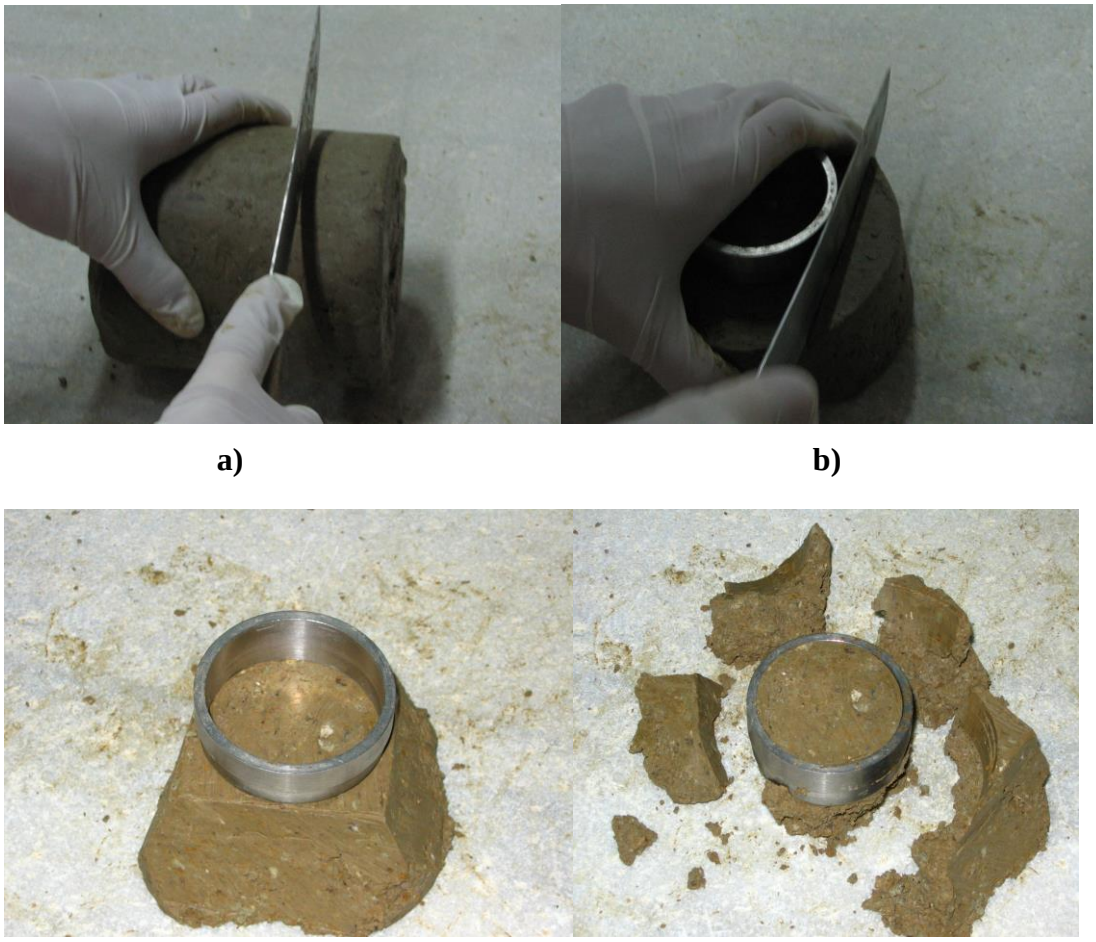
Şekil 3.7' de görülen ödometre deney aleti yükleme askısı ve yükleme kirişinden oluşan yükleme elemanları ve konsolidasyon hücresinden oluşmaktadır. Yükleme elemanları numuneye eksenel yük uygulamaktadır. Bu nedenle yükün uygulanması sırasında dikkat edilmesi gereken yükleme kirişinin yatay olmasıdır. 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 3.7' 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 3.7 : Ödometre Deney Aleti

3.8.2. Numune Hazırlanması

Ödometre deneyinde kullanılmak üzere numune hazırlanması için önce Standart Proktor kalıbında hazırlanmış zemin numunesinden yaklaşık 25 mm kalınlığında bir parça kesilir. Şekil 3.8' 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 3.8 : 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 doygun 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 doygun 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 numunesinin şişme basıncı belirlenmiştir. Bu amaçla numuneye ilk olarak 0.25 kg/cm^2 düşey gerilme uygulanmıştır. Numune şiştikçe yük askısına yük konularak düşey deformasyon saatinin sıfırda kalması sağlanmıştır. Şişmenin hiç olmadığı anda numune üzerindeki basınç, şişme basıncı olarak belirlenmiştir. Şişmeyi engelleyen basıncın belirlenmesinin ardından bir üst yük kademesine geçilerek 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 kg/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.

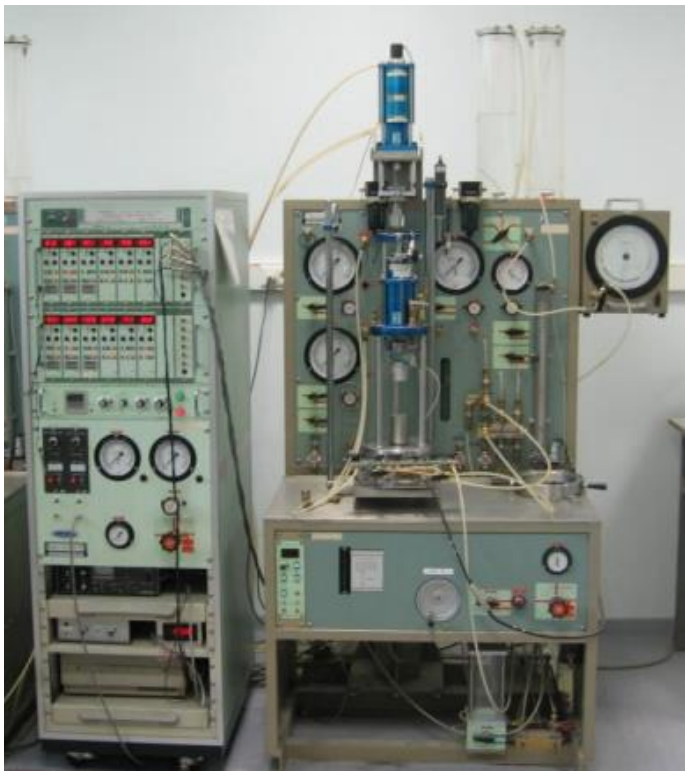
Uygulanan gerilme kademeleri tamamlandıktan sonra yükler kaldırılır. Ring ve numune birlikte alınır, üzerinde bulunan sular uzaklaştırılarak zemin numunesinin ıslak ağırlığı belirlenir. Sonra numune 105 C^0 deki etüvde 24 saat kurutulur. Etüvden çıkarılan numune tartılarak kuru ağırlığı bulunur ve su 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 laboratuarına getirilmiştir.

Şekil 3.9’ da görüldüğü gibi deney sistemi iki ana üniteden oluşmaktadır. Bunlar ünite A ölçüm ve ünite B yükleme birimi olarak isimlendirilmiştir.

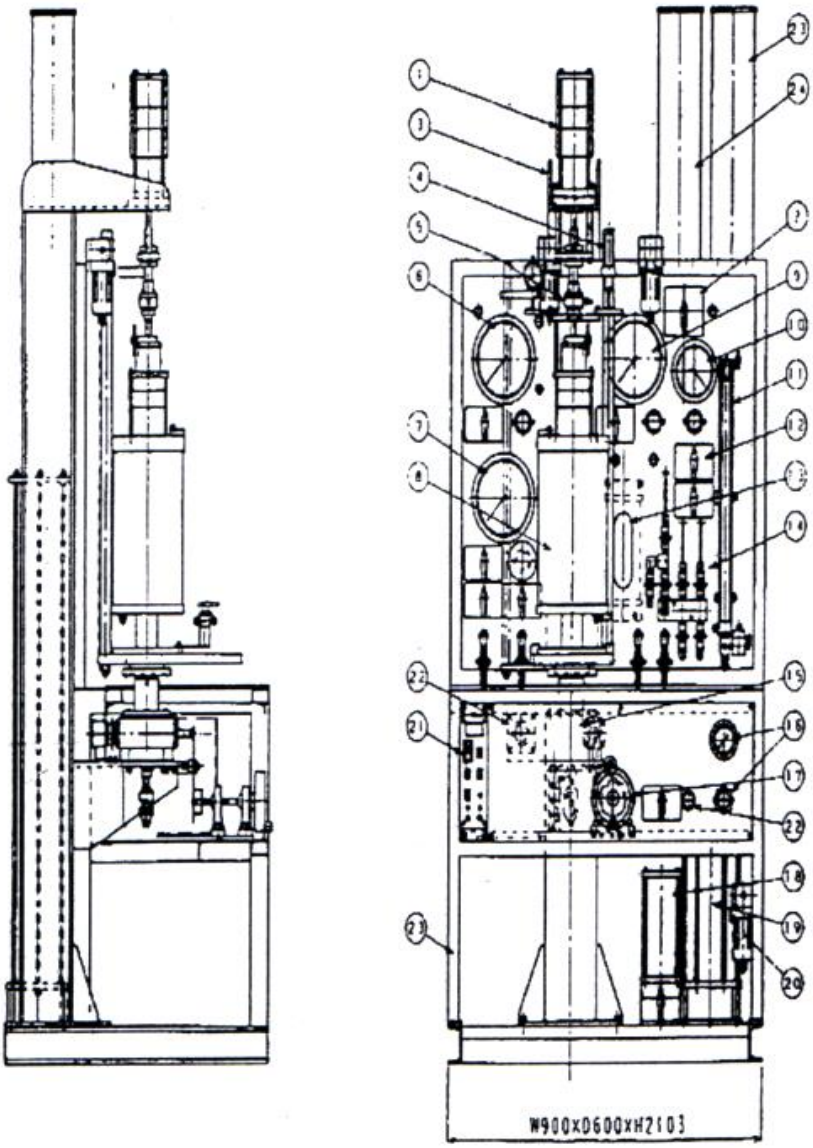


Şekil 3.9 : Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

3.9.1.1. Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre

Şekil 3.10’ 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/cm^2 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 3.10 : 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/cm^2 basınç ayarlanmasına uygundur. Çevre basıncı ile ters basıncın 0–10 kg/cm^2 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.

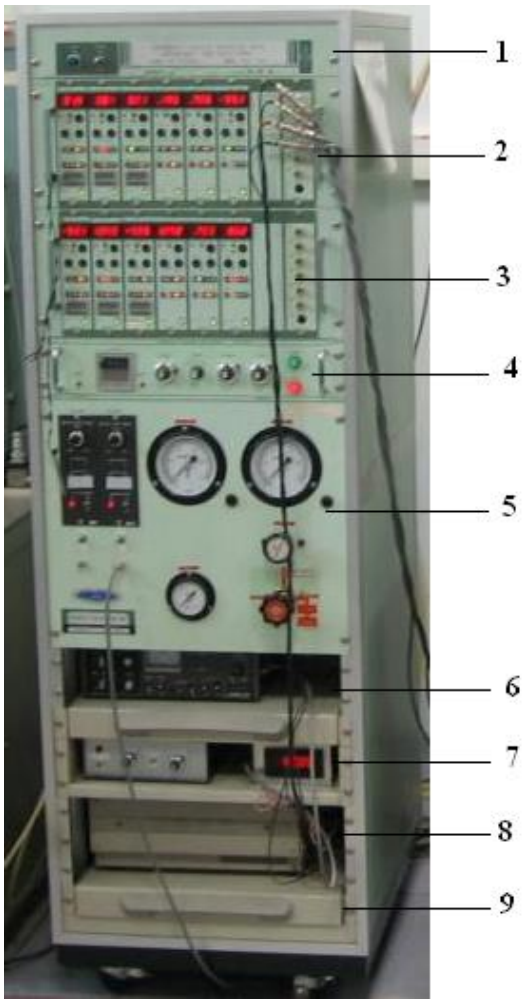
3.9.1.2. Elektriksel Ölçüm Birimi

Şekil 3.11’ de dinamik yükleme ölçüm ve kayıt ünitesi görülmektedir. Elektriksel ölçüm ve kayıt birimi hem yüklemeyi kontrol etmekte hem de verilerin toplanıp aktarılmasında kullanılmaktadır. Pünomatik 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/cm^2, 5 kgf/cm^2 ve 2 kgf/cm^2 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 Ana elektrik kaynağı
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 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 Dinamik yükleme kontrol birimi
5 Dinamik yükleme basınç birimi
6 Veri kayıt birimi
7 Direkt akım amplifikatör
8 Kayıt cihazı (8 kanal)
9 Elektrik ölçüm birimleri

Şekil 3.11 : Dinamik Yükleme Ölçüm ve Kayıt Birimleri

3.9.2. Deney Sisteminin Kalibrasyonu

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

Dinamik üç eksenli deney aletinde kalibrasyonlar dijital panodaki deformasyon verilerinin karşılaştırılması ve panodaki değerlerin kontrolleri ile sağlanmaktadır. Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri Şekil 3.12' de görülmektedir.



Şekil 3.12 : 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 hassalığını 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 hassalığını 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 voltmetre 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 voltmetre 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 voltmetre 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 kayıtta alınan değerler bu katsayılarla çarpılarak deney sonuçlarının hazırlanması sırasında kullanılır.

3.9.3. Numune Hazırlanması

Dinamik deney uygulaması için çöp sızıntı suyu içeriği % 0, 5, 20, 50 ve 100 olan numuneler Standart Proktor kalıbı ve tokmağı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden küre bırakılmayan numuneler hemen dinamik deneye tabi tutulurken diğer numuneler 7, 30 ve 90 gün küre bırakılmıştır.

Standart Proktor kalıbında hazırlanmış numunelerin dinamik deney için hazırlanmasında JGS T 520–1990 standartlarına uyulmuştur. Numunelerin deney için uygun çapa getirilmesi için tıraşlama aleti kullanılmıştır. Şekil 3.12' 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 3.13 : 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 doygun hale getirilmiş filtre kağıdı konularak membran içindeki numune buraya yerleştirilir. Membran alt pistona 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 pistona 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 sıfırlnır. 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 pistona 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/cm^2 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 datalar 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’ de ise deney sonuçları incelenecektir.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Giriş

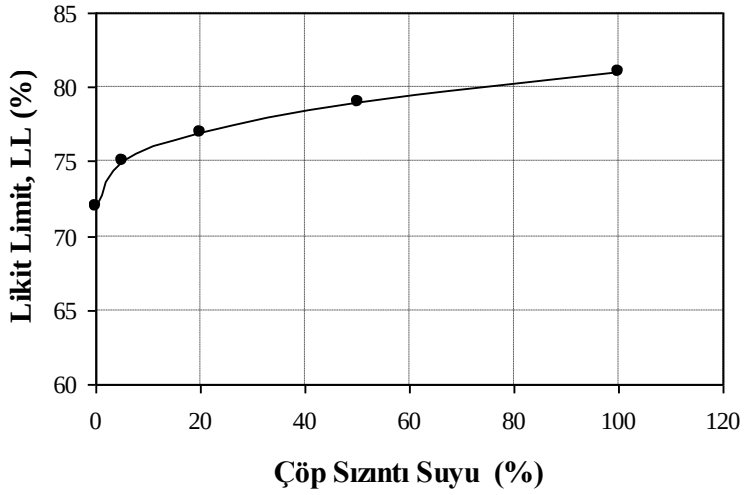
Bu bölümde çöp su oranının ve bu suyun zeminle etkileşim süresinin zeminin statik ve dinamik yükler altındaki davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Atterberg kıvam limitleri, kesme kutusu, ödometre ve dinamik üç eksenli deney sonuçları detaylı şekilde ele alınmıştır. Atterberg kıvam limitleri deneylerinde zemine % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu katılarak kür oranın 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 oranı ve kür süresinin zeminin statik yükler altında şekil değiştirme ve kayma direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla zemine % 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu katılarak 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür süreleri sonunda deneye tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin aynı özellikte olmasını sağlamak amacı ile tüm deney numuneleri Standart Proktor kalıbında Proktor tokmağı kullanılarak hazırlanmıştır. Ödometre deneyinde çöp sızıntı suyu oranı % 5, 20, 50 ve % 100, kür süresi 0 ve 30 gün olan numuneler ele alınmıştır. Bu deney ile kür oranı ve kür süresinin 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 0, 7 ve 90 gün olan numunelerin dinamik üç eksenli deney sonuçları ele alınmıştır. Bu deney sonuçları ile kür oranının ve kür süresinin zeminin dinamik yükler altında şekil değiştirme davranışı ve Elastisite modülü üzerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney sonuçlarının gerçekçi ve güvenilir olması için deneylerde Kemerburgaz Katı Atık Tesis alanından getirilen dolgu malzemesi ve çöp sızıntı suyu kullanılmıştır.

MH (yüksek plastisiteli silt) sınıfı bu zemininin LL= (%) 72, PL (%)= 35 ve PI (%)= 37 olarak belirlenmiştir.

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

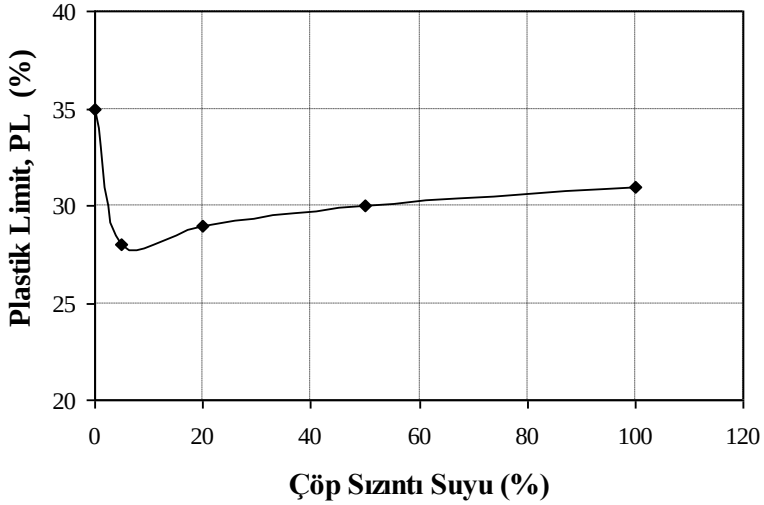
Zemine farklı oranlarda çöp sızıntı suyu katılarak zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin çöp sızıntı suyu oranına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Şekil 4.1' de likit limit deney sonuçları görülmektedir. Buna göre zeminin temiz (çöp sızıntı suyu: % 0) olması durumunda likit limit % 72 olarak belirlenmiştir. Zemine % 5 oranında çöp sızıntı suyu katılması ile LL= % 75 değerine yükselir. Çöp sızıntı suyu oranı % 20' ye çıkarıldığında LL= % 77' e yükselmiştir. Çöp sızıntı suyu oranındaki artışla birlikte likit limit değeri de artmıştır. % 50 çöp sızıntı suyu oranında likit limit % 79, % 100 çöp sızıntı suyu oranında % 81 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.



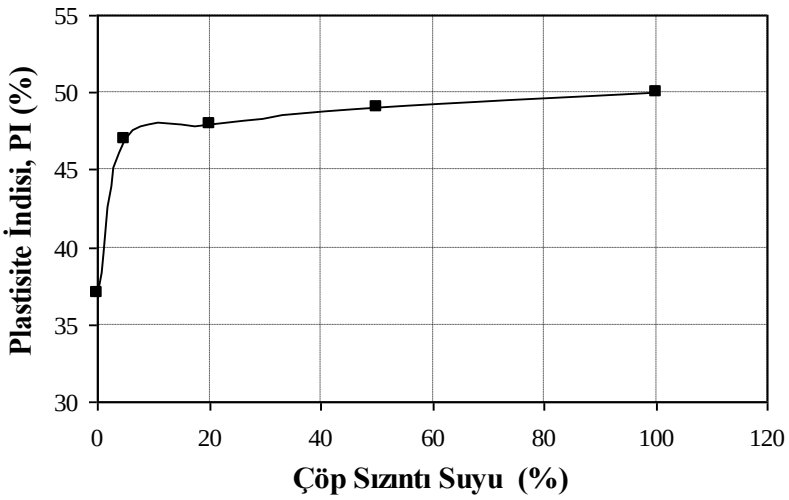
Şekil 4.1 : Çöp Sızıntı Suyu Oranının Likit Limit Üzerine Etkisi (t=0)

Şekil 4.2' de görüldüğü gibi plastik limit (PL) değeri çöp sızıntı suyu katılmamış zemin için (PL= % 35) maksimumdur. % 5 çöp sızıntı suyu oranında ise plastik limit (PL= % 28) minimumdur. % 20 çöp sızıntı suyu oranında plastik limit % 5 çöp sızıntı suyu oranına göre artarak % 29 değerine ulaşmıştır. Bu artış % 50 çöp sızıntı

suyu oranında da devam ederek plastik limit % 30 olmuştur. % 100 çöp sızıntı suyu oranında da plastik limit değeri artarak % 31 değerine ulaşmıştır. Çöp sızıntı suyu katkılı zemin numunelerinin plastik limit değeri temiz zemin numunesine göre daha düşüktür. 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)



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

Plastisite indisi (PI) ise Şekil 4.3' de görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu miktarındaki artışla artma eğilimi göstermiştir. Temiz zeminin plastisite indisi (PI= % 37) çöp sızıntı suyu katılmış numunelere göre daha küçüktür. % 100 çöp sızıntı suyu oranında plastisite indisi (PI= % 50) maksimum değerine ulaşır. Bilindiği gibi organik maddeler zeminin Atterberg limitlerini arttırmaktadır. Bunun neticesinde

organik içerikli çöp sızıntı suyu oranı arttıkça zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi artar.

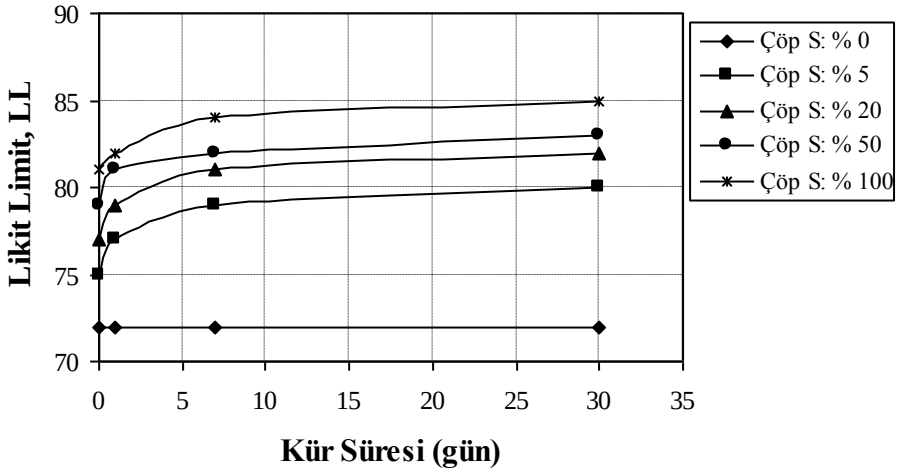
4.3. Kür Süresinin Zeminin Endeks Özellikleri Üzerine Etkisi

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 Ek A' da verilmiştir. Bu sonuçların incelenmesi sırasında ilk olarak likit limitteki (LL) değişimi 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.

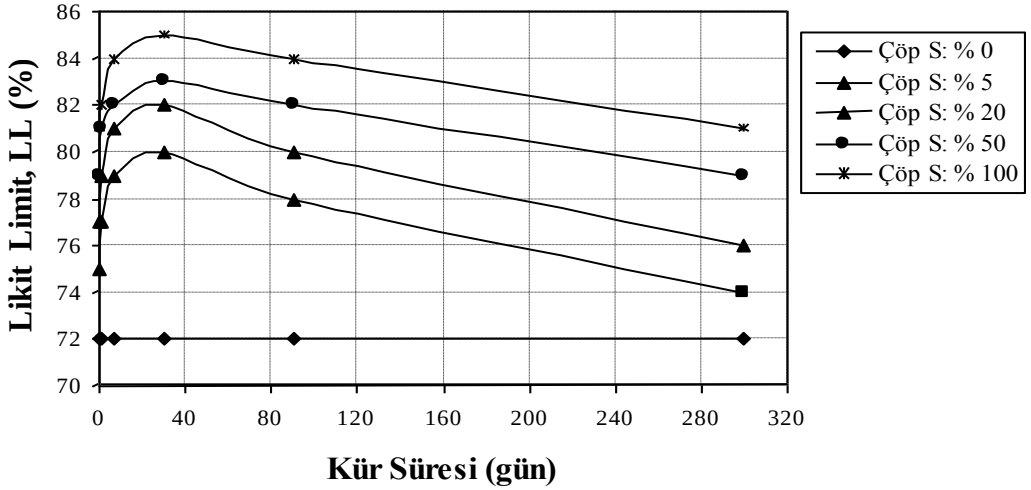
Tablo 4.1 : Kür Oranı ve Kür Süresinin Kıvam Limitleri Üzerine Etkisi

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
5	0	75	28	47
	1	77	29	48
	7	79	30	49
	30	80	29	51
	90	78	31	47
	300	74	29	45
20	0	77	29	48
	1	79	30	49
	7	81	31	50
	30	82	30	52
	90	80	32	48
	300	76	30	46
50	0	79	30	49
	1	81	31	50
	7	82	32	50
	30	83	31	52
	90	82	33	49
	300	79	32	47
100	0	81	31	50
	1	82	32	50
	7	84	33	51
	30	85	32	53
	90	84	34	50
	300	81	33	48

Şekil 4.4.a' da görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında likit limit değeri kür süresi artıkça, artarak 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra ise likit limit değeri Şekil 4.4.b' de görüldüğü gibi düşmeye başlamıştır. 90 ve 300 günlük kür sürelerindeki bu azalmalara rağmen çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin likit limit değerleri temiz zemin numunelerinden daha yüksektir. Ayrıca çöp sızıntı suyu oranındaki artışla birlikte likit limit değeri artarak % 100 çöp sızıntı suyu oranında maksimum değere ulaşmıştır.



a) t= 0–30 gün

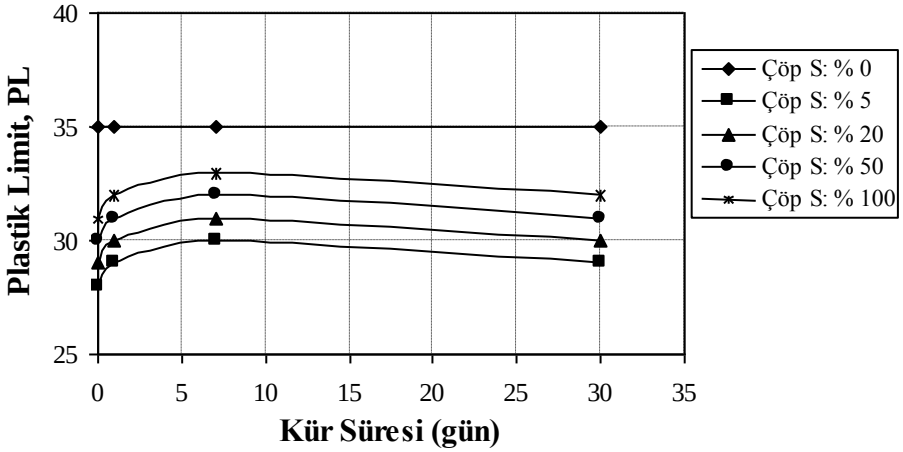


b) t= 0–300 gün

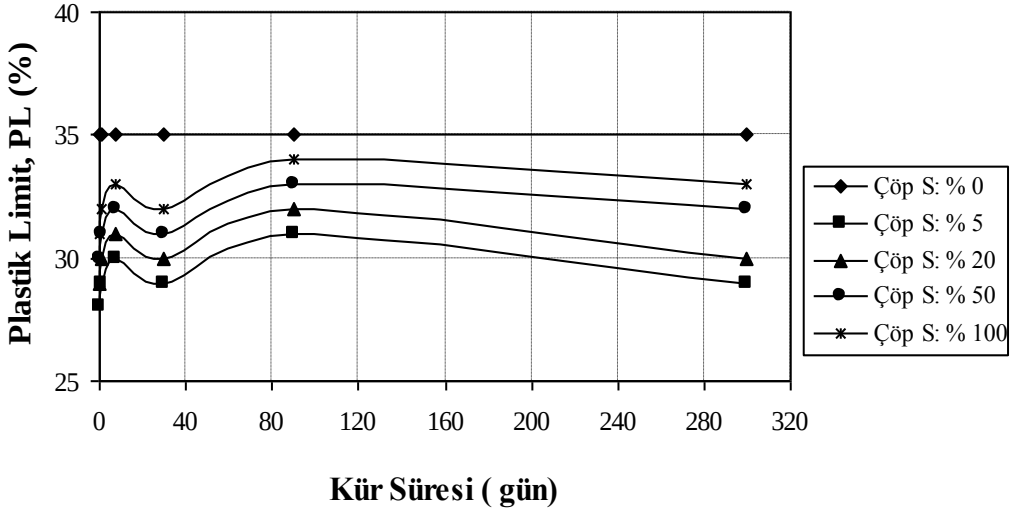
Şekil 4.4 : Kür Süresinin Likit Limit Üzerine Etkisi

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 düşüktür. 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.a' da görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastik limit değeri 7 gün de dahil olmak üzere kür süresi arttıkça artmıştır. 30 günlük kür sonunda ise plastik limit değeri 7 güne göre azalmıştır. Bu kür süresinden sonra Şekil 4.5.b' de görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında tekrar plastik limit artarak 90 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır. 300 günlük kür sonunda ise tekrar plastik limit düşmüştür. 30 ve 300 gündeki düşmelere rağmen plastik limit t=0' a göre daha büyüktür.



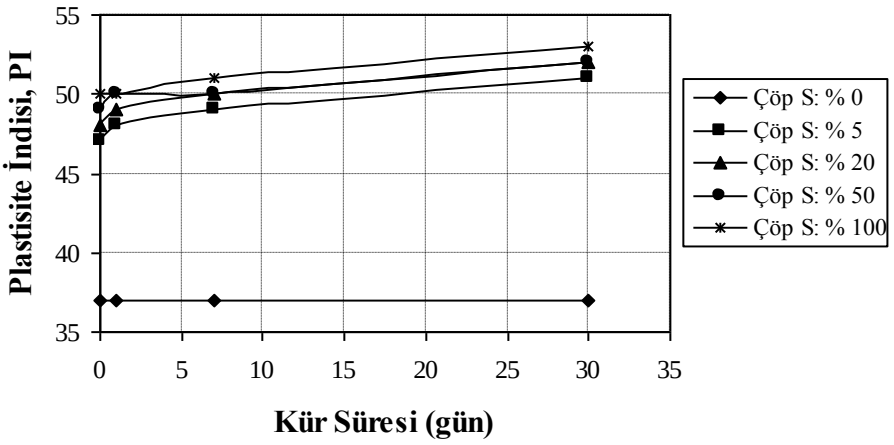
a) t= 0–30 gün



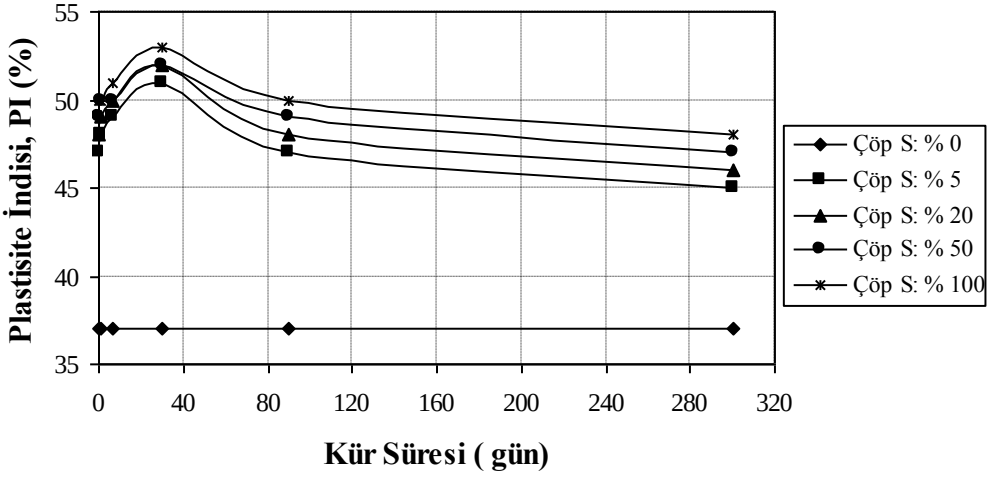
b) t= 0–300 gün

Şekil 4.5 : Kür Süresinin Plastik Limit Üzerine Etkisi

Şekil 4.6’ da görüldüğü gibi likit limit ve plastik limitte olduğu gibi plastisite indisinde de çöp sızıntı suyu katılmış zemin numuneleri benzer davranış göstermektedir. Tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastisite indisi artarak 30 günlük kür sonunda maksimum değere ulaşmıştır (Şekil 4.6.a). Bu kür süresinden sonra ise Şekil 4.6.b’ de görüldüğü gibi plastisite indisinde 90 günlük kür ile birlikte bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma 300 günlük kürde de devam ederek t= 0’ a göre tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastisite indisi % 4 oranında azalmıştır. 90 ve 300 gün sonunda görülen azalmalara rağmen çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunelerinin plastisite indisi temiz zemine göre daha yüksektir. % 100 çöp sızıntı suyu oranında plastisite indisi diğer kür oranlarına göre daha fazla artış göstermiştir. % 5 çöp sızıntı suyu oranında ise plastisite indisindeki artış miktarı en azdır.



a) t= 0–30 gün



b) t= 0–300 gün

Şekil 4.6 : Kür Süresinin Plastisite İndisi Üzerine Etkisi

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

4.4.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranının Etkisi

Zeminin statik yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve kayma direnci davranışının incelenmesi amacı ile konsolidasyonsuz-drenajsız deneyler yapılmıştır. 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 oranları ve kür sürelerine ait grafikler EkB' de verilmiştir.

$$\tau = \frac{P}{A_c} \tag{4.1}$$

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.

$$\Delta L = \text{Yatay deformasyon saat okuması x Saat katsayısı} \tag{4.2}$$

Yatay deplasmanların hesaplanmasının ardından alan düzeltmesine geçilir.

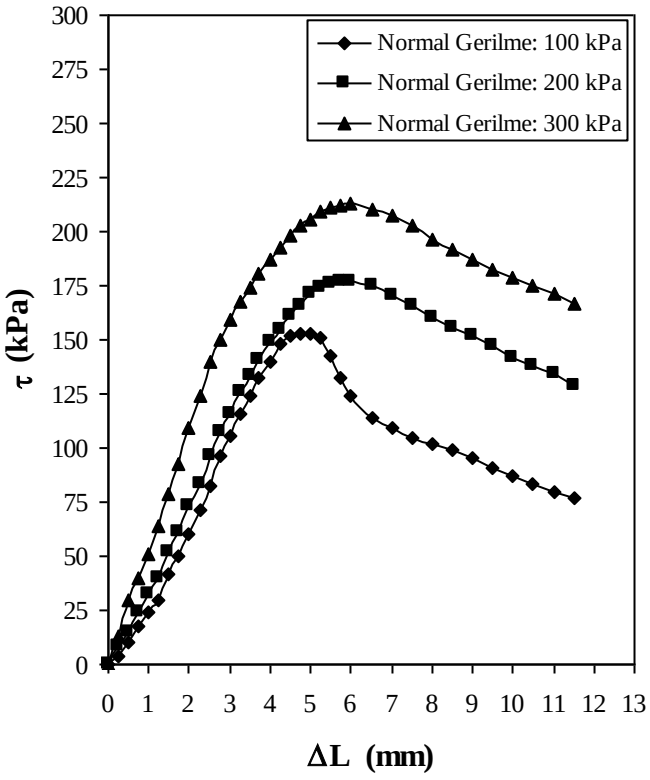
$$A_c = L(W - \Delta L) \tag{4.3}$$

L , W= Kesme kutusunun kenar uzunlukları

Aynı alandaki normal gerilme ise:

$$\sigma = \frac{N}{A_c} \tag{4.4}$$

Olarak elde edilir. Burada N normal kuvveti göstermektedir.



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

Şekil 4.7' de 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 153 kPa olarak belirlenmiştir. Normal gerilmenin artması ile kayma mukavemeti değerleri artmaktadır. Çünkü numune sıkışmakta ve daha sıkı ve sağlam bir yapı kazanmaktadır. 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. Bu amaçla küre bırakılmamış numunelere ait grafikler ele alınacaktır. Diğer kür sürelerine ait grafikler Ek B' de verilmiştir.

Tablo 4.2' de farklı oranlarda kür oranına ve kür süresine sahip deney numunelerine ait su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir. Numunelere ait

deney sonuçlarının doğru değerlendirilebilmesi için her bir numune % 25 su muhtevasında hazırlanıp deneye tabi tutulmuştur.

Tablo 4.2 : Kesme Kutusu Deneyi w-γ_k Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	**Kür Süresi (gün)**	**σ (kPa)**	**Deney Başı w_{ilk} (%)**	**Deney Sonu w_{son} (%)**	**Deney Başı γ_{kilk} (kN/m^3)**	**Deney Sonu γ_{kson} (kN/m^3)**
0	0	100	25	24.991	14.376	14.38
		200	25	24.992	14.872	15.83
		300	25	24.98	15.824	14.87
	90	100	25	24.959	14.8	14.81
		200	25	24.949	14.96	14.97
		300	25	24.94	15.392	15.4
5	0	100	25	24.957	14.016	14.02
		200	25	24.996	14.64	14.64
		300	25	24.98	15.064	15.07
	1	100	25	24.988	14.968	15.04
		200	25	24.964	15.04	14.97
		300	25	24.96	15.688	15.69
	7	100	25	24.961	14.808	14.81
		200	25	24.951	14.928	14.93
		300	25	24.961	15.464	15.47
	30	100	25	24.961	14.576	14.58
		200	25	24.961	14.824	14.83
		300	25	24.961	15.288	15.29
	90	100	25	24.98	14.672	14.67
		200	25	24.97	14.816	14.82
		300	25	24.98	14.96	14.96
10	0	100	25	24.996	14.496	14.5
		200	25	24.996	14.848	14.85
		300	25	25	14.848	14.84
	1	100	25	24.969	14.624	14.62
		200	25	24.996	15.056	15.05
		300	25	24.992	15.456	15.46
	7	100	25	24.969	14.664	14.66
		200	25	24.941	14.936	14.95
		300	25	24.914	15.096	15.1
	30	100	25	24.96	14.728	14.73
		200	25	24.941	15.032	15.04
		300	25	24.941	15.4	15.4
	90	100	25	24.979	14.848	14.99
		200	25	24.98	14.992	14.85
		300	25	25	15.52	15.22

Tablo 4.2 (devam) : Kesme Kutusu Deneyi w-γ_k Değerleri

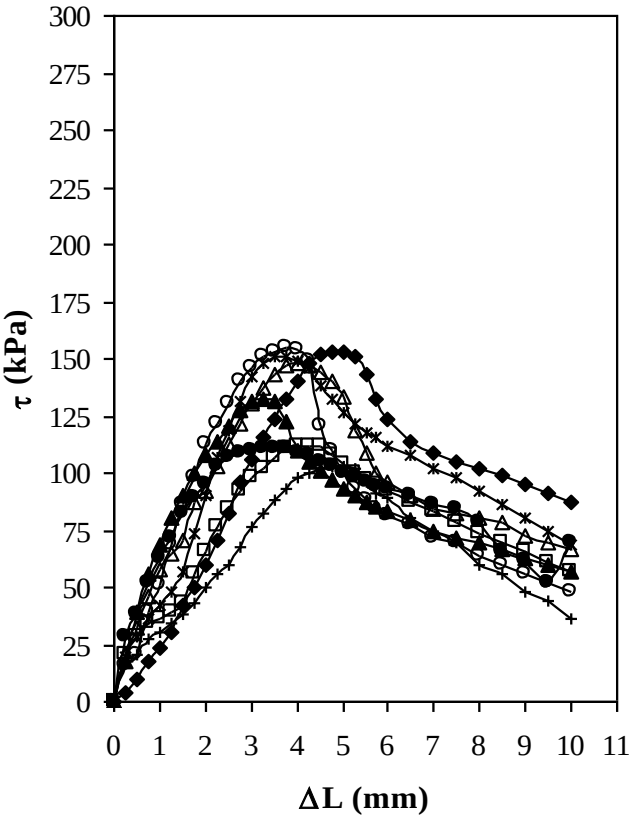
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	σ (kPa)	Deney Başı w_{ilk} (%)	Deney Sonu w_{son} (%)	Deney Başı γ_{kilk} (kN/m^3)	Deney Sonu γ_{kson} (kN/m^3)
20	0	100	25	24.98	14.352	14.36
		200	25	25	14.504	14.5
		300	25	24.996	14.84	14.84
	1	100	25	24.976	14.952	14.95
		200	25	24.988	15.008	15.01
		300	25	24.984	15.36	15.36
	7	100	25	24.996	14.672	14.67
		200	25	25	14.936	14.94
		300	25	24.979	15.936	15.94
	30	100	25	24.961	15	15.01
		200	25	25	15.072	15.08
		300	25	24.980	15.208	15.21
	90	100	25	24.94	14.632	14.63
		200	25	24.94	15.112	15.12
		300	25	24.947	15.32	15.33
30	0	100	25	24.992	14.496	14.5
		200	25	24.992	14.712	14.71
		300	25	24.996	15.256	15.26
	1	100	25	24.949	14.56	14.56
		200	25	24.992	15.032	15.03
		300	25	24.98	14.24	15.73
	7	100	25	24.98	14.688	14.69
		200	25	24.96	14.96	14.97
		300	25	24.94	15.904	15.91
	30	100	25	24.951	15.248	15.25
		200	25	24.98	15.312	15.31
		300	25	24.96	15.464	15.47
	90	100	25	24.98	14.776	14.78
		200	25	24.97	15.408	15.41
		300	25	24.98	16.136	16.14
40	0	100	25	24.996	14.408	14.41
		200	25	24.996	14.544	14.55
		300	25	24.992	14.776	14.77
	1	100	25	24.98	14.848	14.85
		200	25	24.996	14.936	14.98
		300	25	24.99	15.456	15.46
	7	100	25	24.96	14.704	14.71
		200	25	24.98	14.976	14.98
		300	25	24.97	15.992	16.09
	30	100	25	24.96	15.264	15.27
		200	25	24.979	15.4	15.41
		300	25	25	15.528	15.53
	90	100	25	24.98	14.824	14.83
		200	25	24.97	14.944	14.95
		300	25	24.98	15.32	15.33

Tablo 4.2 (devam) : Kesme Kutusu Deneyi w-γ_k Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	σ (kPa)	Deney Başı w_{ilk} (%)	Deney Sonu w_{son} (%)	Deney Başı γ_{kilk} (kN/m^3)	Deney Sonu γ_{kson} (kN/m^3)
50	0	100	25	24.996	14.48	14.48
		200	25	24.996	14.912	14.91
		300	25	24.988	15.168	15.17
	1	100	25	24.98	14.768	14.77
		200	25	24.996	14.96	14.96
		300	25	24.98	15.312	15.31
	7	100	25	24.959	14.904	14.91
		200	25	25	15.024	15.02
		300	25	24.96	15.496	15.5
	30	100	25	24.92	15.024	15.04
		200	25	24.897	15.256	15.27
		300	25	24.942	15.448	15.46
	90	100	25	24.98	15.008	15.01
		200	25	24.96	15.232	15.24
		300	25	24.96	15.432	15.43
100	0	100	25	25	14.536	14.53
		200	25	24.992	14.976	14.98
		300	25	24.99	15.44	15.44
	1	100	25	24.96	14.832	14.84
		200	25	24.94	15.4	15.41
		300	25	24.96	15.68	15.69
	7	100	25	24.98	14.848	14.85
		200	25	24.935	15.344	15.35
		300	25	24.94	15.536	15.54
	30	100	25	24.98	14.24	14.76
		200	25	24.98	15.4	15.41
		300	25	24.98	15.656	15.65
	90	100	25	24.94	14.976	14.98
		200	25	24.96	15.256	15.26
		300	25	24.94	15.496	15.49

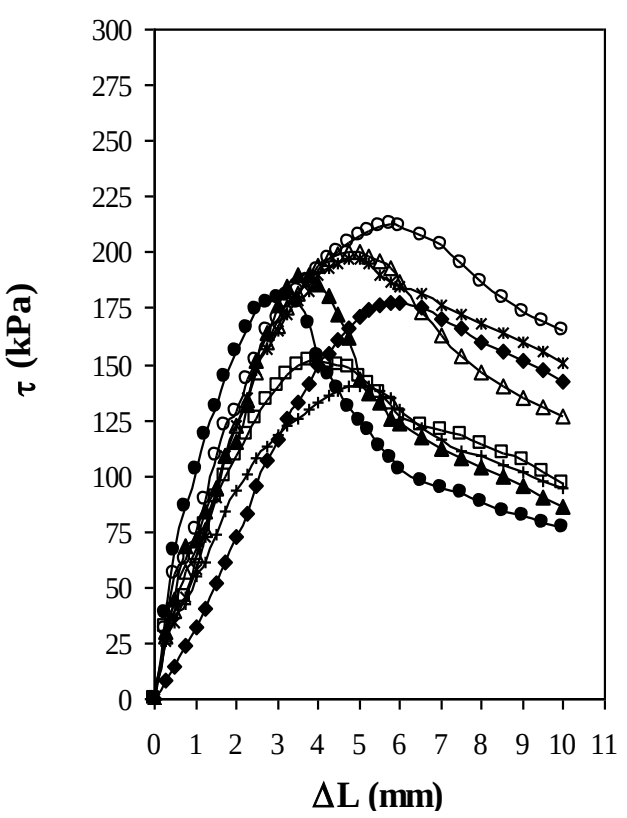
Şekil 4.8, 4.9 ve Şekil 4.10' da farklı oranlarda çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinin 100, 200 ve 300 kPa normal gerilme kademelerine ait kayma gerilmesi-yatay deplasman eğrileri verilmiştir. Şekil 4.8' de σ = 100 kPa' a ait eğriler görülmektedir. Her çöp sızıntı suyu oranına ait τ_{maks} değerleri incelendiğinde % 20 çöp sızıntı suyu oranında bu değerin maksimum, % 50 çöp sızıntı suyu oranında ise minimum olduğu görülür. Pik noktalara ulaşılan deformasyon seviyeleri incelendiğinde; % 10 çöp sızıntı suyu oranında deformasyon seviyesinin en düşük, temiz zeminde ise en yüksek olduğu görülür.

Şekil 4.9' da σ = 200 kPa' a ait eğriler görülmektedir. σ = 100 kPa grafiğinde olduğu gibi % 20 çöp sızıntı suyu oranında τ_{maks} en büyük ve % 50 çöp sızıntı suyu oranında en küçüktür. Bu yük kademesinde çöp sızıntı suyu katılmış zemin numuneleri temiz zemine göre maksimum kayma gerilmesine daha düşük deformasyon seviyelerinde ulaşmışlardır. Temiz zemin τ_{maks} değerine % 10 deformasyon seviyesinde ulaşırken % 5 çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunesi ise % 5 yatay deformasyon seviyesinde ulaşmıştır.



Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.991	14.38
5	24.957	14.02
10	24.996	14.5
20	24.98	14.36
30	24.992	14.5
40	24.996	14.41
50	24.996	14.48
100	25	14.53

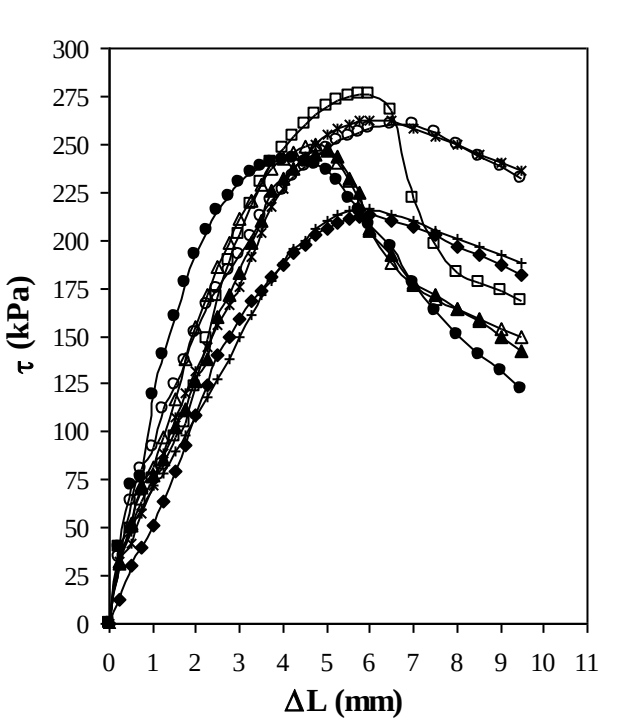
Şekil 4.8 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (σ = 100 kPa, t= 0)



Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	15.83
5	24.996	14.64
10	24.996	14.85
20	25	14.5
30	24.992	15.03
40	24.996	14.55
50	24.996	14.91
100	25	14.85

Şekil 4.9 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (σ = 200 kPa, t= 0)

Şekil 4.10' da σ = 300 kPa' a ait eğriler görülmektedir. Bu gerilme seviyesinde τ_{max} diğer iki gerilme seviyesinden farklı olarak τ_{maks} en büyük değere % 100 çöp sızıntı suyu oranında ulaşmıştır. En küçük τ_{maks} değeri ise temiz zeminde elde edilmiştir. Bunun sebebini araştırmak için öncelikle Tablo 4.1' de verilmiş olan deney başı ve deney sonu su muhtevası (w) ile kuru birim hacim ağırlıklara (γ_k) bakmak gerekir. Tablodan görüldüğü gibi su muhtevaları arasında fark yoktur. Fakat bu gerilme seviyesinde % 100 çöp sızıntı suyu oranına ait γ_k % 20 çöp sızıntı suyu oranına ait değerden daha büyüktür. γ_k değerindeki bu artış kayma mukavemetinde artışa neden olmuştur. Bunun sonucunda bu gerilme seviyesinde % 100 çöp sızıntı suyu içeriğinde τ_{maks} en büyük değere ulaşmıştır. Aynı durum temiz zemin numunesi ve % 50 çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numune içinde geçerlidir. Bu gerilme seviyesinde temiz zeminin γ_k değeri % 50 çöp sızıntı suyu içeren numunenin γ_k değerinden daha küçüktür. Dolayısıyla τ değerleri de daha küçük olmuştur.



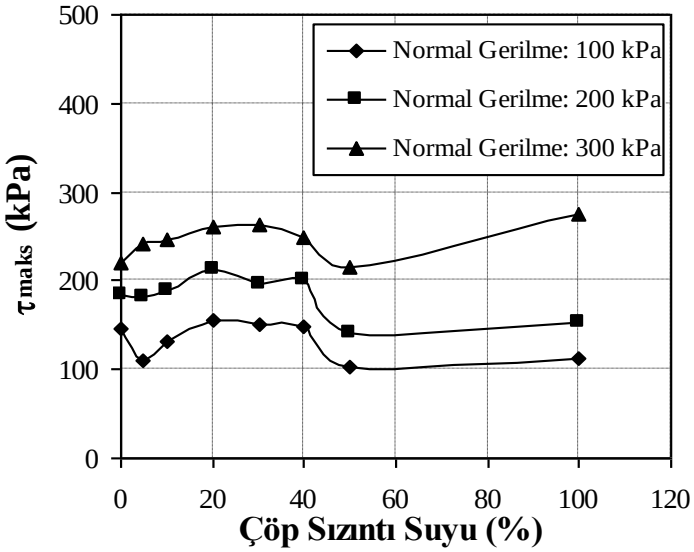
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	14.87
5	24.98	15.07
10	25	14.84
20	24.996	14.84
30	24.996	15.26
40	24.992	14.77
50	24.988	15.17
100	24.99	15.44

Şekil 4.10 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Eğrisi (σ = 300 kPa, t= 0)

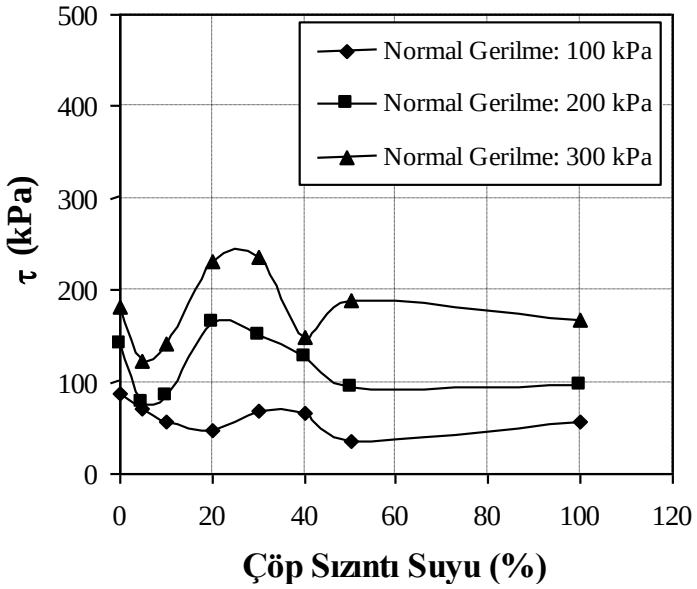
t= 0 için hazırlanmış olan τ - ΔL grafiklerinden yararlanarak kür oranı ile zeminin kayma direnci değişimleri Şekil 4.11' de gösterilmiştir. σ = 100 kPa gerilme seviyesinde çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin τ_{maks} değerleri temiz zemine göre daha düşüktür. % 50 çöp sızıntı suyu oranında τ_{maks} en küçük değerdedir. % 100 çöp sızıntı suyu oranında τ_{maks} değeri % 50 çöp sızıntı suyu oranına göre artmıştır. σ = 200 kPa' da ise τ_{maks} değeri % 50' den düşük çöp sızıntı suyu oranlarında temiz zemine göre artmıştır. % 100 çöp sızıntı suyu oranında ise τ_{maks} % 50 çöp sızıntı suyu oranına göre % 8 artmıştır. 300 kPa normal gerilme seviyesinde de % 50 çöp sızıntı suyu oranına kadar temiz zemine göre τ_{maks} artmıştır. Bu kür oranında ise τ_{maks} temiz zemine göre azalmıştır. τ_{maks}, % 100 çöp sızıntı suyu oranında tekrar artarak maksimum değere ulaşmıştır.

Deneyin tamamlandığı % 17 deformasyon seviyesine karşı gelen kayma gerilmeleri (τ) kür oranları arasında karşılaştırma için kullanılmıştır. Şekil 4.12' de görüldüğü gibi σ = 100 kPa' da % 50 çöp sızıntı suyu oranında τ minimumdur. Çöp sızıntı suyu katılmamış numune için ise maksimumdur. τ çöp sızıntı suyu oranındaki artışa karşılık farklı oranlarda azalmıştır. σ = 200 ve 300 kPa' da ise % 20 ve % 30 çöp

sızıntı suyu oranları için τ değeri artmıştır. Diğer kür oranlarında ise τ değeri temiz zemine göre azalmıştır.



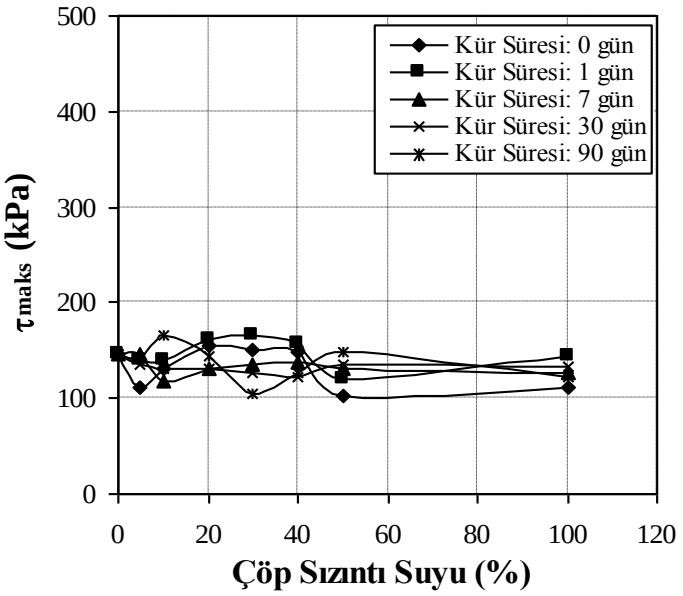
Şekil 4.11 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (t= 0)



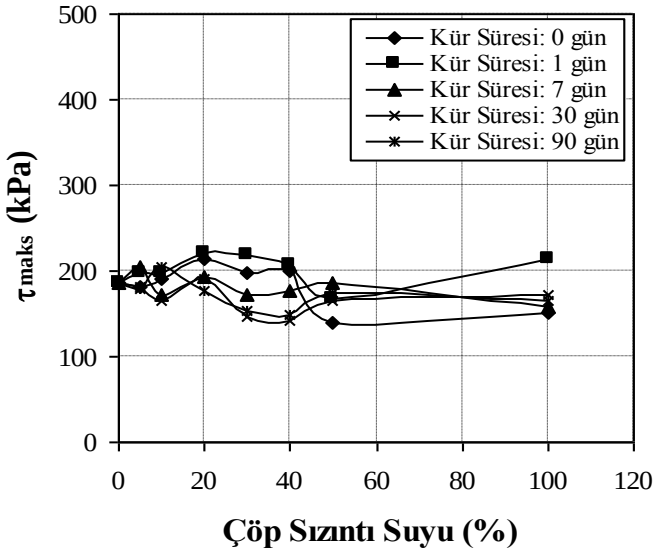
Şekil 4.12 : Kür Oranın τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, t= 0)

Şekil 4.13' de tüm kür sürelerine ait τ_{maks} değerlerinin kür oranı ile değişimi 100 kP normal gerilme için verilmiştir. Bu gerilme seviyesinde zemine çöp sızıntı suyu karıştırılması ile τ_{maks} temiz zemine göre azalmıştır. 200 kPa normal gerilme kademesinde ise 7, 30 ve 90 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri çöp sızıntı suyu

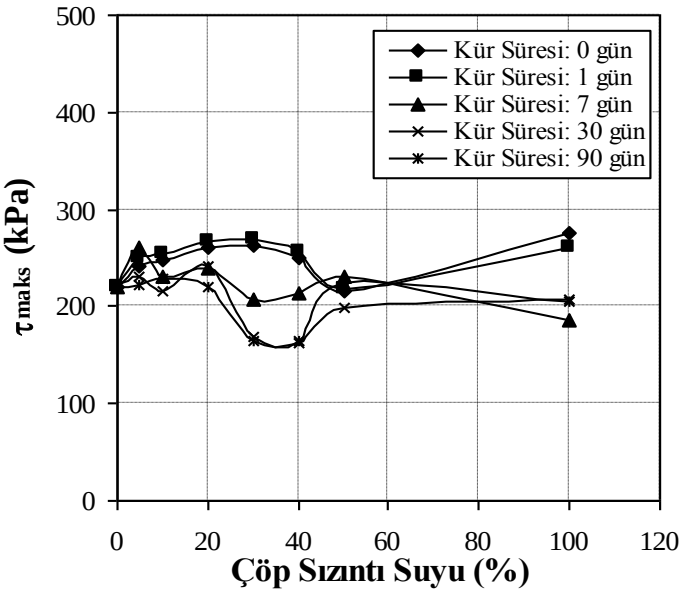
katılmış numunelerde temiz zemin numunesine göre daha düşüktür (Şekil 4.14). t= 0 ve 1 günde ise çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin genel olarak τ_{maks} değerleri temiz zemine göre daha büyüktür. 300 kPa normal gerilmede ise çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin τ_{maks} değerleri t= 0 ve 7 günde temiz zemine göre daha büyüktür (Şekil4.15). Diğer kür sürelerinde ise τ_{maks} değerleri zemine çöp sızıntı suyu katılması ile temiz zemine göre azalmıştır.



Şekil 4.13 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (σ= 100 kPa)



Şekil 4.14 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (σ= 200 kPa)



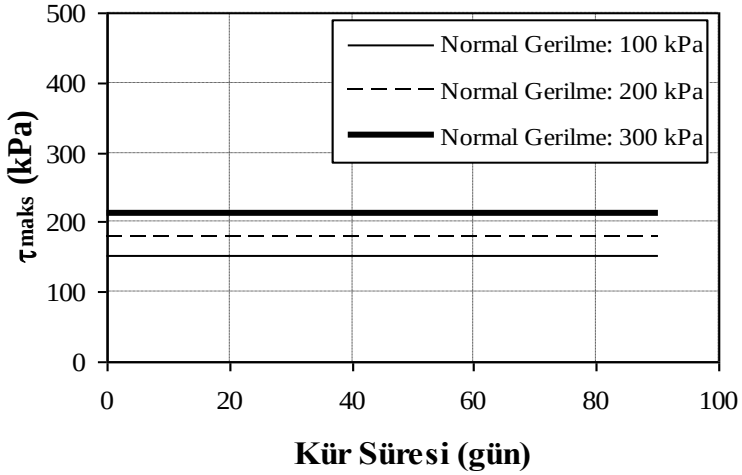
Şekil 4.15 : Kür Oranın τ_{maks} Üzerine Etkisi (σ= 300 kPa)

4.4.2. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Süresinin Etkisi

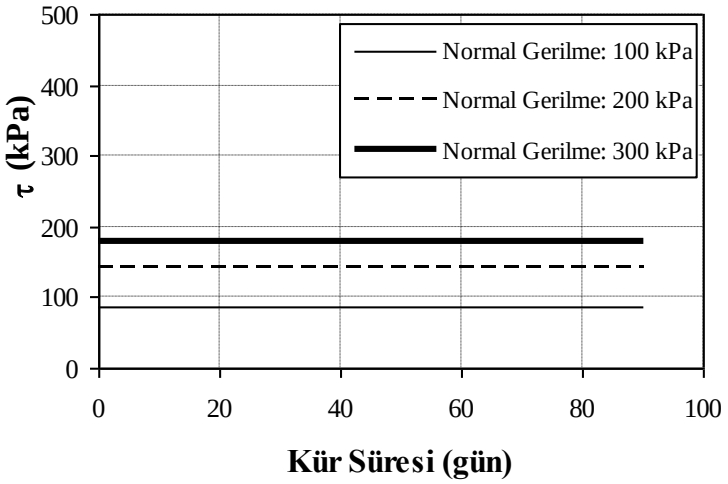
Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerine çöp sızıntı suyu oranının ve kür süresinin etkisini incelemek amacı ile farklı kür oranlarında ve farklı kür sürelerinde hazırlanan numuneler konsolidasyonsuz-drenajsız deneye tabi tutulmuştur. Bu deney sonuçlarının değerlendirilmesi sırasında aynı kür oranına sahip numuneler kendi aralarında gruplandırılarak kür süresi ile gerilme-şekil değiştirme davranışı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

Çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış zemin numunelerinde zemin ve çöp sızıntı suyu arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeni ile kür süresine bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme davranışında değişme gözlenmiştir. Temiz zeminde böyle bir değişme söz konusu değildir. Temiz zeminde Şekil 4.16' da görüldüğü gibi maksimum kayma gerilmesi (τ_{maks}) değerinin aynı koşullar altında aynı değeri vermesi beklenir. Zeminde yapısal bir değişme olmamasından dolayı aynı deformasyon seviyesinde kayma direnci değerinde de değişmenin olmaması gerekir (Şekil 4.17). Fakat laboratuarda hazırlanan deney numunesinin su muhtevasındaki azalma, çimentolanma etkisi ve deneyin uygulanma tekniğinden dolayı kayma direnci değerinde bir miktar değişme olmaktadır. Şekil 4.18' de görüldüğü gibi 90 gün su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde nem odasında saklanmış numunenin kayma

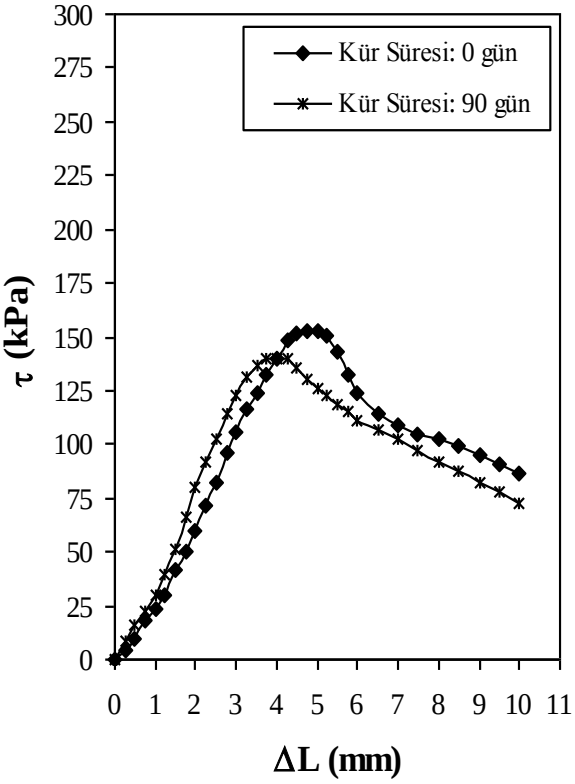
direnci bekletilmemiş numuneye göre % 8 oranında azalmıştır. Bu azalma Proktor kalıbında numunenin hazırlanması sırasında oluşan gerilme farklarından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.19' da görüldüğü gibi 200 kPa gerilme seviyesinde ise τ_{maks} değeri 90 gün sonunda t= 0' a göre % 10 artmıştır. 300 kPa (Şekil 4.20) gerilme seviyesinde de 200 kPa' da olduğu gibi kayma direnci 90 günlük kür sonunda küre bırakılmamış numuneye göre % 6 artmıştır. τ_{maks} değerine ulaşılan deformasyon seviyeleri de su muhtevasına, γ_k değerine ve deneyin yapılış tekniğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Deneye tabi tutulan bu numunede 90 gün sonunda her üç yük kademesinde de τ_{maks} değerine ulaşılan yatay deformasyon seviyesi t= 0' a göre % 20 oranında bir düşme göstermiştir.



Şekil 4.16 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Temiz zemin)

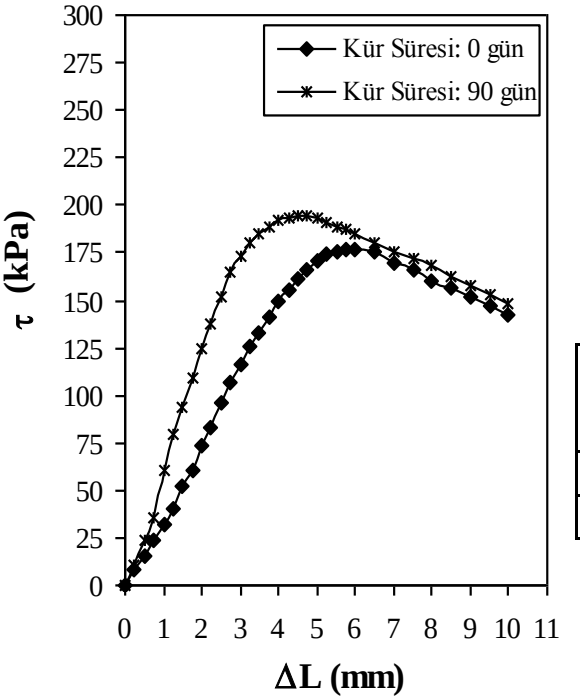


Şekil 4.17 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Temiz Zemin)



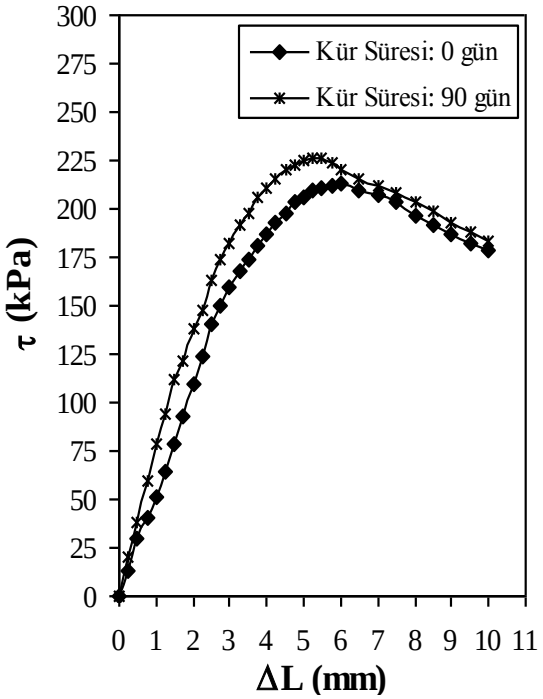
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.991	14.38
90	24.959	14.81

Şekil 4.18 : τ-ΔL (Temiz Zemin, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	15.83
90	24.949	15.40

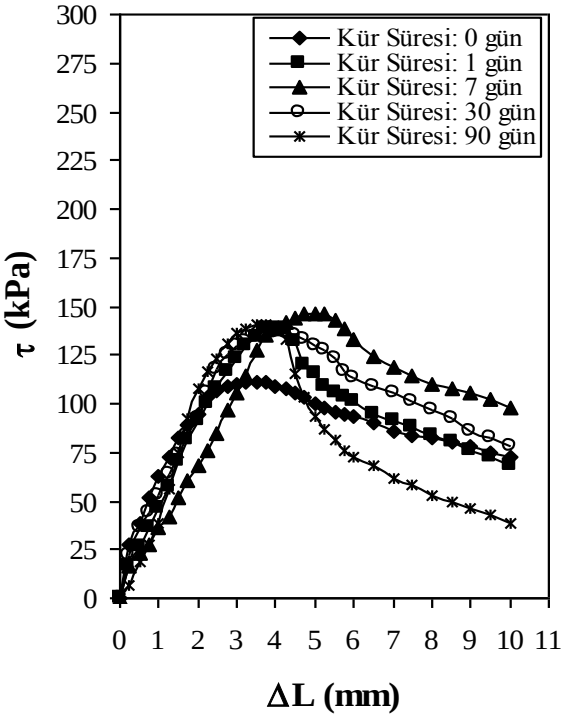
Şekil 4.19 : τ-ΔL (Temiz Zemin, σ = 200 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	14.87
90	24.94	15.40

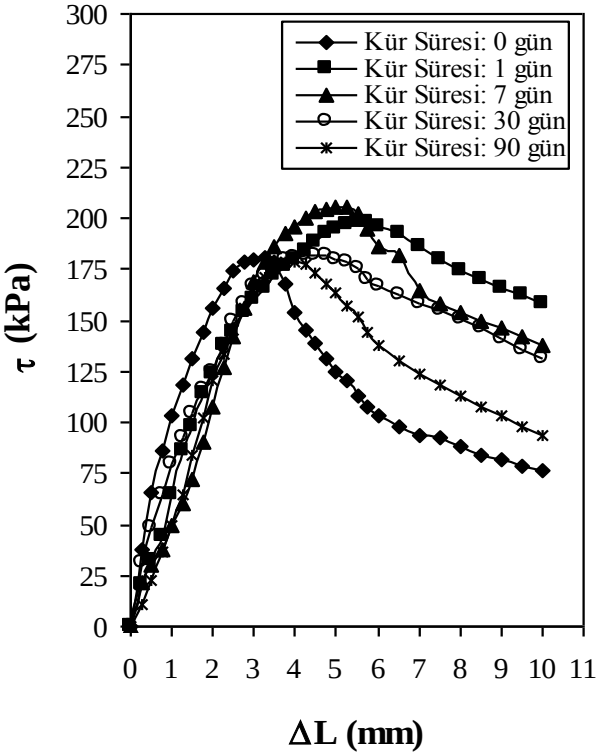
Şekil 4.20 : τ-ΔL (Temiz Zemin, σ = 300 kPa)

Şekil 4.21' de % 5 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin σ = 100 kPa gerilme seviyesi için $\tau - \Delta L$ grafiğinin kür süresi ile değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi küre bırakılmamış numuneye ait τ_{maks} değeri en küçüktür. Bu kür süresine ait τ_{maks} değerine ulaşılan yatay deformasyon seviyesi de en küçüktür. En büyük τ_{maks} 7 günlük kür sonunda elde edilmiştir. Bu değere karşı gelen deformasyon seviyesi de diğer kür sürelerine göre daha büyüktür. Bu kür süresinden sonra τ_{maks} değerinde bir düşme görülmesine rağmen t= 0' a ait değerden t= 30 ve 90 güne ait değerler daha büyüktür. Maksimum kayma gerilmelerine ulaşılan yatay deformasyon seviyeleri şekilden görüldüğü gibi 7 günlük kür için maksimumdur. Bu kür süresinden sonra τ_{maks} değerlerine karşı gelen deformasyon seviyelerinde de bir düşme gözlenmiştir. 200 kPa normal gerilmede de (Şekil 4.22) 7 günlük kür sonunda τ_{maks} diğer kür sürelerine göre en büyük değere ulaşır. Diğer gerilme seviyelerinde olduğu gibi 300 kPa gerilme seviyesinde de (Şekil 4.23) en büyük τ_{maks} 7 günlük küre aittir. 200 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde 90 günlük küre ait τ_{max} değeri minimumdur.



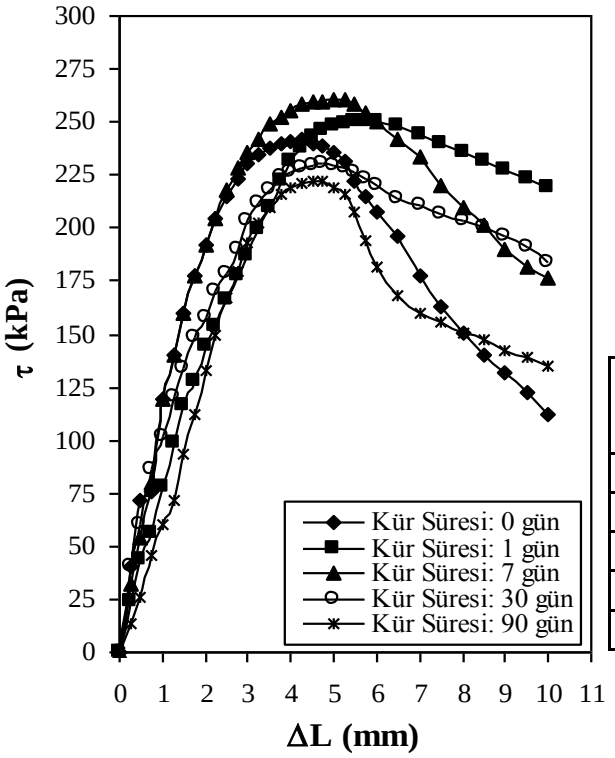
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.957	14.02
1	24.988	15.04
7	24.961	14.81
30	24.961	14.58
90	24.98	14.67

Şekil 4.21 : τ-ΔL (Çöp S: % 5, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.64
1	24.964	14.97
7	24.951	14.93
30	24.961	14.83
90	24.97	14.82

Şekil 4.22 : τ-ΔL (Çöp S: % 5, σ = 200 kPa)

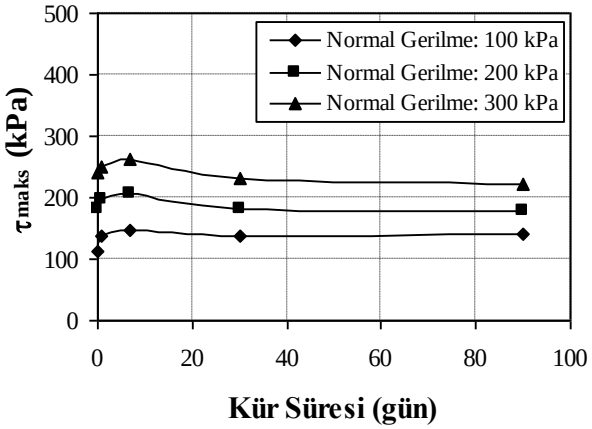


Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	15.07
1	24.96	15.69
7	24.961	15.47
30	24.961	15.29
90	24.98	14.96

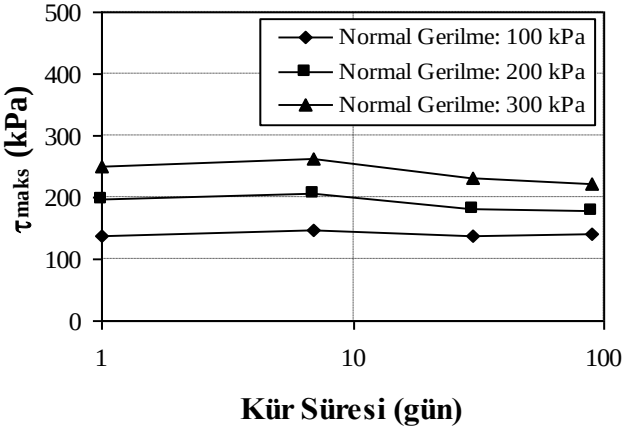
Şekil 4.23 : τ-ΔL (Çöp S: % 5, σ = 300 kPa)

% 5 çöp sızıntı suyu için hazırlanmış olan τ - ΔL grafiklerinden yararlanılarak kür süresi ile zeminin kayma direnci değişimleri Şekil 4.21' de gösterilmiştir. Şekil 4.24.a' da görüldüğü gibi σ = 100 kPa gerilme seviyesinde küre bırakılmış numunelerin τ_{maks} değerleri küre bırakılmamış numuneye göre daha büyüktür. σ = 200 kPa ve 300 kPa gerilme seviyelerinde ise 30 ve 90 günlük kür süreleri için τ_{maks} değeri t= 0' a göre bir miktar düşme göstermiştir. σ = 100 kPa' da t= 0' a göre τ_{maks} değerindeki t= 1 gün ile başlayan artış t= 7 günde en büyük değere ulaşmıştır. 30 günde ise bu artış bir miktar azalmıştır. 90 günde ise tekrar artmıştır. σ = 200 ve 300 kPa' da ise 30 günlük kür ile başlayan τ_{maks} değerindeki azalma 90 günde de devam etmiştir. Şekil 4.24.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de τ_{maks} değeri 7 günlük kür sonunda 1 günlük küre göre doğrusal bir artış göstermiştir. 7 günden sonra 30 günlük kür sonunda ise bir azalma söz konusudur. 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde τ_{maks} değerindeki bu düşüş 90 günlük kür süresi için de geçerlidir. σ = 100 kPa' da ise 90 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri 30 güne göre artmıştır.

Deneyin tamamlandığı % 17 deformasyon seviyesine karşı gelen kayma gerilmesi (τ) değerinin kür süresi ile değişimini ele alırsak; Şekil 4.25.a' da görüldüğü gibi σ = 100 kPa' da t= 1 ve 90 gün sonunda τ değeri t= 0' a göre düşerken 7 ve 30 günde ise artmıştır. t= 1 ve 90 günde τ_{maks} değerine göre % 17 deformasyon seviyesinde kayma gerilmesi ani yük boşalmasından dolayı oldukça düşmüştür. t= 7 günde ise bu deformasyon seviyesi için t= 0' a göre artmıştır. σ = 200 ve 300 kPa' da ise % 17 deformasyon seviyesine karşı gelen kayma direnci değerleri t= 0' dan daha büyüktür. Aynı deformasyon seviyesine karşı gelen τ değeri kür süresindeki artışa karşılık (Şekil 4.25.b) σ = 200 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde 1 ve 7 günlük kür süreleri arasında düşme göstermiştir. σ = 100 kPa' da ise bu kür süreleri arasında artış gözlenmiştir. 30 gün sonunda elde edilen τ değeri ise σ = 100 ve 200 kPa için azalırken σ = 300 kPa için artmıştır. 90 günlük kür sonunda ise her yük kademesinde τ 90 günlük kür sonunda 30 günlük küre göre azalmıştır.

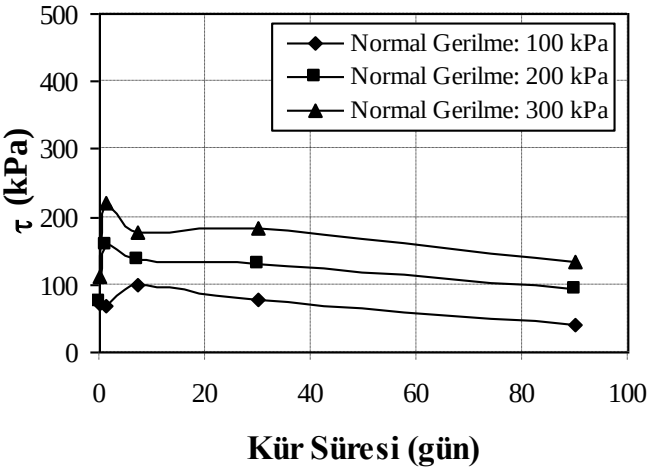


a) t= 0–90 gün

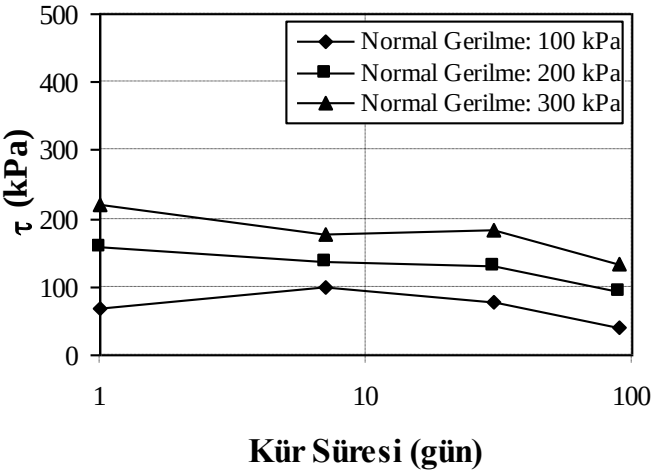


a) t= 1–90 gün

Şekil 4.24 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5)



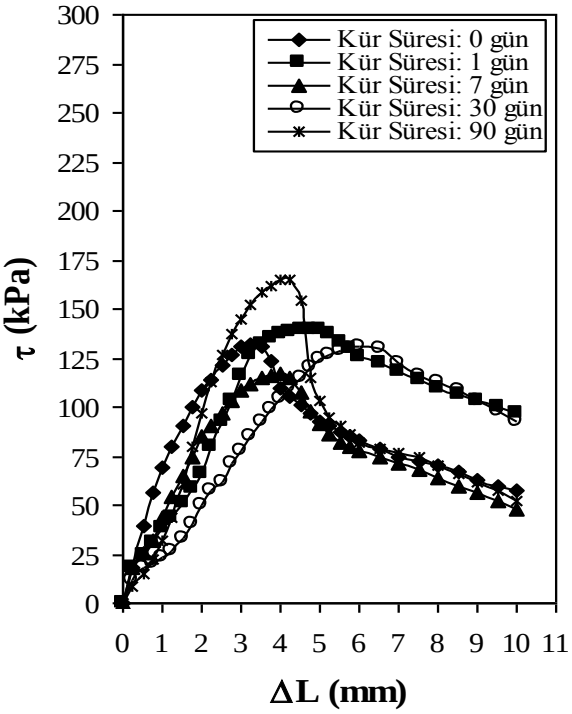
a) t= 0–90 gün



a) t= 1–90 gün

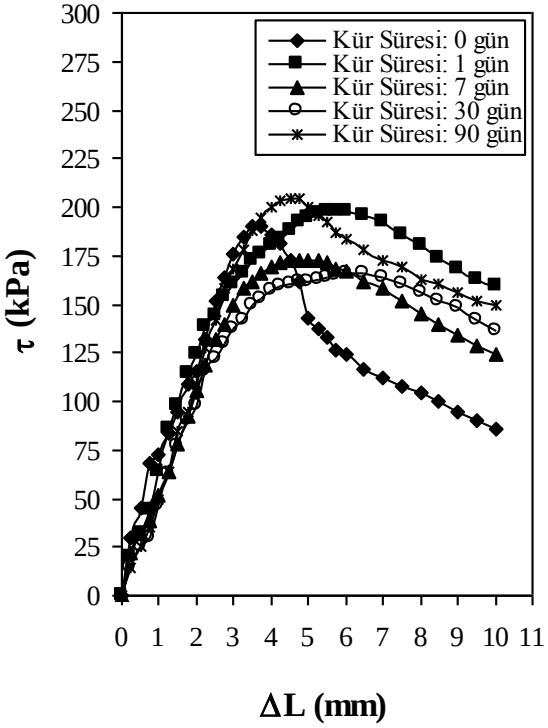
Şekil 4.25 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 5)

Şekil 4.26 ve 427' de % 10 çöp sızıntı suyu oranına ait 100 ve 200 kPa normal gerilme seviyelerine ait eğriler incelendiğinde; her iki gerilme seviyesi için τ_{maks}' ın 90 günlük kür için maksimum olduğu görülmüştür. σ = 300 kPa' da (Şekil 4.28) ise τ_{maks} t= 0 için maksimumdur. σ = 100 kPa' da 7 günlük kür sonunda τ_{maks} minimum değerdedir. σ = 200 ve 300 kPa' da ise τ_{maks} 30 günlük kür sonunda minimum olarak belirlenmiştir. Üç yük kademesine ait grafiklerden görüldüğü gibi kür süresindeki artışla birlikte maksimum kayma gerilmesine ulaşılan deformasyon seviyesi de artmıştır.



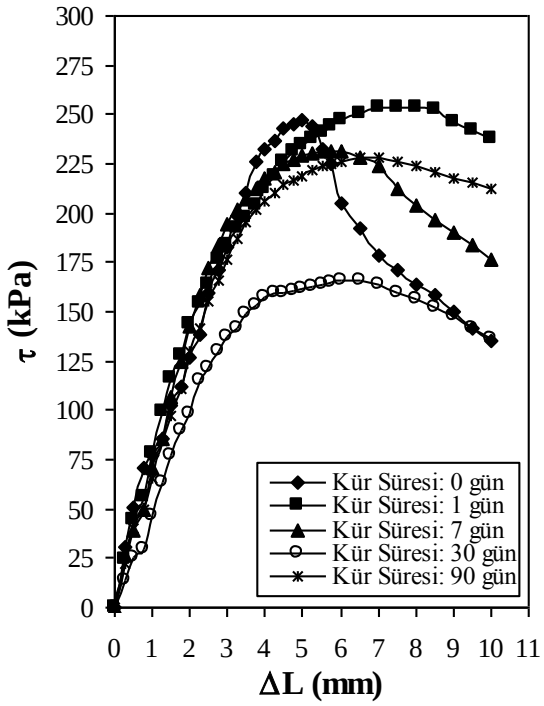
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.5
1	24.969	14.62
7	24.969	14.66
30	24.960	14.73
90	24.979	14.99

Şekil 4.26 : τ-ΔL (Çöp S: % 10, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.85
1	24.996	15.05
7	24.941	14.95
30	24.941	15.04
90	25	14.85

Şekil 4.27 : τ-ΔL (Çöp S: % 10, σ = 200 kPa)



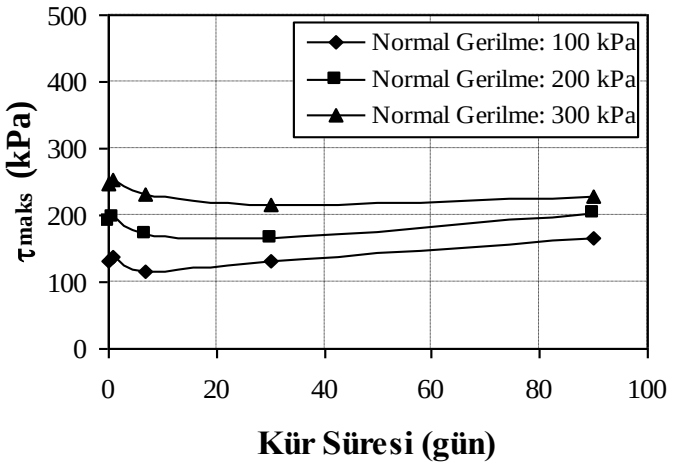
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	25	14.84
1	24.992	15.46
7	24.914	15.1
30	24.941	15.4
90	25	15.22

Şekil 4.28 : τ-ΔL (Çöp S: % 10, σ = 300 kPa)

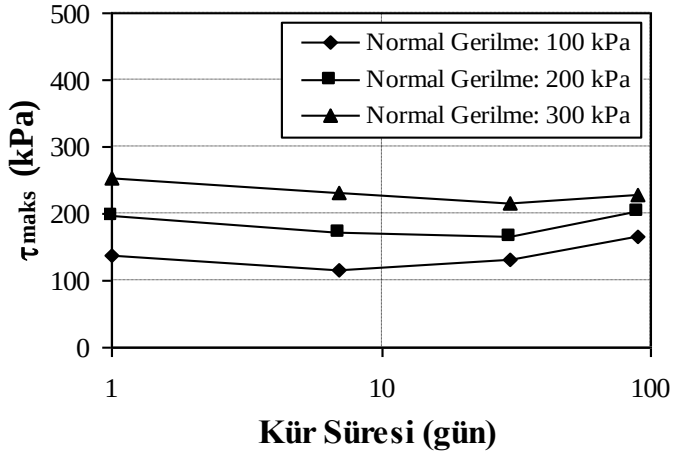
% 10 çöp sızıntı suyuna ait τ - ΔL grafiklerinden yararlanarak kür süresi ile zeminin kayma direnci değişimleri Şekil 4.29' da gösterilmiştir. 100 ve 200 kPa normal gerilme seviyelerinde 1 ve 90 gün küre bırakılmış numunelerin τ_{maks} değerleri küre bırakılmamış numunelere göre daha büyüktür (Şekil 4.29.a). 90 gün sonunda 100 kPa normal gerilme altında τ_{maks} değeri t= 0' a göre % 25 artmıştır. 200 kPa' da ise bu artış % 7 olarak belirlenmiştir. σ = 300 kPa' da ise sadece 1 gün küre bırakılmış numunenin τ_{maks} değeri küre bırakılmamışa göre artmıştır. Bu artış % 3 oranında olmuştur. Üç yük kademesinde de 7 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri t= 0' a göre % 8 oranında azalmıştır. Şekil 4.29.b' de görüldüğü gibi 200 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde τ_{maks} değeri 30 günlük kür sonunda lineer bir azalış göstermiştir. 100 ve 200 kPa normal gerilme kademelerinde τ_{maks} değeri 30 günlük kür süresi ile birlikte artmaya başlamıştır. Bu artış 90 günlük kürde de devam etmiştir. 300 kPa normal gerilmede ise 7 gündeki azalma 30 günde de devam etmiştir. 90 gün sonunda bu gerilme seviyesinde de 30 güne göre bir artış gözlenmiştir.

Deneylerin % 17 deformasyon seviyesine kadar sürdürülmüş olmasından dolayı bu deformasyon seviyesinde kayma gerilmesi (τ) değerinin kür süresi ile değişimini incelemek amacı ile Şekil 4.30 hazırlanmıştır. Şekil 4.30.a' da görüldüğü gibi 200 ve

300 kPa normal gerilmeleri için küre bırakılmış numunelerin τ değerleri küre bırakılmamış numuneye göre artmıştır. σ = 100 kPa' da ise t= 1 ve 30 gün için τ değeri t= 0' a göre artmıştır. Şekil 4.30.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de τ değeri 1 günlük küre göre 7 günlük kür sonunda azalmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde bu azalış 30 günlük kürde de devam etmiştir. 200 ve 300 kPa gerilme kademeleri için ise bu kür süresinde artış gözlenmiştir. 100 kPa normal gerilmede τ değeri 7 günde olduğu gibi tekrar düşerken 200 ve 300 kPa normal gerilmeleri için artmıştır. 100 kPa' da görülen bu düşüş τ_{maks} değerinden anlaşıldığı üzere ani yük boşalmasından kaynaklanmaktadır.

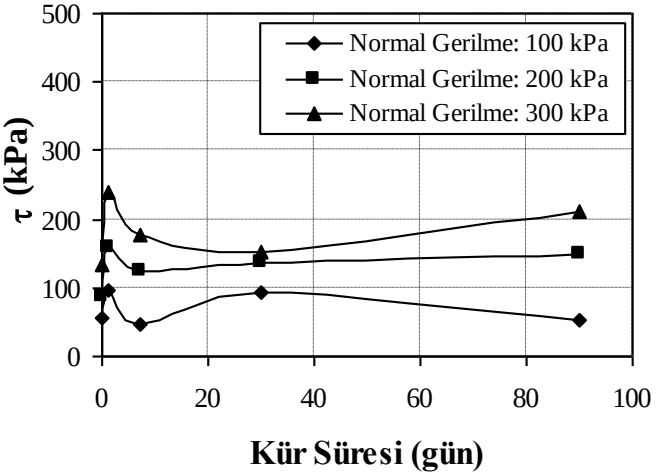


a) t= 0–90 gün

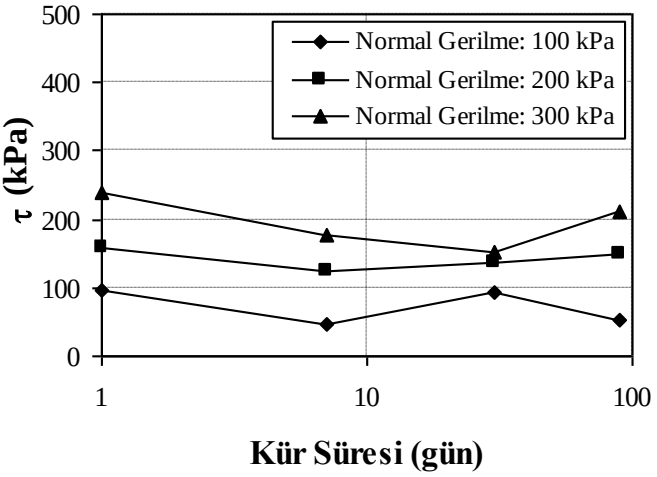


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.29 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 10)



a) t= 0–90 gün

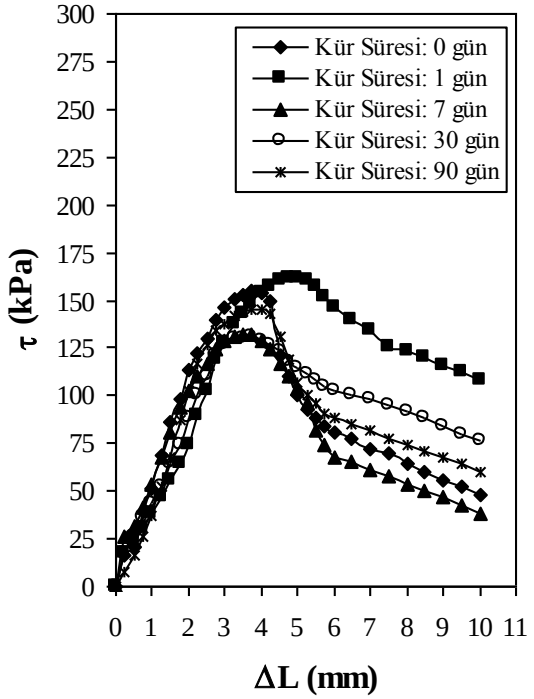


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.30 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 10)

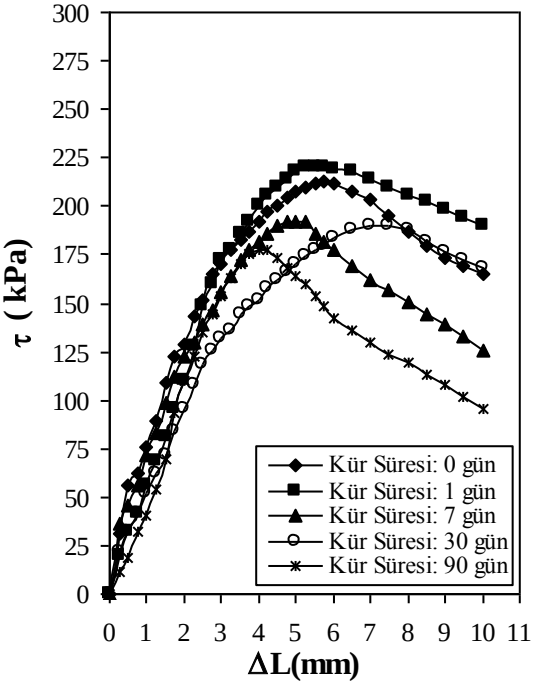
Şekil 4.31' de görüldüğü gibi % 20 çöp sızıntı suyu oranında σ = 100 kPa gerilme seviyesinde 30 gün küre bırakılmış numuneye ait τ_{maks} değeri en küçüktür. En büyük τ_{maks} ise 1 gün küre bırakılmış numuneye aittir. Kür süresinin artması ile τ_{maks} değeri düşme eğilimi göstermiştir. 7, 30 ve 90 günlük kür süreleri sonunda τ_{maks} küre bırakılmamış numuneye göre azalmıştır. 90 günlük kür sonunda τ_{maks} değerindeki azalma 7 ve 30 güne göre daha azdır. 1 günlük kür sonunda maksimum kayma gerilmesine diğer kür sürelerine göre daha büyük deformasyon seviyesinde ulaşılmıştır. σ = 200, 300 kPa gerilme seviyelerinde (Şekil 4.32 ve Şekil 4.33) τ_{maks} 90 günlük kür süresi için minimum, 1 günlük kür süresi için ise maksimumdur. τ_{maks}

değeri bu artışından sonra kür süresinin artması ile birlikte azalmıştır. Bu gerilme seviyelerinde τ_{maks} değerine ulaşılan kayma deformasyon değerleri de kür süresine bağlı olarak azalmıştır.



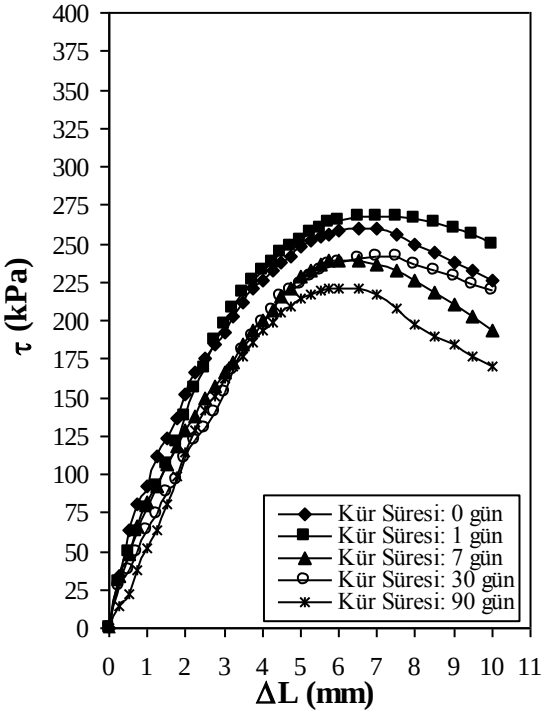
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	14.36
1	24.976	14.95
7	24.996	14.67
30	24.961	15.01
90	24.940	14.63

Şekil 4.31 : τ-ΔL (Çöp S: % 20, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	25	14.5
1	24.988	15.01
7	25	14.94
30	25	15.08
90	24.94	15.12

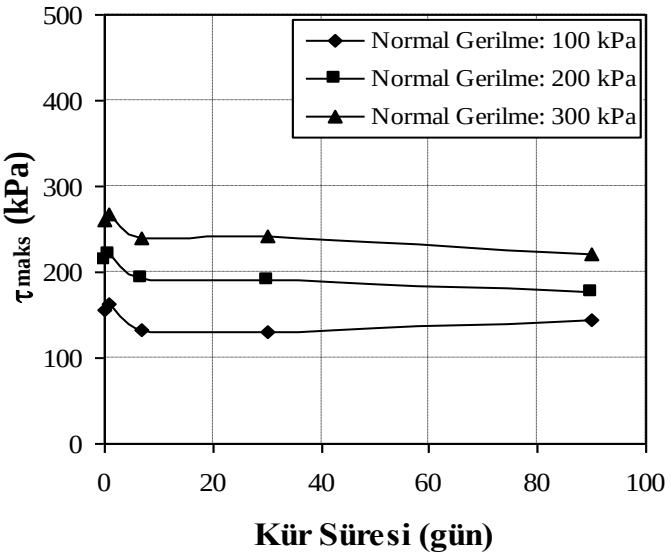
Şekil 4.32 : τ-ΔL (Çöp S: % 20, σ = 200 kPa)



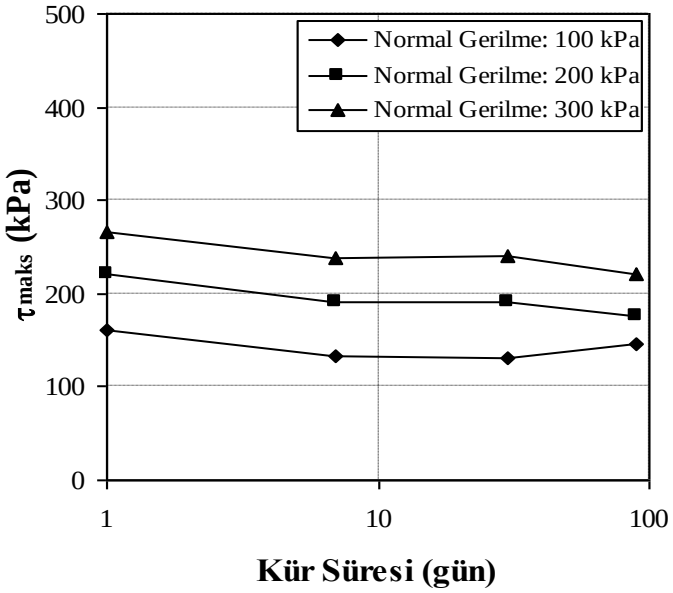
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.84
1	24.984	15.36
7	24.979	15.94
30	24.980	15.21
90	24.947	15.33

Şekil 4.33 : τ-ΔL (Çöp S: % 20, σ = 300 kPa)

% 20 çöp sızıntı suyu oranına ait τ - ΔL grafiklerinden yararlanarak kür süresi ile zeminin kayma direnci (τ_{maks}) değişimleri Şekil 4.34.a' da gösterilmiştir. 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde zemin davranışı paralellik gösterir. Bu gerilme kademelerinde 1 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri t= 0' a göre % 3 oranında artmıştır. 100 kPa normal gerilmede ise t= 0' a göre τ_{maks} % 4.5 oranında artmıştır. 1 günlük kürden sonra τ_{maks} değeri üç gerilme kademesinde de azalmıştır. En çok azalma 7 günlük kür sonunda gözlenmiştir. 100 kPa normal gerilmede t= 0' a göre kayma direnci % 14 azalmıştır. 200 kPa' da % 28, 300 kPa normal gerilmede ise % 22 kayma direncinde azalma görülmüştür. Şekil 4.34.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de τ_{maks} değeri 7 günlük kür sonunda 1 günlük küre göre azalmıştır. 30 günlük kür sonunda ise 200 ve 300 kPa normal gerilme kademelerinde τ_{maks} değeri artarken 100 kPa normal gerilmede γ_k değerinin daha düşük olmasından dolayı τ_{maks} % 0.75 azalmıştır. 90 günlük kür sonunda 200 ve 300 kPa gerilme kademelerinde τ_{maks} değeri 30 güne göre azalmıştır.



a) t= 0–90 gün

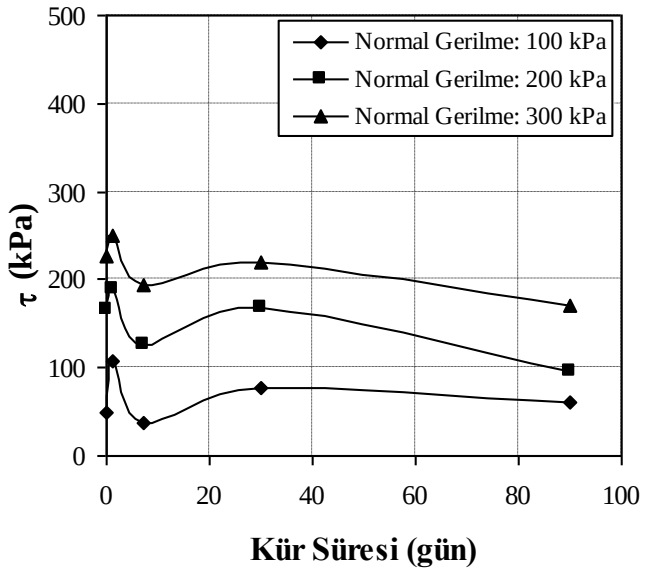


b) t= 1–90 gün

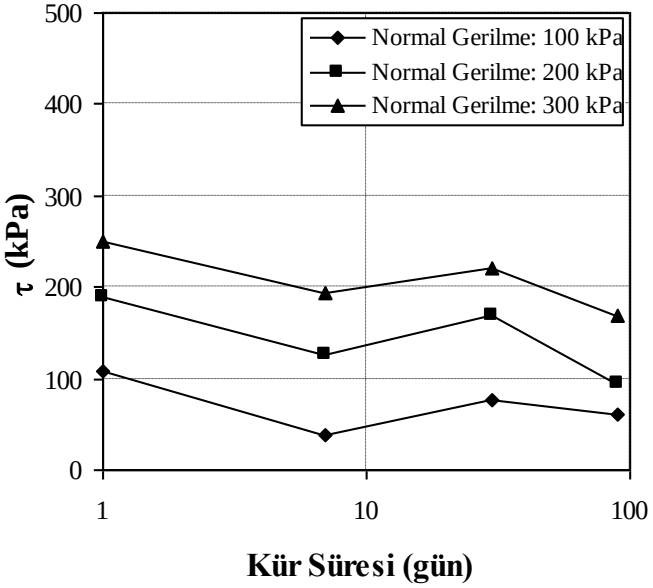
Şekil 4.34 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 20)

% 20 çöp sızıntı suyu oranı için % 17 kayma deformasyonuna karşı gelen kayma gerilmesinin kür süresi ile değişimi Şekil 4.35.a' da görülmektedir. 200 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde zemin davranışı paralellik gösterir. Üç gerilme seviyesinde de t= 0' a göre 1 günlük kür sonunda τ artarak maksimum olmuştur. t= 0' a göre τ değeri 7 günlük kür sonunda azalmaya başlamıştır. Bu kür süresinde τ değeri üç yük kademesinde de minimumdur. Şekil 4.35.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de τ değeri 1 günlük küre göre 7 günlük kür sonunda azalmıştır. 30 günlük kür

sonunda ise 7 güne göre τ değerinde artış gözlenmiştir. 90 günlük kür sonunda ise τ değeri 30 günlük küre göre azalmıştır.



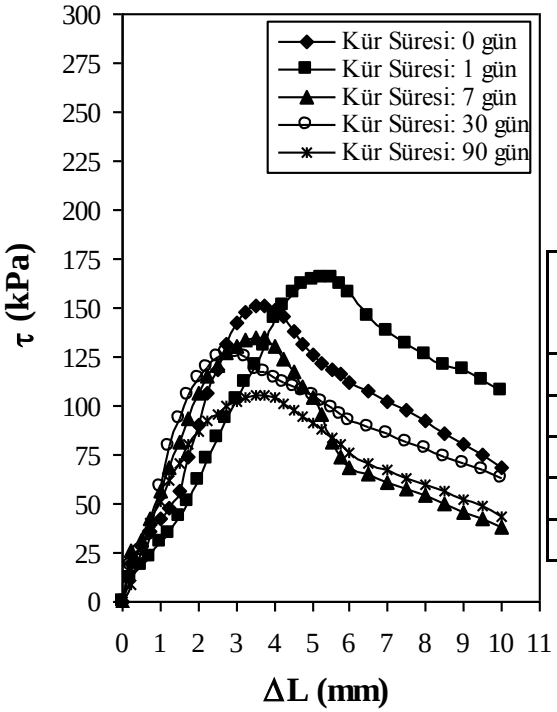
a) t= 0–90 gün



b) t= 1–90 gün

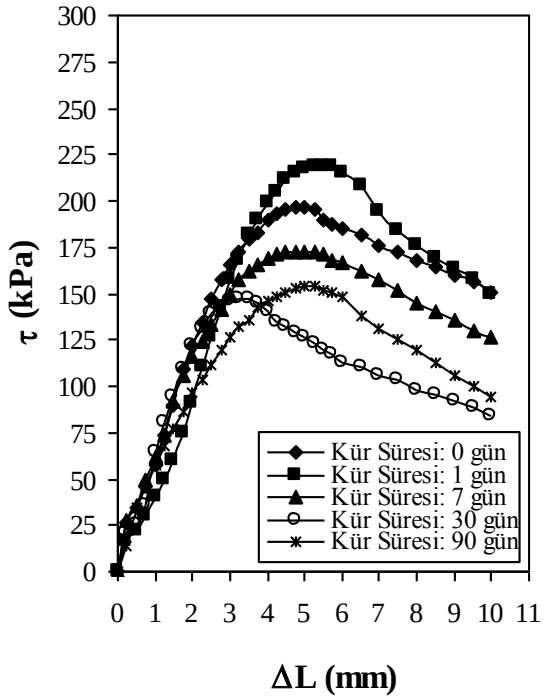
Şekil 4.35 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 20)

% 30 çöp sızıntı suyuna oranında Şekil 4.36, 4.37 ve 4.38' de görüldüğü gibi τ_{maks} 90 günlük kür sonunda minimum, 1 günlük kür sonunda ise maksimumdur. τ_{maks} değeri 1 günlük kür süresi sonunda artarken daha büyük kür sürelerinde azalmıştır. 100 ve 200 kPa normal gerilme altında 1 günlük kür sonunda τ_{maks} değerine ulaşılan yatay deformasyon seviyesi t= 0' a göre daha büyüktür. Bu kür süresinden sonra ise pik noktaya ulaşılan yatay deformasyon seviyesi 30 günlük kür sonunda azalırken 7 ve 30 günde t= 0 ile aynıdır. 300 kPa normal gerilme seviyesinde ise küre bırakılmış numunelerde pik noktaya ulaşılan yatay deformasyon seviyeleri küre bırakılmamış numuneye göre azalmıştır.



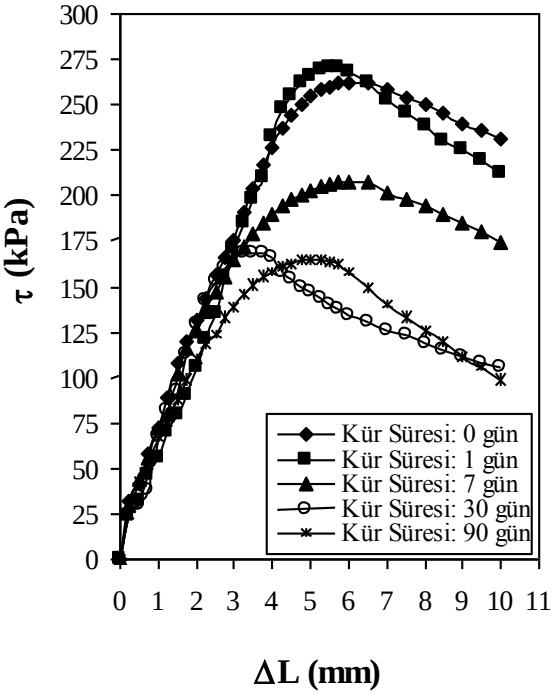
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	14.5
1	24.949	14.56
7	24.980	14.69
30	24.951	15.25
90	24.98	14.78

Şekil 4.36 : τ-ΔL (Çöp S: % 30, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	15.26
1	24.980	15.03
7	24.960	14.97
30	24.980	15.31
90	24.980	15.41

Şekil 4.37 : τ-ΔL (Çöp S: % 30, σ = 200 kPa)

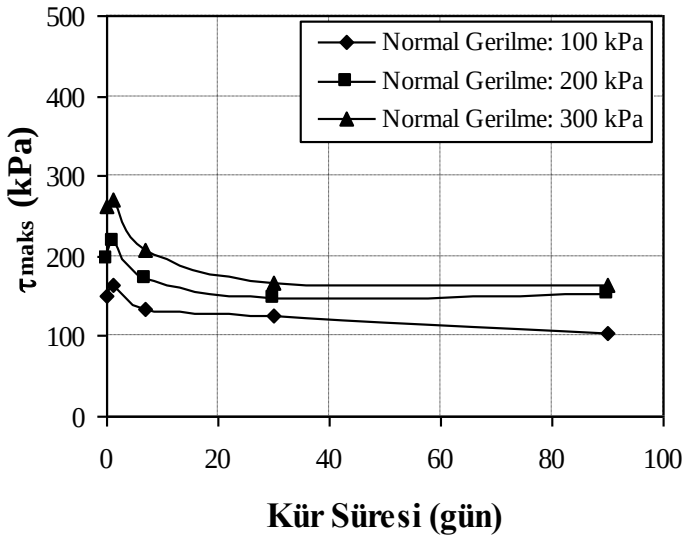


Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	15.26
1	24.980	15.73
7	24.940	15.91
30	24.960	15.47
90	24.98	16.14

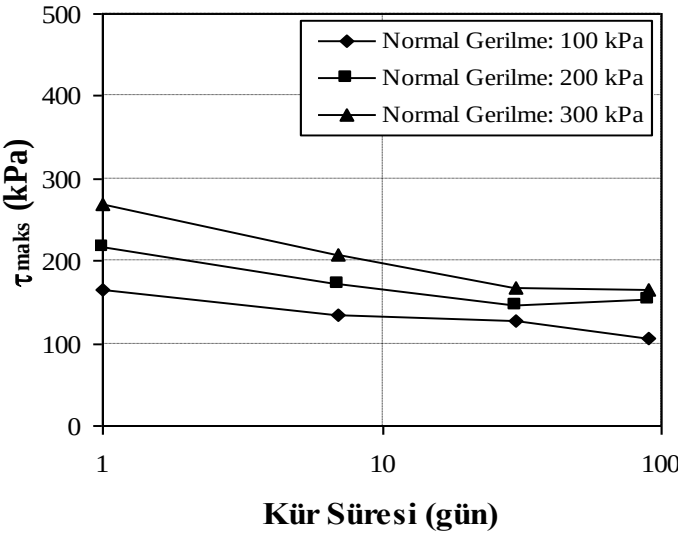
Şekil 4.38 : τ-ΔL (Çöp S: % 30, σ = 300 kPa)

Şekil 4.39.a' da görüldüğü gibi % 30 çöp sızıntı suyu oranında üç yük kademesinde de t= 0' a göre 1 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri artarak maksimum değere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra ise τ_{maks} değeri kür süresine bağlı olarak t= 0' a göre azalmıştır. 100 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde 90 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri minimumdur. 200 kPa normal gerilmede ise γ_k değerinin 90 güne göre daha küçük olmasından dolayı 30 günlük kür sonunda τ_{maks} minimum olmuştur. Şekil 4.39.b' de görüldüğü gibi 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde 30 günlük kür sonuna kadar τ_{maks} lineer bir azalış göstermiştir. 200 kPa normal gerilme altında 90 günlük kür sonunda τ_{maks} 30 günlük küre göre % 5 oranında artmıştır. 300 kPa normal gerilmede ise 90 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri 30 günlük küre göre % 2 oranında azalmıştır. Bu nedenle 30 ve 90 günlük kür süreleri arasında τ_{maks} değişimi yatay bir hal almıştır. 100 kPa gerilme seviyesinde ise 90 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri 30 günlük küre göre % 17 oranında azalmıştır.

Şekil 4.40.a' da görüldüğü gibi % 30 çöp sızıntı suyu oranında % 17 deformasyona karşı gelen kayma gerilmesi üç yük kademesinde de kür süresindeki artışla azalmıştır. Şekil 4.40.b' de yine aynı deformasyon seviyesindeki kayma gerilmesinin 1 ve 90 günlük kür süreleri için değişimi ele alınmıştır. Üç yük kademesinde de 1 günlük küre göre 7 günlük kür sonunda τ azalmıştır. 200 ve 300 kPa normal gerilme kademelerinde 30 günlük kür sonunda da bu azalma devam ederken 100 kPa gerilmede ise 30 günlük kür sonunda bir artış gözlenmiştir. 90 günlük kür sonunda ise τ değeri 30 günlük küre göre azalmıştır. 200 kPa' da ise 90 günlük kür sonunda 30 güne göre τ değerinde % 12 oranında artış gözlenmiştir. 300 kPa normal gerilmede ise 30 ve 90 günlük kür süreleri arsında kayma gerilmesindeki değişim % 6 oranındadır. Bu nedenle bu kür süreleri arasında kayma direnci değişimi yatay bir hal almıştır.

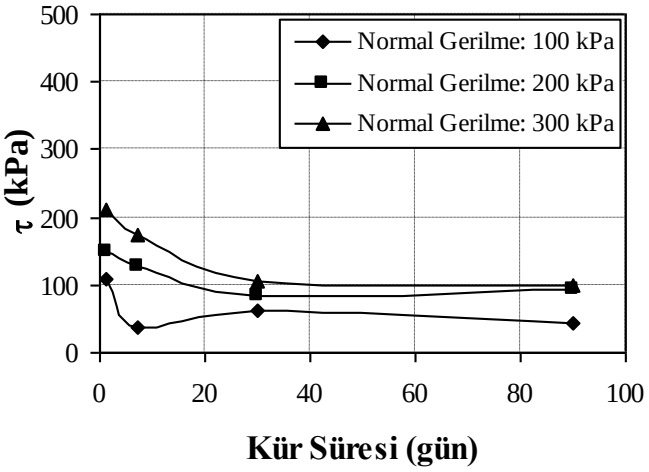


a) t= 0–90 gün

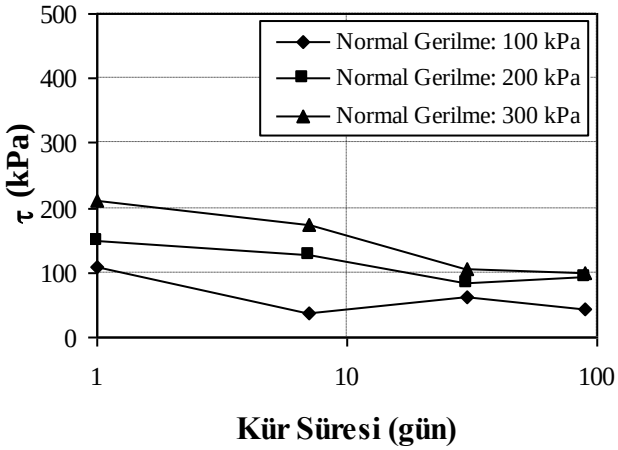


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.39 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: %30)



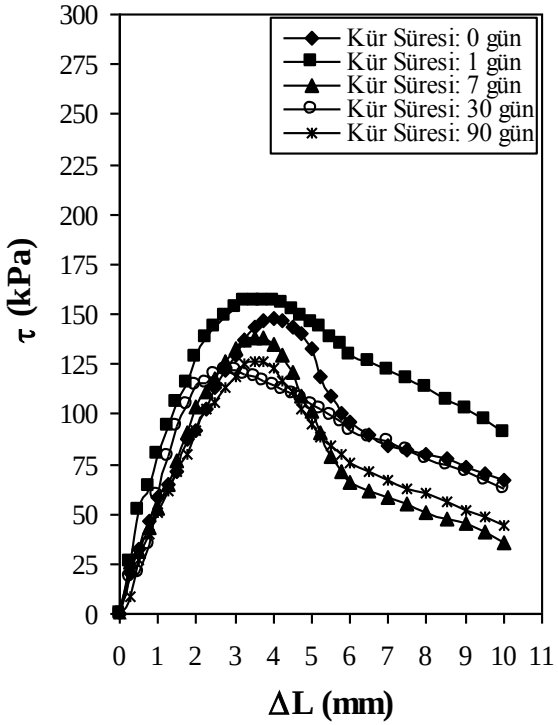
a) t= 0–90 gün



b) t= 1–90 gün

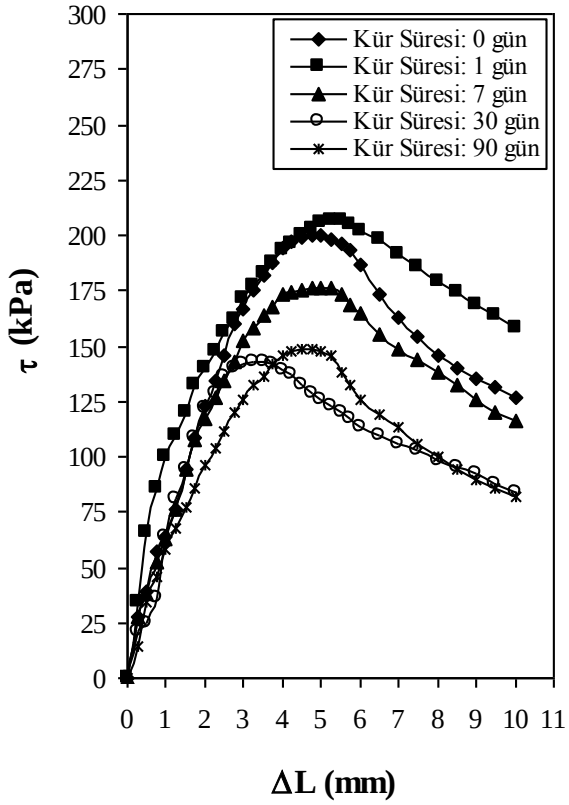
Şekil 4.40 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 30)

% 40 çöp sızıntı suyuna ait Şekil 4.41, 4.42 ve 4.43' de görüldüğü gibi τ_{maks} 30 günlük kür sonunda minimum, 1 günlük kür sonunda ise maksimumdur. τ_{maks} değeri 1 günlük kür sonunda artarken daha büyük kür sürelerinde azalmıştır. 100 ve 200 kPa normal gerilme altında 1 günlük kür sonunda τ_{maks} değerine karşı gelen yatay deformasyon seviyesi t= 0' a göre daha büyüktür. Bu kür süresinden sonra ise pik noktaya ulaşılan yatay deformasyon seviyesi 30 günlük kür sonunda azalırken 7 ve 90 günde t= 0 ile aynıdır. 300 kPa normal gerilme seviyesinde ise küre bırakılmış numunelerde pik noktaya ulaşılan yatay deformasyon seviyeleri küre bırakılmamış numuneye göre daha düşüktür.



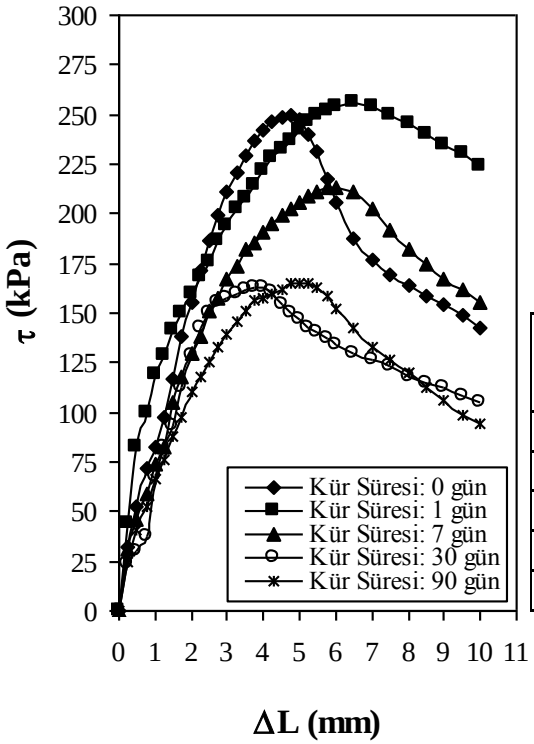
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.41
1	24.980	14.85
7	24.960	14.71
30	24.960	15.27
90	24.980	14.83

Şekil 4.41 : τ-ΔL (Çöp S: % 40, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.55
1	24.996	14.98
7	24.980	14.98
30	24.979	15.41
90	24.970	14.95

Şekil 4.42 : τ-ΔL (Çöp S: % 40, σ = 200 kPa)



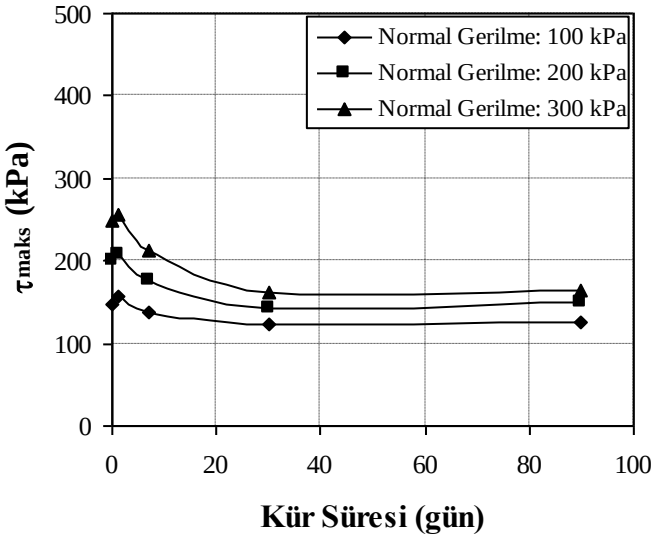
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	14.77
1	24.990	15.46
7	24.970	16.09
30	25	15.53
90	24.980	15.33

Şekil 4.43 : τ-ΔL (Çöp S: % 40, σ = 300 kPa)

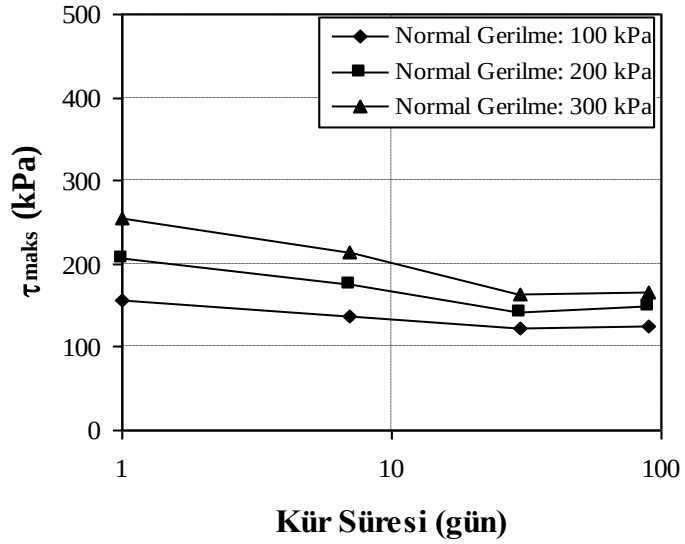
% 40 çöp sızıntı suyuna ait τ - ΔL grafiklerinden yararlanarak hazırlanan kür süresi ile zeminin kayma direnci (τ_{maks}) değişimleri grafiği Şekil 4.44' de gösterilmiştir. Üç yük kademesinde de t= 0' a göre 1 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri artarak en büyük değere ulaşmıştır (Şekil 4.44.a). Bu kür süresinden sonra ise τ_{maks} değeri kür süresine bağlı olarak t= 0' a göre azalmıştır. Üç yük kademesinde de 30 günlük kür sonunda τ_{maks} minimum olmuştur. Şekil 4.44.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de 30 günlük kür sonuna kadar τ_{maks} azalırken 90 günlük kür sonunda ise bir miktar artmıştır. Bu artış 100 kPa gerilmede % 3, 200 kPa gerilmede % 4 ve 300 kPa normal gerilmede % 1' dir.

% 40 çöp sızıntı suyu oranında kür süresi ile kayma gerilmesindeki değişimi incelemek amacı ile deneyin tamamlandığı % 17 yatay (kayma) deformasyon seviyesi ele alınmıştır. Şekil 4.45.a' da görüldüğü gibi 200 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde zemin davranışı paralellik gösterir. Ayrıca üç gerilme seviyesinde de 1 günlük kür sonunda t= 0' a göre kayma gerilmesi artıp diğer kür süreleri için azalmıştır. Bu nedenle % 17 deformasyona karşı gelen kayma direnci 1 günlük kür için maksimum, 90 günlük kür için ise minimumdur. 200 ve 300 kPa normal gerilme

kademelerinde 7 günlük kürden başlayarak 30 günlük kür sonuna kadar kayma gerilmesi lineer bir azalış göstermiştir (Şekil 4.45.b). Bu azalma 90 günlük kür sonunda daha azdır. 100 kPa gerilmede ise 30 günlük kür sonunda 7 günlük küre göre bir artış söz konusudur. 90 günlük kür sonunda ise τ değeri 30 günlük küre göre azalmıştır.

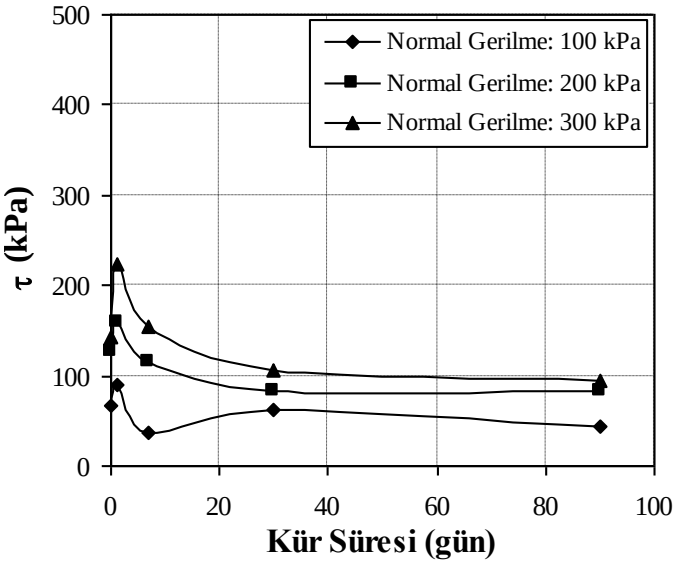


a) t= 0–90 gün

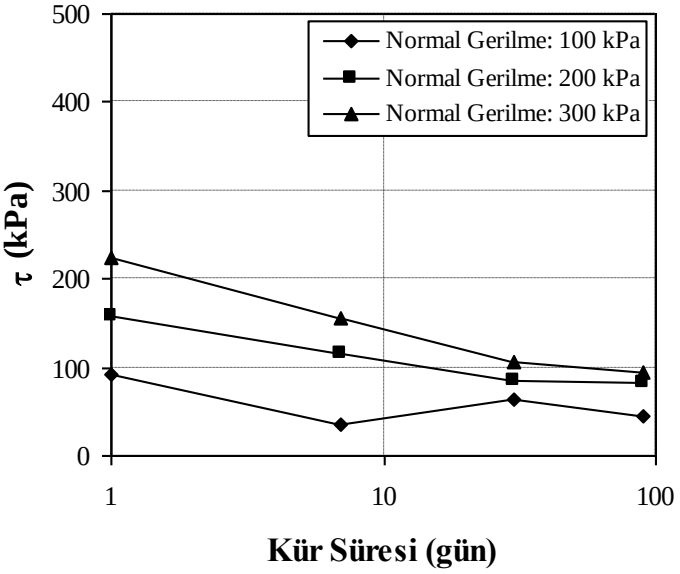


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.44 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 40)



a) t= 0–90 gün

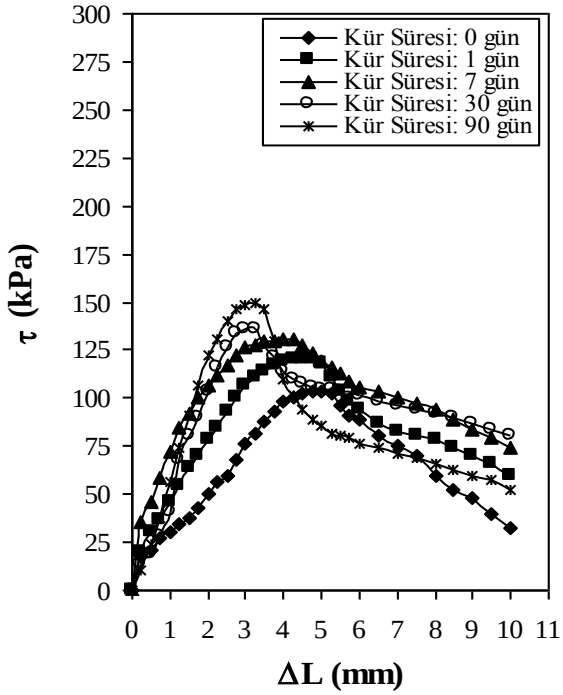


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.45 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 40)

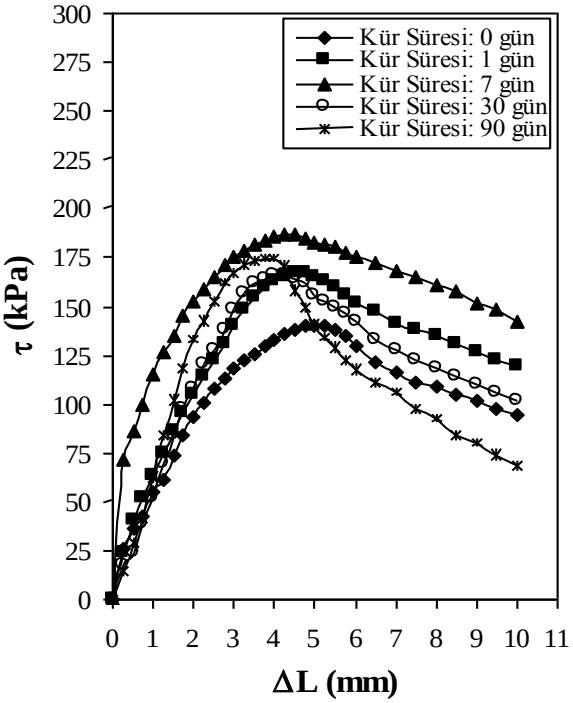
% 50 çöp sızıntı suyuna ait Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48' de görüldüğü gibi kür sürelerine ait başlangıç kayma gerilmeleri % 2 yatay deformasyon değerine kadar yakın değerlerde hareket etmiş deformasyon seviyesinin artması ile birlikte kür sürelerine özgü davranışlar ortaya çıkmıştır. Örneğin $\sigma = 100$ kPa normal gerilme eğrisi için τ_{maks} 90 günlük kür sonunda maksimum, t= 0' da ise minimumdur. Diğer gerilme seviyelerinde ise τ_{maks} 7 günlük kür sonunda maksimumdur. Grafiklerde görüldüğü

gibi 30 ve 90 günlük kür sürelerinde kayma gerilmeleri daha düşük yatay deformasyon değerlerinde pik noktaya ulaşılmış ve bu noktadan sonra kayma gerilmelerinde ani düşme gözlenmiştir.



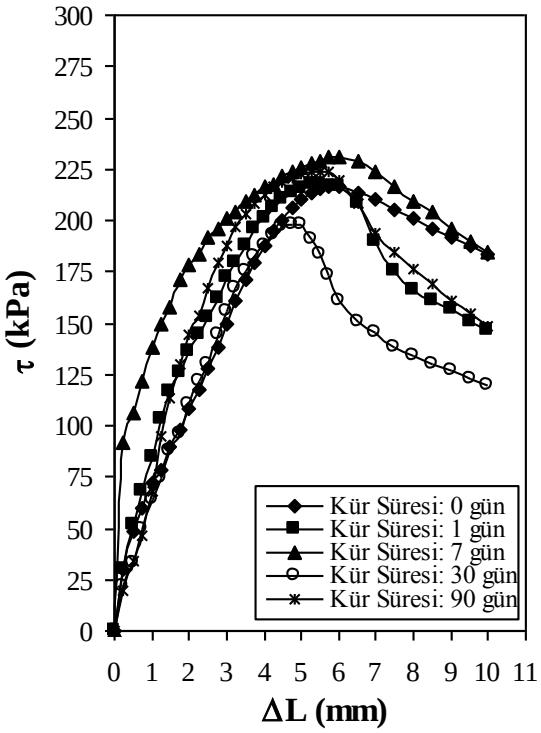
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.48
1	24.980	14.77
7	24.959	14.91
30	24.920	15.04
90	24.980	15.01

Şekil 4.46 : τ-ΔL (Çöp S: % 50, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.996	14.91
1	24.980	14.96
7	25	15.02
30	24.897	15.27
90	24.960	15.24

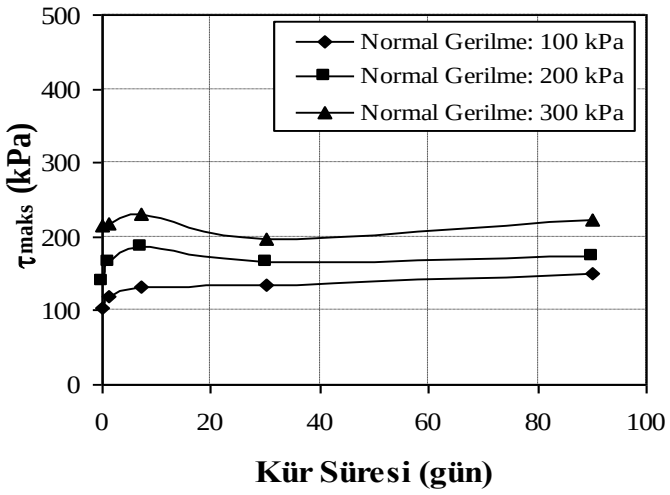
Şekil 4.47 : τ-ΔL (Çöp S: % 50, σ = 200 kPa)



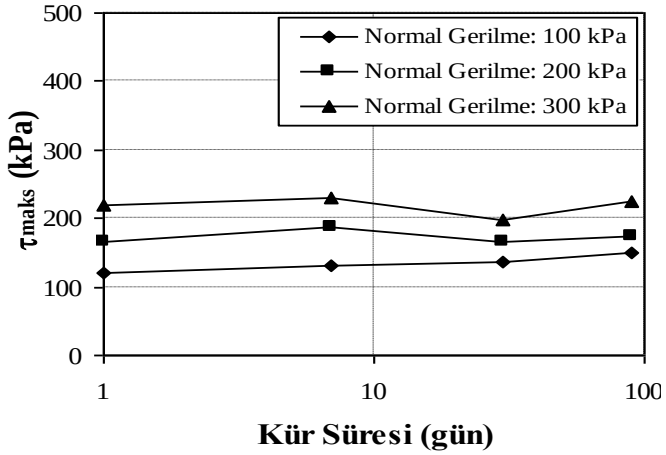
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.988	15.17
1	24.980	15.31
7	25	15.5
30	24.942	15.46
90	24.960	15.43

Şekil 4.48 : τ-ΔL (Çöp S: % 50, σ = 300 kPa)

% 50 çöp sızıntı suyu oranı için τ_{maks}' ın kür süresi ile değişimi Şekil 4.49' da verilmiştir. Üç yük kademesinde de t= 0' a göre 7 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri artıp 30 günlük kür sonunda ise azalmıştır (Şekil 4.49.a). Bu kür süresinden sonra τ_{maks} artmaya başlamıştır ve 90 günlük kür sonunda maksimum değerine ulaşmıştır. Şekil 4.49.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de zemin davranışı paralellik gösterir. 1 günlük küre göre 7 günlük kür sonunda τ_{maks} artmıştır. 30 günlük kür ile birlikte τ_{maks} azalmıştır. Kayma gerilmesi üç normal gerilme seviyesinde de 90 günlük kür sonunda lineer bir artış göstermiştir.



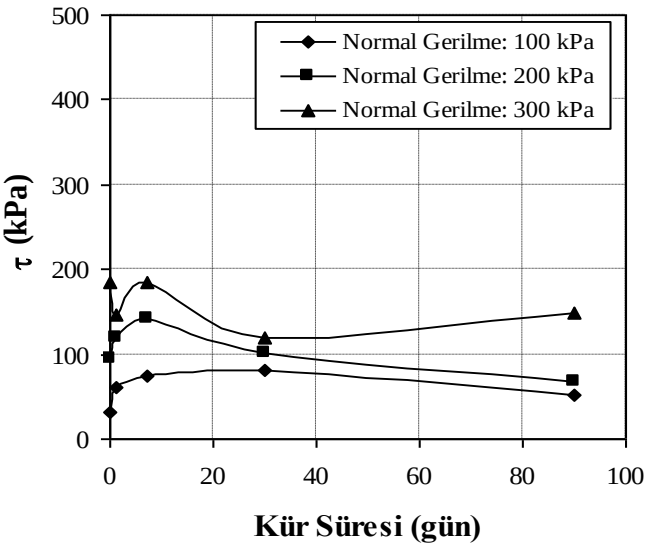
a) t= 0–90 gün



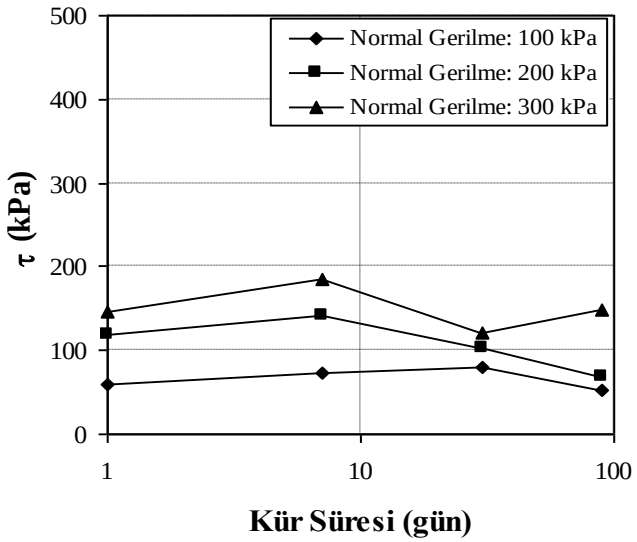
b) t= 1–90 gün

Şekil 4.49 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: % 50)

Şekil 4.50.a' da görüldüğü gibi % 50 çöp sızıntı suyu oranında % 17 deformasyona karşı gelen kayma gerilmesi üç normal gerilme seviyesinde 1 ve 7 günlük kür süreleri sonunda artmıştır. % 17 yatay deformasyona karşı gelen kayma gerilmesi 200 ve300 kPa normal gerilme seviyelerinde 7 günlük kür sonunda en büyüktür. 100 kPa normal gerilmede ise küre bırakılmamış numunenin τ değeri % 17 deformasyon için maksimumdur. Şekil 4.50.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de 30 günlük kür sonunda kayma gerilmesi azalmıştır. 30 günlük kürden sonra 90 günlük kür sonunda kayma gerilmesi 100 ve 200 kPa için azalırken 300 kPa normal gerilmede artmıştır.



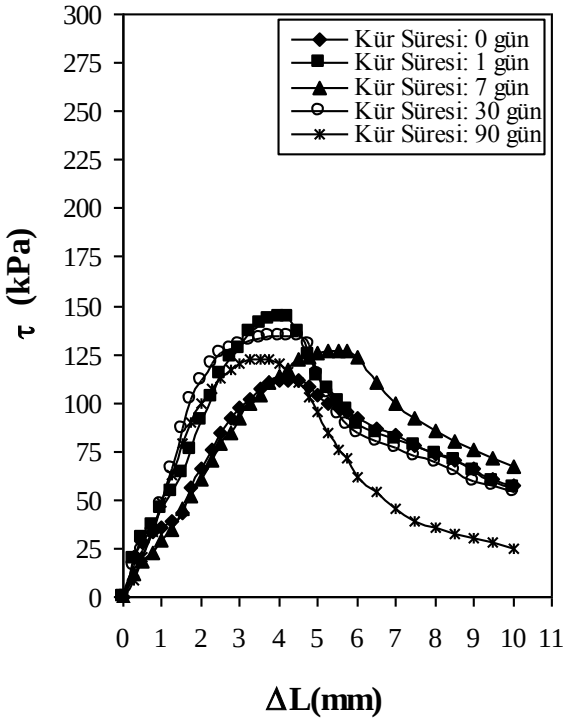
a) t= 0–90 gün



b) t= 1–90 gün

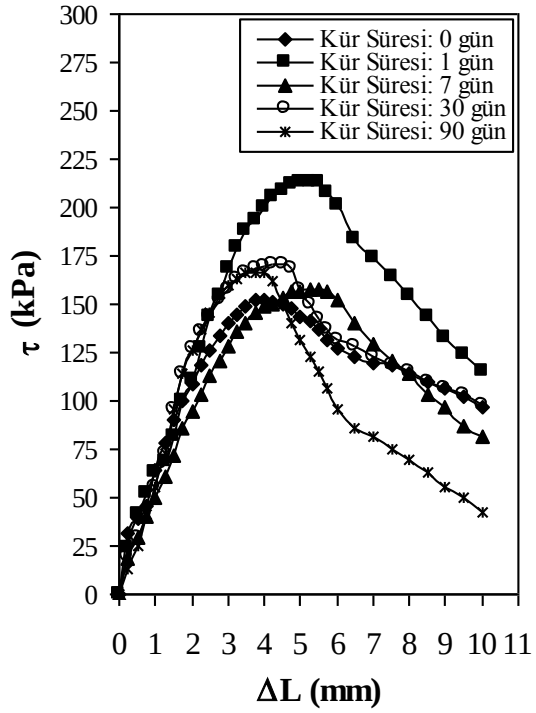
Şekil 4.50 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 50)

% 100 çöp sızıntı suyuna ait Şekil 4.51 ve 4.52' de görüldüğü gibi $\sigma = 100$ ve 200 kPa normal gerilme seviyeleri için τ_{maks} t= 1 günlük kür sonunda maksimum, t= 0 için ise minimumdur. $\sigma = 300$ kPa gerilme seviyesinde ise τ_{maks} t= 7 gün için minimum, t= 0 için ise maksimumdur. Bu kür oranında kayma gerilmeleri 1 günlük kür sonunda artmış, 7 günlük kür sonunda azalmış ve bu kür süresine göre 30 ve 90 günlük kürlerin sonunda tekrar artmıştır. Fakat $\sigma = 300$ kPa gerilme seviyesinde (Şekil 4.53) 90 gün sonundaki artışa rağmen τ_{maks} değeri küre bırakılmamış numunelerden daha düşüktür.



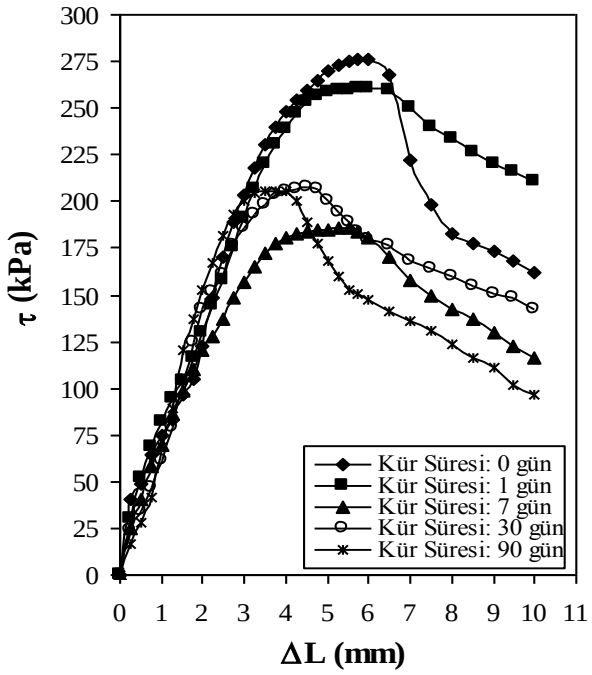
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	25	14.53
1	24.960	14.84
7	24.980	14.85
30	24.980	14.76
90	24.940	14.98

Şekil 4.51 : τ-ΔL (Çöp S: % 100, σ = 100 kPa)



Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	14.98
1	24.940	15.41
7	24.935	15.35
30	24.980	15.41
90	24.960	15.49

Şekil 4.52 : τ-ΔL (Çöp S: % 100, σ = 200 kPa)



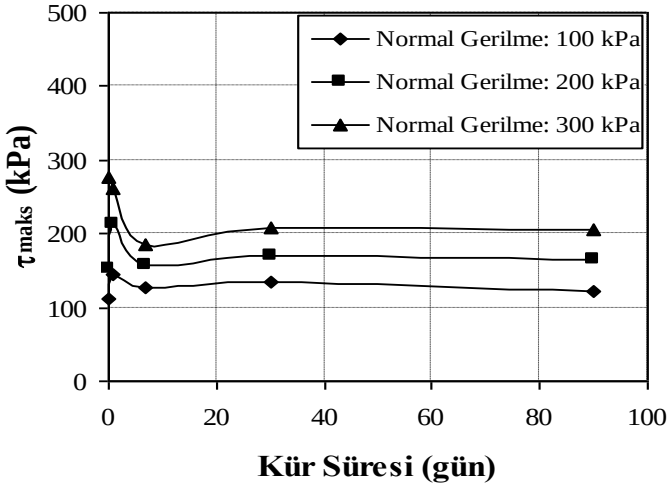
Kür Süresi (gün)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.990	15.44
1	24.960	15.69
7	24.940	15.54
30	24.980	15.65
90	24.940	15.49

Şekil 4.53 : τ-ΔL (Çöp S: % 100, σ = 300 kPa)

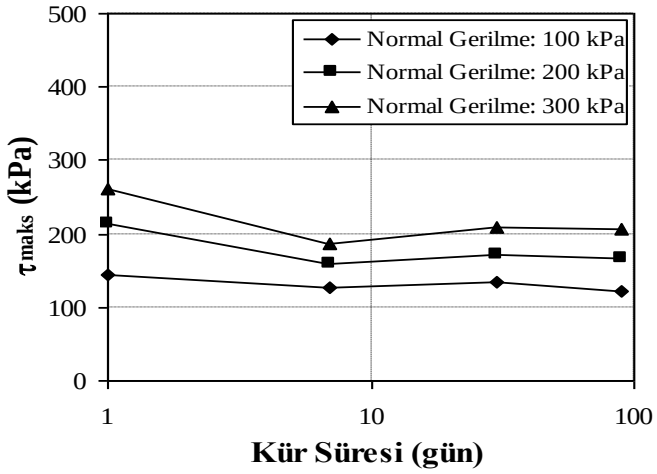
Şekil 4.54.a' da görüldüğü gibi % 100 çöp sızıntı suyu oranında 100 ve 200 kPa normal gerilme altında küre bırakılmamış numunelerin τ_{maks} değeri minimumdur. 1 günlük kür sonunda ise τ_{maks} maksimumdur. 300 kPa normal gerilme seviyesinde ise küre bırakılmamış numunelerin τ_{maks} değeri maksimumdur. 7 günlük kür sonunda ise bu gerilme seviyesi için τ_{maks} değeri minimumdur. Şekil 4.54.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de 1 günlük küre göre 7 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri azalmıştır. 30 günlük kür sonunda τ_{maks} değeri artmıştır. 90 günlük kür sonunda ise τ_{maks} değeri 30 günlük küre göre azalmıştır. Yük kademesi arttıkça azalma miktarı düşmüştür. 100 kPa normal gerilmede % 9 oranında düşme olurken 200 kPa normal gerilmede % 3 ve 300 kPa' da ise % 0.5 oranında olmuştur. Bu nedenle 200 ve 300 kPa gerilme kademelerinde 30 ve 90 günlük kür süreleri arasında τ_{maks} grafiği yatay konumdadır.

% 100 çöp sızıntı suyu oranında kür süresi ile kayma gerilmesindeki değişimi incelemek amacı ile deneyin tamamlandığı % 17 yatay (kayma) deformasyon seviyesi değerleri karşılaştırmada kullanılmıştır. Şekil 4.55.a' da görüldüğü gibi 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde t= 0' a göre 1 günlük kür sonunda kayma gerilmesi artmıştır. Kayma gerilmesi % 17 yatay deformasyon için maksimumdur.

Bu kür süresinden sonra kayma gerilmesi azalarak 90 günlük kür sonunda minimum olmuştur. 100 kPa normal gerilmede ise γ_k değerinin diğer yük kademelerine göre daha düşük olmasından dolayı 1 günlük kür sonunda kayma gerilmesi % 2 oranında azalmıştır. 7 günlük kür sonunda ise en büyük kayma gerilmesi değerine ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra kayma gerilmesi azalarak 90 günlük kür sonunda minimum olmuştur. Şekil 4.55.b' de görüldüğü gibi üç yük kademesinde de 7 günlük kür sonunda kayma gerilmesi azalmıştır. 200 ve 300 kPa normal gerilmelerde 30 günlük kür sonunda kayma gerilmesi 7 günlük küre göre bir artış göstermiştir. 90 günlük kür sonunda ise kayma gerilmesi azalmıştır. 100 kPa normal gerilmede ise 7 günlük kürden sonra kayma gerilmesi azalarak 90 günlük kür sonunda diğer kür sürelerine göre azalmıştır.

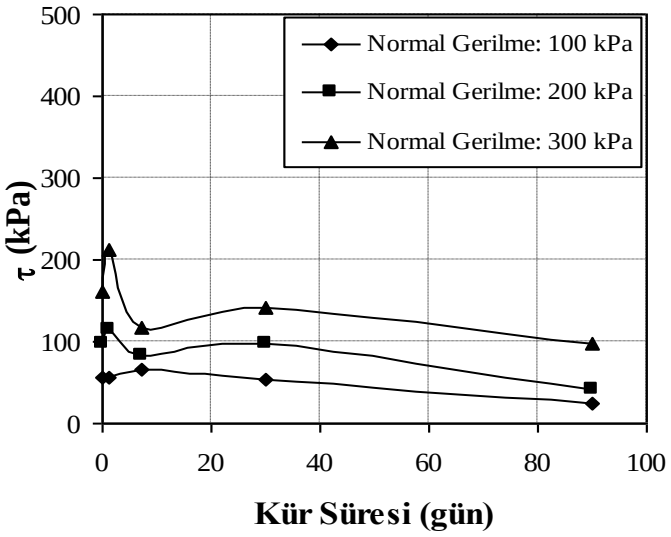


a) t= 0–90 gün

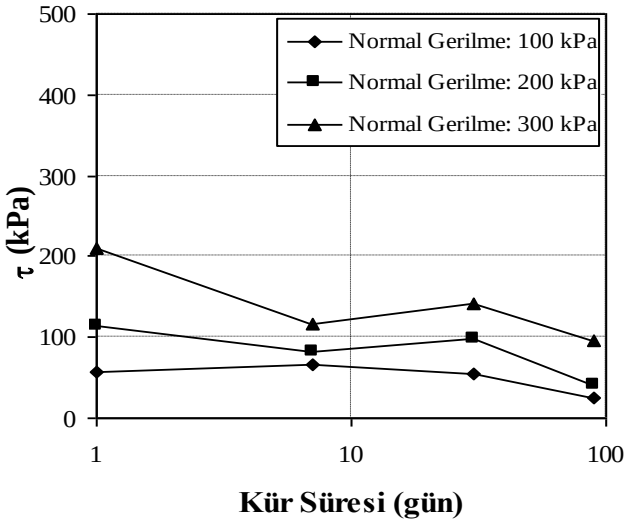


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.54 : Kür Süresinin τ_{maks} Üzerine Etkisi (Çöp S: %100)



a) t= 0–90 gün

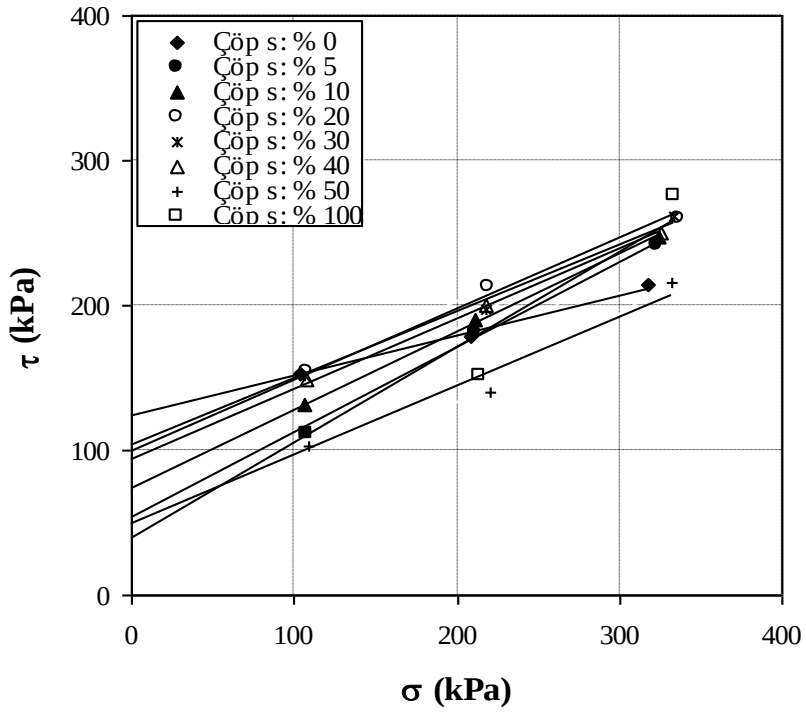


b) t= 1–90 gün

Şekil 4.55 : Kür Süresinin τ Üzerine Etkisi (γ: % 17, Çöp S: % 100)

4.4.3. Kayma Direnci Üzerinde Kür Oranının Etkisi

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. Bu amaçla küre bırakılmamış numunelere ait konsolidasyonsuz-drenajsız deney sonuçları kullanılarak Şekil 4.56' da görüldüğü gibi tüm kür süreleri için kırılma zarfları çizilmiştir. Diğer kür sürelerine ait grafikler Ek B' de verilmiştir. Daha sonra ise bu grafiklerden yararlanarak c, ϕ değerleri hesaplanmıştır

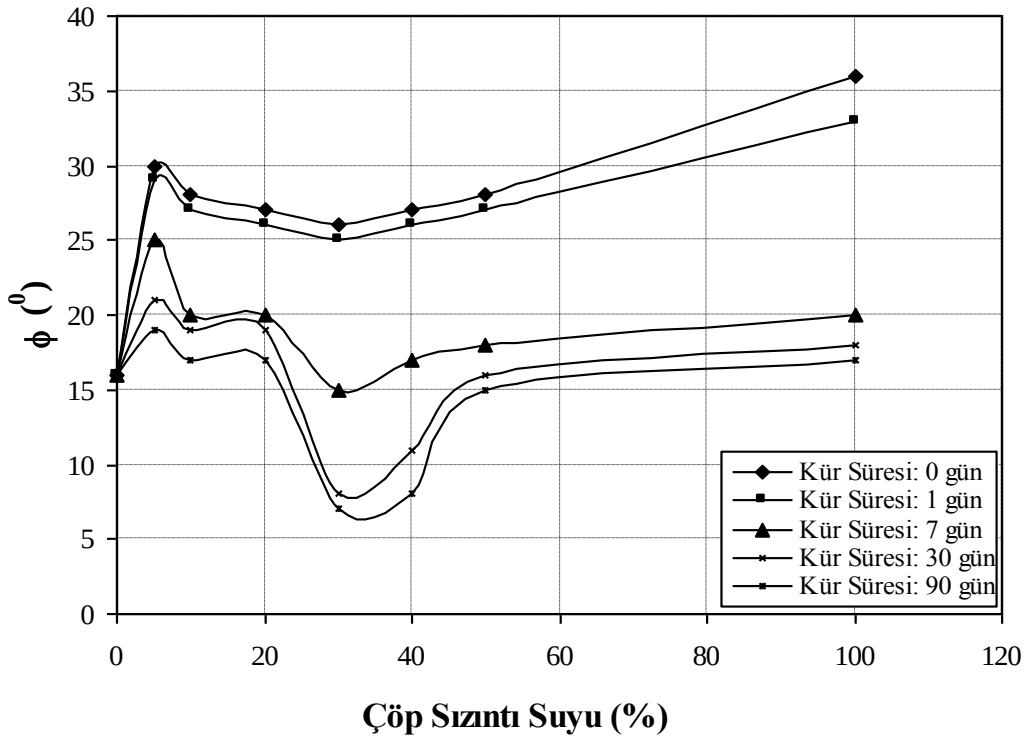


Şekil 4.56 : Kırılma Zarfı (t=0)

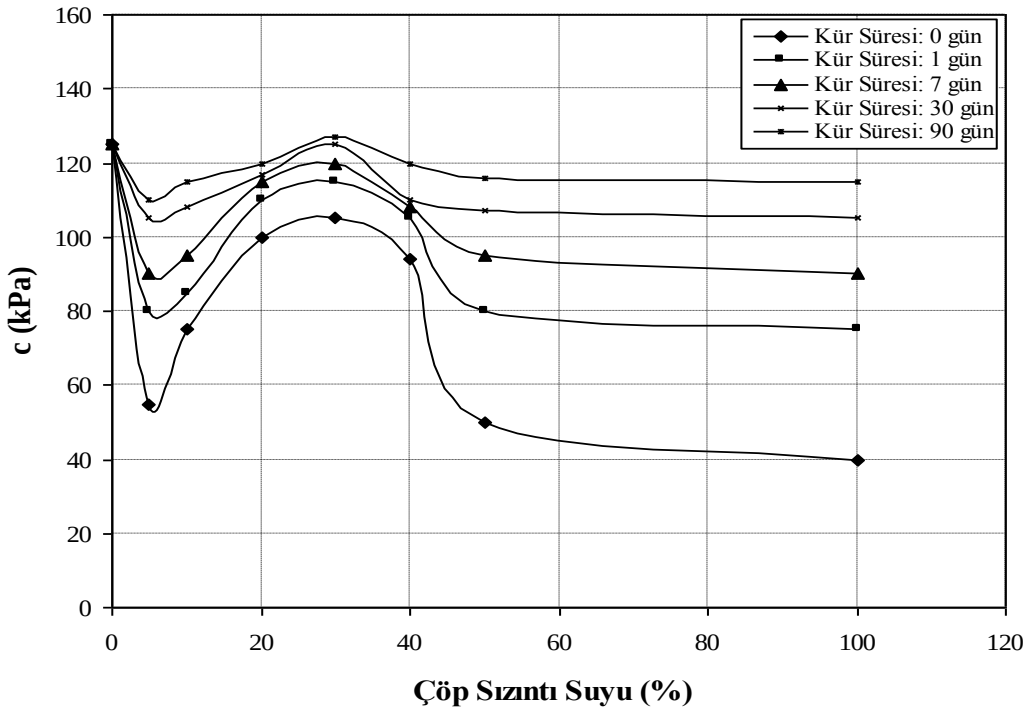
Şekil 4.57' de t= 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür sürelerine ait ϕ değerlerinin kür oranı ile değişimi görülmektedir. t= 0' da temiz zeminin kayma mukavemeti açısı (ϕ) minimumdur. Zemine çöp sızıntı suyu katılması ile ϕ artmıştır. % 100 çöp sızıntı suyu oranında ϕ' de en fazla artış görülür. Buna göre % 100 çöp sızıntı suyu oranında ϕ maksimumdur. Çöp sızıntı suyu katılmış numuneleri kendi aralarında incelersek; % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla ϕ azalmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla ϕ artmıştır. % 30 oranından küçük çöp sızıntı suyu oranlarında görülen azalmalara rağmen ϕ değerleri temiz zemine göre daha büyüktür. % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar görülen azalma ve bu çöp sızıntı suyu oranından sonra görülen artma tüm kür oranlarında görülmektedir. 7 günlük kür sonunda % 30 çöp sızıntı suyu içeren numunenin ϕ değeri temiz zemin numunesine göre daha küçüktür. Diğer kür oranları ise daha büyüktür. 30 günlük kür sonunda ise % 30 ve % 40 çöp sızıntı suyu oranlarında ϕ temiz zemine göre azalırken diğer çöp sızıntı suyu oranlarında artma olmuştur. 90 günlük kür sonunda ϕ değeri % 30, % 40 ve % 50 çöp sızıntı suyu oranlarında temiz zemine göre daha düşüktür.

Şekil 4.58’ de t= 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür sürelerine ait c değerlerinin kür oranı ile değişimi görülmektedir. t= 0’ da zemine çöp sızıntı suyu katılması ile c temiz zemine göre düşmüştür. % 100 çöp sızıntı suyu oranında c en düşük değerdedir. % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla c artmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise c çöp sızıntı suyu oranındaki artışla azalmıştır. Kohezyonda görülen bu davranış diğer kür sürelerinde de geçerlidir. Kohezyonda görülen artışlara rağmen c değeri genel olarak temiz zemine göre daha düşüktür.

c ve ϕ grafiklerinden görüldüğü gibi % 30 oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla c azalıp ϕ artmaktadır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla c azalmakta, ϕ ise artmaktadır.



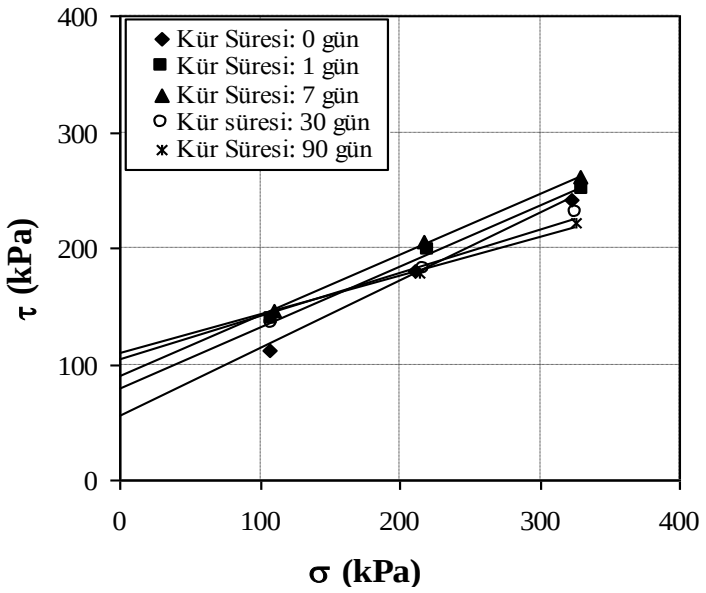
Şekil 4.57 : Çöp sızıntı suyu Oranın ϕ Üzerine Etkisi (t=0)



Şekil 4.58 : Çöp sızıntı suyu Oranın c Üzerine Etkisi (t=0)

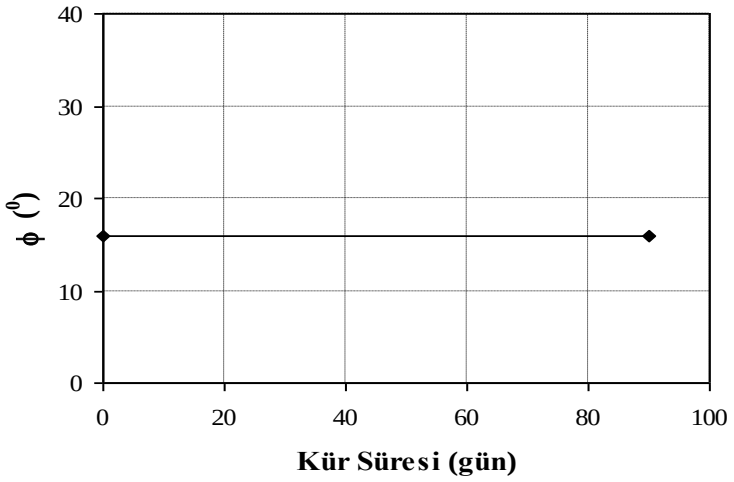
4.4.4. Kayma Direnci Üzerinde Kür Süresinin Etkisi

Zeminin kayma mukavemeti parametreleri (c, ϕ) üzerine çöp sızıntı suyu oranının ve kür süresinin etkisini incelemek amacı ile kesme kutusu deney sonuçlarından yararlanmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi sırasında aynı kür oranına sahip numuneler kendi aralarında gruplandırılarak kür süresi ile c ve ϕ değişimi ele alınmıştır. Bu amaçla Şekil 4.59' da % 5 çöp sızıntı suyu oranı için gösterildiği gibi tüm çöp sızıntı suyu oranları için kırılma zarfları çizilir. Diğer kür oranlarına ait kırılma zarfları Ek B' de gösterilmiştir. Bu kırılma zarflarından yararlanarak c ve ϕ parametreleri hesaplanır.

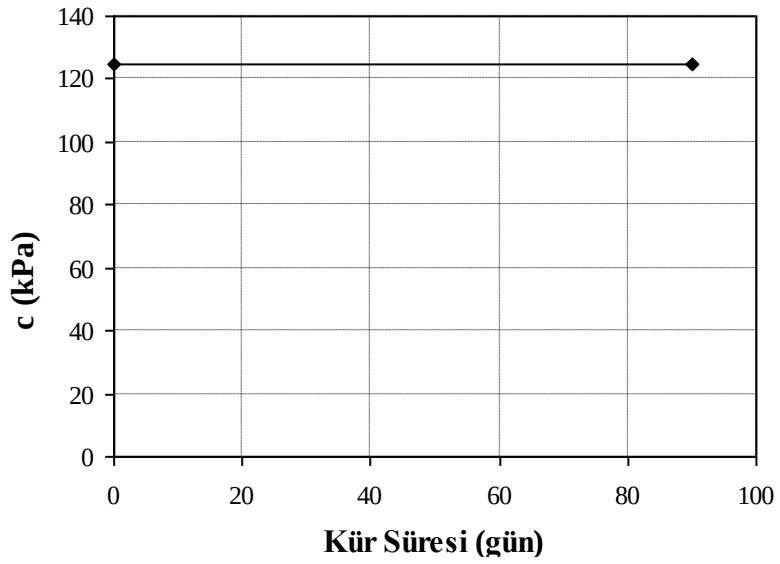


Şekil 4.59 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5)

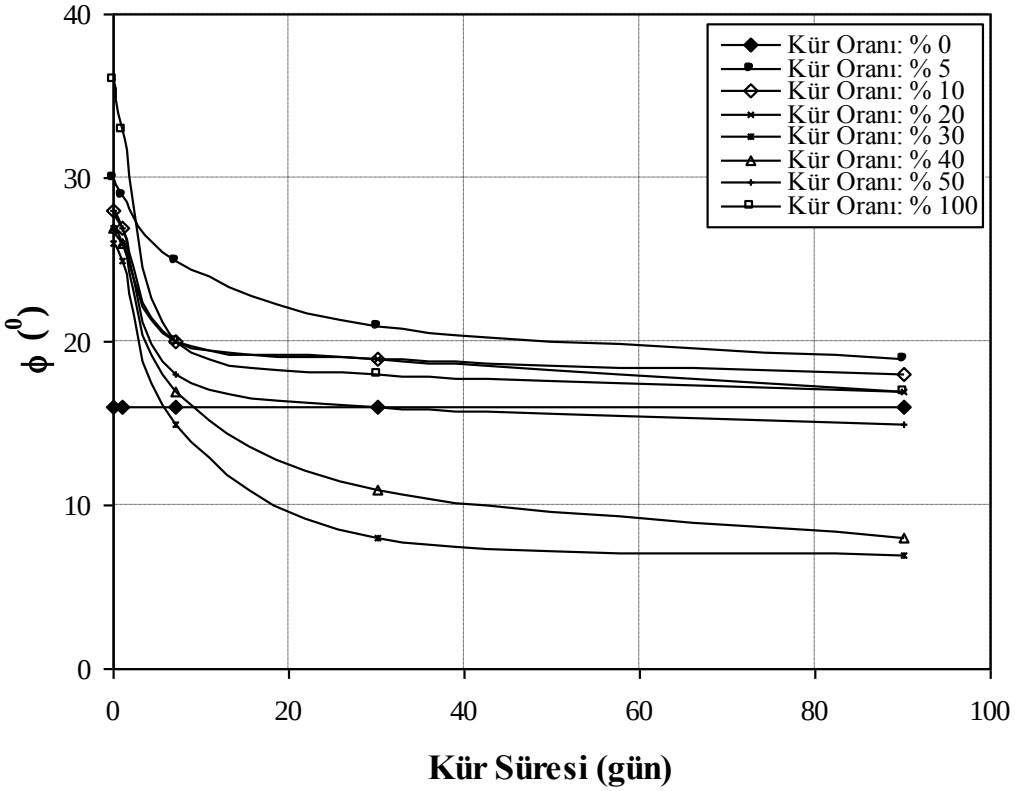
Çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunelerinde zemin ve çöp sızıntı suyu arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeni ile kür süresine bağlı olarak c ve ϕ değerlerinde değişme gözlenmiştir (Şekil 4.59). Temiz zeminde böyle bir değişim söz konusu değildir. Bu nedenle aynı zemin numunesinin her zaman aynı c ve ϕ değerini vermesi beklenir. Bu çalışmada aynı zeminden iki numune hazırlanarak biri bekletilmeden hemen deneye tabi tutulmuştur. Diğeri ise su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde 90 gün nem odasında bekletildikten sonra deneye alınmıştır. Şekil 4.60 ve Şekil 4.61' de görüldüğü gibi ϕ ve c parametreleri her iki numune için aynıdır.



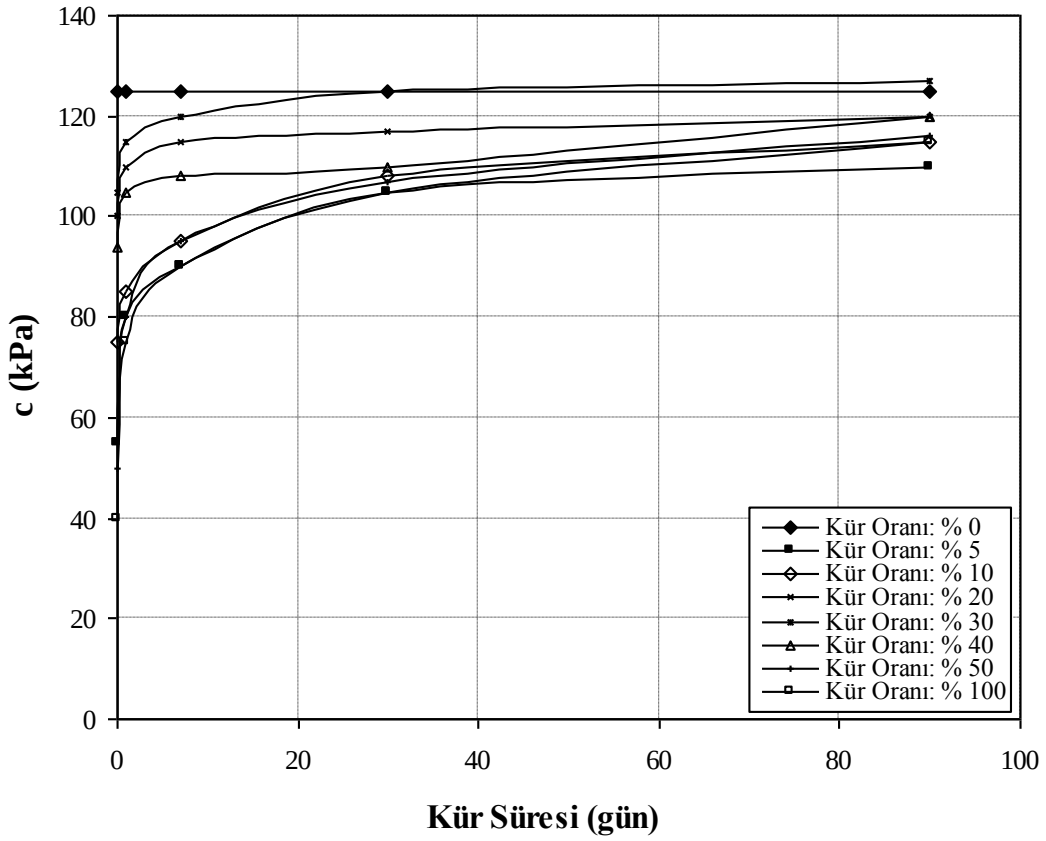
Şekil 4.60 : Kür Süresinin ϕ Üzerine Etkisi (Temiz Zemin)



Şekil 4.61 : Kür Süresinin c Üzerine Etkisi (Temiz Zemin)

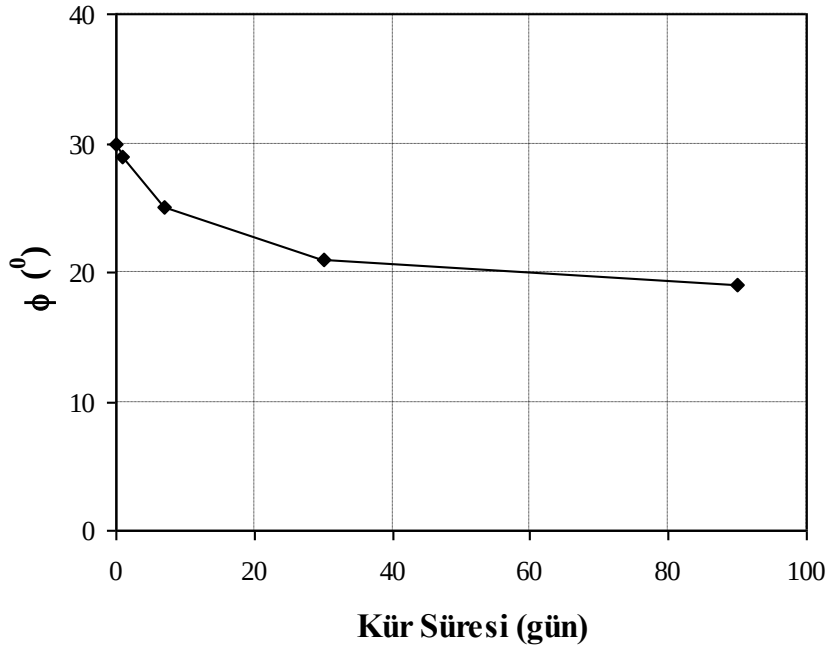


Şekil 4.62 : Kür Süresinin ϕ Üzerine Etkisi

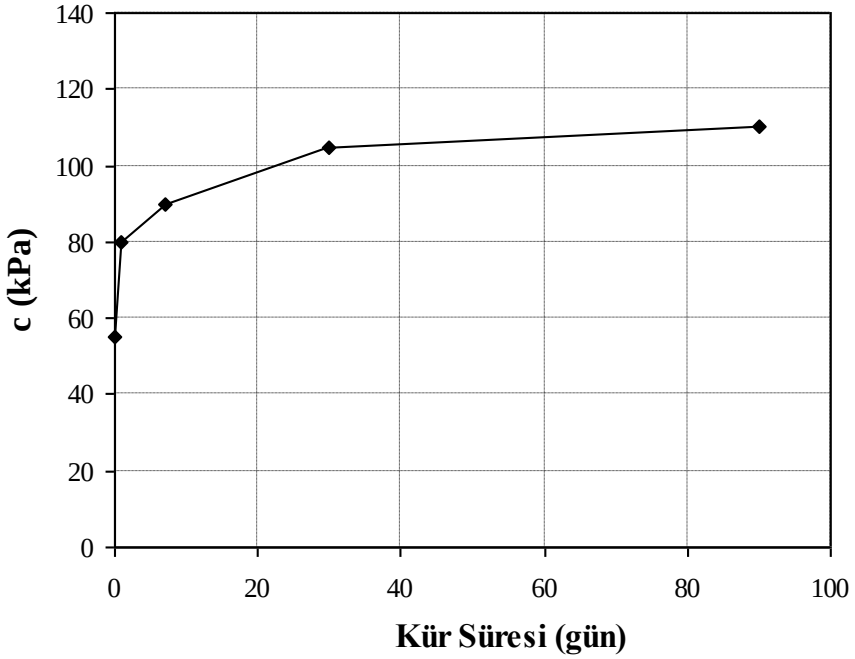


Şekil 4.63 : Kür Süresinin c Üzerine Etkisi

Çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunelerinin ϕ ve c parametrelerinin kür süresine bağlı olarak gösterdikleri değişimler Şekil 4.62 ve Şekil 4.63' de verilmiştir. Şekil 4.64' de % 5 çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numunede olduğu gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında ϕ kür süresindeki artışla azalmıştır. c ise kür süresindeki artışla artmıştır (Şekil 4.65). % 100 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanmış numuneler en çok kür süresinden etkilenmiştir. Bu çöp sızıntı suyu oranında hazırlanıp küre bırakılmadan hemen statik yük uygulanan numunenin ϕ' si 36^{0}' dir. Aynı özellikteki diğer numune 90 gün kürde bekletildikten sonra aynı yüklere maruz kaldığında ϕ 17^{0}' e kadar düşmüştür. t= 0 için 40 kPa olan c değeri ise 90 günlük kür sonunda 115 kPa' a kadar yükselmiştir.



Şekil 4.64 : Kür Süresinin ϕ Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5)



Şekil 4.65 : Kür Süresinin c Üzerine Etkisi (Çöp s: % 5)

4.5. Ödometre Deney Sonuçları

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış numuneler ödometre deneyine tabi tutularak zeminin hacim değiştirme davranışı, ön konsolidasyon basıncı ve permeabilite katsayısı üzerine çöp sızıntı suyu oranının ve kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla elde edilen deney sonuçları iki aşamada ele alınacaktır. İlk olarak ön konsolidasyon basıncındaki değişim daha sonra ise permeabilite katsayısındaki değişim ele alınacaktır. Tablo 4.3' de ödometre deneyine ait w ve γ_k değerleri, Tablo 4.4' de ödometre deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.3 : Ödometre Deneyi w ve γ_k Değerleri

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	**Kür Süresi (gün)**	**Deney Başı w_{ilk} (%)**	**Deney Sonu w_{son} (%)**	**Deney Başı γ_{kilk} (kN/m^3)**	**Deney Sonu γ_{kson} (kN/m^3)**
0	0	25	31	13.74	15.67
	30	25	30.6	11.94	15.07
5	0	25	30	13.51	13.73
	30	25	33	14	14.39
20	0	25	28	15.14	15.58
	30	25	31	15.04	15.27
50	0	25	34	15.55	15.92
	30	25	31	15.27	15.37
100	0	25	33	14.49	14.54
	30	25	32	14.08	14.58

Tablo 4.4 : Ödometre Deney Sonuçları

Çöp sızıntı suyu(%)	P (kPa)	Kür S: 0 gün		Kür S: 30 gün	
		c_v (cm^2/sn)	k (cm/sn)	c_v (cm^2/sn)	k (cm/sn)
0	200	$17.70.10^{-5}$	$43.80.10^{-10}$	$17.70.10^{-5}$	$43.80.10^{-10}$
	400	$7.75.10^{-5}$	$13.04.10^{-10}$	$7.75.10^{-5}$	$13.04.10^{-10}$
	800	$7.06.10^{-5}$	$8.42.10^{-10}$	$7.06.10^{-5}$	$8.42.10^{-10}$
5	200	$26.32.10^{-5}$	$45.22.10^{-10}$	$33.92.10^{-5}$	$76.36.10^{-10}$
	400	$8.12.10^{-5}$	$13.69.10^{-10}$	$13.02.10^{-5}$	$21.39.10^{-10}$
	800	$7.63.10^{-5}$	$8.51.10^{-10}$	$8.90.10^{-5}$	$9.88.10^{-10}$
20	200	$16.53.10^{-5}$	$14.20.10^{-10}$	$21.54.10^{-5}$	$27.14.10^{-10}$
	400	$6.84.10^{-5}$	$10.90.10^{-10}$	$8.95.10^{-5}$	$12.59.10^{-10}$
	800	$5.96.10^{-5}$	$7.43.10^{-10}$	$6.86.10^{-5}$	$8.01.10^{-10}$
50	200	$21.82.10^{-5}$	$21.88.10^{-10}$	$31.57.10^{-5}$	$46.11.10^{-10}$
	400	$8.12.10^{-5}$	$12.93.10^{-10}$	$11.86.10^{-5}$	$18.88.10^{-10}$
	800	$6.39.10^{-5}$	$7.60.10^{-10}$	$7.91.10^{-5}$	$8.63.10^{-10}$
100	200	$23.86.10^{-5}$	$23.8.10^{-10}$	$32.39.10^{-5}$	$53.72.10^{-10}$
	400	$8.90.10^{-5}$	$13.10.10^{-10}$	$12.08.10^{-5}$	$20.61.10^{-10}$
	800	$6.95.10^{-5}$	$8.20.10^{-10}$	$8.40.10^{-5}$	$9.63.10^{-10}$

4.5.1. Hacim Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

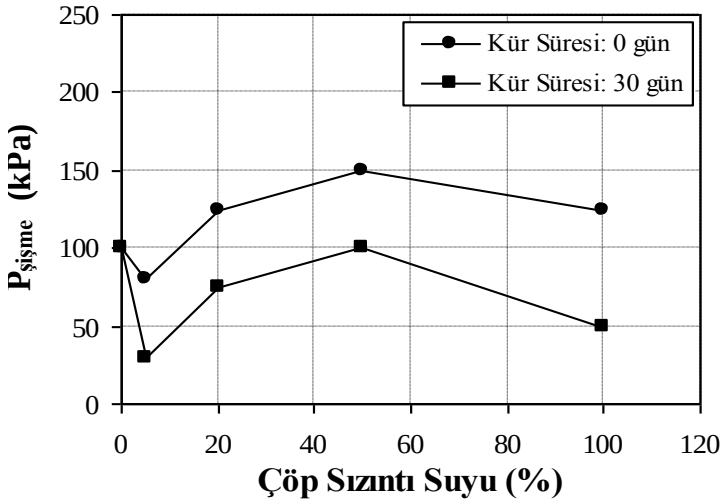
Zeminin hacim değiştirme davranışı, oturma ile olan direkt ilişkisinden dolayı önemlidir. Hacim değiştirme davranışı zeminin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde etkilidir. Bu nedenle farklı oranlarda çöp sızıntı suyu ile kirletilmiş ve küre bırakılmış zemin numunelerinin hacim değiştirme davranışındaki değişimler incelenmiştir. Bu amaçla ödometre deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Şekil 4.67 ve 4.68' de kür süresi t= 0 ve t= 30 gün olan numunelere ait boşluk oranı-konsolidasyon grafikleri verilmiştir.

Konsolidasyon deneyleri başında her numuneye ait şişme basınçları belirlenmiştir. Tablo 4.5 ve Şekil 4.66' da t= 0 ve t= 30 gün için şişme basınçları verilmiştir. Temiz zemine ait şişme basıncı 100 kPa' dır. t= 0' da % 5 çöp sızıntı suyu oranında şişme basıncı temiz zemine göre bir miktar düşme göstererek 80 kPa olarak belirlenmiştir. Bu çöp sızıntı suyu oranından daha yüksek çöp sızıntı suyu oranlarında ise şişme basıncı artmıştır. % 50 çöp sızıntı suyu oranında en büyük şişme basıncı

gözlenmiştir. % 100 çöp sızıntı suyu oranında bu değer düşerek % 20 çöp sızıntı suyu oranı ile aynı olmuştur. 30 günlük kür sonunda çöp sızıntı suyu ile kirletilmiş numunelerin şişme basınçları temiz zemine göre düşme göstermiştir.

Tablo 4.5 : Kür Oranı ve Kür Süresinin $P_{şişme}$ Üzerine Etkisi

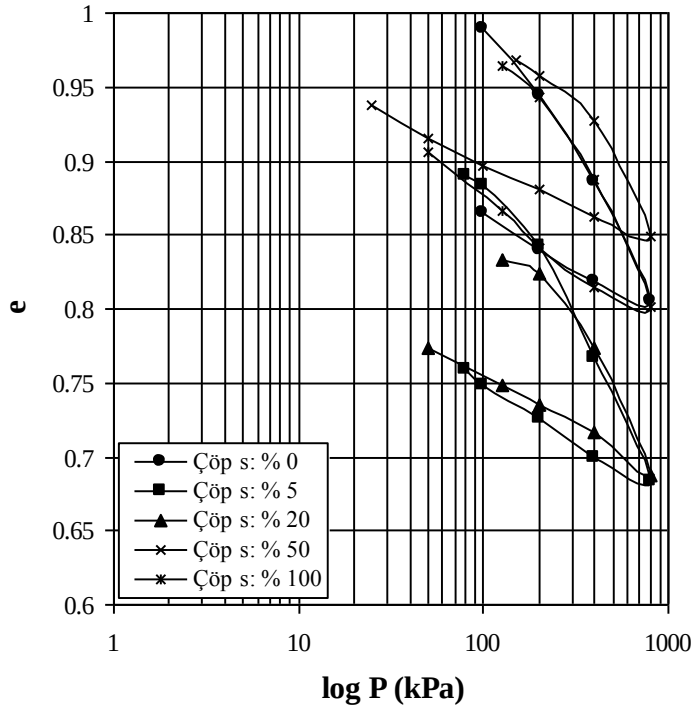
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	**Kür Süresi (gün)**	**$P_{şişme}$ (kPa)**
0	0	100
	30	100
5	0	80
	30	30
20	0	125
	30	75
50	0	150
	30	100
100	0	125
	30	50



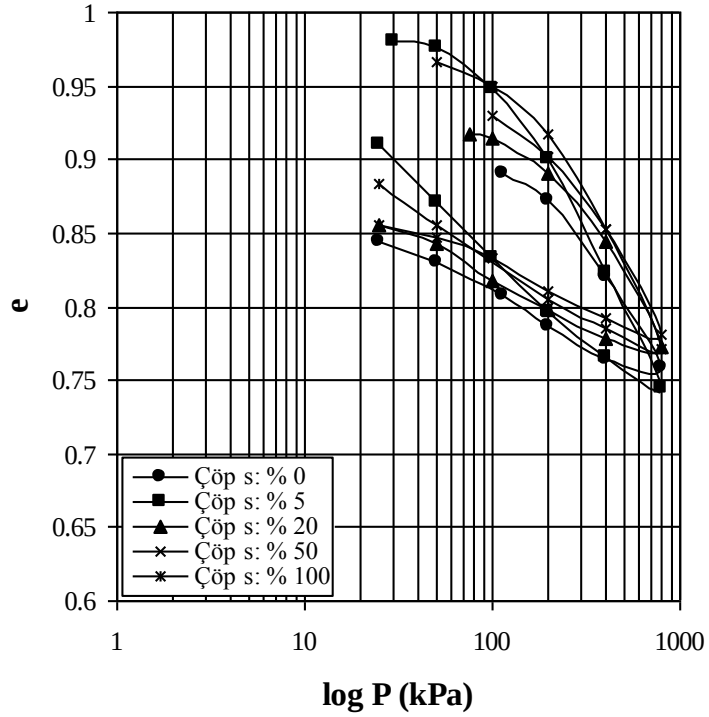
Şekil 4.66 : Kür Oranı ve Kür Süresi İle $P_{şişme}$ Değerindeki Değişim

Küre bırakılmamış numunelere ait e-log P (Şekil 4.67) grafiğinden yararlanarak çöp sızıntı suyu oranı ile hacim değişimi incelenmiştir. Konsolidasyon basıncı değerlerine karşı gelen boşluk oranlarına göre % 50 çöp sızıntı suyu oranında en az oturma olmuştur. En çok oturma ise % 20 çöp sızıntı suyu oranında gözlenmiştir. Temiz zeminde ve % 100 çöp sızıntı suyu oranında zemin aynı oturma davranışını

göstermiştir. 30 günlük kür sonunda ise Şekil 4.68' de görüldüğü gibi 30 günlük kür sonunda en çok oturma temiz zeminde, en az oturma ise % 5 çöp sızıntı suyu oranında olmuştur.



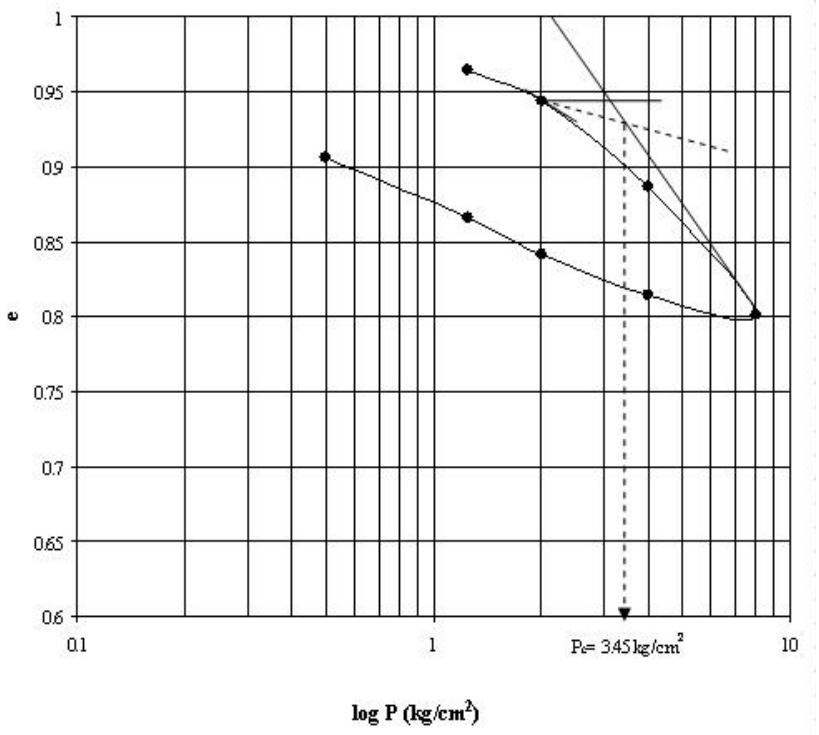
Şekil 4.67 : e-log P (t= 0)



Şekil 4.68 : e-log P (t= 30 gün)

4.5.2. Ön Konsolidasyon Basıncı Üzerine Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

Bir kil tabakasının geçmişte etkisi altında kaldığı en yüksek konsolidasyon basıncı ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Ön konsolidasyon basıncı (P_c) e-logP grafiklerinden (Şekil 4.67 ve Şekil 4.68) Casagranda yönteminden yararlanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.69' da küre bırakılmamış % 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış numuneye ait grafikte gösterildiği gibi önce eğrinin en küçük yarıçap değerine sahip olduğu nokta yaklaşık olarak belirlenmekte, bu noktadan bir yatay doğru ve bu noktaya teğet bir başka doğru çizilmektedir. Bu iki doğrunun yaptığı açının açı ortayı ile konsolidasyon eğrisinin doğru kısmının uzantısının kesiştiği nokta ön konsolidasyon basıncı değerini vermektedir. Tablo 4.6' da her çöp sızıntı suyu oranına ait t= 0 ve t= 30 güne ait P_c değerleri verilmiştir.



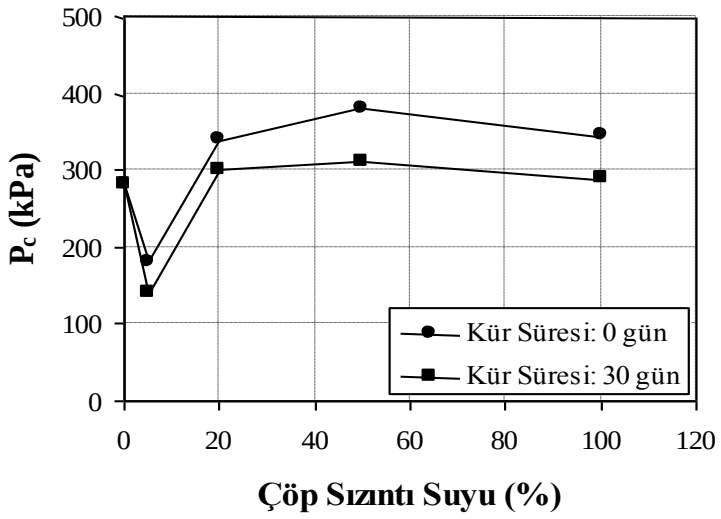
Şekil 4.69 : Ön Konsolidasyon Basıncının Ödometre Eğrisinden Bulunması (Çöp s: % 100, Kür S: 0)

Şekil 4.70' de görüldüğü gibi t= 0 kür süresine ait P_c değerleri t= 30 gündeki değerlerden yüksektir. Çöp sızıntı suyu bünyesindeki Li, Na, K, Ca gibi maddeler kür süresi boyunca kille etkileşime girerek flok yapı oluşturarak P_c değerini düşürmektedir. P_c % 5 çöp sızıntı suyu oranında düşme eğilimi göstermiş, % 20 çöp sızıntı suyu oranı ile birlikte artış göstererek bu artışa % 50 çöp sızıntı suyu oranına

kadar devam etmiştir. % 100 çöp sızıntı suyu oranında P_c tekrar düşme göstermiştir. Fakat bu noktadaki P_c temiz zemindeki değerinden daha yüksektir. t= 0 ve 30 gün için P_c % 5 çöp sızıntı suyu oranında minimum ve % 50 çöp sızıntı suyu oranında ise maksimumdur. Buna göre % 5 çöp sızıntı suyu oranından sonraki çöp sızıntı suyu oranları zeminin P_c değerinin artmasına neden olur. Ayrıca kür süresinin artması ile P_c değeri azalır.

Tablo 4.6 : Kür Oranı ve Kür Süresinin P_c Üzerine Etkisi

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	P_c (kPa)
0	0	282
	30	295
5	0	180
	30	140
20	0	340
	30	300
50	0	380
	30	310
100	0	345
	30	290



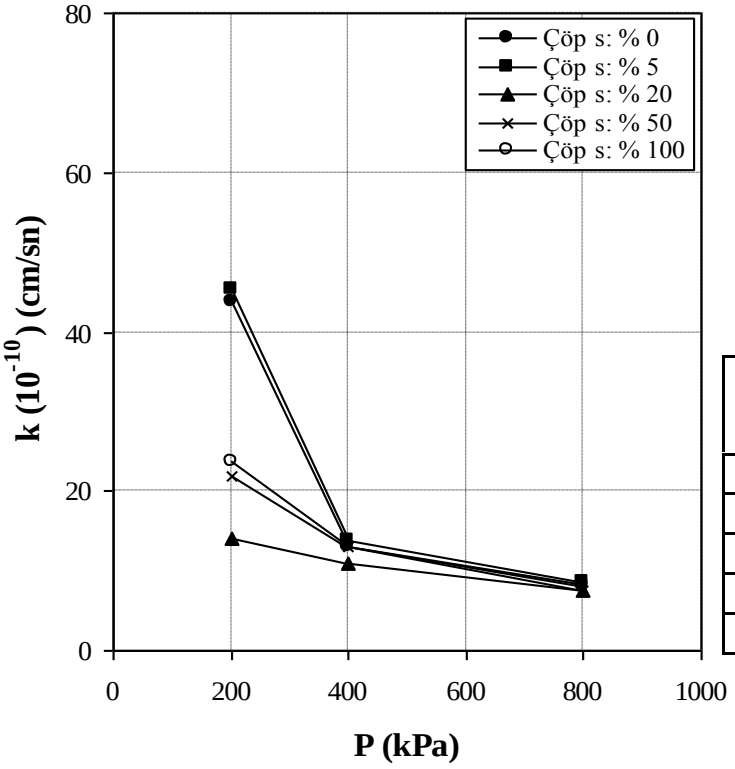
Şekil 4.70 : Kür Oranı ve Kür Süresi İle P_c Değerindeki Değişim

4.5.3. Permeabilite Katsayısı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanan numuneler küre bırakılmadan ve 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.

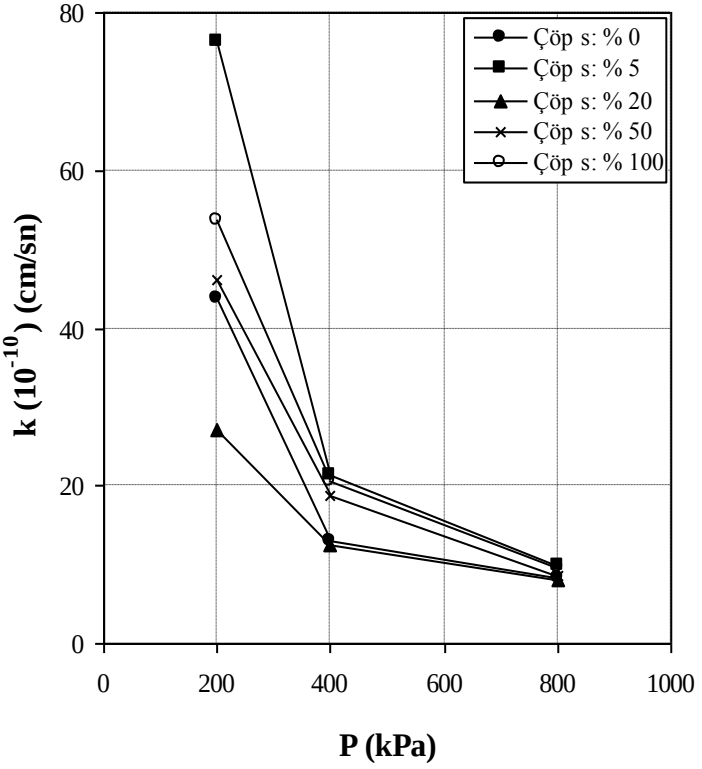
Permeabilite katsayısı 200, 400 ve 800 kPa yük kademesi için Logaritma Zaman Yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.71' de bu yöntemle elde edilmiş permeabilite katsayısılarının konsolidasyon basıncı ile değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi konsolidasyon basıncı arttıkça permeabilite katsayısı azalmıştır.

Şekil 4.72' de görüldüğü gibi 30 günlük kür sonunda üç yük kademesinde de permeabilite katsayıları t= 0' a göre artmıştır. Her iki kür süresinde de permeabilite aynı davranışı göstermektedir. Permeabilite, % 5 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinde temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise permeabilite azalmıştır. % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında ise % 20 çöp sızıntı suyu oranına göre permeabilite artmıştır. Fakat bu artışa rağmen permeabilite temiz zemine göre daha düşüktür. t= 30 günde ise % 5 çöp sızıntı suyu içeren numunenin permeabilitesi temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise azalmıştır. 30 günlük kür sonunda % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin permeabilitesi temiz zemine göre daha yüksektir.



Kür Oranı (%)	w_{son} (%)	γ_{kson} (kN/m^3)
0	31	15.67
5	30	13.73
20	28	15.58
50	31	15.92
100	33	14.58

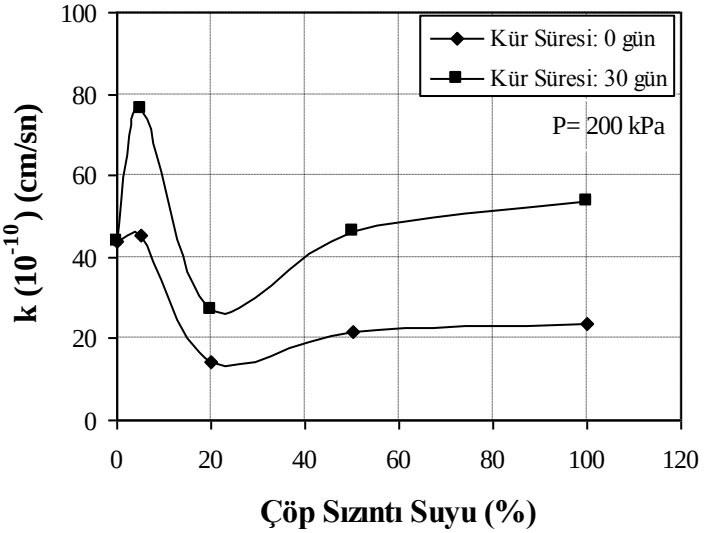
a) t= 0



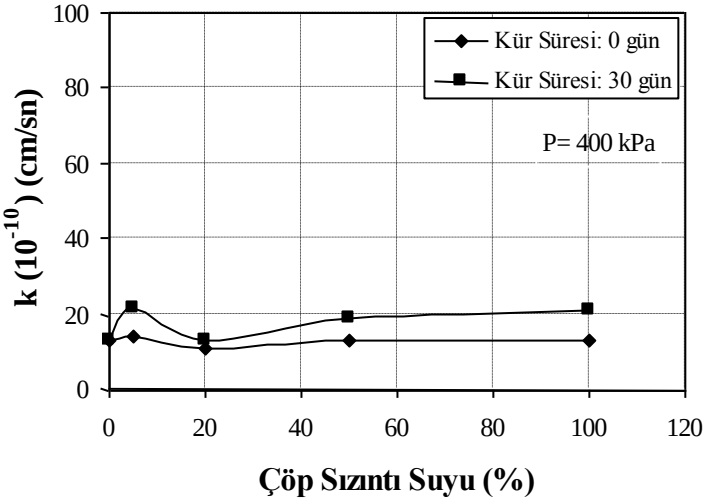
Kür Oranı (%)	w_{son} (%)	γ_{kson} (kN/m^3)
0	30.6	15.07
5	33	14.39
20	31	15.27
50	31	15.37
100	32	14.58

b) t= 30 gün

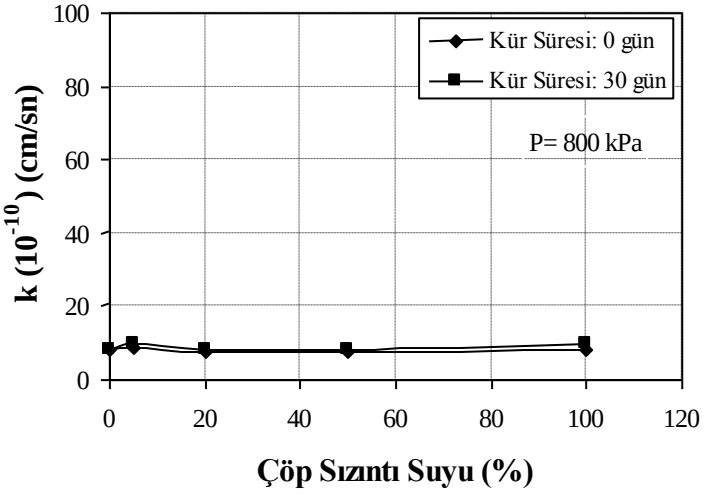
Şekil 4.71 : Konsolidasyon Basıncı İle Permeabilite Katsayısındaki Değişim



a) Yük Kademesi 200 kPa



b) Yük Kademesi 400 kPa



c) Yük Kademesi 800 kPa

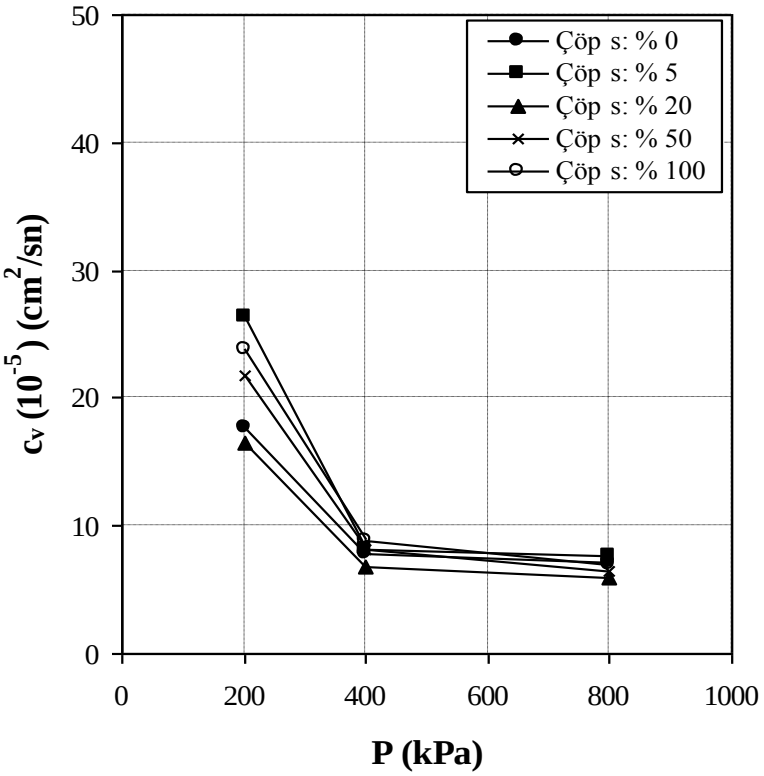
Şekil 4.72 : Kür Oranı ve Kür Süresinin Permeabilite Katsayısı Üzerine Etkisi

4.5.4. Konsolidasyon Katsayısı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanan numuneler küre bırakılmadan ve 30 günlük kür süresi sonunda ödometre deneyine tabi tutularak konsolidasyon katsayısı (c_v) üzerinde kür oranı ve kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Konsolidasyon katsayısı 200, 400 ve 800 kPa yük kademesi için Logaritma Zaman Yöntemi ile hesaplanmıştır.

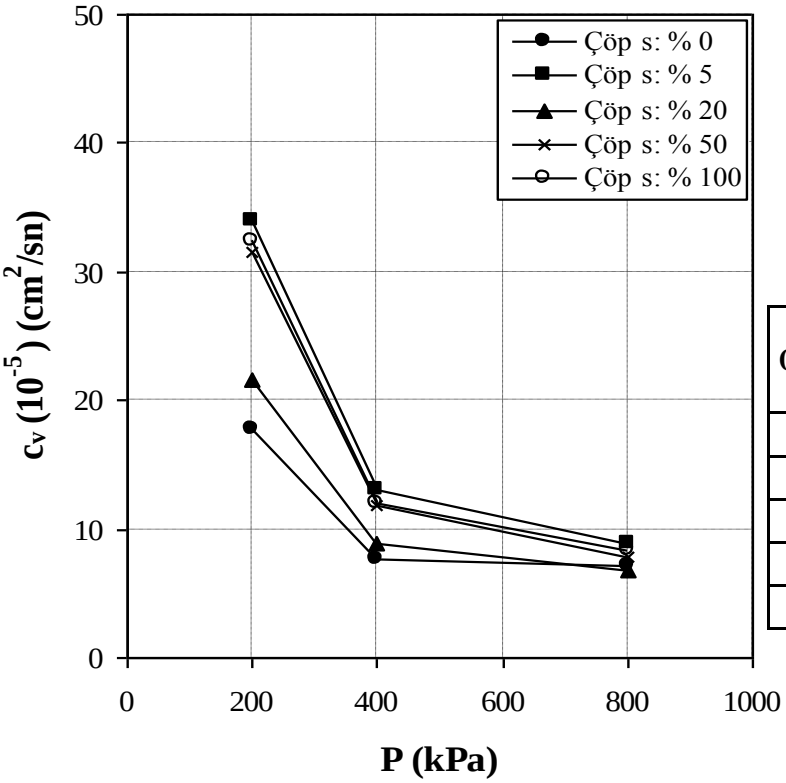
Konsolidasyon katsayısı 200, 400 ve 800 kPa yük kademesi için Logaritma Zaman Yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.73' de bu yöntemle elde edilmiş konsolidasyon kat sayılarının konsolidasyon basıncı ile değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi konsolidasyon basıncı arttıkça konsolidasyon katsayısı azalmıştır.

Şekil 4.74' de görüldüğü gibi 30 günlük kür sonunda üç yük kademesinde de konsolidasyon katsayıları t= 0' a göre artmıştır. Her iki kür süresinde de konsolidasyon katsayısındaki değişimler aynıdır. Konsolidasyon katsayısı % 5 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinde temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise azalmıştır. % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında ise konsolidasyon katsayısı % 20 çöp sızıntı suyu oranına göre artmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranlarında konsolidasyon katsayısı temiz zemine göre artmıştır. t= 30 günde ise % 5 çöp sızıntı suyu içeren numunenin konsolidasyon katsayısı temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise azalmıştır. 30 günlük kür sonunda da % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin konsolidasyon katsayıları temiz zemine göre artmıştır.



Kür Oranı (%)	w_{son} (%)	γ_{kson} (kN/m^3)
0	31	15.67
5	30	13.73
20	28	15.58
50	31	15.92
100	33	14.58

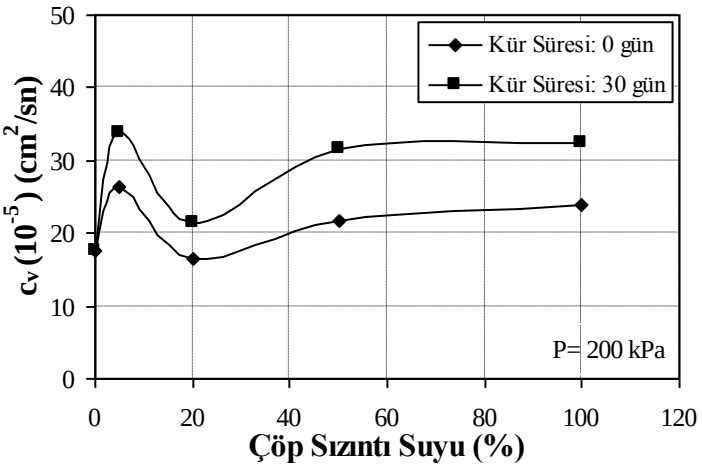
"a) t= 0



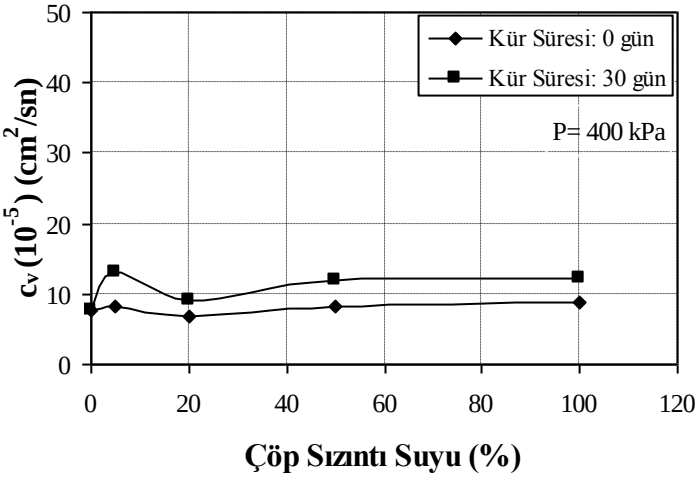
Kür Oranı (%)	w_{son} (%)	γ_{kson} (kN/m^3)
0	30.6	15.07
5	33	14.39
20	31	15.27
50	31	15.37
100	32	14.58

b) t= 30 gün

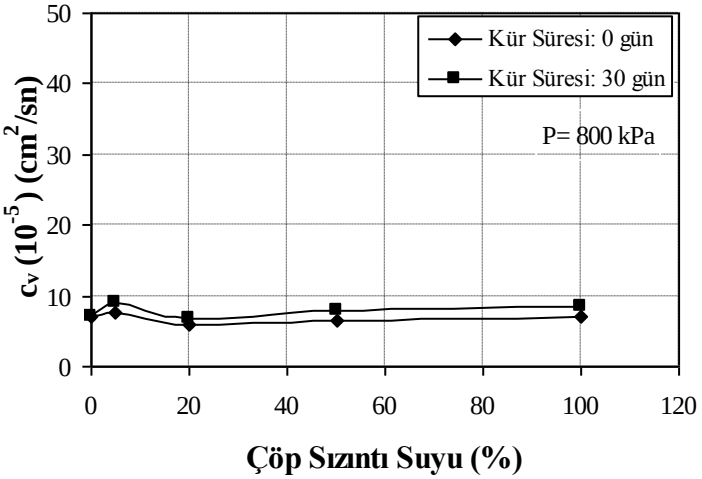
Şekil 4.73 : Konsolidasyon Basıncı İle Konsolidasyon Katsayısındaki Değişim



a) Yük Kademesi 200 kPa



b) Yük Kademesi 400 kPa



c) Yük Kademesi 800 kPa

Şekil 4.74 : Kür Oranı ve Kür Süresinin Konsolidasyon Katsayısı Üzerine Etkisi

4.6. Zeminin Dinamik Davranışları Üzerine Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

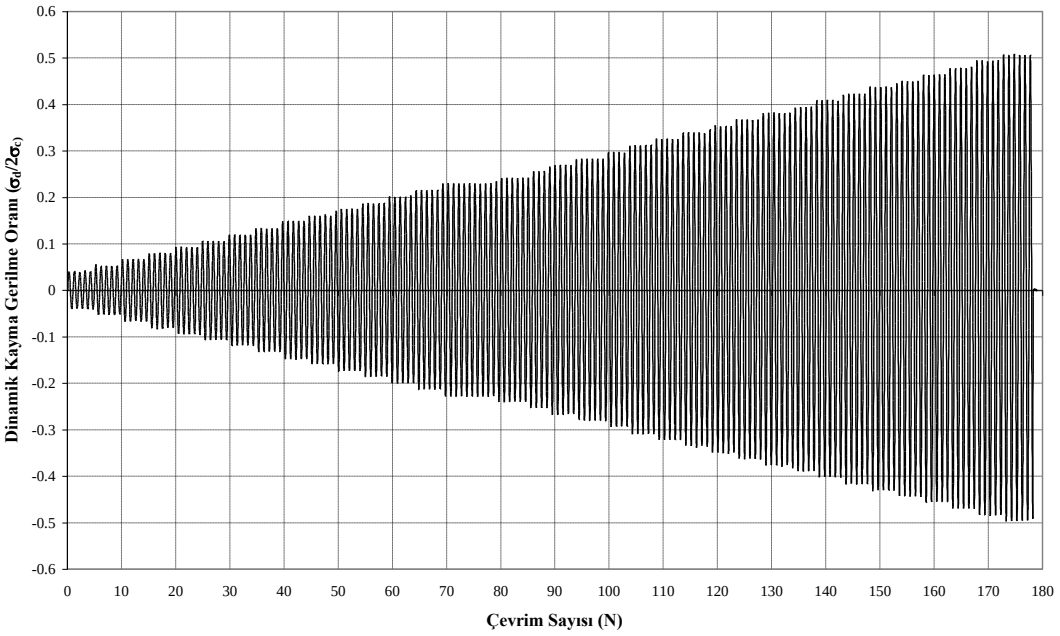
4.6.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

Bu çalışmada zeminin dinamik elastisite modülünün yanı sıra gerilme şekil değiştirme davranışı üzerinde kür oranı ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla % 0, 5, 20 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranları ile hazırlanmış numuneler küre bırakılmadan, 7 ve 90 gün süre ile küre bırakılarak dinamik üç eksenli deney sisteminde azalım deneylerine tabi tutulmuştur. Dinamik deney uygulamalarında numuneler doygun hale getirilmemiş ve konsolidasyona bırakılmamıştır. 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_k ve w değerleri verilmiştir.

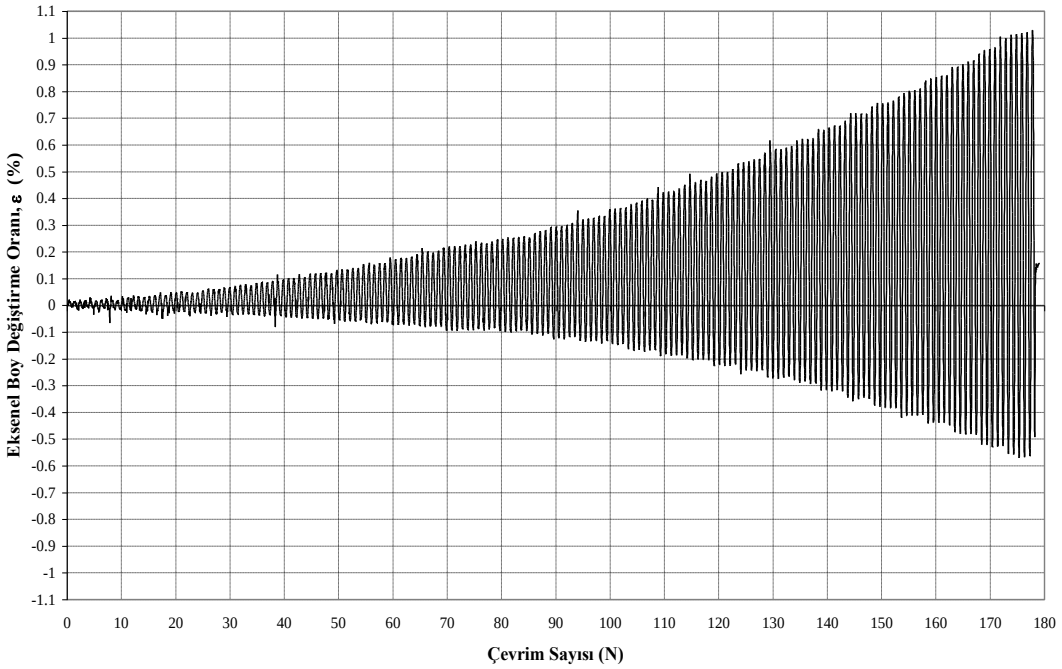
Tablo 4.7 : Dinamik Deney w-γ_k Değerleri

Çöp sızıntı	Kür Süresi	w_{ilk} (%)	w_{son} (%)	γ_{kilk} (kN/m^3)	γ_{kson} (kN/m^3)
0	7	24.98	24.96	14.17	14.20
	90	24.89	24.84	14.20	14.20
5	0	25.01	24.97	14.77	14.82
	7	24.97	24.94	14.73	14.74
	90	24.86	24.82	14.69	14.70
20	0	24.96	24.94	14.40	14.50
	7	24.96	24.91	14.38	14.39
	30	24.90	24.86	14.49	14.47
	90	24.84	24.80	14.37	14.37
50	0	24.97	24.89	14.79	14.88
	7	24.93	24.86	14.41	14.44
	90	24.84	24.65	14.15	14.19
100	0	24.94	24.88	14.62	14.70
	7	24.92	24.85	14.59	14.62
	90	24.83	24.79	14.60	14.68

Dinamik deney uygulamaları sırasında ilk olarak en büyük elestisite modülü ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümün ardından yine dinamik gerilme oranı ($\pm\sigma_d / 2\sigma_c$) 5 çevrimde bir kademeli olarak arttırılarak dinamik deney yapılmıştır. Bu deneye ait gerilme oranı ve eksenel boy değişimleri 3. Bölümde anlatıldığı gibi hesaplanmaktadır. Hesaplamanın ardından Şekil 4.75 ve Şekil 4.76' da görüldüğü gibi dinamik gerilme oranı-çevrim sayısı ve eksenel şekil değiştirme oranı-çevrim sayısı eğrileri çizilir. Tüm çöp sızıntı suyu oranlarına ait dinamik deney sonuç grafikleri EKD' de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen sonuçlar yardımı ile 0, 7 ve 90 günlük kür süreleri için kür oranının zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra ise 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında hazırlanmış zemin numunelerinin gerilme şekil değiştirme davranışı üzerinde kür süresinin etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.75 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı
(Çöp S: % 50, Kür S: 7 gün)



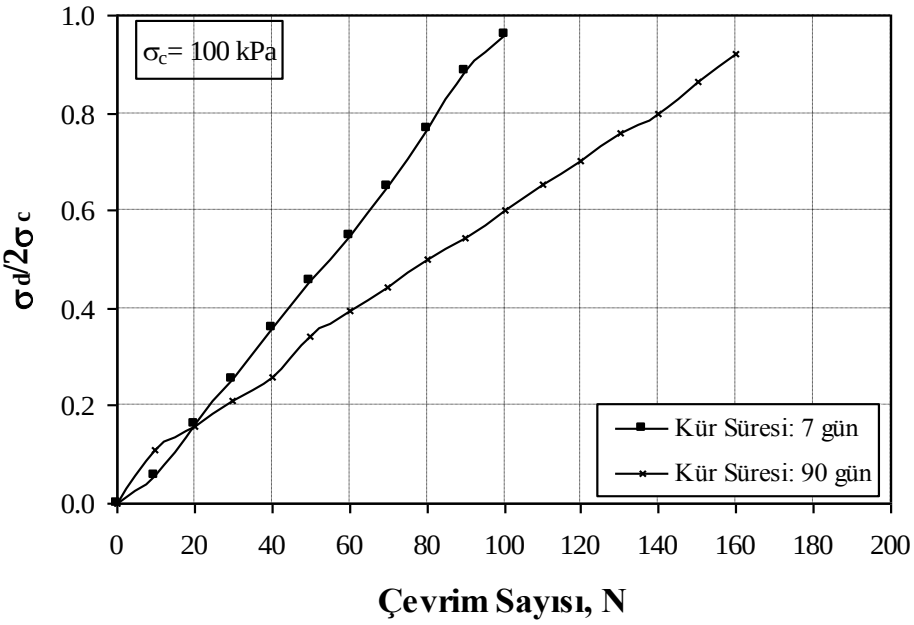
Şekil 4.76 : Eksenel Boy Değiştirme-Çevrim Sayısı
(Çöp S: % 50, Kür S: 7 gün)

4.6.1.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Oranının Etkisi

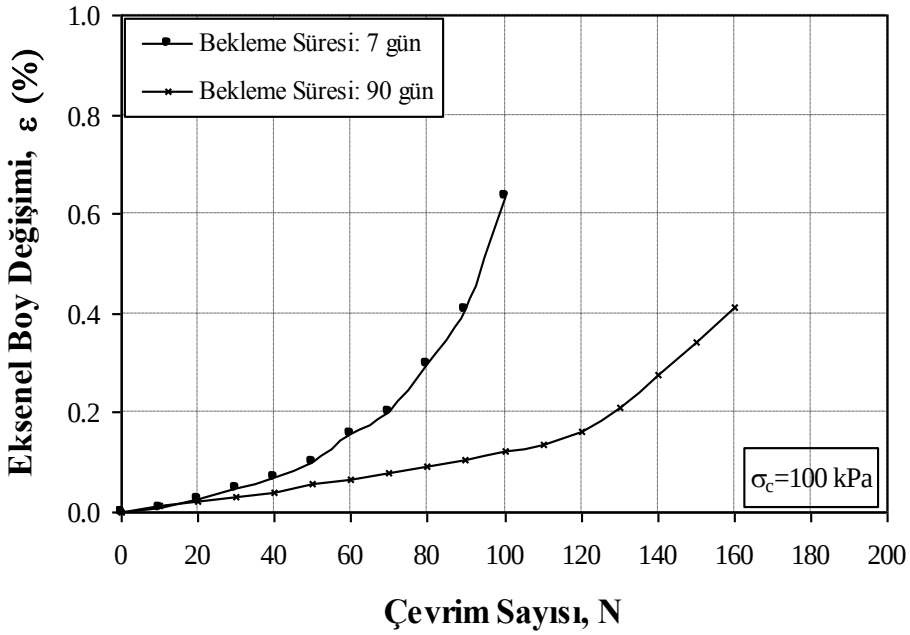
Kür oranın zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisini incelemek için % 5, 20, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanmış numuneler aynı dinamik yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra küre bırakılmamış, 7 ve 90 gün küre bırakılmış numuneler kendi aralarında gruplandırılmıştır. Aynı kür süresindeki numunelere ait eksenel boy değişimi (ε)-çevrim sayısı (N) grafikleri ve dinamik kayma gerilme oranı ($\sigma_d / 2\sigma_c$)-çevrim sayısı (N) grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak çöp sızıntı suyu oranın zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kür oranın zeminin şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacı ile her kür oranına ait sonuçlar temiz zemine ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde 90 gün nem odasında bekletilmiş numuneye ait sonuçlar kullanılmıştır. Kesme kutusu deney sonuçlarında görüldüğü gibi temiz zeminin aynı yükleme şartları altında küre bırakıldıktan sonra ya da küre bırakılmadan deneye tabi tutulması halinde mukavemet özellikleri değişmemektedir. Aynı durum dinamik yükleme koşulları için de geçerli olduğundan 90 gün nem odasında saklanmış numuneye ait değerler karşılaştırılmada kullanılmıştır.

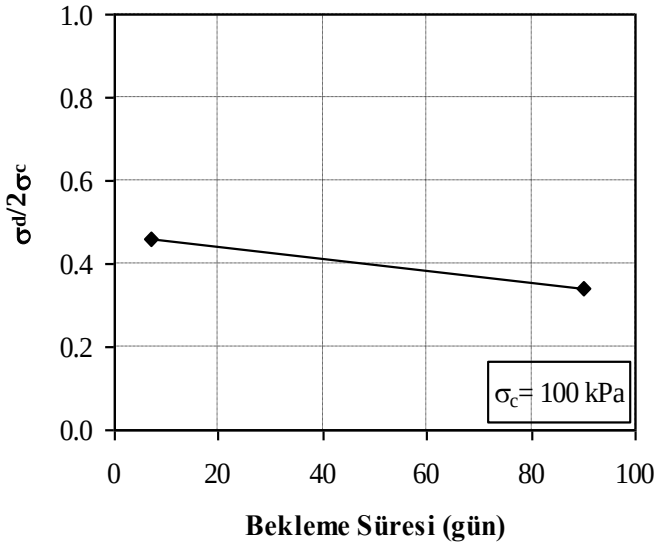
Yükleme şartlarının değişmesi ile zemindeki davranış değişimlerini incelemek amacı ile 7 ve 90 gün nem odasında saklanmış temiz zemin numuneleri üzerine farklı dinamik yükler uygulanmıştır. Şekil 4.77' de görüldüğü gibi 7 gün bekletilmiş numune üzerine daha fazla dinamik yük uygulanmıştır. Bunun sonucunda Şekil 4.78' de görüldüğü gibi bu numunede daha fazla deformasyon oluşmuştur. 100. çevrimde 7 gün bekletilmiş numuneye ait dinamik kayma gerilme oranı 90 gün bekletilmiş numuneye ait değerden % 60 daha büyüktür (Şekil 4.79). 7 gün bekletilmiş numunenin bu çevrim sayısındaki eksenel boy değişimi 90 gün bekletilmiş numuneye göre % 81 daha büyüktür (Şekil 4.80). Görüldüğü gibi gerilme seviyesi arttıkça deformasyon da artmaktadır.



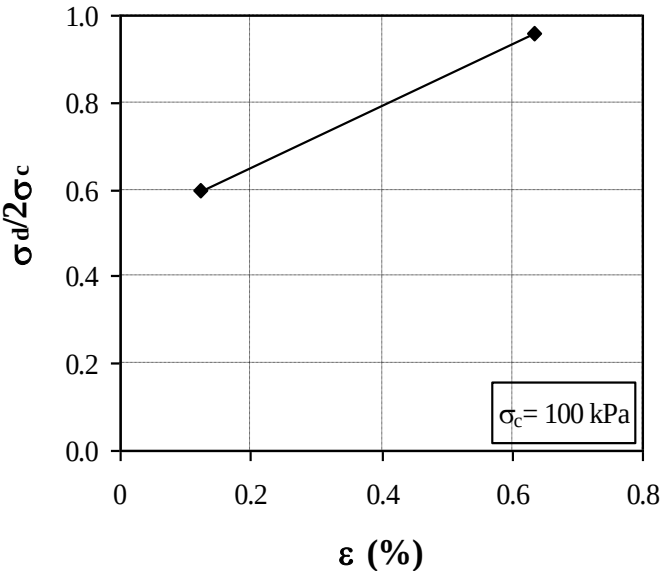
Şekil 4.77 : Temiz Zeminin Dinamik Kayma Gerilme Oranı



Şekil 4.78 : Temiz Zeminin Eksenel Boy Değiştirme Davranışı

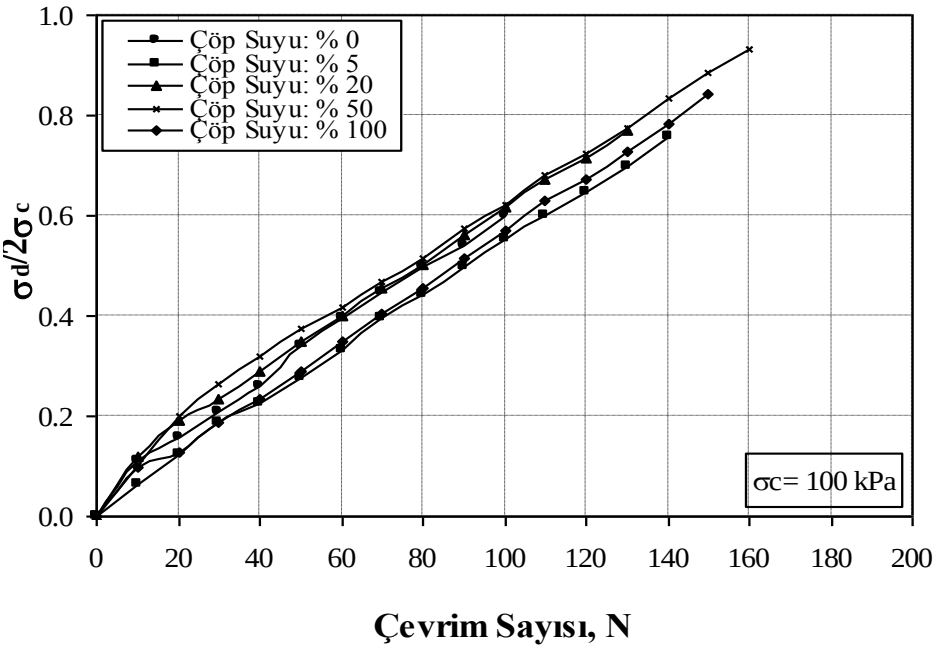


Şekil 4.79 : Temiz Zeminin Dinamik Kayma Gerilme Oranı (N= 100)

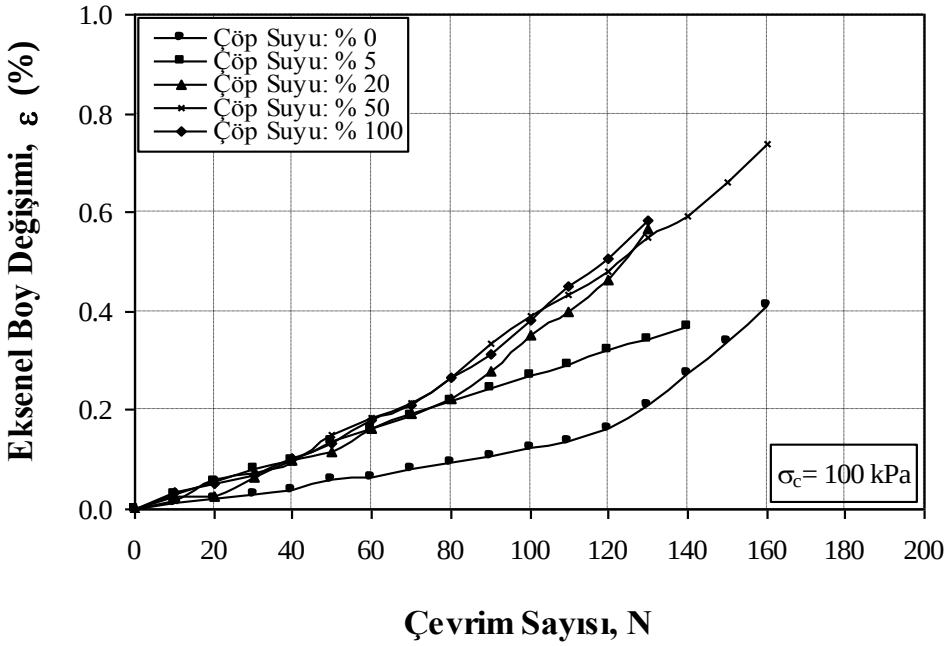


Şekil 4.80 : Temiz Zemininin Eksenel Boy Değiştirme Davranışı (N= 100)

Şekil 4.81' de görüldüğü gibi küre bırakılmamış tüm numunelerde dinamik kayma gerilme oranı sabittir. Şekil 4.82' de ise bu numunelere ait eksenel boy değişimi-çevrim sayısı grafiği görülmektedir. En az boy değişimi temiz zeminde olmuştur. En fazla boy değişimi ise % 50 çöp sızıntı suyu oranında gözlenmiştir.

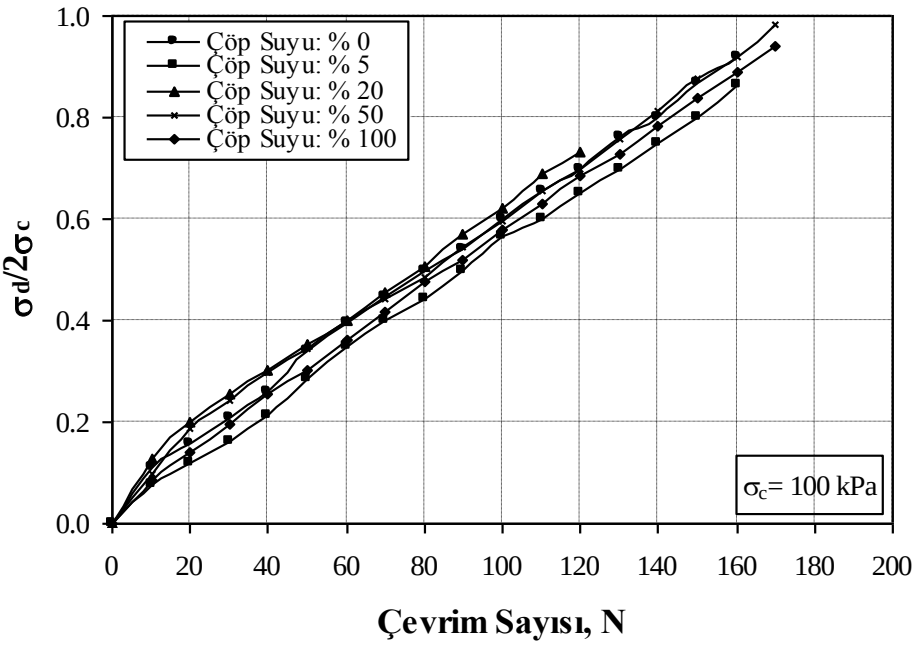


Şekil 4.81 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı (Kür S: 0)

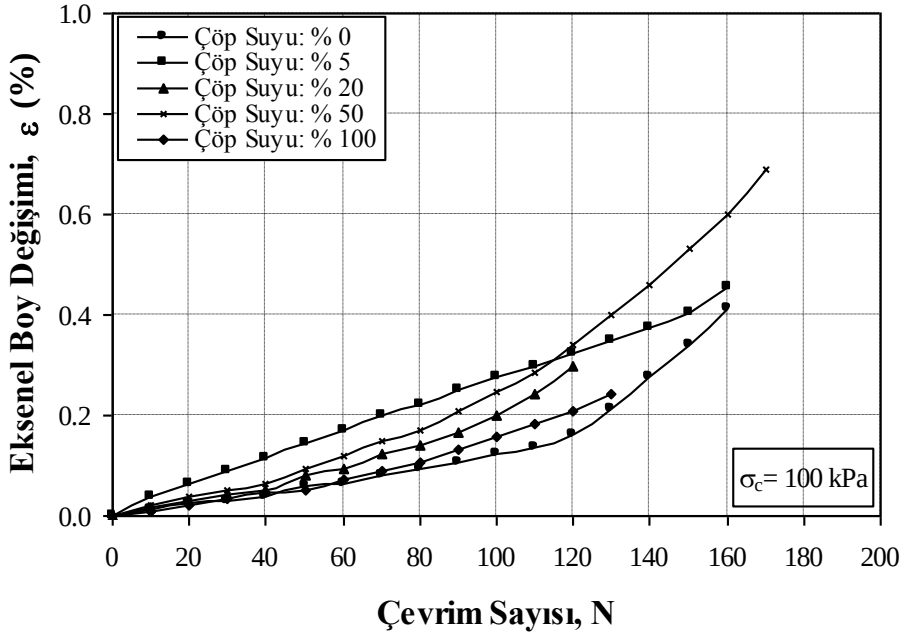


Şekil 4.82 : ε Üzerine Kür Oranın Etkisi (Kür S: 0)

Şekil 4.83' de 7 gün küre bırakılmamış numunelere ait dinamik kayma gerilme oranları verilmiştir. Bu kür süresinde de numunelere aynı dinamik yükler uygulanmıştır. Şekil 4.84' da görüldüğü gibi t= 7 güne ait zemin davranışları t= 0' a benzer davranış göstermektedir. Bu kür süresinde de temiz zemindeki boy değişimi aynı çevrim sayında çöp sızıntı suyu katılmış numunelere göre daha azdır.

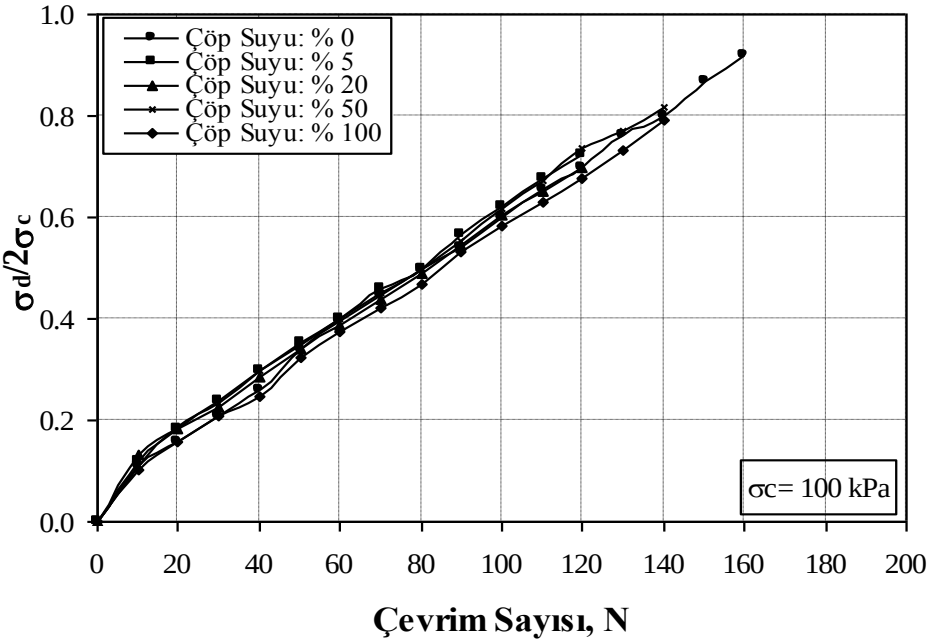


Şekil 4.83 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı (Kür S: 7 gün)

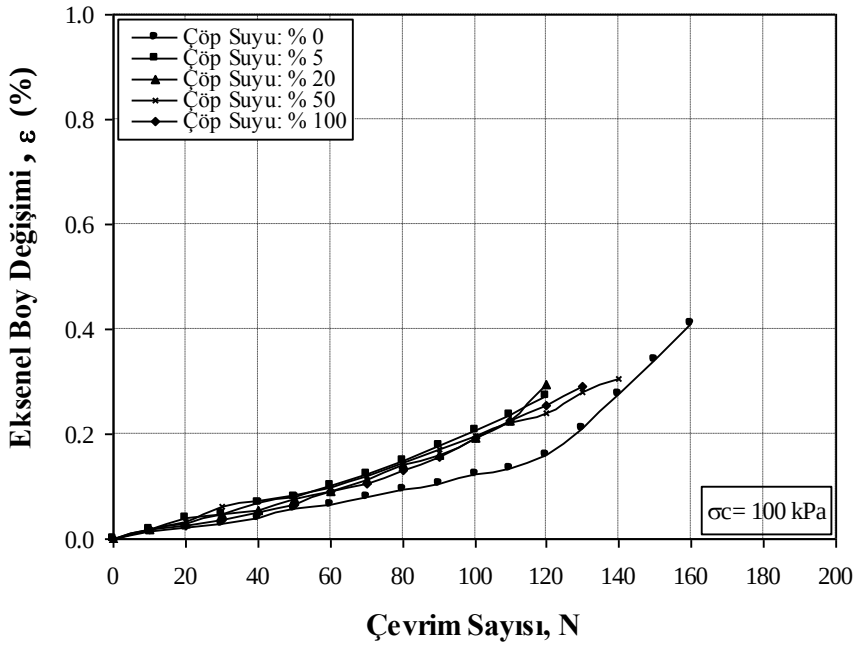


Şekil 4.84 : ε Üzerine Kür Oranın Etkisi (Kür S: 7 gün)

Şekil 4.85' de 90 gün küre bırakılmamış numunelere ait dinamik kayma gerilme oranları verilmiştir. Bu kür süresinde de numunelere aynı dinamik yükler uygulanmıştır. Şekil 4.86' da görüldüğü gibi t= 90 güne ait zemin davranışları diğer kür süreleri ile benzerdir. Bu kür süresinde de temiz zemindeki boy değişimi aynı çevrim sayında çöp sızıntı suyu katılmış numunelere göre daha azdır.



Şekil 4.85 : Dinamik Kayma Gerilme Oranı (Kür S: 90 gün)

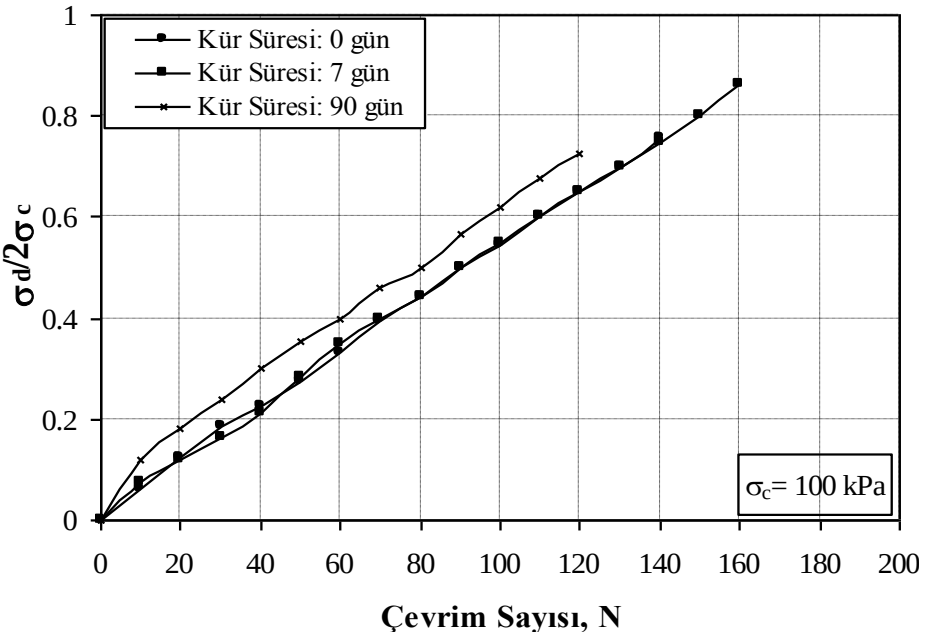


Şekil 4.86 : ε Üzerine Kür Oranın Etkisi (Kür S: 90 gün)

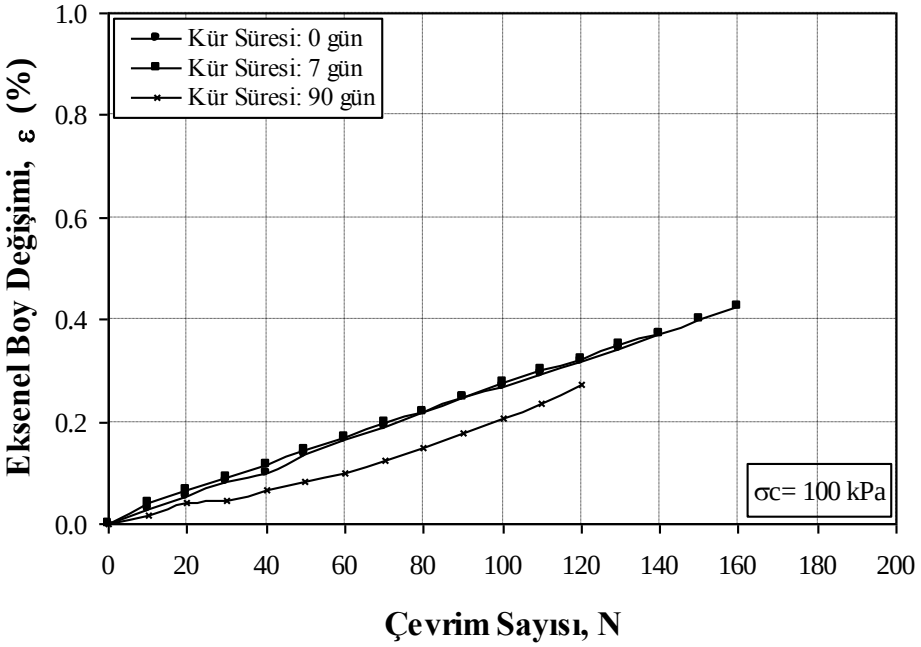
4.6.1.2. Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Üzerinde Kür Süresinin Etkisi

Kür oranı sabit tutulup farklı kür sürelerine ait eksenel boy değişimi (ε)-çevrim sayısı (N) ve dinamik kayma gerilme oranı ($\sigma_d / 2\sigma_c$)- çevrim sayısı (N) grafikleri hazırlanmıştır. Bu grafiklerden yararlanarak belli bir kür oranı için kür süresinin zeminin dinamik gerilme-şekil değiştirme davranışı irdelenmiştir. Bu amaçla çöp sızıntı suyu oranı % 5, 20, 50 ve % 100 olan numunelerin küre bırakılmamış, 7 ve 90 gün küre bırakılmış deney sonuçlarından yararlanılmıştır.

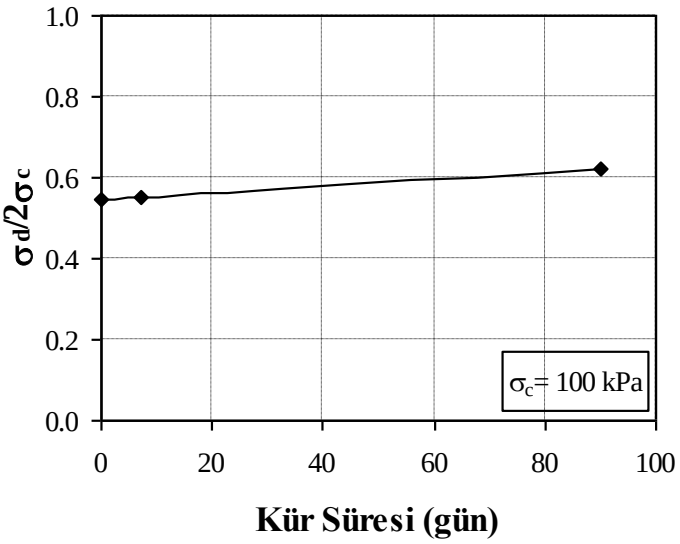
Şekil 4.87' de % 5 çöp sızıntı suyu oranına ait $\sigma_d / 2\sigma_c$ grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi deneylerde aynı dinamik yük uygulanmıştır. Şekil 4.88' de ise bu çöp sızıntı suyu oranı için ε-N grafiği verilmiştir. Küre bırakılmamış ve 7 gün küre bırakılmış numunelerin boy değişim miktarları oldukça yakındır. Grafik dikkatle incelendiğinde 7 gün küre bırakılmış numunelerin boy değişimleri küre bırakılmamış numunelerden biraz daha büyük olduğu görülür. Şekil 4.89' da 100. çevrime denk gelen dinamik kayma gerilme oranı verilmiştir. Şekil 4.90' da ise bu gerilme oranlarına karşı gelen ε değerleri verilmiştir. Buna göre t= 0' a göre t= 7 gün için ε % 0.93 artarken, 90 gün sonunda ise % 12 azalmıştır. Bu çevrimde görüldüğü gibi 7 günlük kürden sonra zeminin direnci artmıştır.



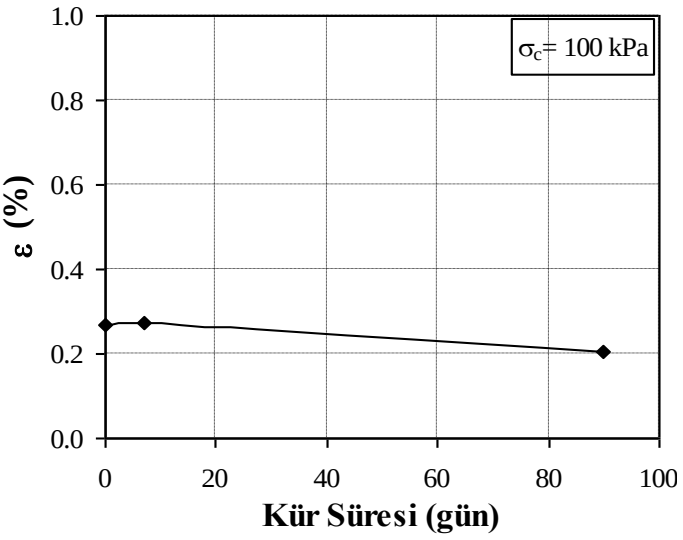
Şekil 4.87 : Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 5)



Şekil 4.88 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 5)

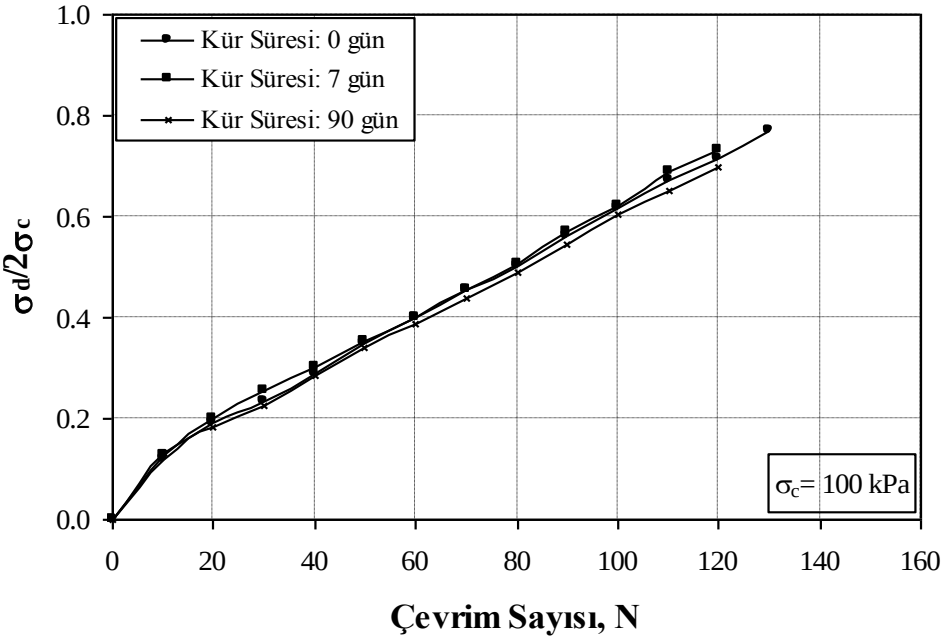


Şekil 4.89 : Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: %5)

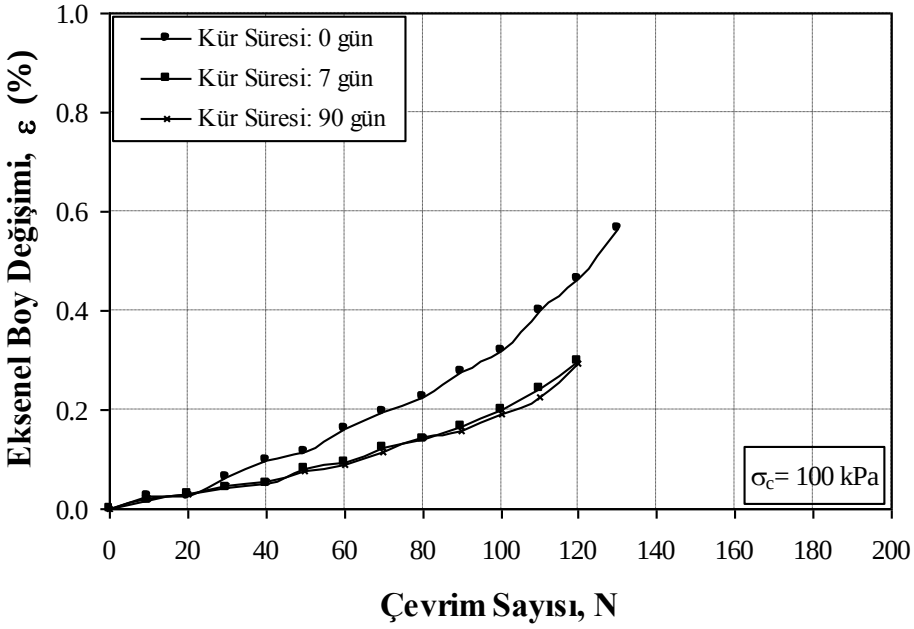


Şekil 4.90 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: 5)

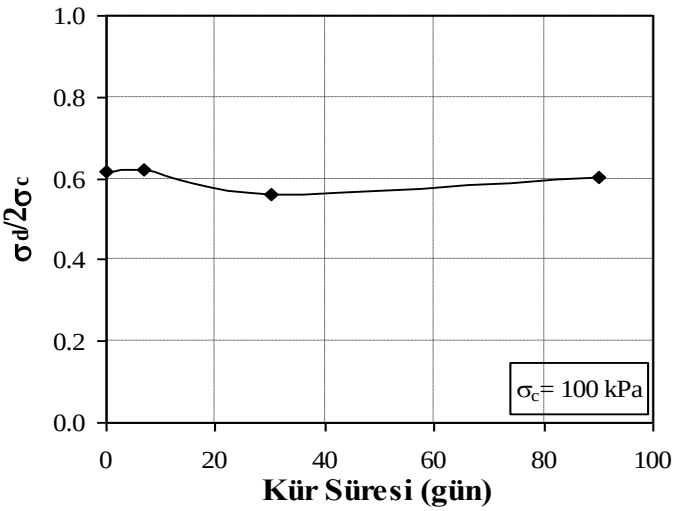
Şekil 4.91' de % 20 çöp sızıntı suyu oranına ait $\sigma_d / 2\sigma_c$ grafiğinden görüldüğü gibi her kür oranında dinamik kayma gerilme oranı aynı denecek kadar yakın değerlerdedir. Şekil 4.92' de ε-N grafiğinden görüldüğü gibi t=7 ve 90 güne ait boy değişimleri çok yakındır. Grafik incelendiğinde 7 günlük kür sonunda ε değerlerinin 90 gün küre bırakılmış zeminin ε' u ile aynı olduğu görülür. Şekil 4.93' de 100. çevrime denk gelen dinamik kayma gerilmeleri verilmiştir. Şekil 4.94' de bu gerilmelere karşı gelen boy değişimleri görülmektedir. 7 gün küre bırakılmış numunenin eksenel boy değişimi küre bırakılmamış numuneye göre % 36.5 azalmıştır. 90 gün sonunda ise bu azalma % 40 olarak belirlenmiştir.



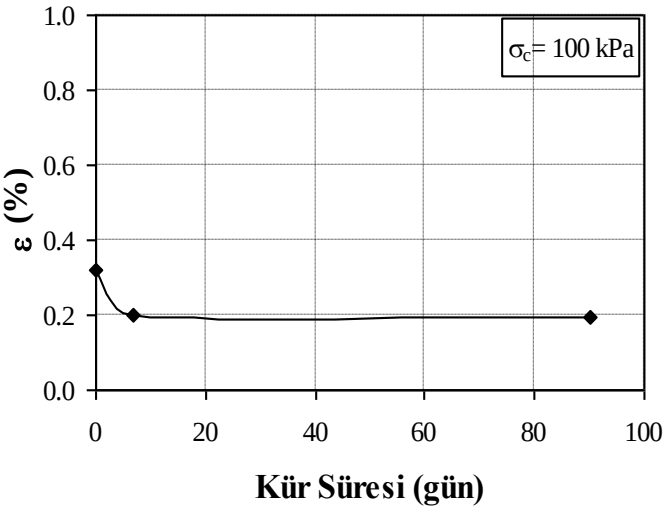
Şekil 4.91 : Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 20)



Şekil 4.92 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 20)

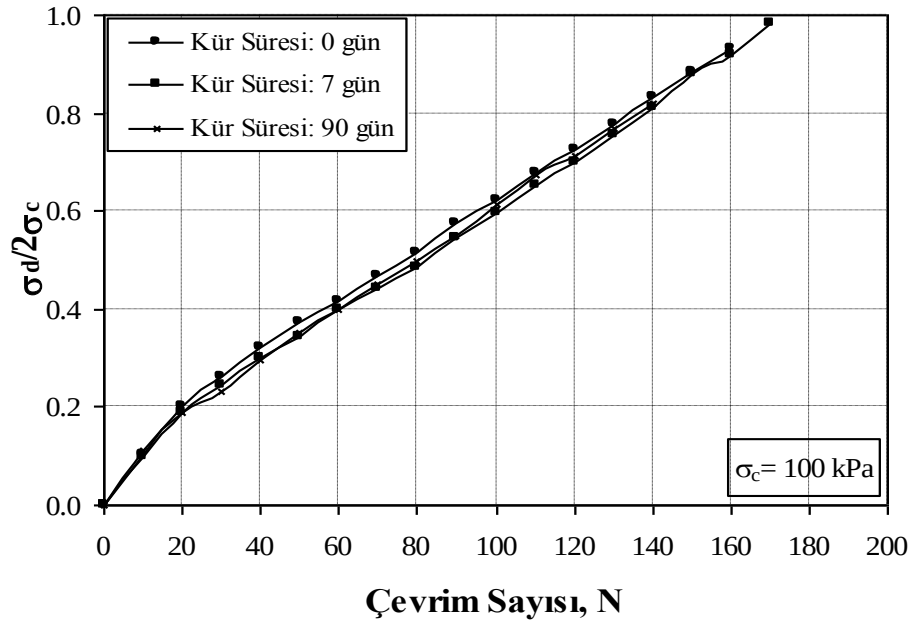


Şekil 4.93 : Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 20)

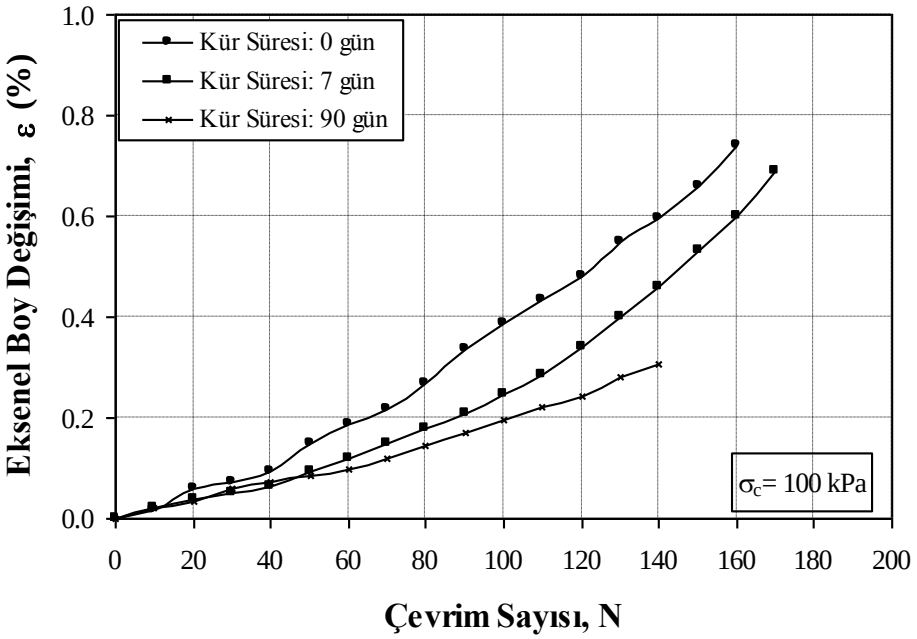


Şekil 4.94 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 20)

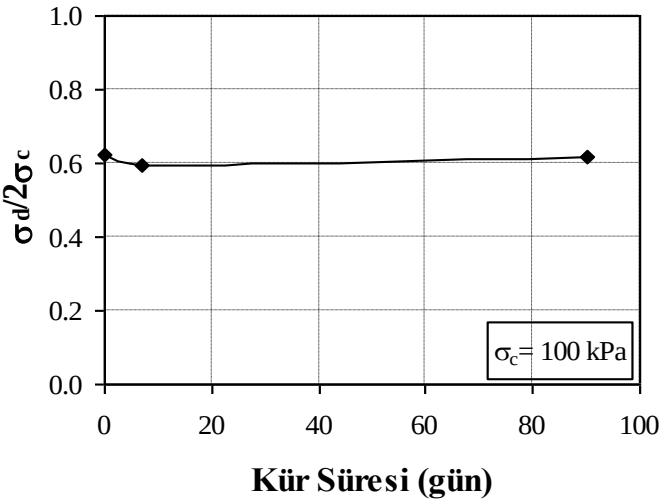
Diğer kür oranlarında olduğu gibi % 50 çöp sızıntı suyu oranında da tüm deneylerde aynı dinamik yükler uygulanmıştır. Şekil 4.95' de bu çöp sızıntı suyu oranına ait dinamik kayma gerilme oranı grafiği verilmiştir. Şekil 4.96' da ise bu çöp sızıntı suyu oranına ait ε-N grafiği verilmiştir. Küre bırakılmamış numunelerin aynı çevrim sayısı için eksenel boy değişimleri küre bırakılmış numunelere göre daha büyüktür. Şekil 4.97' de 100. çevrime denk gelen dinamik kayma gerilmeleri verilmiştir. Şekil 4.98' de eksenel boy değişimlerinin kür süresi ile değişimi görülmektedir. Buna göre 7 gün küre bırakılmış numunenin eksenel boy değişimleri küre bırakılmamış numuneye göre % 37 azalmıştır. 90 gün sonunda ise küre bırakılmamış numunelere göre boy değişiminin % 39 azaldığı gözlenmiştir.



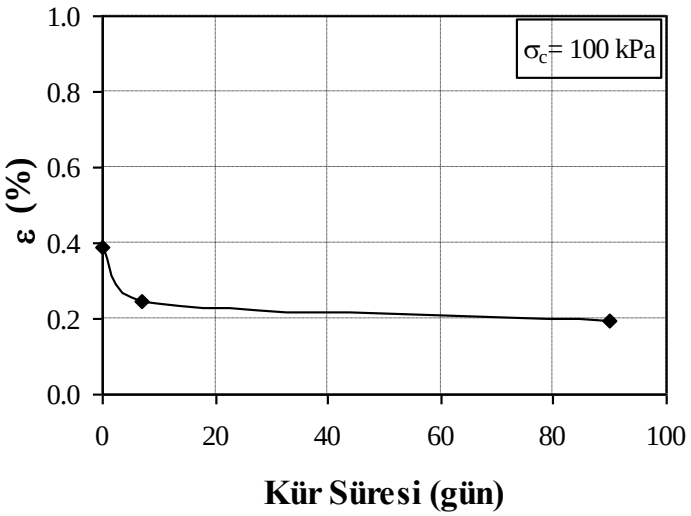
Şekil 4.95 : Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 50)



Şekil 4.96 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 50)

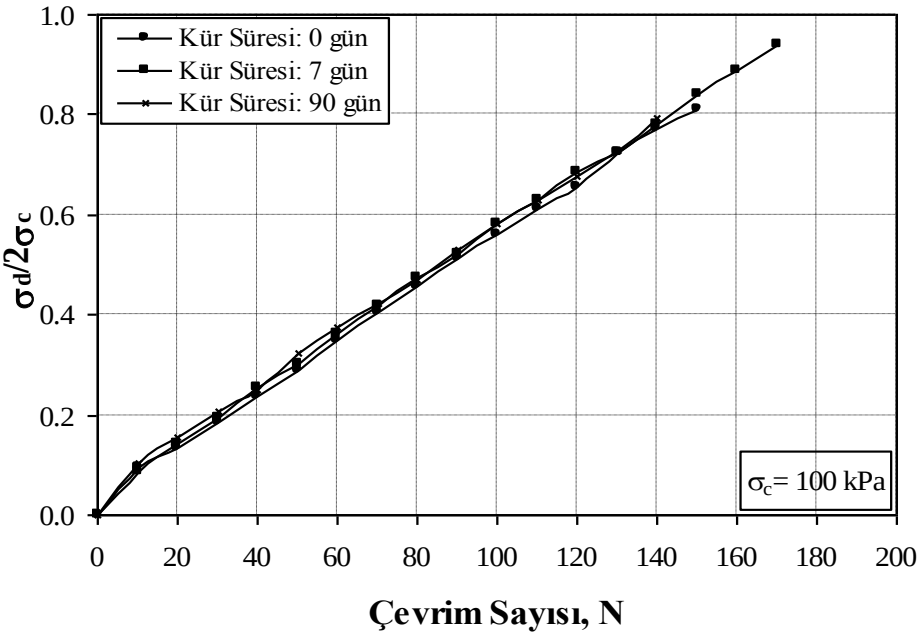


Şekil 4.97 : Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 50)

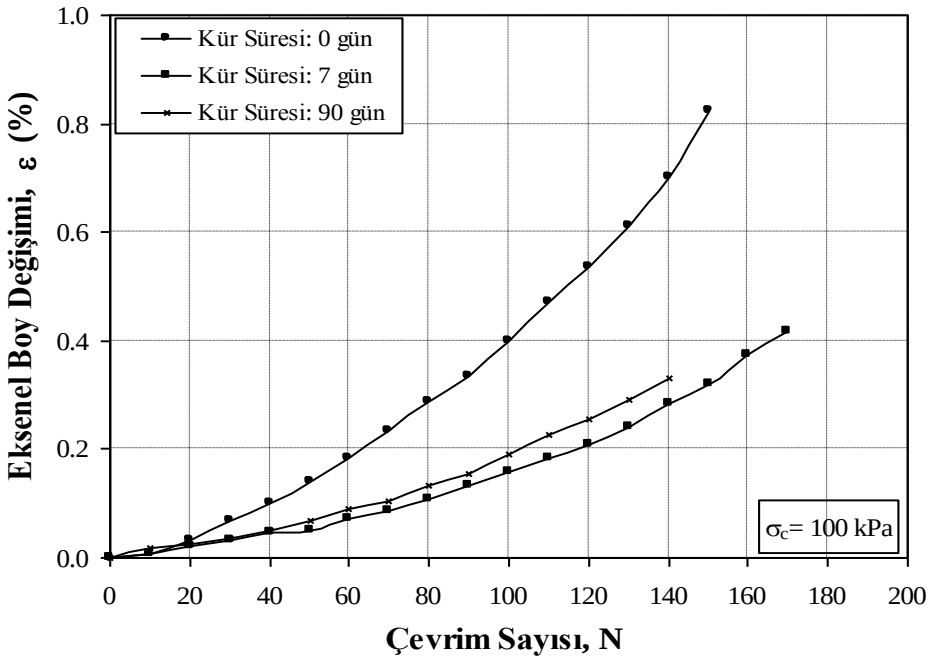


Şekil 4.98 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 50)

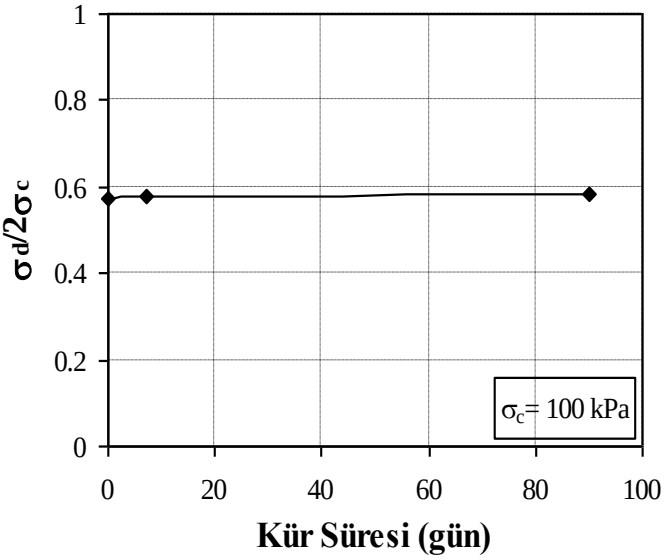
% 100 çöp sızıntı suyu oranında tüm deneylere ait dinamik kayma gerilme oranı N ilişkisi Şekil 4.99' da görülmektedir. Şekil 4.100' de ise bu çöp sızıntı suyu oranına ait ε-N grafiği görülmektedir. Bu çöp sızıntı suyu oranında da kür süresi artınca eksenel boy değişimi azalmıştır. 4.101' de 100. çevrimdeki dinamik kayma gerilme oranları verilmiştir. 100. çevrime denk gelen boy değişimlerini ele alırsak; küre bırakılmamış numunelere ait sonuçlara göre 7 gün küre bırakılmış numunelerin boy değişimi % 61 azalmıştır (Şekil 4.102). 90 gün küre bırakılmış numunelerin boy değişimi ise % 52 oranında küre bırakılmamışlara göre azalmıştır.



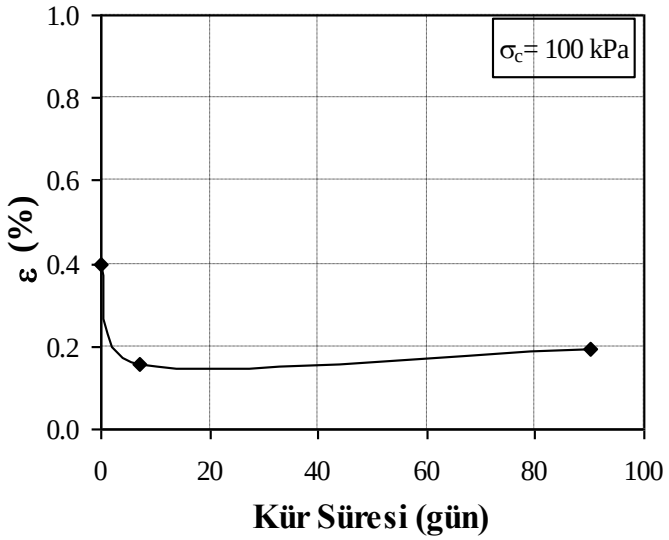
Şekil 4.99 : Dinamik Gerilme Oranı-Çevrim Sayısı (Çöp S: % 100)



Şekil 4.100 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (Çöp S: % 100)



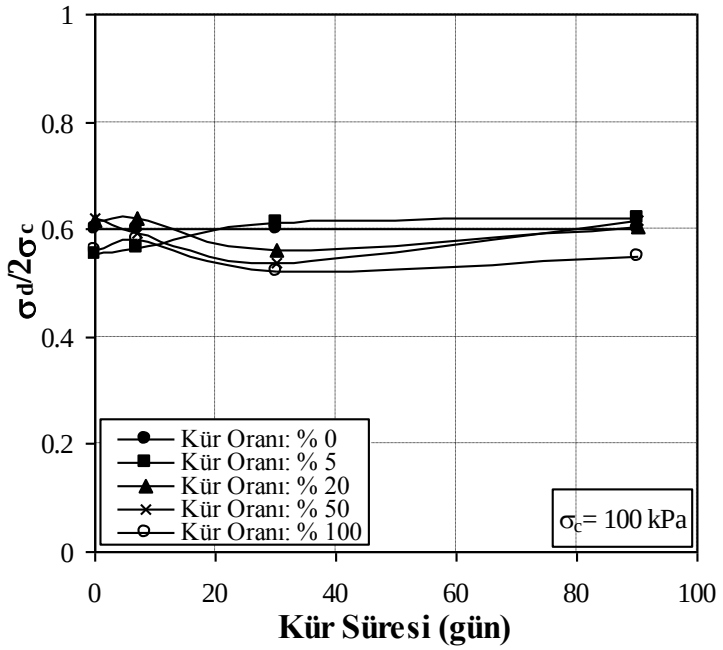
Şekil 4.101 : Dinamik Gerilme Oranı (N= 100, Çöp S: % 100)



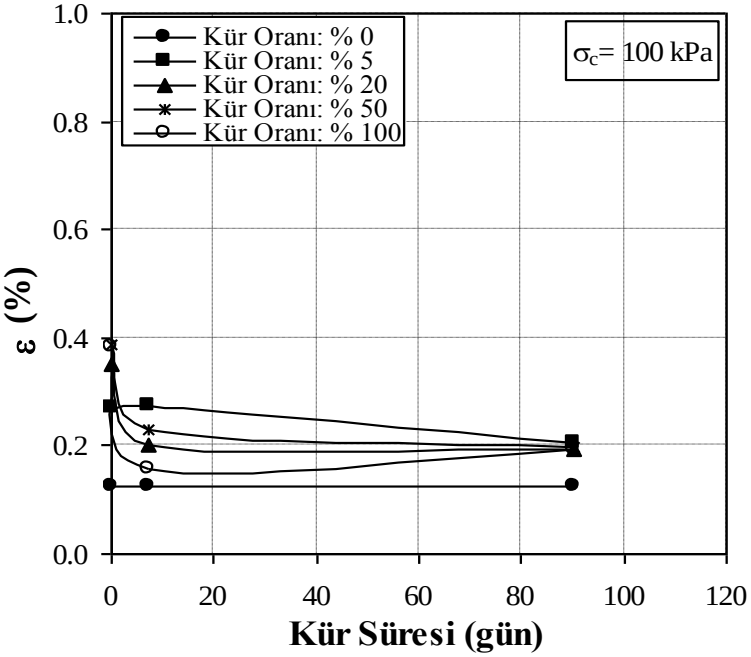
Şekil 4.102 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100, Çöp S: % 100)

Şekil 4.103' de MH sınıfı zemine çeşitli oranlarda çöp sızıntı suyu katılarak hazırlanan numunelere ait dinamik kayma gerilme oranları görülmektedir. Şekil 4.104' de ise aynı numunelerin kür süresi ile eksenel boy değişimleri verilmiştir. Aynı dinamik yükler altında en büyük şekil değiştirme 7 günlük kür sonunda meydana gelmiştir. 90 günlük kür sonunda çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış zemin numunelerindeki boy değişimi aynı seviyededir. Ayrıca boy değişimi temiz zeminde en az, % 5 çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numunelerde ise en fazladır. Bu verilere

göre % 100 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanan numunelerin dirençleri diğer çöp sızıntı suyu oranlarına göre daha yüksektir.



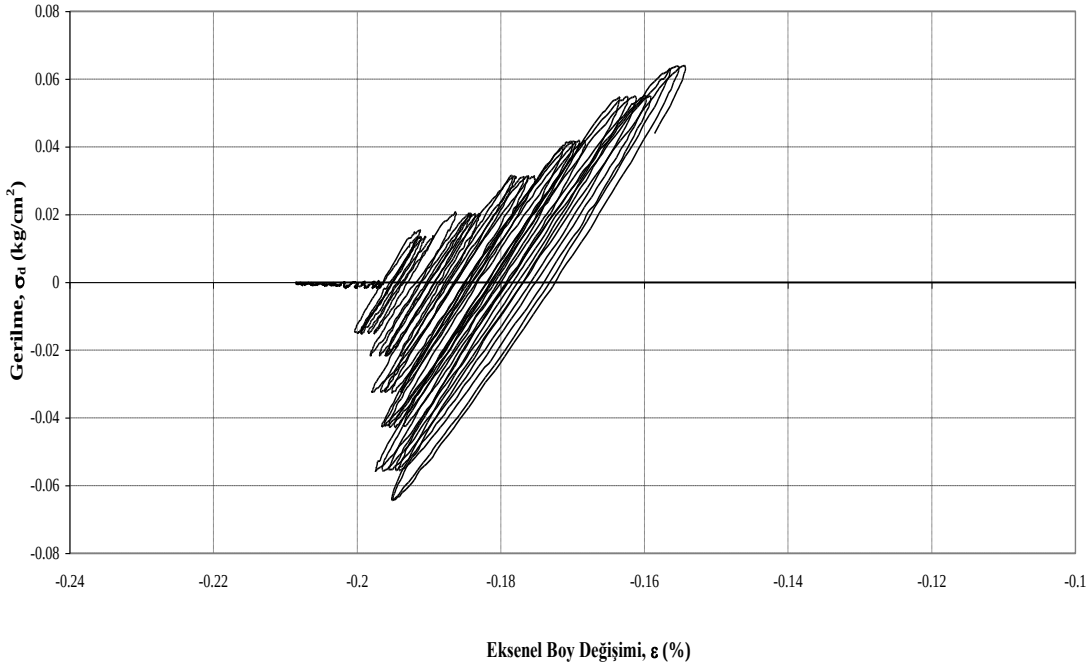
Şekil 4.103 : Dinamik Gerilme Oranı (N= 100)



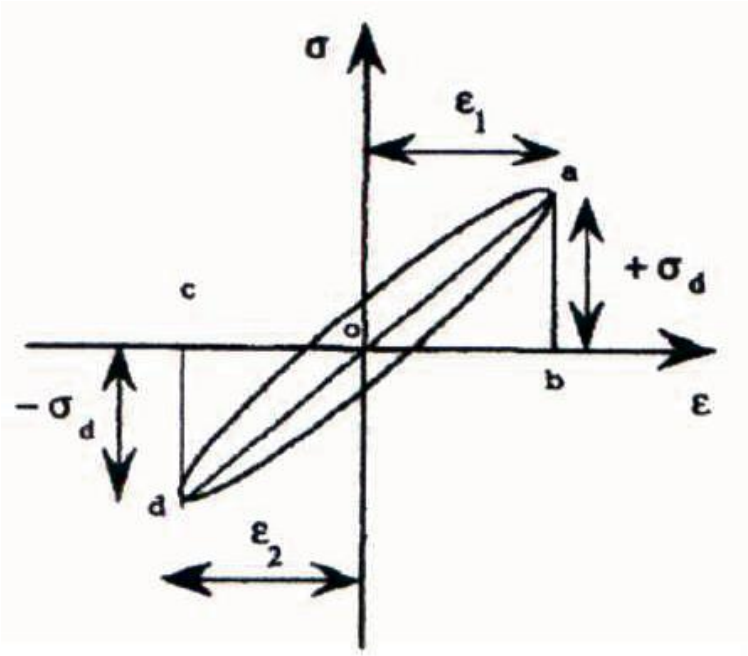
Şekil 4.104 : ε Üzerine Kür Süresinin Etkisi (N= 100)

4.6.2. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Oranı ve Kür Süresinin Etkisi

Elastisite modülü üzerinde kür oranın ve kür süresinin etkisinin belirlenmesi için en büyük elestisite modülü ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sırasında gerilme oranları plastik şekil değiştirmelere izin vermeyecek şekilde 5 çevrimde bir kademeli olarak arttırılarak uygulanmıştır. Daha sonra tekrarlı gerilme (σ) ve eksenel boy değişimi (ε) 3. Bölümde anlatılan hesaplama yöntemine benzer şekilde hesaplanarak histerisis ilmikleri çizilir (Şekil 4.105). Elastisite modülünün hesaplanması sırasında Şekil 4.106' da gösterildiği gibi histerisis ilmiklerinin eğimi hesaplanır. 4.5' de görüldüğü gibi gerilme eksenel boy değişimine bölünerek eğim hesaplanır.



Şekil 4.105 : En Büyük Elastisite Modülü Ölçüm Sonucu
(Çöp S: % 50, Kür Süresi: 7 gün)



Şekil 4.106 : Tekrarlı Yükleme İle Elde Edilen Histerisis İlmiği (Fahoum, 1996)

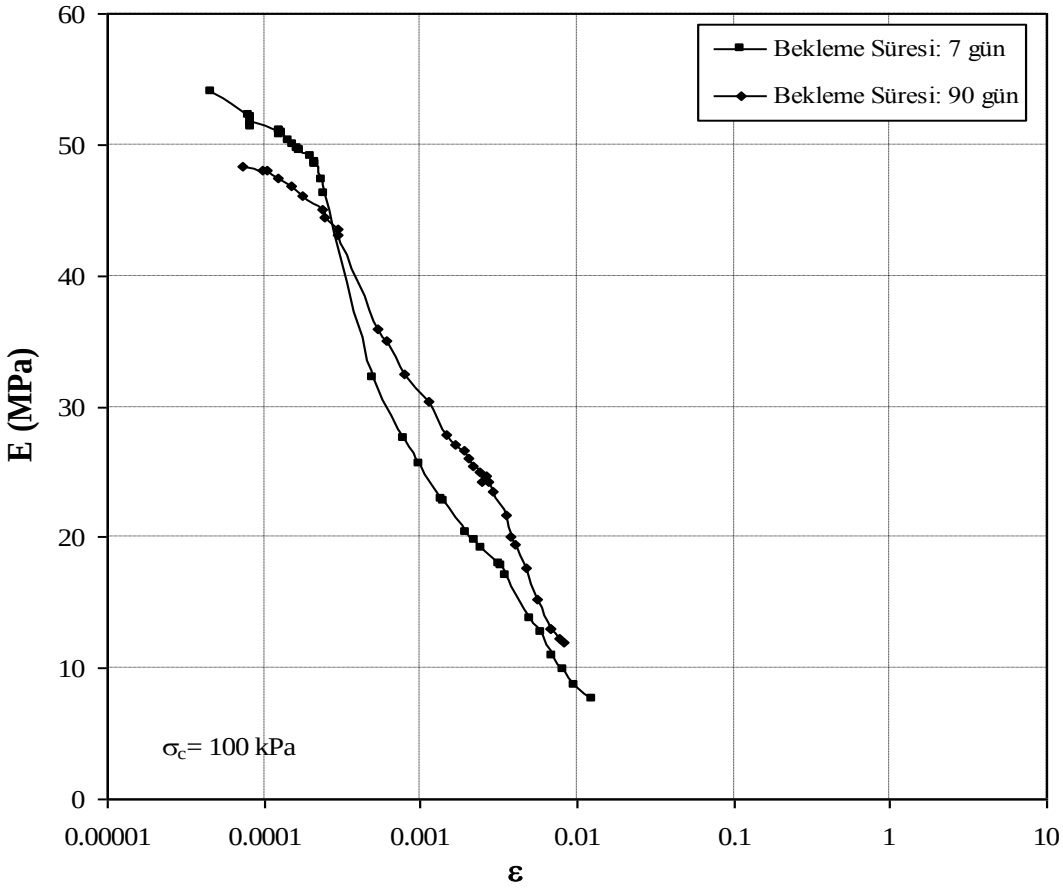
$$E = \frac{2\sigma_d}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \qquad \textbf{(4.5)}$$

σ_d = deviatör gerilme

ε_1 ve ε_2 = eksenel deformasyon

4.6.2.1. Temiz Zeminin Elastisite Modülü

Şekil 4.107' de farklı dinamik yüklere maruz kalmış çöp sızıntı suyu katılmamış zeminin elastisite modülü grafiği görülmektedir. Proktorda hazırlanmış olan çöp sızıntı suyu katılmamış zemin numuneleri su muhtevası değişmeyecek şekilde 7 ve 90 gün nem odasında bekletilmiştir. Numunelere farklı dinamik yükler uygulanarak yük kademesine bağlı olarak elastisite modülündeki değişimler gözlenmiştir. Elastisite modülleri arasındaki farklılık zemin yapındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

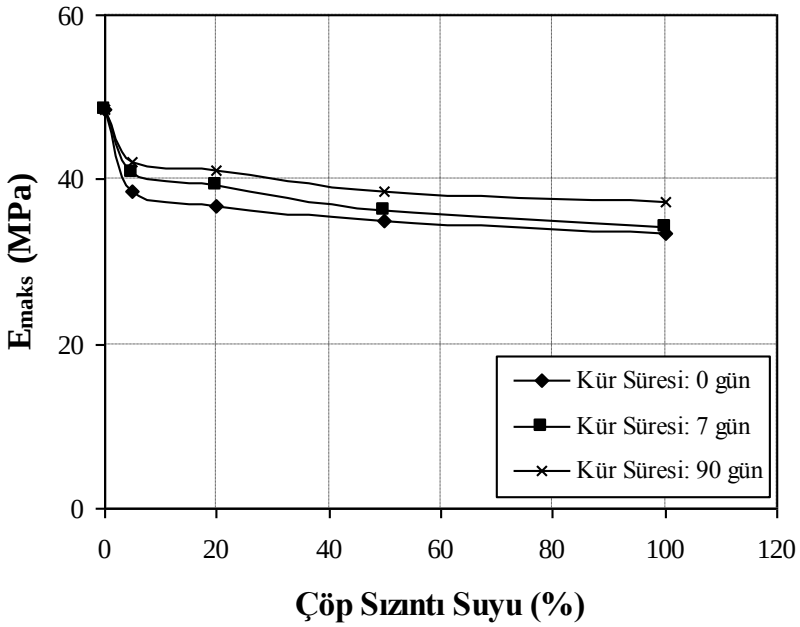


Şekil 4.107 : Dinamik Yükün Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Temiz Zemin)

4.6.2.2. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Oranının Etkisi

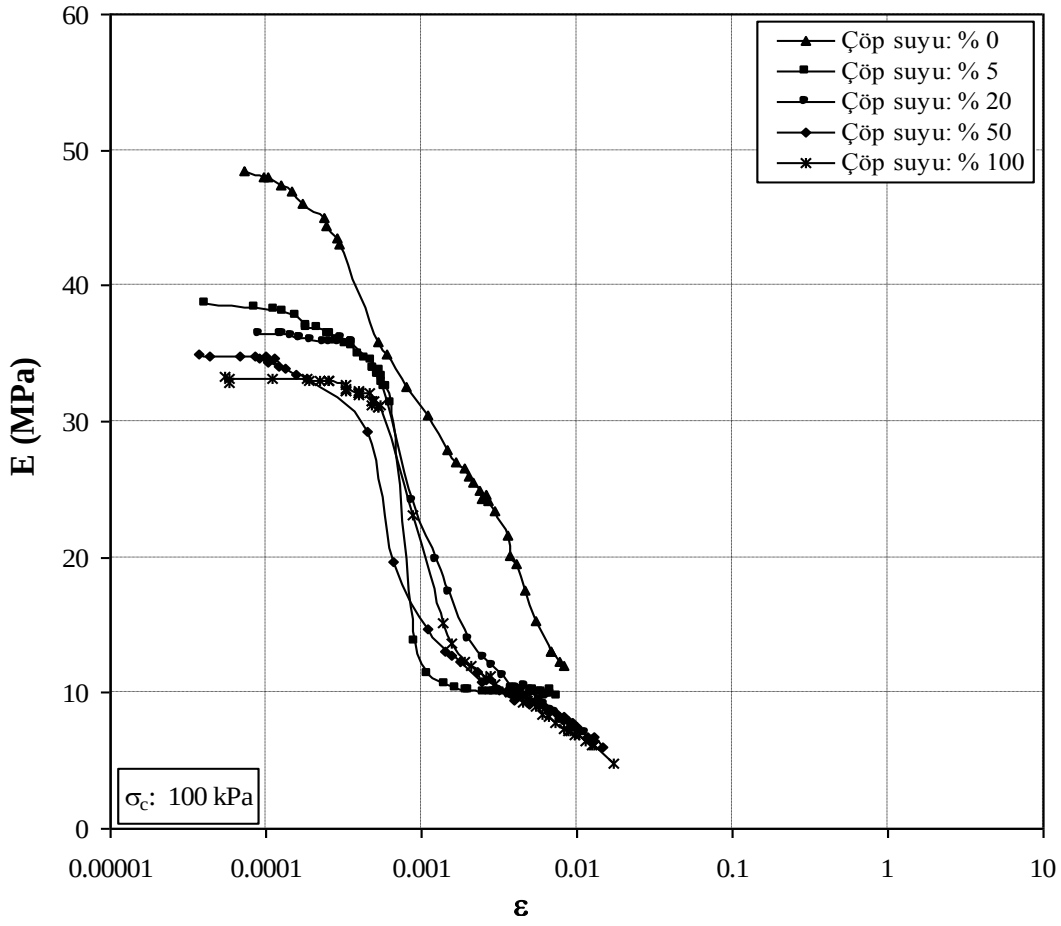
Kür oranın elastisite modülü üzerine etkisini incelemek için kür süresi sabit tutulup kür oranları değiştirilmiş numunelere ait sonuçlardan yararlanılmıştır. Bu amaçla 0, 7, ve 90 günlük kür sürelerine bırakılmış numunelerin elastisite modülü (E)-eksenel boy değişimi (ε) grafiklerinden yararlanılmıştır.

Şekil 4.108' de t= 0, 7 ve 90 gün için en büyük elastisite modülü değerlerinin çöp sızıntı suyu oranı ile değişimi görülmektedir. t= 0, 7 ve 90 günde çöp sızıntı suyu ile karıştırılmış zemin numunelerinin elastisite modülleri çöp sızıntı suyu oranı arttıkça azalmaktadır. Buna göre temiz zeminin en büyük elastisite modülü numuneler içinde en büyük değere sahiptir. % 100 çöp sızıntı suyu oranında ise en büyük elastisite modülü değeri t= 0' da en küçüktür.



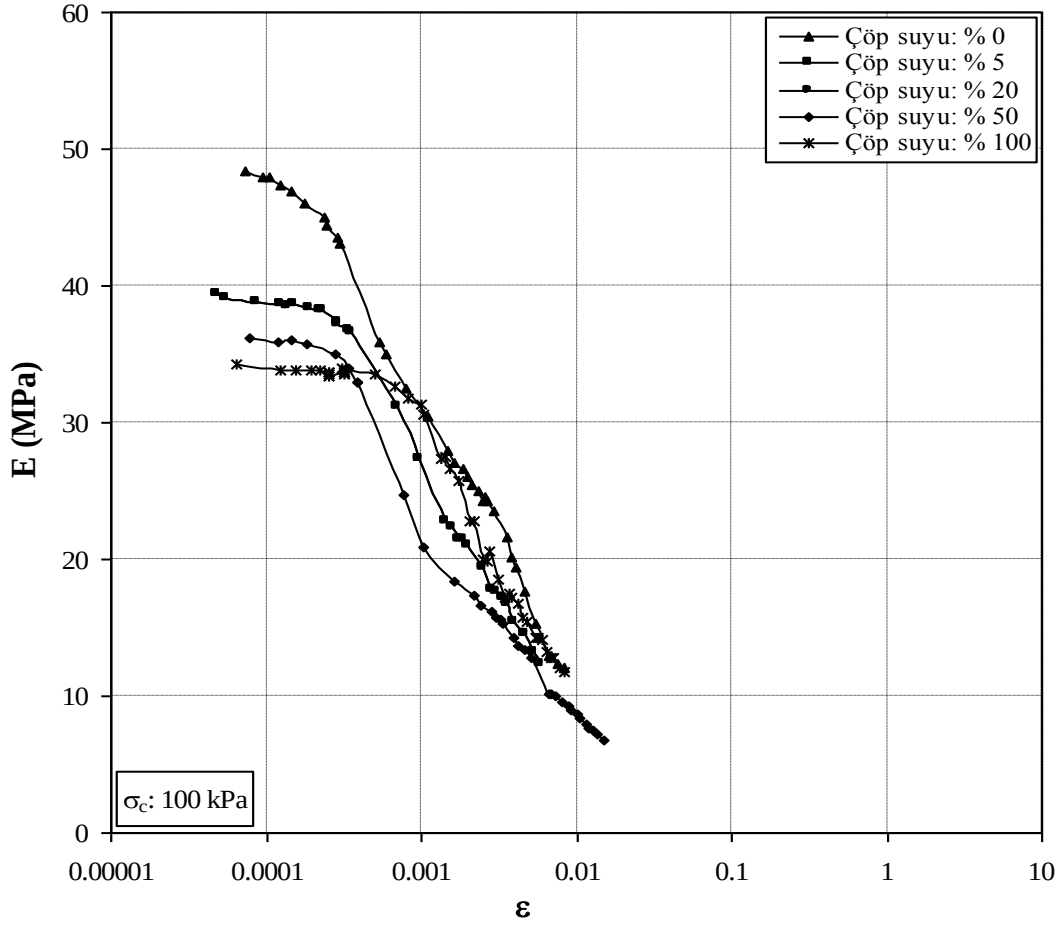
Şekil 4.108 : Kür Oranının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi

Şekil 4.109' da küre bırakılmamış (t= 0) numunelere 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 % 20 azalmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında elastisite modülü % 24 azalmıştır. % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında elastisite modülü % 28 ve % 31 azalmıştır. Görüldüğü gibi 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.



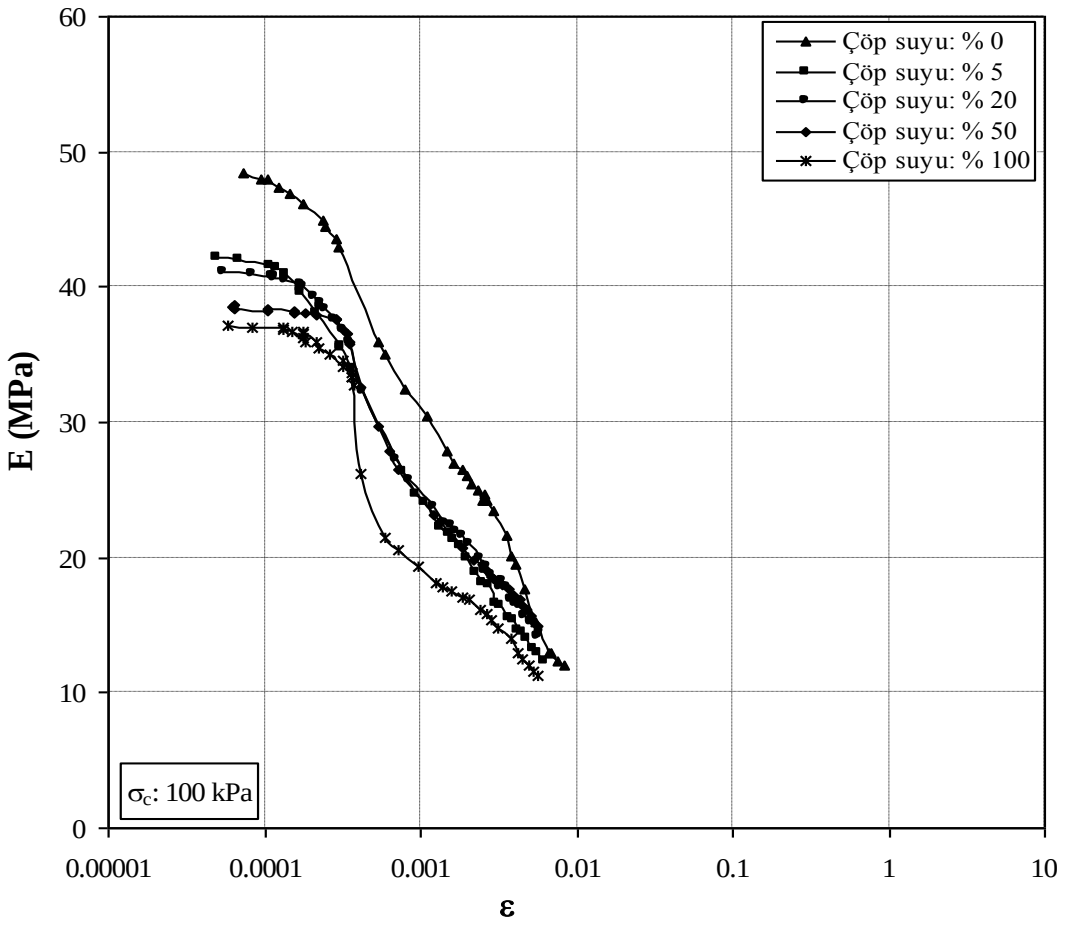
Şekil 4.109 : Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Kür S: 0)

Şekil 4.110' da 7 günlük küre ait elastisite modülü grafiği verilmiştir. Bu kür oranında da 0.0001 eksenel boy değişimine karşı gelen değerler ele alınmıştır. Bu eksenel boy değişiminde elastisite modülü % 5 çöp sızıntı suyu oranında % 16 azalmıştır. % Elastisite modülü % 20 çöp sızıntı suyu oranında, % 20 azalmıştır. Elastisite modülü % 50 çöp sızıntı suyu oranında % 25, % 100 çöp sızıntı suyu oranında % 29 azalmıştır. Görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu oranındaki artışla 7 gün küre bırakılmış numunelerin elastisite modülleri azalmıştır.



Şekil 4.110 : Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Kür S: 7 gün)

Şekil 4.111' de görüldüğü gibi 90 günlük kür sonunda 0.0001 eksenel boy değişiminde elastisite modülü % 5 çöp sızıntı suyu oranı için % 13 azalmıştır. Elastisite modülündeki azalma % 20 çöp sızıntı suyu oranında % 15 olarak belirlenmiştir. % 50 çöp sızıntı suyu oranında elastisite modülü % 19, % 100 çöp sızıntı suyu oranında % 23 azalmıştır. Buna göre 90 günlük kür sonunda temiz zeminin elastisite modülü maksimum, % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunenin elastisite modülü minimumdur. Bu verilere göre 90 günlük kür sonunda diğer kür sürelerinde olduğu gibi elastisite modülü çöp sızıntı suyu oranındaki artışla azalmıştır.



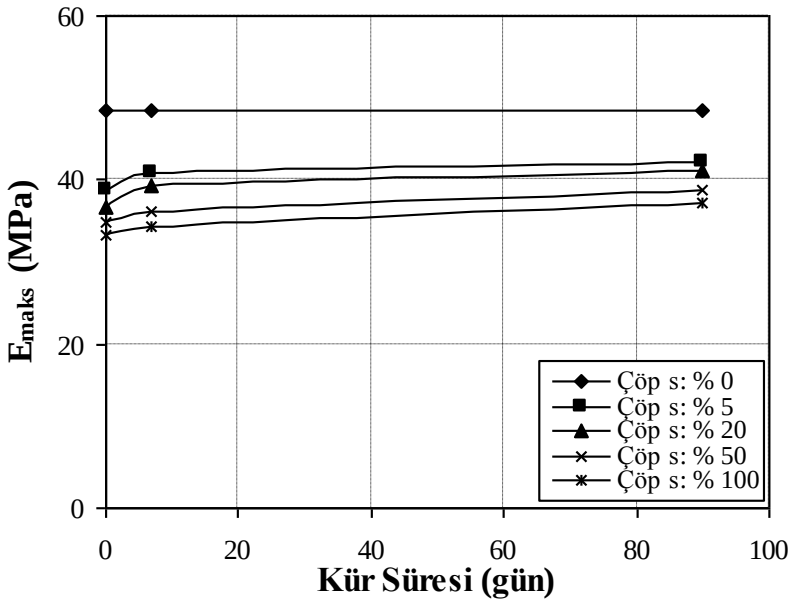
Şekil 4.111 : Kür Oranın Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Kür S: 90 gün)

4.6.2.3. Elastisite Modülü Üzerinde Kür Süresinin Etkisi

Bu bölümde ise kür süresinin elastisite modülü üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çöp sızıntı suyu oranı % 5, 20, 50 ve % 100 olan numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 7 ve 90 gün küre bırakılmıştır. Kür süreleri sonunda ise en büyük elastisite modülü ölçümleri yapılmıştır (Tablo 4.8). Şekil 4.112' de bu ölçümler sonucunda elde edilen en büyük elastisite modülü değerlerinin kür süresi ile değişimi verilmiştir. % 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış küre bırakılmamış numuneye ait en büyük elastisite modülü en küçüktür.

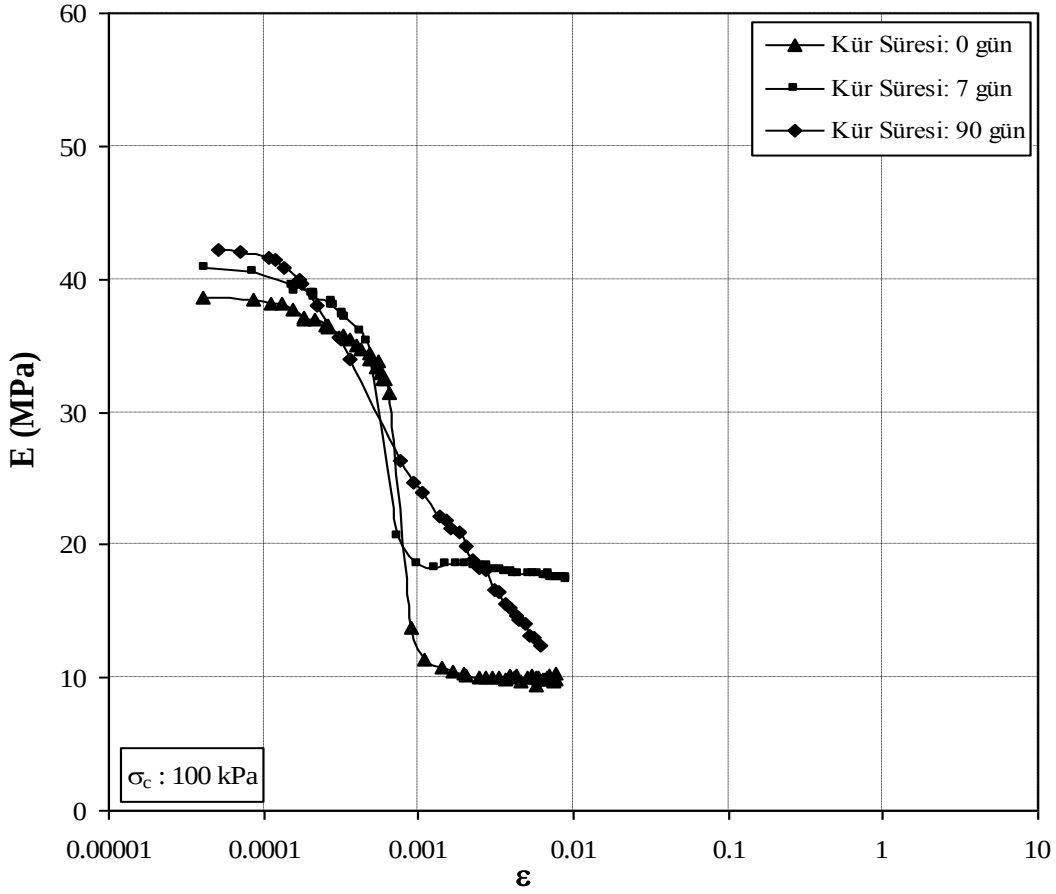
Tablo 4.8 : Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi

Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	E (MPa)
0	90	48.40
5	0	38.65
	7	40.89
	90	42.18
20	0	36.80
	7	39.43
	90	41.13
50	0	34.88
	7	36.13
	90	38.65
100	0	33.32
	7	34.31
	90	37.19



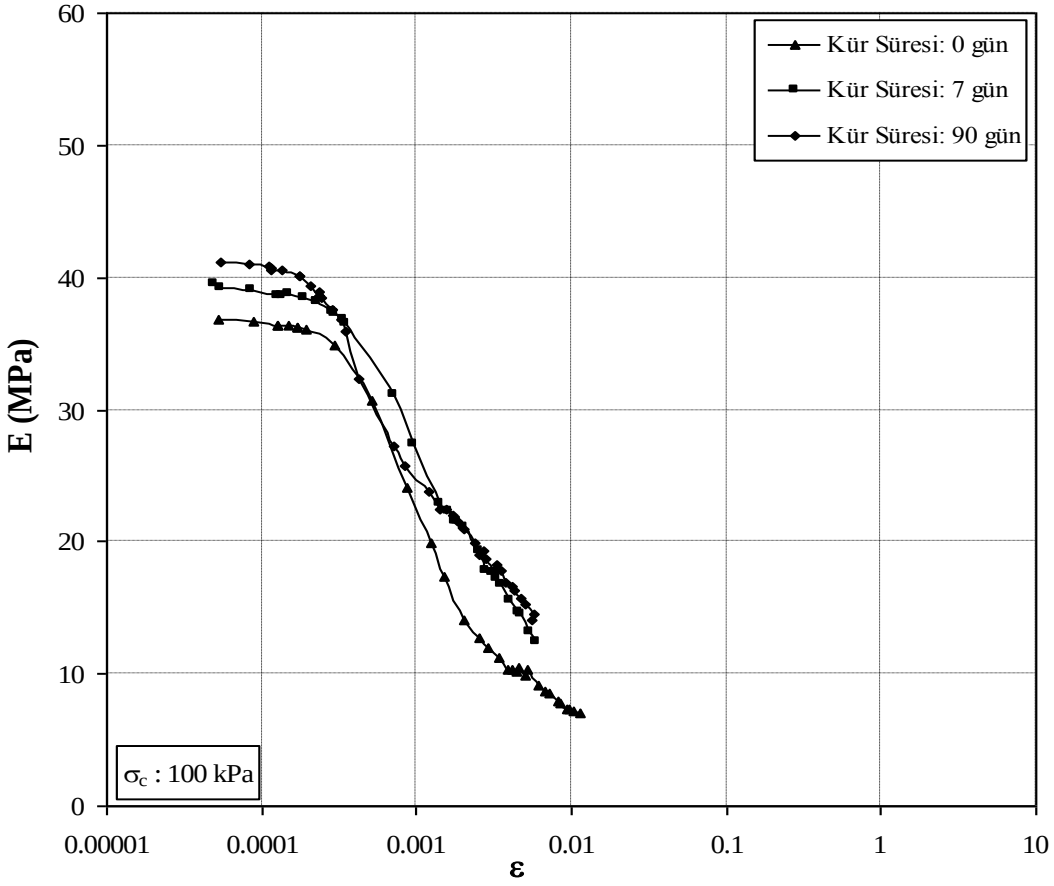
Şekil 4.112 : Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi

Şekil 4.113' de % 5 çöp sızıntı suyu içeren numunelere ait elastisite modülü grafiği görülmektedir. Kür süresindeki artışla elastisite modülündeki değişimi incelemek için en büyük elastisite modülü değerlerini ele alırsak; t= 0' a göre 7 günlük kür sonunda başlangıç elastisite modülü % 3, 90 günlük kür sonunda ise % 6 artmıştır. Buna göre % 5 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanmış numunelerin elastisite modülleri kür süresindeki artışla artmaktadır.



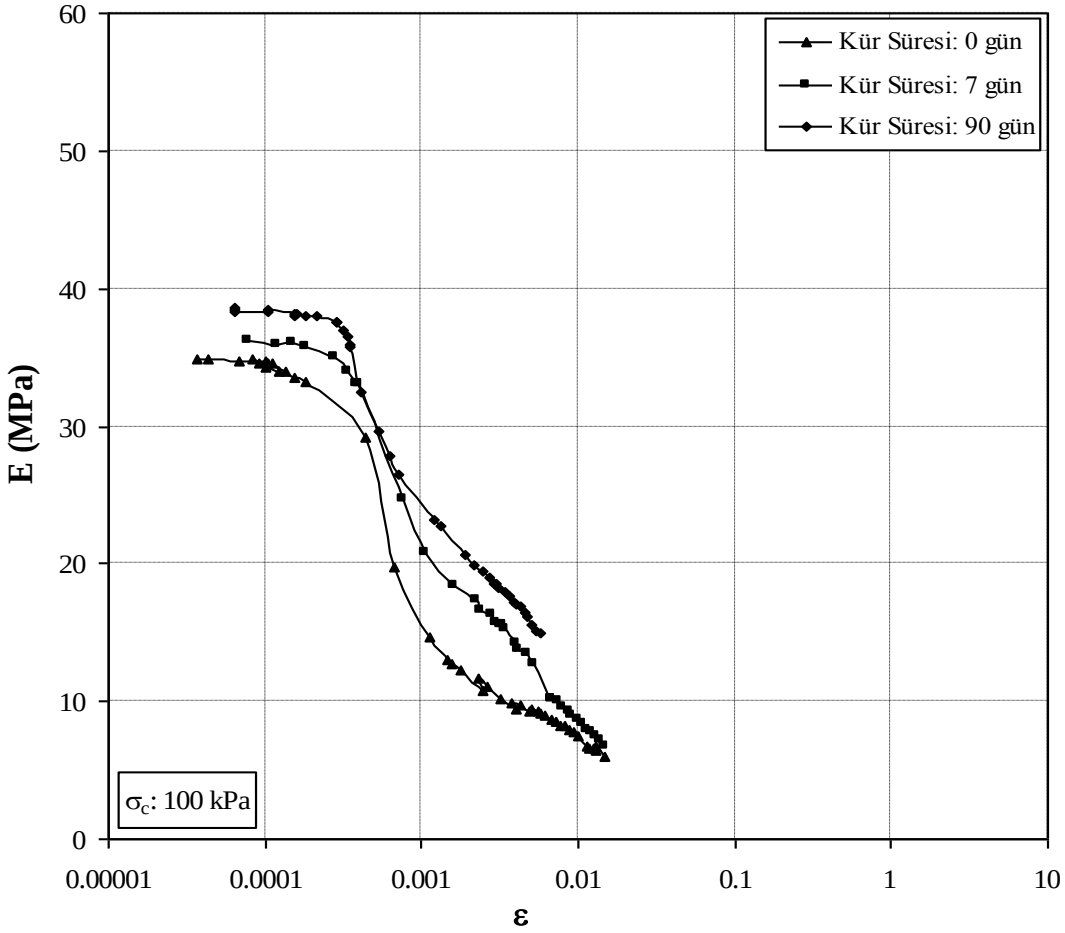
Şekil 4.113 : Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 5)

Şekil 4.114' de % 20 çöp sızıntı suyu içeren numunelere ait elastisite modülü grafiği görülmektedir. Kür süresindeki artışla elastisite modülündeki değişimi incelemek için küçük deformasyon seviyelerindeki elastisite modüllü değerlerini ele alırsak; t= 0' a göre 7 günlük kür sonunda en büyük elastisite modülü % 7, 90 günlük kür sonunda ise % 11 artmıştır. Buna göre % 20 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanmış numunelerin elastisite modülleri kür süresindeki artışla artmaktadır.



Şekil 4.114 : Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 20)

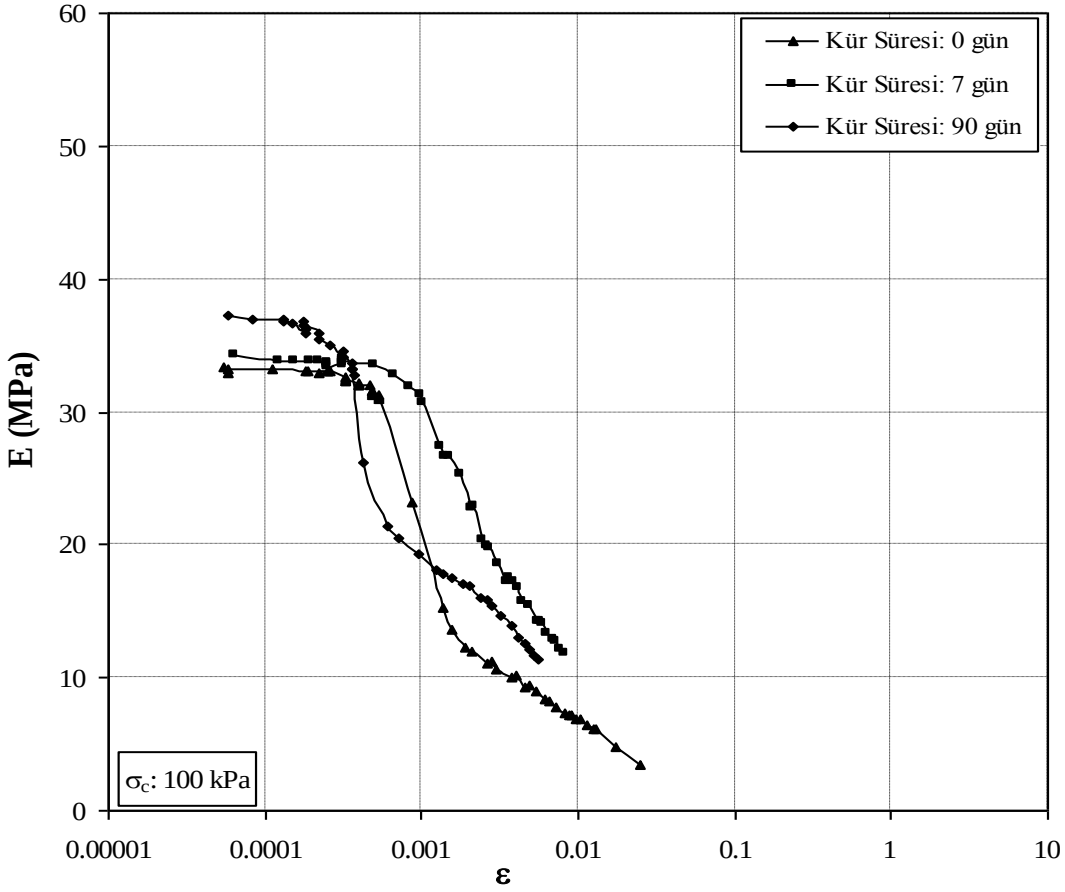
% 50 çöp sızıntı suyu içeren numunelere ait elastisite modülü-ε grafiği Şekil 4.115' de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi küçük deformasyon seviyelerinde t= 0' a ait değerler 7 ve 90 güne ait değerlerden daha küçüktür. En büyük elastisite modülü değerlerini ele alırsak; t= 0' a göre 7 günlük kür sonunda en büyük elastisite modülü % 4, 90 günlük kür sonunda ise % 11 artmıştır. Görüldüğü gibi % 50 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanmış numunelerin elastisite modül değerleri kür süresindeki artışla artmaktadır.



Şekil 4.115 : Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 50)

% 100 çöp sızıntı suyu içeren numunelere ait elastisite modülü-ε grafiği Şekil 4.116' da verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi küçük deformasyon seviyelerinde t= 0' a ait değerler 7 ve 90 güne ait değerlerden daha küçüktür. En büyük elastisite modülü değerlerini ele alırsak; t= 0' a göre 7 günlük kür sonunda en büyük elastisite modülü % 3, 90 günlük kür sonunda ise % 11.5 artmıştır. Görüldüğü gibi % 100 çöp sızıntı suyu oranında hazırlanmış numunelerin elastisite modül değerleri kür süresindeki artışla artmaktadır.

Elastisite modülü (E) –Eksenel boy değişimi (ε) grafiklerinden görüldüğü gibi kür oranının yanı sıra kür süresi de elastisite modülü üzerinde etkilidir. % 5, 20, 50 ve % 100 oranlarında çöp sızıntı suyu katılarak hazırlanmış numunelerin elastisite modülleri kür süresindeki artışla birlikte artmıştır. Fakat elastisite modülü üzerinde kür süresinin etkisi çöp sızıntı suyu oranının göre daha azdır.



Şekil 4.116 : Kür Süresinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi (Çöp S: % 100)

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 oranı 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 ile kirletilmiş zemin numunelerinin kohezyon değerleri temiz zemine göre daha düşüktür. Çöp sızıntı suyu katılarak hazırlanan numuneler kendi aralarında incelendiğinde % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar c' nin kür oranındaki artışla arttığı görülmüştür. Bu orandan sonra ise kür oranındaki artışla c azalmıştır. ϕ ise genel olarak temiz zemine göre çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numunelerde daha yüksektir. % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla ϕ azalmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise

çöp sızıntı suyu oranındaki artışla ϕ artmıştır. Ayrıca kesme kutusu deney sonuçları göstermiştir ki kür süresindeki artışla c azalırken, ϕ ise artmaktadır. Ödometre deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayı üzerinde çöp sızıntı suyu oranı ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. Çöp sızıntı suyu oranı arttıkça % 20 çöp suyu oranı dışında permeabilite çöp suyu oranındaki artışla artmıştır. Ayrıca permeabilite katsayı kür süresindeki artışla artmıştır.

Aynı dinamik yükler altında çöp sızıntı suyu oranı ve kür süresinin zeminin elastisite modülü üzereine etkisini araştırmak amacı ile dinamik üç eksenli basınç deney sisteminden yararlanılmıştır. Dinamik deney sonuçları göstermiştir ki çöp sızıntı suyu katılmamış numunelere göre çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin elastisite modülleri daha düşüktür. Zemine karıştırılan çöp sızıntı suyu oranı elastisite modülü üzerinde etkilidir. Çöp sızıntı suyu oranı arttıkça elastisite modülü azalmaktadır. Çöp sızıntı suyunun yanı sıra kür süresi de elastisite modülü üzerinde etkilidir. Fakat çöp sızıntı suyu oranına göre bu etki daha azdır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sızıntı çöp sızıntı suyu oranın ve zeminle etkileşim süresinin zeminin statik ve dinamik davranışları üzerine etkileri ele alınmıştır. Zeminin statik davranışları olarak; gerilme-şekil değiştirme, kayma mukavemeti parametreleri, zeminin hacim değiştirme davranışı ve permeabilite katsayısı ele alınmıştır. Dinamik davranışlar olarak dinamik yükler altında zeminin gerilme-şekil değiştirme ve dinamik elastisite modülü incelenmiştir. Bu amaçla yüksek plastisiteli silte (MH) optimum su muhtevasının % 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100' ü oranında çöp sızıntı suyu katılarak Standart Proktor ile numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı küre bırakılmadan hemen deneye alınırken diğerleri 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakılmıştır. Ayrıca kıvam limitleri deneylerinde 300 gün küre bırakılmış numuneler kullanılmıştır.

Kıvam limitleri pH, anyon ve katyon etkisi ile değişmektedir (Keskin ve diğ., 2004). Çöp sızıntı suyu ile yapılan bu çalışmada kıvam limitlerinin değişimi üzerinde kür oranı ile artan pH miktarının etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Likit limit deney sonuçlarından görüldüğü gibi 7.65 pH değerine sahip temiz zeminin likit limiti % 72' iken pH değeri 7.83 olan % 100 çöp sızıntı suyu içeren numunenin likit limiti % 81 olarak belirlenmiştir. Buradan anlaşıldığı gibi çöp sızıntı suyu oranındaki artışla pH değeri artarak likit limitin artmasına neden olmuştur. 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. 300 günlük kür süresi sonunda ise likit limit başlangıç değerlerine geri dönmüştür. Plastik limit deneyleri sonucunda; çöp sızıntı suyu katkılı zemin numunelerinin plastik limit değerlerinin temiz zeminden daha düşük olduğu görülmüştür. Fakat 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. 30 günlük kür sonunda plastik limit

7 güne göre bir miktar azalmıştır. 90 günde tekrar artmıştır. 300 günde 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 300 günlük kür sonunda başlangıç değerlerine geri dönmüştür.

% 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu içeren 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 uygulanarak kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. 100 kPa normal gerilme seviyesinde çöp sızıntı suyu içeren numunelerin kayma mukavemetleri temiz zemin numunesinden daha düşüktür. 7 güne kadar küre bırakılmış numunelerin kayma mukavemetleri 200 ve 300 kPa normal gerilme seviyelerinde artmıştır. 30 ve 90 gün kürde bırakılmış numunelerin kayma mukavemetleri üç gerilme seviyesinde de azalmıştır. Çöp sızıntı suyu içeren numunelerde en büyük kayma gerilmesine temiz zemine göre daha düşük deformasyon seviyelerinde ulaşılmıştır. Çöp sızıntı suyu içeren numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde % 20 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla kayma mukavemetlerinin arttığı görülmüştür. Bu orandan daha yüksek çöp sızıntı suyu oranlarında ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla kayma mukavemetleri azalmıştır. Fakat % 100 çöp sızıntı suyu oranında % 50 çöp sızıntı suyu oranına göre 200 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde bir miktar artış gözlenmiştir. 1 ve 7 gün küre bırakılmış numunelerin kayma mukavemetleri küre bırakılmamış numunelere göre daha yüksektir. 30 ve 90 gün küre bırakılmış numunelerin kayma mukavemetleri azalmıştır. Ayrıca % 20' den daha düşük çöp sızıntı suyu içeren numunelerin en büyük kayma gerilmesine ulaştıkları yatay deformasyon seviyeleri kür süresindeki artışla artmıştır. Bu orandan daha yüksek çöp sızıntı suyu oranlarında ise en büyük kayma gerilmesine ulaşılan yatay deformasyon seviyeleri kür süresindeki artışla azalmıştır.

Kesme kutusu deney sonuçları göstermiştir ki % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar çöp sızıntı suyu oranındaki artışla zeminin kohezyonu (c) artarken, içsel sürtünme açısı (ϕ) azalmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise çöp sızıntı suyu

oranındaki artışla c azalırken, ϕ artmıştır. Zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısında görülen bu davranış değişiklikleri üzerinde sodyum, magnezyum ve kalsiyumun etkin olduğu görülmüştür. % 30 çöp sızıntı suyu oranına kadar sodyum, magnezyum ve kalsiyum azalmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranından sonra ise bu maddeler artmıştır. Çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunelerinin ϕ ve c parametrelerinin kür süresine bağlı olarak gösterdikleri değişimler incelendiğinde; tüm çöp sızıntı suyu oranlarında ϕ' nin kür süresindeki artışla azaldığı, c' nin ise arttığı görülmüştür.

% 5, 20, 50 ve 100 çöp sızıntı suyu oranı ile hazırlanmış numunelere ait ödometre deney sonuçlarına göre küre bırakılmamış % 50 çöp sızıntı suyu içeriğine sahip numunede en az konsolidasyon oturması olmuştur. En çok oturma ise en düşük sodyum ve klorür içeriğine sahip olan % 20 çöp sızıntı suyu ile hazırlanmış numunede gözlenmiştir. Temiz zeminde ve % 100 çöp sızıntı suyu oranında zemin aynı oturma davranışını göstermiştir. 30 günlük kür sonunda ise çöp sızıntı suyu oranındaki artışla zemindeki oturma miktarı artmıştır. Fakat bu kür süresinde aynı konsolidasyon basınçları altında temiz zemine göre çöp sızıntı suyu içeren numunelerde daha az konsolidasyon oturmaları olmuştur.

% 20 çöp sızıntı suyu içeren numune dışında diğer çöp sızıntı suyu içeren numunelerin permeabiliteleri Goh ve Tay (1993) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi çöp suyu oranındaki artışla artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu içeren numunede görülen bu davranış değişimi numune içindeki sodyum ve klorür miktarının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Aydın ve diğ., 2004). Zeminin permeabilitesi kür süresindeki artışla artmıştır. Küre bırakılmamış ve 30 gün küre bırakılmış numunelere ait deney sonuçları karşılaştırıldığında kür süresindeki artışla permeabilitenin artığı görülmüştür. Zeminin konsolidasyon katsayısı permeabiliteye benzer davranış göstermiştir. Yine % 5 çöp sızıntı suyu içeren zemin numunelerinin konsolidasyon katsayısı temiz zemine göre artmıştır. % 20 çöp sızıntı suyu oranında ise azalmıştır. % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında ise konsolidasyon katsayısı % 20 çöp sızıntı suyu oranına göre artmıştır. Bu çöp sızıntı suyu oranlarında konsolidasyon katsayısı temiz zemine göre artmıştır. Konsolidasyon katsayısı permeabilitede olduğu gibi kür süresindeki artışla artmıştır.

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 küre bırakılmadan, 7 ve 90 gün süre ile küre bırakılarak dinamik üç eksenli deney sisteminde azalım deneylerine tabi tutulmuştur. Dinamik deney uygulamalarında numuneler doygun hale getirilmemiş ve konsolidasyona bırakılmamıştır. 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. Buna göre çöp sızıntı suyu oranındaki artışla zeminin eksenel boy değişimi artmaktadır. Genel olarak çöp sızıntı suyu içeren numunelerin eksenel boy değişimleri kür süresindeki artışla azalmıştır.

Elastisite modülü üzerinde kür oranın ve kür süresinin etkisinin belirlenmesi için en büyük elestisite 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 nitratın etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Çöp suyu oranındaki artışla nitrat miktarı azalmıştır. Bunu sonucunda zeminin elastisite modülünde azalma gözlenmiştir. Elastisite modülü üzerinde çöp sızıntı suyu oranın yanı sıra kür süresinin etkisini belirlemek amacı ile küre bırakılmamış numunelere ait değerler 7 ve 90 gün küre bırakılmış numunelere ait değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda kür süresindeki artışla çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin en büyük elastisite modülü değerlerinin bir miktar arttığı görülmüştür. Elde edilen bu veriler doğrultusunda en büyük elastisite modülü üzerinde çöp sızıntı suyu oranının kür süresine göre daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Düzenli katı atık depo alanlarında yeraltı suyunun kirlenmesini engellemek amacı ile kil tabakaların permeabilitesinin düşük olması istenmektedir. Fakat bu çalışmada görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu oranındaki ve kür süresindeki artışla permeabilite katsayısı artarak yeraltı suyunun kirlenme riski artmıştır. Çöp sızıntı suyu zeminin likit limitini arttırak zeminde kuruma çatlakları oluşmasına neden olacaktır. Bu

durum istenmeyen bir özelliktir. Çünkü çatlaklardan çöp suyunun sızarak yeraltı suyunu kirletme riski vardır (Güler ve diğ., 1992). Çöp sızıntı suyu ve kür süresi zeminin kayma mukavemeti ve içsel sürtünme açısı üzerinde olumsuz etki yapmıştır. Bunun neticesinde katı atık depo alanlarında şev kayması problemi ile karşılaşılabilir. Çöp sızıntı suyu zeminin deprem yükleri altında dayanımının azalmasına neden olmuştur.

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 laboratuar 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 Geçirimlilik 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 *Enginerring 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*, Istanbul, 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 Liqud 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.

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.

Mıtchell, J.K., 1976. Fundamatals 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 Metarials 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 Stres 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.

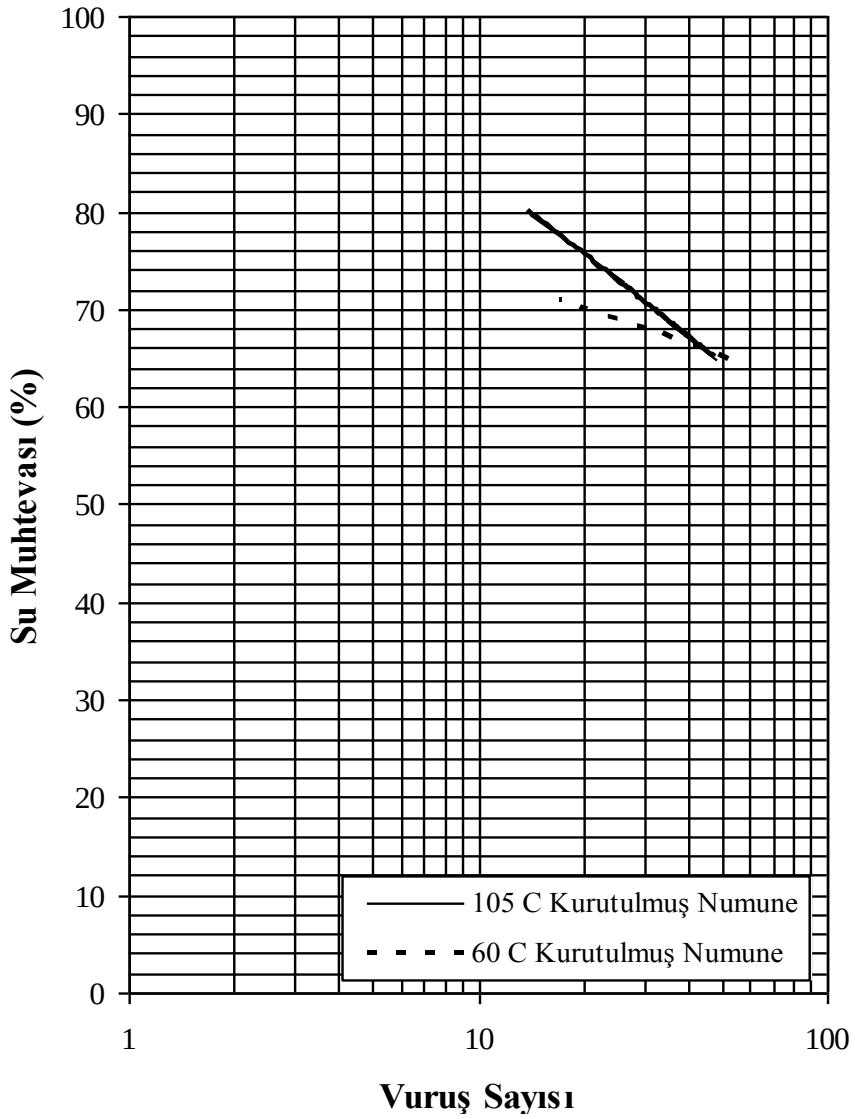
Toğrol, E. ve Özüdoğru K., 1992. Deniz Geotekniği, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, s. 11

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.

Tablo A.1 : Kıvam Limitleri (Temiz Zemin)

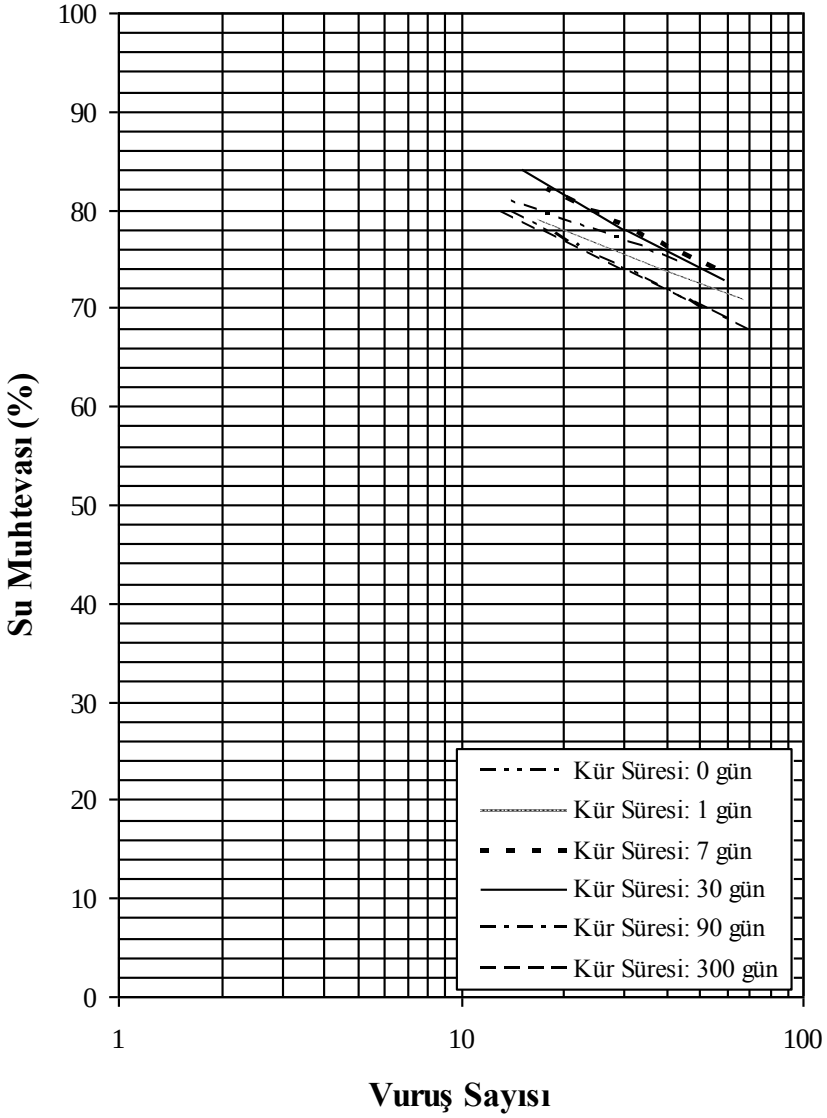
Zemin Sınıfı	Kurutulma Sıcaklığı (C^0)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
MH	105	72	35	37
	60	69	33	36



Şekil A.1 : Deney Numunesi Likit Limit Sonuçları

Tablo A.2 : Kıvam Limitleri (Çöp S: % 5)

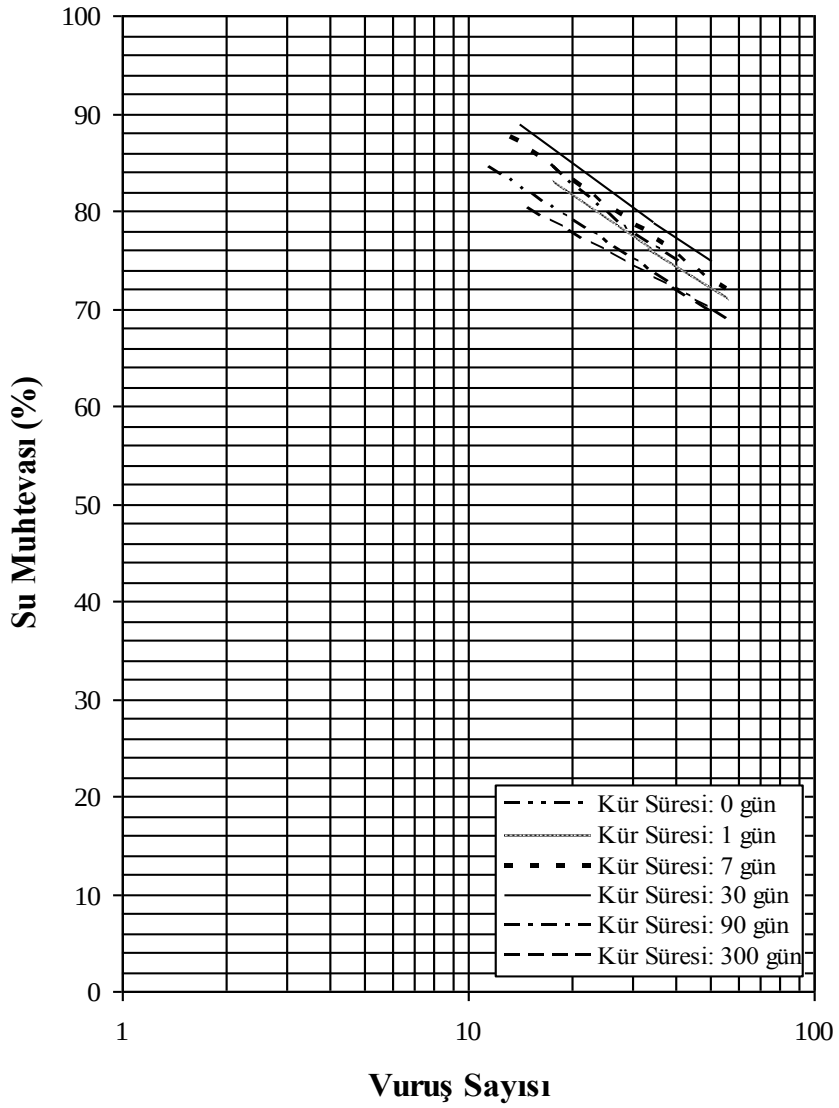
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
5	0	75	28	47
	1	77	29	48
	7	79	30	49
	30	80	29	51
	90	78	31	47
	300	74	29	45



Şekil A.2 : Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 5)

Tablo A.3 : Kıvam Limitleri (Çöp S: % 20)

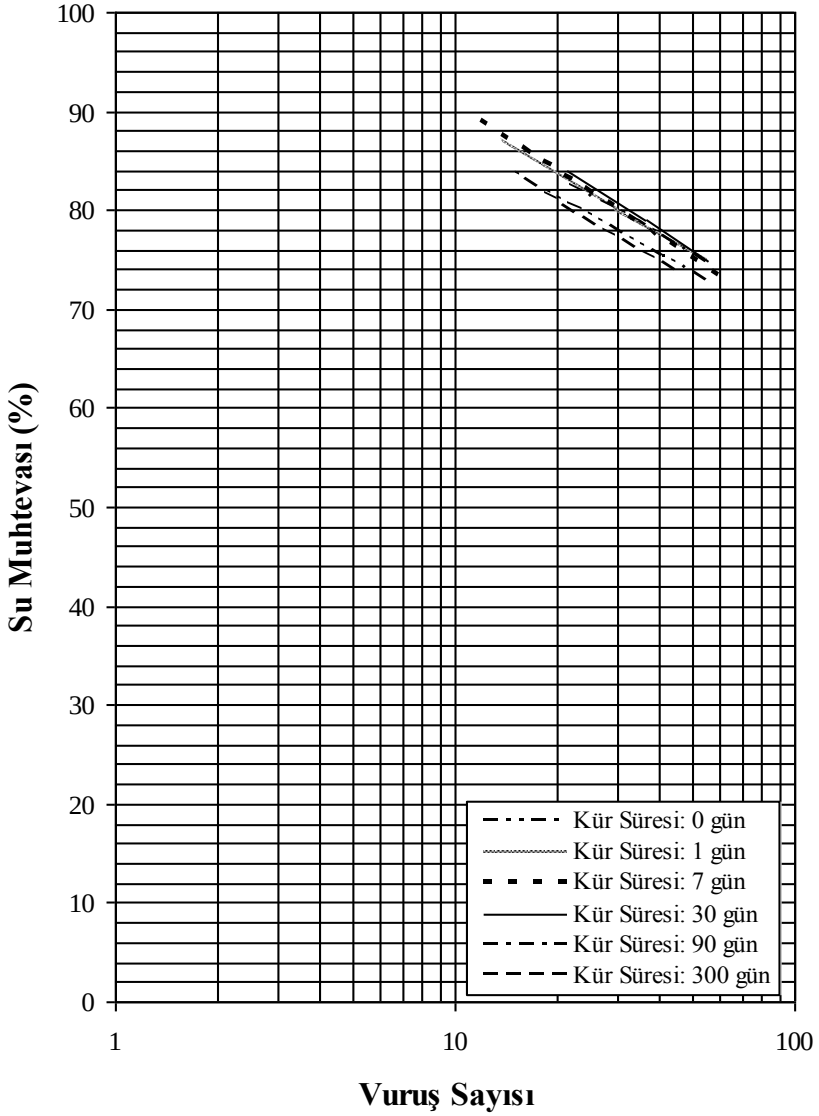
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
20	0	77	29	48
	1	79	30	49
	7	81	31	50
	30	82	30	52
	90	80	32	48
	300	76	30	46



Şekil A.3 : Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 20)

Tablo A.4 : Kıvam Limitleri (Çöp S: % 50)

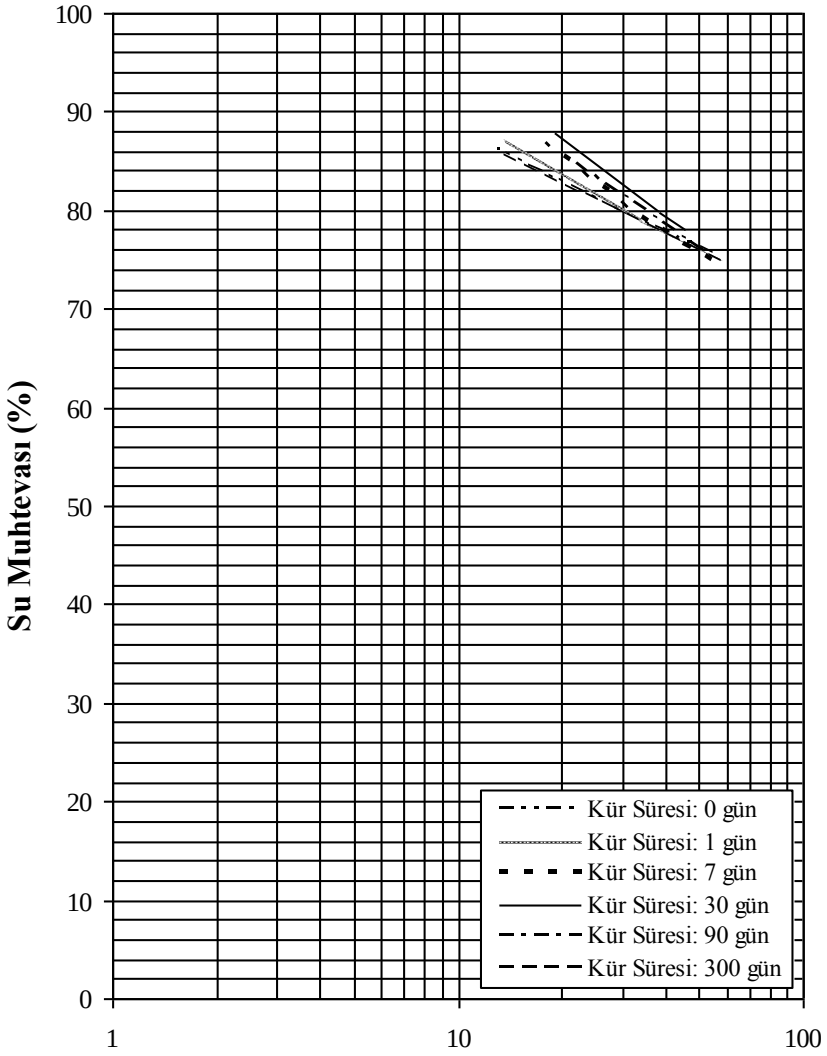
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
50	0	79	30	49
	1	81	31	50
	7	82	32	50
	30	83	31	52
	90	82	33	49
	300	79	32	47



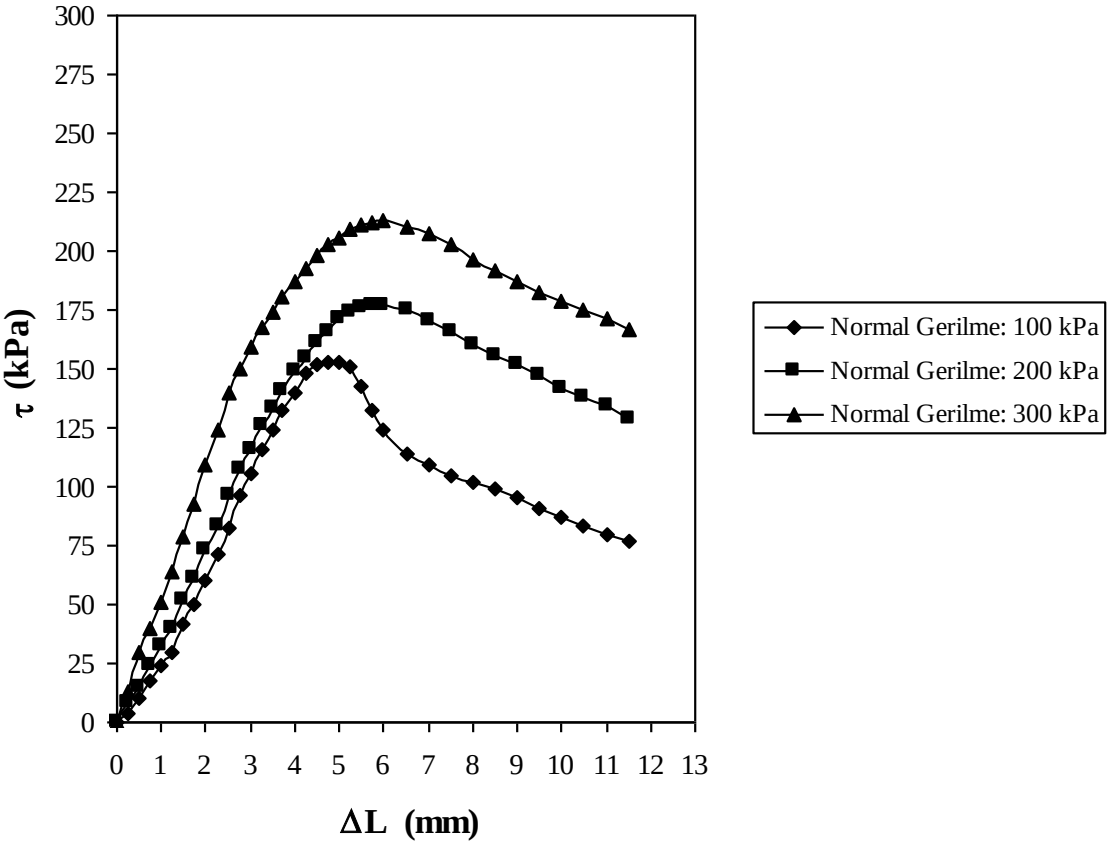
Şekil A.4 : Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 50)

Tablo A. 5 : Kıvam Limitleri (Çöp S: % 100)

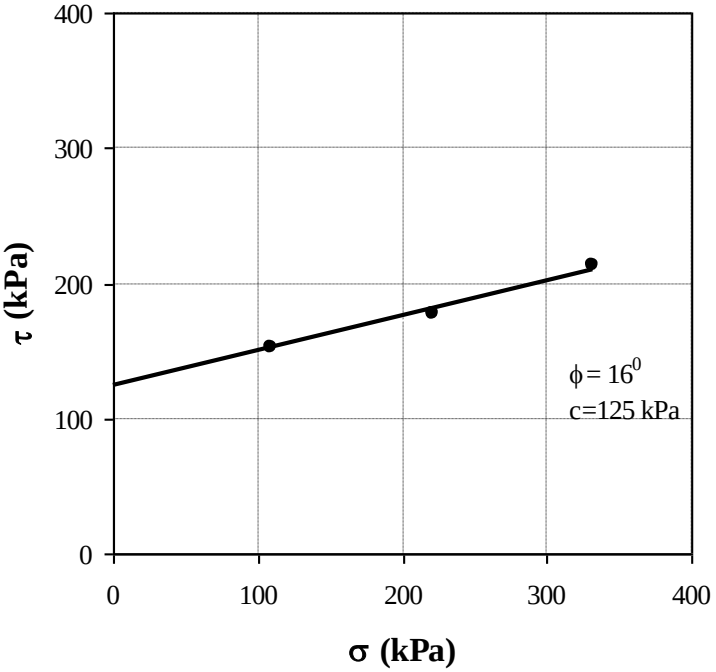
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
100	0	81	31	50
	1	82	32	50
	7	84	33	51
	30	85	32	53
	90	84	34	50
	300	81	33	48



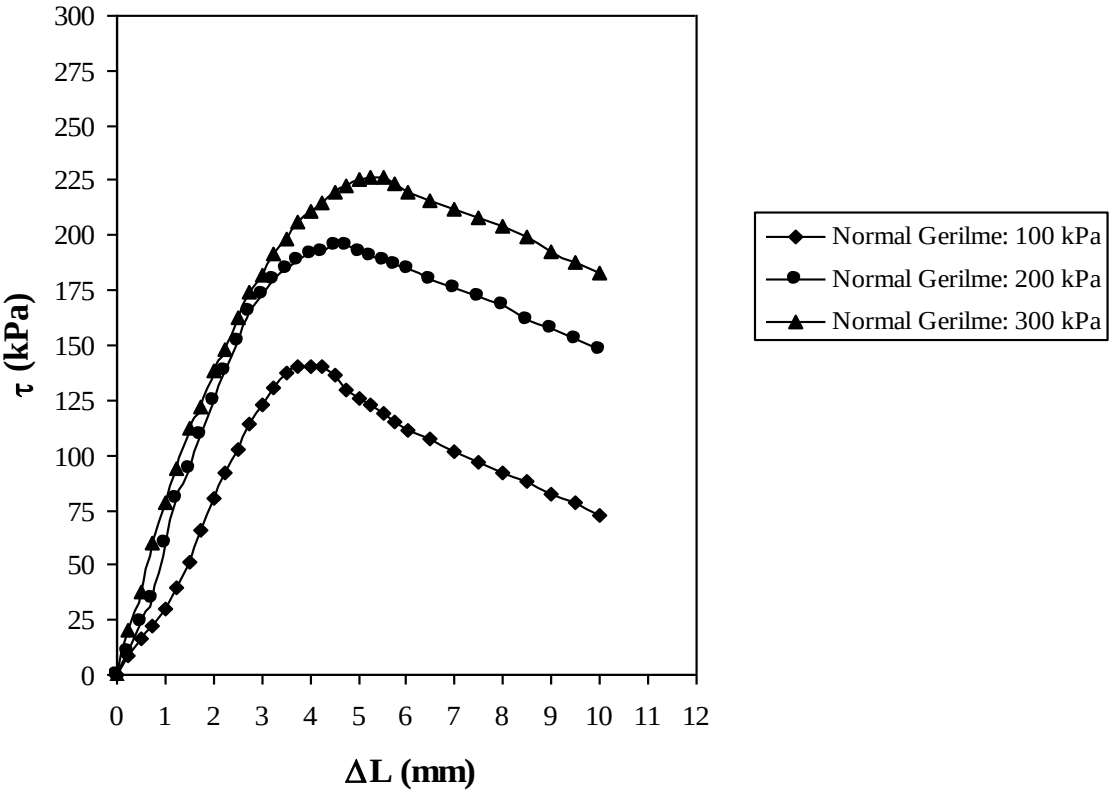
Şekil A.5 : Likit Limit Sonuçları (Çöp S: % 100)



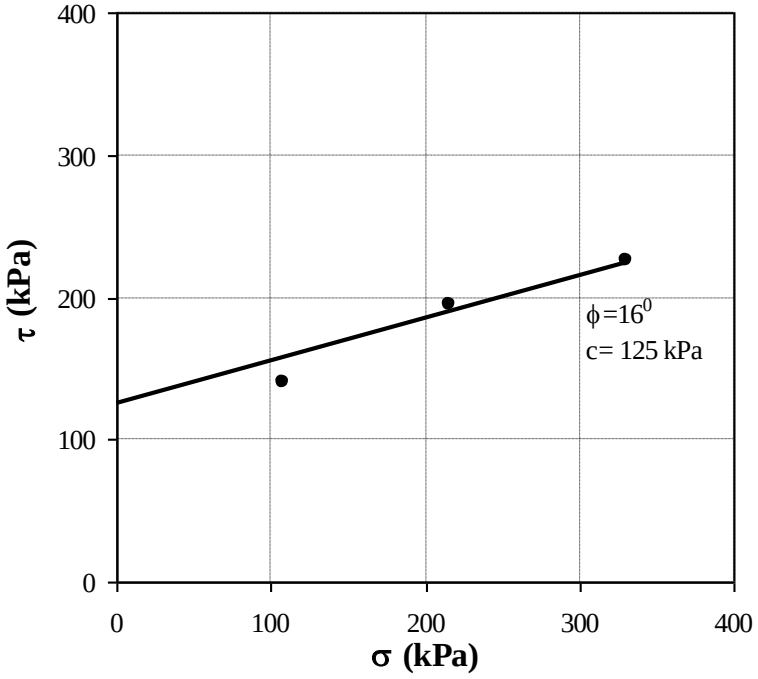
Şekil B.1 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Temiz Zemin, t=0)



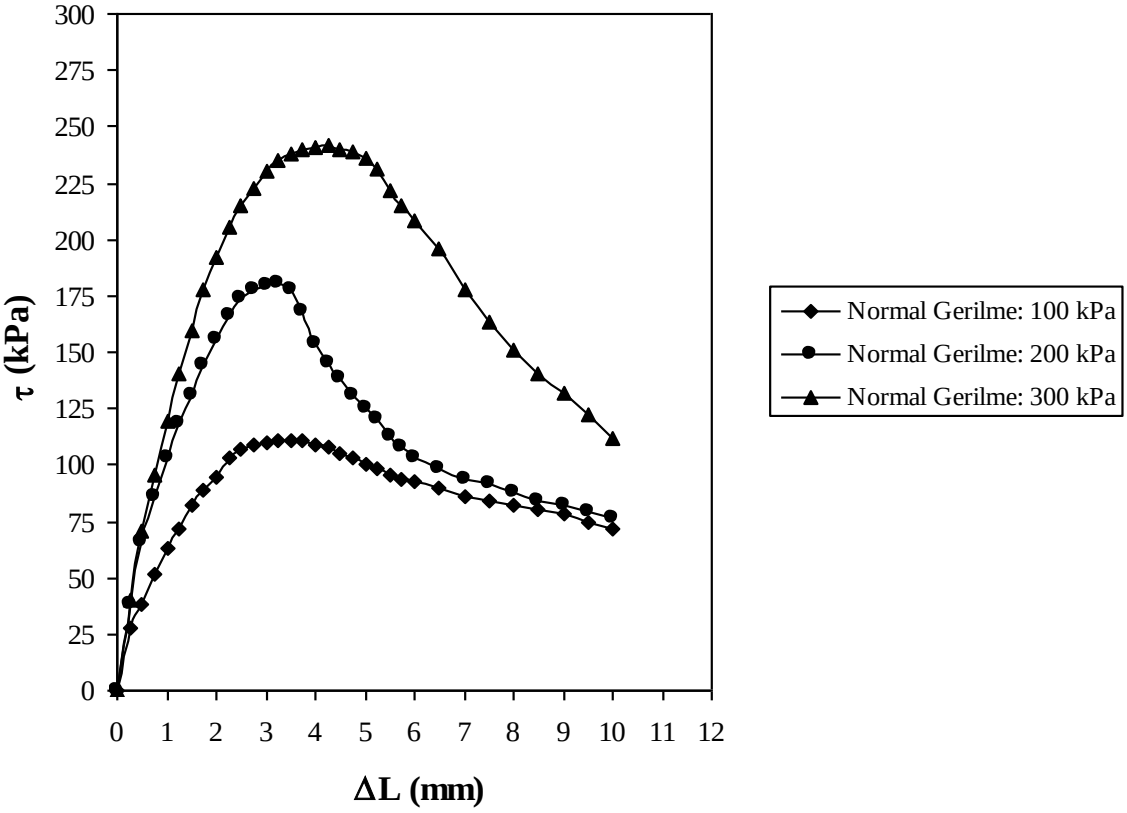
Şekil B.2 : Kırılma Zarfı (Temiz Zemin, t=0)



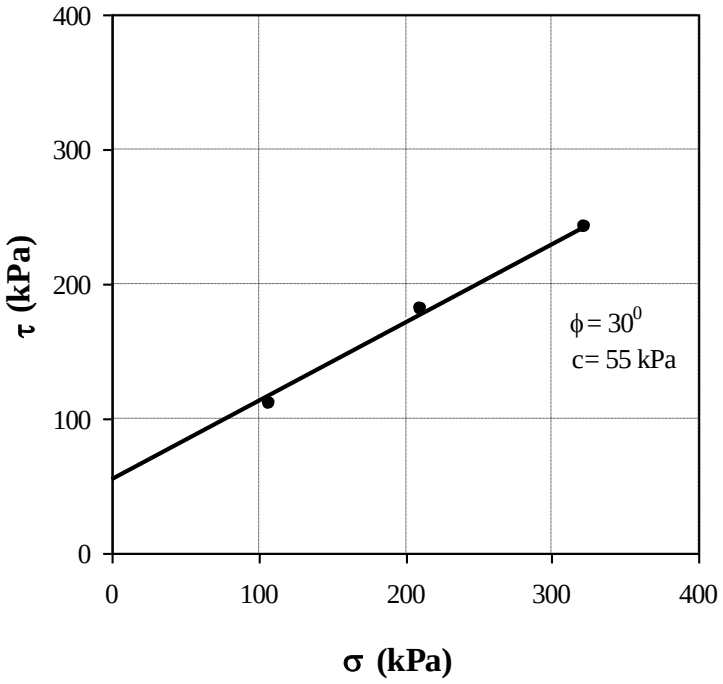
Şekil B.3 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Temiz Zemin, t= 90 gün)



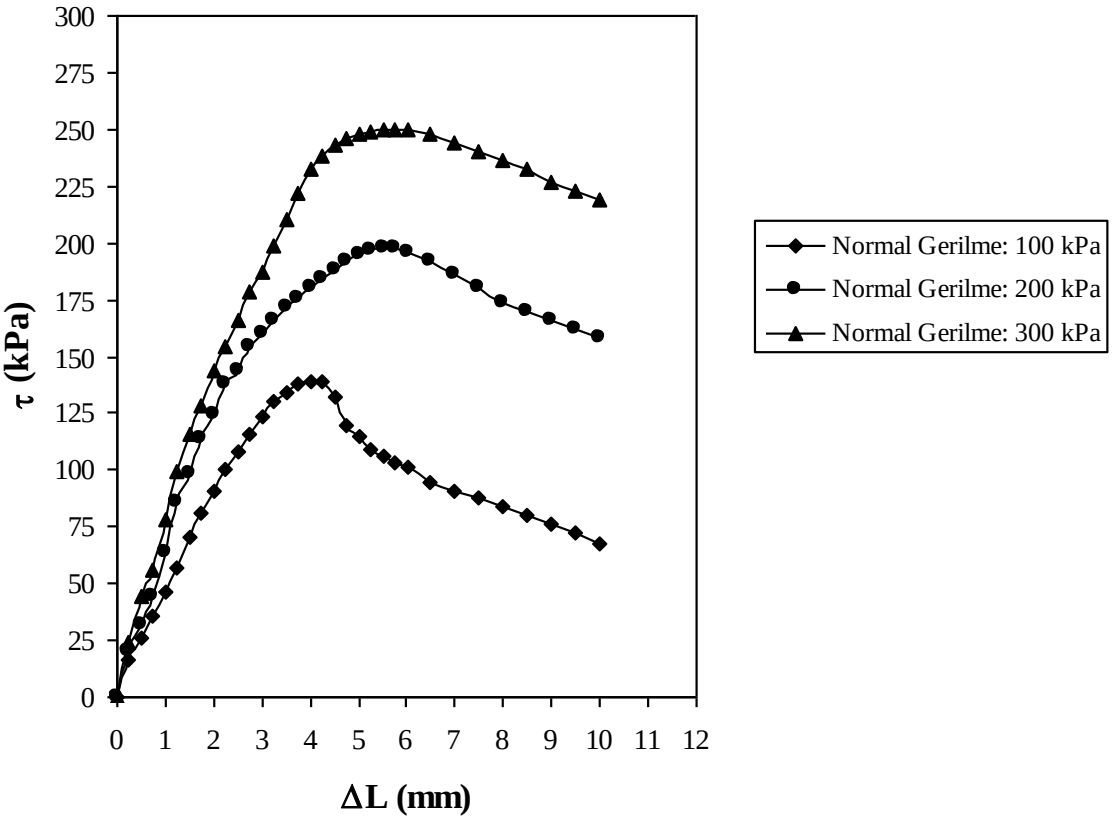
Şekil B.4 : Kırılma Zarfı (Temiz Zemin, t= 90 gün)



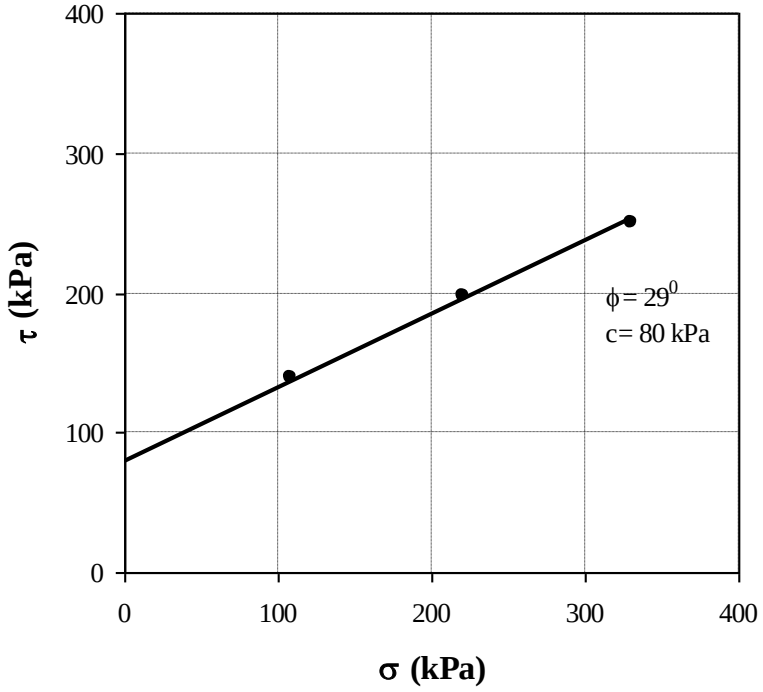
Şekil B.5 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 5, t: 0)



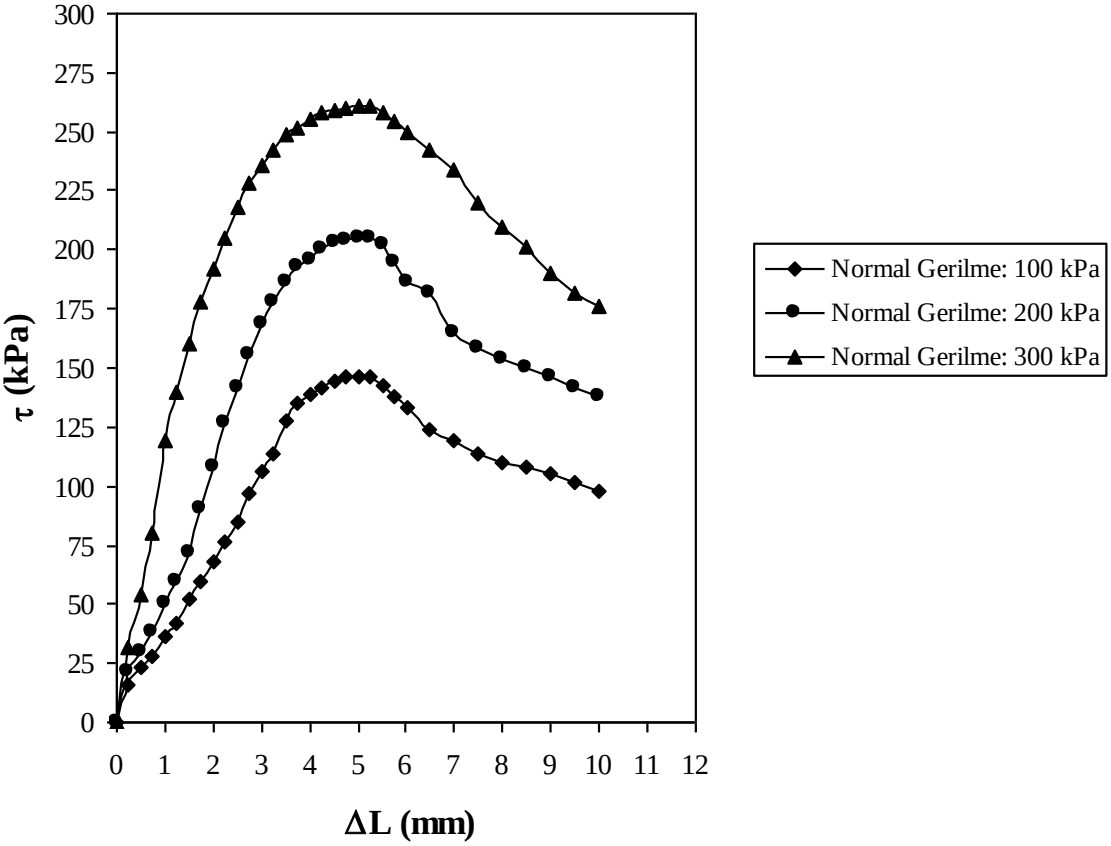
Şekil B.6 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 0)



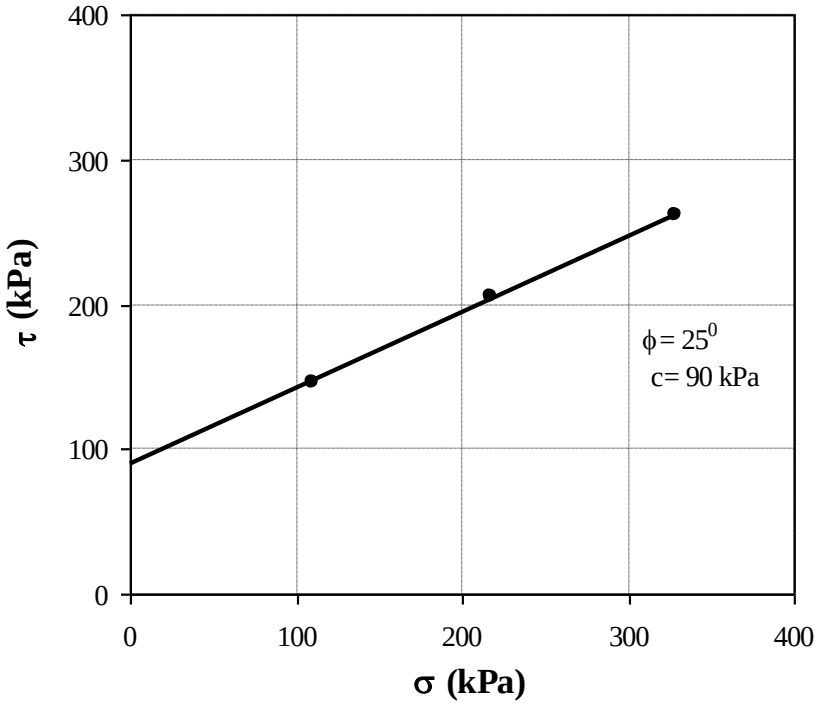
Şekil B.7 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 5, t: 1 gün)



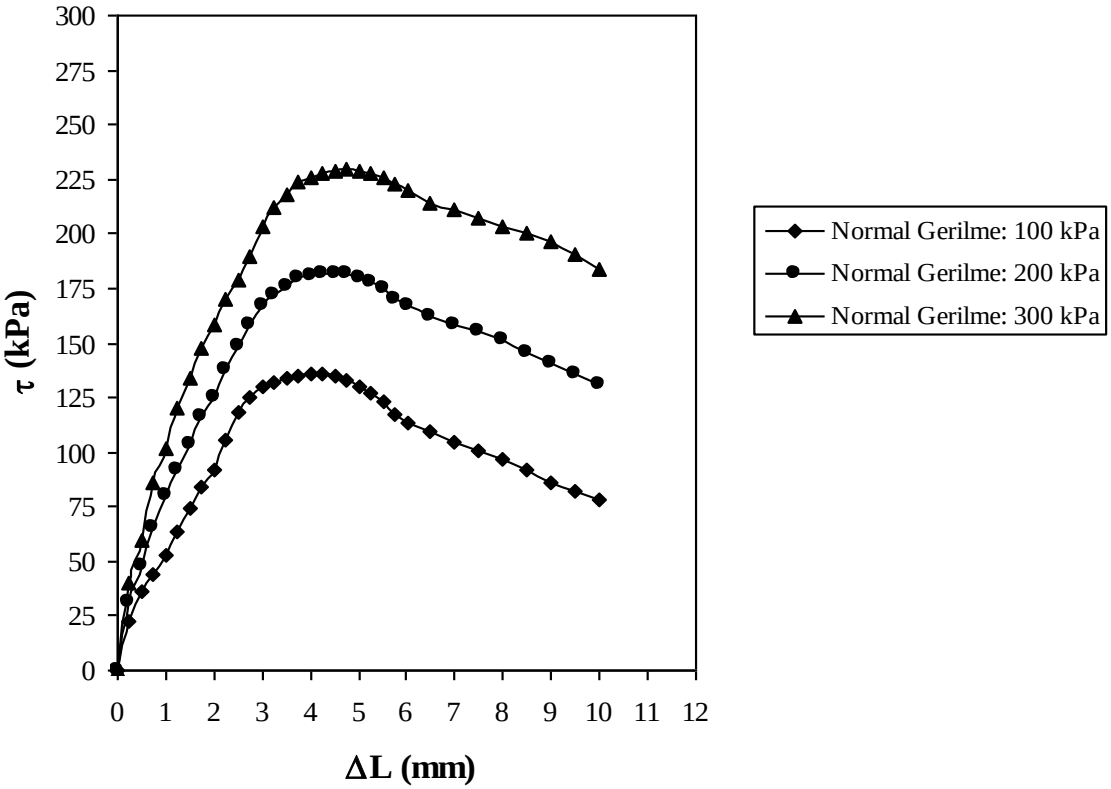
Şekil B.8 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 1 gün)



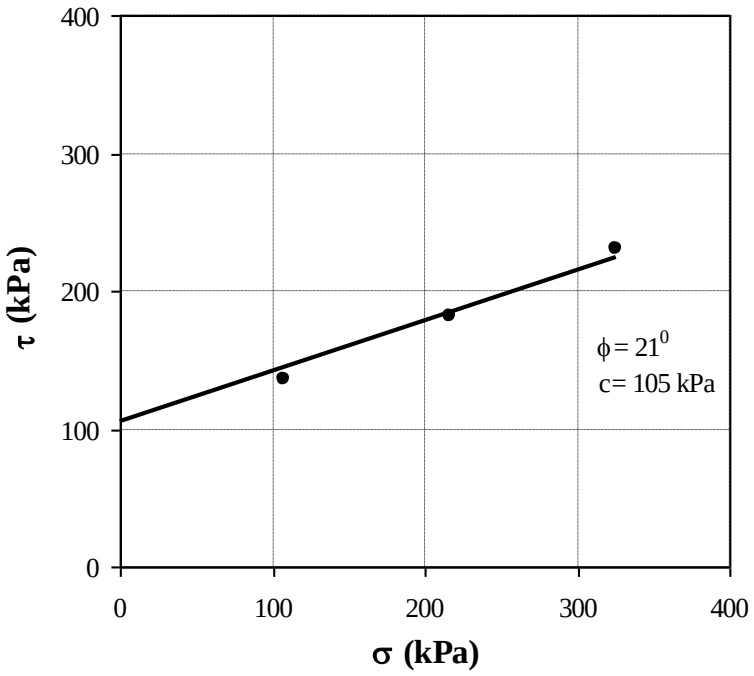
Şekil B.9 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 5, t: 7 gün)



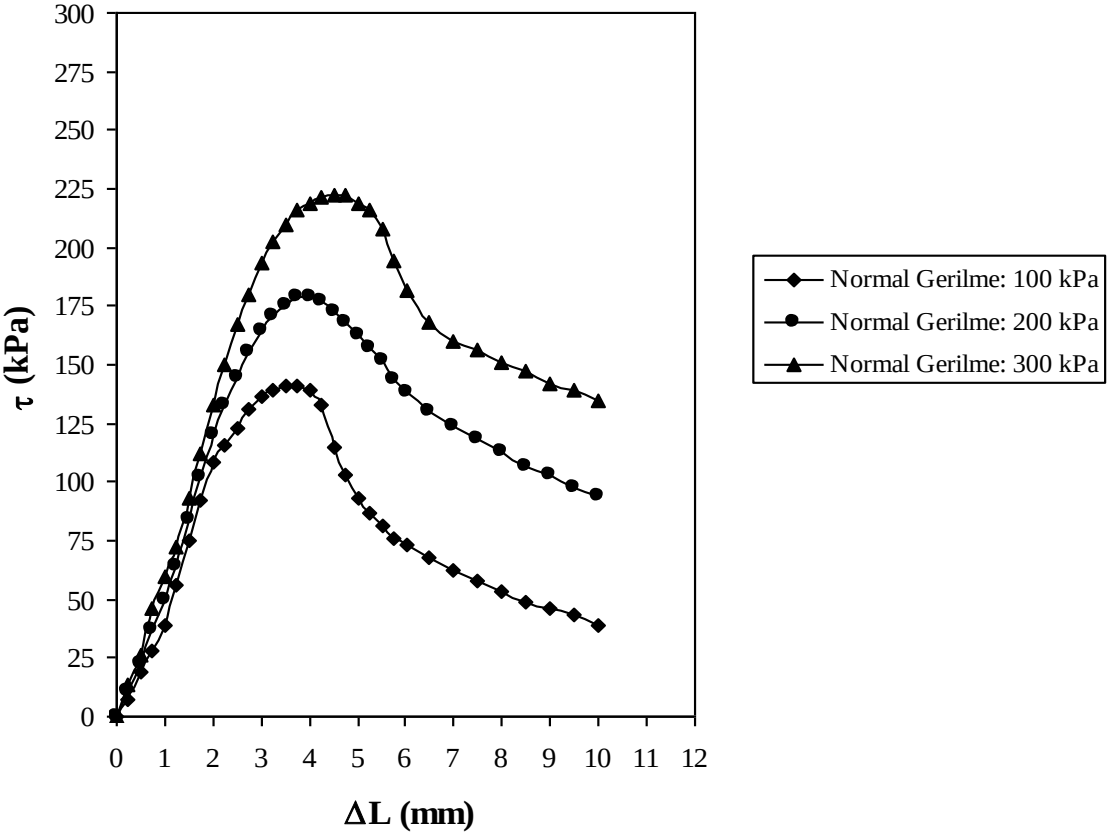
Şekil B.10 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 7 gün)



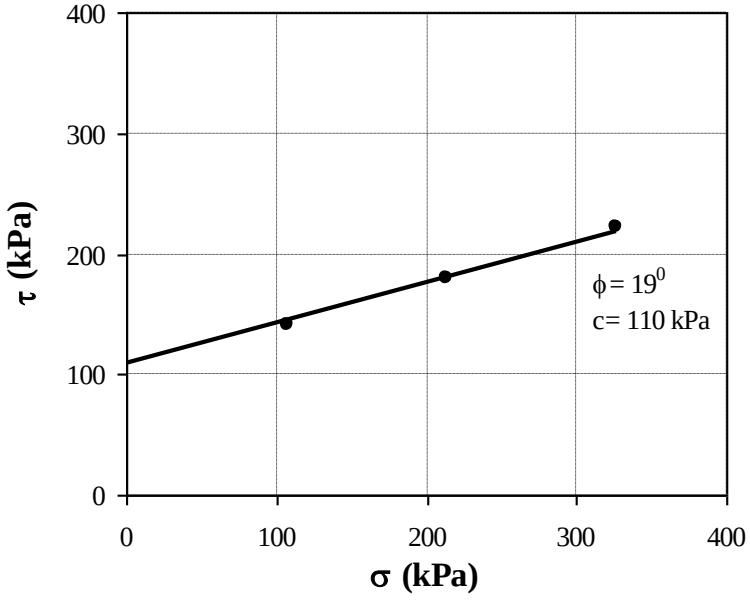
Şekil B.11 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 5, t: 30 gün)



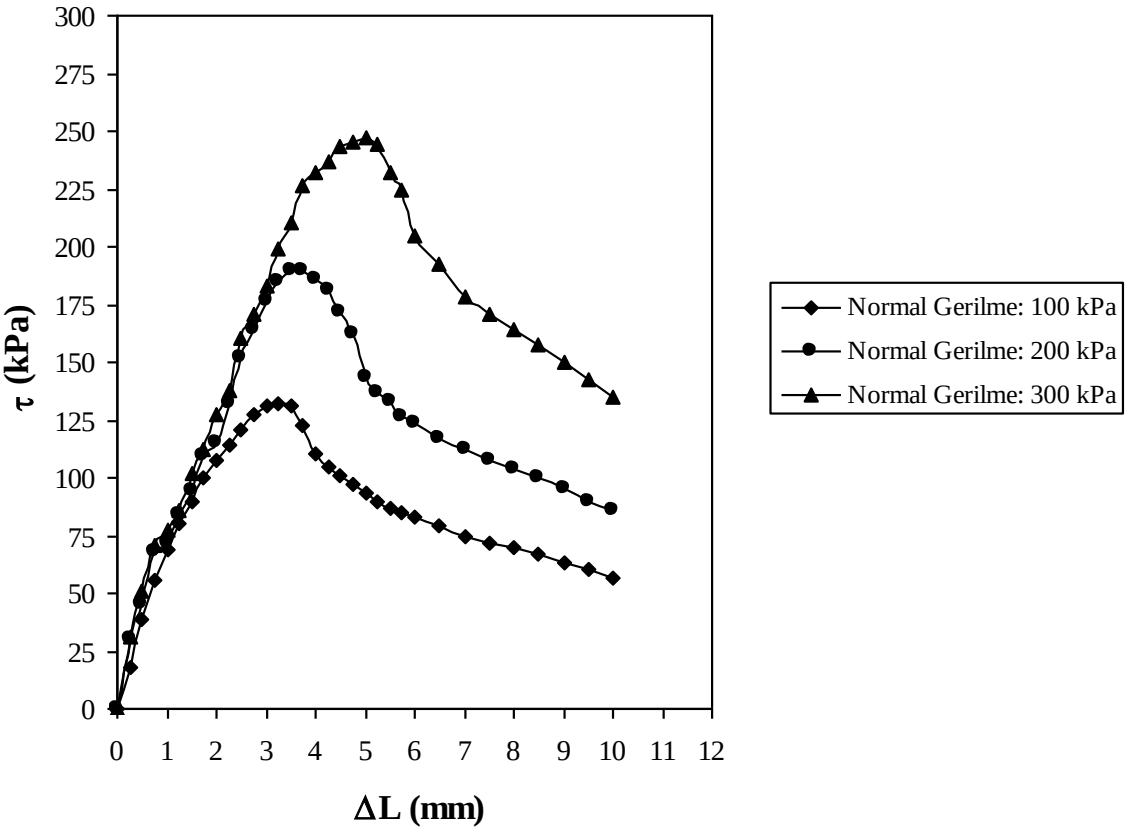
Şekil B.12 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 30 gün)



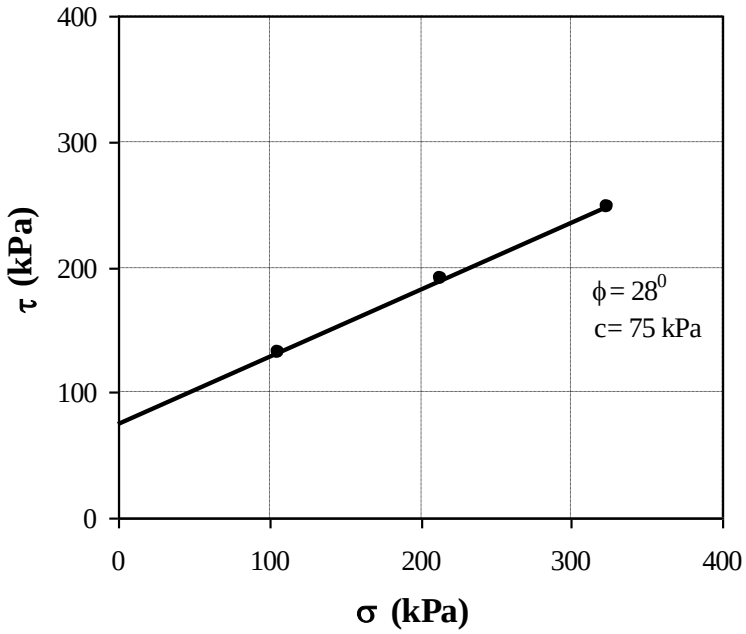
Şekil B.13 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 5, t: 90 gün)



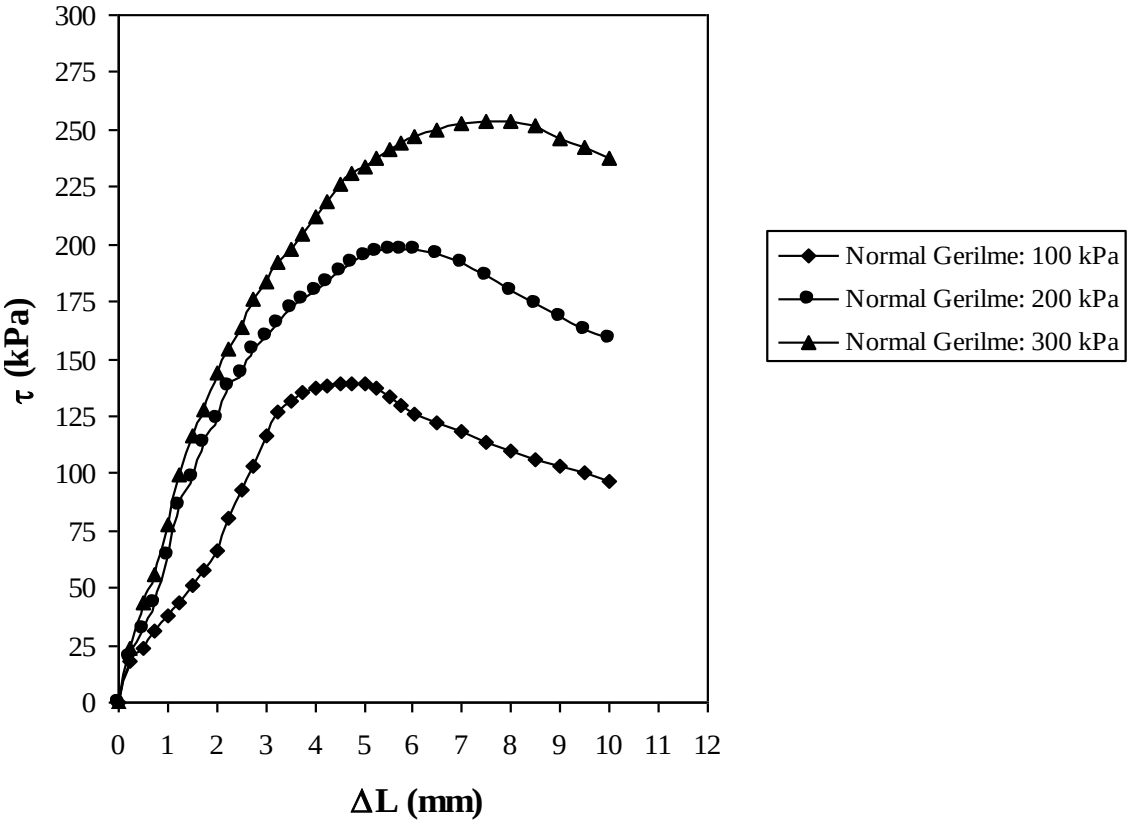
Şekil B.14 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 5, t: 90 gün)



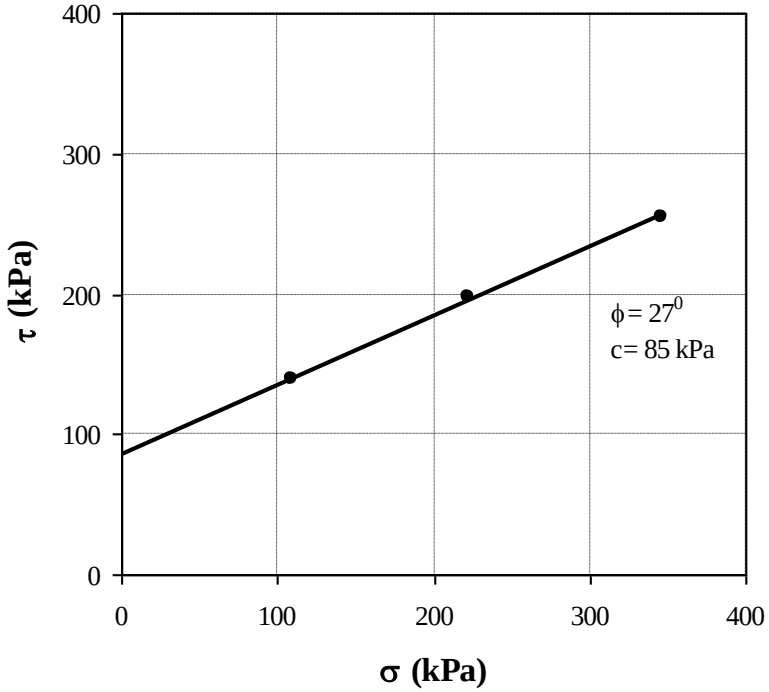
Şekil B.15 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t: 0)



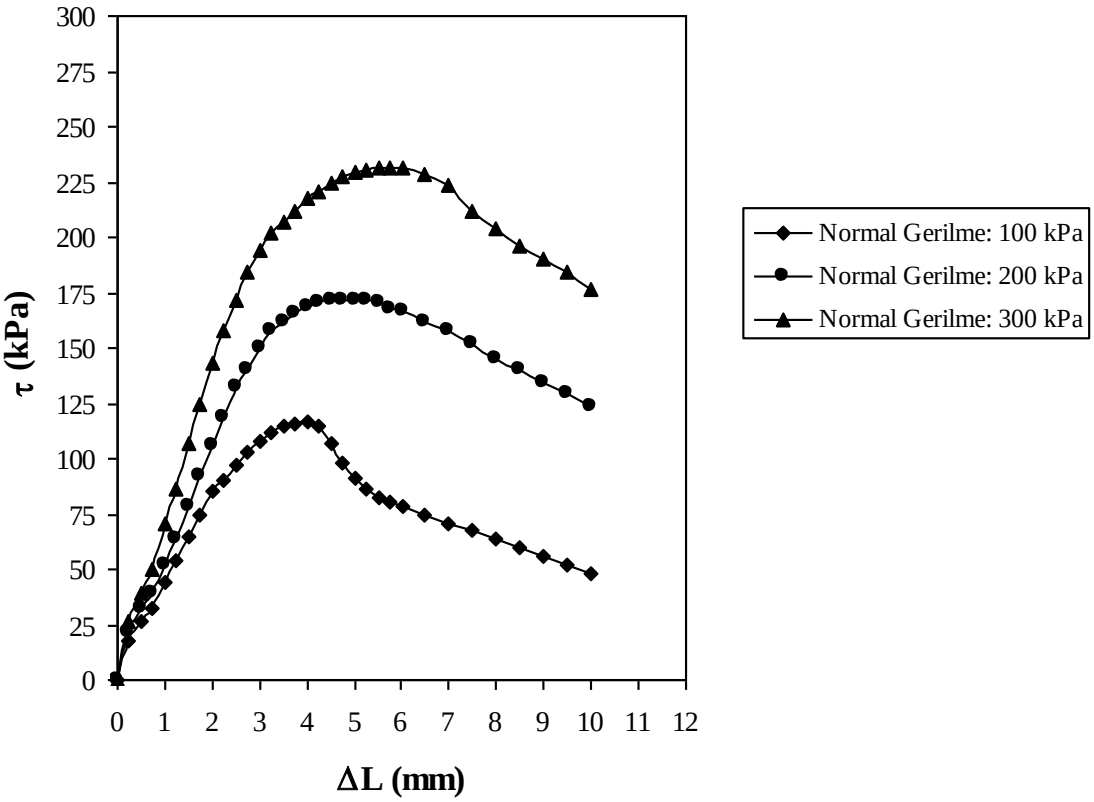
Şekil B.16 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 0)



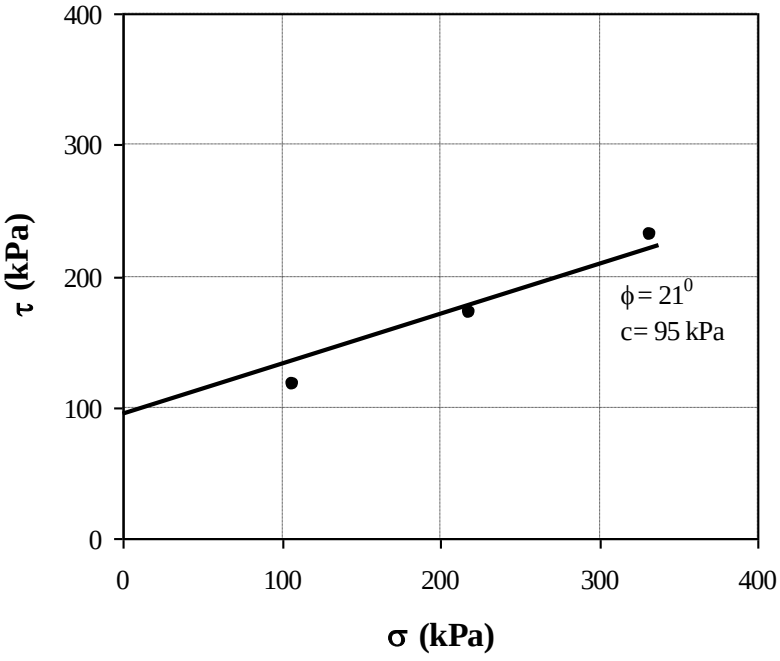
Şekil B.17 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 10, t: 1 gün)



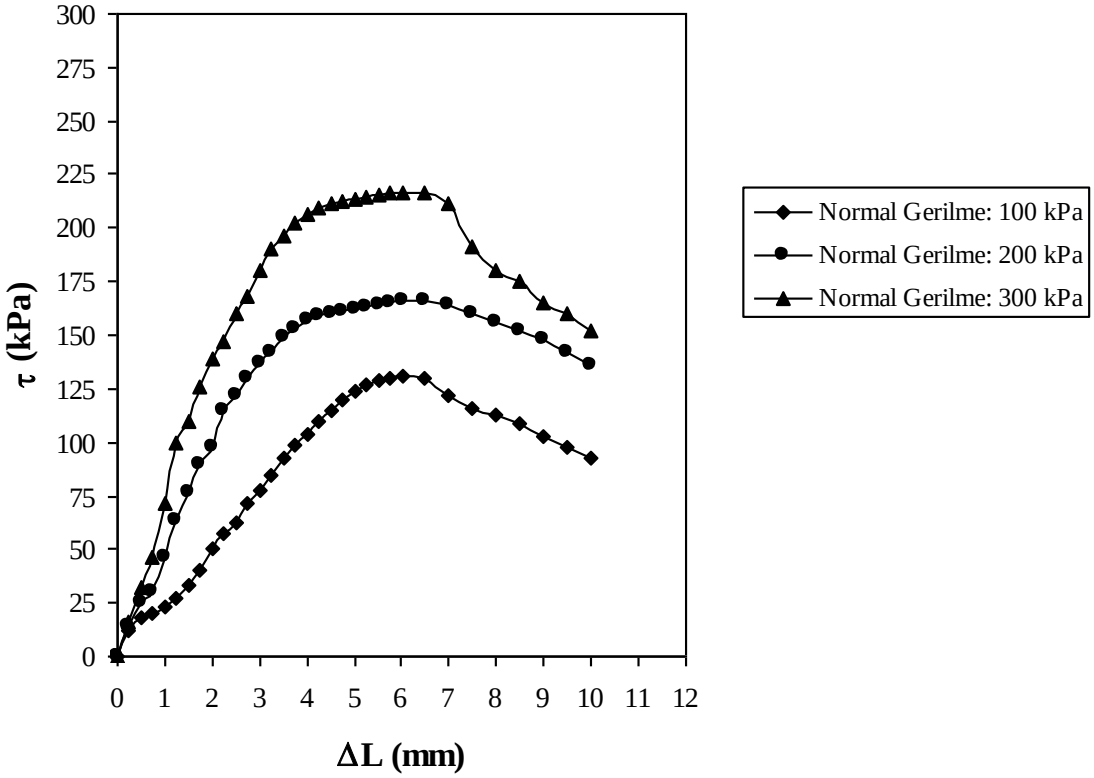
Şekil B.18 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 1 gün)



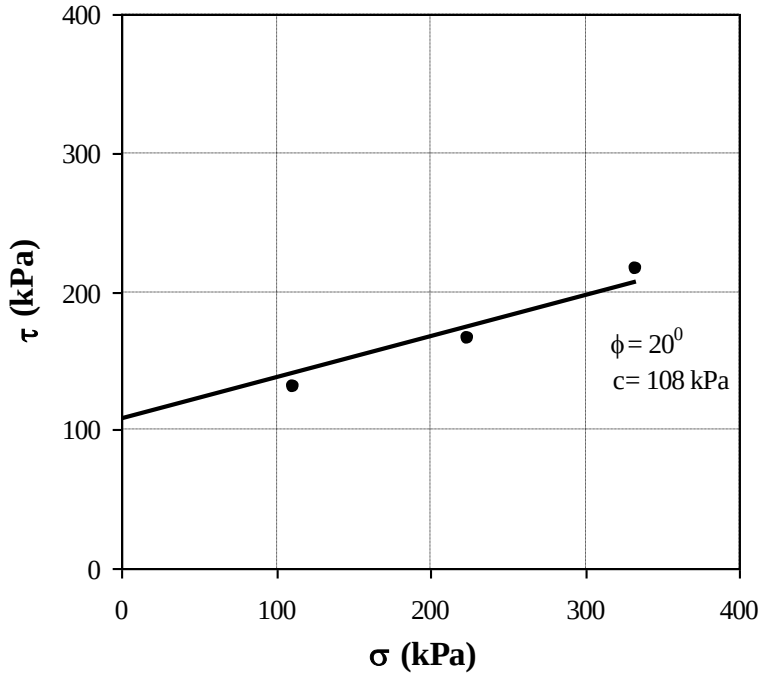
Şekil B.19 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 10, t: 7 gün)



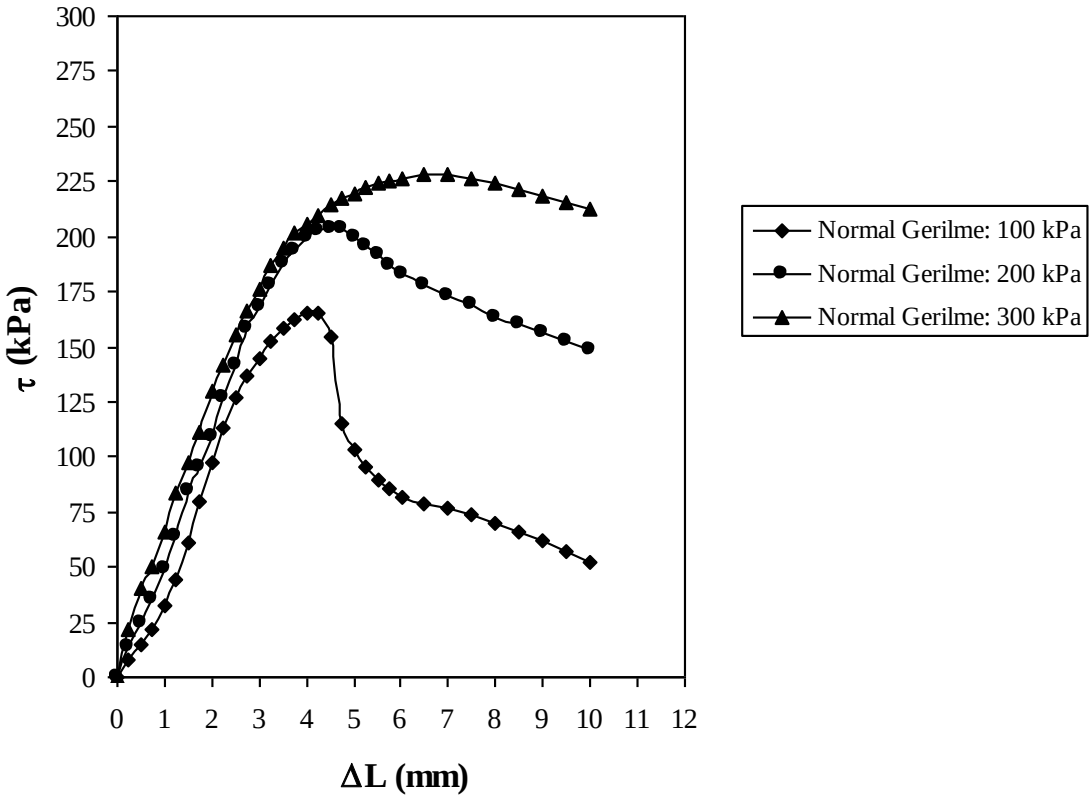
Şekil B.20 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 7 gün)



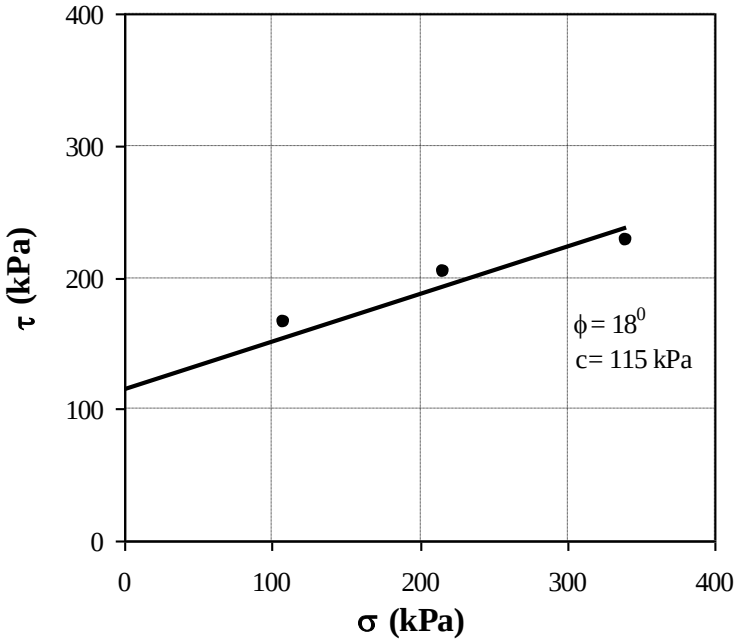
Şekil B.21 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 10, t: 30 gün)



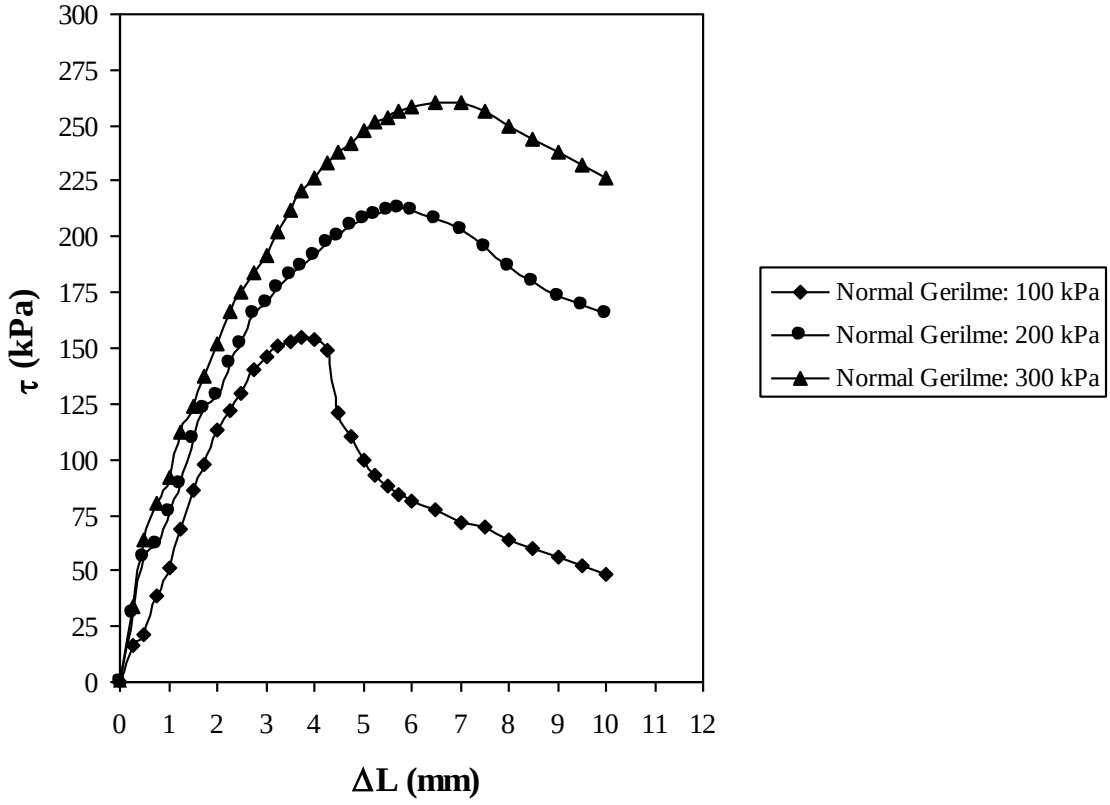
Şekil B.22 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10, t: 30 gün)



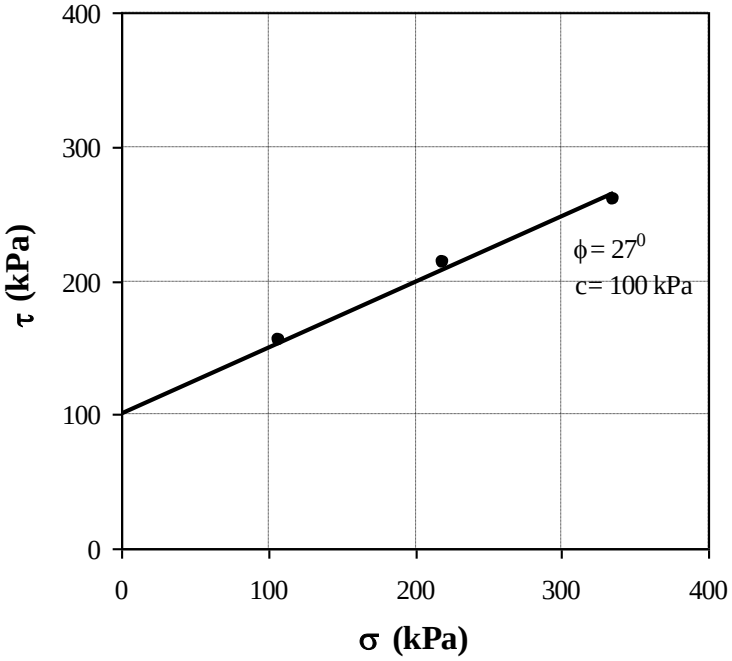
Şekil B.23 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 10, t: 90 gün)



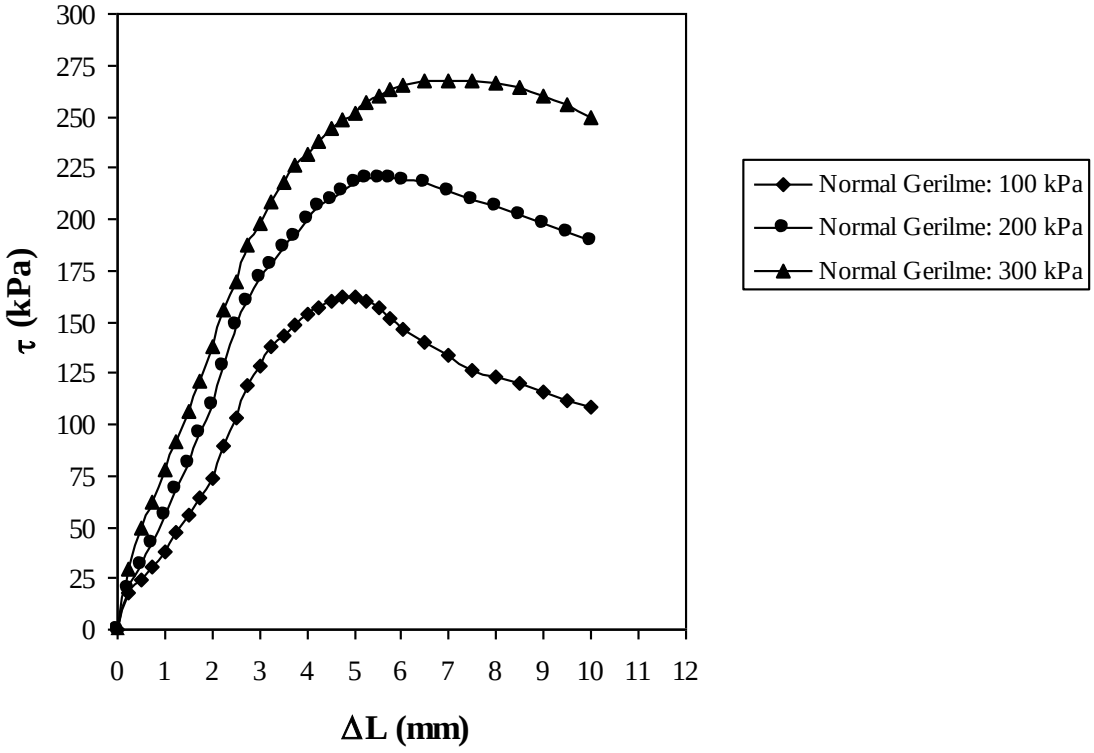
Şekil B.24 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 10,t: 90 gün)



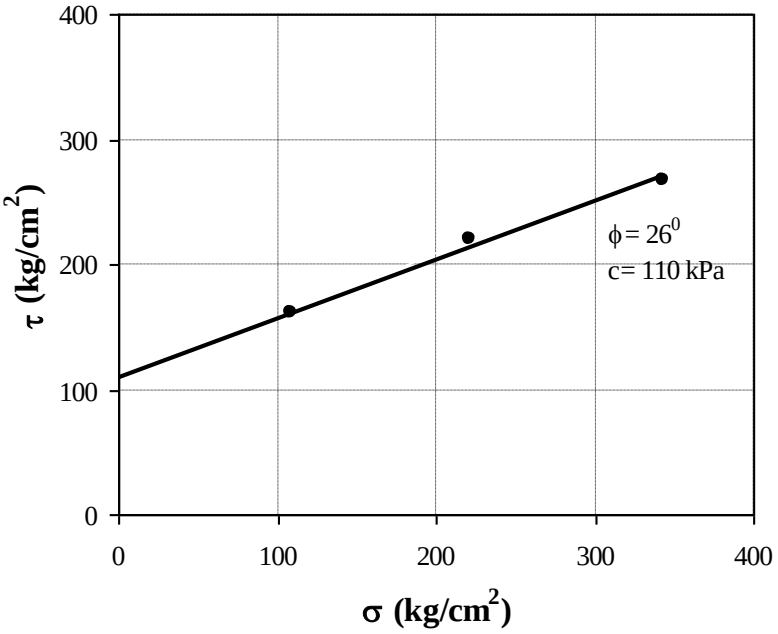
Şekil B.25 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 20, t: 0)



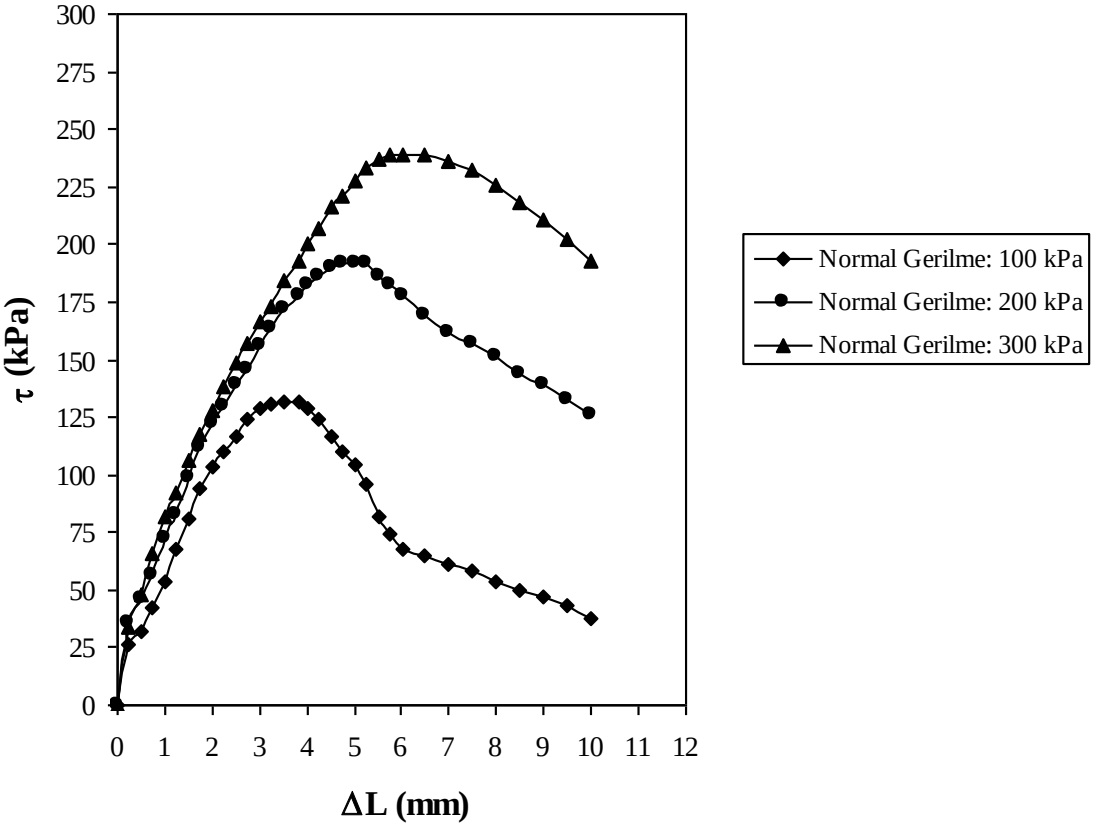
Şekil B.26 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 0)



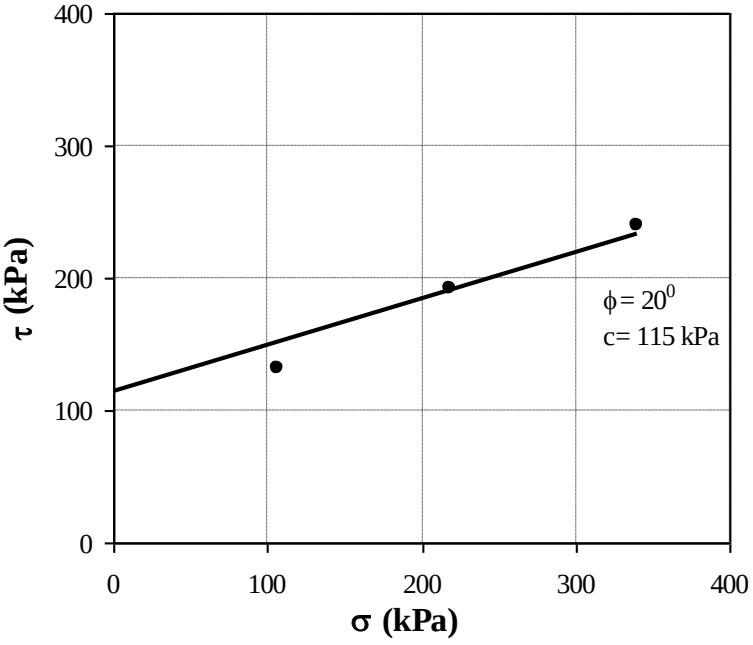
Şekil B.27 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 20, t: 1 gün)



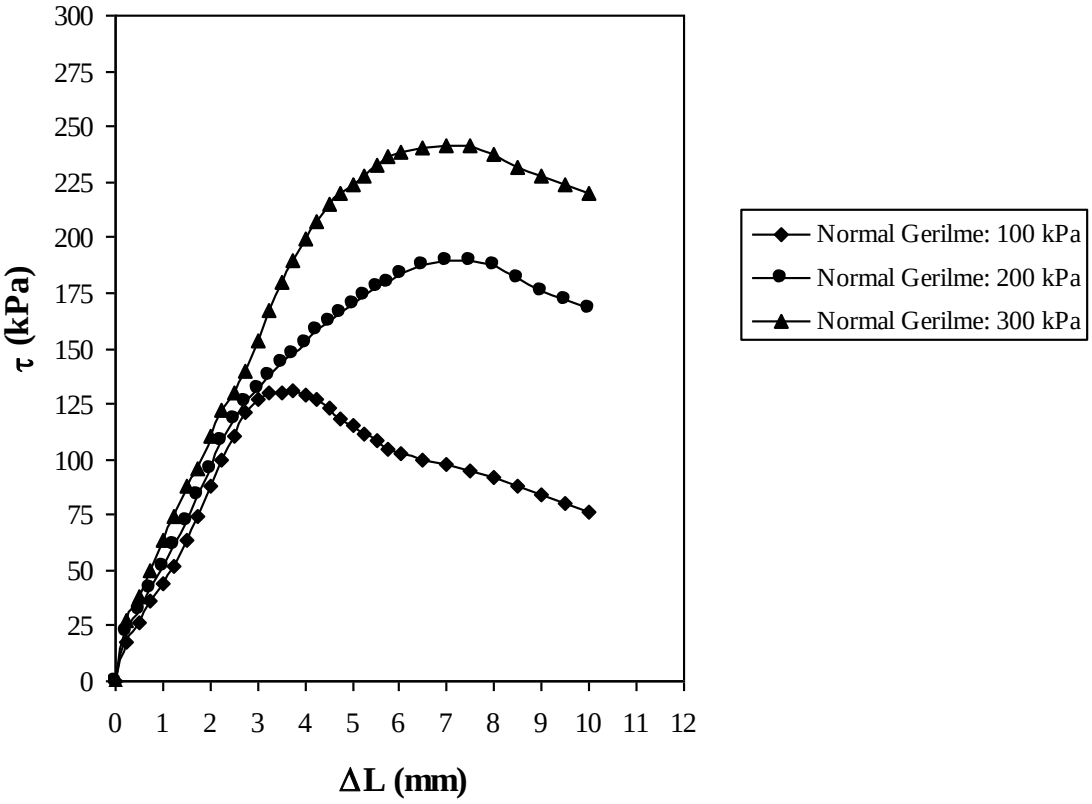
Şekil B.28 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 1 gün)



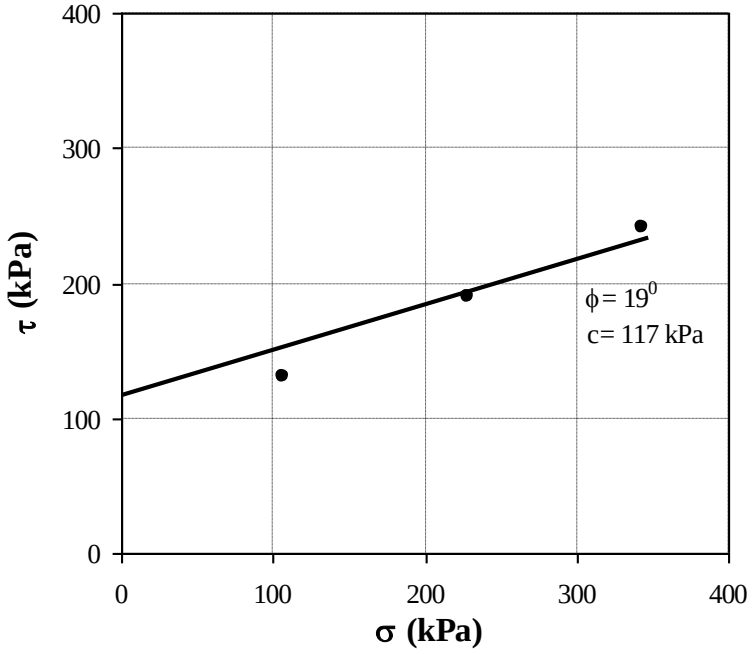
Şekil B.29 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 20, t: 7 gün)



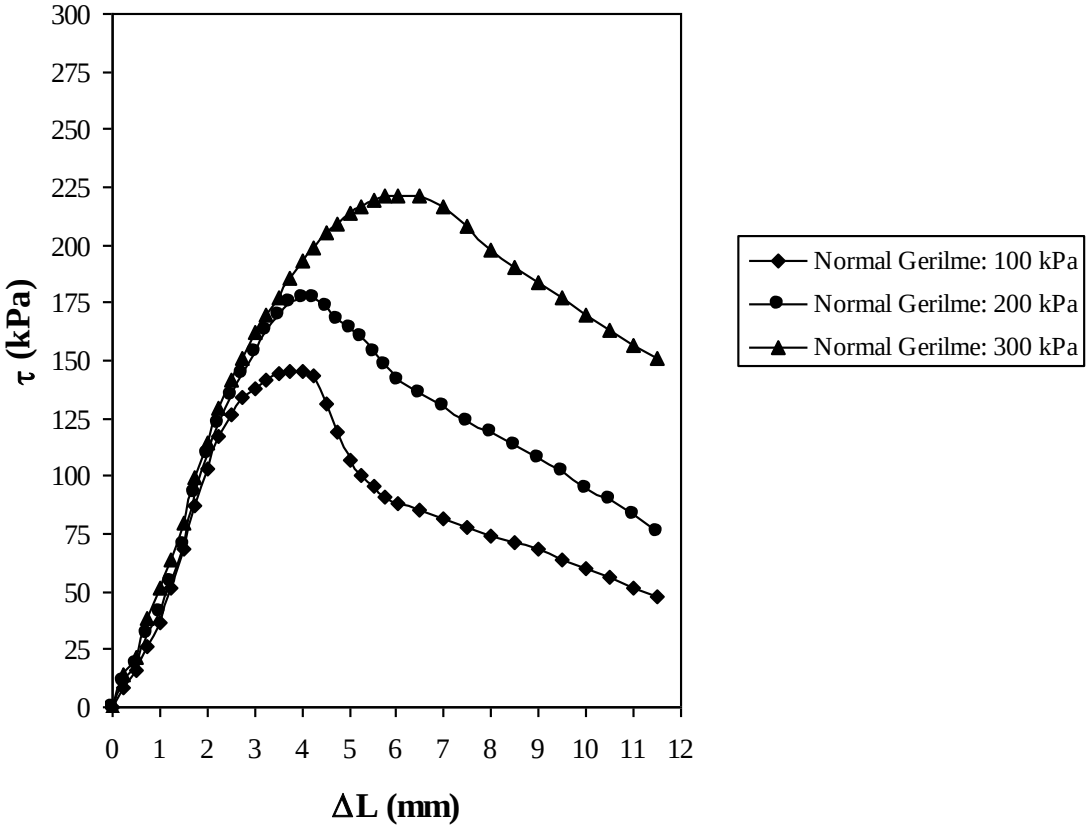
Şekil B.30 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 7 gün)



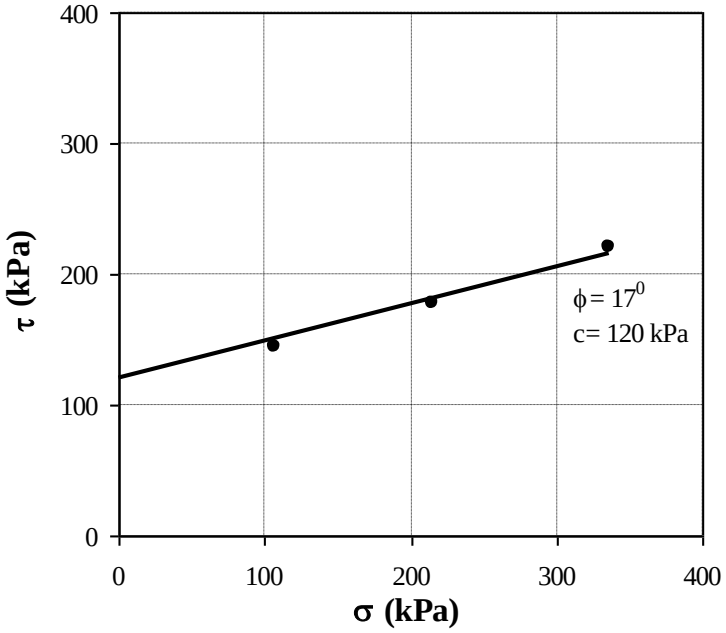
Şekil B.31 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 20, t: 30 gün)



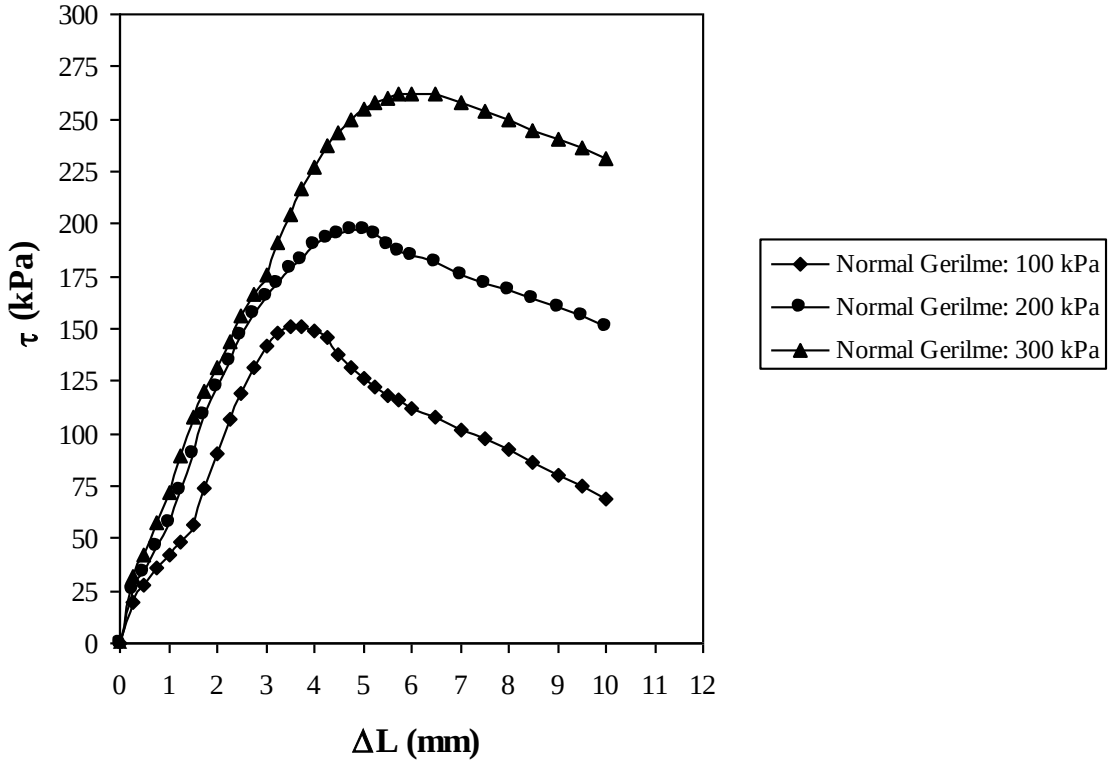
Şekil B.32 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 30 gün)



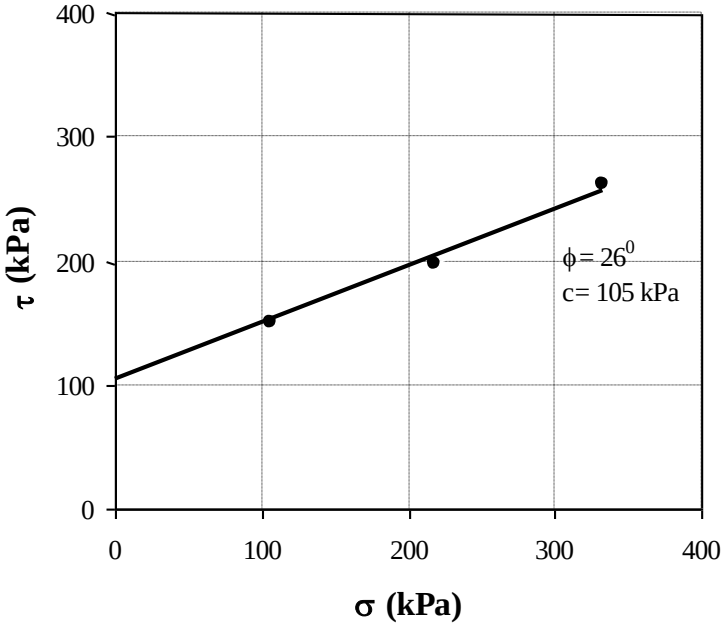
Şekil B.33 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 20, t: 90 gün)



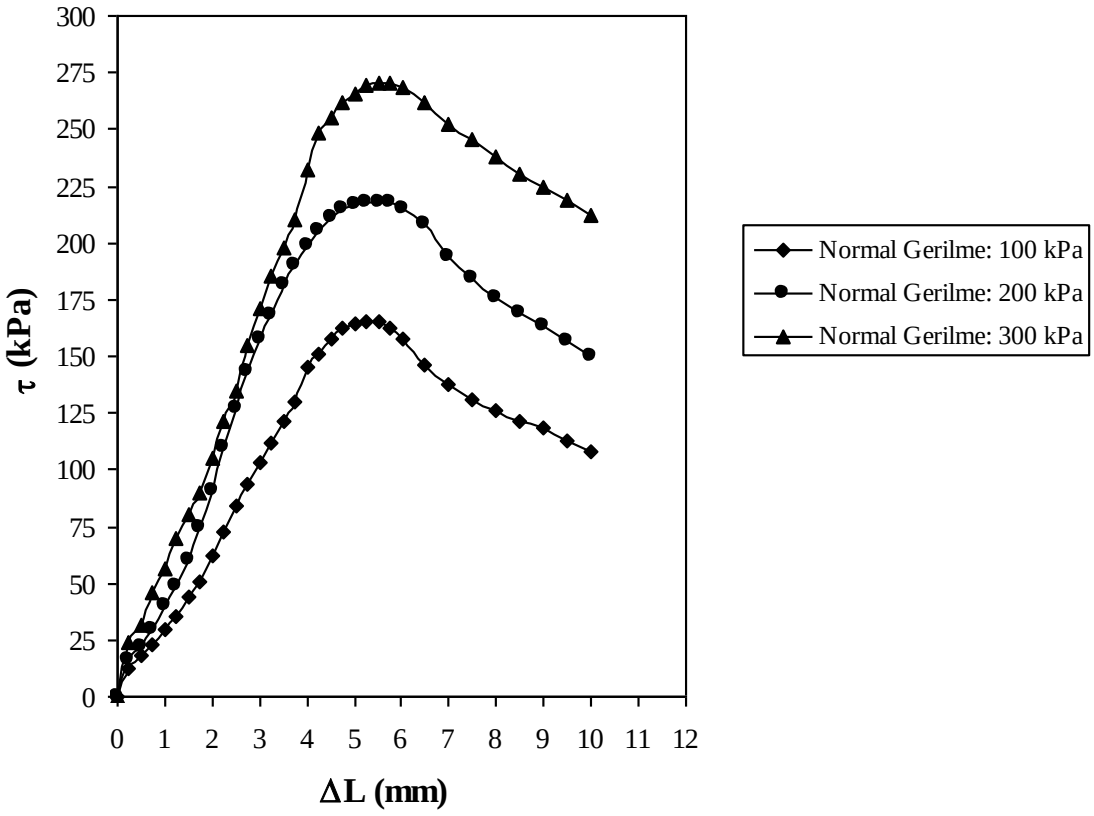
Şekil B.34 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 20, t: 90 gün)



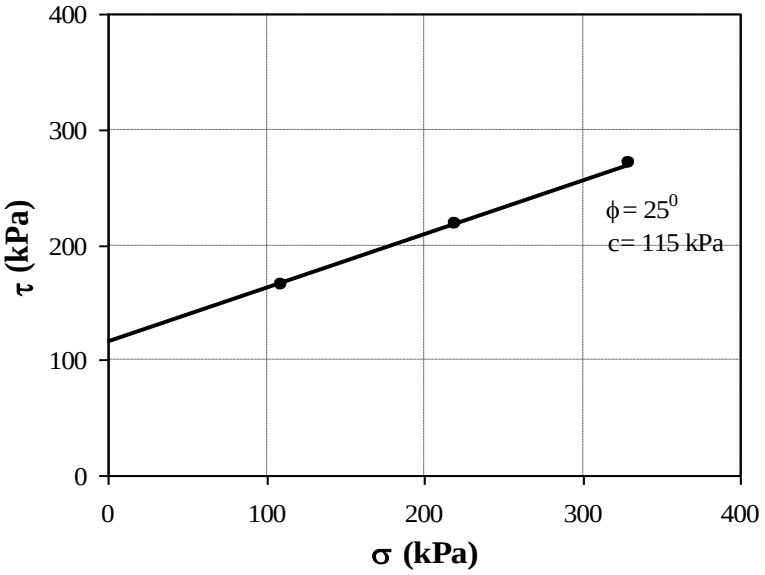
Şekil B.35 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 30, t: 0)



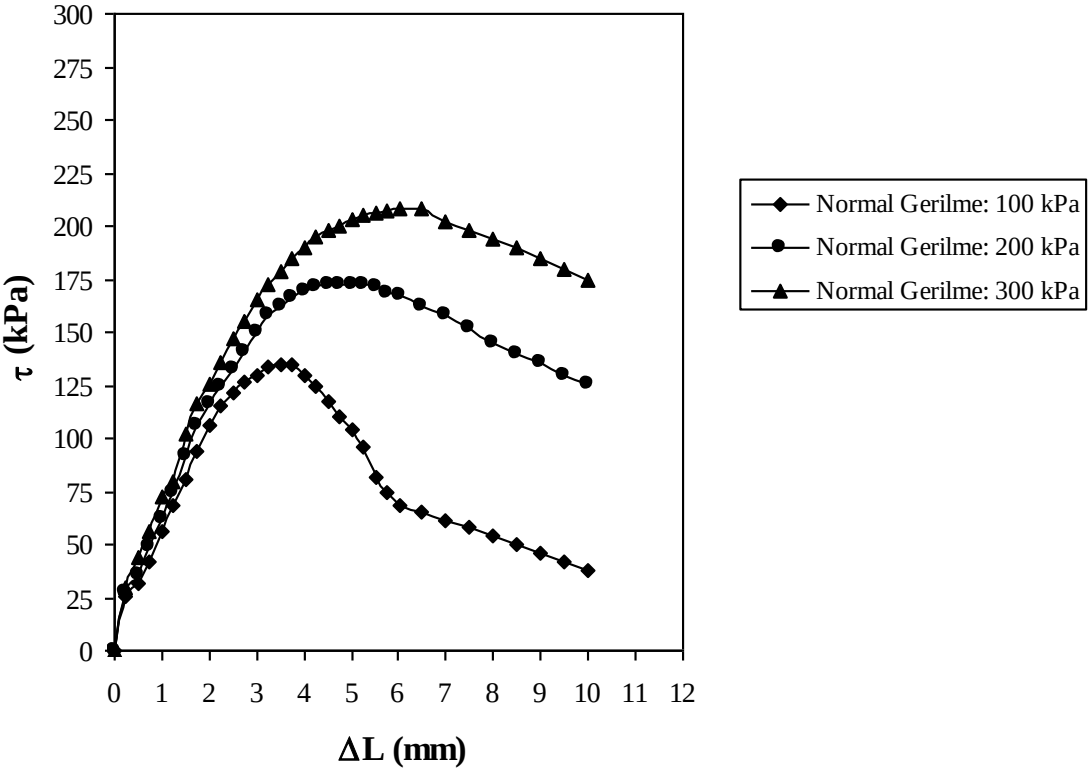
Şekil B.36 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 0)



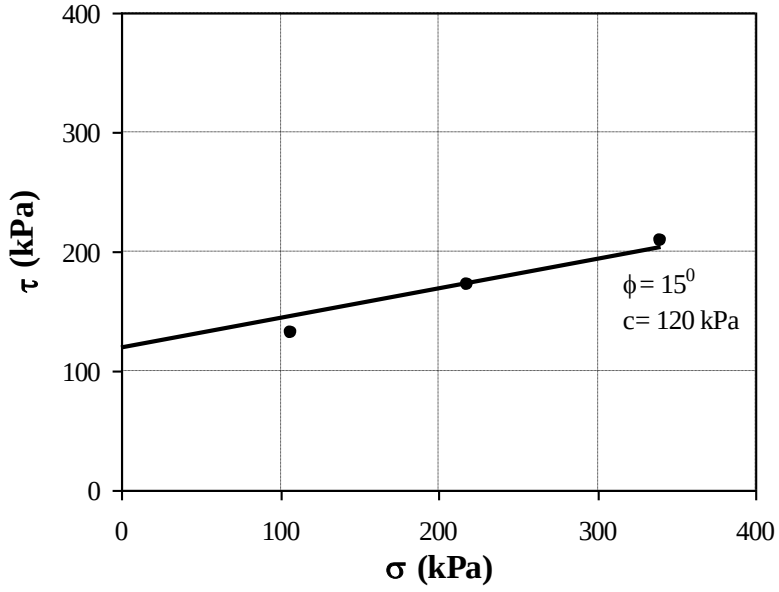
Şekil B.37 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 30, t: 1 gün)



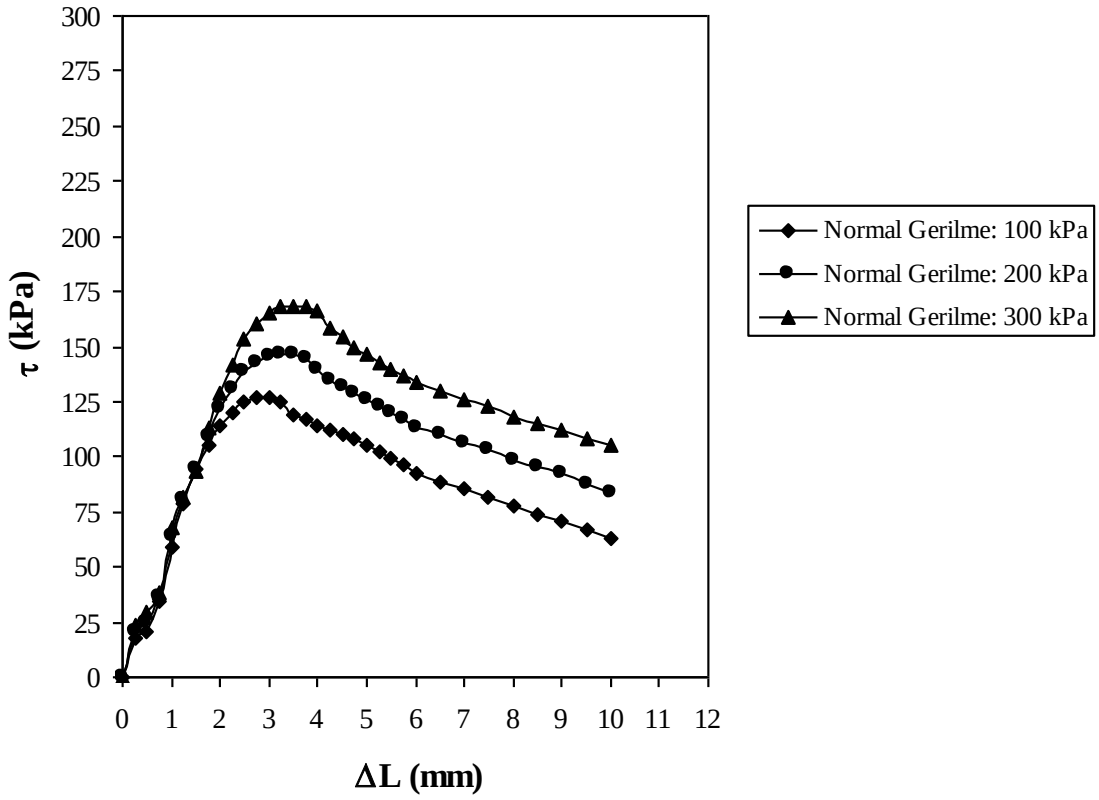
Şekil B.38 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 1 gün)



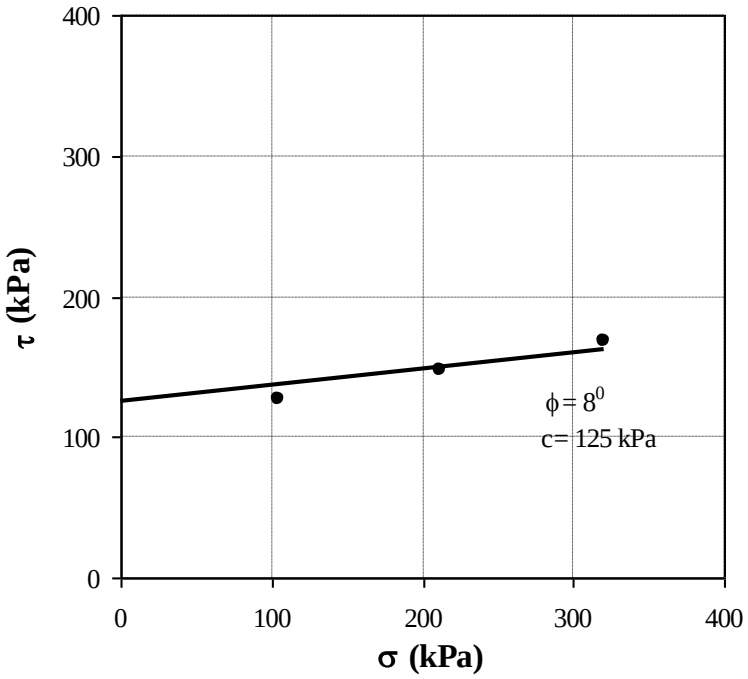
Şekil B.39 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 30, t: 7 gün)



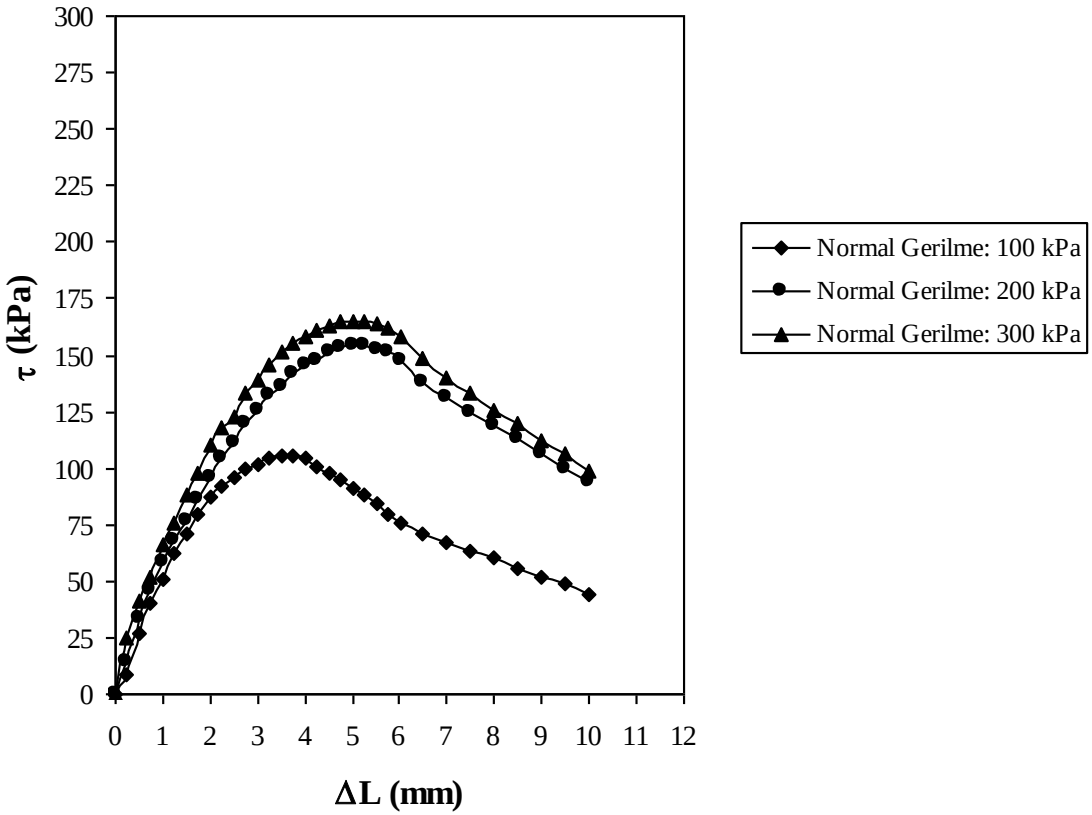
Şekil B.40 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 7 gün)



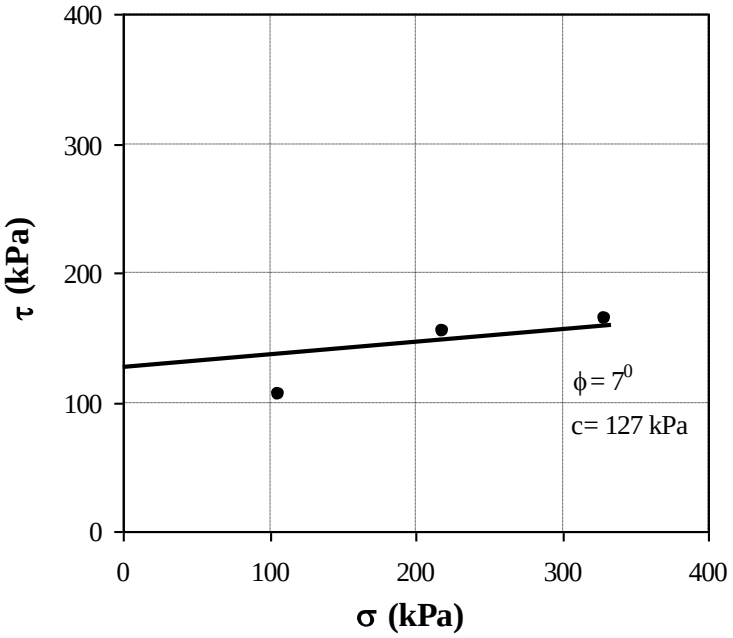
Şekil B.41 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 30, t: 30 gün)



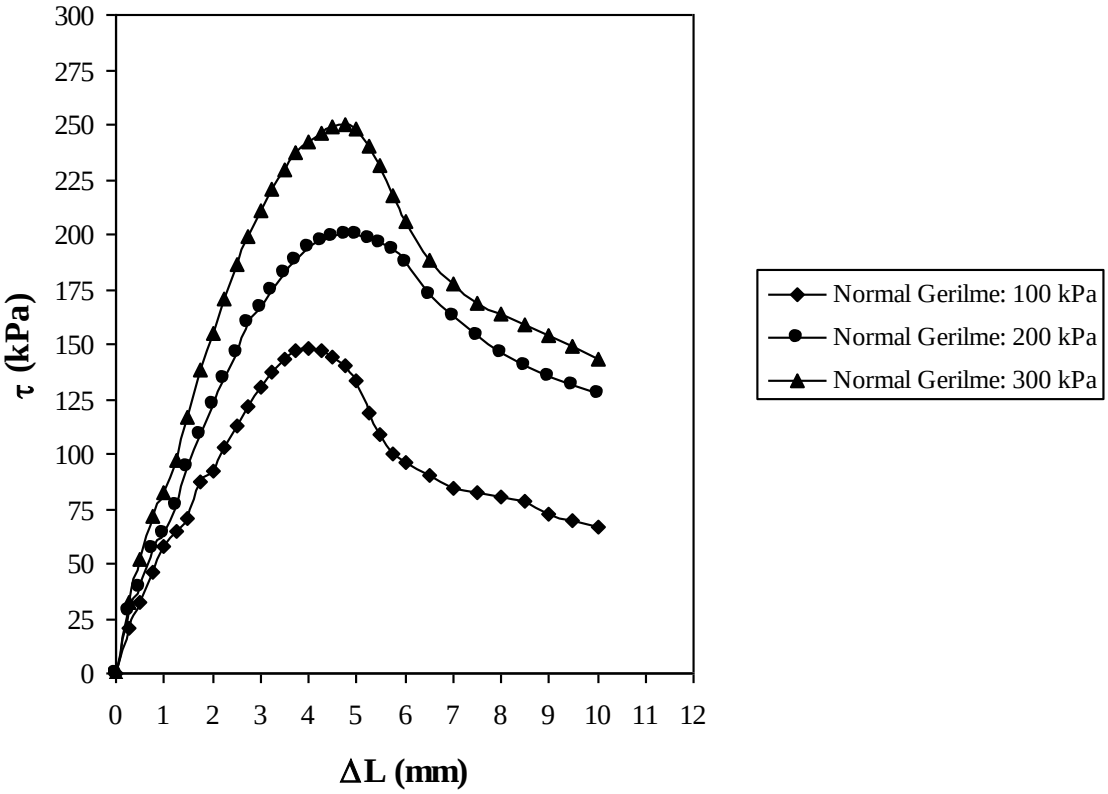
Şekil B.42 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 30 gün)



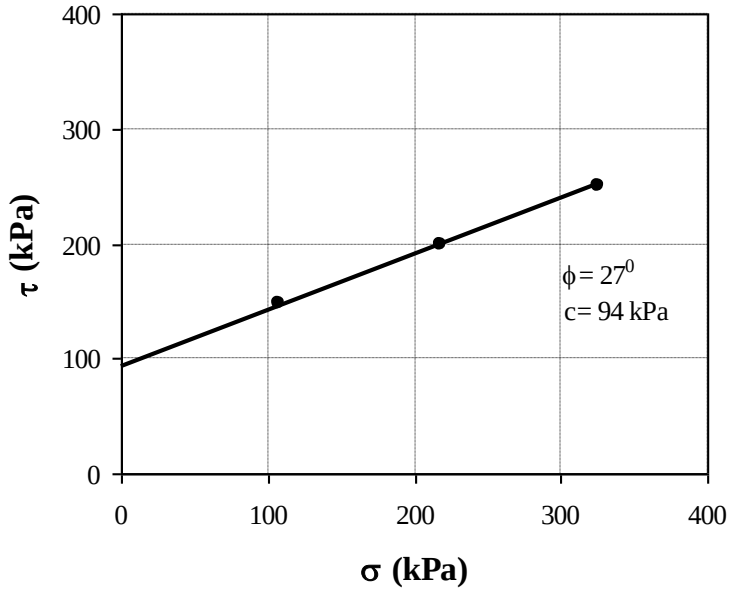
Şekil B.43 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 30, t: 90 gün)



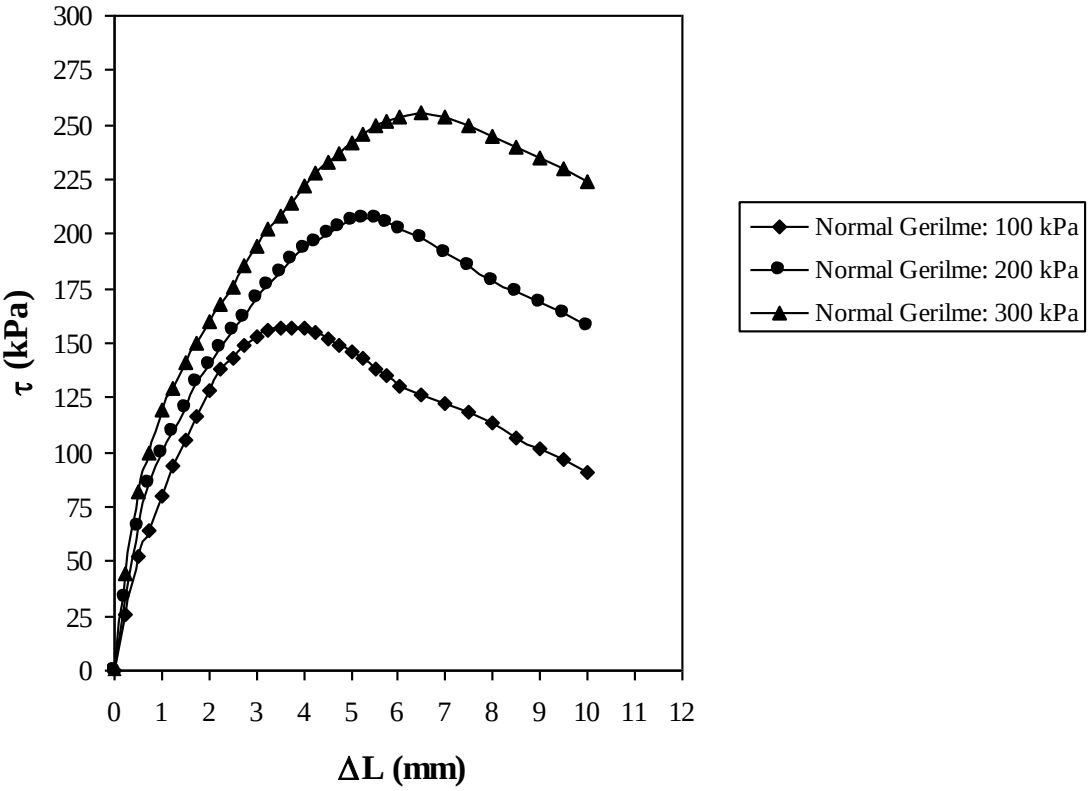
Şekil B.44 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 30, t: 90 gün)



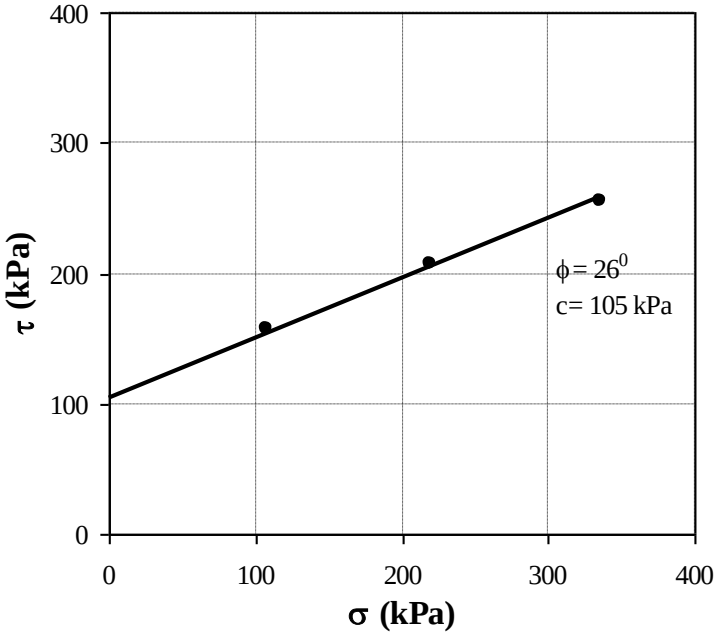
Şekil B.45 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 40, t: 0)



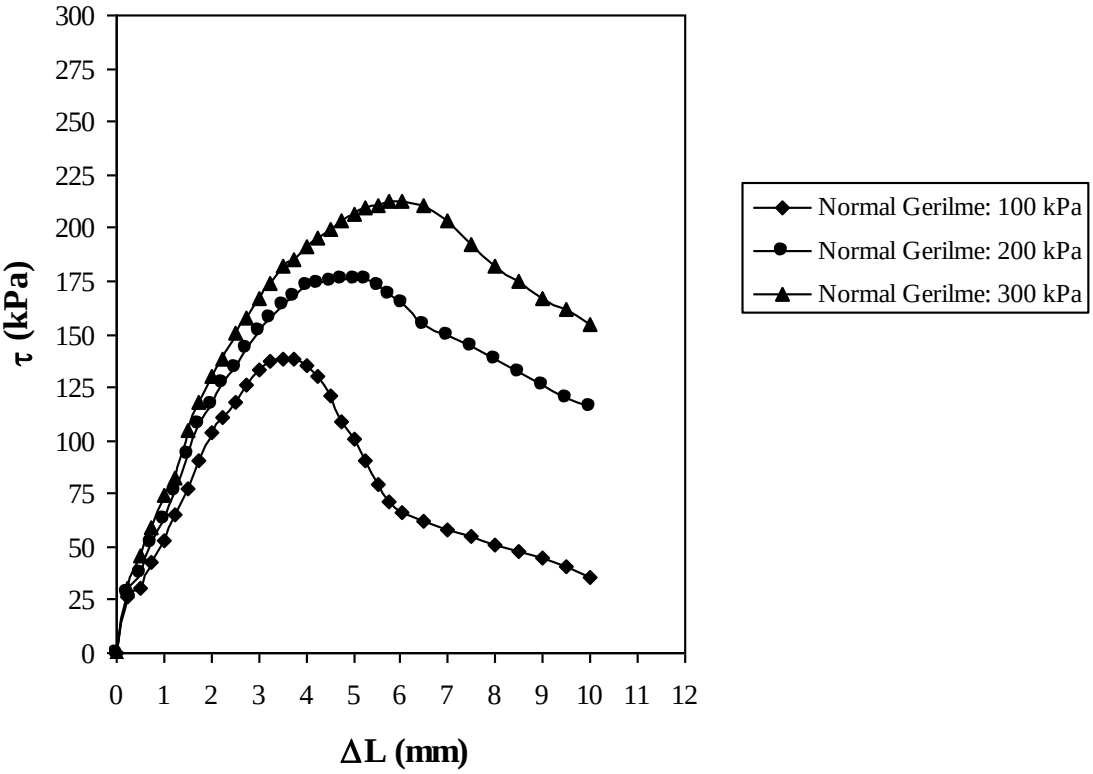
Şekil B.46 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 0)



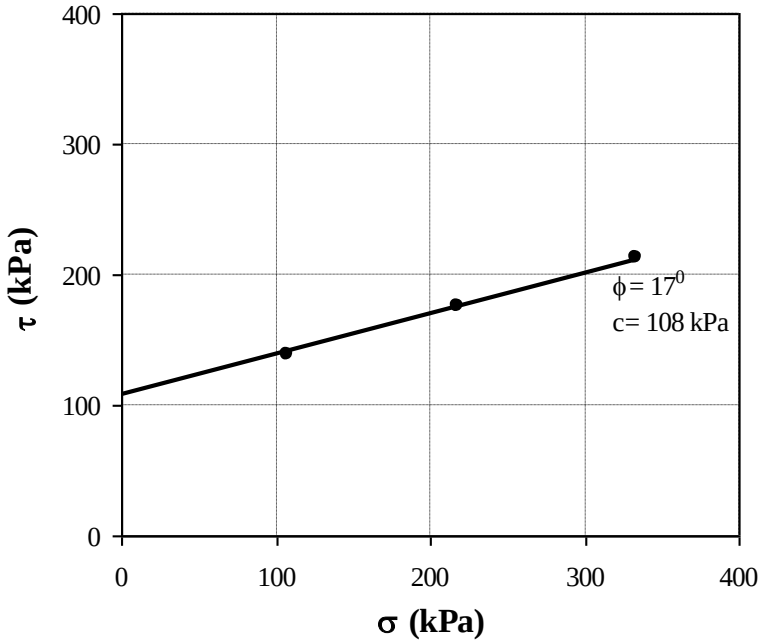
Şekil B.47 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 40, t: 1 gün)



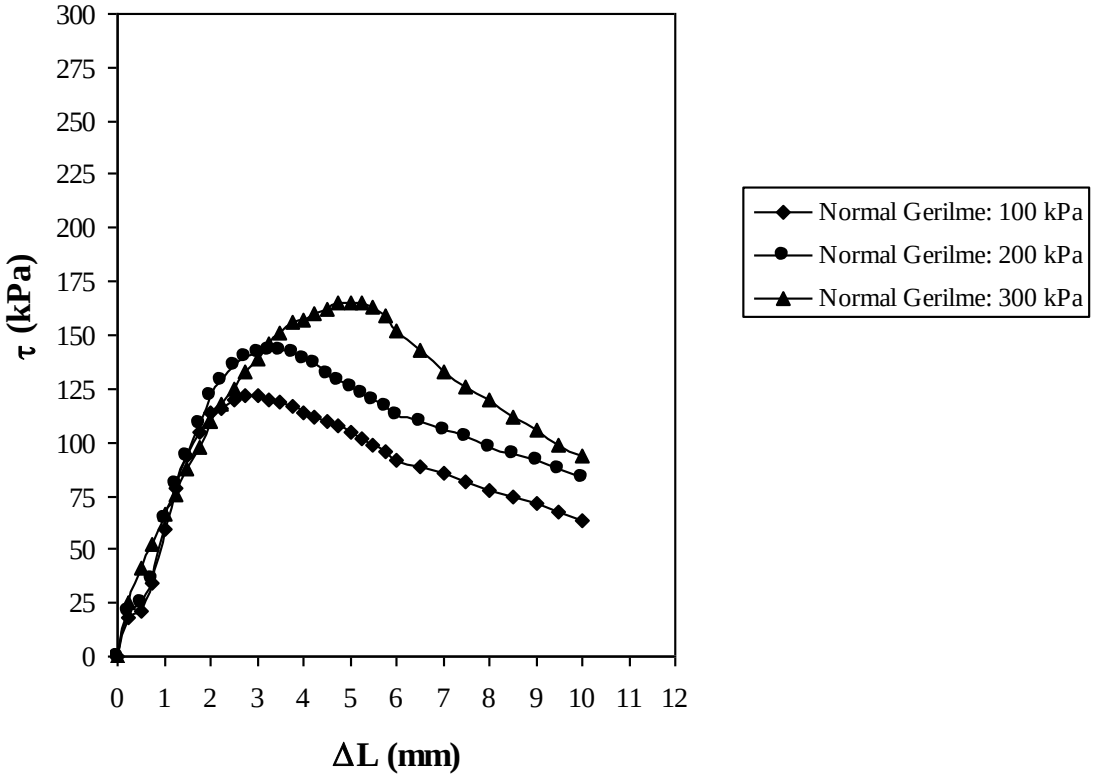
Şekil B.48 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 1 gün)



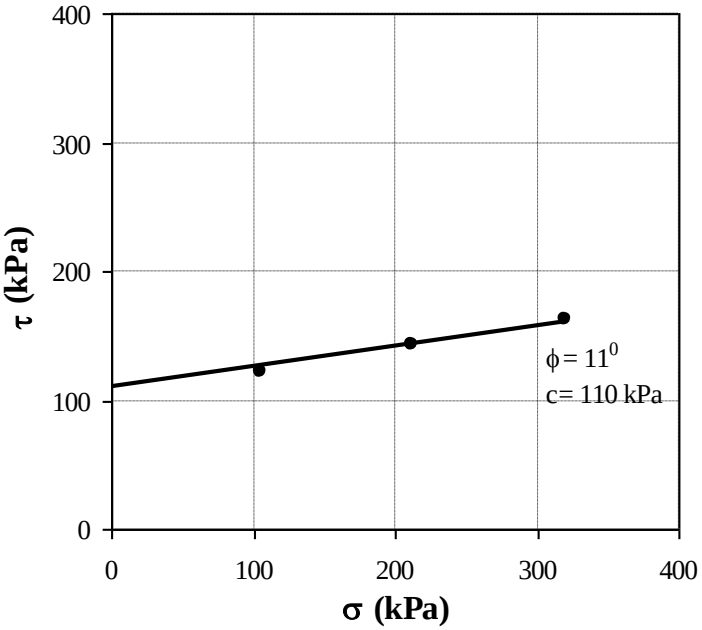
Şekil B.49 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 40, t: 7 gün)



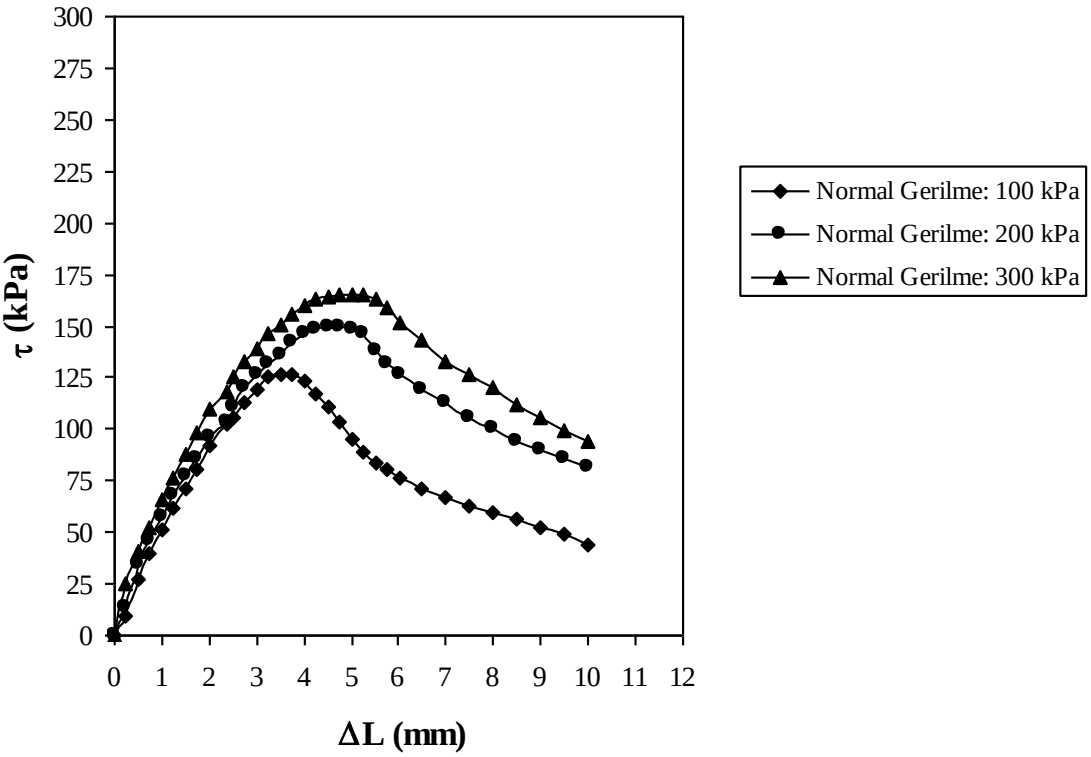
Şekil B.50 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 7 gün)



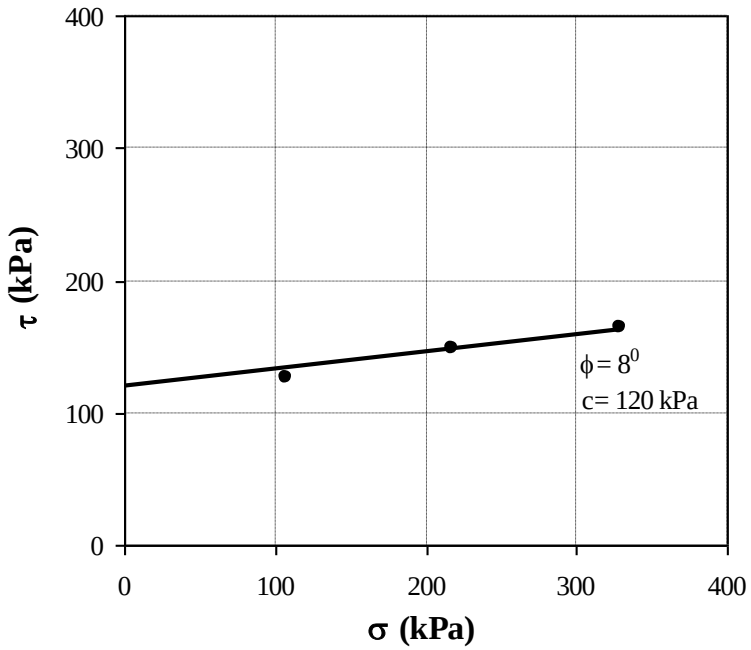
Şekil B.51 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 40, t: 30 gün)



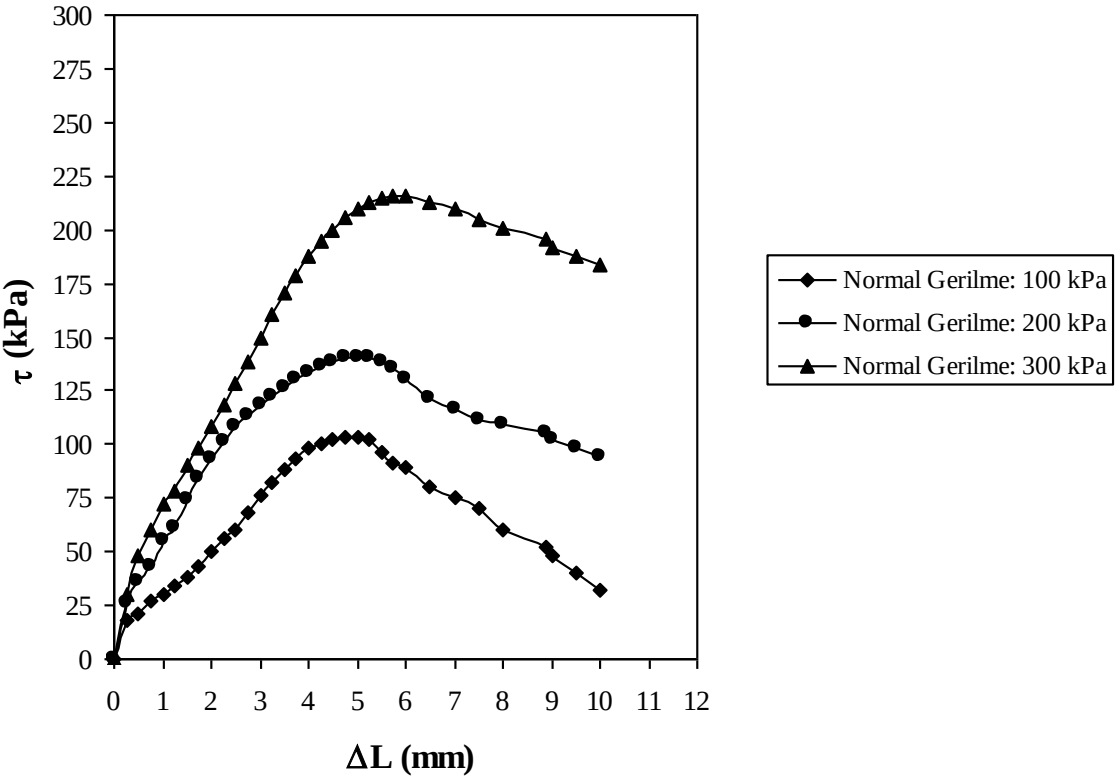
Şekil B.52 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 30 gün)



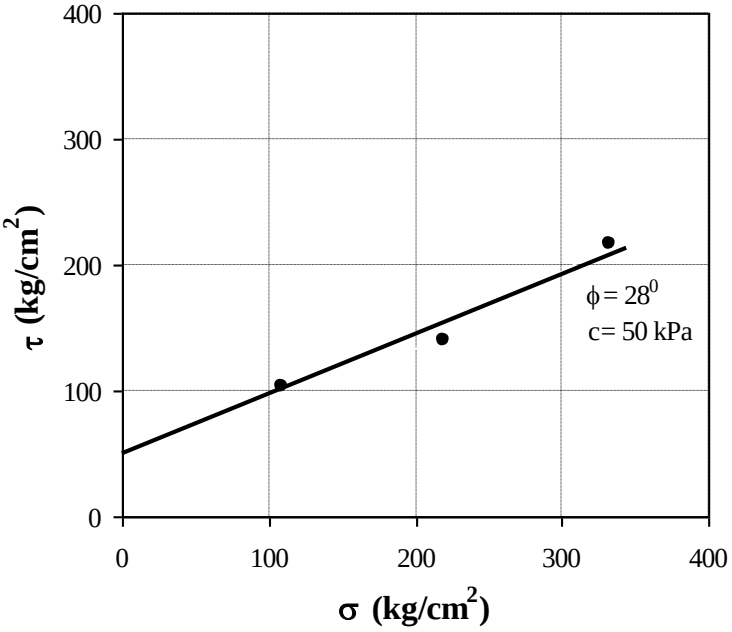
Şekil B.53 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 40, t: 90 gün)



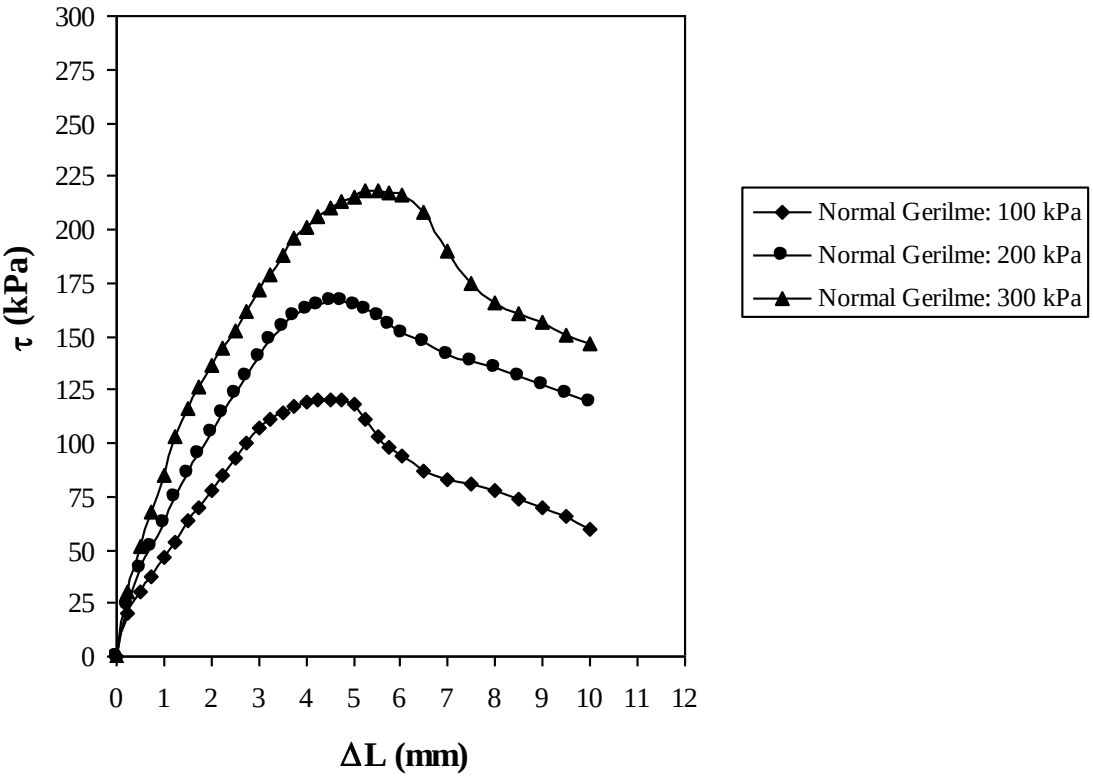
Şekil B.54 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 40, t: 90 gün)



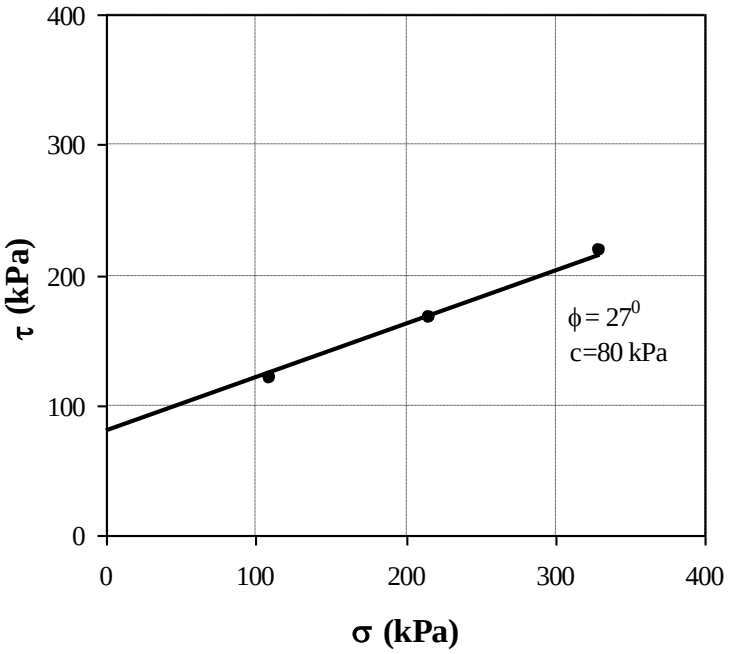
Şekil B.55 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 50, t: 0)



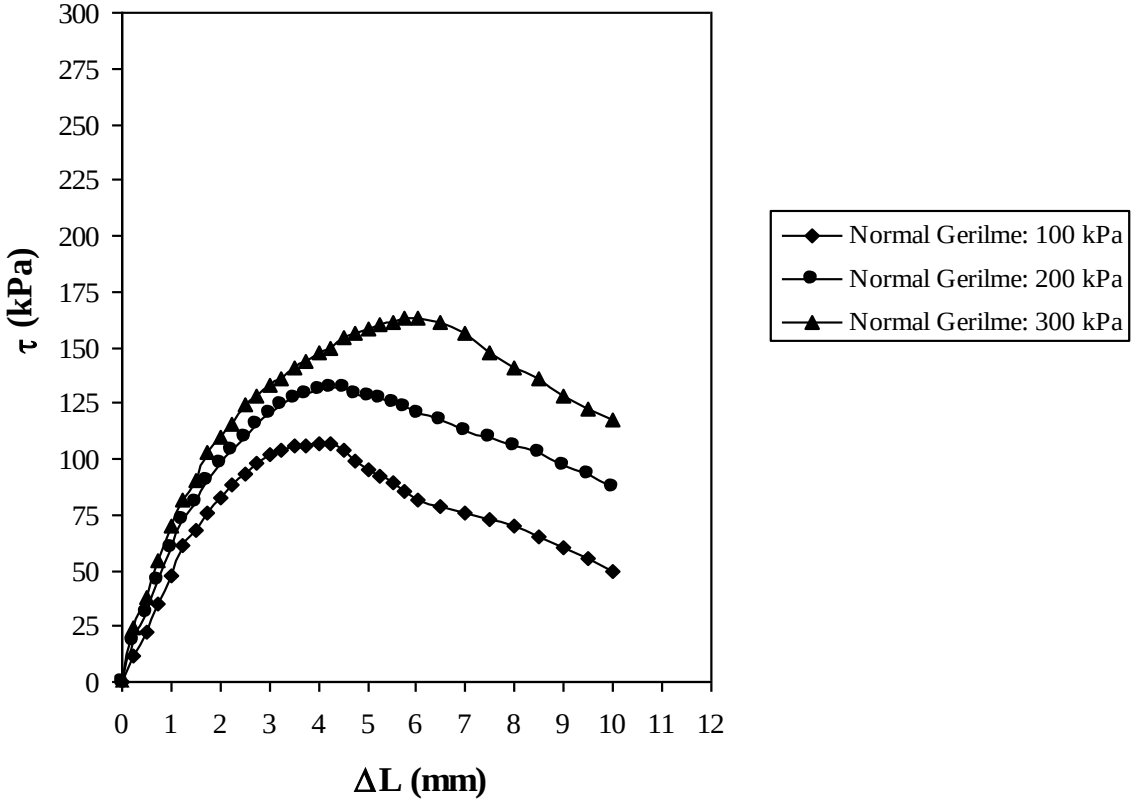
Şekil B.56 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 0)



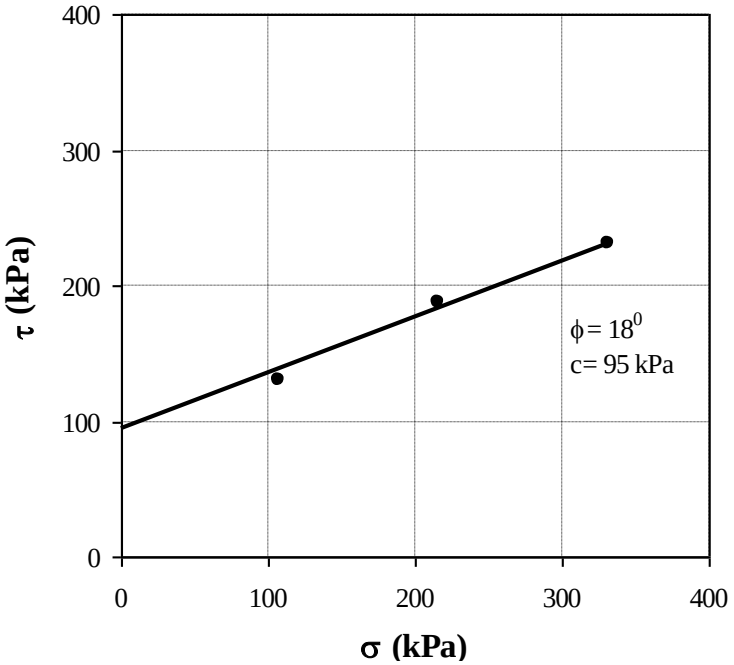
Şekil B.57 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 50, t: 1 gün)



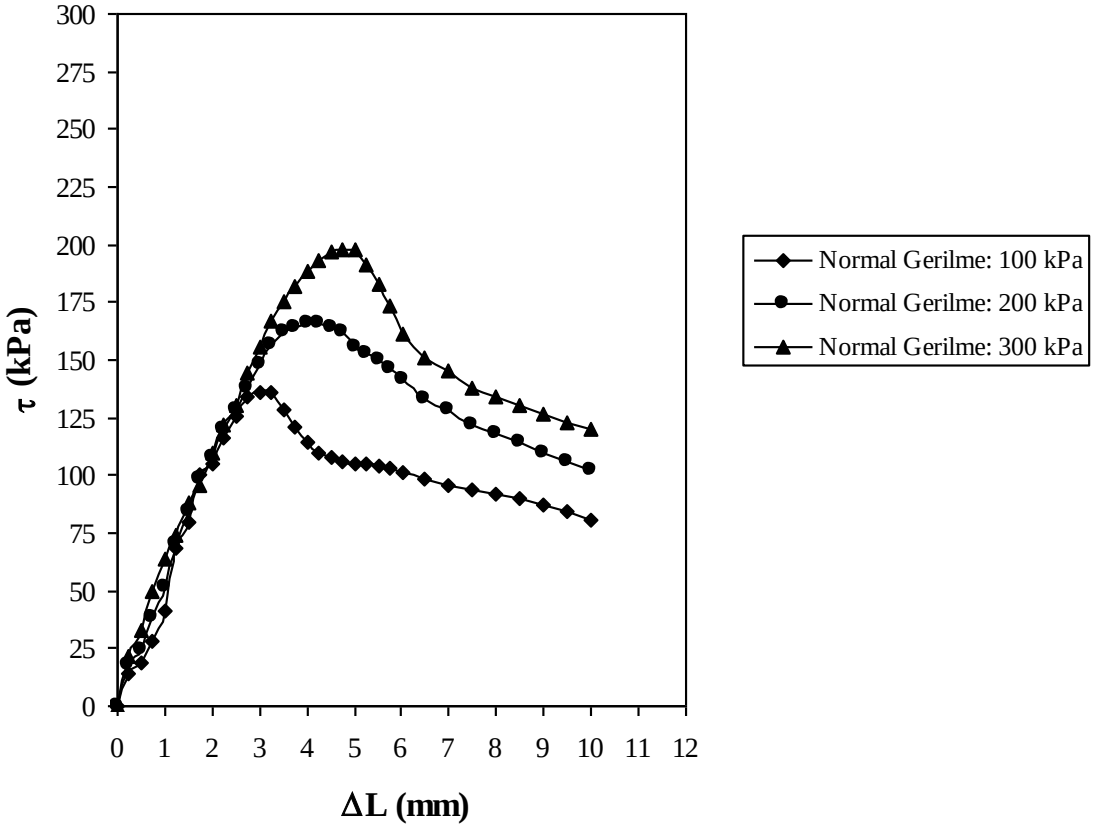
Şekil B.58 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 1 gün)



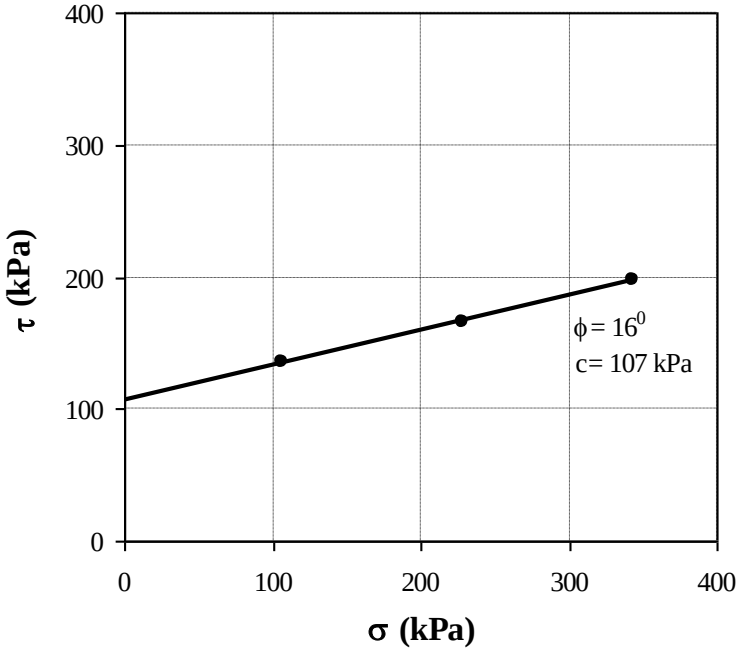
Şekil B.59 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 50, t: 7 gün)



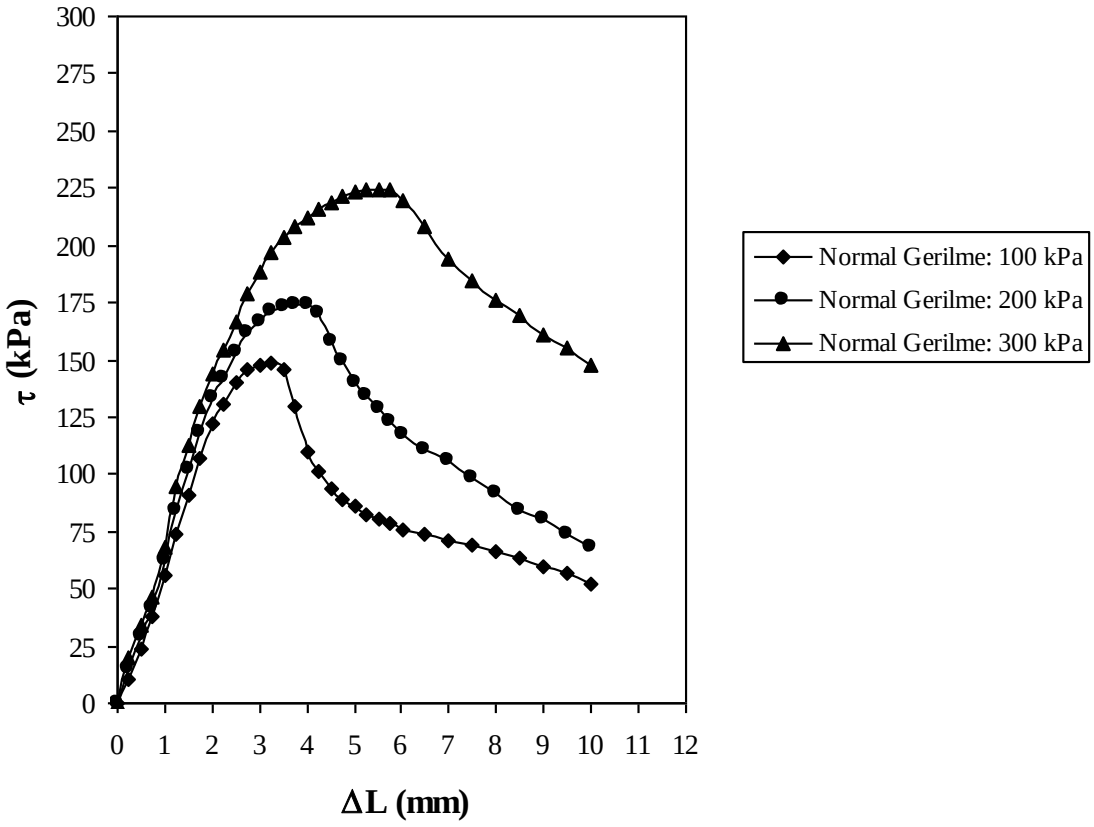
Şekil B.60 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 7 gün)



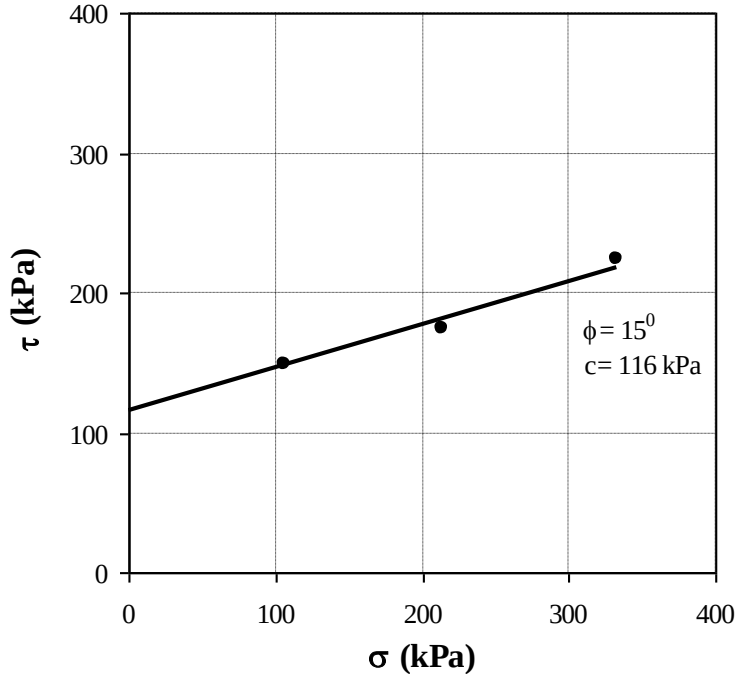
Şekil B.61 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 50, t: 30 gün)



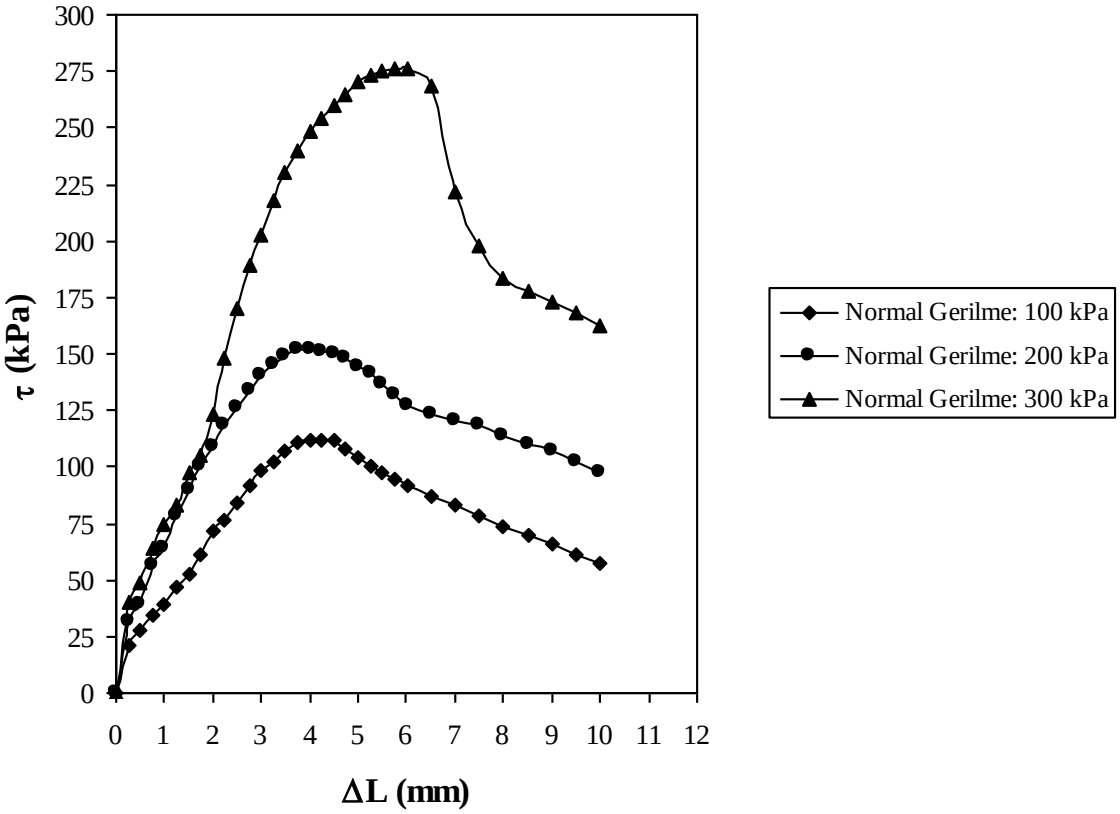
Şekil B.62 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 30 gün)



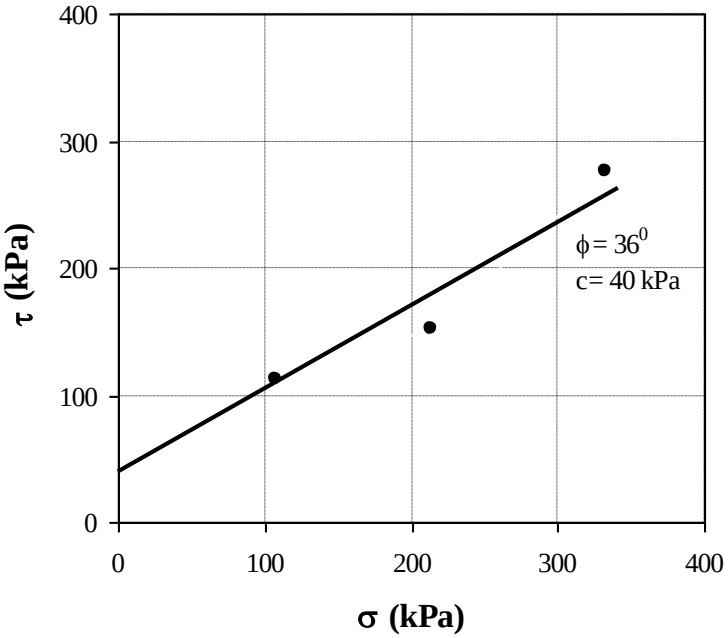
Şekil B.63 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 50, t: 90 gün)



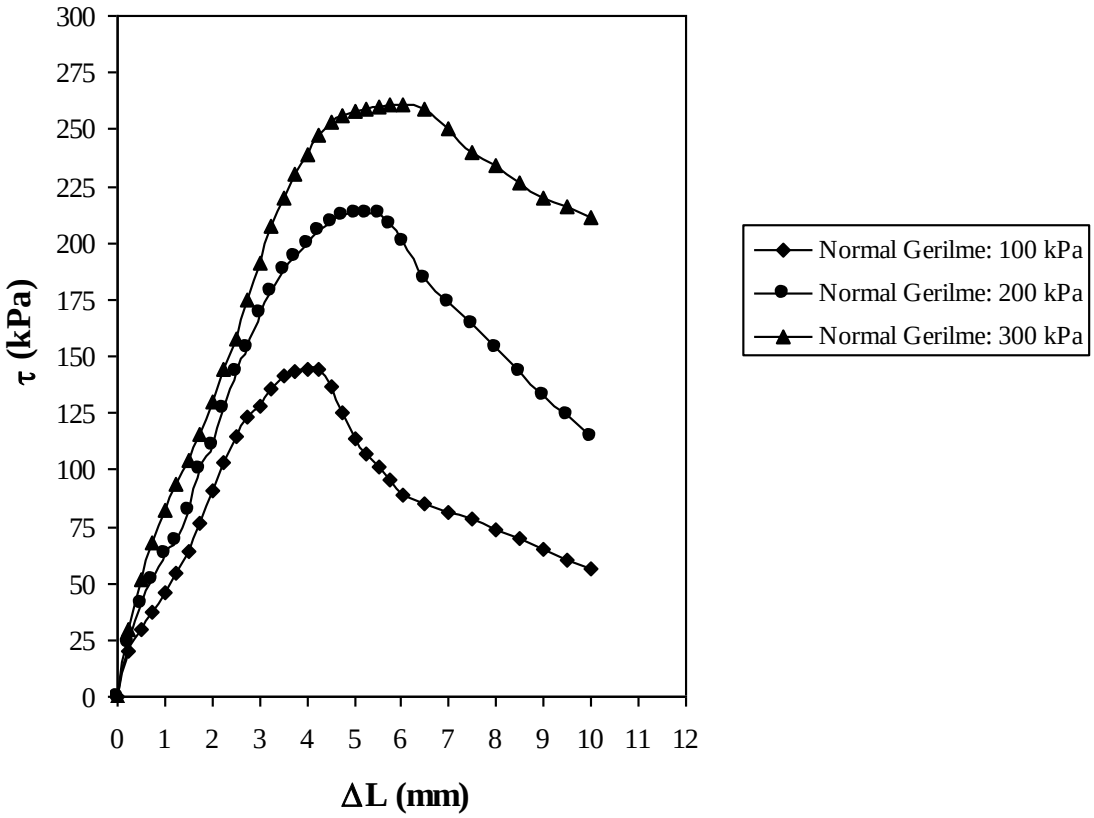
Şekil B.64 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 50, t: 90 gün)



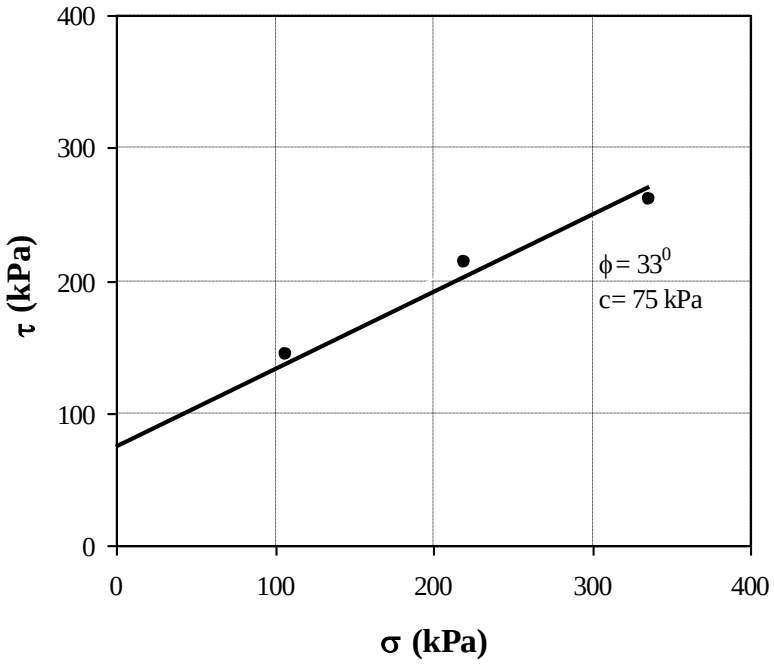
Şekil B.65 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (Çöp S: % 100, t: 0)



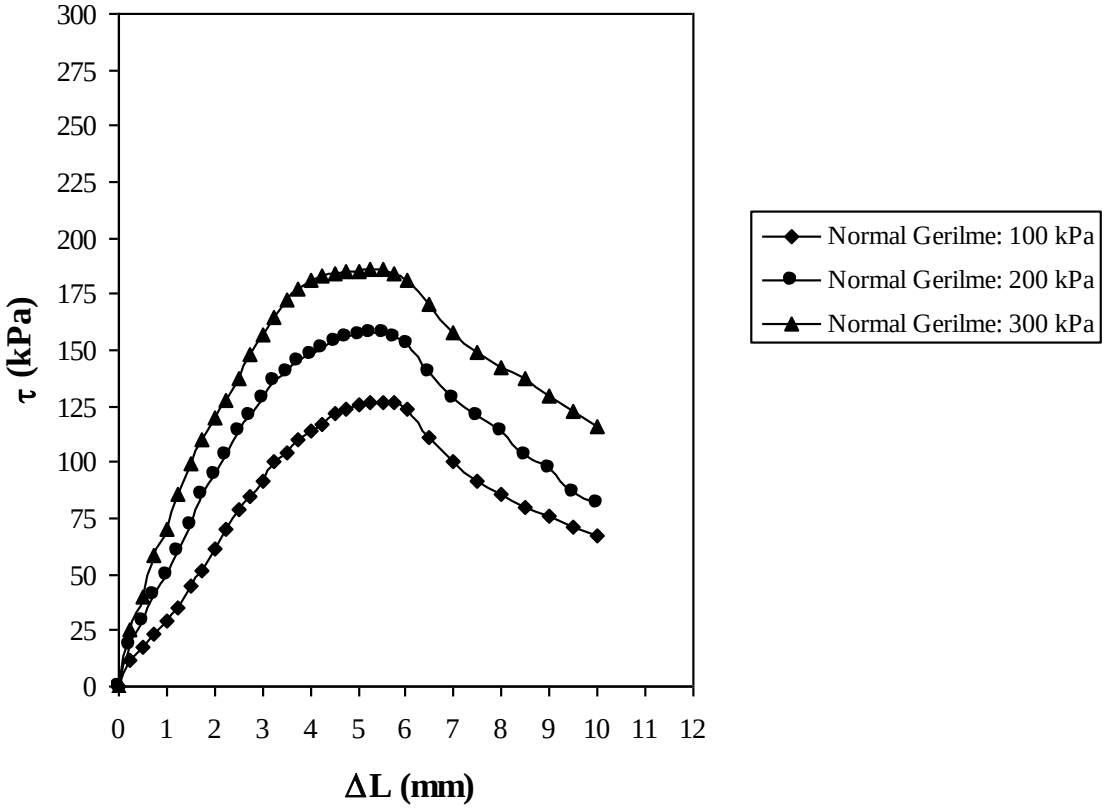
Şekil B.66 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 0)



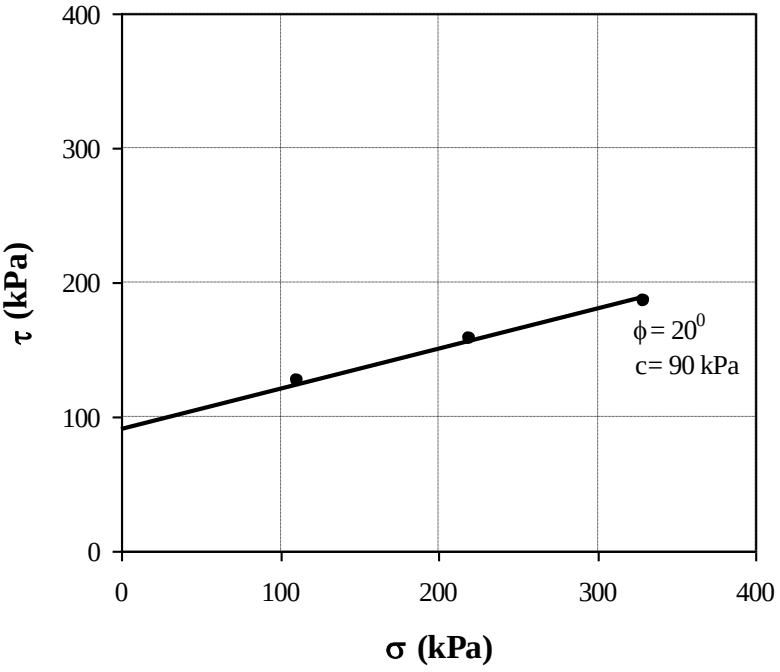
Şekil B.67 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 100, t: 1 gün)



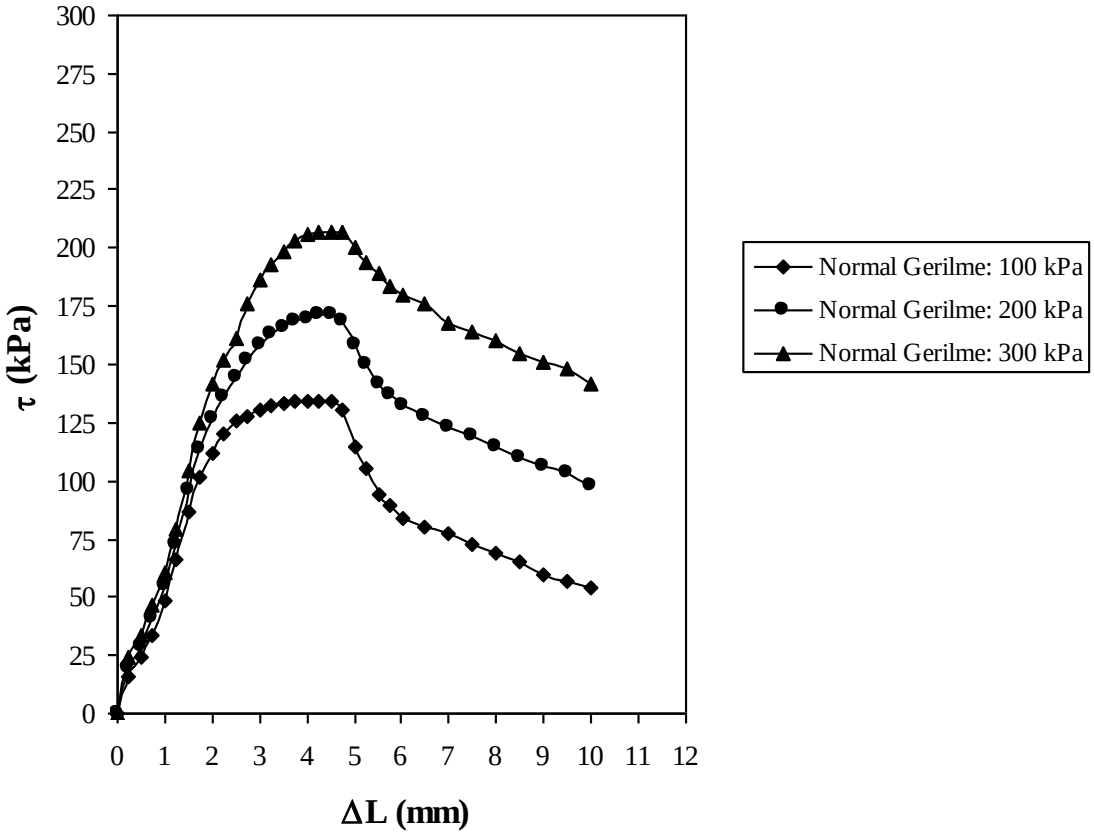
Şekil B.68 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 1 gün)



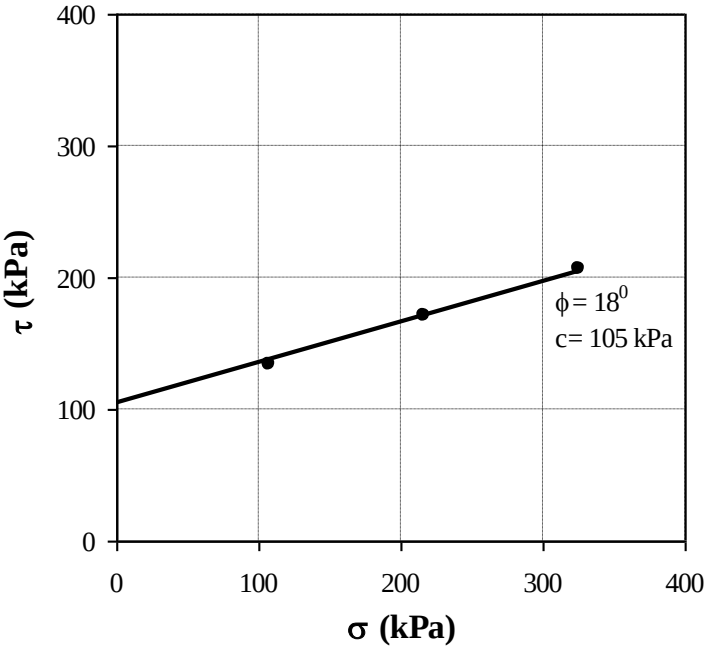
Şekil B.69 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 100, t: 7 gün)



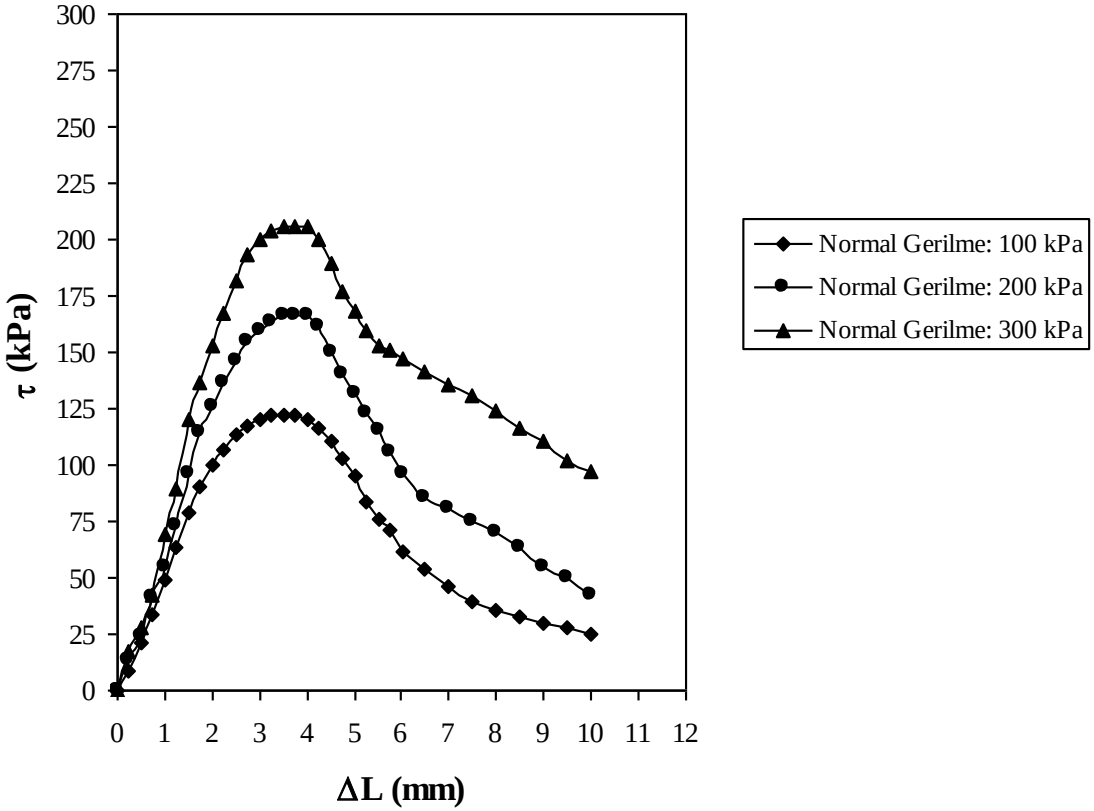
Şekil B.70 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 7 gün)



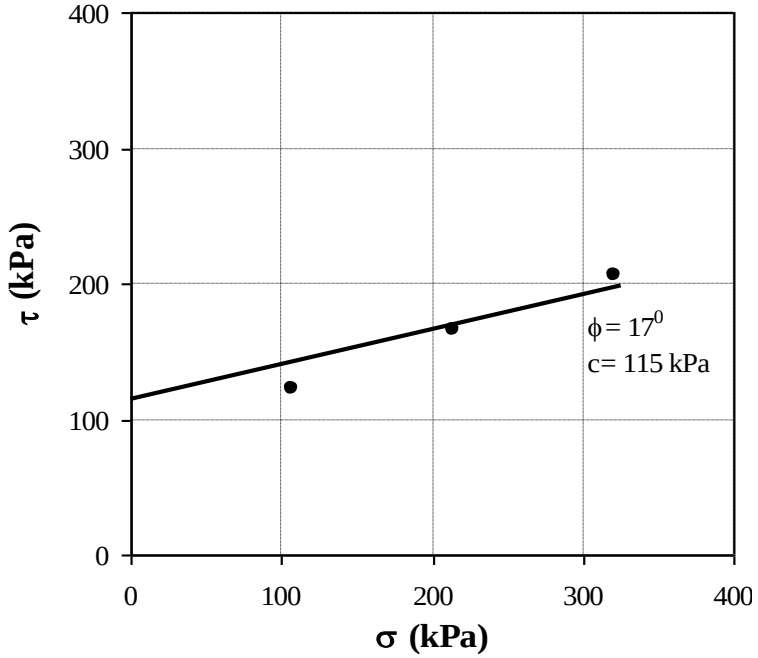
Şekil B.71 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 100, t: 30 gün)



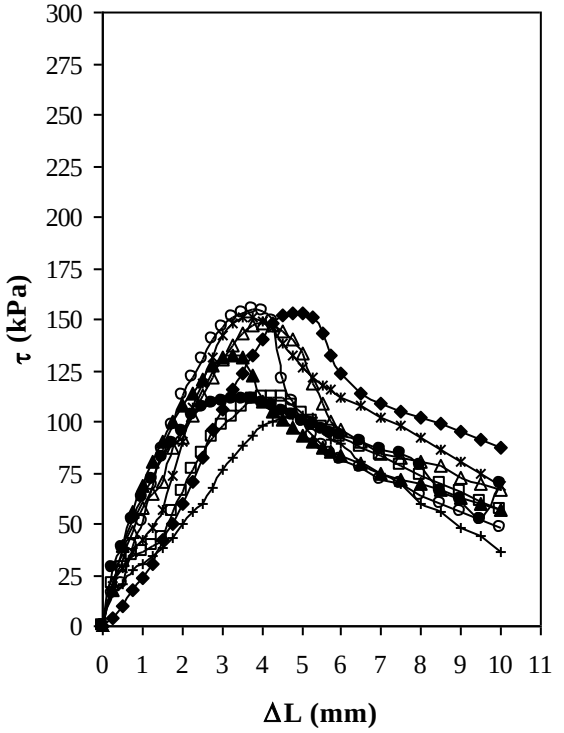
Şekil B.72 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 30 gün)



Şekil B.73 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman
(Çöp S: % 100, t: 90 gün)

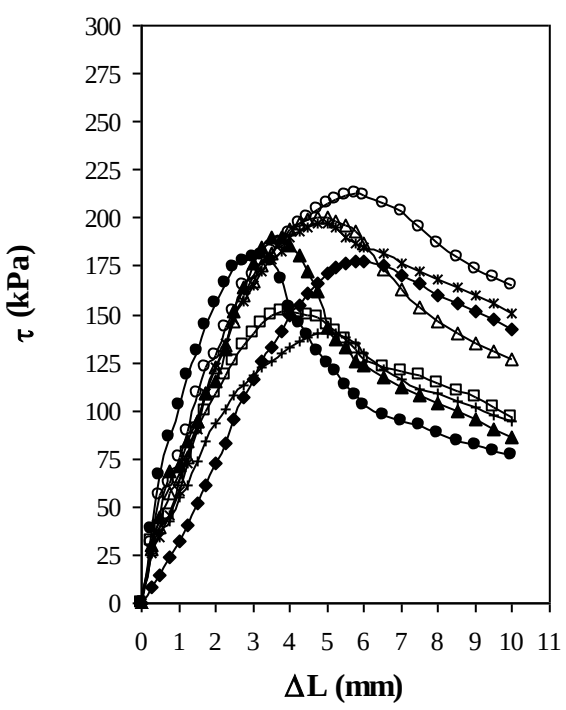


Şekil B.74 : Kırılma Zarfı (Çöp S: % 100, t: 90 gün)



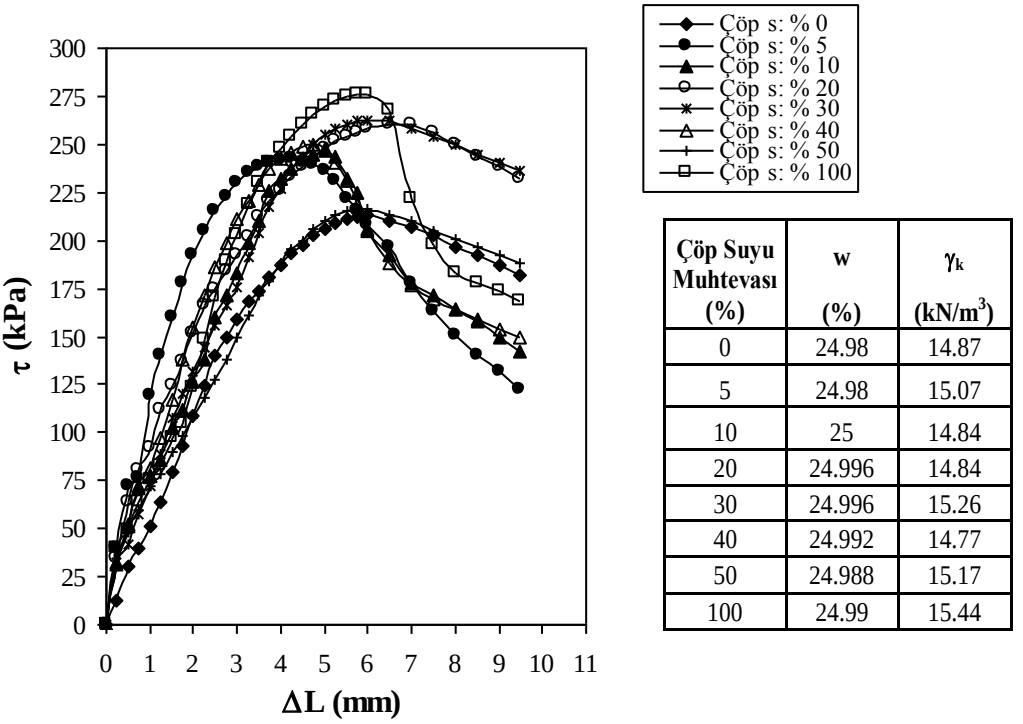
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.991	14.38
5	24.957	14.02
10	24.996	14.5
20	24.98	14.36
30	24.992	14.5
40	24.996	14.41
50	24.996	14.48
100	25	14.53

Şekil B.75 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (τ= 100 kPa, t: 0)



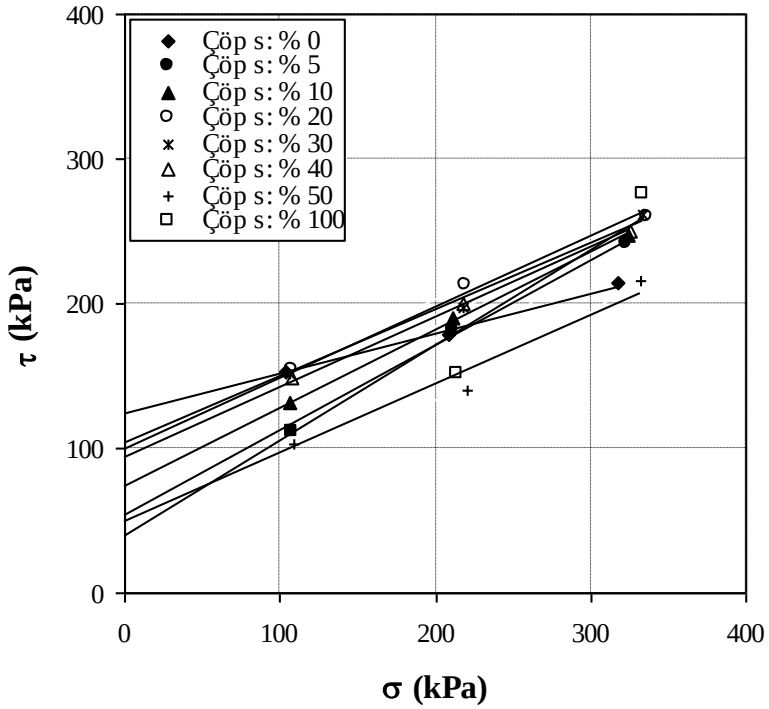
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	15.83
5	24.996	14.64
10	24.996	14.85
20	25	14.5
30	24.992	15.03
40	24.996	14.55
50	24.996	14.91
100	25	14.85

Şekil B.76 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (τ= 200 kPa, t: 0)

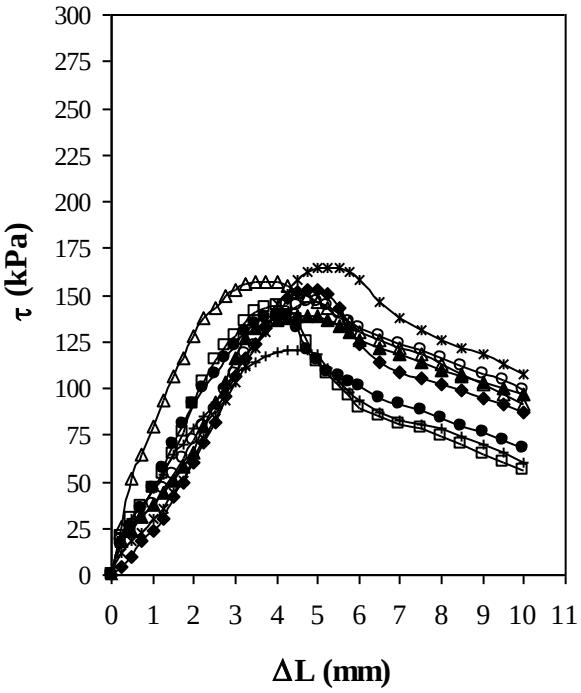


Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	14.87
5	24.98	15.07
10	25	14.84
20	24.996	14.84
30	24.996	15.26
40	24.992	14.77
50	24.988	15.17
100	24.99	15.44

Şekil B.77 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (τ= 300 kPa, t: 0)

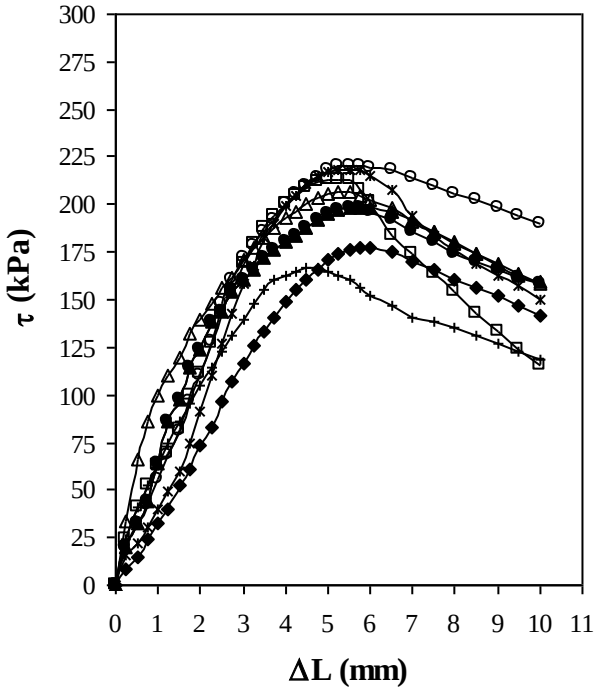


Şekil B.78 : Kırılma Zarfı (t: 0)



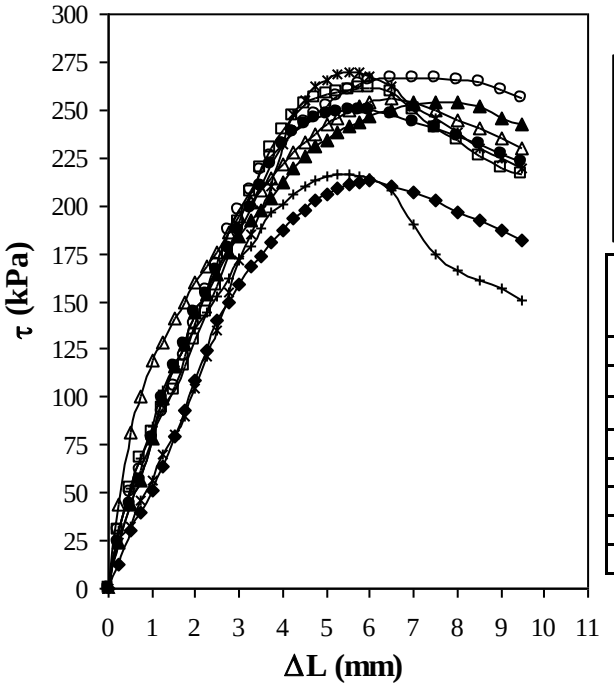
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.991	14.38
5	24.988	14.81
10	24.969	14.62
20	24.976	14.95
30	24.949	14.56
40	24.980	14.85
50	24.980	14.77
100	24.960	14.84

Şekil B.79 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 1 gün)



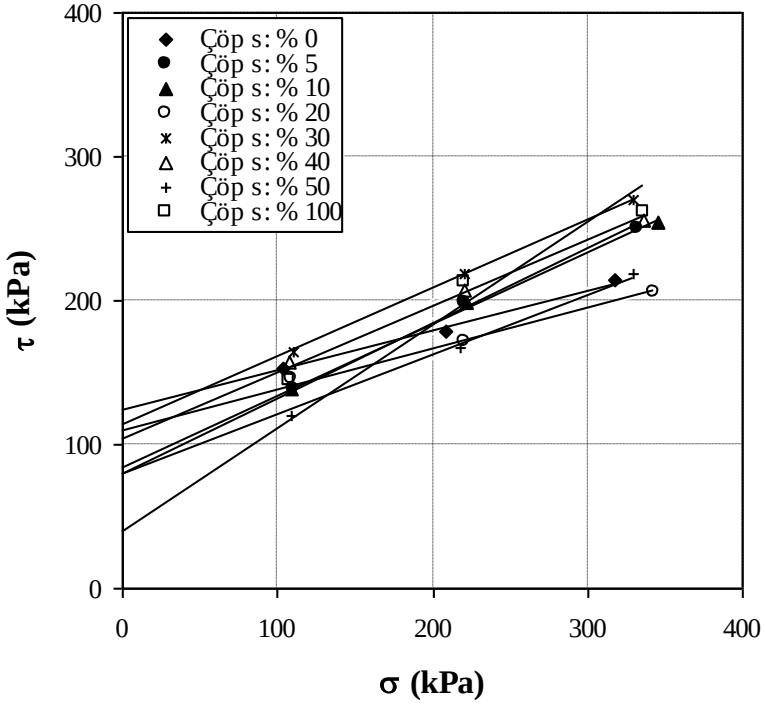
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	15.83
5	24.964	14.97
10	24.996	15.05
20	24.988	15.01
30	24.992	15.03
40	24.996	14.98
50	24.996	14.96
100	24.94	15.41

Şekil B.80 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 1 gün)

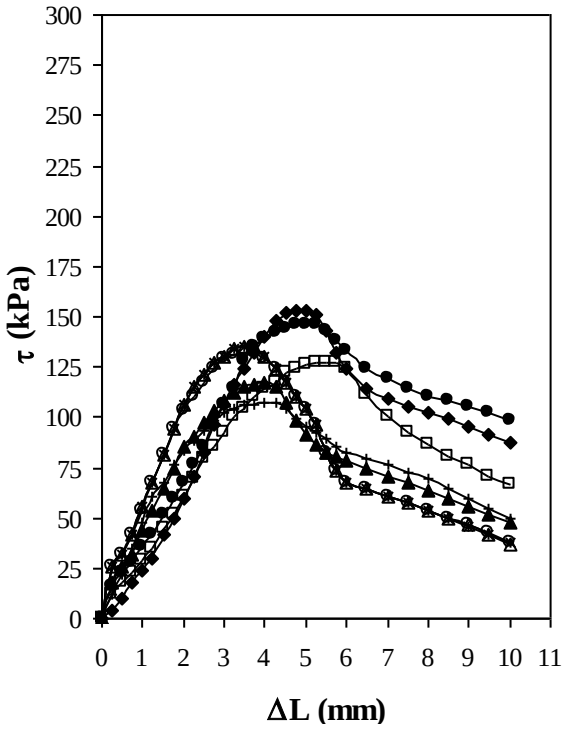


Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.980	14.87
5	24.960	15.69
10	24.992	15.46
20	24.984	15.36
30	24.980	15.31
40	24.990	15.46
50	24.980	15.31
100	24.960	15.69

Şekil B.81 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 1 gün)

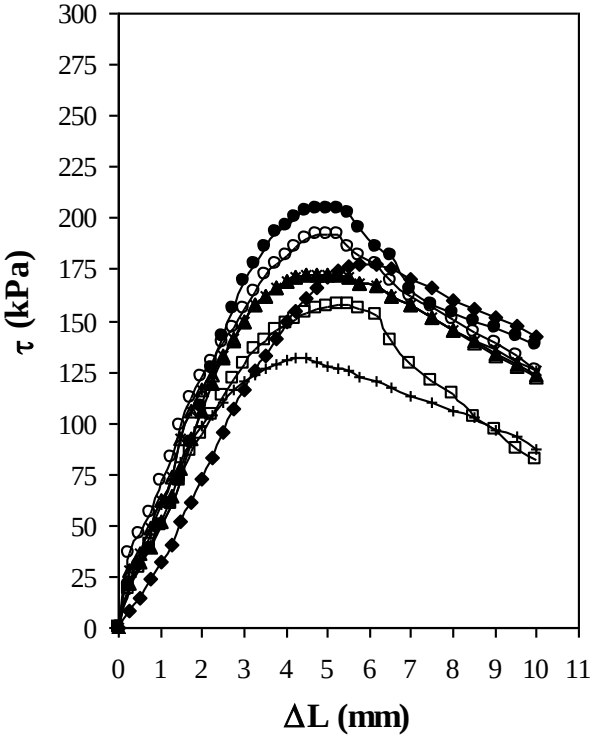


Şekil B.82 : Kırılma Zarfı (t: 1 gün)



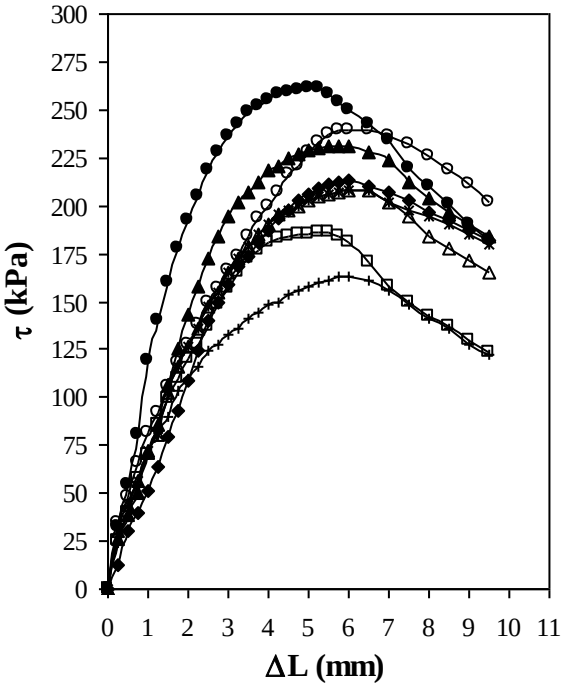
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.991	14.38
5	24.961	14.81
10	24.969	14.66
20	24.996	14.67
30	24.980	14.69
40	24.960	14.71
50	24.959	14.91
100	24.980	14.85

Şekil B.83 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 7 gün)



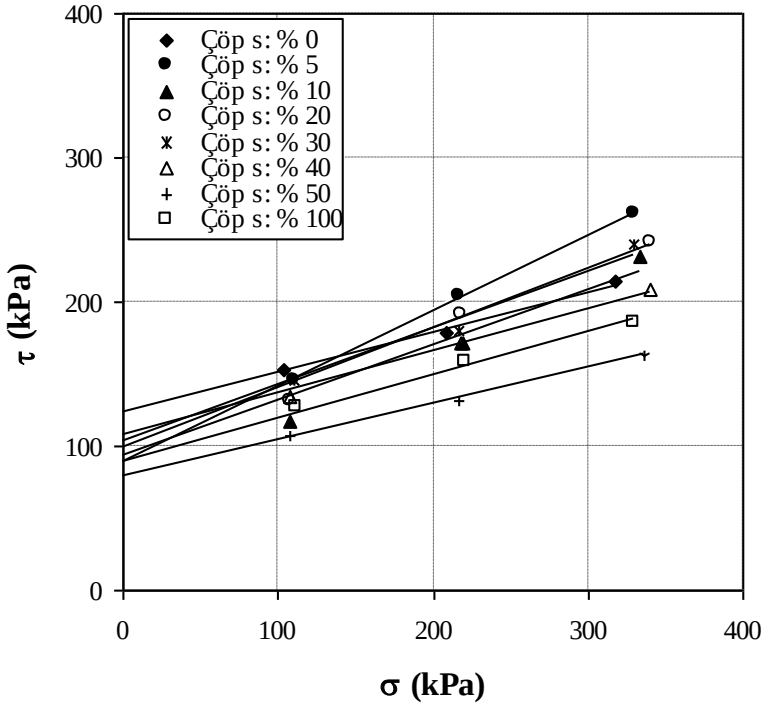
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	15.83
5	24.964	14.93
10	24.941	14.95
20	25	14.94
30	24.960	14.97
40	24.980	14.98
50	25	15.02
100	24.940	15.54

Şekil B.84 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 7 gün)

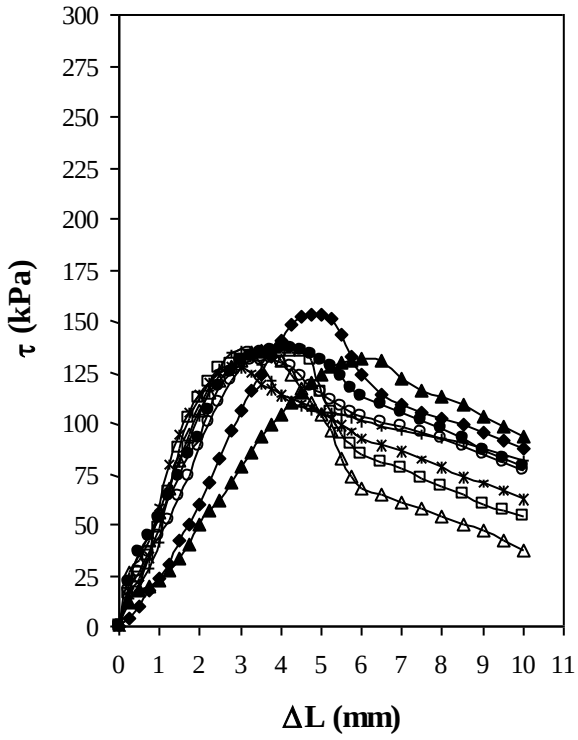


Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	14.87
5	24.961	15.47
10	24.914	15.1
20	24.979	15.94
30	24.940	15.47
40	24.970	16.09
50	24.960	15.5
100	24.940	15.54

Şekil B.85 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 7 gün)

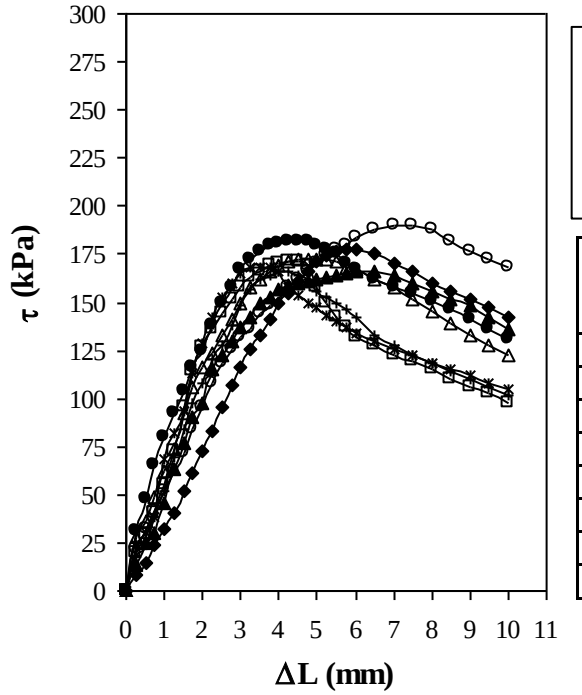


Şekil B.86 : Kırılma Zarfı (t: 7 gün)



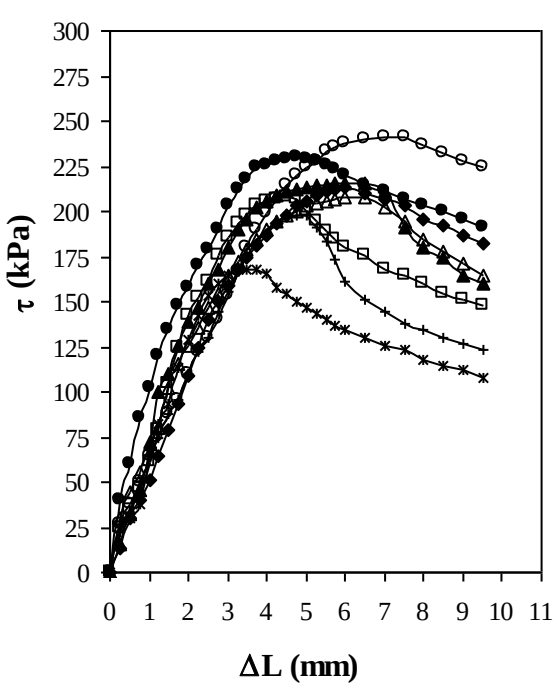
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.991	14.38
5	24.961	14.58
10	24.960	14.73
20	24.961	15.01
30	24.951	15.25
40	24.960	15.27
50	24.920	15.04
100	24.980	14.76

Şekil B.87 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 30 gün)



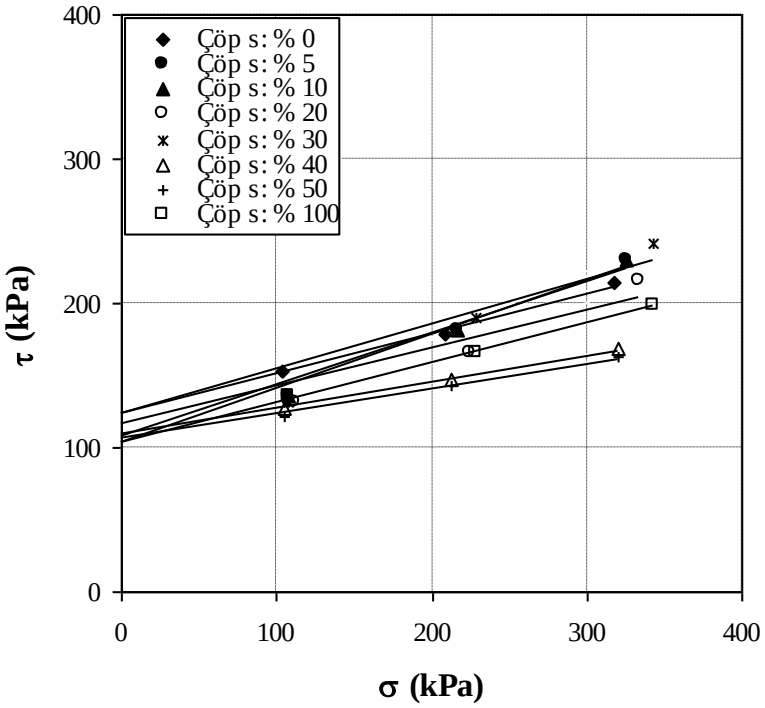
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.992	15.83
5	24.961	14.83
10	24.941	15.04
20	25	15.08
30	24.980	15.31
40	24.979	15.41
50	24.897	15.27
100	24.980	15.41

Şekil B.88 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 30 gün)

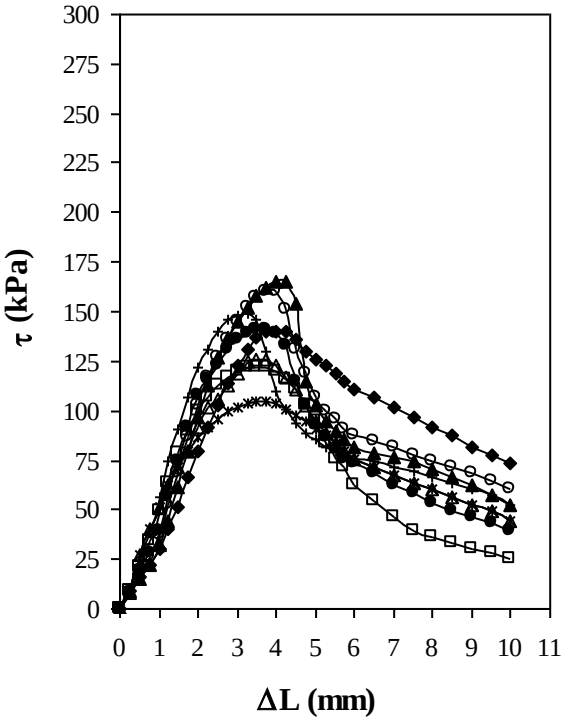


Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.98	14.87
5	24.961	15.29
10	24.941	15.4
20	24.980	15.21
30	24.960	15.47
40	25	15.53
50	24.942	15.46
100	24.980	15.65

Şekil B.89 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 30 gün)

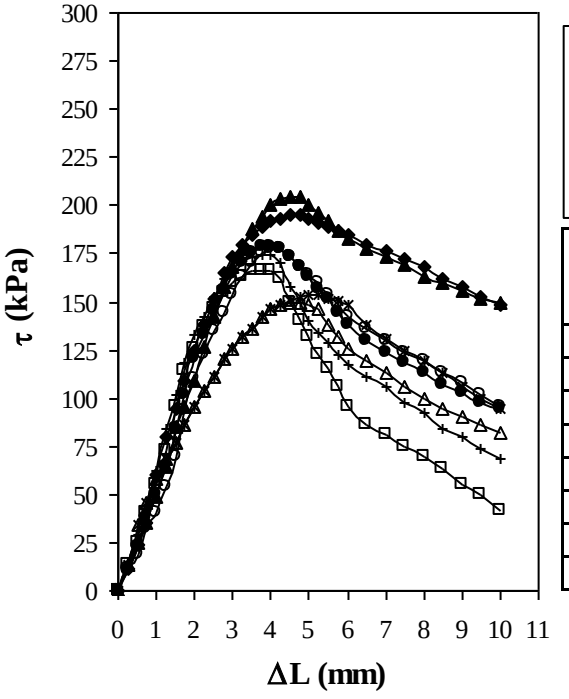


Şekil B.90 : Kırılma Zarfı (t: 30 gün)



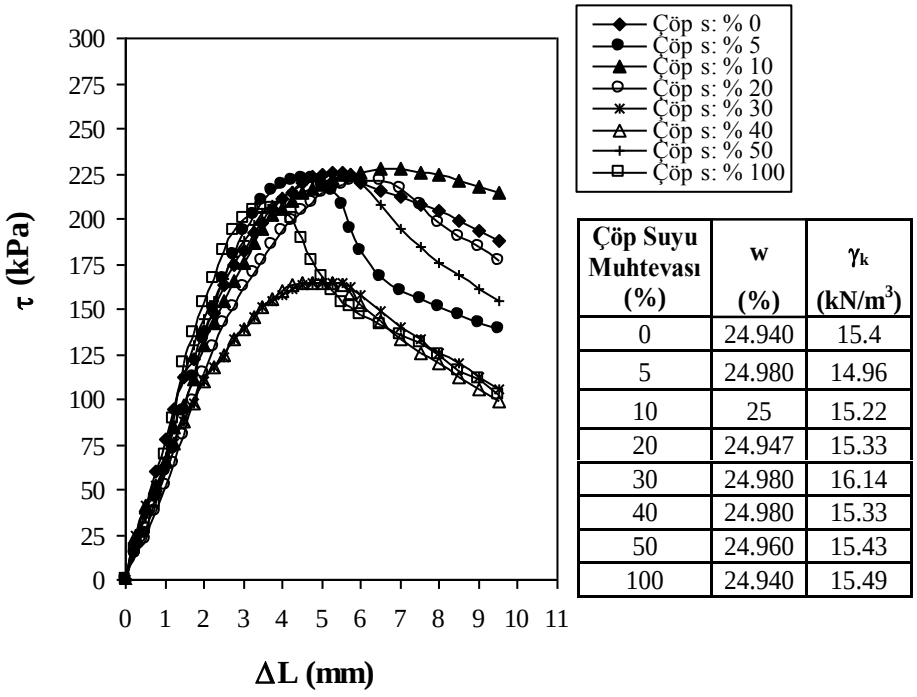
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.959	14.81
5	24.980	14.67
10	24.979	14.99
20	24.940	14.63
30	24.980	14.78
40	24.980	14.83
50	24.980	15.01
100	24.940	14.98

Şekil B.91: Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 100 kPa, t: 90 gün)



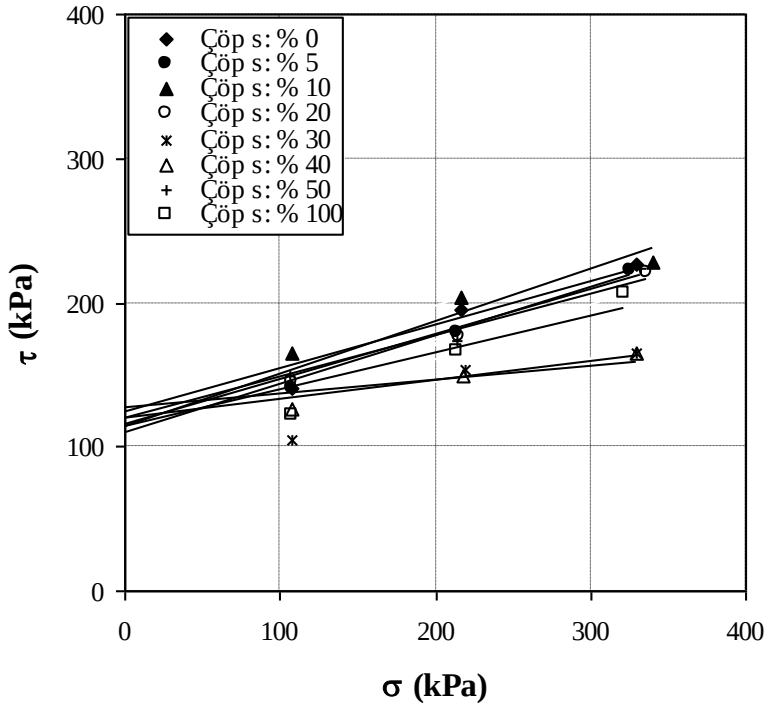
Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.959	14.81
5	24.980	14.67
10	24.979	14.99
20	24.940	14.63
30	24.980	14.78
40	24.980	14.83
50	24.980	15.01
100	24.940	14.98

Şekil B.92 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 200 kPa, t: 90 gün)

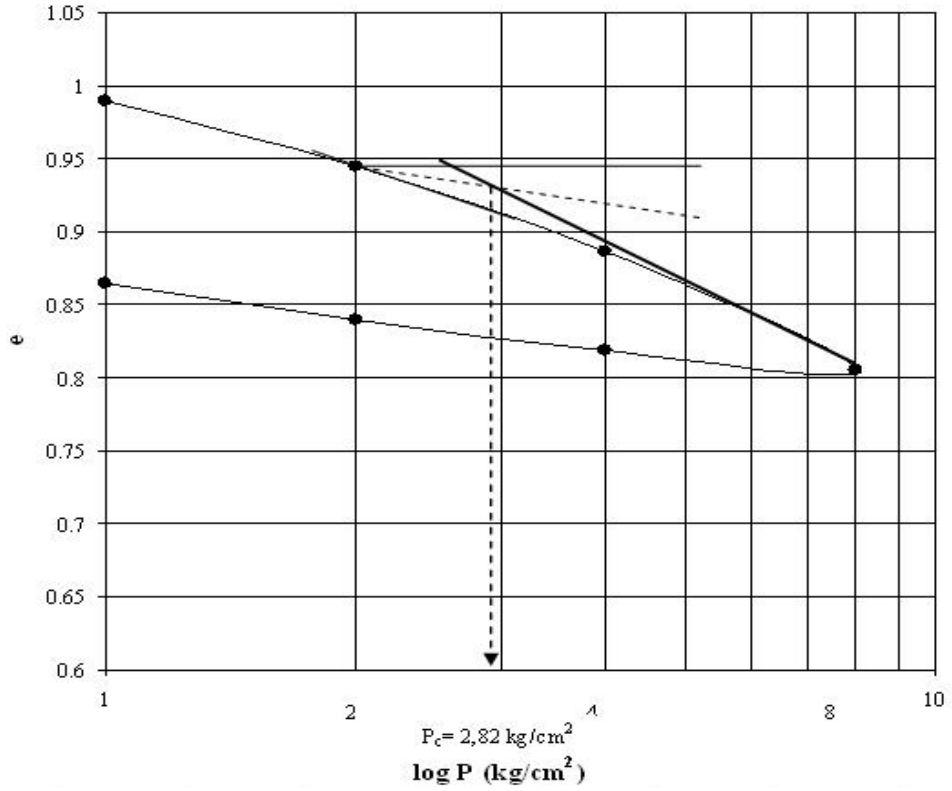


Çöp Suyu Muhtevası (%)	w (%)	γ_k (kN/m^3)
0	24.940	15.4
5	24.980	14.96
10	25	15.22
20	24.947	15.33
30	24.980	16.14
40	24.980	15.33
50	24.960	15.43
100	24.940	15.49

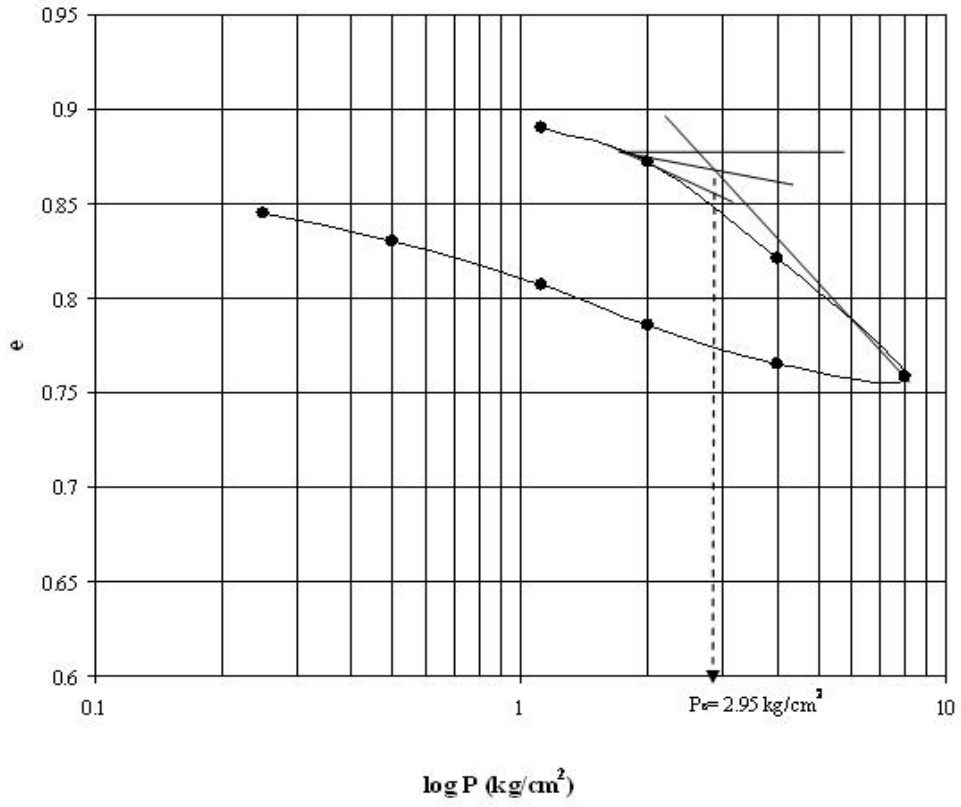
Şekil B.93 : Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman (σ= 300 kPa, t: 90 gün)



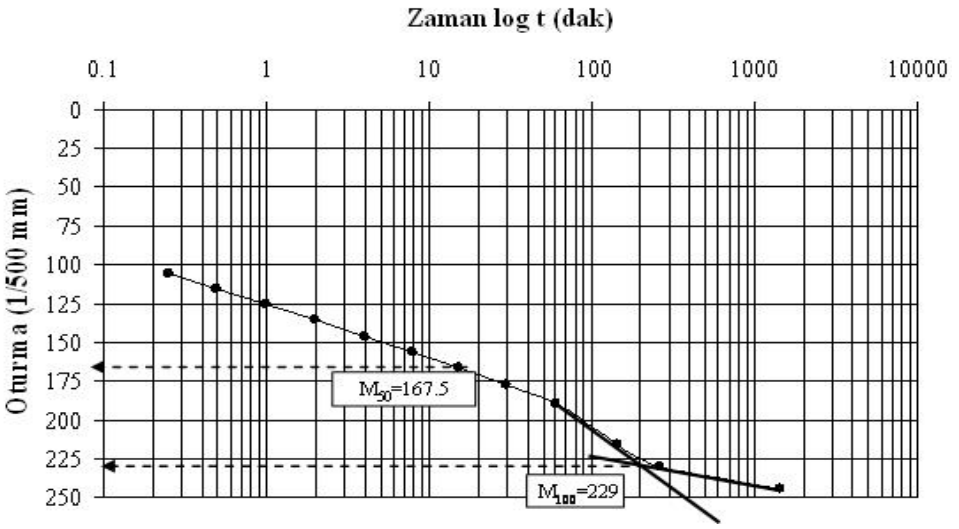
Şekil B.94: Kırılma Zarfı (t: 90 gün)



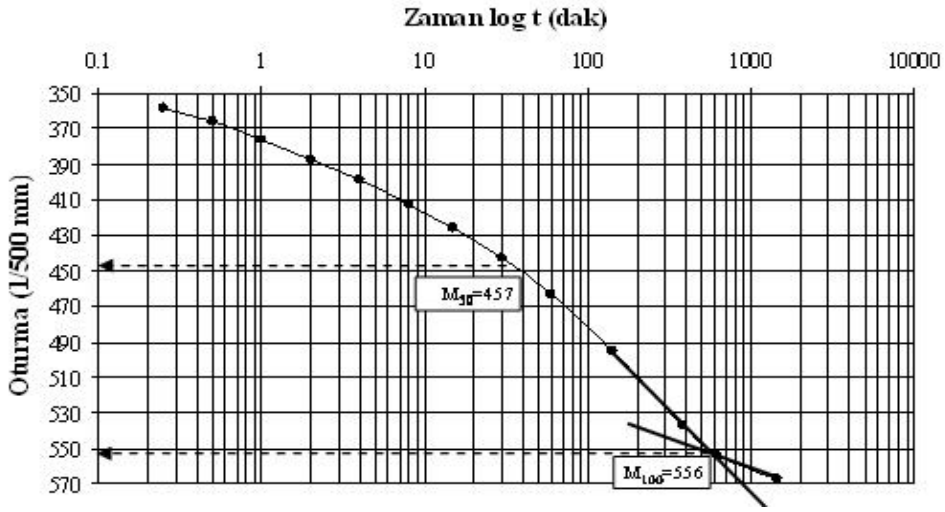
Şekil C.1 : e-log P (Temiz Zemin, t: 0)



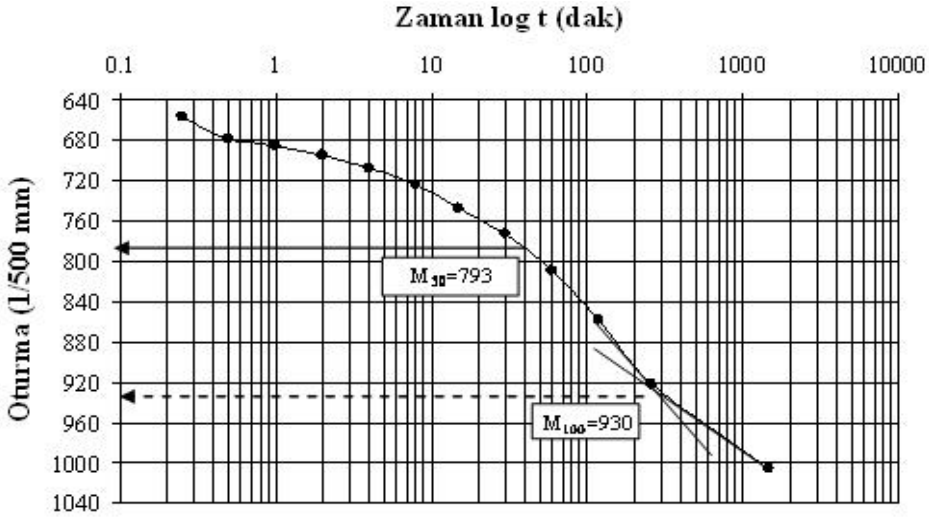
Şekil C.2 : e-log P (Temiz Zemin, t: 30 gün)



a) P= 200 kPa

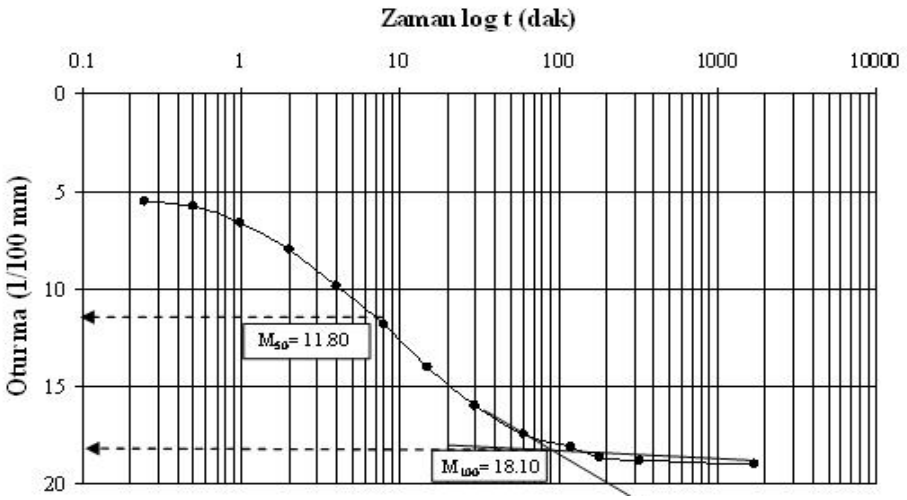


b) P= 400 kPa

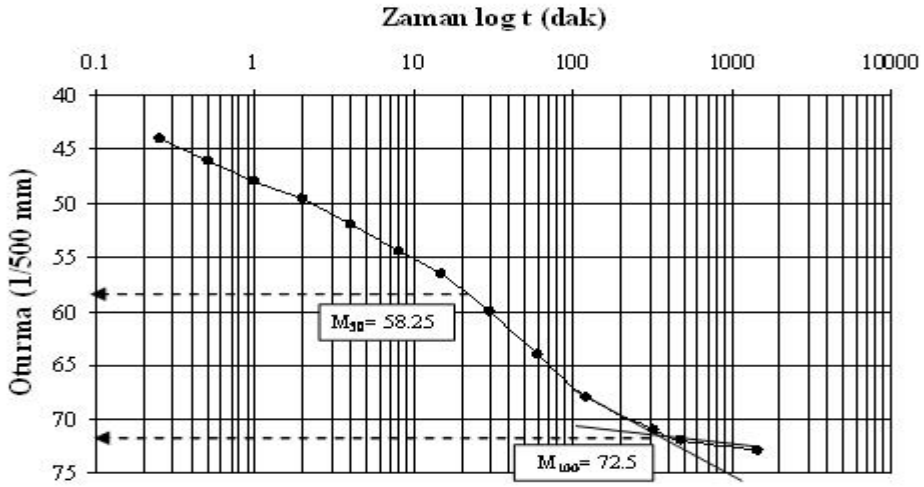


c) P= 800 kPa

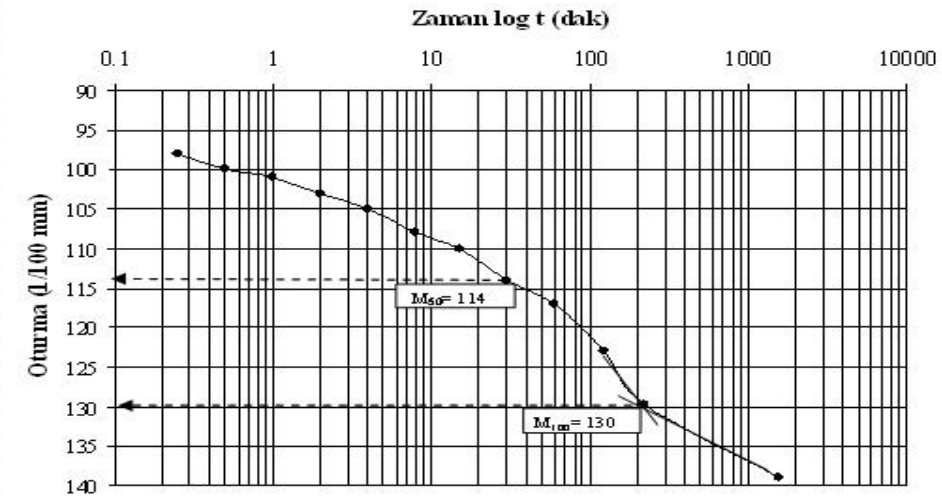
Şekil C.3 : Logaritma Zaman Yöntemi (Temiz Zemin, t: 0)



a) P= 200 kPa

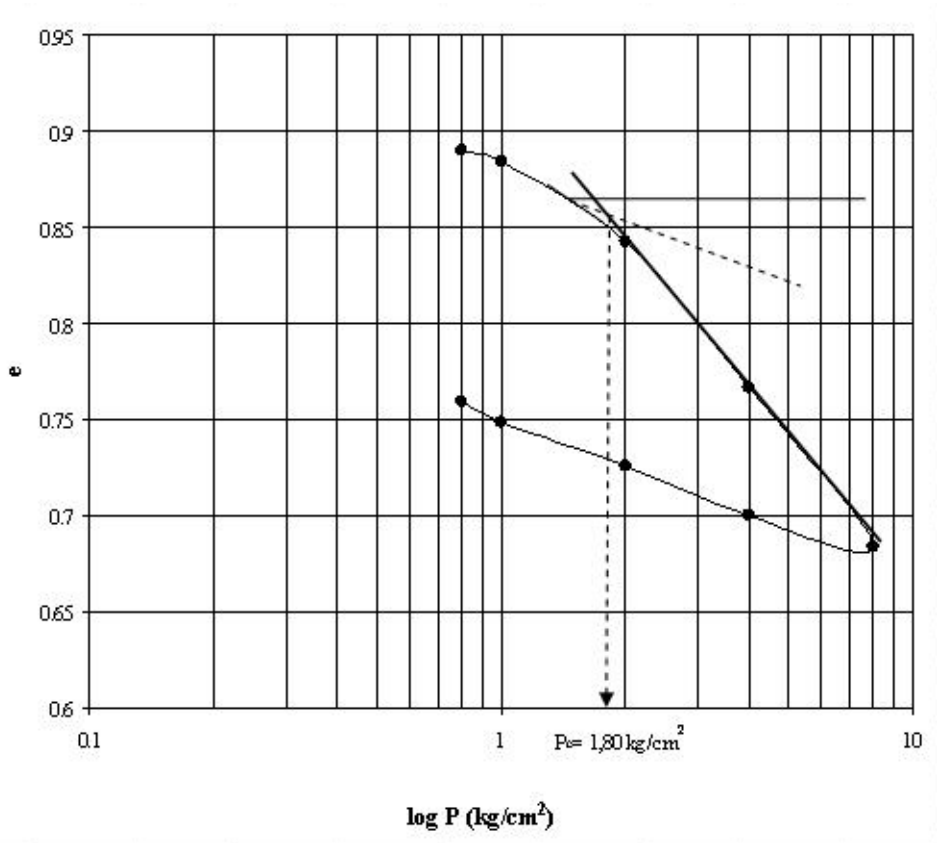


b) P= 400 kPa

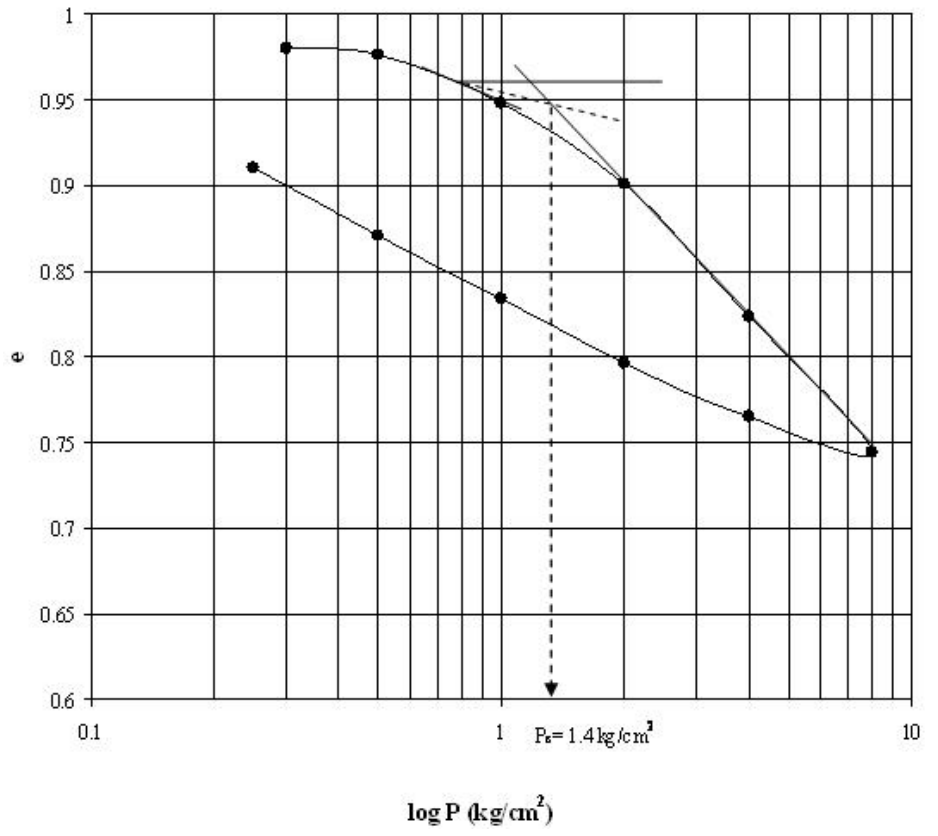


c) P= 800 kPa

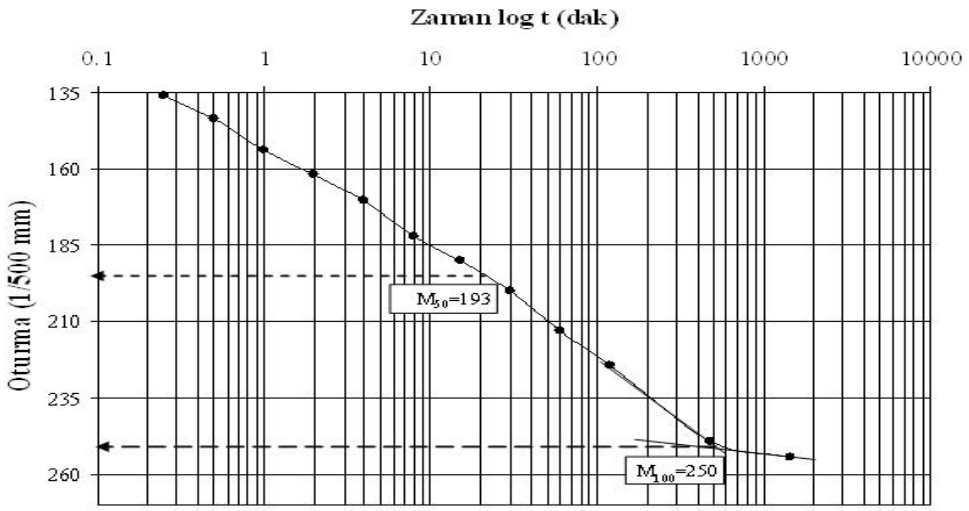
Şekil C.4 : Logaritma Zaman Yöntemi (Temiz Zemin, t: 30 gün)



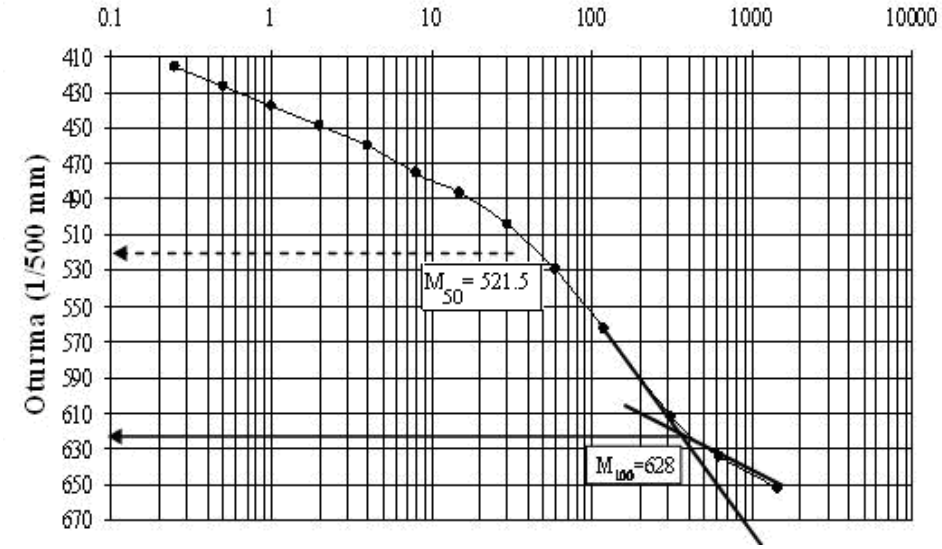
Şekil C.5 : e-log P (Çöp S: % 5, t: 0)



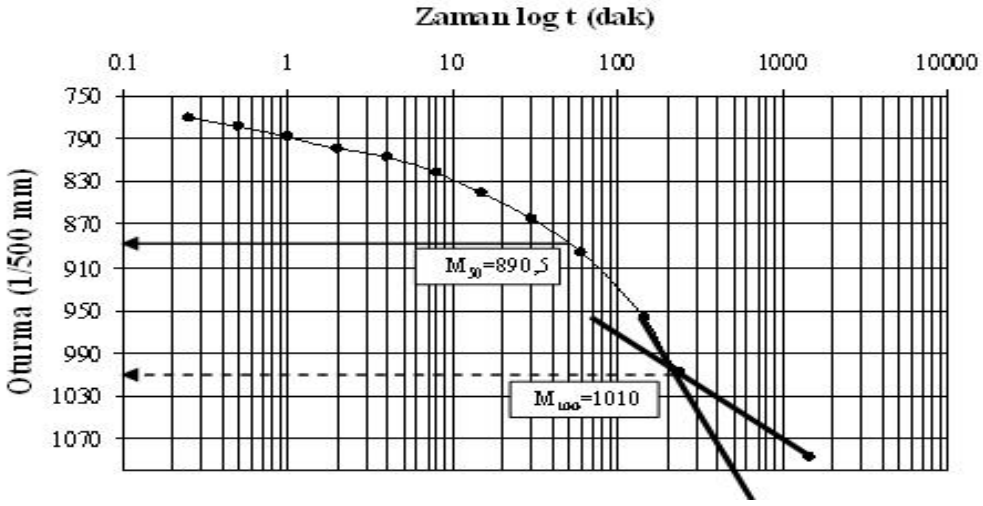
Şekil C.6 : e-log P (Çöp S: % 5, t: 30 gün)



a) P= 200 kPa

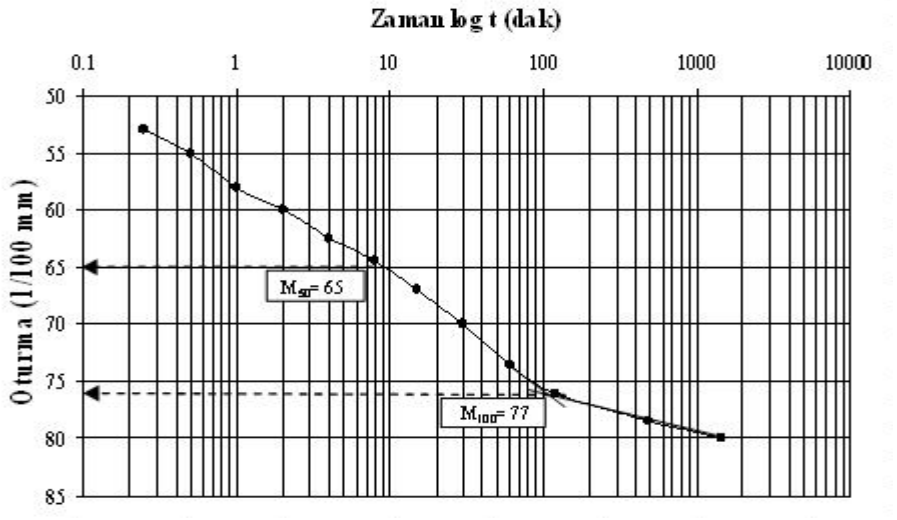


b) P= 400 kPa

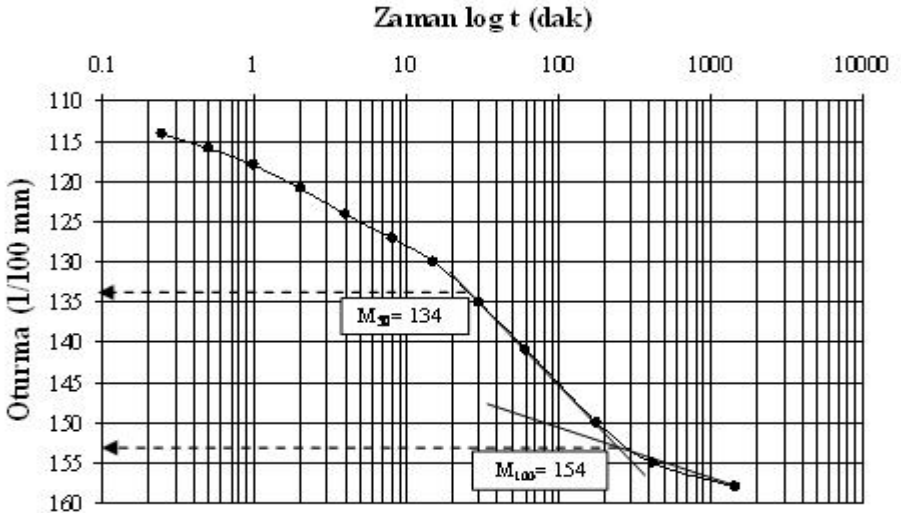


c) P= 800 kPa

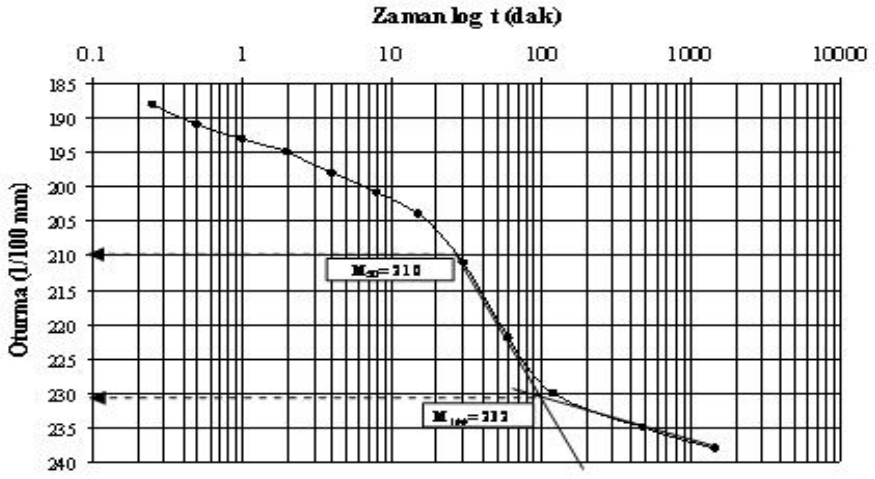
Şekil C.7 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 5, t: 0)



a) P= 200 kPa

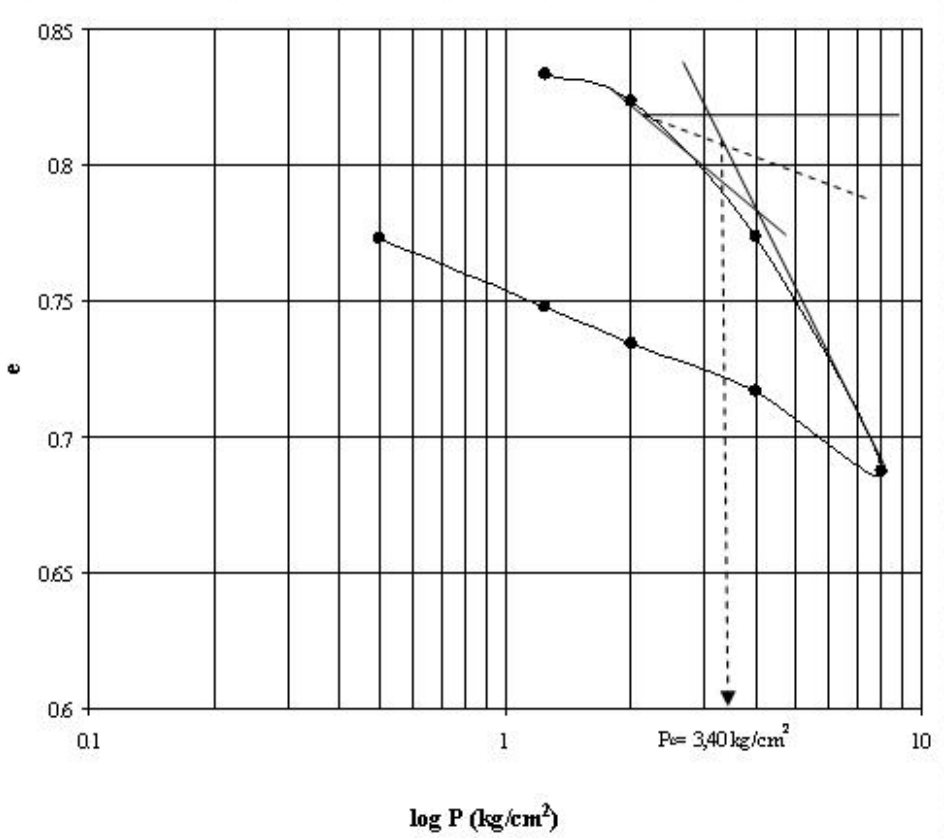


b) P= 400 kPa

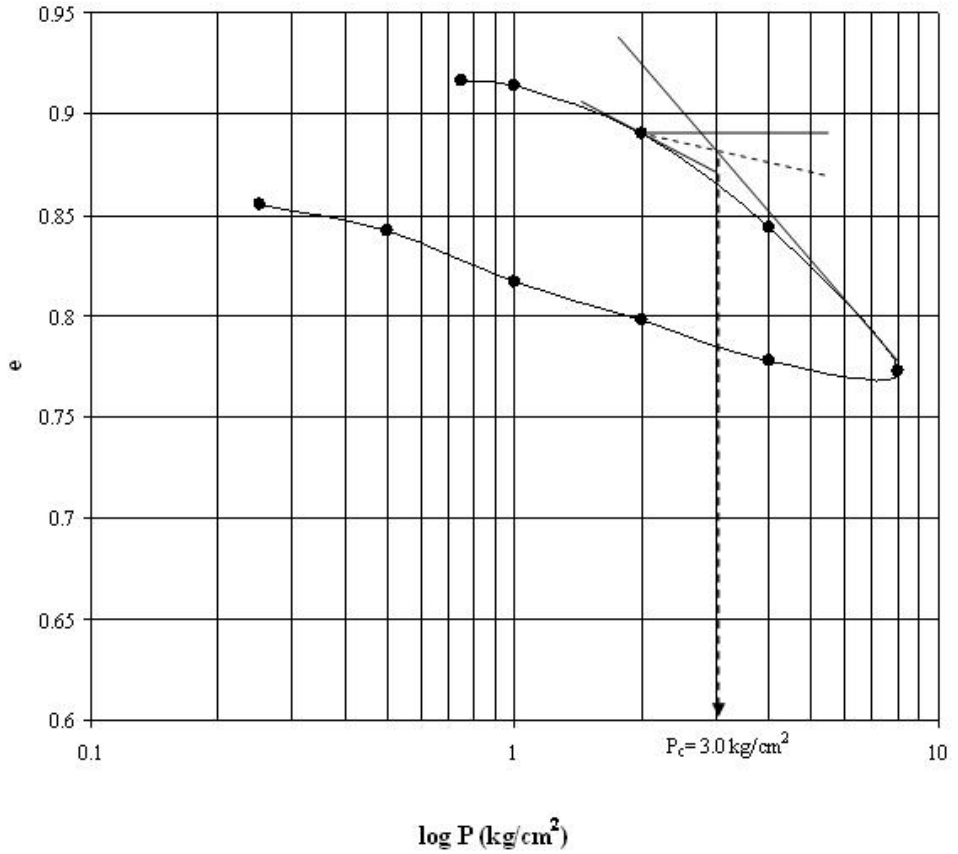


c) P= 800 kPa

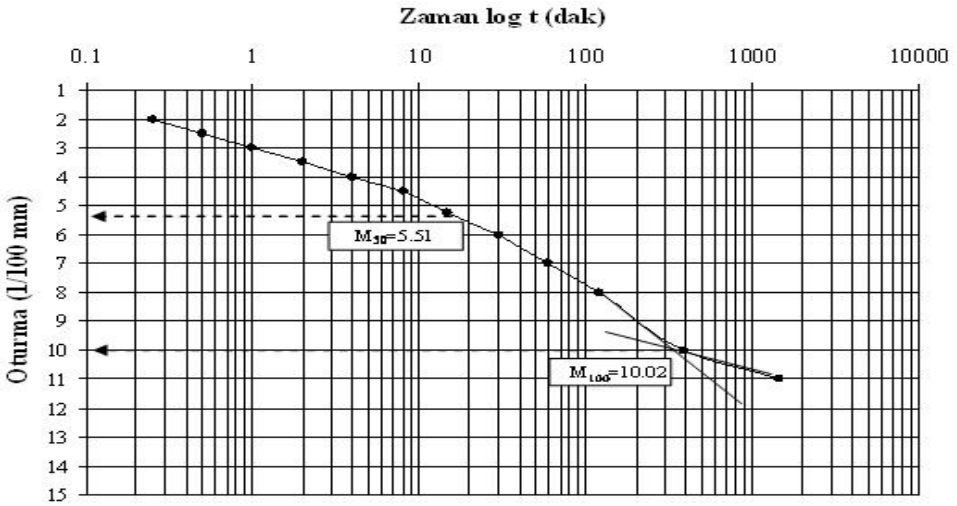
Şekil C.8 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 5, t: 30 gün)



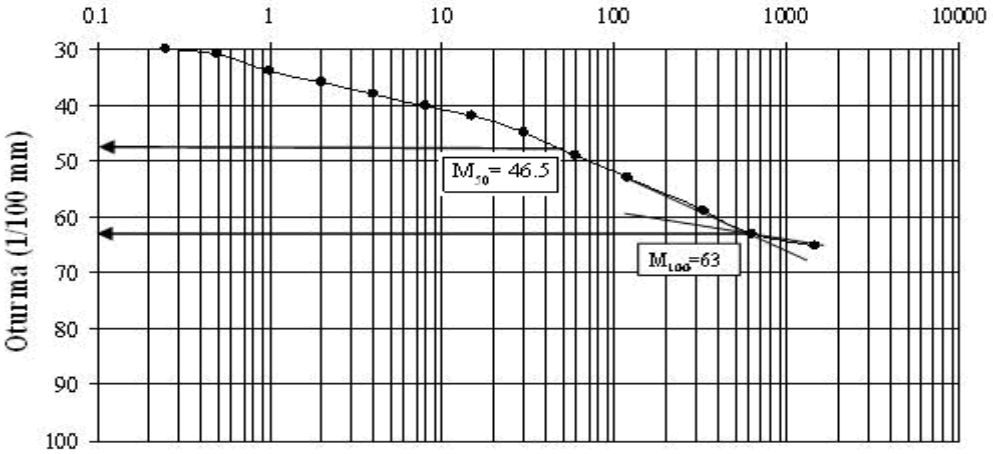
Şekil C.9 : e-log P (Çöp S: %20, t: 0)



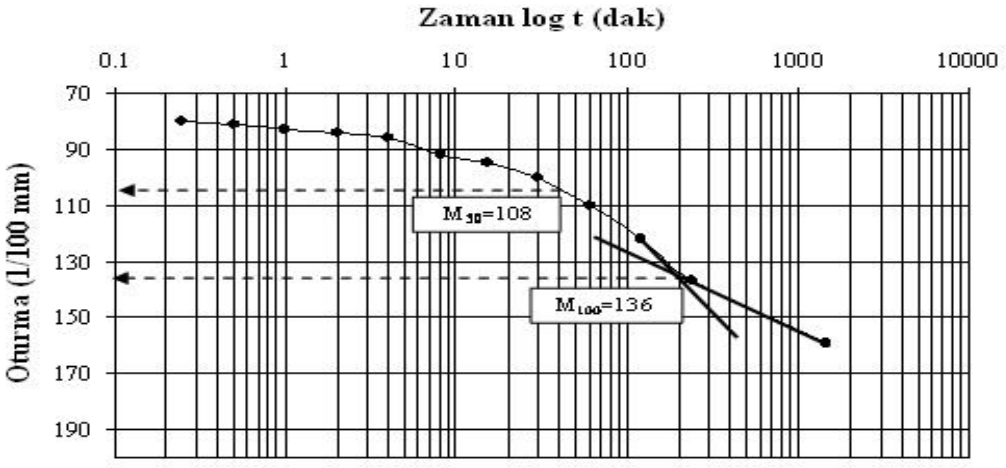
Şekil C.10 : e-log P (Çöp S: %20, t: 30 gün)



a) P= 200 kPa

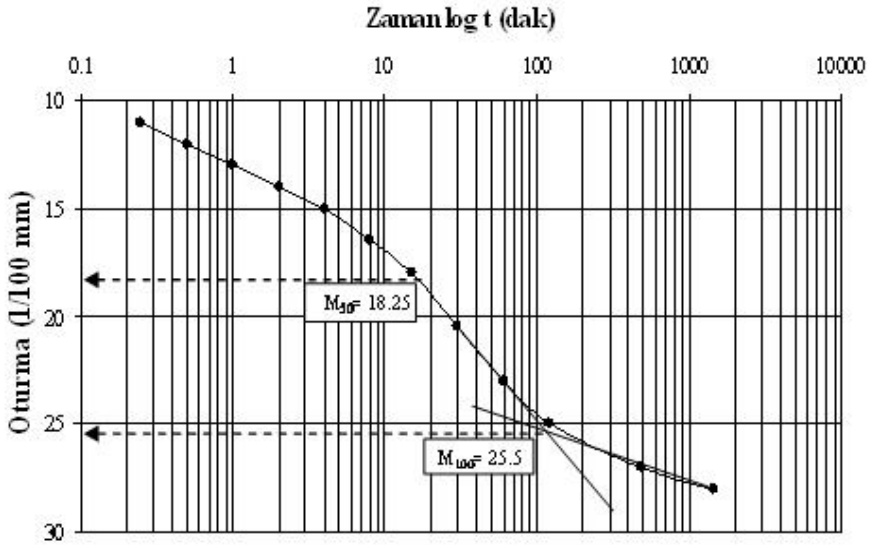


b) P= 400 kPa

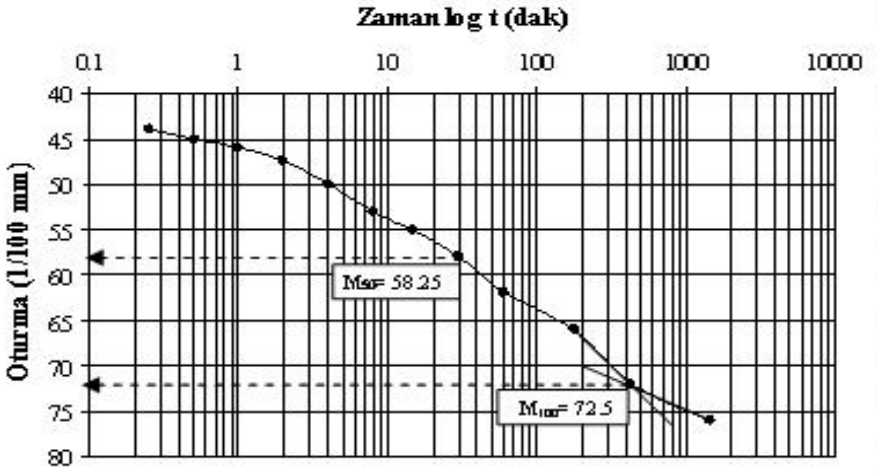


c) P= 800 kPa

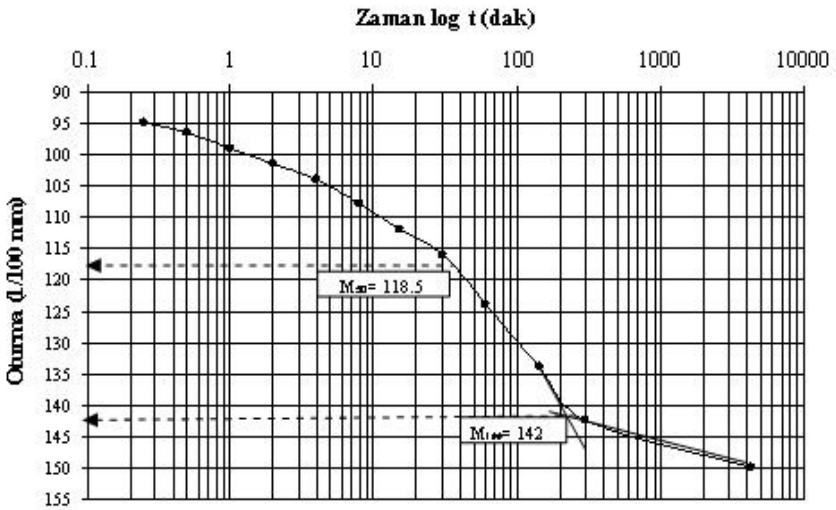
Şekil C.11 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 20, t: 0)



a) P= 200 kPa

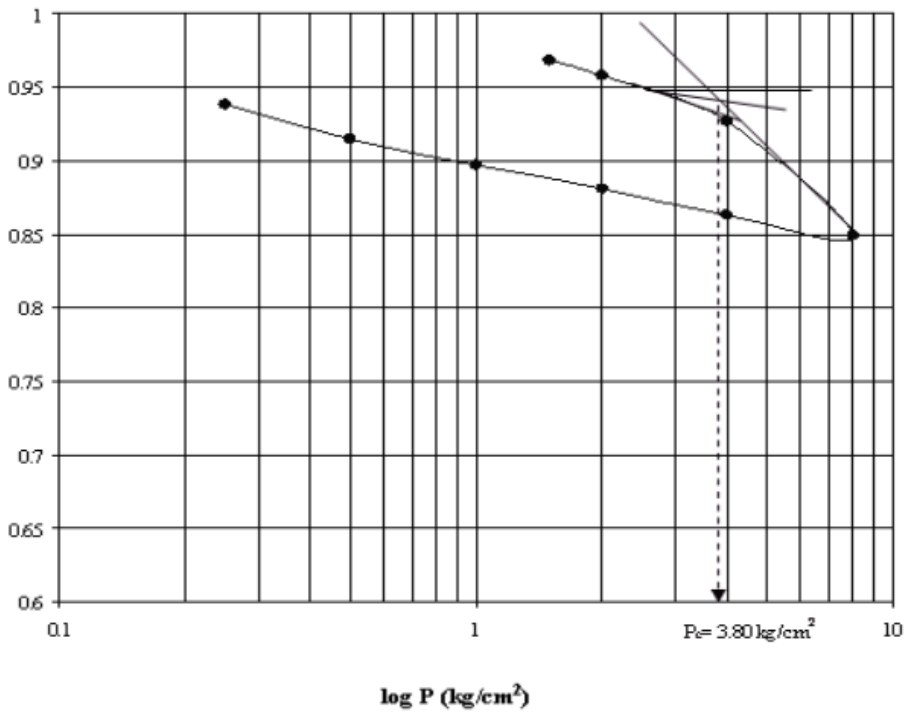


b) P= 400 kPa

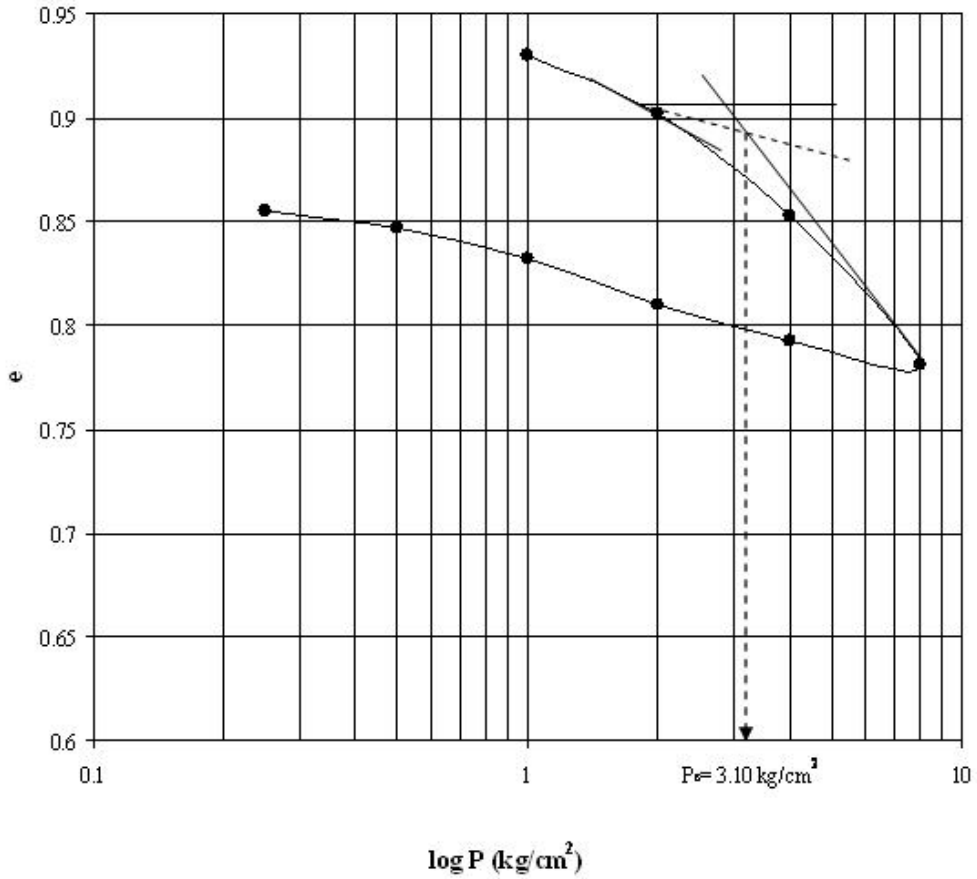


c) P= 800 kPa

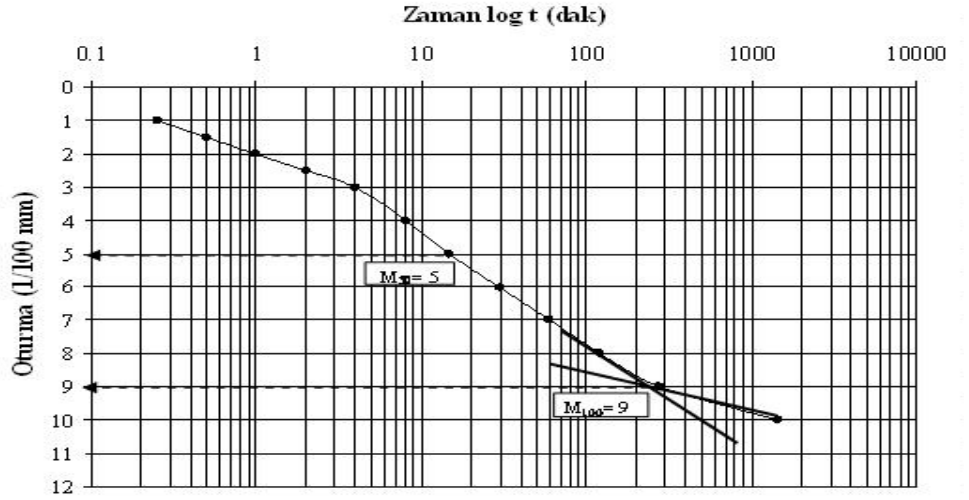
Şekil C.12 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 20, t: 30 gün)



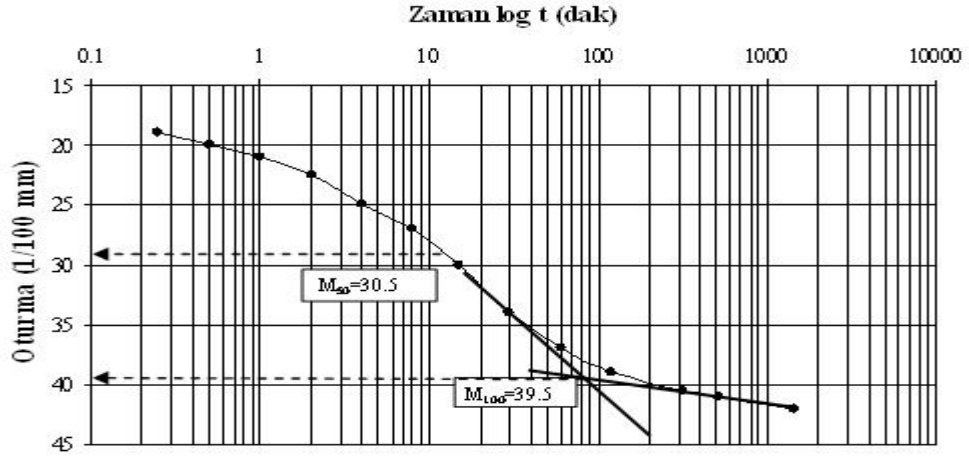
Şekil C.13 : e-log P (Çöp S: %50, t: 0)



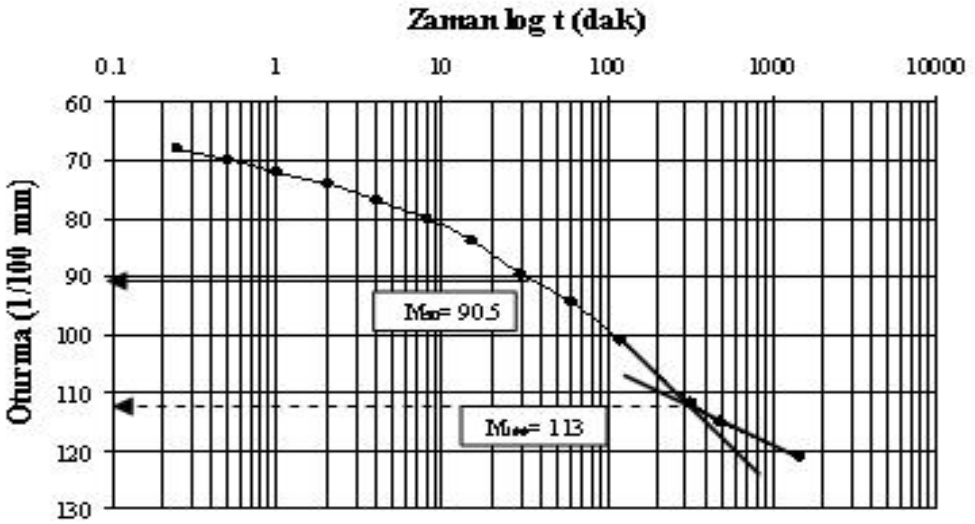
Şekil C.14 : e-log P (Çöp S: %50, t: 30 gün)



a) P= 200 kPa

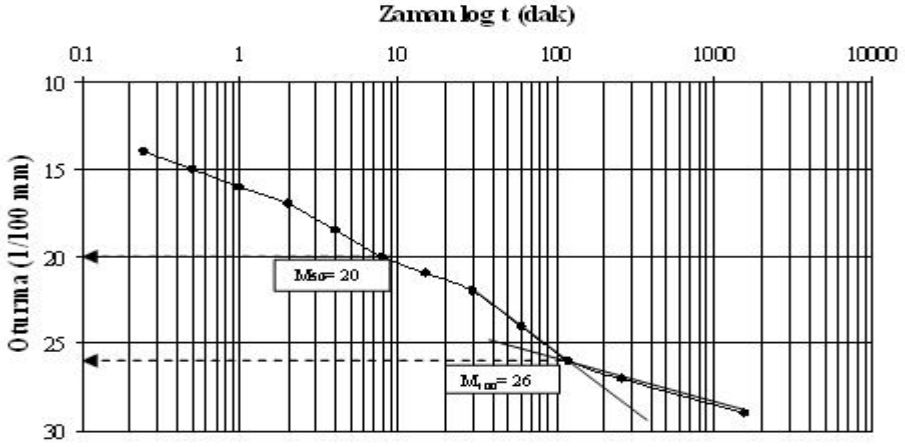


b) P= 400 kPa

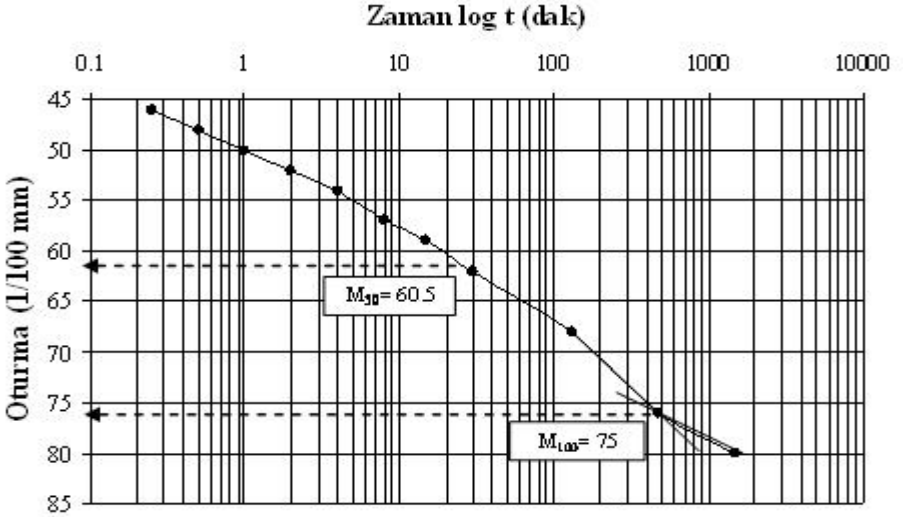


c) P= 800 kPa

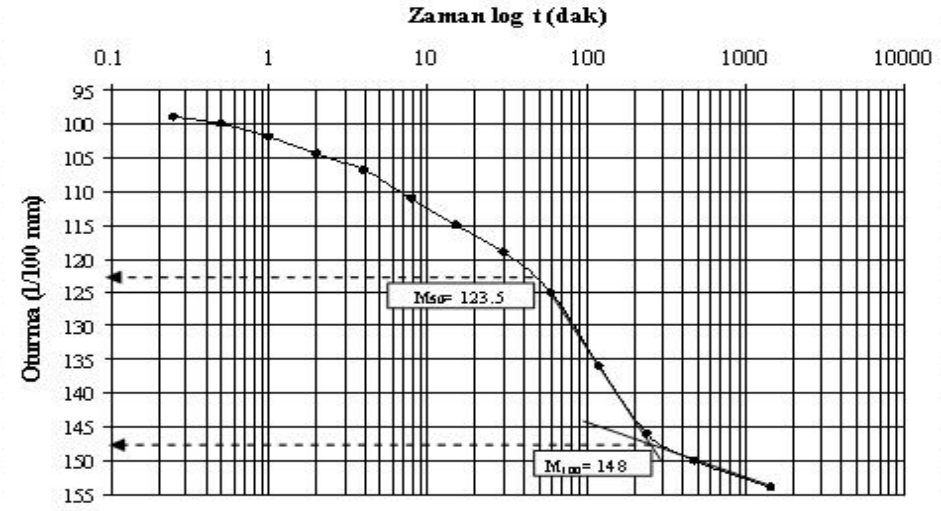
Şekil C.15 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 50, t: 0)



a) P= 200 kPa

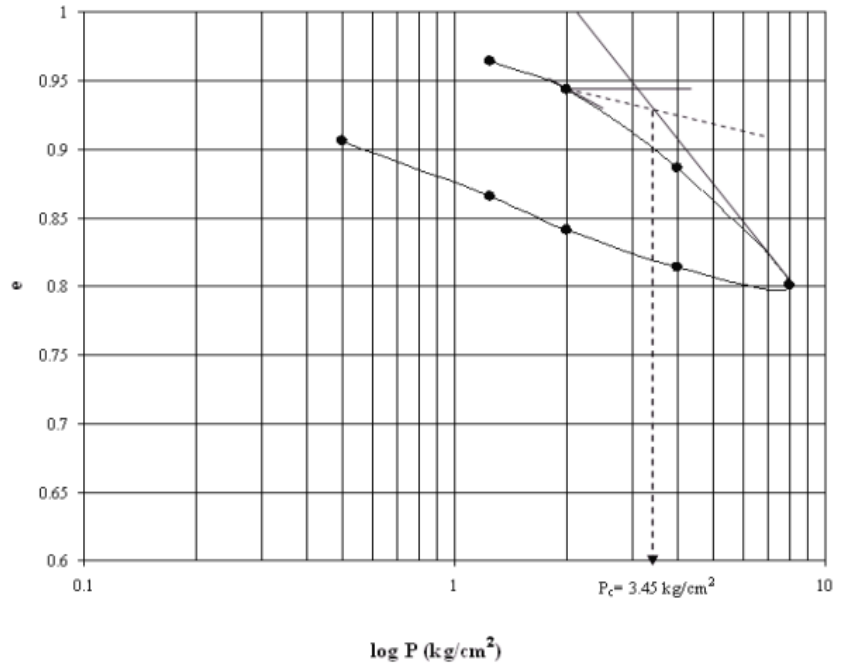


b) P= 400 kPa

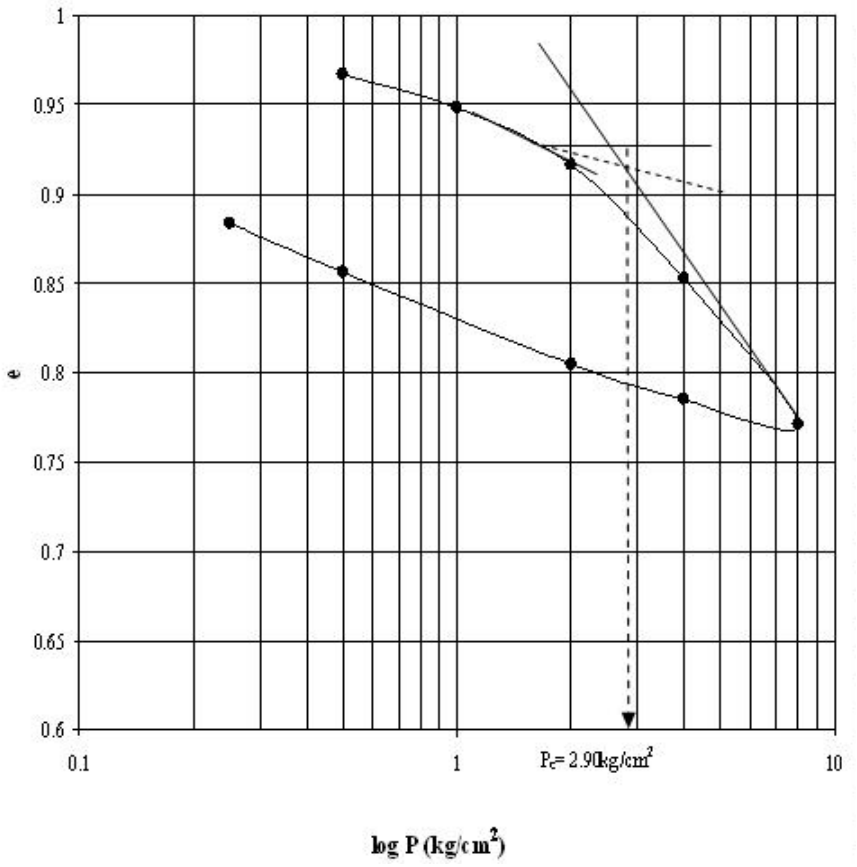


c) P= 800 kPa

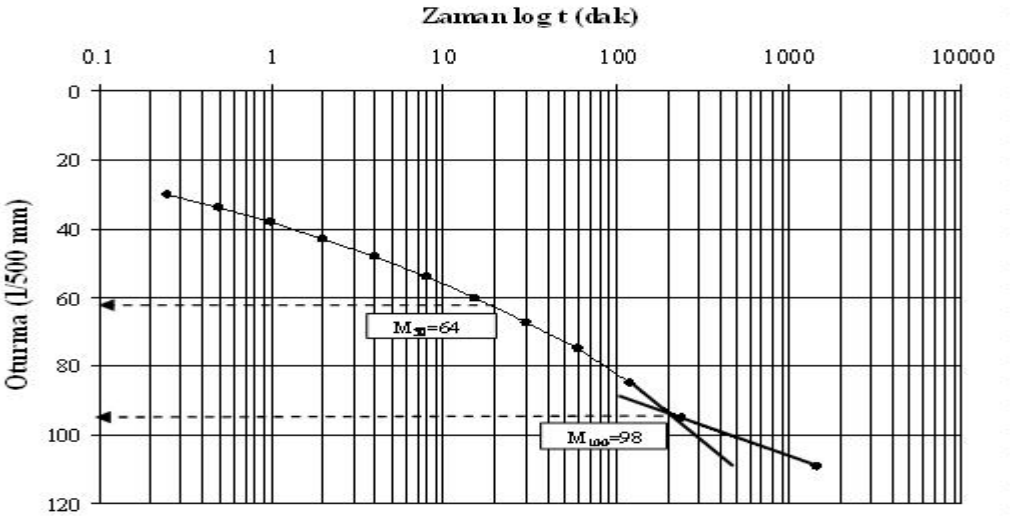
Şekil C.16 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 50, t: 30 gün)



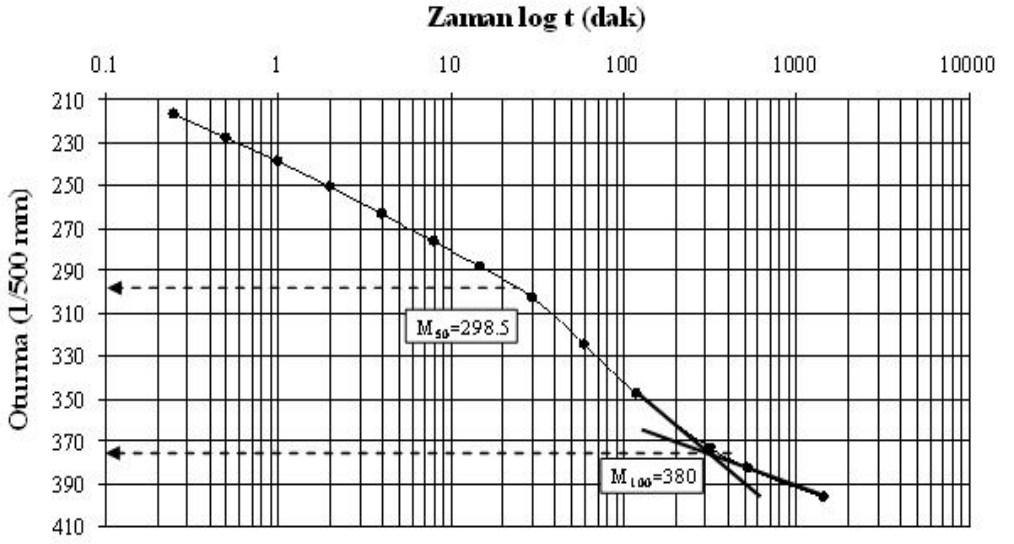
Şekil C.17 : e-log P (Çöp S: %100, t: 0)



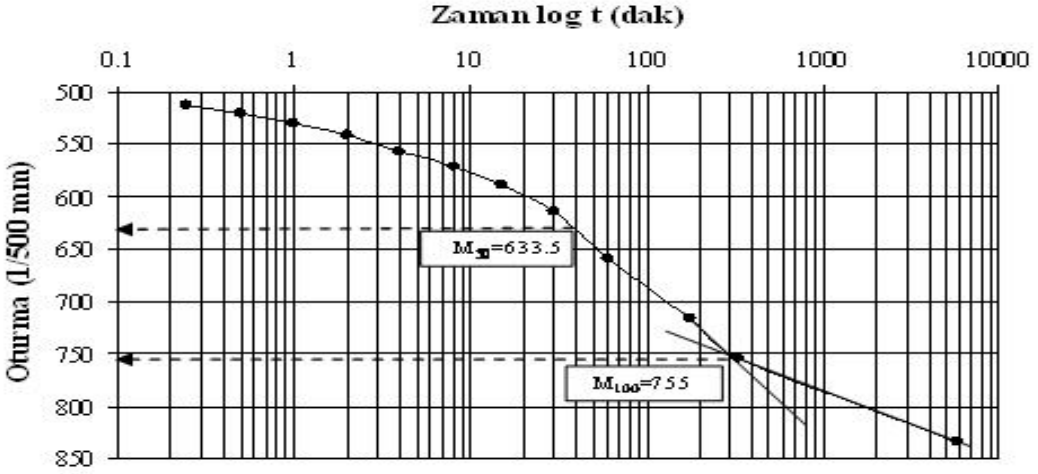
Şekil C.18 : e-log P (Çöp S: %100, t: 30 gün)



a) P= 200 kPa

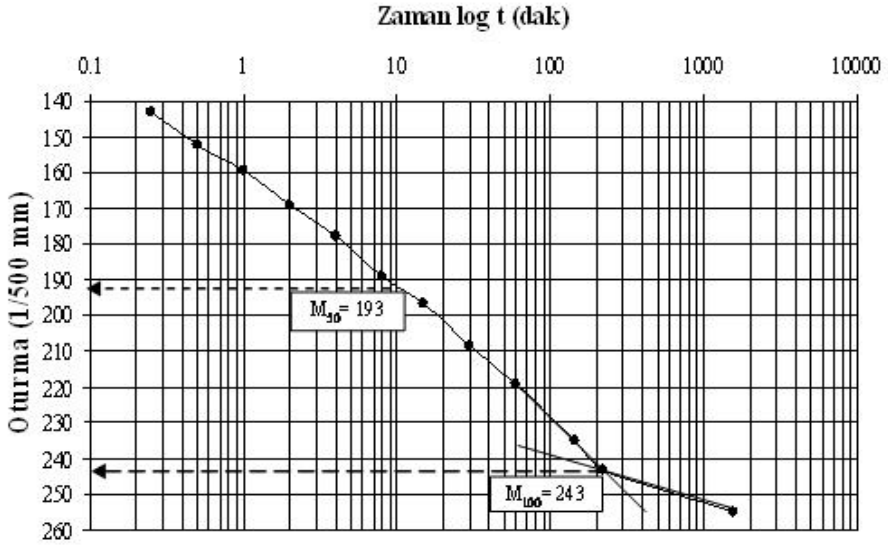


b) P= 400 kPa

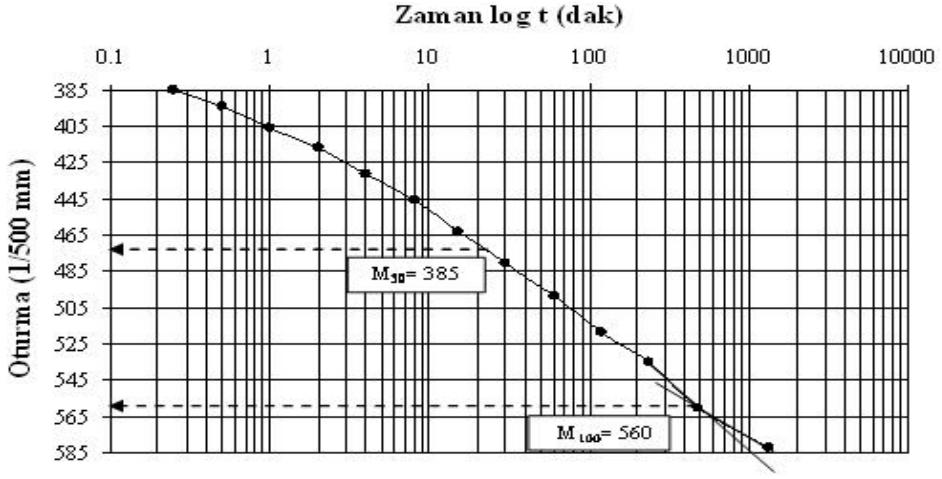


c) P= 800 kPa

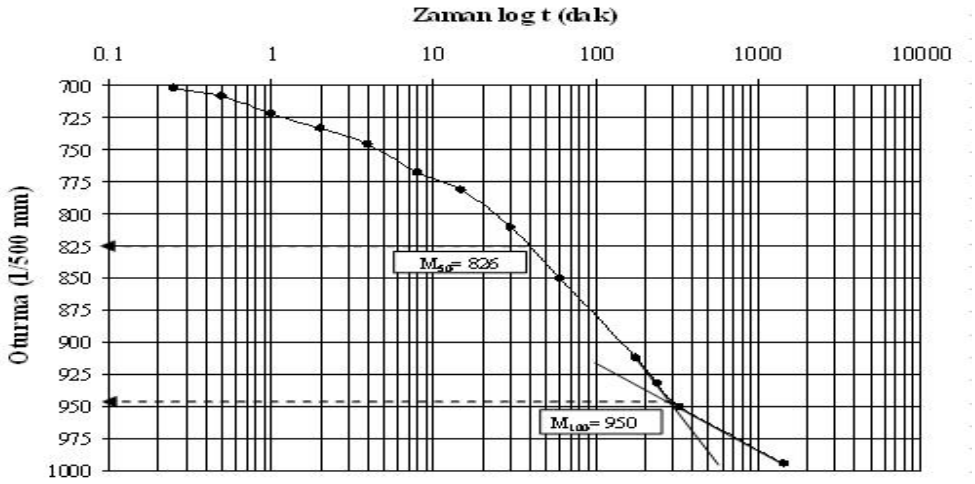
Şekil C.19 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 100, t: 0)



a) P= 200 kPa



b) P= 400 kPa

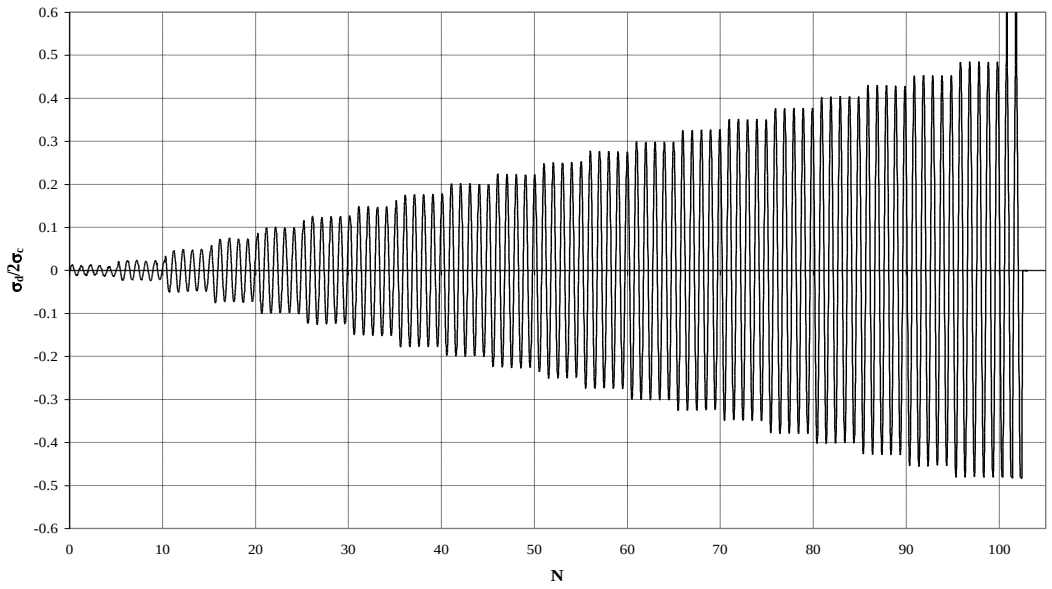


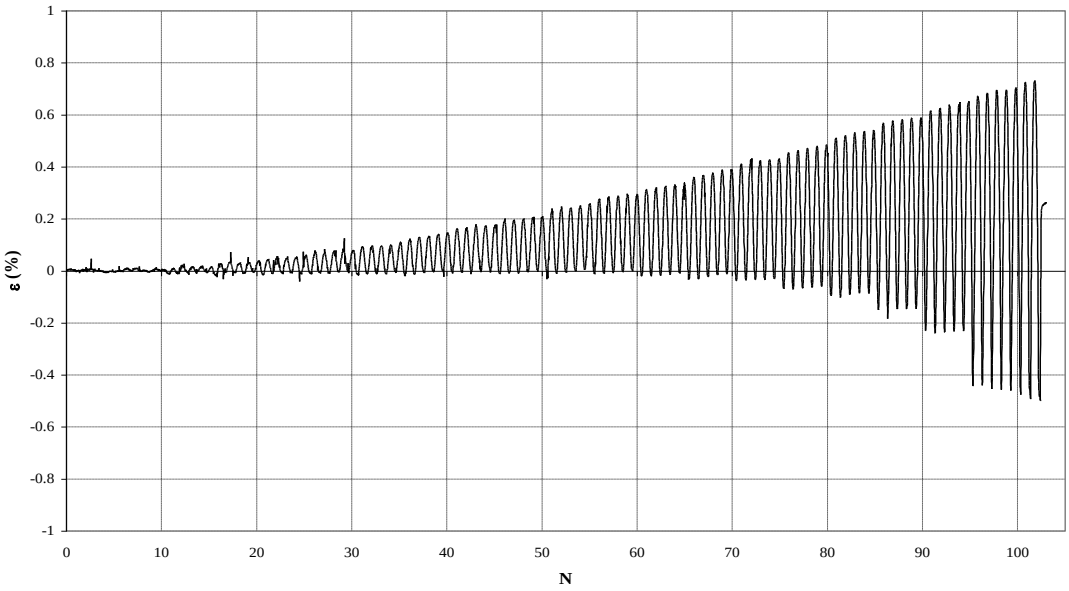
c) P= 800 kPa

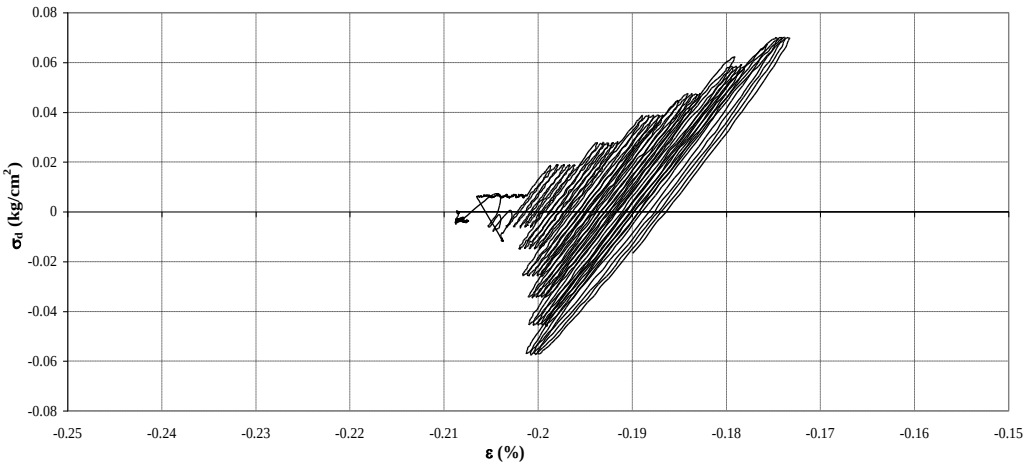
Şekil C.20 : Logaritma Zaman Yöntemi (Çöp S: % 100, t: 30 gün)

Tablo D.1 : Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi w-γ_k Değerleri

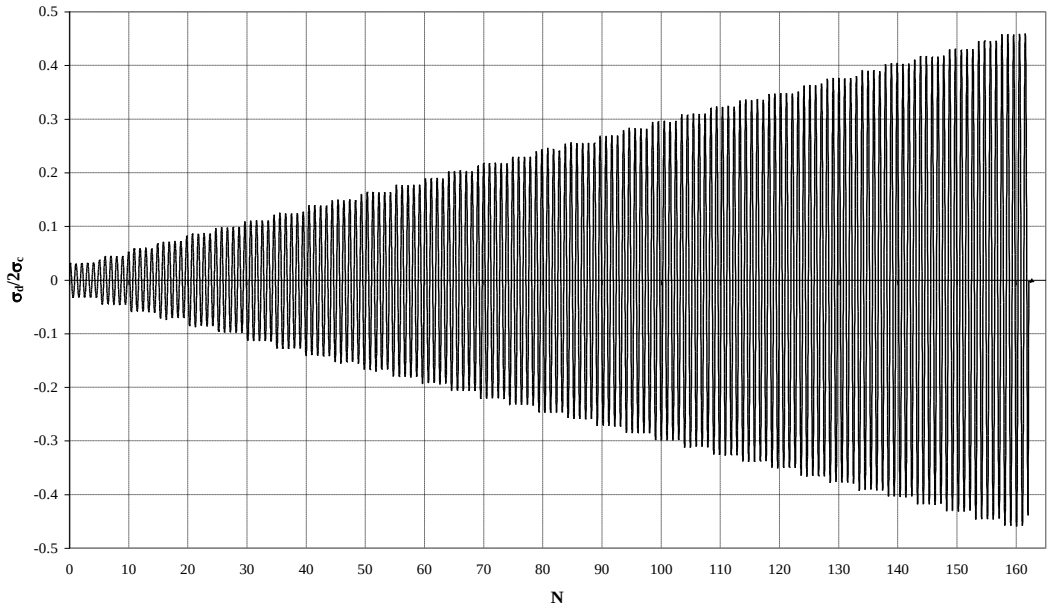
Çöp sızıntı suyu Muhtevası (%)	**Kür Süresi (gün)**	**w_{ilk} (%)**	**w_{son} (%)**	**γ_{kilk} (kN/m^3)**	**γ_{kson} (kN/m^3)**
0	7	24.98	24.96	14.17	14.20
	90	24.89	24.84	14.20	14.20
5	0	25.01	24.97	14.77	14.82
	7	24.97	24.94	14.73	14.74
	90	24.86	24.82	14.69	14.70
20	0	24.96	24.94	14.40	14.50
	7	24.96	24.91	14.38	14.39
	30	24.90	24.86	14.49	14.47
	90	24.84	24.80	14.37	14.37
50	0	24.97	24.89	14.79	14.88
	7	24.93	24.86	14.41	14.44
	90	24.84	24.65	14.15	14.19
100	0	24.94	24.88	14.62	14.70
	7	24.92	24.85	14.59	14.62
	90	24.83	24.79	14.60	14.68

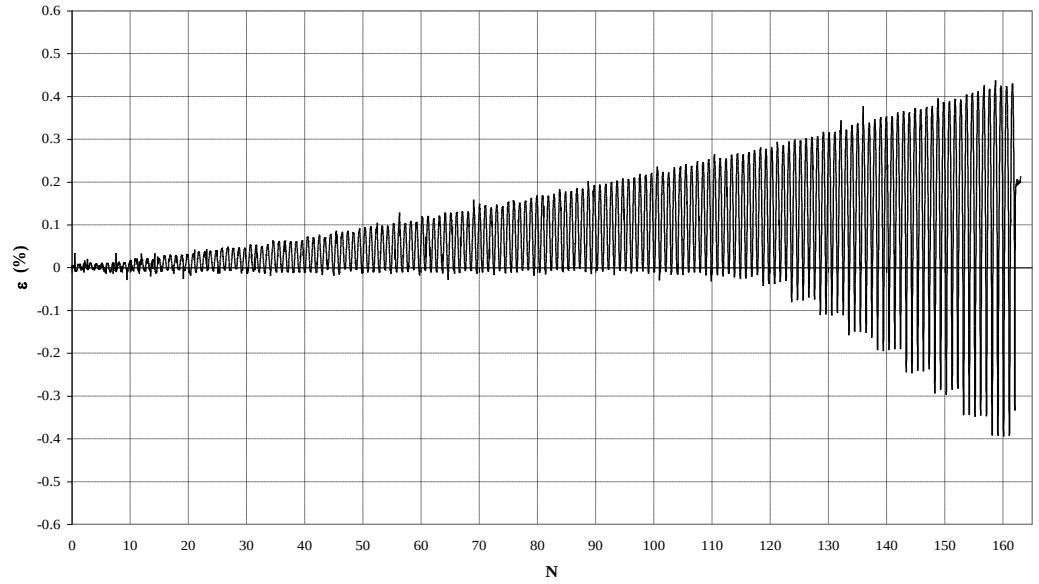


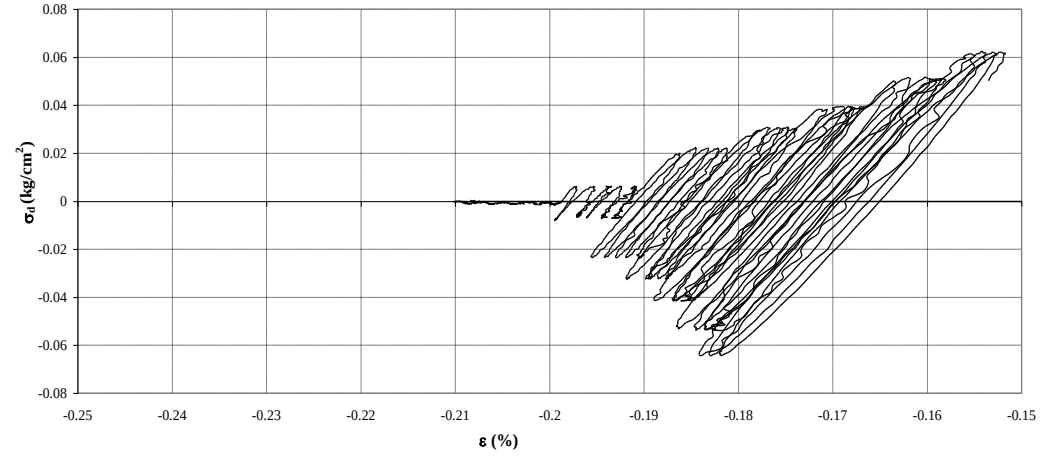




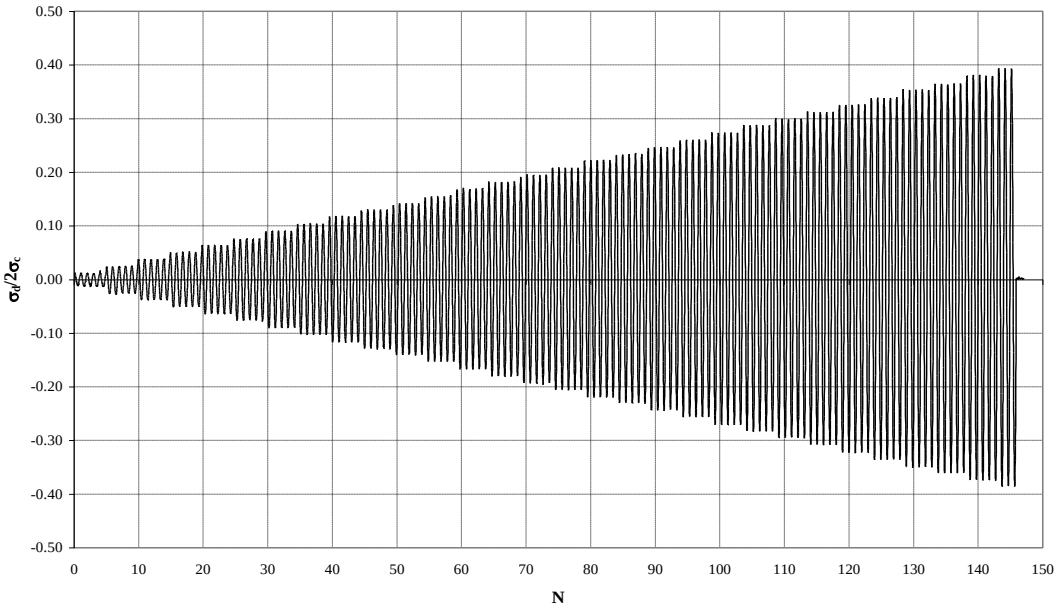
Şekil D.1 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Temiz Zemin, t: 7 gün)

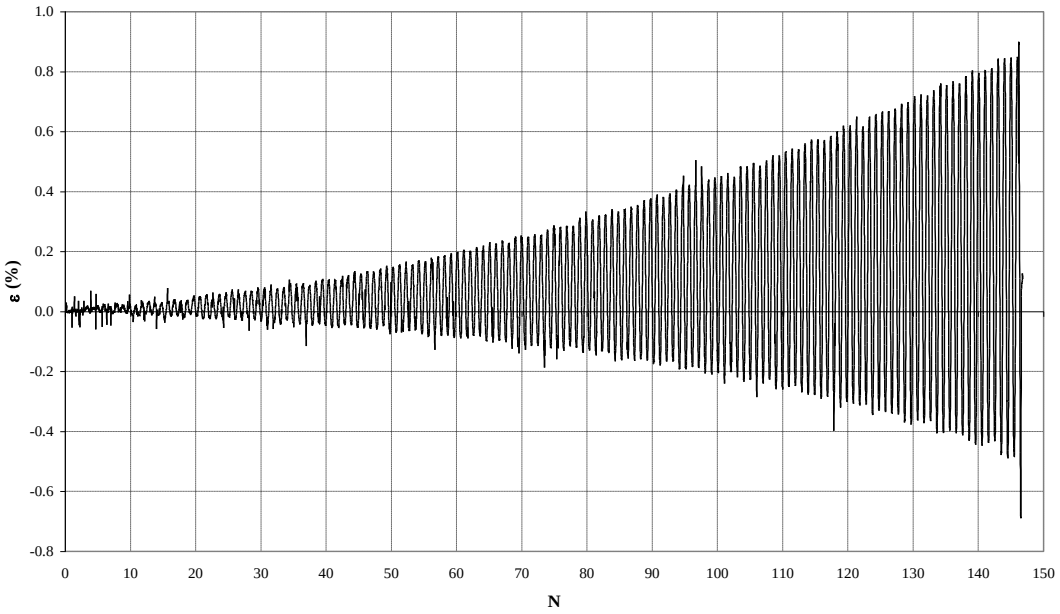


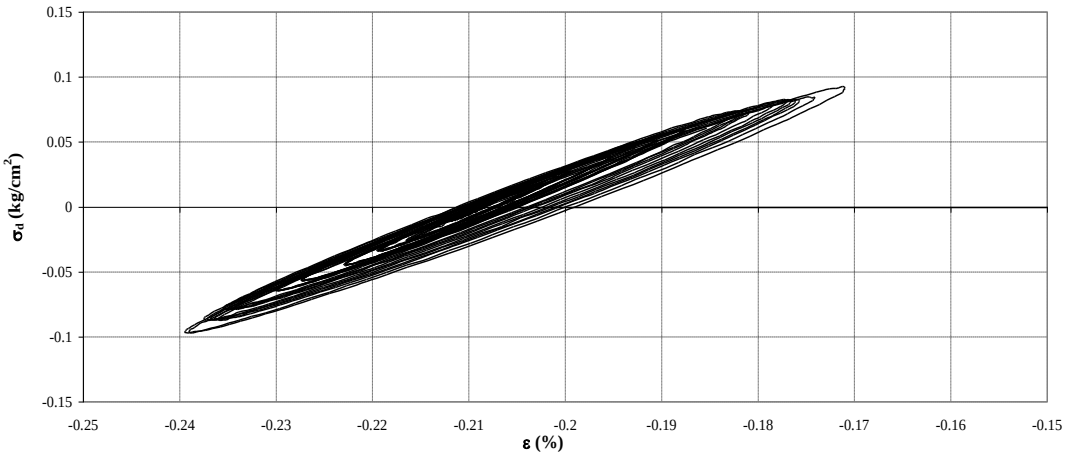




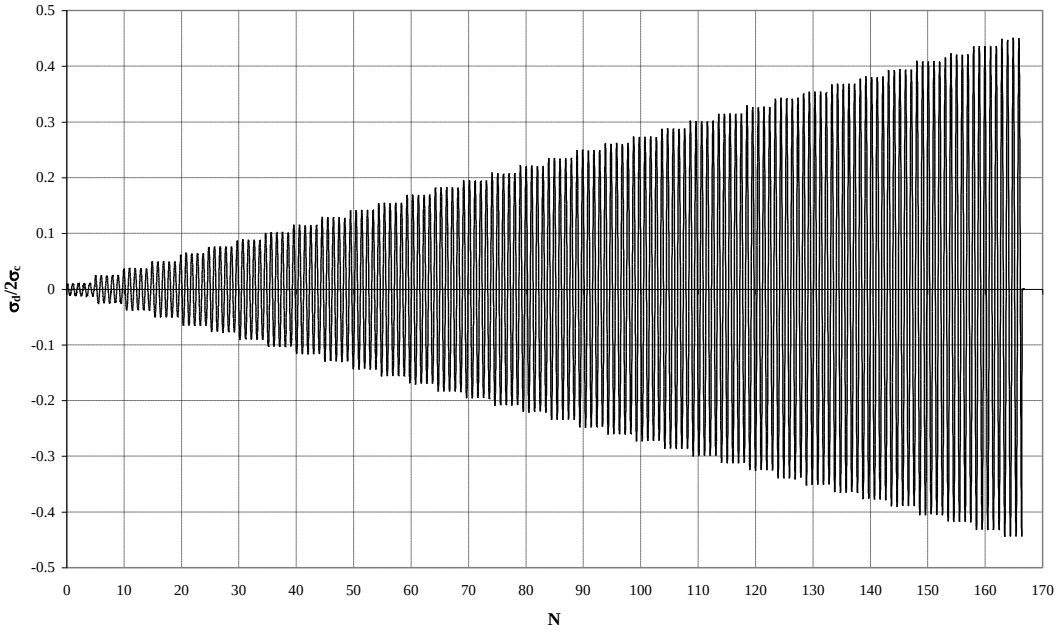
Şekil D.2 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Temiz Zemin, t: 90 gün)

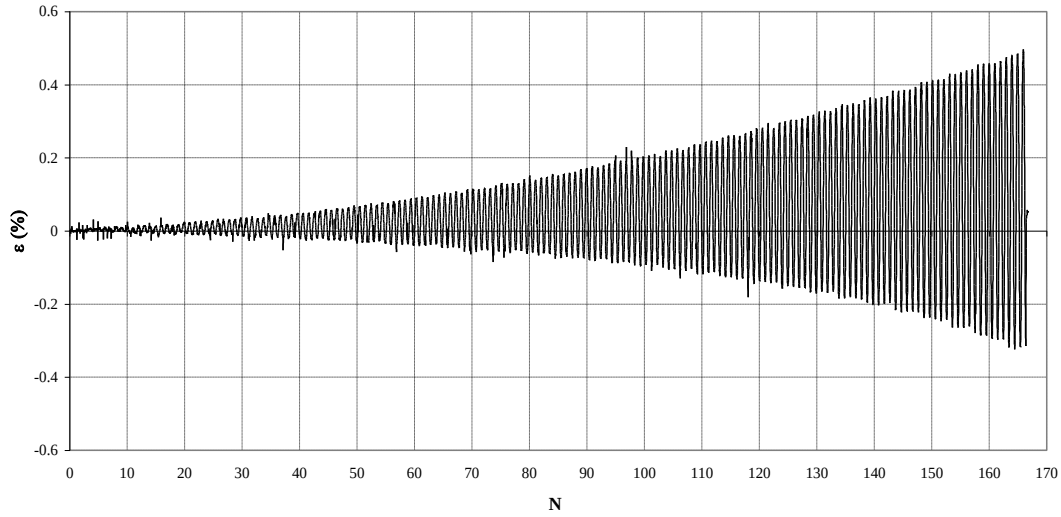


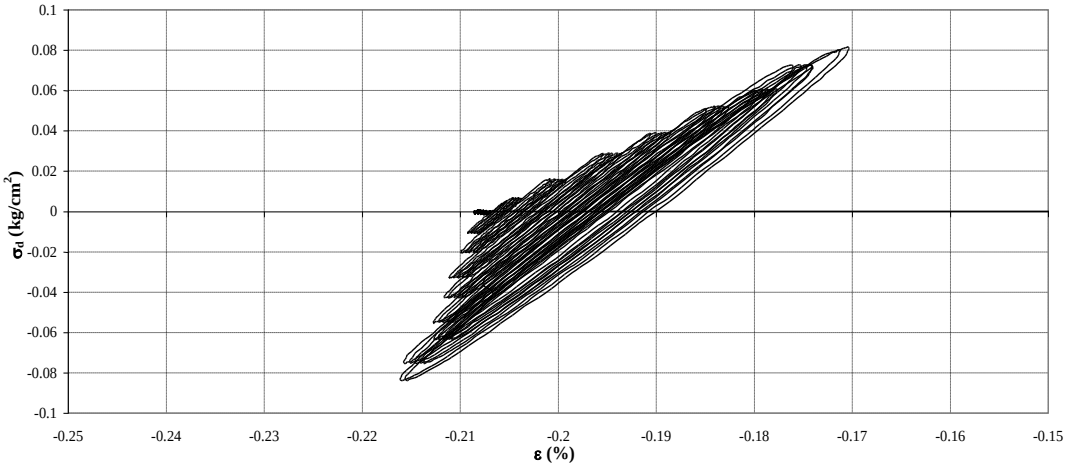




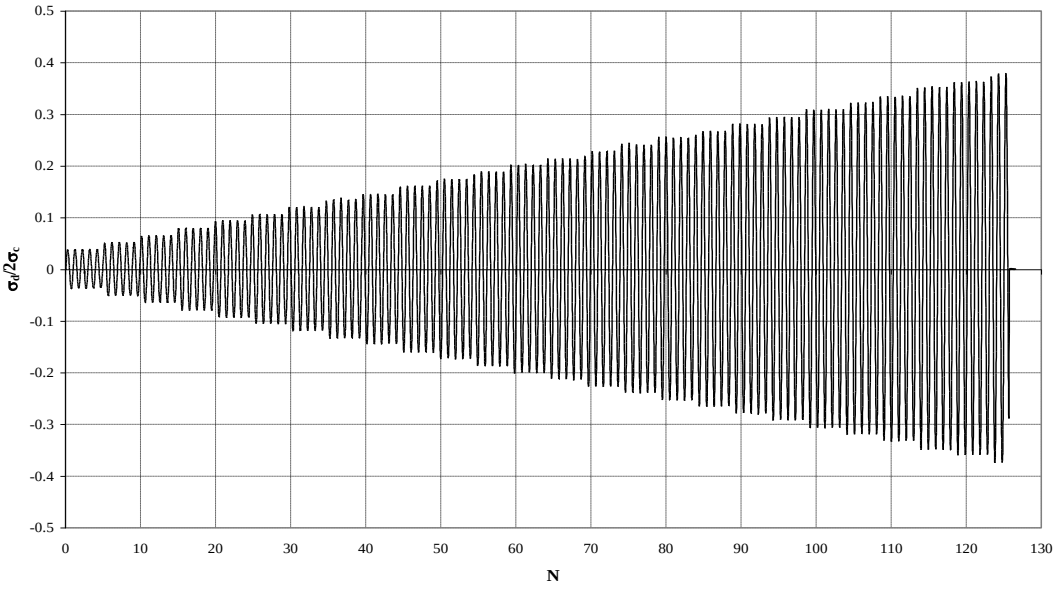
Şekil D.3 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S : % 5, t: 0 gün)

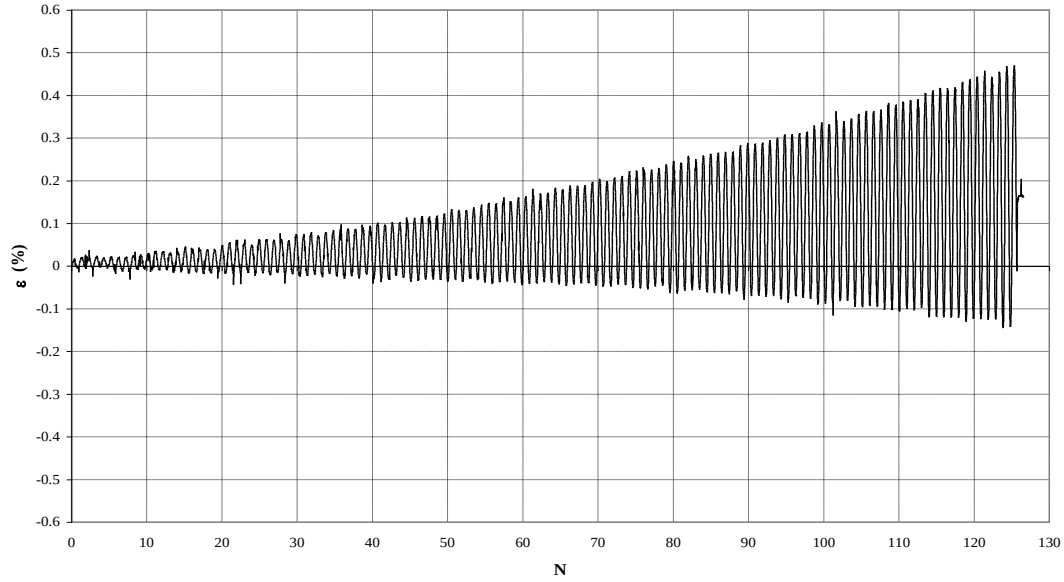


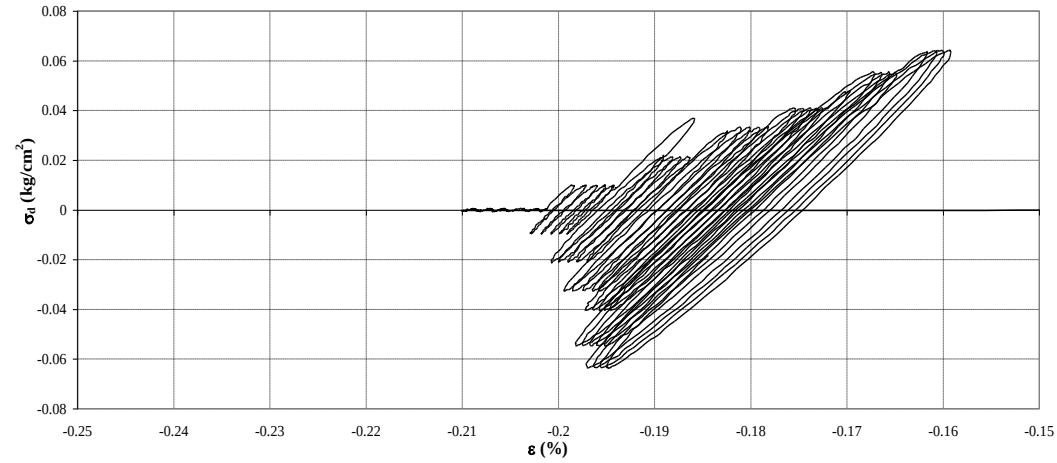




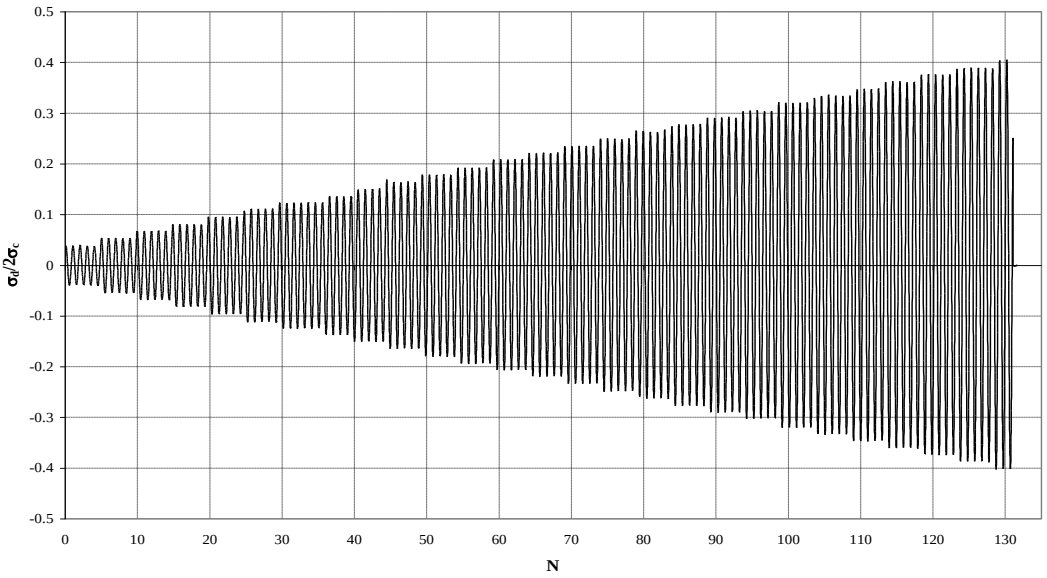
Şekil D.4 : Dinamik Üç Eksenli Deneyi Sonucu
(Çöp S : % 5, t: 7 gün)

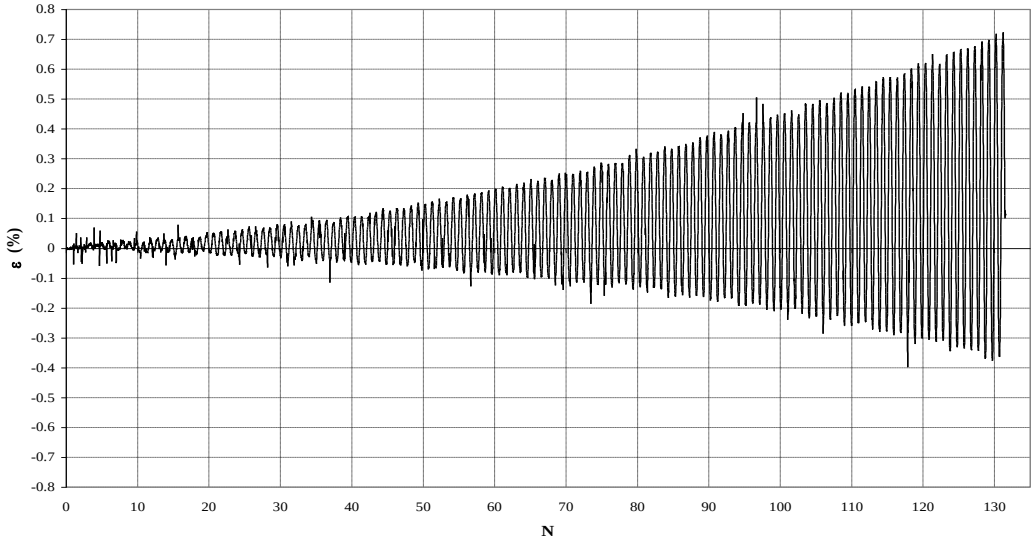


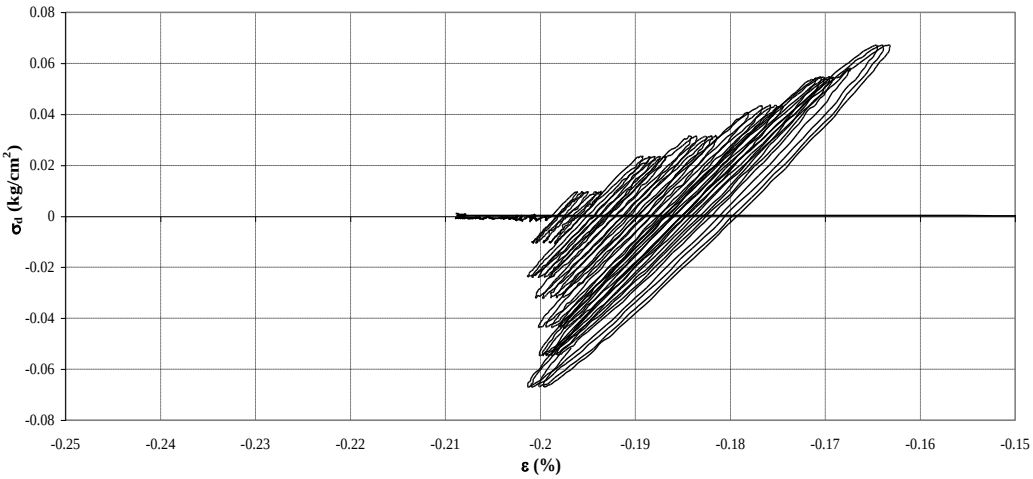




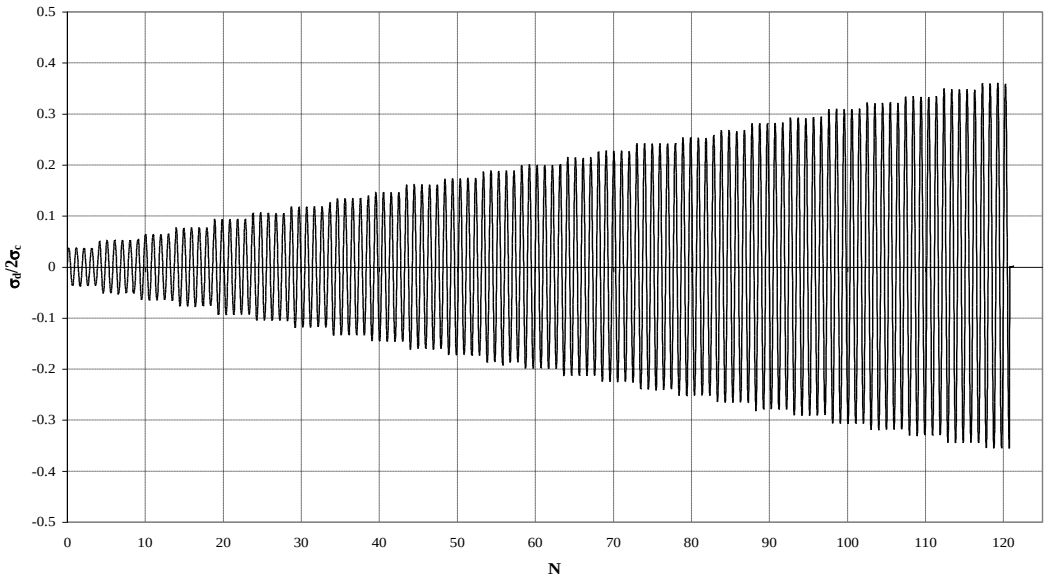
Şekil D.5 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 5, t: 90 gün)

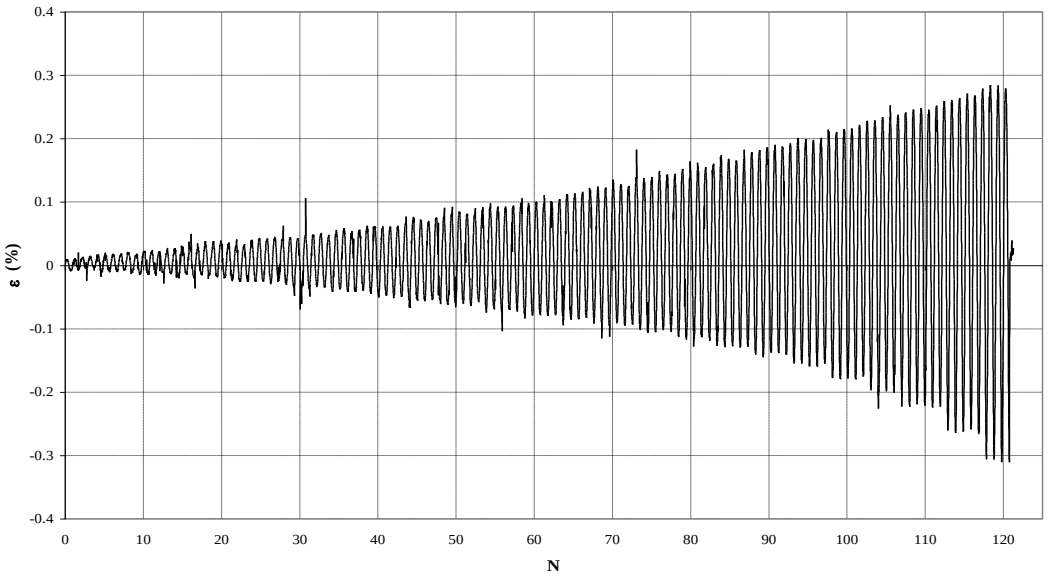


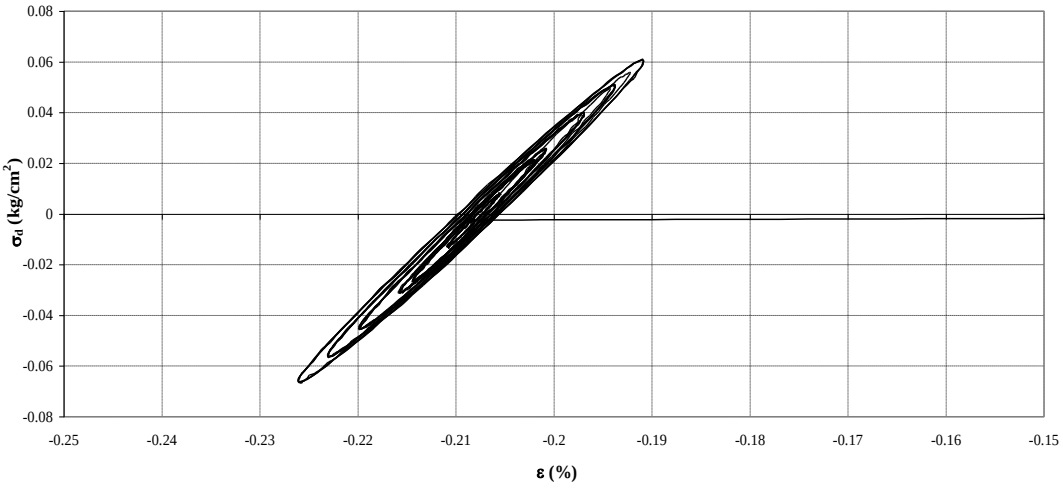




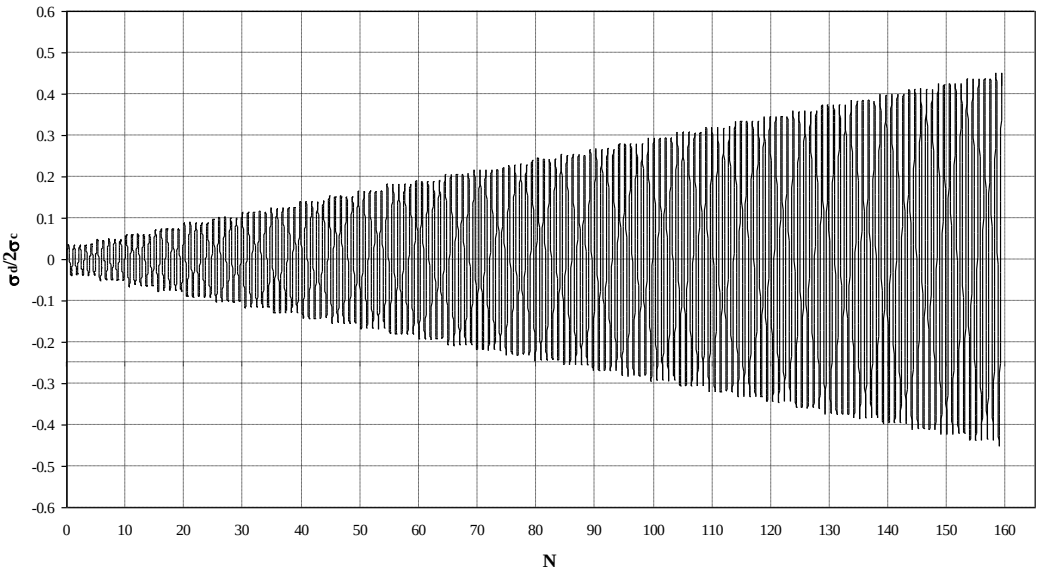
Şekil D.6 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 20, t: 0 gün)

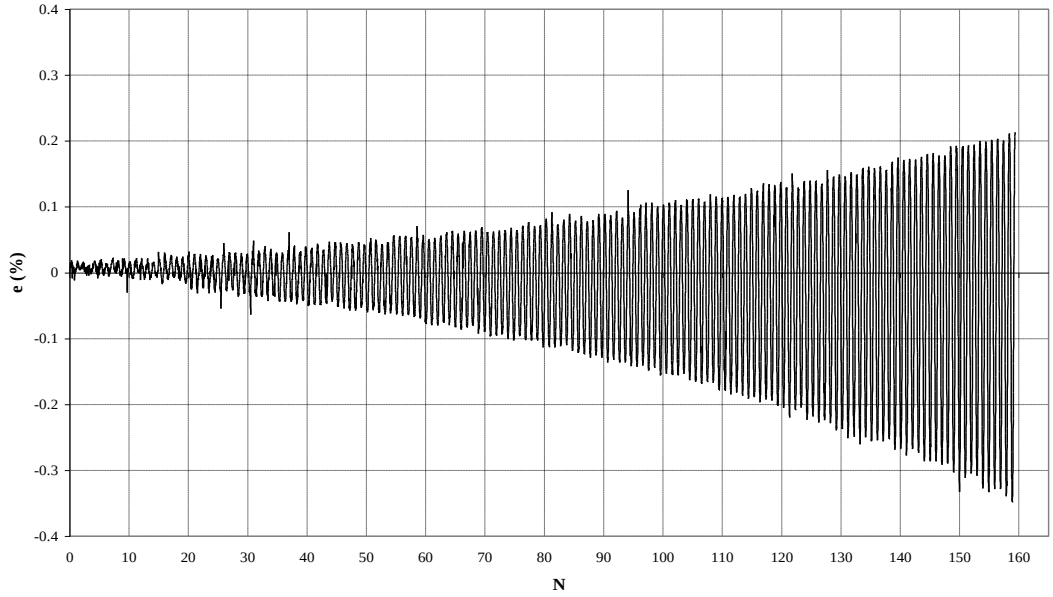


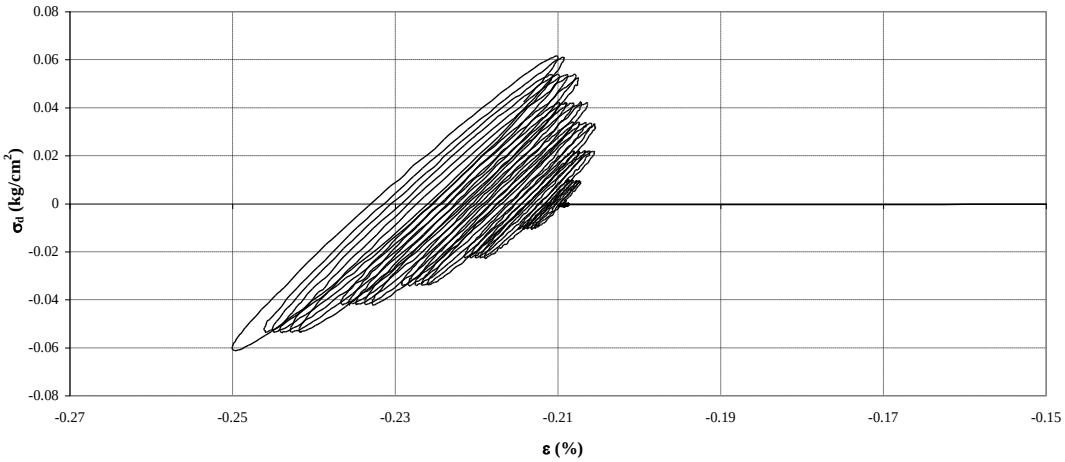




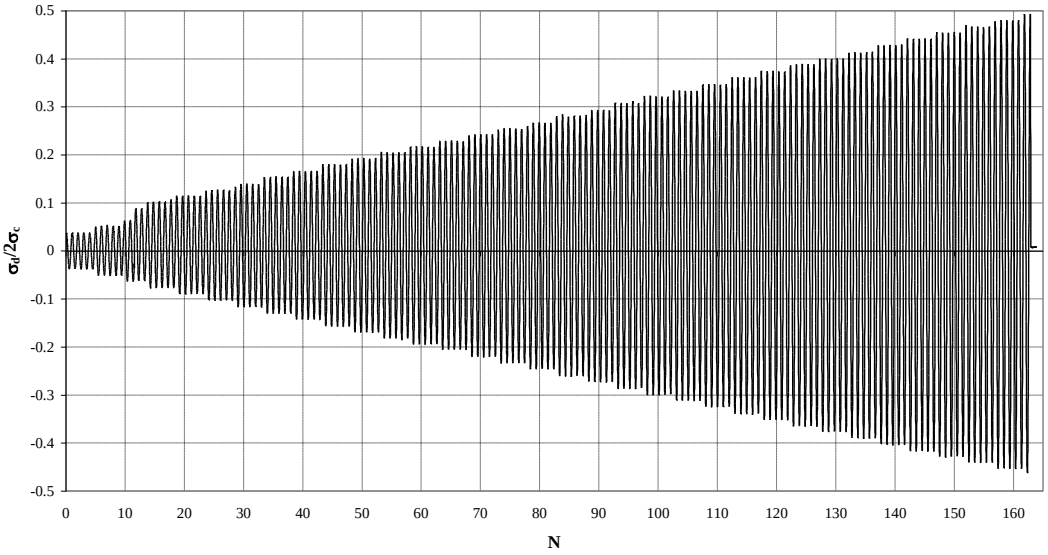
Şekil D.7 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 20, t: 7 gün)

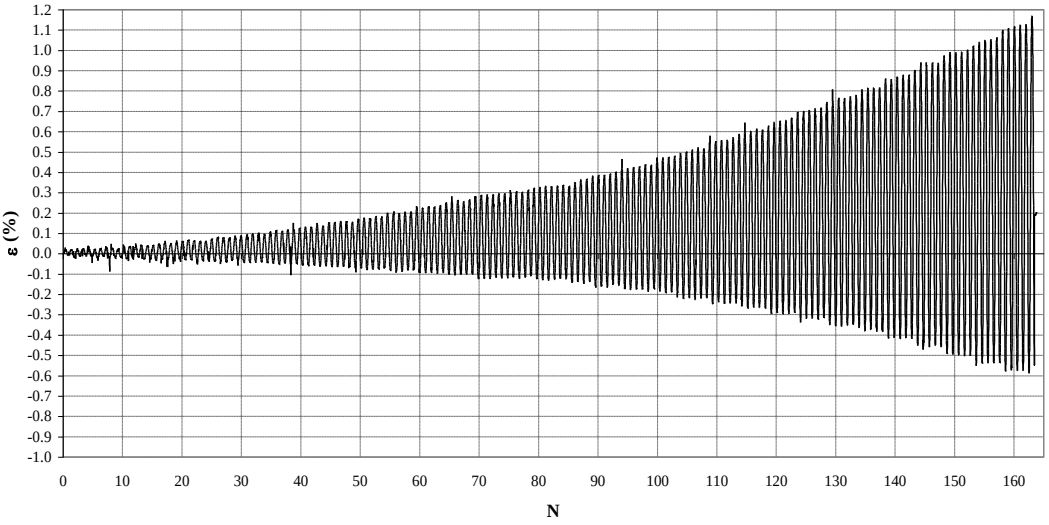


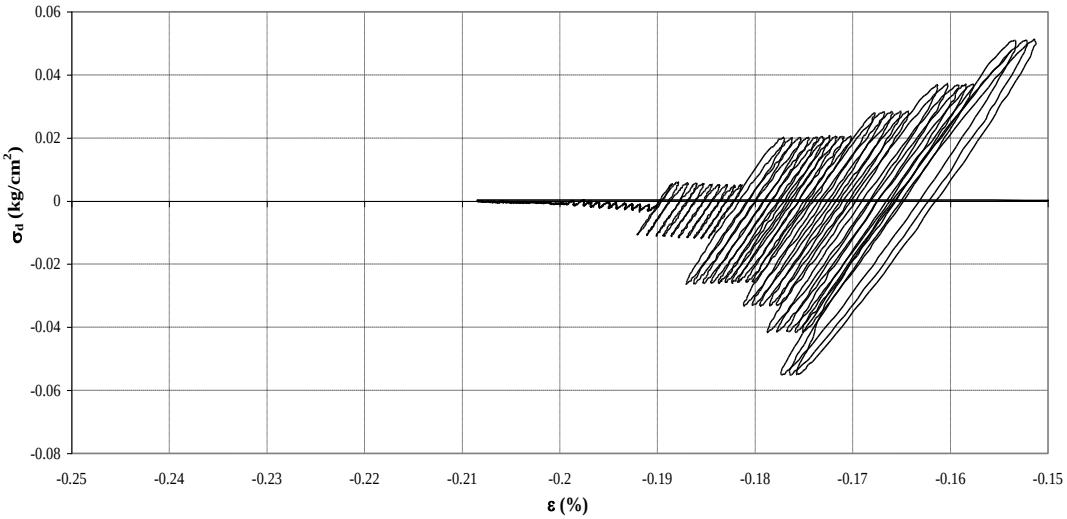




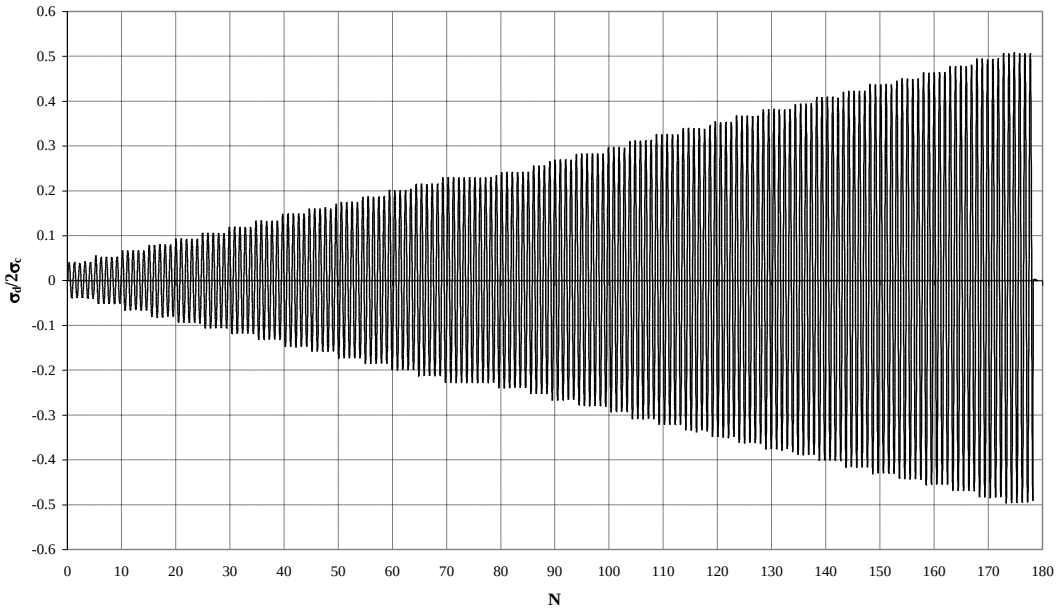
Şekil D.8 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 20, t: 90 gün)

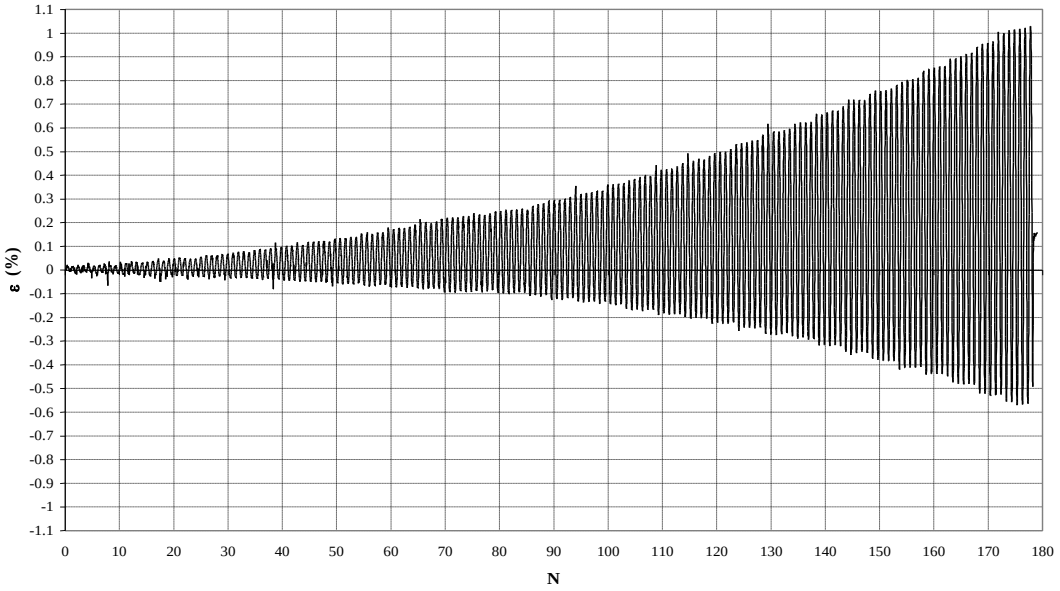


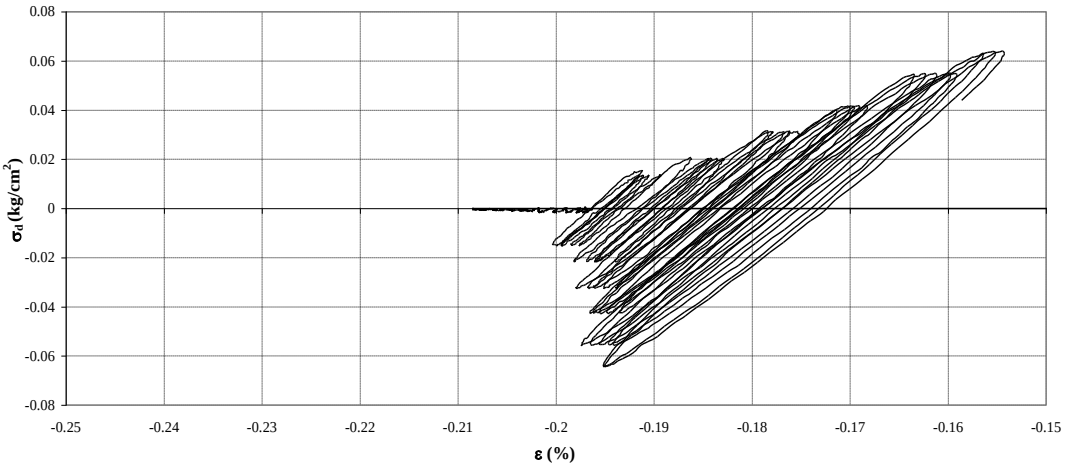




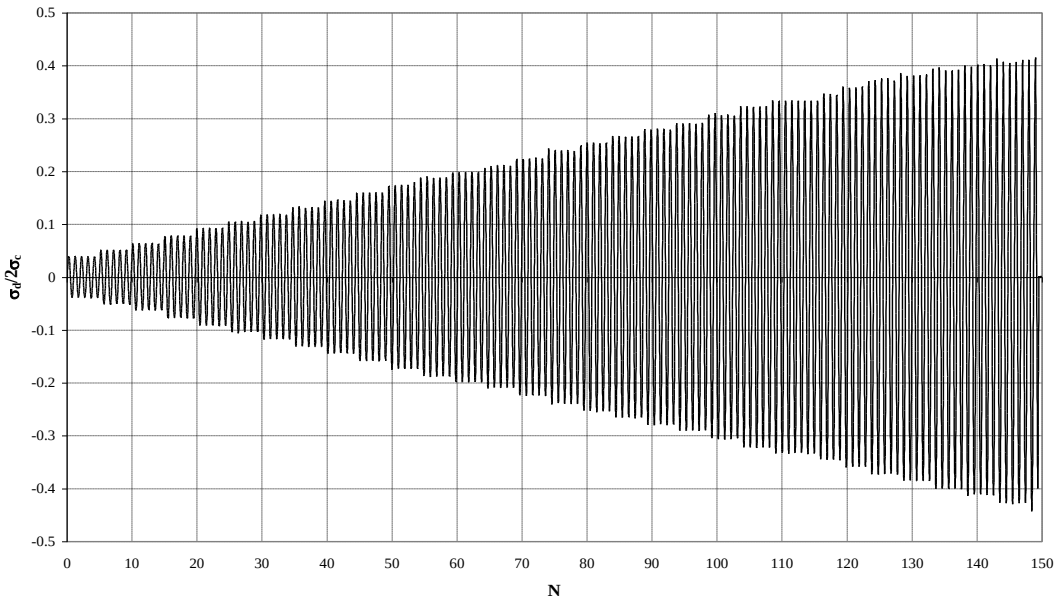
Şekil D.9 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 50, t: 0 gün)

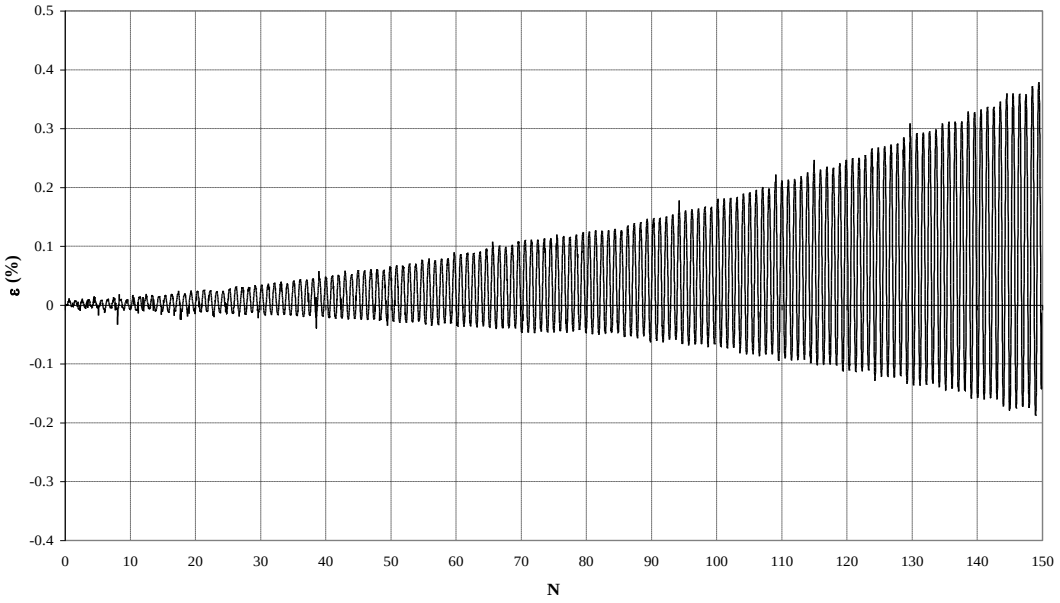


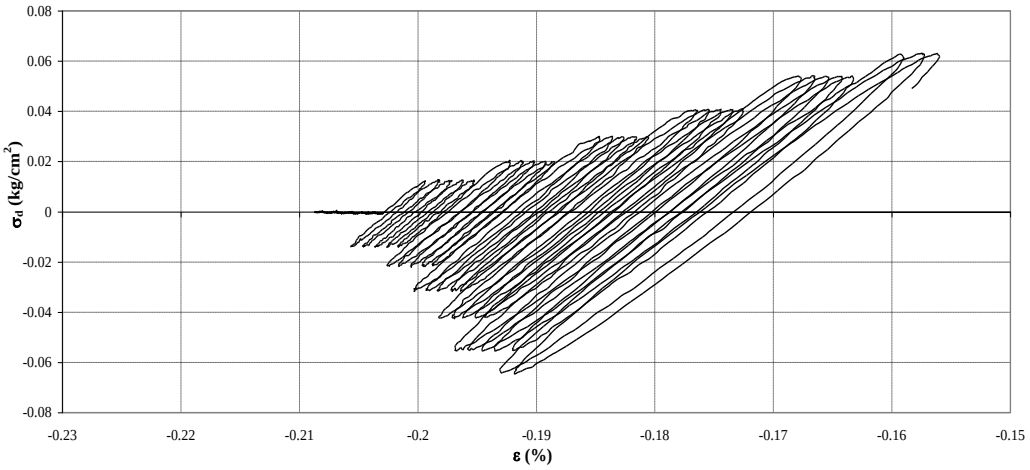




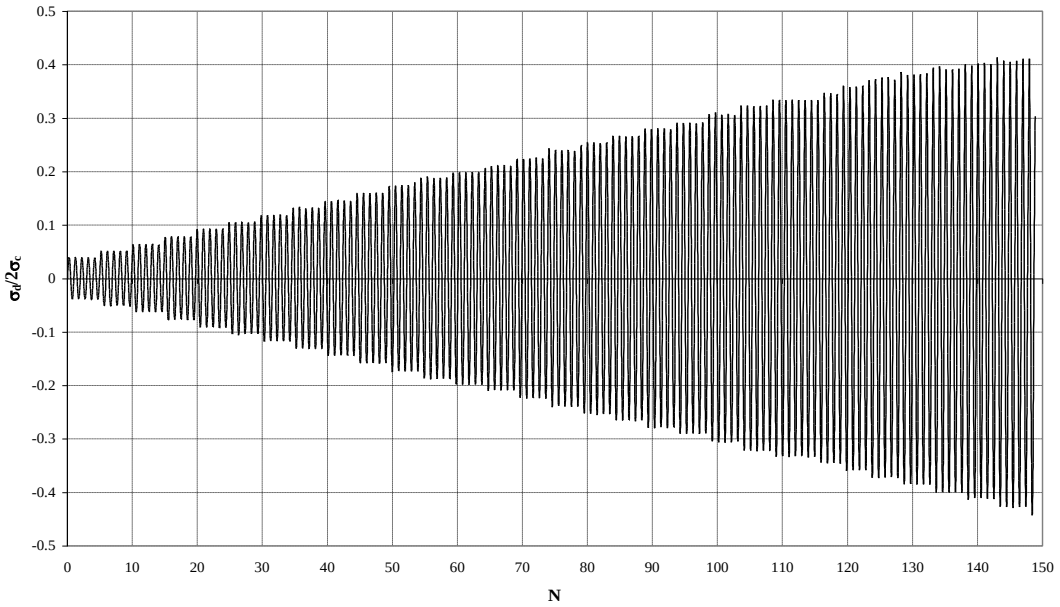
Şekil D.10 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 50, t: 7 gün)

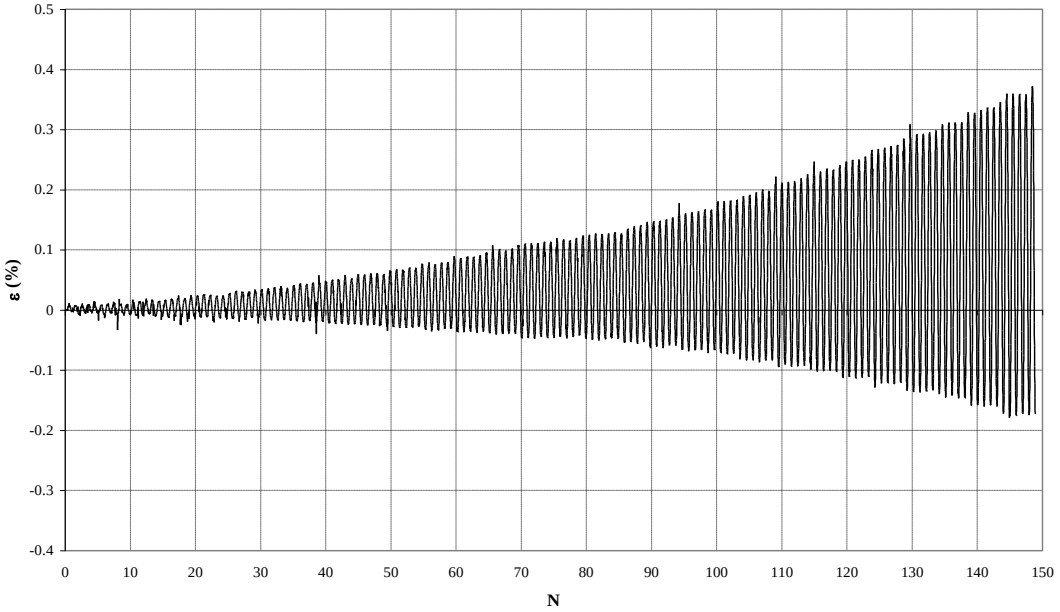


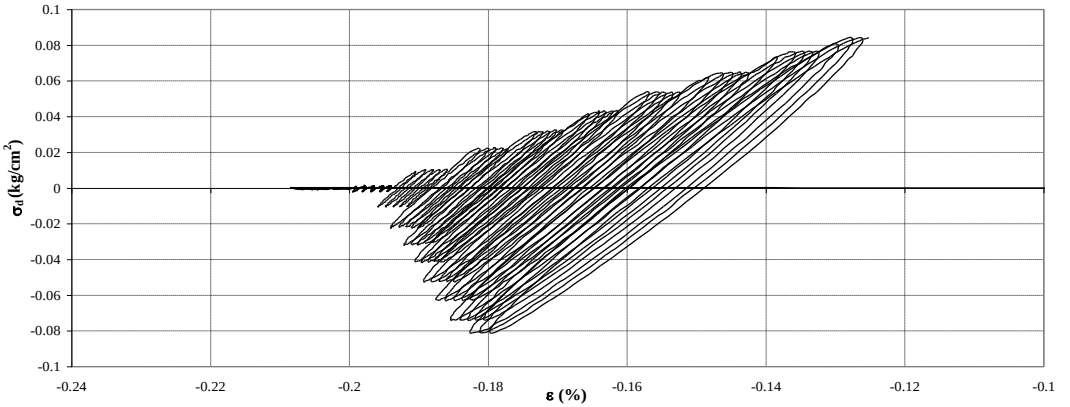




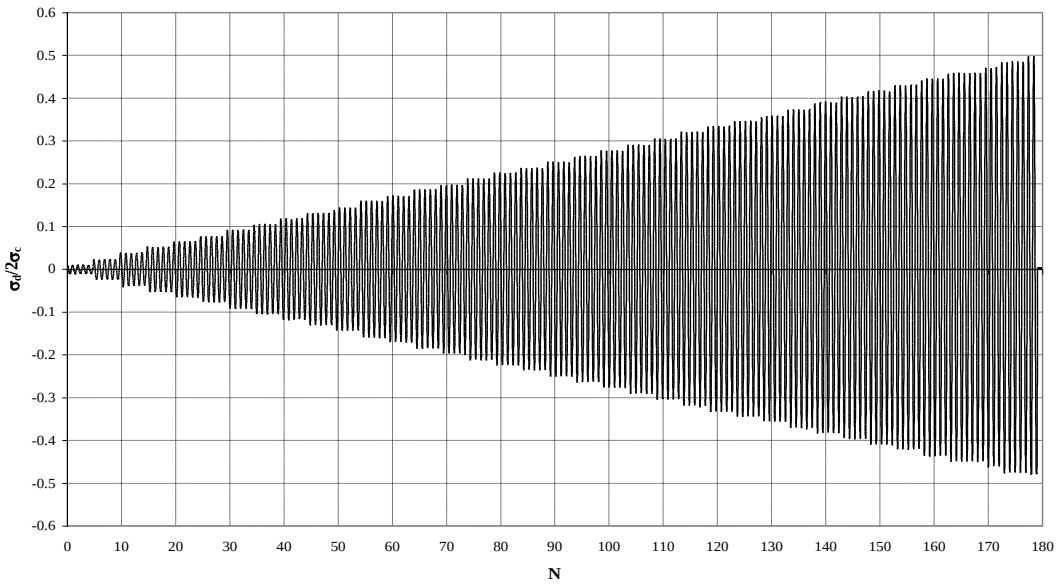
Şekil D.11 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 50, t: 90 gün)

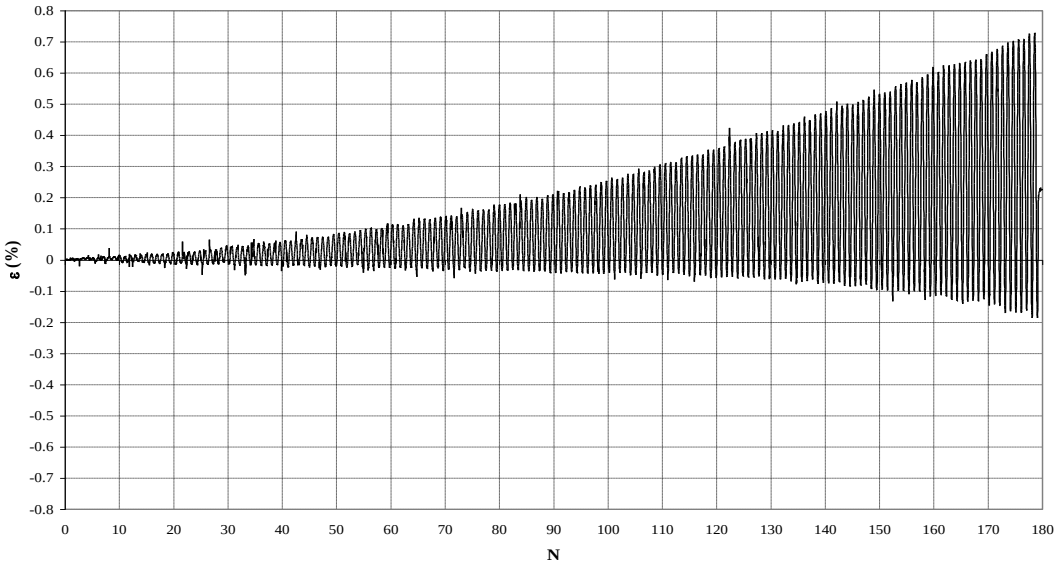


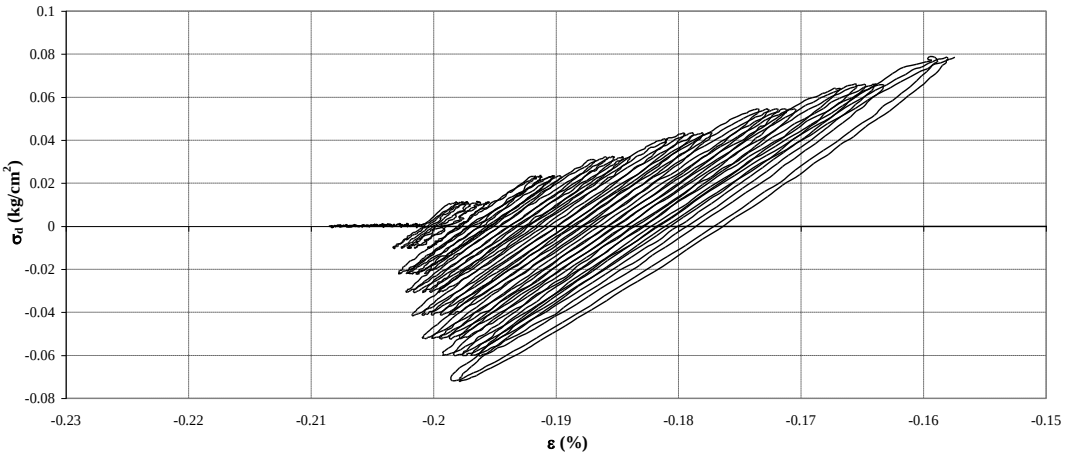




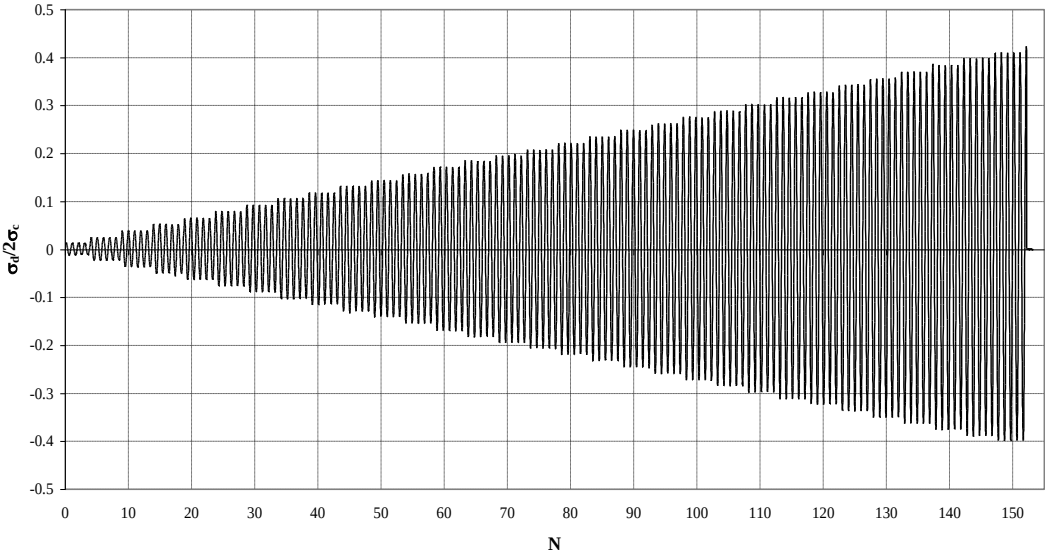
Şekil D.12 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 100, t: 0 gün)

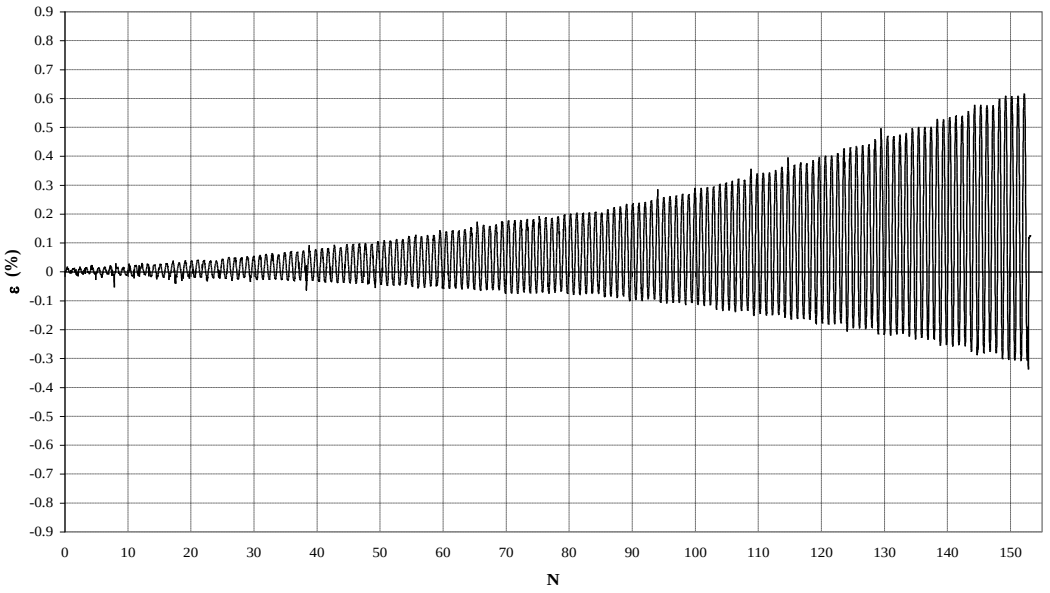


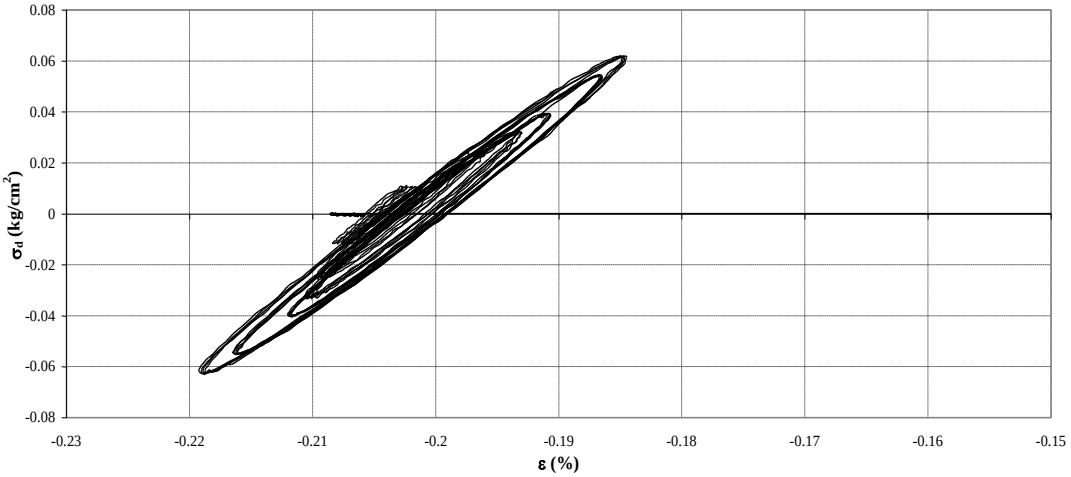




Şekil D.13 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 100, t: 7 gün)







Şekil D.14 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sonucu
(Çöp S: % 100, t: 90 gün)

ÖZGEÇMİŞ

21.04.1977’ de Kırklareli’ de doğdu. 1994 yılında Bahçelievler Endüstri Meslek Lisesi Yapı Ressamlığı Bölümünden mezun oldu. 1994 yılında Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulunda öğrenime başladı ve 1996 yılında mezun oldu. 1998 yılında İstanbul Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünde yükseköğrenimine başladı. 1999–2000 öğretim yılında Jeofizik Mühendisliğinden bölüm birincisi olarak İnşaat Mühendisliği Bölümüne iç yatay geçiş yaptı. 2002 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansa başladı. Halen bu bölümde öğrenimini sürdürmektedir.