CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL KATI ATIKLARIN GEOTEKNİK KARAKTERİZASYONU VE DURAYLILIĞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Yüksek Mühendisi Hasan Fırat PULAT

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Geoteknik

MANİSA 2014

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL KATI ATIKLARIN GEOTEKNİK KARAKTERİZASYONU VE DURAYLILIĞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Yüksek Mühendisi Hasan Fırat PULAT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Ekim 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Kasım 2014

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Yeliz YÜKSELEN-AKSOY

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Arif Şengün KAYALAR (DEU)

: Prof.Dr. Gökhan BAYKAL (BU)

: Doç.Dr. İsfendiyar EGELİ (İYTE)

: Yrd.Doç.Dr. Ender BAŞARI (CBU)

MANİSA 2014

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER iii

SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ ix

ŞEKİLLER LİSTESİ xi

ÇİZELGELER LİSTESİ xix

TEŞEKKÜR xxii

TÜRKÇE ÖZET xxiii

YABANCI DİLDE ÖZET (ABSTRACT) xxiv

BÖLÜM I

1. Giriş 1

1.1 Problem 1

1.2 Tezin Hedefleri 2

1.3 Tez Organizasyonu 5

BÖLÜM II

2. Kentsel Katı Atıklar ve Özellikleri 8

2.1 Katı Atık Kompozisyonu 9

2.1.1 Ülkelere Göre Katı Atık Kompozisyonu 11

2.2 Katı Atık Bertaraf Etme Yöntemleri 15

2.2.1 Düzensiz Depolama 15

2.2.2 Düzenli-Sıhhi Depolama 15

2.2.3 Kompostlaştırma, Tekrar Kullanım, Geri Dönüşüm ve Geri Kazanım 15

2.3 Kentsel Katı Atıkların Mühendislik Özellikleri 16

2.3.1 Kentsel Katı Atıkların Fizikokimyasal Özellikleri 17

2.3.1.1 Kentsel Katı Atıkların Birim Hacim Ağırlığı 17

2.3.1.2 Kentsel Katı Atıkların Su İçeriği 21

2.3.2 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri 22

2.3.2 Kentsel Katı Atıkların Hidrolik İletkenliği 24

2.3.4 Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirliği 25

2.3.5 Kentsel Katı Atıkların Kayma Dayanımı 33

2.3.6 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılığı 52

BÖLÜM III

3. Malzeme ve Yöntem.....56

3.1 Malzeme Karekterizasyonu. 56

3.1.1 Sentetik Malzemelerin Karakterizasyonu.....56

3.1.1.1 T-1 Kompozisyonu.....58

3.1.1.2 E-1 Kompozisyonu.....59

3.1.1.3 U-1 Kompozisyonu 59

3.1.2 Doğal Malzemelerin Karakterizasyonu.....60

3.2 Yöntem 67

3.2.1 Kentsel Katı Atıkların Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi 67

3.2.2 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Deneyleri 73

3.2.2.1 Sentetik Taze ve Yıllanmış Numunelerin Kompaksiyonu 74

3.2.2.2 Doğal Taze ve Yıllanmış Numunelerin Kompaksiyonu 76

3.2.3 Kentsel Katı Atıkların Sıkışma Deneyleri 77

3.2.4 Kentsel Katı Atıkların Direk Kesme Deneyleri.....85

3.2.5 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılık Analizleri 91

BÖLÜM IV

4. Kentsel Katı Atıkların Fizikokimyasal Özellikleri.....96

4.1 Sentetik KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri.....100

4.1.1 Sentetik Taze KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri.....100

4.1.2 Sentetik Yıllanmış KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri.....102

4.1.3 Sentetik Modifiye KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri 103

4.2 Doğal KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri 106

4.2.1 Doğal Taze KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri 106

4.2.2 Doğal Yıllanmış KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri 106

4.2.3 Menemen Endüstriyel KKA Numunelerinin Fiziko Kimyasal Özellikleri 107

BÖLÜM V

5. Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri 109

5.1 Sentetik Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri 109

5.1.1 Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri 110

5.1.1.1 KKA Kompozisyonunun Kompaksiyon Davranışı Üzerindeki Etkisi.....112

5.1.1.2 Dane Boyutunun Kompaksiyon Davranışı Üzerindeki Etkisi 119

5.1.2 Sentetik Yıllanmış Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri 126

5.1.3 Doğal Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri 130

BÖLÜM VI

6. Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri 137

6.1 Sentetik KKA'ların Sıkışabilirlik Özellikleri 138

6.1.1 Sentetik Taze KKA'ların Sıkışabilirlik Özellikleri 138

6.1.2 Sentetik Yıllanmış KKA'ların Sıkışabilirlik Özellikleri 146

6.1.3 Kompozisyonun KKA'ların Sıkışabilirlik Üzerindeki Etkisi.....152

6.1.3.1 Kompozisyon etkisinin E-1 kompozisyonunun Sıkışabilirlik Özelliğine Etkisi 153

6.1.3.2 Kompozisyon etkisinin U-1 kompozisyonunun Sıkışabilirlik Özelliğine Etkisi.....154

6.1.3.3 Kompozisyon etkisinin T-1 kompozisyonunun Sıkışabilirlik Özelliğine Etkisi 156

6.2 Doğal KKA'ların Sıkışabilirlik Özellikleri 159

6.2.1 Doğal Taze KKA'ların Sıkışabilirlik Özellikleri 159

6.2.2 Doğal Yıllanmış KKA'ların Sıkışabilirlik Özellikleri 160

BÖLÜM VII

7. Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti Özellikleri 164

7.1 Sentetik KKA'ların Kayma Mukavemeti.....164

7.1.1 Sentetik Taze KKA'ların Kayma Mukavemeti 164

7.1.1.1 Su İçeriğinin Sentetik Taze KKA'ların Kayma Mukavemetine Etkisi 165

7.1.1.1.1 Su İçeriğinin E-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi 165

7.1.1.1.2 Su İçeriğinin U-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi 170

7.1.1.1.3 Su İçeriğinin T-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi 174

7.1.1.2 Kompozisyonun Sentetik Taze KKA'ların kayma mukavemetine etkisi.....179

7.1.1.2.1 Kompozisyonun E-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi.....179

7.1.1.2.2 Kompozisyonun U-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi.....183

7.1.1.2.3 Kompozisyonun T-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi 188

7.1.1.3 Dane Boyutunun Sentetik Taze KKA'ların Kayma Mukavemetine Etkisi.....196

7.1.1.3.1 Dane Boyutunun E-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi 196

7.1.1.3.2 Dane Boyutunun U-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi.....199

7.1.1.3.3 Dane Boyutunun T-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi 202

7.1.2 Sentetik Yıllanmış KKA'ların Kayma Mukavemeti 205

7.1.2.1 Yıllanmanın E-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi.....206

7.1.2.2 Yıllanmanın U-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi 209

7.1.2.3 Yıllanmanın T-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi.....211

7.2 Doğal KKA'ların Kayma Dayanımı 216

7.2.1 Doğal Taze KKA'ların Kayma Dayanımı 216

7.2.2 Doğal Yıllanmış KKA'ların Kayma Dayanımı 219

BÖLÜM VIII

8. KKA'ların Şev Duraylılık Analizleri.....222

8.1 Şev Modellerinin Oluşturulması.....223

8.2 Farklı Mühendislik Özelliklerindeki Şevlerin Duraylılık Analizleri.....226

8.2.1 Şev Açısının Şev Duraylılığı Üzerindeki Etkisi.....226

8.2.2 Şev Geometrisinin Duraylılık Analizleri Üzerindeki Etkisi.....230

8.2.3 Yıllanma Etkisinin Şev Duraylılığına Etkisi.....234

8.2.4 Yeraltı suyunun Şev duraylılığı üzerindeki etkisi.....237

8.2.5 Manisa Atık Depolama Sahasının Duraylılık Analizleri.....241

8.2.6 Deprem kuvvetlerinin şev duraylılığı üzerindeki etkisi.....243

BÖLÜM IX

9. Endüstriyel KKA'lar ile Gerçekleştirilen Vaka İncelemesi.....248

9.1 Menemen OSB Düzenli Atık Depolama Sahası Özellikleri.....248

9.2 Endüstriyel Katı Atıkların Fiziko Kimyasal Özellikleri.....251

9.3 Endüstriyel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti Parametreleri.....254

9.4 Menemen OSB Düzenli Depolama Sahası Duraylılık Analizleri.....258

9.5 Deprem Kuvvetlerinin Endüstriyel KKA Depolama Sahasındaki Etkisi.....263

BÖLÜM X

10. Sonuçlar ve Öneriler.....267

10.1 Sonuçlar.....267

10.1.1 Kentsel Katı Atıkların Fizikokimyasal Özellikleri.....267

10.1.2 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri.....268

10.1.3 Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri.....270

10.1.4 Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti Özellikleri.....271

10.1.5 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılığı.....273

10.2 Genel Sonuçlar.....275

10.3 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler 275

KAYNAKLAR 277

EKLER 296

ÖZGEÇMİŞ 330

SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

T-1	Temsili Türkiye kentsel katı atık kompozisyonu
E-1	Temsili Avrupa ortalama kentsel katı atık kompozisyonu
U-1	Temsili Amerika Birleşik Devletleri kentsel katı atık kompozisyonu
T-1-D	Doğal su içeriğinde T-1 kompozisyonundaki sentetik taze KKA numunesi
E-1-D	Doğal su içeriğinde E-1 kompozisyonundaki sentetik taze KKA numunesi
U-1-D	Doğal su içeriğinde U-1 kompozisyonundaki sentetik taze KKA numunesi
T-1-Y	Doğal su içeriğinde T-1 kompozisyonundaki sentetik yıllanmış KKA numunesi
E-1-Y	Doğal su içeriğinde E-1 kompozisyonundaki sentetik yıllanmış KKA numunesi
U-1-Y	Doğal su içeriğinde U-1 kompozisyonundaki sentetik yıllanmış KKA numunesi
T-1-I	Doygun durumda T-1 kompozisyonundaki sentetik taze KKA numunesi
E-1-I	Doygun durumda E-1 kompozisyonundaki sentetik taze KKA numunesi
U-1-I	Doygun durumda U-1 kompozisyonundaki sentetik taze KKA numunesi
T-1-1	Kül atığın kompozisyondan çıkartıldığı taze modifiye KKA kompozisyonu
T-1-2	Organik atık oranının azaltıldığı taze modifiye KKA kompozisyonu
E-1-1	Kağıt-karton atık oranının azaltıldığı taze modifiye KKA kompozisyonu
E-1-2	Organik atık oranının azaltıldığı taze modifiye KKA kompozisyonu
U-1-1	Plastik atığın kompozisyondan çıkartıldığı taze modifiye KKA kompozisyonu
U-1-2	Metal atığın kompozisyondan çıkartıldığı taze modifiye KKA kompozisyonu
T-1-K	Kağıt-karton atık boyutlarının büyütüldüğü taze modifiye KKA kompozisyonu
T-1-M	Mutfak atık boyutlarının büyütüldüğü taze modifiye KKA kompozisyonu
E-1-K	Kağıt-karton atık boyutlarının büyütüldüğü taze modifiye KKA kompozisyonu
E-1-M	Mutfak atık boyutlarının büyütüldüğü taze modifiye KKA kompozisyonu

U-1-K	Kağıt-karton atık boyutlarının büyütüldüğü taze modifiye KKA kompozisyonu
U-1-M	Mutfak atık boyutlarının büyütüldüğü taze modifiye KKA kompozisyonu
M-D-T	Manisa doğal taze KKA numunesi
M-D-Y	Manisa doğal yıllanmış KKA numunesi
MNMN-D-T	Menemen doğal taze endüstriyel katı atık numunesi
MNMN-D-Y	Menemen doğal yıllanmış endüstriyel katı atık numunesi
Ø’	Efektif içsel sürtünme açısı
c’	Efektif kohezyon
H	Şev depolama yüksekliği
α	Şev eğimi
γ	Birim hacim ağırlık
w	Su içeriği
C_c	Sıkışma indisi
σ’	Efektif normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
ε	Deformasyon
Δ	Deplasman

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Dört büyük şehrimize ait kişi başına düşen katı atık miktarları (Gören, 2006) 12

Şekil 2.2 İstanbul Büyükşehir Belediyesine ait katı atık kompozisyonu (Gören, 2006).....12

Şekil 2.3 EPA'nın (1990) verilerine göre Amerika'daki evsel katı atıkların bileşimi 14

Şekil 2.4 Toplam b.h.a. değerlerinin derinlik ile değişimi (Kavazanjian ve diğ., 1995).....20

Şekil 2.5 Hidrolik iletkenliğin derinlikle değişimi (Powrie ve Beaven, 1999).....24

Şekil 2.6 Katı atıkların zaman içerisindeki oturma evreleri (Grisolia ve Napoleoni, 1996).....28

Şekil 2.7 Kentsel katı atıkların kayma dayanımı aşamaları (Kölsch, 1996) 34

Şekil 2.8 Kanada KKA numuneleri büyük direk kesme sonuçları (Landva ve Clark, 1990).....36

Şekil 2.9 Küçük ölçekli direk kesme sonuçları (Siegel ve diğ., 1990) 37

Şekil 2.10 Rapor edilmiş kayma mukavemeti değerleri (Singh ve Murphy, 1990).....38

Şekil 2.11 Büyük ölçekli direk kesme deney sonuçları (a-b), (Mazzucato ve diğ., 1999) 40

Şekil 2.12 Direk kesme kayma zarfı (Kavazanjian ve diğ., 1999) 40

Şekil 2.13 Maksimum deformasyona ait kayma dayanımı değerleri (Pelkey ve diğ.,2001).....41

Şekil 2.14 Farklı derinliklerdeki KKA numunelerin kayma zarfları (Caicedo ve diğ., 2002) 42

Şekil 2.15.a Farklı su içeriğindeki numunelerin kayma zarfları, (Vilar ve Carvalho, 2002) 43

Şekil 2.15.b Farklı b.h.a.'taki numunelerin kayma zarfı, (Vilar ve Carvalho, 2002).....43

Şekil 2.16 Farklı araştırmacılar tarafından rapor edilen τ - σ değerleri, (Eid ve diğ., 2000).....45

Şekil 2.17 Kavazanjian ve diğ. (1995) tarafından önerilen kayma zarfı 46

Şekil 2.18.a Yıllanmış KKA numunelerin CU deneyi kohezyon – su içeriği ilişkileri (Gabr ve Valero, 1995).....47

Şekil 2.18.b Yıllanmış KKA numunelerin CU deneyi kohezyon – efektif normal gerilme ilişkileri (Gabr ve Valero, 1995).....47

Şekil 2.19 Katı atıklar için sürtünme açısı-kohezyon diyagramı (Singh ve Murphy, 1990) 48

Şekil 2.20 Katı atık gövdesinde oluşması muhtemel kayma düzlemleri (Aykol, 2008) 53

Şekil 3.1 Sentetik KKA kompozisyonlarında kullanılan malzemeler 57

Şekil 3.2 Plastik tanklar içerisine yerleştirilmiş sentetik numuneler.....58

Şekil 3.3 Manisa ili vahşi atık depolama sahasının uydu görüntüsü 61

Şekil 3.4 Manisa ili vahşi atık depolama sahasından görüntüler.....61

Şekil 3.5 Doğal atık numunelere uygulanan eleme işlemi.....62

Şekil 3.6 Manisa atık sahasından alınan doğal taze KKA numunesi 62

Şekil 3.7 Manisa atık sahasından alınan doğal yıllanmış KKA numunesi.....63

Şekil 3.8 Manisa ili KKA kompozisyon yüzdeleri 63

Şekil 3.9 Menemen OSB vahşi endüstriyel atık depolama sahasının uydudandan görüntüsü...64

Şekil 3.10 Endütriyel katı atıkların (a) ayrılması ve (b) poşetlenmesi 65

Şekil 3.11.a Piknometre deneyinde numunelere vakum uygulaması.....69

Şekil 3.11.b Üç kompozisyonun cam piknometreler içerisindeki görünümü 70

Şekil 3.12 Su içeriği belirlenmiş KKA numuneleri.....71

Şekil 3.13 Porselen potalar içerisindeki OM deney numuneleri 72

Şekil 3.14 Sentetik KKA numunelerinin pH değerlerinin ölçülmesi 73

Şekil 3.15 Sentetik taze numunenin kalıptan çıkartılması 74

Şekil 3.16 Doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerin kalıptan çıkartılması 77

Şekil 3.17 Büyük ölçekli ve standart boyutlu sıkışabilirlik hücreleri.....78

Şekil 3.18 Büyük ölçekli sıkışabilirlik hücresinin bileşenleri.....79

Şekil 3.19 Büyük ölçekli sıkışabilirlik sisteminin kalibrasyonu 80

Şekil 3.20 Sıkışma deneyi numunelerinin hazırlanışı.....83

Şekil 3.21 Sıkıştırma deneyleri a) Islak durum b) Kuru durum.....84

Şekil 3.22 Sıkıştırma deneyi sonrası KKA numunesinden görüntüler.....85

Şekil 3.23 KKA'ların kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılan test türleri (Zeccos, 2005) 86

Şekil 3.24 Büyük ölçekli direk kesme cihazı 86

Şekil 3.25 Kesme kutusunun bölümleri 87

Şekil 3.26 Kesme kutusunun içine yerleştirilmiş sentetik KKA numunesi 90

Şekil 3.27 İki kademeli modellenmiş şev geometrisi 92

Şekil 3.28 Kum (SW) bandıyla ayrılmış yıllanmış ve taze KKA tabakaları.....93

Şekil 3.29 Plaxis-2D programıyla üç farklı eğimde gerçekleştirilen duraylılık analizleri.....93

Şekil 3.30 Menemen düzenli atık depolama sahasının şev güvenlik analizi.....94

Şekil 3.31 Manisa atık depolama sahası için belirlenmiş sismik inceleme sahası.....94

Şekil 3.32 İnceleme sahası içerisinde meydana gelmiş depremler.....95

Şekil 3.33 Dinamik kuvvetler etkisinde deforme olmuş şev gövdesi.....95

Şekil 4.1 Üç farklı kompozisyona ait granülometri eğrileri.....96

Şekil 5.1 Sentetik taze KKA kompozisyonlarına ait Standart Proctor deney sonuçları.....110

Şekil 5.2 Sentetik taze KKA kompozisyonlarına ait Modifiye Proctor deney sonuçları.....111

Şekil 5.3 Farklı kompaksiyon enerjilerinin sentetik taze numuneler üzerindeki etkileri.....112

Şekil 5.4 T-1 ve T-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri.....114

Şekil 5.5 T-1 ve T-1-2 kompozisyonlarına ait kompaksiyon.....114

Şekil 5.6 E-1 ve E-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri.....115

Şekil 5.7 E-1 ve E-1-2 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri..... 116

Şekil 5.8 U-1 ve U-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri 117

Şekil 5.9 U-1 ve U-1-2 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri 118

Şekil 5.10 Dane boyu dağılımının T-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi 120

Şekil 5.11 İri daneli mutfak atığının T-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi 121

Şekil 5.12 İri daneli kağıt-karton atığının T-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi....122

Şekil 5.13 Dane boyu dağılımının E-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi 122

Şekil 5.14 İri daneli kağıt-karton atığının E-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi....123

Şekil 5.15 İri daneli mutfak atığının E-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi.....124

Şekil 5.16 Dane boyu dağılımının U-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi.....125

Şekil 5.17 İri daneli mutfak atığının U-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi.....125

Şekil 5.18 İri daneli kağıt-karton atığının U-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi ...126

Şekil 5.19 Sentetik yıllanmış KKA numunelerin kompaksiyon eğrileri 127

Şekil 5.20 Sentetik yıllanmış – taze (T-1) KKA numuneleri MP kompaksiyon eğrileri 128

Şekil 5.21 E-1-D ve E-1-Y numuneleri Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri 129

Şekil 5.22 U-1-D ve U-1-Y numuneleri Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri.....130

Şekil 5.23 Doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerine ait MP kompaksiyon eğrileri 131

Şekil 5.24 Doğal ve sentetik yıllanmış KKA numunelerine ait MP kompaksiyon eğrileri 132

Şekil 5.25 Doğal ve sentetik taze KKA numunelerinin MP kompaksiyon eğrileri 133

Şekil 5.26 Çeşitli çalışmalardaki kompaksiyon eğrilerinin karşılaştırılması 134

Şekil 6.1 E-1-D ve E-1-I numunelerin sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği.....140

Şekil 6.2 Etüvden çıkarılmış U-1-D numunesinden görünüm 141

Şekil 6.3 U-1 doğal ve doygun numunelerin sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği 142

Şekil 6.4 T-1 doğal ve doygun numunelerin sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği.....144

Şekil 6.5 Doğal ve doygun durumdaki üç kompozisyonun sıkışabilirlik eğrileri.....144

Şekil 6.6 Yıllanmış E-1-Y kompozisyonundan bir görünüm 147

Şekil 6.7 Yıllanmış E-1-Y numunesinin sıkışabilirlik deneyinden bir görünüm.....147

Şekil 6.8 E-1-D, E-1-I ve E-1-Y numunelerinin sıkışabilirlik deneyi e - σ' ilişkileri.....148

Şekil 6.9 Sıkışabilirlik hücresi içerisindeki U-1-Y numunesi 149

Şekil 6.10 Yıllanmış U-1-Y kompozisyonu sıkışabilirlik deneyinden bir görünüm 150

Şekil 6.11 U-1-D, U-1-I ve U-1-Y numunelerinin sıkışabilirlik deneyi e - σ' ilişkileri 151

Şekil 6.12 Yıllanmış T-1-Y kompozisyonundan bir görünüm 151

Şekil 6.13 T-1-D, T-1-I ve T-1-Y numunelerinin sıkışabilirlik deneyi e - σ' ilişkileri 152

Şekil 6.14 E-1-D (orijinal) E-1-1 ve E-1-2 kompozisyonları sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği....154

Şekil 6.15 U-1-D (orijinal) U-1-1 ve U-1-2 kompozisyonları sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği ...155

Şekil 6.16 T-1-D (orijinal) T-1-1 ve T-1-2 kompozisyonları sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği 156

Şekil 6.17 Sıkışma indeksi – organik atık içeriği ilişkisi 158

Şekil 6.18 Manisa Doğal taze KKA numunesi sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği.....160

Şekil 6.19 Manisa Doğal yıllanmış KKA numunesi sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği 161

Şekil 7.1 Optimum su içeriğinde kesme kutusuna yerleştirilmiş E-1 numunesi 166

Şekil 7.2 Optimum su içeriğindeki E-1-D numunesi τ – ε ilişkisi 167

Şekil 7.3 Optimum su içeriğindeki E-1-I numunesi τ – ε ilişkisi 168

Şekil 7.4 E-1-D ve E-1-I numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi 168

Şekil 7.5 E-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi.....169

Şekil 7.6 E-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi 170

Şekil 7.7 Optimum su içeriğindeki U-1-D numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 171

Şekil 7.8 Optimum su içeriğindeki U-1-I numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi.....172

Şekil 7.9 U-1-D ve U-1-I numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi 172

Şekil 7.10 U-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi 173

Şekil 7.11 U-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi 174

Şekil 7.12 Optimum su içeriğindeki T-1-D numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi.....175

Şekil 7.13 Optimum su içeriğindeki T-1-I numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 176

Şekil 7.14 T-1-D ve T-1-I numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....176

Şekil 7.15 T-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi.....177

Şekil 7.16 T-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi 177

Şekil 7.17 Modifiye E-1-1 numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 180

Şekil 7.18 E-1-1 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....181

Şekil 7.19 Modifiye E-1-2 numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 182

Şekil 7.20 E-1-2 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....182

Şekil 7.21 Kompozisyon etkisinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi.....183

Şekil 7.22 Modifiye U-1-1 numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 184

Şekil 7.23 U-1-1 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....185

Şekil 7.24 Modifiye U-1-2 numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 186

Şekil 7.25 U-1-2 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....186

Şekil 7.26 Kompozisyon etkisinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi.....187

Şekil 7.27 Modifiye T-1-1 numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 189

Şekil 7.28 T-1-1 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....190

Şekil 7.29 Modifiye T-1-2 numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 191

Şekil 7.30 T-1-2 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....192

Şekil 7.31 Kompozisyon etkisinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi.....192

Şekil 7.32 İçsel sürtünme açısı – organik atık içeriği ilişkisi 193

Şekil 7.33 İçsel sürtünme açısı – lifli atık yüzdesi içeriği ilişkisi 194

Şekil 7.34 Lifli atık numunesine ait τ - ΔL ilişkisi.....195

Şekil 7.35 Lifli atık malzemelerin kayma mukavemeti parametreleri.....195

Şekil 7.36 E-1-K numunesine ait τ - ε ilişkisini gösteren grafik.....197

Şekil 7.37 E-1-M numunesine ait τ - ε ilişkisini gösteren grafik.....197

Şekil 7.38 Dane boyutunun E-1 kompozisyonun kayma mukavemeti üzerindeki etkisi.....198

Şekil 7.39 U-1-M numunesine ait τ - ε ilişkisini gösteren grafik.....199

Şekil 7.40 U-1-K numunesine ait τ - ε ilişkisini gösteren grafik 200

Şekil 7.41 Dane boyutunun U-1 kompozisyonun kayma mukavemeti üzerindeki etkisi 201

Şekil 7.42 T-1-M numunesine ait τ - ε ilişkisini gösteren grafik 202

Şekil 7.43 T-1-M numunesine ait τ - ε ilişkisini gösteren grafik 203

Şekil 7.44 Dane boyutunun T-1 kompozisyonun kayma mukavemeti üzerindeki etkisi.....203

Şekil 7.45 E-1 kompozisyonundaki yıllanmış KKA numunesi görünümü.....206

Şekil 7.46 Yıllanmış E-1-Y numunesi τ – ε ilişkisi 207

Şekil 7.47 E-1-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi 208

Şekil 7.48 E-1 kompozisyonundaki yıllandırılmış ve günlük numunelerin kayma zarfları.....208

Şekil 7.49 U-1 kompozisyonundaki yıllanmış KKA numunesi görünümü.....209

Şekil 7.50 Yıllanmış U-1-Y numunesi τ – ε ilişkisi 210

Şekil 7.51 E-1-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi 210

Şekil 7.52 U-1 kompozisyonundaki yıllandırılmış ve günlük numunelerin kayma zarfları.....211

Şekil 7.53 Yıllanmış T-1-Y numunesi τ – ε ilişkisi.....212

Şekil 7.54 T-1-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi.....213

Şekil 7.55 T-1 kompozisyonundaki yıllandırılmış ve günlük numunelerin kayma zarfları 213

Şekil 7.56 Elde edilen kayma zarflarının literatürdeki verilerle karşılaştırılması.....216

Şekil 7.57 Kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş MDT numunesinden bir görünüm.....217

Şekil 7.58 Doğal taze MDT numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 218

Şekil 7.59 M-D-T ve T-1-D numuneleri kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi 218

Şekil 7.60 Kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş MY numunesinden bir görünüm 219

Şekil 7.61 Doğal yıllanmış MY numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi 220

Şekil 7.62 Doğal yıllanmış MY numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi 220

Şekil 8.1 FLAC-Slope 7.0.419 ana penceresi 224

Şekil 8.2 Şev geometrisi parametrelerinin belirlenmesi.....224

Şekil 8.3 Malzeme modelleri ve malzeme tanımlama parametreleri.....225

Şekil 8.4 Modellenen şev gövdesindeki gerilme dağılışı 225

Şekil 8.5 Kritik güvenlik sayısında modellenmiş T-1-D kompozisyonu 228

Şekil 8.6 Kritik güvenlik sayısındaki şev açılarına karşılık gelen depolama yükseklikleri 228

Şekil 8.7 α=26,56° eğimiyle modellenmiş KKA şev geometrisi.....229

Şekil 8.8.a 40 m. depolama yüksekliğindeki tek eğimli şev geometrisi.....231

Şekil 8.8.b 40 m. yüksekliğindeki iki kademeli şev geometrisi.....231

Şekil 8.9 Üst ve alt düzlükleri 50m olan şev modeli 233

Şekil 8.10 Farklı yıllanma etkisindeki katmanların duraylılık analizleri.....235

Şekil 8.11 Araya serilen kum tabakasının KKA'ların duraylılığı üzerindeki etkisi.....236

Şekil 8.12 Yeraltı suyu etkisi altındaki E-1-D modelinin duraylılık analizi 238

Şekil 8.13 Manisa Vahşi Atık Sahası Depolama Yüksekliği.....241

Şekil 8.14 Plaxis-2D programıyla üç farklı eğimde gerçekleştirilen duraylılık analizleri.....242

Şekil 8.15 Manisa vahşi atık depolama sahasının üstten görünümü 243

Şekil 8.16 Manisa atık depolama sahası ve sismik faliyetlerin inceleme alanı 244

Şekil 8.17 Belirlenen özelliklerde bulunan deprem noktaları.....245

Şekil 8.18 Üç farklı doğrultudaki deprem ivme kayıtları 246

Şekil 8.19 Deformasyona uğramış depolama sahasından görünüm 247

Şekil 9.1. Düzenli atık depolama sahasının üstten görünüşü 249

Şekil 9.2. Düzenli depolama sahasından genel bir görünüm 250

Şekil 9.3. Depolama sahasında kullanılan geotekstillerden görünüm.....251

Şekil 9.4. (a) Endütriyel katı atıkların ayrılması ve (b) poşetlenmesi 252

Şekil 9.5. Menemen OSB endüstriyel katı atıklarına ait organik madde deney numuneleri 253

Şekil 9.6. Büyük ölçekli direk kesme deneyi hücresine yerleştirilmiş numuneden görünüm.....254

Şekil 9.7. Menemen OSB - Küçük BHA direk kesme deney numunesi τ - ε ilişkisi.....255

Şekil 9.8. Menemen OSB - Küçük BHA numunesine ait kayma mukavemeti parametreleri 256

Şekil 9.9. Menemen OSB - Büyük BHA direk kesme deney numunesi τ - ε ilişkisi.....257

Şekil 9.10. Menemen OSB – Büyük BHA numunesi kayma mukavemeti parametreleri 257

Şekil 9.11.a. Küçük BHA'lı çift şevli 10 m depolama yüksekliğinde 1V/3H şev modeli.....258

Şekil 9.11.b. Küçük BHA'lı çift şevli 20 m depolama yüksekliğinde 1V/3H şev modeli.....258

Şekil 9.11.c. Küçük BHA'lı tek şevli 20 m depolama yüksekliğinde 1V/3H şev modeli.....259

Şekil 9.11.d. Büyük BHA'lı tek şevli 20 m depolama yüksekliğinde 1V/2H şev modeli 259

Şekil 9.12 Endüstriyel atık depolama sahasına ait tanımlanmış geometri ve yükler 262

Şekil 9.13 Şev gövdesinde meydana gelen toplam deplasmanlar.....262

Şekil 9.14 Uzun yıllar endüstriyel atıkların boşaltığı vahşi depolama alanı.....263

Şekil 9.15 İnşaatı tamamlanan düzenli atık depolama sahası 264

Şekil 9.16 Deplasmanları taban kayasına tanımlanmış şev modeli 265

Şekil 9.17 Deforme olmuş şev modeli 265

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1 Evsel katı atık bileşim oranları (Wigh ve diğ., 1981) 10

Çizelge 2.2 Gelir düzeylerine göre ülkelerin katı atık kompozisyonu (Gören, 2006) 13

Çizelge 2.3 Farklı ülkelerdeki katı atıkların yüzde oranları (Gören, 2006) 13

Çizelge 2.4 USEPA 1960-1990 yılları ABD evsel katı atık içerikleri (USEPA, 2009).....14

Çizelge 2.5 Katı atıkların çeşitli koşullardaki b.h.a. değerleri (Aykol, 2008) 19

Çizelge 2.6 KKA'ların sıkıştırılma derecelerine göre a ve b (Zekkos ve diğ., 2006) 21

Çizelge 2.7 Çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilen su içeriği değerleri (Hossain, 2002) ..22

Çizelge 2.8 Çeşitli ortamlardaki KKA'ların b.h.a. değerleri (Oweis ve Khera, 1998).....23

Çizelge 2.9 Katı atıkların sahalarındaki oturma oranları (Aykol, 2008).....29

Çizelge 2.10.a Sentetik KKA numuneler ile yapılan sıkışabilirlik deneyleri.....32

Çizelge 2.10.b Doğal KKA numuneler ile yapılan sıkışabilirlik deneyleri 32

Çizelge 2.11 Laboratuar ortamındaki kayma mukavemeti deneyleri (Stark ve diğ, 2009).....50

Çizelge 2.12 Laboratuvar ortamındaki kayma dayanımı parametreleri (Aykol, 2008) 51

Çizelge 2.13 Arazi ortamındaki kayma mukavemeti deneyleri (Stark ve diğ, 2009).....51

Çizelge 2.14 Arazi yükleme deneylerinden elde edilen dayanım parametreleri (Aykol, 2008) ...52

Çizelge 3.1 T-1, E-1, U-1 kompozisyonlarının KKA birleşim oranları.....60

Çizelge 3.2 Kentsel katı atık numune grupları 66

Çizelge 3.3 Deneylerde kullanılan malzemelerin standart dane boyu özellikleri.....68

Çizelge 3.4 Deneylerde kullanılan ince ve iri dane boyut aralıkları.....68

Çizelge 3.5 Modifiye sentetik KKA kompozisyonları ve özellikleri.....80

Çizelge 3.6 Büyük ölçekli sıkışma deney programı ve numune özellikleri 82

Çizelge 3.7 Büyük ölçekli direk kesme deney programı ve deney özellikleri 89

Çizelge 4.1 Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık (G_s) değerleri 97

Çizelge 4.2 T-1, E-1 ve U-1 KKA numunelerinin özgül ağırlık (G_s) değerleri.....98

Çizelge 4.3 T-1, E-1 ve U-1 numunelerinin hacim ve ağırlık oranları 99

Çizelge 4.4 Kullanılan malzemelerin başlangıç su içeriği değerleri 99

Çizelge 4.5 Farklı sıcaklıklarda test edilen su içeriği değerleri.....100

Çizelge 4.6 T-1-D, E-1-D ve U-1-D KKA numunelerinin fiziko kimyasal özelllikleri.....101

Çizelge 4.7 T-1-Y, E-1-Y ve U-1-Y KKA numunelerinin fiziko kimyasal özelllikleri 103

Çizelge 4.8 T-1-D, T-1-1 ve T-1-2 KKA numunelerinin fiziko kimyasal özelllikleri 103

Çizelge 4.9 E-1-D, E-1-1 ve E-1-2 KKA numunelerinin fiziko kimyasal özelllikleri.....104

Çizelge 4.10 U-1-D, U-1-1 ve U-1-2 KKA numunelerinin fiziko kimyasal özelllikleri 105

Çizelge 4.11 M-D-T ve M-D-Y KKA numunelerinin fiziko kimyasal özelllikleri 107

Çizelge 4.12 Menemen OSB Endüstriyel KKA numunesinin fiziko kimyasal özelllikleri 108

Çizelge 5.1 Kompozisyon etkisinin incelenmesi için kullanılan numuneler 113

Çizelge 5.2 Sentetik taze KKA'ların MP karakteristikleri üzerinde kompozisyon etkisi.....118

Çizelge 5.3 Deneylerde kullanılan ince ve iri dane boyut aralıkları.....119

Çizelge 5.4 Kompozisyon etkisinin KKA'ların kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisi 135

Çizelge 6.1 Büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri ve sıkışma indisi değerleri.....162

Çizelge 7.1 Sentetik taze KKA numunelerin direk kesme deney sonuçları.....179

Çizelge 7.2 Farklı dane boyu özelliklerindeki E-1'in kayma mukavemeti parametreleri 199

Çizelge 7.3 Farklı dane boyu özelliklerindeki U-1'in kayma mukavemeti parametreleri 201

Çizelge 7.4 Farklı dane boyu özelliklerindeki T-1'in kayma mukavemeti parametreleri.....204

Çizelge 7.5 Dane boyunun kayma mukavemeti parametrelerine etkisi 204

Çizelge 7.6 Organik madde içeriğinin zaman içerisindeki değişimi.....206

Çizelge 7.7 Sentetik KKA numunelerinin kayma mukavemeti özellikleri.....215

Çizelge 8.1 Farklı mühendislik parametreleri ile modellenmiş şevlerin güvenlik sayıları 227

Çizelge 8.2 Farklı kademe sayısındaki şevlerin güvenlik sayıları 232

Çizelge 8.3 Farklı geometrik özelliklerdeki şev modellerinin güvenlik sayıları 234

Çizelge 8.4 Yıllanma etkisinin şev duraylığı üzerindeki etkisi 235

Çizelge 8.5 Kum tabakasının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi 237

Çizelge 8.6 Yeraltı su seviyesinin duraylılık analizlerine etkisi.....238

Çizelge 8.6 (Devamı) Yeraltı su seviyesinin duraylılık analizlerine etkisi.....239

Çizelge 8.7 Manisa vahşi atık depolama sahası duraylılık analiz sonuçları.....242

Çizelge 8.8 Manisa atık depolama sahasına ait maksimum deplasman değerleri 247

Çizelge 9.1 Endüstriyel atıkların ortalama doğal su içeriği değeri.....252

Çizelge 9.2 Endüstriyel atıkların ortalama organik madde miktarı, (%) 253

Çizelge 9.3 Menemen OSB depolama sahası şev duraylılık analizleri 260

Çizelge 9.4 Menemen OSB endüstriyel atık şevdeki maksimum deplasman değerleri 266

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince bilgisinden faydalandığım insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı kıymetli hocam, Doç. Dr. Yeliz YÜKSELEN-AKSOY'a sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma boyunca bilgi birikimi, değerli görüşleri ve deneyimleri ile yol gösteren Prof. Dr. Arif Şengün KAYALAR'a ve tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Ender BAŞARI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Diğer jüri üyelerim, Prof. Dr. Gökhan BAYKAL'a ve Doç. Dr. İsfendiyar EGELİ'ye tavsiye ve yorumları için teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Ali Hakan ÖREN'e içten teşekkürlerimi sunarım. Manisa Büyük Şehir Belediyesi Temizlik İşleri Müdürlüğü'nde görevini sürdüren Çevre Mühendisi Gökhan ÇEVİK'e verdiği katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Son olarak bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan aileme ve zor günlerimde yanımda olan dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hasan Fırat PULAT

Manisa, 2014

KENTSEL KATI ATIKLARIN GEOTEKNİK KARAKTERİZASYONU VE DURAYLILIĞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Gelişen dünya nüfusuna paralel olarak ortaya çıkan kentsel katı atık miktarı her geçen gün katlanarak artmaktadır. İnsan sağlığı ve çevrenin korunması açısından üretilen atıkların güvenilir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Düzenli depolama günümüzde halen en tercih edilen atık bertaraf metodudur. Depolama sahasına getirilen atıkların sağlıklı, güvenilir ve ekonomik bir şekilde bertarafı en başta depolanacak malzemenin özelliklerinin iyi tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır. Mühendislik özellikleri iyi tanımlanmamış atıklar ile yapılacak kontrolsüz depolamalar verecekleri ekonomik zararların yanı sıra oluşabilecek büyük deformasyonlar ve göçmelerle can ve mal güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu amaçla belirli kompozisyonlarda laboratuar koşullarında sentetik olarak üretilmiş ve doğal atık depolama sahasından alınmış taze ve yıllanmış kentsel katı atık (KKA) numunelerinin geoteknik özellikleri laboratuar ortamında incelenmiştir. İncelemeler sırasında deneylerde kompozisyon, yıllanma, dane boyutu, su içeriği, birim hacim ağırlık gibi birçok değişkenlerin etkileri araştırılmıştır. Sentetik numuneler Türkiye (T-1), Amerika Birleşik Devletleri (U-1) ve Avrupa (E-1) için temsili KKA kompozisyonları ve bunlardan türetilmiş modifiye kompozisyonlardan oluşmaktadır. İlk olarak sentetik ve doğal KKA'ların maksimum dane boyutları, doğal su içeriği, organik madde miktarı, özgül ağırlık, pH değerleri belirlenmiştir. Sonrasında sentetik ve doğal KKA numunelerinin farklı kompozisyonlarda, çeşitli dane boyutlarında ve iki farklı sıkıştırma enerjisi etkisinde kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. KKA'ların sıkışabilirlik davranışları C.B.Ü. Zemin Mekaniği laboratuarında özel olarak üretilmiş büyük ölçekli sıkışabilirlik hücreleri ile incelenmiştir. Doygun ve doğal su içeriğinde gerçekleştirilen deneylerde kompozisyon ve yıllanma etkilerinin sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dane boyu dağılımı, birim hacim ağırlık, kompozisyon, su içeriği, yıllanma gibi çeşitli mühendislik özelliklerine sahip doğal ve sentetik KKA numunelerinin kayma mukavemeti parametreleri özel üretilmiş büyük ölçekli direk kesme cihazıyla belirlenmiştir. Elde edilen mühendislik parametreleri kullanılarak mevcut ve tasarlanmış KKA şevlerinin duraylılık analizleri statik ve dinamik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Statik ve dinamik analizler FLAC-2D ve Plaxis-2D bilgisayar programları ile gerçekleştirilmiş, modellenen şevlerde meydana gelen maksimum deformasyonlar ve şev güvenlik sayıları belirlenmiştir. Tez kapsamında elde edilen KKA'ların mühendislik parametreleri ve duraylılık analizleri sonuçları ile daha güvenli ve ekonomik KKA depolama sahalarının tasarlanması mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel katı atık, kompaksiyon, sıkışabilirlik, kayma mukavemeti, yıllanma, kompozisyon, duraylılık.

GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF THE MUNICIPAL SOLID WASTES AND INVESTIGATION OF THEIR SLOPE STABILITY

ABSTRACT

Along with the developing world population generated municipal solid waste amount also increases day by day. Wastes have to be disposed safely for protection of human health and the environment. Sanitary landfilling has still been the most preferred disposal method. In order to dispose wastes healthily, safely and economically, waste material properties must be well defined. Uncontrolled waste storage, which is not with well defined engineering properties, not only causes economic loss, but also endangers human life and property safety. For this purpose, geotechnical properties of synthetic waste samples with pre-determined compositions and natural waste samples, which were gathered from landfill were investigated in the laboratory. In the tests, the effect of many parameters such as composition, aging, grain size, water content, and unit weight on the geotechnical properties of MSWs were examined. The synthetic MSW samples were collected to be representative of Turkey (T-1), United States of America (U-1) and the European Union (E-1) in average compositions and modified compositions, which were derived from these three basic compositions. Maximum grain size, natural water content, organic matter content, specific gravity and pH values of the synthetic and natural MSW samples were determined. Then, compaction tests were conducted under different compaction energies on the synthetic, natural and modified MSW samples, which have different grain size distributions. Compressibility behaviour of MSW samples were investigated by using a specially manifactured large scale compressibility test system in the C.B.U. Soil Mechanics laboratory. Composition and aging effect on the compressibility behaviour of MSW samples were also investigated on the saturated samples and samples having the optimum water contents. Shear strength parameters of synthetic and natural MSW samples were determined by using a specially manufactured large scale direct shear test system. The effect of grain size distribution, unit weight, composition, water content and aging were investigated on the shear strength behavior of MSW samples. Slope stability analyses were also conducted by using the obtained engineering parameters of MSW samples for present and designed slopes at static and dynamic conditions. Static and dynamic stability analyses were made by using Plaxis-2D and Flac-2D computer programs. Maximum deformations and factor of safety values were obtained for the defined slope models. The evaulated MSW engineering parameters in this study can be used in the design of safe and economical landfills.

Keywords: Municipal solid waste, compaction, compressibility, shear strength, aging, composition, slope stability.

1. GİRİŞ

Bu bölümde ilk olarak tezin ortaya çıkmasına neden olan kentsel katı atıklar ve depolanması ile ilgili problemler ortaya konulmuştur. İkinci kısımda tez kapsamında yapılması hedeflenen araştırmalardan, elde edilmesi planlanan parametrelerden ve bunlara ne şekilde ulaşılacağından bahsedilmiştir. Giriş bölümünün son kısımında tezi oluşturan bölümler, çalışma aşamaları ve bölüm içerikleri hakkında kısa özetler verilmiştir.

1.1 Problem

İnsan yaşamının kaçınılmaz bir ürünü olan katı atıklar, gelişen dünyaya paralel olarak sistemli bir şekilde muhafaza edilmeye çalışılmaktadır. Bu tür atıkların tam olarak ortadan kaldırılması mümkün olmadığından, hacimlerinin en aza indirilmesi, düzenli bir şekilde depolanması ve teknolojinin elverdiği ölçüde geri dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir. Kentsel katı atık (KKA)'ların bertaraf edilmesi amacıyla dünya genelinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Düzenli depolama, kompostlaştırma ve yakma gibi diğer uygulanan yöntemlere kıyasla daha ekonomik olup, dünya genelinde en yaygın kullanılan katı atık bertaraf metodudur (Reddy ve diğ., 2009; Hanson ve diğ., 2010). Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) toplanan kentsel katı atıkların %54'lük bölümünün düzenli depolama sahalarında muhafaza edildiğini rapor etmiştir (USEPA, 2007). Sızdırmazlığı sağlanmış ve gaz çıkışı kontrol altına alınmış kentsel katı atık (KKA) depolama sahaları, atıkların kademeli bir şekilde istiflenip, sıkıştırıldığı mühendislik yapılarıdır (Machado ve diğ., 2008). Katı atık depolama sahalarının temel görevleri, atıkların neden olduğu çevre kirliliğini kontrol etmek, zemin ve su kirliliğinin önüne geçmektir.

Depolama tesislerinin temel mühendislik malzemesi, kentsel katı atıkların bizzat kendisidir. Ancak kullanılan diğer mühendislik malzemelerine kıyasla kentsel katı atıkların belirgin mühendislik özelliklerinden bahsetmek oldukça zordur. Yapısında çok farklı özelliklerde materyalleri bulunduran KKA'lar heterojen yapıda olup, büyük boşluk oranlarına sahiptirler. Bunun yanı sıra zaman, konum ve çevre şartlarına bağlı olarak birim hacim ağırlık (b.h.a.), su içeriği, kayma dayanımı, hidrolik iletkenlik ve sıkışabilirlik gibi mühendislik parametreleri değişiklik gösterebilmektedir.

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla, konut ve yaşam alanı ihtiyaçlarının karşılanması her geçen gün zorlaşmaktadır. Ayrıca katı atık depolama sahalarının yer seçimi, tüm dünyada problem yaratmaktadır. Bu durum katı atık depolanması için ayrılan alanların önemini daha da

arttırmaktadır. Bu nedenle katı atık sahalarında, daha dik açılar ile daha büyük yüksekliklerde depolama yapılarak daha büyük miktarlarda katı atığın muhafaza edilmesi gerekmektedir. Bu durumlar değerlendirildiğinde, katı atıkların bertarafı için kullanılan depolama sahalarının olabildiğince titiz, detaylı bir şekilde tasarlanması ve uzun yıllar hizmet verebilmesi gereklidir. Düzenli katı atık depolama sahasının tasarımının güvenilir ve ekonomik olması ise depolanacak KKA'ların özelliklerinin iyi tanımlanmasıyla yakından ilişkilidir. Bu nedenle ülkeden ülkeye hatta şehirden şehire değişen kompozisyonlara sahip, özellikleri zamanla değişen katı atıkların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi güvenli ve ekonomik kentsel katı atık (KKA) sahalarının oluşturulması açısından son derece önemlidir.

1.2 Tezin Hedefleri

Kentsel katı atıklar ile ilgili uluslararası literatürde yapılan çalışmalar çeşitli bilim dalları arasında sıkışıp kalmıştır. Ülkemizde de bu konuda sınırlı sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Kentsel katı atıklar konusunda çalışmaların sınırlı olmasının en net göstergelerinden biri KKA'ların mühendislik parametrelerinin günümüzde dahi zeminlere ait deney metotları ve standartlar ile belirlenmeye çalışılmasıdır. Oysa KKA'lar dane boyutu ve dağılımı, içerdiği malzemeler ve sahip olduğu büyük boşluklar nedeniyle zeminlerden çok farklı özelliklere sahiptir.

Bu çalışma kapsamında ilk olarak bir çok parametreye bağlı olarak değişiklik gösterebilen KKA'ların fizikokimyasal özellikleri incelenmiştir. KKA'ların kompozisyonu, fizikokimyasal özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Bu nedenle ilk olarak kompozisyon etkisinin, KKA'ların mühendislik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Doğal ortamda bulunan kentsel katı atık numuneleri bölgeden bölgeye, konumuna (yüzeyde ya da gömülü olması durumuna), dış koşullara (güneş, yağış, kar) depolanma şekline (düzenli ya da düzensiz) ve depolama öncesi herhangi bir işlem geçirip geçirmediğine (geri dönüşüm, ayrıştırma, yeniden kullanım, yakma, ayıklama v.b.) göre kompozisyon farklılıkları göstermektedir. Laboratuvar ortamında farklı kompozisyonlarda sentetik numuneler hazırlanarak kompozisyon etkisinin KKA'ların mühendislik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla literatür araştırmaları sonucunda Türkiye (T-1), Amerika Birleşik Devletleri (U-1) ve Avrupa (E-1) ortalama kompozisyonlarına ait temel KKA numuneleri üretilmiştir. Sonrasında ise temel kompozisyonlardan bazı malzemeler tamamen çıkartılarak ya da oransal olarak azaltılırak, modifiye KKA numuneleri üretilmiştir. Farklı kompozisyon karakteristiklerindeki (temel ve modifiye) sentetik KKA numunelerinin fizikokimyasal özellikleri incelenmiştir.

Sentetik ve doğal KKA numuneleri ile yapılan laboratuvar çalışmalarında KKA'ların birim hacim ağırlık, doğal su içeriği, organik madde miktarı, özgül ağırlık, pH değer aralıkları ve dane dağılım özellikleri belirlenmiştir. KKA'ların temel mühendislik parametrelerinin değer aralıklarını belirlemek sonraki aşamalarda, mukavemet parametrelerinin ve şev güvenlik sayılarının doğru şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Yıllanma, KKA'ların mühendislik özelliklerini önemli şekilde etkileyen bir diğer parametredir. Yıllanma ile KKA'ların temel özelliklerini ne şekilde etkilediği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda sentetik olarak üretilen KKA numunelerinin, büyük plastik variller içerisinde dış ortama bırakılarak, belirli aralıklar (3 – 6 – 12 ay) ile temel mühendislik parametrelerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

Sentetik KKA numunelere ait fizikokimyasal özelliklerle, doğal KKA numunelere ait özellikler karşılaştırılmıştır. Bu amaçla sentetik numuneler için yapılan tüm laboratuvar çalışmaları Manisa ili vahşi katı atık depolama sahasından temin edilen doğal katı atık numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Manisa Büyük Şehir Belediyesi'nden alınan özel izin kapsamında, yetkililer depolama sahasından taze ve yıllanmış doğal katı atık temin edilmesinde yardımcı olmuşlardır. Doğal taze numunelerin atık depolama sahasındaki maksimum bekleme süresi bir haftayla sınırlandırılırken, doğal yıllanmış numunelerde depolama süresi 5-10 yıl arasında değişen numuneler kullanılmıştır.

Depolama sahalarının en uygun şekilde, güvenli ve uzun yıllar boyunca kullanılabilmesi için, katı atıkların sahaya getirilmesinden sonraki sürecin iyi ve bilinçli yönetilmesi gerekmektedir. Bu süreçteki en önemli aşamalardan birini KKA'ların kompaksiyonu oluşturmaktadır. Katı atıkların hangi tabaka kalınlıklarında, ne kadar enerji altında ve ne tür ekipmanlar kullanılarak sıkıştırılması gerektiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla; üç farklı kompozisyonda üretilmiş (T-1, E-1 ve U-1) sentetik KKA numuneleri, iki farklı kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılarak, enerji ve kompozisyonun KKA'ların kompaksiyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kompozisyon içerisindeki yüzdece büyük veya baskın karakterli katı atık malzemelerin oranları değiştirilirek, ya da tamamen kompozisyondan çıkartılarak modifiye kompozisyonlar oluşturulmuş ve kompozisyonun kompaksiyon davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Dane boyu dağılımının, kompaksiyon davranışına etki eden en önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Bu amaçla kompozisyon içerisindeki büyük yüzdeye veya baskın karaktere sahip bazı katı atıkların (mutfak atığı ve park-bahçe atığı) dane büyüklükleri arttırılarak kompaksiyon davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yıllanma etkisinin kompaksiyon davranışını ne şekilde etkilediğinin belirlenmesi için sentetik taze, sentetik yıllanmış, doğal taze ve doğal yıllanmış numuneler ile kompaksiyon deneyleri

gerçekleştirilerek, doğal ve sentetik numunelerin kompaksiyon davranışlarındaki benzer ve farklı hususlar incelenmiştir.

Depolama sahasına getirilen KKA'lar, yığışmalı olarak depolanmakta ve düşey yöndeki gerilmeler sürekli değişiklik göstermektedir. Büyük boşluklu yapıya sahip olan KKA'lar bu gerilme artışları sonucunda büyük düşey deformasyonlar yapabilmektedir. Bu düşey deformasyonların tahmin edilebilir olması, gerek depolama yüksekliğinin belirlenmesinde ve şev duraylılık analizlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu amaçla farklı karakteristikteki kentsel katı atık numunelerinin sıkışma davranışlarının incelenmesi hedeflenmiştir. KKA numunelerinin dane boyutları zemin danelerine kıyasla çok daha büyük olabilmektedir. Zemin mekaniği laboratuvarlarında bulunan ufak ölçekteki (1-D) konsolidasyon deney sistemleri ile KKA numunelerin sıkışma deneylerini gerçekleştirmek uygun olmamaktadır. Bu nedenle zeminler için kullanılan (1-D) konsolidasyon deney sisteminin, KKA numuneler ile çalışılabilmesine olanak sağlayacak şekilde modifikasyon işlemlerinin yapılması amaçlanmıştır. İmal edilen büyük ölçekli sıkışma hücresiyle dane boyu dağılımı, kompozisyon, doygunluk derecesi, yıllanma gibi parametrelerin KKA'ların sıkışma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

KKA'ların kayma mukavemeti, atık sahalarının maksimum depolama yüksekliklerinin ve şev açılarının belirlenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle doğal ve sentetik KKA numunelerinin çeşitli değişkenlerin etkisi altındaki kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. İlk olarak; temel kompozisyonların direk kesme deneyleri, doygun ve doğal su içeriği koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede Türkiye (T-1), Avrupa ortalaması (E-1) ve Amerika Birleşik Devletleri (U-1) sentetik KKA numunelerinin toplam ve efektif kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Kompozisyonun, kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasına modifiye kompozisyonlar (T-1-1, T-1-2, E-1-1, E-1-2, U-1-1 ve U-1-2) ile devam edilerek kompozisyon bileşenlerinin parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dane boyu dağılımının kayma mukavemeti üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, laboratuvar ortamında üretilen büyük dane boyutlu sentetik KKA numunelerle direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yıllanma etkisiyle KKA'ların kayma mukavemeti davranışlarında zamanla büyük değişiklikler meydana gelebilmektedir. Bu amaçla sentetik yıllanmış ve doğal yıllanmış KKA numuneler ile deneyler gerçekleştirilerek taze ve yıllanmış numunelerin kayma mukavemeti parametrelerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Dünya genelinde atık sahalarında kontrolsüz yükleme, aşırı yağış, oluşan yangınlar, tahliye sistemlerinin bulunmaması, yeterli sıkıştırmanın yapılmaması, olması gerekenden daha dik

açıda depolama yapılması gibi nedenlerden dolayı şev göçmeleri meydana gelmektedir. Meydana gelen bu olaylar çok sayıda can kaybına ve büyük maddi kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle KKA numuneleri ile gerçekleştiren deney sonuçlarında elde edilen parametreler kullanılarak duraylılık analizleri yapılmıştır. Bu sayede mevcut ve tasarlanmış şev modellerinin, güvenli şev açılarının, güvenlik sayılarının ve oluşması muhtemel maksimum deformasyonların belirlenmesi hedeflenmiştir. Farklı şev açılarında, çeşitli geometrilerde, değişik mühendislik özelliklerindeki KKA'ların şev duraylılık analizleri Flac 2-D, Plaxis 2-D ve Talren V.4 programlarıyla yapılarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Statik analizlere ek olarak dinamik analizler de gerçekleştirilmiştir. Manisa ve Menemen atık depolama sahaları için belirlenen deprem ivmeleri şev modellerine etki ettirilerek dinamik yükler altında meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda; sentetik ve doğal KKA numunelerinin temel mühendislik parametreleri, kompaksiyon özellikleri, sıkışma davranışları, kayma dayanımı parametrelerinin değer aralıkları belirlenmiş, statik ve dinamik kuvvetler etkisindeki tasarlanmış ve mevcut şev modellerinin duraylılık analizleri sonucunda şev açıları, güvenlik sayıları ve maksimum deformasyonları belirlenmiştir. Çalışmanın son bölümünde Menemen düzenli endütriyel katı atık depolama sahası için bir de vaka incelemesi gerçekleştirilmiştir. Vaka incelemesi sırasında arazi incelemeleri, laboratuvar çalışmaları ve bilgisayar analizleri yapılarak, tez çalışmasından elde edilen bilgilerin uygulamada kullanılması imkanı bulunmuştur. Buna ek olarak, Türkiye'de kompozisyon oranları bilinen bir bölge için yapılması planlanan düzenli katı atık depolama sahasının ön tasarımında kullanılacak fizikokimyasal ve mekanik mühendislik parametrelerinin değer aralıkları da oluşturulmaya çalışılmıştır.

1.3 Tez Organizasyonu

Tez kapsamında yapılan çalışmalar toplam 10 bölümde verilmektedir. Bu bölümler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

Birinci bölümde, tez içeriğinin oluşmasına ve şekillenmesine neden olan problemler ortaya konulmuştur. Ayrıca, tezin sonunda ulaşılması planlanan hedefler belirtildikten sonra, tezi oluşturan bölümlerin açıklanması ile birinci bölüm sonlandırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, kentsel katı atıklar ile literatürde daha önce yapılan çalışmalar özetlenmiştir. KKA'ların temel mühendislik özellikleri zamana, konuma, kompozisyona, su içeriğine ve diğer birçok etkene bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle çok sayıda araştırmacı tarafından dünyanın çeşitli bölgelerinde araştırmalar

yapılmıştır. Laboratuvar ortamında doğal ve sentetik katı atık numuneler ile gerçekleştirilen araştırmalara ek olarak, doğal atıklar ile yerinde (in-situ) yapılan birçok incelemeler de literatürde mevcuttur. Bu bölümde sentetik, doğal, taze, yıllanmış KKA'lar ile literatürde yapılan laboratuvar ve arazi çalışmaları farklı yönleriyle ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, bu çalışma kapsamında laboratuvar deneylerinde kullanılan numunelerin kompozisyon özellikleri, kompozisyonu oluşturan materyallerin özellikleri, kullanılan numune çeşitleri tanıtılmaktadır. Yine bu bölümde kullanılan KKA numunelerinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan metotlar, uygulanan yöntemler ilgili standartlar ile birlikte verilmiştir.

Dördüncü bölümde, belirli kompozisyonlarda yapay olarak laboratuvar ortamında üretilen sentetik KKA numunelerinin ve Manisa Belediyesi atık depolama sahasından alınan doğal atık numunelerin fizikokimyasal özellikleri verilmiştir. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda elde edilen granülometri eğrisi verileri, özgül ağırlık, doğal su içeriği, birim hacim ağırlık, organik madde miktarı, pH değerleri Türkiye (T-1), Amerika (U-1) ve Avrupa ortalaması (E-1) temel kompozisyonları ve temel kompozisyonlardan türetilmiş modifiye numuneler (T-1-1, T-1-2, E-1-1, E-1-2, U-1-1 ve U-1-2) için bu bölümde verilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde KKA'ların kompaksiyon davranışları incelenmiştir. Laboratuvar ortamında sentetik olarak üç farklı kompozisyonda üretilmiş taze ve yıllanmış KKA numunelerinin Standard ve Modifiye Proctor deneyleri sonuçları ile Manisa vahşi katı atık depolama sahasından alınan taze ve yıllanmış KKA numunelerinin kompaksiyon deneyleri sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Modifiye kompozisyon numuneleri ve iri daneli numuneler kullanılarak gerçekleştirilen kompaksiyon deneyleri de bu bölümde yer almıştır.

Altıncı bölümde, kademeli olarak artan KKA yükleri altında, KKA numunelerinde meydana gelen düşey deformasyonlar ve KKA numunelerinin sıkışabilirlik özellikleri incelenmiştir. Üç farklı kompozisyonda hazırlanan sentetik KKA numunelerinin doğal su içeriğinde ve doygun durumdaki sıkışma deneyleri ile, yıllanmış ve doğal numunelerin sıkışma deneyleri sonuçları bu bölümde verilmiştir. Üç temel kompozisyondan türetilmiş altı modifiye kompozisyon numunesinin büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri de bu bölümde yer almıştır.

Yedinci bölümde, KKA'ların kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi için bilgisayar kontrollü büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmektedir. İlk olarak üç farklı kompozisyonda (E-1, U-1 ve T-1) hazırlanan sentetik taze KKA numunelerinin yeraltı su seviyesinin altındaki ve üstündeki durumunu (doğal ve doygun durum) temsil eden direk kesme deneyleri yapılarak sonuçları verilmiştir. Direk kesme deneylerine üç farklı

kompozisyonda sentetik yıllanmış KKA numuneler ile devam edilmiştir. Modifiye KKA numunelerinin deneyleri, farklı granülometrideki KKA numunelerine ait büyük ölçekli direk kesme deney sonuçları da yine bu bölümde bulunmaktadır. Doğal taze ve doğal yıllanmış katı atık numunelerine ait büyük ölçekli direk kesme deneyleri ile yedinci bölüm sonlandırılmıştır.

Sekizinci bölüm, mevcut ve tasarlanmış KKA şev modellerinin çeşitli koşullar altındaki bilgisayar analizlerini içermektedir. Analizlerde kullanılacak mühendislik parametrelerinin çok büyük bir bölümü laboratuvar deneylerinden elde edilmiştir. Farklı şev geometrilerinde, çeşitli mühendislik özelliklerinde, değişik kayma mukavemeti değerlerinde ve farklı koşullar altındaki KKA şev modellerinin analizlerinde Flac 2-D, Talren ve Plaxis 2-D bilgisayar programları kullanılmıştır. Analizler sonucunda mevcut ve tasarlanmış şev modellerinin güvenli şev açıları, güvenlik sayıları ve oluşması muhtemel maksimum deformasyonları belirlenmiştir. Statik durumdaki duraylılık analizlerine ek olarak, dinamik kuvvetlerin etkisi altındaki maksimum deformasyonlar da belirlenmiş elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

Dokuzuncu bölüm, İzmir Menemen Organize Sanayi Bölgesi Endüstriyel Atık Depolama Sahası'nda gerçekleştirilmiş bir vaka incelemesini içermektedir. Sahadan alınan örnek katı atık numunelerinin temel mühendislik parametreleri ve kayma mukavemeti değerleri farklı birim hacim ağırlıklar için belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, çeşitli mühendislik ve geometrik özellikler kombinasyonlarıyla modellenen şevin statik ve dinamik kuvvetlerin etkisi altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu farklar metodunu kullanan Flac 2-D programıyla yapılan duraylılık analizlerinden şev güvenlik sayıları, sonlu elemanlar metodunu kullanan Plaxis 2-D programıyla ise maksimum deformasyonlar belirlenmiştir. Yapılan deneyler ve gerçekleştirilen analizler sonucunda İzmir Menemen Organize Sanayi Bölgesi Endüstriyel Katı Atık Depolama Sahası tasarımında kullanılabilecek sınır değerler bu bölümde verilmiştir.

Onuncu bölümde çalışma boyunca elde edilen sonuçların genel bir değerlendirilmesi verilmektedir. Farklı yapı ve özellikteki KKA numuneleri ile yapılan deneylerdeki farklılıklar ve benzerlikler karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir. Ayrıca bundan sonra yapılabilecek bir çalışmanın ne şekilde geliştirilebileceği, ek olarak yapılabilecek çalışmalar ve bundan sonra KKA'lar konusunda yapılacak araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. KENTSEL KATI ATIKLAR VE ÖZELLİKLERİ

İnsan yaşamının doğal bir ürünü olan katı atık, en yalın ifadesiyle evsel, ticari ve endüstriyel işlevler sonucu oluşan ve tüketicisi tarafından artık işe yaramadığı gerekçesiyle atılan ancak çevre ve insan sağlığı yanında diğer toplumsal faydalar nedeniyle düzenli biçimde uzaklaştırılması gereken maddeler olarak tanımlanabilir (Clayton ve Huie, 1973; Erdin, 1996; Matasovic ve Kavazanjian, 1998; Palabıyık ve Altunbaş, 2004). Katı atıklar sahip oldukları özelliklere göre kendi içerisinde kentsel katı atıklar, endüstriyel katı atıklar, ticari ve kurumsal atıklar, belediyesel işlevler ile ilgili atıklar, özel atıklar, tarımsal atıklar, tıbbi atıklar, radyoaktif atıklar gibi sınıflara ayrılmaktadır. Kentsel katı atıklar, evlerden atılan mutfak çöpleri, park ve bahçe gibi alanlardan gelen tehlikeli olmayan belediye hizmeti ile toplanıp taşınan çöp depolama sahalarında bertaraf edilebilen, ayırma yolu ile geri kazanılabilen kompost yapılabilen veya yakılabilen evsel veya endüstri kökenli atıklardır.

Kentsel katı atıkların bertarafı; konutlarda ve işyerlerinde atıldıkları yerlerde geçici olarak biriktirilmesi, bu işyerlerinden toplanması, taşınması, madde ve enerji kazanmak üzere işleme tabi tutulması için yakma, kompostlaştırma, geri kazanma gibi düzenli depolanması suretiyle, çevreye ve insan sağlığına zararsız hale getirilmesi ve ekonomiye katkı sağlama işlemlerinin tümüdür (KAKY, 1991). Düzenli depolama (landfilling, sanitary landfilling), katı atıkların çevreye zarar vermeyecek ve insan sağlığını riske sokmayacak bir şekilde araziye boşaltılmasıdır. Düzenli depolamada katı atıklar sızdırmazlığı sağlanmış büyük alanlara dökülmekte, sıkıştırılmakta ve üzeri örtülerek doğal biyolojik reaktör haline getirilmesi sağlanmaktadır (Tosun, 2011).

Düzenli kentsel katı atık depolama sahaları; jeolojik, hidrojeolojik ve meteorolojik açıdan uygun, çevredeki arazi kullanım amaçlarıyla uyumlu, sızdırmazlığı sağlanmış ve gaz kontrolü yapılmış alanlarda atıkların kademeli bir şekilde depolandığı mühendislik yapılarıdır. Katı atık depolama tesisleri yol, köprü, baraj gibi diğer mühendislik yapılarına kıyasla daha karmaşık yapıdadır. Bunun en büyük nedeni katı atık depolama tesislerinde muhafaza edilen malzemeye ait özelliklerin dış etkenlere bağlı olarak değişebilmesidir. Atık gövdesi; kötü depolama, zayıf sıkıştırma, şiddetli yağmur, yüksek boşluk suyu basıncı, atık su drenaj ve gaz tahliye sistemlerinin olmaması nedenlerine bağlı olarak duraylılığını yitirebilir. Dünyada katı atık depolama tesislerinde meydana gelen göçmeler ile ilgili birçok can ve mal kaybı yaşanmıştır. Kolombiya'nın Bogota bölgesinde 1997 yılında Dona Juana atık depolama sahasında meydana gelen şev göçmesinde 800.000 m^3' lük atık harekete geçmiş ve büyük maddi kayıplara neden olmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda atık depolama sahasındaki

yetersiz drenaj sisteminin ve bu nedenle atık gövdesinde oluşan yüksek boşluk suyu basınçlarının göçmeye neden olmuş olabileceği belirtilmiştir (Merry ve diğ., 2005). Filipinlerin Quezon şehrindeki Patayas atık depolama sahasında 2000 yılında meydana gelen şev göçmesinde 330 kişi yaşamını yitirmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda şiddetli yağış, depolama sahasındaki sızıntı suyu seviyesinin yükselmesi, doğal atıkların oksijenli ve oksijensiz ortamda ürettikleri gazlar ve olması gerekenden daha dik inşa edilen şev eğiminin bu facianın gerçekleşmesinin temel nedenleri olduğu rapor edilmiştir (Koelsch ve Ziehmann, 2004). Yaşanan facialara başka bir örnek, Yunanistan'ın başkenti Atina yakınlarındaki 0,5 $km^{2,}$ lik alan üzerine oturan atık depolama sahasında 2003 yılında yaşanan şev göçmesi faciasıdır. Atık sahasında yapılan araştırmalar sonucunda şev göçmesine iki hafta önceki yangının neden olmuş olabileceği belirtilmiştir. Oluşan yangın sırasında kağıt ve plastik gibi şev duraylılığına katkı sağlayan atıklar kaybolmuş, buna ek olarak şev gövdesi içerisindeki su seviyesinin dengesinin bozulduğu belirtilmiştir. Bir diğer büyük felaket Endonezya'nın Bandung bölgesinde 2005 yılının şubat ayında gerçekleşmiş ve 148 kişi yaşamını yitirmiştir. Bu faciada 2.700.000 m^3 'lük atığın, şiddetli yağmur ve faciadan birkaç gün önceki yangın nedeni ile harekete geçtiği rapor edilmiştir (Münnich ve Bauer, 2006).

Bunlara benzer üzücü ve ekonomik kayıplara neden olan olayların önüne geçebilmek ancak özellikleri iyi tanımlanmış, maksimum direnç kuvvetleri, sıkışabilirlik değerleri, geçirimlilikleri belirlenmiş atık malzemelerinin detaylı ve iyi tasarlanmış atık depolama sahalarında muhafaza edilmesi ile mümkün olacaktır.

2.1 Katı Atık Kompozisyonu

En genel tanımı ile atık; her türlü üretim ve tüketim faaliyetleri sonunda, fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik özellikleriyle karıştıkları alıcı ortamların doğal bileşim ve özelliklerinin değişmesine yol açarak dolaylı veya doğrudan zararlara yol açabilen ve ortamın kullanım potansiyelini etkileyen katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerdir (Boztuğ, 2002). Atıklar; katı, sıvı, tehlikeli ve geri dönüşümlü olmak üzere 4 bölüme ayrılmıştır. Katı atık, evsel, ticari ve endüstriyel işlevler sonucu oluşan ve tüketicisi tarafından artık işe yaramadığı gerekçesiyle atılan ancak çevre ve insan sağlığı yanında diğer toplumsal faydalar nedeniyle düzenli biçimde uzaklaştırılması gereken maddeler olarak tanımlanabilir (Clayton ve Huie, 1973; Erdin, 1996). Atık yönetimi literatüründe katı atık kavramı sıvı, gaz veya radyoaktif atıklar dışında kalan atıklar için kullanılsa da, söz konusu katı atıkların yeniden üretim ve işleme sürecine sokulması nedeniyle artık daha fazla atık anlamı taşımayan katı ya da yarı katı maddeler için de kullanılmaktadır (Zachary, 1995).

Katı atıklar, kaynaklarına göre değişik gruplar altında incelenebilir:

Endüstriyel Atıklar: Endüstriyel işlemler sırasında ve/veya endüstriyel işlemler sonucunda oluşan atıkları kapsamaktadır. Endüstriyel katı atık yönetimi konusunda doğal kaynakların ve çevrenin korunması anlamında geri kazanım ve arıtma tesisi uygulamaları önem taşımaktadır.

Ticari ve Kurumsal Atıklar: Ticari işletmelerden ve kurumlardan ortaya çıkan atıklardır. Genel olarak evsel atıklar kadar organik madde içermeyen atıklardır. Lokanta, büfe, mağaza, okul, askeri yerleşim, liman, ofis, stadyum vb. ortak kullanım alanlarından toplanan atıklar bu kapsamda değerlendirilmektedir.

Belediyesel İşlevler ile İlgili Atıklar: Sokak süprüntüleri, park, bahçe, toptancı halleri, plaj ve mesire yerlerinden toplanan atıklar, araba hurdaları, hayvan ölüleri, su arıtma tesislerinden ortaya çıkan çamurlar bu özelliktedir.

Evsel Atıklar: Evsel faaliyetlerden oluşan artıklardır. Genellikle çöp olarak bilinen ve çoğunlukla zararsız atık grubuna ait atıklar olmakla birlikte evsel atıklar pil, boya vb. zararlı ve tehlikeli atıkları da içerebilmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen evsel katı atık bileşim yüzdeleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Evsel katı atık bileşim oranları (Wigh ve Brunner, 1981)

Kentsel Katı Atık Birleşim Oranları (%)									
Kaynak	Kağıt	Mutfak& Bahçe	Plastik	Cam	Tekstil	Kül ve Taş	Metal	Ahşap	Diğer
Wigh ve Brunner (1981)	41,8	20,6	6,9	7,8	4,1	6,1	8,3	1,8	5,6
Jones ve Malone (1982)	44,8	1,40	9	7,6	3,1	20,2	10,8	0,5	2,7
Walsh ve Kinman (1979)	42,6	14,3	8,7	12,2	-	6,1	12,2	2,6	1,3
Fungaroli ve Steiner (1979a)	55	15,0	3,0	10,0	3,0	2,0	10,0	2,0	-
Fungaroli ve Steiner (1979b)	53,5	13,0	1,5	7,7	0,8	1,5	6,7	2,3	9,8
Kemper ve Smith (1981)	48,6	12,8	5,5	11,9	5,3	5,6	7,3	2,3	0,7
Emcon Assoc. (1989)	35,5	19,6	4,2	9,1	1,1	21,2	8,0	1,3	-
Cameron (1975)	47,6	21,6	5,4	7,0	3,6	1,4	8,7	7,7	-
Ortalama	46,2	14,8	5,5	9,2	3,0	8,0	9,0	2,2	5,2

Özel Atıklar: Radyoaktif atıklar, tehlikeli ve zararlı endüstriyel atıklar, evsel atıklar içerisindeki boya, inceltici, temizlik maddeleri, piller vb., lastik tekerlekler, atık su çamurları, inşaat ve yıkıntı atıkları ile hastane atıkları gibi uzaklaştırılması önem taşıyan atıklar bu gruptadır.

Tarımsal Atıklar: Bitkisel ve hayvansal ürün elde edilmesi ve işlenmesi sonucunda ortaya çıkan atıklardır. Üretilen katı atıkların miktarı ve içerik özellikleri topluluk ya da toplumların sosyo-ekonomik özellikleri, beslenme alışkanlıkları, gelenekler, coğrafya, meslekler ve iklim gibi değişik şartlardan etkilenmektedir.

Bir başka kaynağa göre katı atıklar oluşturuldukları ortama ve içeriklerine göre evsel katı atıklar, mineral atıklar, endüstriyel atıklar, deniz dibindeki tortular, zararlı ve tehlikeli atıklar, olmak üzere 5 ana başlık altında incelenebilir (Tchobanoglous ve diğ., 1993).

Katı atıkların miktar (hacim) ve içerik olarak özelliklerinin bilinmesi, gerekli verilerin uygun yöntemlerle toplanması katı atık yönetim sistemi planlaması ve uygulamalarında etkinliğin sağlanmasında son derece önem taşımaktadır. Katı atıkların özellikleri hakkındaki bilgi ve verilerle ilgili olarak istatistiksel güvenirlilik, standart sapma, mevsimsel özellikler, yaşam standartları gibi konuların da araştırmacılar tarafından dikkate alınması gerekmektedir (Palabıyık ve Altunbaş, 2004).

2.1.1 Ülkelere Göre Katı Atık Kompozisyonu

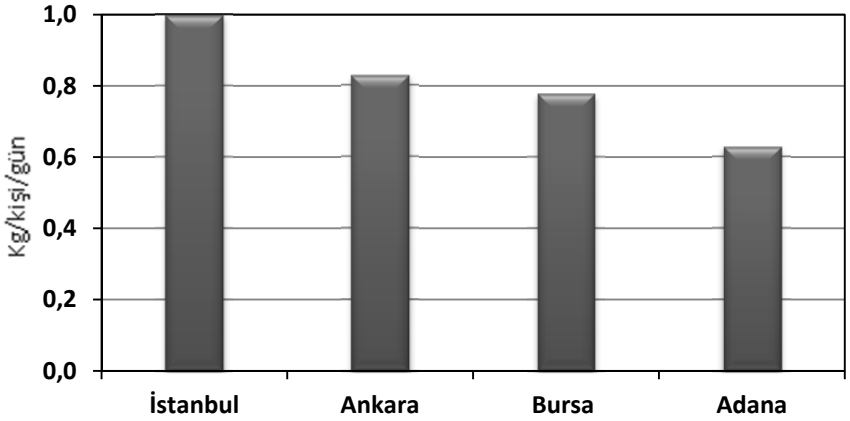
Katı atıkların kompozisyonu; gelir düzeyi, sanayi, sosyal çevre, iklim ve mevsime bağlı olarak değişiklik gösterir. Kompozisyon; katı atık sahalarından numune alarak ya da bir ülkedeki üretilen veya ithal edilen mallar arasından kullanıldıktan sonra evsel katı atık niteliği taşıyacak olanlar tespit edilerek belirlenebilir (Aykol, 2008).

Ülkelerin gelir düzeylerine göre insanların oluşturdukları katı atıklar;

i. Gelir durumu düşük olan ülkelerde; 0,4 ~ 0,6 kg/kişi/gün
ii. Gelir durumu orta olan ülkelerde; 0,5 ~ 0,9 kg/kişi/gün
iii. Gelir durumu yüksek olan ülkelerde; 0,7 ~ 1,8 kg/kişi/gün

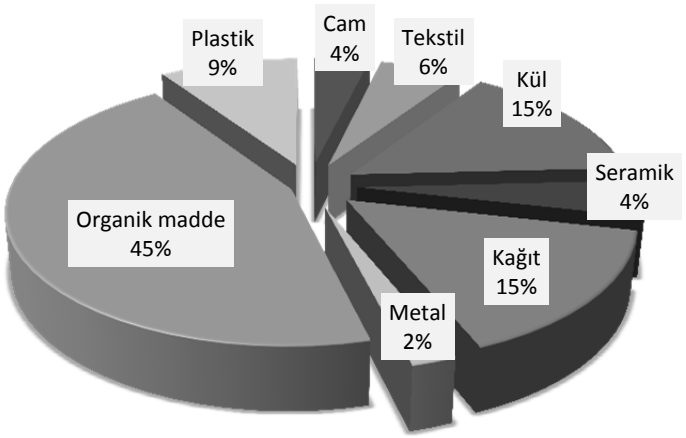
olarak gözlenmiştir (Gören, 2006). Sınıflandırmadan anlaşılacağı üzere gelir düzeyinin yükselmesine paralel olarak tüketim ve dolayısıyla atık miktarı artmaktadır.

Şekil 2.1'de dört şehrimiz için kişi başına düşen günlük atık miktarları verilmektedir. Türkiye yukarıda bahsedilen katı atık sıralamasında 0,7 ~ 0,9 kg/kişi/gün ortalaması ile orta düzeyli gelir seviyesine sahip ülkelerin katı atık ortalamasına sahiptir.



Şekil 2.1 Dört büyük şehrimize ait kişi başına düşen katı atık miktarları (Gören, 2006)

İstanbul Büyük Şehir Belediyesi'ne ait katı atıkların kompozisyonu Şekil 2.2' de verilmiştir. Atık kompozisyonunda en büyük payı %45 ile organik maddeler alırken, kağıt ve kül atıklar bunu takip etmiştir. Kompozisyondaki en düşük pay %2,2 ile metal atıklara aittir.



Şekil 2.2 İstanbul Büyükşehir Belediyesine ait katı atık kompozisyonu (Gören, 2006)

Ülkelerin gelir düzeylerine göre değişiklik gösteren atık kompozisyonu Çizelge 2.2' de yüksek, orta ve düşük gelir düzeyleri için ayrı ayrı verilmiştir. Çizelge 2.2' den görüldüğü üzere yüksek gelirli ülkelerden düşük gelirli ülkelere doğru organik atık miktarında azalma, kağıt ve metal atık miktarlarında ise artış gözlenmektedir.

Çizelge 2.2 Gelir düzeylerine göre ülkelerin katı atık kompozisyonu (Gören, 2006)

Katı Atık Bileşeni	Yüksek gelir düzeyli ülkeler (%)	Orta gelir düzeyli ülkeler (%)	Düşük gelir düzeyli ülkeler (%)
Organik madde	25	45	60
Kağıt	33	15	3
Plastik	6	5	2
Tekstil	3	7	3
Cam ve seramik	8	4	3
Metal	10	4	3
Ahşap, saman	4	3	3
Diğer	11	17	23

Çizelge 2.3'de 14 ülkeye ait katı atık kompozisyon dağılımı özetlenmiştir. Finlandiya, İsveç, Kanada gibi gelişmişlik düzeyi ve okuma yazma oranı yüksek olan ülkelerde kağıt atık oranının diğer ülkelere oranla daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 2.3 Farklı ülkelerdeki katı atıkların yüzde oranları (Gören, 2006)

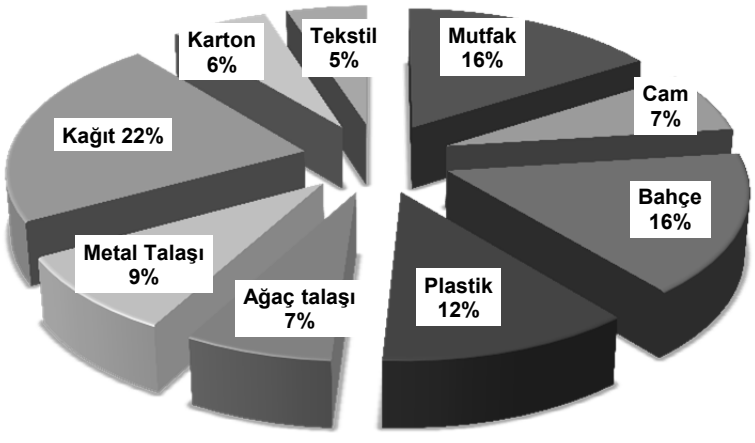
	Kentsel Katı Atık Birleşim Oranları (%)							
Ülke	Kağıt	Organik	Cam	Plastik	Metal	Tekstil	Taş veya Tuğla	Diğer
Avustralya	22,4	27,8	5,3	10,3	4,2	2,2	4,6	23,2
Kanada	38,9	33,9	6,5	4,9	6,2	3,6	1,8	4,4
Danimarka	34	30	6	6	8	-	-	16
Finlandiya	51	29	6	5	2	2	-	5
Fransa	30	25	12	6	5	4	-	18
Almanya	20,8	28,3	10,4	7,7	3,9	-	2,8	26,1
İtalya	22,3	42,1	7,1	7,2	3	-	-	18,3
Japonya	34	13	15	15	5,9	3,8	-	-
Hollanda	24,2	52,4	7,2	7,1	3,2	2,9	-	3
G. Afrika	33	31	12	7	7	-	-	9
İsveç	35-45	25-35	6-8	8-10	2-4	2-4	-	6-9
İsviçre	20,8	33	8,7	13,4	5,9	-	-	9,6
İngiltere	33,9	23,4	14,4	4,2	7,1	4,1	-	2,9
ABD	35,6	29	8,4	7,3	8,9	2,0	-	8,7

Amerika Çevre Koruma Kuruluşu (USEPA)'nın verilerine göre 1960-1990 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde; kağıt, plastik ve ahşap atıklarda bir artma gözlenirken; metal atıklar, bahçe atıkları ve yemek atıklarında da belirgin bir azalma gözlenmiştir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 1960-1990 yılları ABD evsel katı atık içerikleri (USEPA, 2009)

Atık içeriği (%)	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990
Kağıt	34,1	36,8	36,3	33,6	36,1	37,4	37,5
Cam	7,6	8,4	10,4	10,5	9,9	8,6	8,3
Metal	12,0	10,7	11,6	11,2	9,6	8,6	8,3
Plastik	0,5	1,4	2,5	3,5	5,2	7,1	8,3
Lastik, deri	2,3	2,5	2,6	3,0	2,8	2,3	2,4
Tekstil	1,9	1,8	1,6	1,7	1,7	1,7	2,9
Ahşap	3,4	3,4	3,3	3,4	4,4	5,0	6,3
Diğer	0,1	0,3	0,7	1,3	1,9	2,1	1,6
Yemek atıkları	13,9	12,3	10,5	10,5	8,7	8,0	6,7
Bahçe atıkları	22,8	20,9	19	19,7	18,2	18,2	17,9
İnorganik	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5
Toplam	100	100	100	100	100	100	100

Amerika Birleşik Devletleri'nin 1990 yılındaki katı atık kompozisyonunda Şekil 2.3'de görüldüğü gibi metal yüzdesi diğer ülkelere göre oldukça yüksektir.



Şekil 2.3 EPA'nın (1990) verilerine göre Amerika'daki evsel katı atıkların bileşimi

2.2 Katı Atık Bertaraf Etme Yöntemleri

Katı atıkların uzaklaştırılmasında binlerce yıldır uygulanan başlıca yöntemleri kısaca; düzensiz depolama (vahşi depolama (dump site)), düzenli-sıhhi depolama (landfill storage area), kompostlama (composting), geri kazanım (recycle) ve yakma (incineration) olarak özetlemek mümkündür (Palabıyık, 2001).

2.2.1 Düzensiz Depolama

Düzensiz depolama; katı atıkların yerleşim alanı dışında açık alan ve/veya deniz ve ırmaklara hiçbir önlem alınmadan gelişigüzel biçimde atılarak insan yaşam alanlarından uzaklaştırılmasıdır. Düzensiz depolama, katı atıkların çevresel ve ekonomik uygun koşullarda uzaklaştırılması yönteminden çok, toplumların katı atıkları algılamasında ilk evreyi oluşturan gözden uzak olsun anlayışıyla davrandıkları eski ve orta çağlarda kullanılmış bir yöntemdir. Günümüzde ise kalkınamamış ve/veya kalkınmakta olan ülkelerde uygulanan, ancak insan ve çevre sağlığı ile diğer ekonomik sosyal olumsuzlukları nedeniyle terk edilmesi gereken uygulama olarak değerlendirilmektedir.

2.2.2 Düzenli-Sıhhi Depolama

Katı atıkların gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda uygunluğu belirlenmiş bir alana belirli bir plan program çerçevesinde, çevre ve insan sağlığını göz önünde bulundurarak depolanıp bertaraf edilmesidir. Teknik uygulamaların gelişmesine paralel olarak depolama şekilleri de düzensiz (vahşi) depolama alanlarından, kontrollü depolama alanlarına ve en son olarak düzenli sıhhı depolamaya dönüşmüştür (Rushbrook, 1998). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2012 verilerine göre, Türkiye genelinde toplam kapasitesi 480 milyon m^3 olarak tespit edilen 80 düzenli depolama tesisinde bir yılda 24 milyon ton atık bertaraf edilmiştir (TÜİK, 2014).

2.2.3 Kompostlaştırma, Tekrar Kullanım, Geri Dönüşüm ve Geri Kazanım

Kompostlaştırma, organik esaslı katı atıkların oksijenli ortamda ayrıştırılmasıyla tarım alanlarında kullanılan yüksek verimli toprak düzenleyicisinin ortaya çıkarılması işlemidir. Kompostlaştırma sonucu elde edilen kompost, gübreden farklı olarak toprağı ıslah edici, organik değeri ve su tutma kabiliyeti yüksek bir malzemedir. Toprağın boşluk hacmini arttırıp havalandırılmasını, besin maddelerinin daha iyi kullanılmasını sağlamakta ve toprağın işlenebilirliğini kolaylaştırmaktadır (Yıldız ve diğ., 2009). Türkiye İstatistik Kurumu, Türkiye

genelinde toplam kapasitesi 389 bin ton/yıl olan 6 kompost tesisinde 159 bin ton atığın işlem gördüğünü ve 26 bin ton kompost üretildiğini belirtmiştir (TÜİK, 2014).

Tekrar kullanım; atıkların temizleme dışında hiçbir işleme tabi tutulmadan aynı şekliyle defalarca kullanılmasıdır. Atığın kendi ilk üretim amacı ya da değişik amaçlar doğrultusunda yeniden kullanımı yöntemi, geri kazanım yöntemine göre tercih edilmektedir. Çünkü atığın tekrar kullanımı için toplama ve temizleme dışında hiçbir özel işleme gerek duyulmamaktadır.

Geri dönüşüm; atıkların fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerden geçirildikten sonra ikinci hammadde olarak üretim sürecine sokulmasıdır. Geri kazanım; tekrar kullanım ve geri dönüşüm kavramlarını da kapsayan, atıkların özelliklerinden yararlanılarak içindeki bileşenleri fiziksel, kimyasal ya da biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesidir. Diğer bir deyişle geri kazanım süreci; geri kazanılabilir maddelerin katı atık yönetimi içinde toplama, taşıma, aktarma, ayırma ve pazarlama fonksiyonlarının da yer aldığı, artık kullanım dışı kalmış geri kazanılabilir maddelerin yeni bir ürün olarak geri kazanılmasıdır.

Yakma; düzensiz depolama alanlarında atıkları hacimce azaltma amacıyla kontrolsüz yakılmaları dışında, modern anlamda katı atık uzaklaştırma yöntemi olarak yakma; katı atıkların özel olarak projelendirilmiş tesislerde hacim olarak azaltma ve/veya enerji elde etmek amacıyla yakılarak uzaklaştırma ve enerji kazanım yöntemidir. Başlıca amacı depolama ile uzaklaştırılacak atık miktarının azaltılması olan yakma yöntemi ile katı atıklar hacimce %80 - 90, ağırlık bakımından %75 - 80 oranında azaltılabilir (O'reilly, 1991). Türkiye'deki toplam kapasitesi 61 bin ton/yıl olan 3 yakma tesisinde 2012 yılı içerisinde 47 bin ton tehlikeli ve 3 bin ton tehlikesiz olmak üzere toplam 50 bin ton atığın bertaraf edildiği belirtilmiştir (TÜİK, 2014).

2.3 Kentsel Katı Atıkların Mühendislik Özellikleri

KKA'lar çok farklı özelliklere sahip birçok bileşenden meydana gelmektedir. Bu nedenle KKA'ların mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Fassett ve diğ. (1994)'nin yaptıkları çalışmada KKA'ların mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde karşılaşılan bu zorlukları şu maddeler ile özetlemişlerdir:

- Tutarsız ve heterojen bileşime sahip olan KKA'ların yapısı mühendislik parametre değerlerinin geniş bir aralıkta değişim göstermesine neden olmaktadır.
- KKA'ların arazi ortamındaki doğal durumunu temsil eden yeterli boyutlarda numunelerin elde edilmesi çok zor olmaktadır.

- KKA parçacıklarının tutarsız ve kararsız hali numune alma ve deney yapma sürecini zorlaştırır. Ayrıca KKA'lar için belirlenmiş bir örnek alma, numuneyi deneye hazırlama ve deney aşamalarını tanımlayan özelleşmiş bir standartları bulunmamaktadır.
- KKA özellikleri zamana, derinliğe ve bulunduğu lokasyona göre değişiklik göstermektedir.

Bu olumsuzluklar da göz önünde bulundurularak KKA'ların mühendislik özelliklerinin detaylı ve titiz çalışmalar yürütülerek belirlenmesi gerekmektedir.

2.3.1 Kentsel Katı Atıkların Fizikokimyasal Özellikleri

Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi güvenilir ve ekonomik bir tasarımın yapılabilmesindeki ilk adım kullanılacak malzemelerin mühendislik özelliklerinin iyi tanımlanmış olmasıdır. Kentsel katı atıkların mühendislik özellikleri çevresel faktörler, yağış rejimi, kanunlar, sezon, sahip olunan bertaraf tesisleri ve buna benzer birçok özelliğe bağlı olarak büyük değişiklik gösterebilmektedir (Dixon ve Jones, 2005). Bu bölümde statik ve dinamik analizlerde mutlaka ihtiyaç duyulan "birim hacim ağırlık", birçok mühendislik parametresini dolaylı ya da direkt etkileyen "su içeriği" hakkında daha önce yapılan çalışmalar alt başlıklar halinde incelenmiştir.

2.3.1.1 Kentsel Katı Atıkların Birim Hacim Ağırlığı

Heterojen özellikteki çok farklı materyalleri içerisinde bulunduran kentsel katı atık (KKA)'ların birim hacim ağırlık (b.h.a.) değerleri; bileşim (kompozisyon), su içeriği, yıllanma, sıkıştırma (kompaksiyon), ayrışma miktarı, depolama yüksekliği (örtü yükü) ve örneğin alındığı derinliğe bağlı olarak farklılık gösterir (Langer, 2005; Zekkos ve diğ., 2006). KKA'lara ait birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenmesi statik, dinamik duraylılık analizlerinde kullanıldığı gibi yeni inşa edilmesi planlanan depolama sahalarının maksimum şev eğimleri ve maksimum depolama yüksekliklerinin belirlenmesinde de önemli parametrelerden birisidir. KKA'ların birim hacim ağırlıklarını belirlemeye yönelik yapılan çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde elde edilen birim hacim ağırlık değerlerinin çok büyük bir aralık içerisinde yer aldığı görülmektedir. Literatürde genel olarak sıkıştırılmamış ya da çok az (poorly compacted) sıkıştırılmış KKA'ların birim hacim ağırlık değerleri minimum 3 kN/m^3, iyi sıkışmış birim hacim ağırlık değeri ise maksimum 17 kN/m^3 olarak verilmektedir (König ve Jessberger, 1997; Fassett ve diğ., 1994; Zekkos ve diğ., 2006).

KKA'ların birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem vardır. Arazi ortamında birim hacim ağırlığın belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntemler büyük ölçekli atık hücreleri ve test çukurlarıdır. Depolama sahasına gelen toplam atık miktarı ve bunların kapladığı hacmin belirlenmesi ile birim hacim ağırlık değerinin hesaplanması da kullanılan diğer bir yöntemdir.

Landva ve Clark (1990), KKA'ların birim hacim ağırlık değerlerini belirlemek amacıyla Kanada'nın çeşitli bölgelerinde KKA depolama sahalarında çok sayıda test çukuru açmışlardır. Gerçekleştirilen arazi deneyleri sonucunda KKA'ların birim hacim ağırlık değerlerinin 6,8 kN/m^3 ile 16,2 kN/m^3 arasında kaldığını belirlemişlerdir. Sharma ve diğ. (1990) tarafından birçok çalışmadan derlenen birim hacim ağırlık değerlerinin 3,1 ile 13,2 kN/m^3 arasında değiştiği görülmektedir.

Los Angeles'daki Puente atık depolama sahasından alınan örnekler ile yapılan laboratuvar deneylerinde ve sahada nükleer metot ile gerçekleştirilen çalışmalarda KKA'lara ait birim hacim ağırlık değerlerinin derinlik ile değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda yüzeye yakın bölümlerdeki birim hacim ağırlık değeri 3,3 kN/m^3 olarak belirlenirken 60 m derinliğine inildiğinde birim hacim ağırlık 12,8 kN/m^3 değerine ulaşmıştır (Earth Technology, 1988). KKA'ların atık sahasına getirildiği durumdaki birim hacim ağırlık değeri, üzerine etki eden örtü yükünün etkisiyle ani olarak artış göstermektedir. Atık depolama sahasına getirilen atıkların üzerine serilen örtü tabakası ve uygulanan sıkıştırma işlemleri de birim hacim ağırlık değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Zornberg ve diğ. (1999) güney California bölgesindeki atık depolama sahasında yapılan saha ölçümleri ve spektral yüzey dalga analizleri (Spectral Surface Wave Analysis, SASW) yardımıyla derinlik ile birim hacim ağırlık değişimini incelemişlerdir. Araştırmalar sonucunda atık yüzeyinin alt kısmında 8 ile 50 m arasında değişen birim hacim ağırlık değerlerinin 10 ile 15 kN/m^3 arasında değişiklik gösterdiğini rapor etmişlerdir.

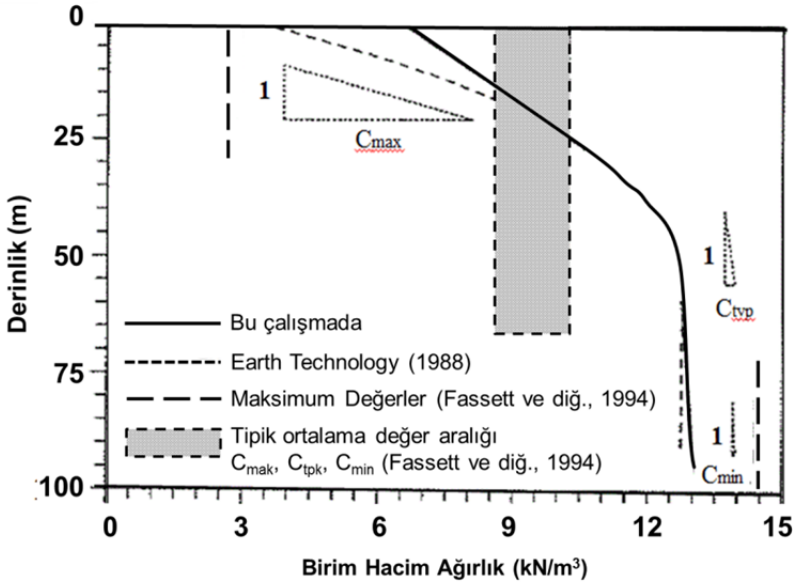
Çizelge 2.5'de çeşitli kaynaklardan elde edilen farklı özelliklere sahip atıkların ölçülen birim hacim ağırlık değerleri özetlenmektedir.

Çizelge 2.5 Katı atıkların çeşitli koşullardaki b.h.a. değerleri (Aykol, 2008)

Kaynak	**Katı atık yerleştirme şekli**	**Birim hacim ağırlık (kN/m^3)**
Amerikan Ordu Şube Başk.(1983)	Parçacıklara ayrılmamış	
	- Az sıkışmış	3,20
	- İyi sıkışmış	6,41
	- Çok iyi sıkışmış	9,61
	Parçacıklara ayrılmış	8,81
Sowers (1968)	Sıkıştırılmaya bağlı olarak	4,81 ~ 9,61
NSWMA (1985)	Katı atık sahasında ayrışmadan önce	7,05 ~ 7,69
	Katı atık sahasında ayrışmadan sonra	10,09 ~ 11,21
Landva ve Clark (1986)	Katı atık sahasında	9,13 ~ 13,46
EMCON (1989)	Katı atık sahasında	7,37

Tchbanoglous (1977) gerçekleştirdiği çalışmada büyük boyuttaki atıkların ayıklanması ile geri kalan nispeten daha küçük parçacıkların daha iyi sıkışması sonucu birim hacim ağırlık değerlerinin 11 kN/m^3 mertebesine ulaştığını belirlemiştir.

Kavazanjian ve diğ. (1995) yaptığı çalışmada derinlikle birim hacim ağırlığın değişimini incelemiştir. Yüzeye yakın bölgedeki birim hacim ağırlık değeri ortalaması 6,5 kN/m^3 seviyesindeyken 45 m derinliğe inildiğinde birim hacim ağırlık 13,0 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen birim hacim ağırlıkların derinlik ile değişimi Şekil 2.4'de verilmektedir. San Francisco Tri-Cities katı atık sahasında yapılan deneylerde doğal atıkların birim hacim ağırlığının derinlikle değişimini test çukurlarıyla belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan deneylerde yüzeydeki ortalama birim hacim ağırlık değerleri 10 kN/m^3 olarak belirlenirken, 50 m derinlikteki birim hacim ağırlık ortalama değerleri 15 kN/m^3 olarak belirlenmiştir (Matsovic ve Kavazanjian, 1999).



Şekil 2.4 Toplam birim hacim ağırlık değerlerinin derinlik ile değişimi (Kavazanjian ve diğ., 1995)

Derinlik etkisi yanında zaman faktörü de birim hacim ağırlık parametresini etkileyen faktörlerden biridir. Katı atıkların birim hacim ağırlık değerlerinin zamana bağlı değişimini inceleyen Zekkos (2005) farklı oranlarda oluşturduğu numuneleri 0 ile 80 kPa'lık çevresel basınçlar altında test etmiş ve 8 ile 13 kN/m^3 arasında değişen birim hacim ağırlık değerleri elde etmiştir. Bu çalışma sonucunda zamana bağlı birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenmesi için denklem 2.1'i önermiştir:

$$\frac{\gamma_t(t)}{\gamma_t(t=1\,gun)} = 0.0173\,\log(t) + 1.006 \qquad (2.1)$$

Denklem 2.1'de γ_t (t) istenilen zamandaki birim hacim ağırlık, γ_t (t=1) ise ilk günkü birim hacim ağırlık değeridir. Zekkos (2005) birim hacim ağırlığın derinliğe bağlı değişimi için de denklem 2.2'yi önermiştir:

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{a + b.z} \qquad (2.2)$$

Denklemde γ_i yüzeydeki birim hacim ağırlık değerini, z ilgili derinliği, a ve b parametreleri sıkıştırılma derecesine bağlı olarak Çizelge 2.6'dan elde edilir.

Çizelge 2.6 KKA'ların sıkıştırılma derecelerine göre a ve b parametreleri (Zekkos ve diğ., 2006)

Sıkıştırılma derecesi	γ_i (kN/m^3)	b (m^3/kN)	a (m^4/kN)
Yetersiz	5	0,1	2
Orta	10	0,2	3
İyi	15,5	0,9	6

Çizelge 2.6'dan görüldüğü üzere KKA'lara uygulanan sıkıştırma miktarı arttıkça a ve b parametreleri de belirli oranda artış göstermektedir.

2.3.1.2 Kentsel Katı Atıkların Su İçeriği

Kentsel katı atıkların su içeriği, ayrışma süreci ve birçok mühendislik parametresini önemli ölçüde etkilemektedir (Dixon ve Jones, 2005; Langer, 2005). Kentsel katı atıkların su içeriği değerinin belirlenmesine dair literatürde üç farklı metot bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kuru ağırlık ölçümüne dayalı su içeriği, ikincisi ıslak ağırlık ölçümüne dayalı su içeriği ve son olarak üçüncüsü de su içeriğinin hacimsel olarak belirlendiği metotlardır (Sharma ve Reddy, 2004). Beaven ve Powrie (1996) katı atıklar için su içeriği değerini; zemin mekaniği tanımıyla aynı şekilde, suyun kütlesinin kuru atık kütlesine oranı olarak tanımlamışlardır.

Atıklar sahada depolandıktan sonra absorpsiyon kuvvetlerinin ya da yağışların etkisi ile karton, kağıt ve tekstil gibi atıklarının su muhtevalarında artış gözlenebilmektedir. Literatürde atıkların su içeriğinin, derinlikle değişimini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Hossain, 2002). Su içeriği atık kompozisyonu, yağış miktarı, nem ve mevsimsel etkilere bağlı olarak değişmektedir (Tchobanoglous ve diğ., 1977).

Gomes ve diğ. (2002) Portekiz'in Santo Tirso adlı katı atık depolama sahasında yaptıkları çalışmada; yeni depolanmış atıkların su içeriğini %61 - %96 aralığında belirlerken, 2-3 yıllık depolanmış atıklardaki su içeriği değerinin %117'ye ulaştığını belirlemişlerdir. Çeşitli araştırmacılar tarafından farklı bölgelerde belirlenen KKA su içeriği değerleri Çizelge 2.7'de verilmektedir.

Çizelge 2.7 Çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilen su içeriği değerleri (Hossain, 2002)

Kaynak	Su içeriği (%)
Sowers (1973)	10 - 50
Gifford (1990)	14 - 68
Landva ve Clark (1990)	15 - 125
Blight ve diğ. (1992)	10 - 100
Huitritic (1981)	15 - 40
Tchobanoglous ve diğ. (1993)	15 - 45
Coumoulos ve diğ. (1999)	20 - 125
Gabr ve Valero (1995)	30 - 130

Çizelge 2.7'den görüldüğü üzere KKA'ların su içeriği değeri %10 ile %130 arasında çok geniş bir aralıkta değişik değerler alabilmektedir. Su içeriği; atık kompozisyonu, numune derinliği ve mevsimsel etkenlere bağlı olarak büyük değişiklik gösterebilmektedir.

2.3.2 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

Katı atık sahalarında daha fazla atığın depolanabilmesi için sıkıştırma işlemi uygulanmaktadır. İyi bir sıkıştırma sağlanabilmesi için katı atıkların maksimum kuru birim hacim ağırlık ve buna karşılık gelen optimum su içeriği değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu değerler tıpkı zeminlerde olduğu gibi kompaksiyon deneyi ile belirlenmektedir. Deneylerin yapılacağı ekipmanlar, kullanılan materyallerin maksimum dane boyutuna göre standartlarda belirtildiği sınırlamalara uygun olarak seçilir.

Atık malzemeler kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen kompaksiyon eğrisi genellikle zeminlere kıyasla daha yassı ve maksimum noktası daha az belirgin şekildedir (Wong, 2009). Kuru birim hacim ağırlık değerindeki değişim, su içeriği değişikliklerine, zeminlerle kıyaslandığında daha az duyarlıdır. KKA'lara ait optimum su içeriği değerlerinin zeminlere kıyasla çok daha yüksek değerler aldığı çeşitli çalışmalarda belirlenmiştir (Gabr ve Valero 1995; Hettiarachchi ve diğ., 2005; Itoh ve diğ., 2005; Reddy ve diğ., 2009a).

Itoh ve diğ. (2005) atık karışımlarıyla Standart ve Modifiye Proctor kompaksiyon deneyleri yapmıştır. Bu çalışmada 550 kJ/m^3 ile 600 kJ/m^3 arasında sıkıştırma enerjisi üreten Standart Proctor kompaksiyon deneyleri sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlığı 5,9 kN/m^3, optimum su içeriğini %20 olarak belirlemişlerdir. Buna karşılık 2,500 kJ/m^3 ile 2,700 kJ/m^3 arasında enerji üreten Modifiye Proctor kompaksiyon testlerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 7,8 kN/m^3'e yükselirken, optimum su içeriği %10'a düşmüştür.

Kentsel katı atıkların kompaksiyon davranışları üzerinde dane boyutu dağılımının da etkisi bulunmaktadır. Hettiarachchi (2005) laboratuvar ortamında üretilen maksimum dane boyutunun 12,5 mm ile sınırlandırıldığı atık numuneleri ile deneyler gerçekleştirmiştir. Laboratuvar ortamında üretilen atık numuneler temsili Amerika Birleşik Devletleri atık kompozisyon oranları kullanılarak üretilmiştir. Standart Proctor deneyleri sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 5,15 kN/m^3, optimum su içeriği %62 olarak belirlenmiştir. Reddy ve diğ. (2009a) Orchard Hills (Illinois, USA) doğal atık depolama sahasından alınan ve maksimum dane boyutunun 40 mm ile sınırlandırıldığı atık örnekleri ile Standart Proctor deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 4,12 kN/m^3 buna karşılık gelen optimum su içeriği değeri ise %70 olarak rapor edilmiştir. Çalışma sonunda sonuçlar Hettiarachchi (2005)'nin çalışması ile karşılaştırılmış ve aradaki farklılıkların nedeninin kullanılan maksimum dane boyutu sınırlaması (D_{maks}=12,5 mm – D_{maks}=40 mm) ve bileşenlerin farklı dane boyutu dağılımlarından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Oweis ve Khera (1998) yaptıkları çalışmada farklı enerjiler uygulayarak, çeşitli ortamlarda değişik dane boyutlarındaki KKA'ların birim hacim ağırlıklarını özetlemişlerdir (Çizelge 2.8).

Çizelge 2.8 Çeşitli ortamlardaki KKA'ların b.h.a. değerleri (Oweis ve Khera, 1998)

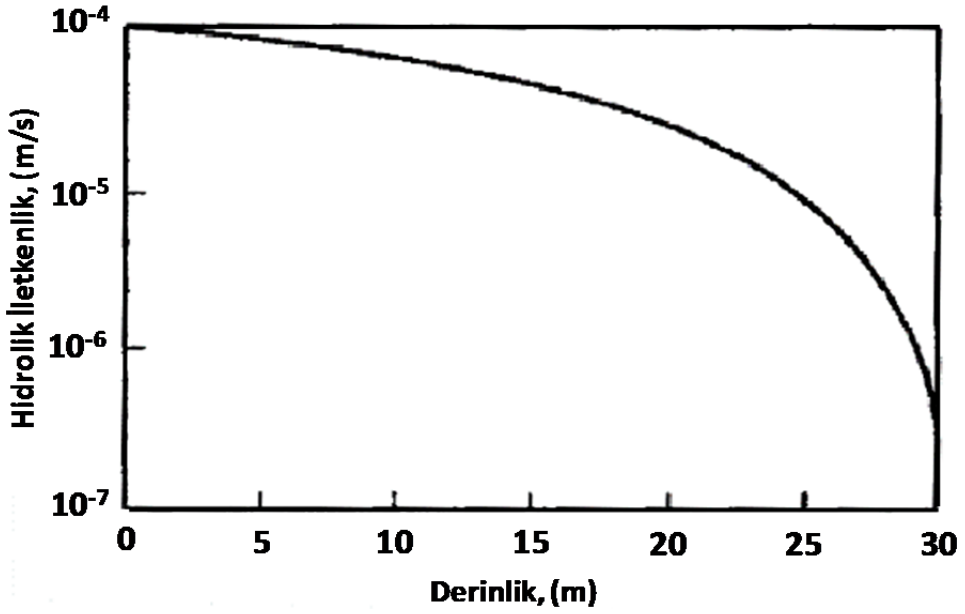
KKA durumu ve türü	**Toplam b.h.a. (kN/m^3)**
Zayıf sıkıştırılmış	2,80 - 4,70
Ortadan iyi düzeye sıkıştırılmış	4,70 - 7,10
İyiden mükemmel düzeye sıkıştırılmış	7,10 - 9,40
Balya şeklinde	5,50 - 10,50
Parçalanmış (doğranmış) şekilde	6,40 - 10,50
Doğal ortamındaki yoğunluk	5,50 - 6,90
Kanada'ya ait kka numuneleri	6,80 - 14,00
Aktif durumdaki sızıntı suyu içeren atık	6,60
ABD'nin kuzeyindeki aktif sahadan alınmış KKA numuneleri	4,60 - 6,30

Çizelge 2.8'den görüldüğü gibi rapor edilen birim hacim aralık değerleri 2,8 kN/m^3 ile 14,0 kN/m^3 gibi çok geniş bir aralıkta değişim göstermektedir.

2.3.3 Kentsel Katı Atıkların Hidrolik İletkenliği

Kentsel katı atıkların hidrolik iletkenliği, depolama sahasındaki atıkların fizikokimyasal ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Depo gövdesinde oluşan sızma suyu basınçlarının, kayma dayanımı ve sıkışabilirlik üzerinde oluşturacağı muhtemel tehlikelerin tasarım aşamalarında hesaba katılması açısından hidrolik iletkenliğin belirlenmesi önemlidir. Powrie ve Beaven (1999) hidrolik iletkenlikle ilgili yaptıkları çalışmalar sonucunda bir çok şev kaymasının nedeninin sızma sıvısının yüksek boşluk basınçlarının, efektif gerilmeleri ve kayma dayanımını azaltması olarak belirlemişlerdir (Brink ve diğ., 1999; Hendron ve diğ., 1999).

Bir depolama sahasında derinlere inildikçe atıklar üzerine etki eden efektif gerilmeler artar. Efektif gerilmelerin artmasına paralel olarak atıkların yoğunlukları da artar (Powrie ve Beaven, 1999). Bleiker ve diğ. (1993) Brockwest atık depolama tesisinde yaptığı çalışmada derinlere indikçe delicilerin daha fazla zorlandığını belirtmiştir. Bu durum derinliğe paralel olarak atık yoğunluğunun artış gösterdiğini desteklemektedir. Yoğunluk değişimine bağlı olarak KKA'ların hidrolik iletkenlikleri derinlikle değişim göstermektedir (Şekil 2.5). Şekil 2.5'den görüldüğü gibi yaklaşık 30 m derinlikten sonra hidrolik iletkenlik değeri 10^{-6} m/s değerine ulaşmıştır.



Şekil 2.5 Hidrolik iletkenliğin derinlikle değişimi (Powrie ve Beaven, 1999)

Fungaroli ve Steiner (1979) kentsel katı atıkların iç yapısını laboratuvar ve arazi şartlarında detaylı şekilde incelemişlerdir (Shank, 1993). Çalışmalarında doygun durumdaki hidrolik

iletkenlik katsayısının (k_s); ortalama dane boyutunun ve yoğunluğun bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ufak parçalara ayrılmış katı atığın doygun hidrolik iletkenlik katsayısı 2 x 10^{-4} cm/s ile 1,1 x 10^{-2} cm/s arasında değer almaktadır. Chen (1995) hidrolik iletkenliğin yoğunluk ve hidrolik eğim ile etkileşimini incelemiştir. Sabit seviyeli permeabilite deneyleri 160 kg/m^3, 320 kg/m^3 ve 480 kg/m^3 olan üç farklı yoğunluk ve iki farklı hidrolik eğim değerleri (2 m/m - 4 m/m) için yapılmıştır. Tamamlanan deneyler sonucunda permeabilite katsayısının 160 kg/m^3 yoğunluk için 9,6 x 10^{-2} cm/s değerini, 480 kg/m^3 yoğunluk için 4,7 x 10^{-5} cm/s değerini aldığı belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde hidrolik eğimin, hidrolik iletkenlik üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır.

Rijit duvarlı permeabilite hücresinin yanı sıra esnek duvarlı permeabilite deneyleri de kentsel katı atıkların hidrolik iletkenlik deneylerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Korman ve diğ. (1986) taze atık numuneler kullanarak esnek duvarlı permeabilite deneyleri yapmışlardır. Arazi sıkılığında hazırladıkları numunelerin doygun permeabilite katsayıları 2 x 10^{-5} cm/s ile 3 x 10^{-7} cm/s arasında değerler almıştır.

2.3.4 Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirliği

Atıkların sıkışabilirlik özelliği düzenli atık depolama sahalarının tasarlanmasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametrelerin başında yer alır. Katı atıklarda meydana gelebilecek sıkışmalar, atık depolama tesislerinin doğru ve optimum şekilde tasarlanabilmesi, katı atık sahası kullanım ömrünü tamamladıktan sonra üstüne inşa edilecek park, bahçe, spor sahasının güvenliği, saha içerisinde bulunan atık suyu toplama ve gaz tahliye sistemlerinin güvenliği açısından önemlidir. Katı atık depolama sahasında meydana gelebilecek aşırı oturmalar gaz ve atık suyu tahliye sistemlerinde hasarlara neden olmaktadır. Bunun devamında zarar gören atık su tahliye sisteminden sızan sular geçirimsiz tabaka üzerinde birikerek depolama koşullarını tehlikeye atmaktadır. Ayrıca düzenli depolama sahalarının optimum koşullarda ve maksimum süreyle kullanım ömürlerini tamamlayabilmeleri açısından kentsel katı atıkların sıkışma davranışlarının en iyi şekilde önceden belirlenmesi gerekmektedir (Grisolia ve diğ., 1991; Langer, 2005; Leonard ve diğ., 2000; Singh, 2008).

Depolama sahalarında meydana gelen oturmalar hacimsel olarak azalmaya neden olmaktadır, bu azalma sayesinde yeni gelecek atıklar için ekstra depolama hacmi oluşmaktadır. Atık depolama sahalarında meydana gelen deformasyonlar atık kompozisyon oranları, çevresel etmenler ve yükleme tarihçesine bağlı olarak şekillenir. Atığın mekanik yapısının kırılması ya da bükülmesi, büyük boşluklu atıkların içerisine daha küçük atıkların

girmesi, organik atıkların ayrışmaya uğraması, korozyon ve oksitlenme gibi inorganik tepkimeler, basınç ve çevre şartlarına bağlı olarak oturma ve sıkışmalar gözlenir.

Atık depolama sahalarında meydana gelen oturmalar ilk olarak Sowers'ın 1973 yılında yaptığı çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmada oturmalar fizikokimyasal ve biyolojik bozunmalara bağlı olarak değişiklik gösteren dört alt kategoriye ayrılmıştır. Alt kategoriler arasında yer alan biyolojik ayrışma; diğerlerine oranla daha karmaşık bir yapıya sahip, sıcaklık ve pH değerlerine bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilen ve günümüzde halen net olarak bilimsel bir formülle açıklanamamıştır. Fizikokimyasal ayrışma; atıkların oturma davranışında önemli rol oynayabilen ve en az biyolojik ayrışma kadar karmaşık bir yapıya sahip olan diğer bir alt kategori olarak incelenir. Oksitlenme ve korozyon tepkimeleri, kullanım ömürlerini tamamlamış ve kapatılması planlanan düzenli atık depolama tesislerinin güvenli şekilde tasarlanması ve oluşabilecek olası tehlikelerin önlenmesi açısından son derece önemlidir.

Atık ortamında oksijenin olup olmaması eğer varsa miktarı oturma davranışında aktif rol oynayacak organizmaları belirlemektedir (Watson, 1982). Yapılan çalışmalar sonucunda oksijenli ortamda meydana gelen ayrışmaların oksijensiz tepkimelere oranla çok daha kısa sürede meydana geldiği ve 12 kat daha fazla ısı ortaya çıkardığı belirlenmiştir (Stone, 1975). Oksijenli ortamdaki ayrışmalar oksijensiz ortamdan çok daha hızlı gerçekleşir. Laboratuvar ortamında iki farklı depolama hücresinde oksijenli ve oksijensiz ayrışmaya bırakılan atıklar incelendiğinde, oksijenli ayrışmaya bırakılan hücrede %25 daha fazla hacim azalması olduğu belirlenmiştir (Stone, 1975).

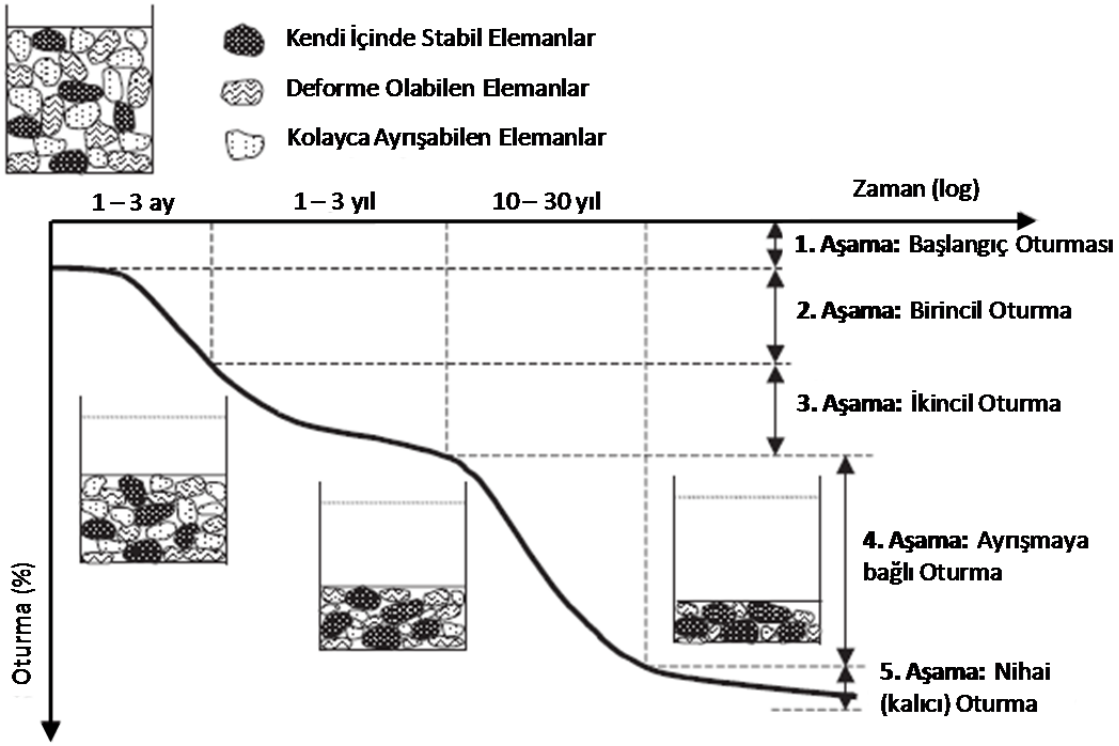
Literatürde bazı araştırmacılar tarafından kentsel katı atıkların sıkışabilirliği, artan düşey yüklemeye bağlı olarak gelişen ani sıkışma (immediate compression) ve sabit yük altında daha uzun sürede gerçekleşen gecikmeli sıkışma (delayed compression) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birçok araştırmada ani ve gecikmeli sıkışma yerine birincil ve ikincil sıkışabilirlik terimleri de kullanılabilmektedir. Ancak, birincil sıkışma kentsel katı atıklarda pek rastlanmayan boşluk suyu basınçlarının zamana bağlı sönümlenmesiyle açıklanmaya çalışılmaktadır. Ertelenmiş (gecikmeli) sıkışmanın yerini alan ikincil sıkışabilirlik, mekanik ve biyolojik ikincil sıkışma olarak ikiye ayrılabilir.

Manassero ve diğ. (1996) yaptıkları çalışmada sıkışma mekanizmasının birincil ve ikincil sıkışma olmak üzere iki ana bileşenden meydana geldiğini belirtmişlerdir. Birincil sıkışma yükün uygulanmasıyla ani olarak fiziksel yapıda danelerin eğilmesi, bükülmesi, ezilmesi ya da yeni bir yerleşme düzenine girmesi (reorientation) ile meydana gelir. Birincil sıkışma bir veya iki gün ile birkaç hafta arasında gerçekleşmektedir. Birincil sıkışmanın temel nedeni atığın

kendi ağırlığıdır. Günlük olarak depolama sahasına getirilen atıklar efektif gerilmelerin artmasına neden olur. Çok geniş bir alana yapılan homojen yükleme tek boyutlu konsolidasyon teorisi ile açıklanabilmektedir. Düşey yöndeki efektif gerilmelerin artışı, düşey birim şekil değiştirmelerin artışına neden olmaktadır (Fassett ve diğ., 1994; Dixon ve diğ., 2004). İkincil sıkışma ise oksitlenme, korozyon gibi kimyasal tepkimeler ile ayrışma, bozunma gibi biyokimyasal olayların neden olduğu tamamlanması birincil sıkışmaya kıyasla çok daha uzun olan bir süreçtir. İkincil sıkışma sürecinde başrolü oynayan bileşen biyolojik bozunmadır. İkincil sıkışma atık depolama sahasının kullanım ömrü boyunca devam edecek bir süreç olup, toplam sıkışmanın önemli kısmını oluşturur (Oweis ve Khera, 1998; Gourc ve diğ., 1998; Fassett ve diğ., 1994; Manassero ve diğ., 1996).

Edil ve diğ. (1990) kentsel katı atıkların sıkışabilirliğini beş aşamada incelemişlerdir. Birincisi; mekanik bükülme, eğilme, ezilme ve yeni düzene geçmenin (reorientation) neden olduğu fiziksel sıkışmadır ve ani olarak meydana gelmektedir. İkincisi; küçük parçacıkların boşluklara ya da büyük parçacıkların arasına girmesiyle gerçekleşen (Ravelling settlement) çözülme oturmasıdır. Konsolidasyon mekanizmasının neden olduğu tüm atık iskeletinde ya da bölgesel meydana gelen sıkışmalar üçüncü sırada yerini alır. Dördüncü sırada organik maddelerin biyolojik bozunması sonucu meydana gelen ayrışma (çürüme) sıkışması bulunmaktadır. Son olarak beşinci sıkışma aşaması ise fizikokimyasal olayların bir sonucu olarak bileşenlerde meydana gelen yıkılma ve çökmelerin neden olduğu sıkışmalardır.

Şekil 2.6'da Grisolia ve Napoleoni (1996)'nin beş aşamada inceledikleri KKA'ların oturma evrelerini gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Katı atıkların zaman içerisindeki oturma evreleri (Grisolia ve Napoleoni, 1996)

Birinci aşama yüklemenin yapıldığı anda ani olarak meydana gelmektedir. İkinci aşama, zeminlerde de görülen zamana bağlı aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesiyle meydana gelmektedir. Üçüncü aşamadaki ikincil oturma, KKA danelerinin oksidasyon ve korozyona bağlı bükülme, eğilme mekanizmalarının sonucunda gerçekleşir. Dördüncü aşama organik maddelerin zaman içerisinde ayrışması sonucu meydana gelen ayrışmaya bağlı oturmalardan meydana gelmektedir. Bu aşama diğerlerine kıyasla çok daha uzun sürmektedir. Son olarak beşinci aşamada nihai oturmalar depolama sahasının kullanım ömrü süresince devam edecek olan oturma aşamasıdır.

Terzaghi tarafından 1943 yılında geliştirilen konsolidasyon teorisi, suya doygun kil zeminlerin zamana bağlı oturma miktarlarının belirlenmesinde günümüzde de geçerliliğini korumaktadır. Ancak doğal ortamında tam doygun olmayan ve zeminlere kıyasla farklı mekanik özelliklere sahip olan atıklar için konsolidasyon teorisinin kullanılması uygun olmamaktadır (Liu ve diğ., 2006). Bu nedenle atıkların oturma miktarlarının belirlenmesinde denetleme ve gözleme dayalı sürekli takip sistemlerinin kullanılması yaygınlaşmıştır ve bu yöntem atıklar için kullanılmasının yanı sıra zemin dolgu ve kazılarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, Asaoka (1978) yaptığı çalışmada yumuşak bir zemin üzerine oturan dolguda meydana

gelecek nihai oturmaların belirlenmesi amacıyla gözleme dayalı incelemeyi kullanmıştır. Buna benzer olarak heterojen katmanlardan oluşan ve geleneksel konsolidasyon teorisinin uygulanabilir olmadığı ya da büyük deformasyon yapan zeminlerde gözlem ve denetime dayalı metot sıklıkla kullanılmaktadır (Tan ve diğ., 1991).

Kentsel katı atıklar; atık kompozisyonuna, ortam sıcaklığına, çevresel ve düşey yöndeki gerilmelere, sıkıştırma ekipmanı ve tekrar sayısına, sıkıştırılan tabaka sayısı ve kalınlığına, ayrışmaya uğrayabilecek madde miktarına, su muhtevasına bağlı olarak farklı oranlarda oturma gösterebilirler. Çizelge 2.9 farklı çalışmalardan elde edilen en büyük oturma miktarı değerlerini ve yüzdelerini özetlemektedir (Aykol, 2008).

Çizelge 2.9 Katı atıkların sahalarındaki oturma oranları (Aykol, 2008)

Yükseklik (m)	Dolgu yaşı (yıl)	En büyük oturma (m)	En büyük oturma (%)	Atık sahası	Kaynak
15	3	0,50	3	İspanya	Sanchez ve diğ. (1995)
6,7	0	0,10	1	Kaliforniya	Merz ve Stone (1962)
36	2	1,90	5	Kaliforniya	Edil ve diğ. (1991)
15	0	2,20	15	Kaliforniya	El-Fadel ve Al-Rashed (1998)
18,6	2	2,50	13	İngiltere	Cheney (1983)
3	0	1,40	47	A.B.D	Gandolla ve diğ. (1992)
1,5	0	0,20	1	A.B.D	Rao ve diğ. (1977)
2	0	0,60	30	Kore	Kang ve diğ., (1997)
2	0	0,30	15	Kore	Lee ve diğ. (1995)
27	3	9,78	36	Santa Monica	Huitric (1981)
3	2	0,60	20	A.B.D	Bjarngard ve Edgers (1990)
1,9	8	0,20	11	Naji Adası	Env. Sci. Eng. (1994)
24	23	1,43	6	Connecticut	Keene (1977)
50	8	3,20	6	Michigan	Dodt ve diğ. (1987)
9	25	1,10	12	Massachusetts	Stulgis ve diğ. (1995)

Reinhart ve Al-Yousfi (1996) Kaliforniya katı atık sahasındaki atık suyu drene edilmiş bir katı atık hücresinde deneyler gerçekleştirerek, toplam sıkışmanın başlangıç yüksekliğinin %20'si kadar meydana geldiğini gözlemişlerdir. Kuru atıkların bulunduğu bir depo hücresinde ise başlangıç yüksekliğinin ancak %8'i kadar oturma meydana geldiğini belirlemişlerdir. Fransa'nın Rauen şehrinde 6,0 ~ 9,0 m yüksekliğinde depolanmış bir katı atık sahasında, titreşimli silindirin 2 kez geçmesiyle yapılan dinamik kompaksiyon deneyinde 0,70 ~ 1,50 m arasında değişen sıkışmalar oluştuğu belirlenmiştir (D'Appolonia, 1978). Menard ve Broise

(1975) ise 6 ~ 16 m arası yükseklikte depolanmış bir katı atıkta 3 ve 6 geçişle 115 ve 245 ton.m/m^2 bir sıkıştırma enerjisi uygulamıştır. Bunun sonucunda 0,4 ~ 0,5 m'lik oturmalar gözlemlemiştir. Katı atıklara dinamik kompaksiyon ile sıkıştırma enerjisi uygulanması sonucunda boşluk oranı ve buna bağlı oksijenle temas yüzeyi azalır. Oksijenle daha az temas eden atıkların ayrışma ve ikincil sıkışma miktarı azalır. Gerçekleştirilen dinamik kompaksiyon uygulamaları sonucunda birincil oturmada %70, ikincil oturmada %50'ye varan azalmalar gözlemlenirken, boşluk suyu basınç değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

Kavazanjian ve diğ. (1999) Californiya'nın Monterey Park atık depolama sahasında yaptıkları çalışmalarında yeniden oluşturulan (reconstituted) numuneler üzerinde tek yönlü sıkışma deneyleri yapmışlardır. Yaklaşık 460 mm çapında ve 467 mm yüksekliğindeki sıkışma hücresinde atık numunelerine 2000 kPa kadar sıkışma kuvvetleri uygulanarak ani (immediate compression) ve gecikmeli (delayed compression) sıkışmaların mekanik bileşenleri incelenmeye çalışılmıştır. Atık depolama sahasından 35 m derinlikten alınan 11-35 yıllık numuneler arazi ortamındaki su içeriği ve birim hacim ağırlık değerlerine getirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Kentsel katı atıkların ani sıkışabilirliğini belirlemek amacıyla toplamda 8 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda sıkışma indeksi (compression index, C_c) 0,121 – 0,247 arasında değerler almış ve ortalama değer 0,185 olarak belirlenmiştir. Modifiye yeniden sıkışma indeksi (recompression index, C_r) 0,003 – 0,017 arasında değişirken ortalama değer olarak 0,012 belirlenmiştir. İkincil sıkışma indeksinin ortalama değeri (C_α) 0,0035 olarak belirtilmiştir. Modifiye edilmiş yeniden sıkışma indeksi değerlerinin beklenenden düşük olduğunun altı çizilmiştir. Başlangıç birim hacim ağırlık değerlerinin sıkışabilirlik üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla 12,10 ve 14,04 kN/m^3 iki farklı birim hacim ağırlık değerlerindeki numuneler üzerinde sıkışma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda daha düşük birim hacim ağırlık değerine sahip numunenin daha yüksek başlangıç (initial) sıkışabilirlik özelliği olduğu belirlenmiştir. Ancak, daha yüksek normal gerilme değerlerine çıkıldığında dahi iki numune arasındaki sıkışabilirlik özellikleri benzerlik göstermesine rağmen başlangıç birim hacim ağırlık değerlerinin neden olduğu etkiler hiçbir zaman tam olarak silinememiştir.

Landva ve diğ. (2000) Kanada'nın New Brunswick bölgesinde Spruce Lake atık depolama sahasında bir boyutlu sıkışma deneyleri yapmışlardır. Bu çalışmada toplam oturmayı ani (immediate), kısa zamanlı (instant) ve gecikmiş (delayed) sıkışma olmak üzere üç bileşene ayırmışlardır. Ani (immediate) sıkışma atık sahasına gelen yeni atık yüklemesi sırasında oluşan yanal birim deformasyonun bir sonucu olarak anlık gerçekleşir. Kısa zamanlı (instant) sıkışabilirlik, kısa dönemde meydana gelen oturmaları ifade eden birincil sıkışmanın yerini

alır. Landva ve diğ. (2000) çalışmalarında düşey olarak ikiye ayrılabilen dairesel kesitli bir hücre kullanmışlardır. Yükleme yapıldığında yanal gerilmelerin kayıt altına alınmasıyla K_0 ve aktif yanal basınç değerleri belirlenmiştir. Deneyler beş farklı yapay atık numunesinin 7,9 ile 8,6 kN/m^3 birim hacim ağırlık değerleri arasında hazırlanmasıyla yapılmıştır. Dane boyutu 150 mm'den daha büyük atıklar ayrılarak numunelere 0 ile 180 kPa arasında gerilmeler uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda sükûnetteki yanal basınç katsayısının 0,35 ile 0,40 arasında değişen değerler aldığı belirtilmiştir. Deneylerde K_o en kritik (ya da en büyük) değerini uzun dönem sonunda yani ayrışabilir lifli yapıların ortadan kalktığı zaman almıştır. Birincil konsolidasyon indeksinin 0,17 ile 0,24 arasında değiştiği rapor edilmiştir. Ertelenmiş (delayed) sıkışma indeksi parametresine karşılık gelen ikincil sıkışma indeksi nispeten daha dar bir aralıkta 0,011 ile 0,016 arasında değişen değerler almıştır. Başka bir çalışmada ise Avusturalya'nın Melbourne bölgesindeki atık depolama sahasında sızdırma suyu devir daimli test hücresi kullanılarak dört yıl boyunca meydana gelen oturma davranışları hem arazi ortamında hem de laboratuvar ortamında incelenmiştir. Arazi ortamında atıkların ikincil sıkışma indisi değerlerinin (C_α) 0,028 ile 0,038 arasında değerler aldığı belirlenmiştir (Yuen ve Styles, 2000). Katı atık depolama tesisinin servis süresi tamamlandıktan sonra sıkışmalar Kaliforniya, Wisconsin ve Brezilya'daki üç farklı atık depolama sahasında incelenmiştir (Ling ve diğ., 1998). İkincil sıkışma oranlarının (secondary compression ratio) Brezilyada 0,0004, Wisconsin'de 0,008 ve Kaliforniya'nın güneyinde 0,013 değerlerini aldığı belirtilmiştir. Elde edilen bu değerler mekanik ve biyolojik ikincil sıkışma oranlarının birleşimiyle meydana gelmiştir.

Ani sıkışmanın tahmin edilebilmesi için kullanılan ani sıkışma oranı değeri (C_c') birim logaritmik gerilmedeki değişmenin birim deformasyonda meydana getirdiği değişim olarak tanımlanabilir (Oweis ve Khera, 1990). Ani sıkışma oranı katsayısının belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur (Stoltz ve diğ., 2010a-b; Hossain ve diğ. 2009; Durmuşoğlu ve diğ., 2006) Ani sıkışma oranı katsayısı C_c'' nün organik madde oranı azaldıkça azaldığı Sowers (1973) ve Chen ve diğ. (2009)'nin çalışmalarında rapor edilmiştir. Sıkışmayan madde miktarı arttıkça C_c' azalmaktadır. (Dixon ve diğ., 2008). Buna karşılık Hossain ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada organik madde miktarının azalmasıyla C_c''nün artış gösterdiğini belirtmiştir (bozunma ve çürüme arttıkça C_c''nün artması). Landva ve diğ. (2000) ve Chen ve diğ. (2010) çalışmalarında atık yoğunluğunun arttıkça C_c' değerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Literatürde sentetik KKA numuneler ile farklı ekipmanlar kullanılarak yapılan sıkışma deneyleri Çizelge 2.10.a'da, doğal KKA numuneler ile elde edilen sıkışma oranları (deformasyonun, toplam yüksekliğe oranı [$\Delta H/H_0$]) Çizelge 2.10.b'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.10.a Sentetik KKA numuneler ile yapılan sıkışabilirlik deneyleri

KKA türü	Kullanılan sistem ve numune özellikleri	Sıkışma oranı
Sentetik Kentsel Katı Atık Numuneler	63 mm çapındaki halka ile taze ve ayrışmış sentetik KKA numuneleri kullanılarak, ortalama dane boyutu 1,5 mm, malzemelerin %10'u 10 mm'den daha büyük boyuttayken %35'i 0,1 mm'den daha küçük boyutta (Reddy ve diğ., 2009a)	0,15-0,34
	63 mm çapındaki halka ile, taze sentetik KKA numuneler ortalama dane boyutu 1,5 mm, malzemelerin %10'u 10 mm'den daha büyük boyuttayken %35'i 0,1 mm'den daha küçük boyutta (Dixon ve diğ., 2008).	0,16-0,31
	Büyük ölçekli deney hücresi 750 x 500 x 500 mm, taze sentetik KKA numunesi, maksimum dane boyu 125 mm ile 500 mm (Hettiarachchi, 2005).	0,30
	63 mm teflon konsolidasyon halkası, taze sentetik KKA numuneleri, maksimum dane boyutu 5 mm (Langer, 2005).	0,18-0,21
	0,5 x 0,5 x 0,75 m sıkıştırma hücresi, parçalanmış (shredded) taze sentetik atık numuneleri, maksimum dane boyutu 10mm x 40mm (Reddy ve diğ., 2009b).	0,30

Çizelge 2.10.b Doğal KKA numuneler ile yapılan sıkışabilirlik deneyleri

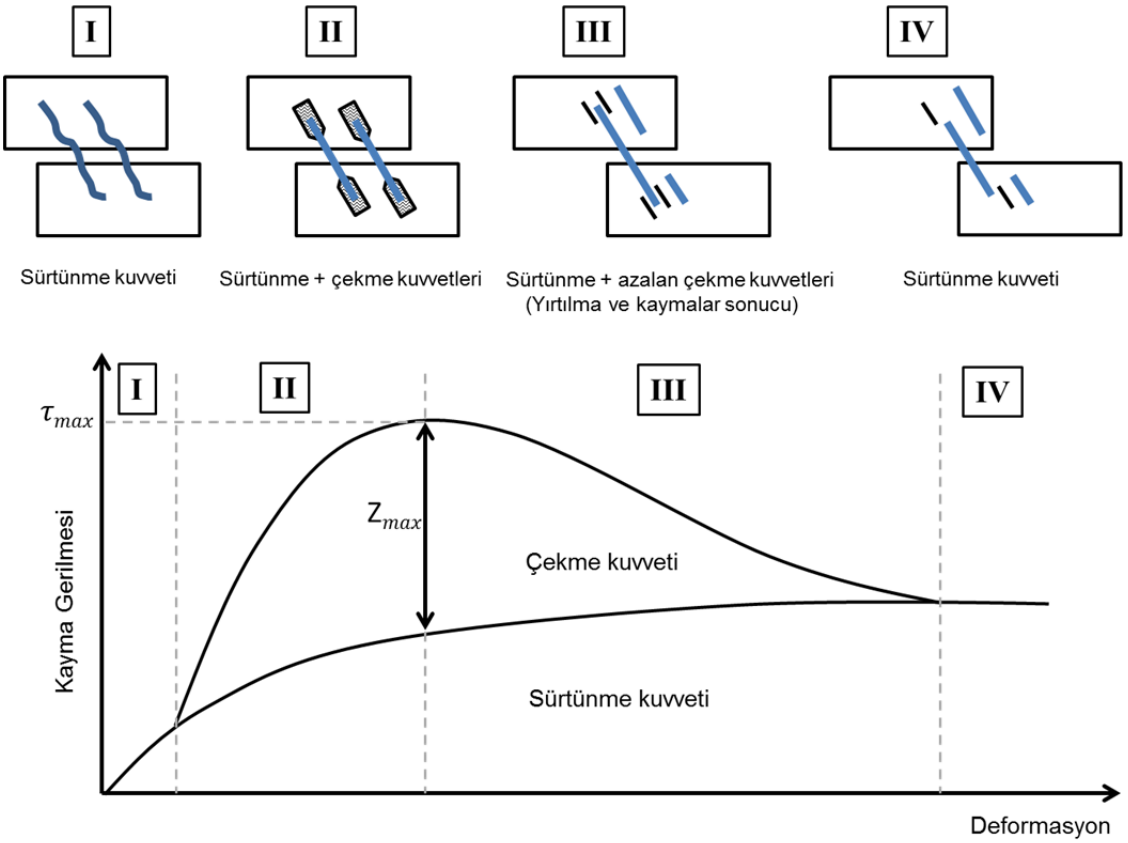
KKA türü	Kullanılan sistem ve numune özellikleri	Sıkışma oranı
Doğal Kentsel Katı Atık Numuneler	63 mm konsolidasyon halkası, parçalanmış taze doğal KKA, maksimum dane boyutu 40 mm (Reddy ve diğ., 2009a)	0,24-0,33
	63 mm konsolidasyon halkası, 10 yıllık ayrışmış KKA numuneleri (Durmuşoğlu ve diğ., 2006)	0,13-0,23
	711 mm büyük ölçekli konsolidasyon halkası, 10 yıllık ayrışmış KKA numuneleri (Durmuşoğlu ve diğ., 2006)	0,19-0,26
	385 mm çapında 365 mm yüksekliğinde konsolidasyon halkası, 15 yıllık doğal yıllanmış KKA numuneleri (Vilar ve Carvalho, 2004)	0,21
	63,5 mm konsolidasyon halkası, parçalanmış taze KKA numunesi, büyük çoğunluğu 40 ile 120 mm'lik dane boyutları (Hossain ve diğ., 2002)	0,16-0,25
	63 mm konsolidasyon halkası, 15-30 yıllık ayrışmaya uğramış doğal atık numuneleri, maksimum dane boyutu 6,30 mm (Gabr ve Valero, 1995)	0,15-0,22
	570 mm çapında hücre, parçalanmış (shredded) taze doğal KKA numunesi, maksimum dane boyutu 47 mm (Wall ve Zeiss, 1995)	0,21-0,25
	470 mm çapında konsolidasyon hücresi, parçalanmış taze doğal KKA, Kanada'nın Edmonton bölgesinden alınmış (Landva ve Clark, 1990)	0,35

Gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneylerinden sıkışma oranının 0,13 ile 0,35 arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

2.3.5 Kentsel Katı Atıkların Kayma Dayanımı

Doğal olarak ya da sonradan oluşmuş bir şev yapısının duraylılığını etkileyen en önemli parametrelerden biri şevi oluşturan materyalin sahip olduğu kayma mukavemetidir. Kentsel katı atıkların (KKA) kayma mukavemeti parametrelerinin çok geniş bir aralıkta değer aldığı literatürde rapor edilmektedir (Mazzucato ve diğ., 1999; Kavazanjian ve diğ., 1995; Zekkos, 2005; Zhan ve diğ., 2008). KKA'ların kayma mukavemetinin bu denli geniş bir aralıkta değer almasının birçok nedeni bulunmaktadır. Bu nedenlerden en önemlisi, içerisinde farklı özelliklere sahip ve değişik kompozisyonlarda birçok materyal bulundurmasıdır.

Kentsel katı atıklar temel fizikokimyasal özelliklerinde olduğu gibi kayma dayanımında da zeminlerden farklı davranış gösterirler. Kentsel katı atıklar yapılarında plastik, kağıt ve tekstil gibi şerit halinde güçlendirici etki yapan lifli malzemeler bulundurmaktadır. Bu güçlendirici etki, normal gerilmelerin etkisi altında oluşan bağlayıcı dirençler (bonding resistance) ve malzemenin lifli özelliğinden kaynaklanan çekme gerilmeleri (tensile strength) olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır (Kölsch, 1996; Langer, 2005). Zeminlerin kayma davranışından farklı olarak daneler arası sürtünme kuvvetlerine ek olarak kayma yüzeyindeki şerit halindeki malzemelerin çekme dayanımları da kayma mukavemetinde etkili olmaktadır. Kölsch (1996) kentsel katı atıkların kayma mekanizmasını dört aşamaya ayırmıştır. Birinci aşamada, deformasyon sırasında sadece sürtünme kuvvetleri artış göstermektedir. İkinci aşamada, artan deformasyonla birlikte zemin davranışından farklı olarak liflerde gerilme oluşarak çekme kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Bunu takiben üçüncü aşamada, lifli malzemelerin çekme dayanımları aşılır, bunun sonucunda yapılarında kayma ve kopmalar meydana gelir. Bu aşamada kentsel katı atıklar maksimum kayma gerilme değerine ulaşır. Son olarak dördüncü aşamada düşen kayma gerilmesi değeri sadece sürtünme kuvvetlerinden meydana gelmektedir. Şekil 2.7'de kentsel katı atıkların deformasyona bağlı kayma dayanımı aşamalarını gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Kentsel katı atıkların kayma dayanımı aşamaları (Kölsch, 1996)

Normal gerilmelerin artmasıyla lifler arasındaki bağlar daha sıkı hale gelmektedir ve bu da kayma gerilmelerinin daha da artmasına neden olmaktadır.

Kohezyon ince daneli zeminlerde daneler arasındaki kimyasal ve fiziksel bağ kuvvetlerinden meydana gelmektedir. Kentsel katı atıklarda ise kohezyon zeminlerden farklı şekilde numuneyi meydana getiren bileşenlerin birbirine kenetlenmesiyle (interlocking) oluşmaktadır. Bu parametre kapilarite kuvvetlerinin neden olduğu zahiri kohezyon şeklinde de tanımlanmaktadır. Zahiri kohezyon ampirik bir parametre olup laboratuvar deneyleri ile belirlenebilir.

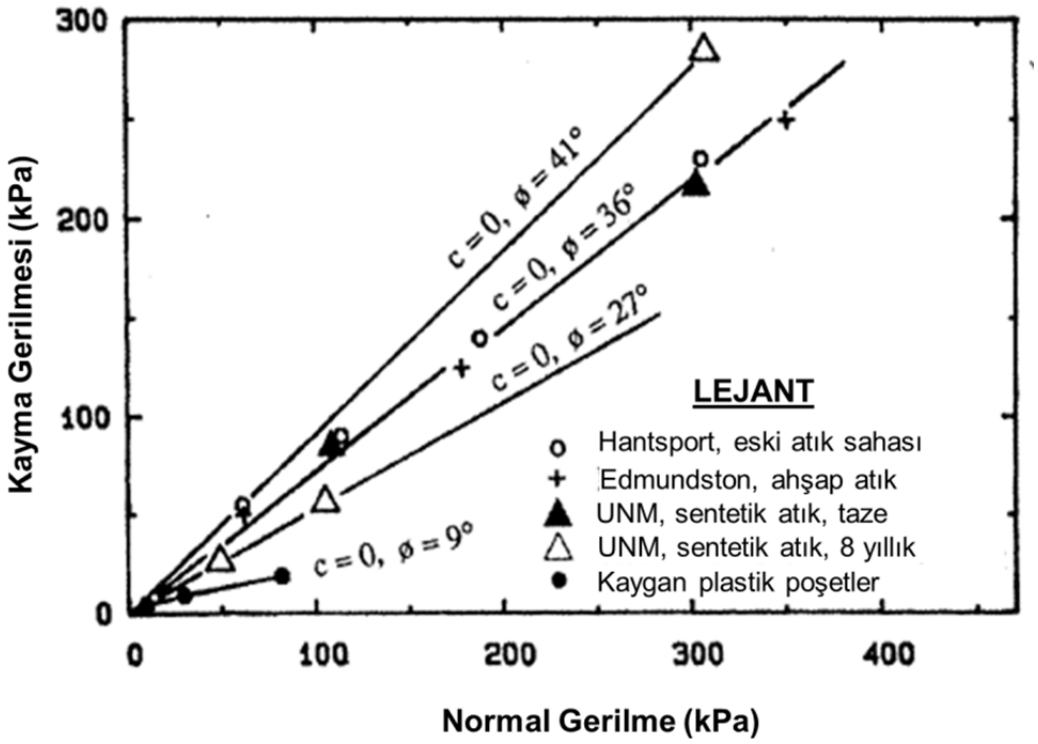
Mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deney aşamalarındaki farklılıklar, araştırmacının yaptığı kabuller ve KKA'lar için yapılan deneylerin belirgin standartlarının olmaması aynı deney numuneleri ile farklı sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle KKA'ların kayma mukavemetinin belirlenmesi için farklı yaklaşımlar kullanılabilmektedir:

1. Duraylılığını yitirmiş ya da koruyan şevlerin statik ve dinamik koşullardaki geriye dönük duraylılık analizlerini yaparak kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi,
2. Arazi ortamında yerinde (in-situ) yapılan deneyler ile kayma mukavemetinin belirlenmesi,
3. Laboratuvar ortamında yeniden oluşturulan (reconstituted) atık numuneleri kullanılarak büyük ve küçük ölçekli deneyler aracılığıyla kayma mukavemetinin belirlenmesi.

Literatürde KKA'ların kayma dayanımları üzerinde yapılan çalışmalar genel olarak laboratuvar ve arazi ortamında yapılan çalışmalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Landva ve Clark (1986) Kanada'nın farklı atık sahalarından aldıkları doğal numuneler üzerinde kesit alanı 434 x 287 mm olan büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sırasında aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişmemesine dikkat edilmiş ve kesme hızı 1,5 mm/dakika olarak seçilmiştir. Deneyler sonucunda içsel sürtünme açısı 24° ile 42° arasında değer alırken kohezyon değerleri 10 ile 23 kPa arasında değişiklik göstermiştir. Blackfoot ve Burbank bölgelerinden alınan yıllanmış atıklar ile yapılan deneylerde ise içsel sürtünme açıları 38° ile 42° arasında, kohezyon değerleri 16 – 19 kPa arasında değerler almıştır. Aynı bölgeden alınan numuneler büyük ölçekli plastik hücreler içerisinde bir yıl boyunca bekletildikten sonra gerçekleştirilen deneylerde ise içsel sürtünme açısının 33°, kohezyon değerinin 16 kPa olduğu görülmüştür. Bu çalışmada kayma mukavemeti parametrelerindeki düşüşün nedenini atıkların bir yıl boyunca ayrışmasıyla ilişkilendirmişlerdir. Ancak kesin bir yorumda bulunabilmek için gerçekleştirilen deney sayısının arttırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Lifli ve şerit halindeki atıkların (kağıt, karton, tekstil, plastik) kayma dayanımını arttırıcı etkileri olduğu yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Kolsch, 1995 ve 1996 yıllarında yaptığı çalışmalarda lifli malzemelerin ürettikleri çekme gerilmeleri ile kayma mukavemetini arttırıcı, KKA yapısını güçlendirici (reinforcement) etki yaptıklarını rapor etmiştir. Buradan yola çıkılarak, çalışmada KKA'lar için içsel çekme gerilme açısı tanımlanmıştır. İçsel çekme gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla özel bir cihaz geliştirilmiş ve KKA'lar içerisindeki materyaller için ölçümler yapılmıştır. Deneyler neticesinde taze atıklar için içsel çekme gerilmeleri açısını 35°, ayrışmış KKA'lar için 14° ve son olarak lif bulundurmayan numuneler için 0° olarak belirlenmiştir. Landva ve Clark (1990) büyük boyutlu kesme sistemini kullanarak yaptıkları deneyler sonucunda içsel sürtünme açısını 24° ile 41° arasında kohezyon değerlerini 0 ile 23 kPa arasında rapor etmişlerdir. Plastik naylon torbaların yatay bir şekilde yerleştirilerek birbirleri üzerinde kaymalarına izin verildiği deneylerde ise içsel sürtünme açısı

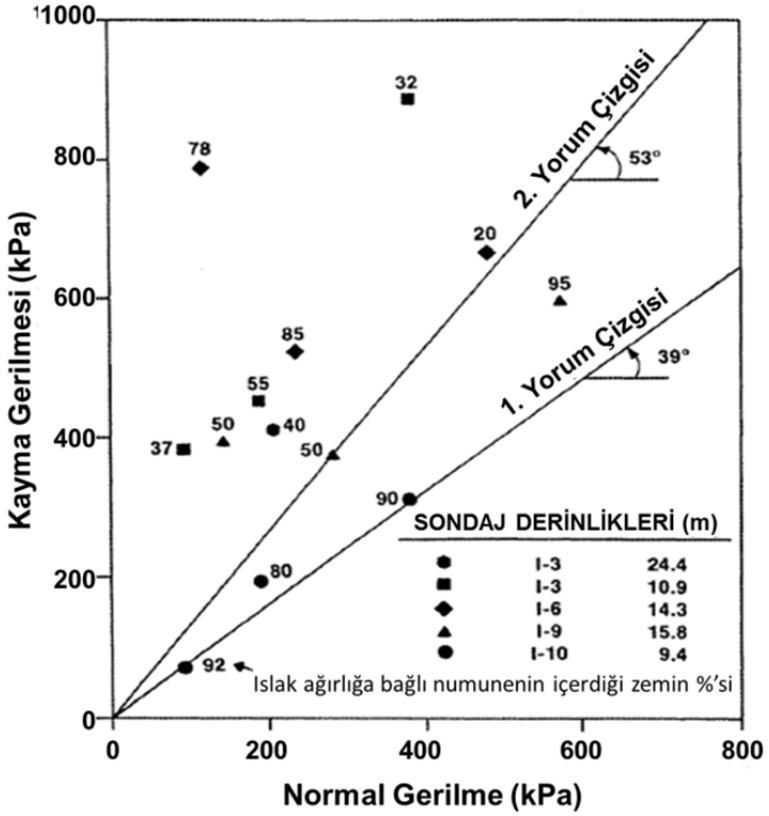
değeri 9° olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda lifli ve şerit şeklindeki atık malzemelerin kesme yönünde hareket etmeye eğilimli olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.8'de bu çalışmadaki farklı karakteristiklerdeki doğal KKA numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkilerini göstermektedir.



Şekil 2.8 Kanada KKA numuneleri büyük ölçekli direk kesme deneyi sonuçları (Landva ve Clark, 1990)

Siegel ve diğ. (1990) çalışmalarında, Los Angeles, Kaliforniya bölgesindeki atık depolama sahasından 13 cm çaplı akrilik tüpler içerisinde 4,6 ile 25 m arasındaki derinliklerden çıkartılan yükseklikleri 7,6 ile 10,2 cm olan atık numuneleri ile kesme kutusu deneyleri yapmışlardır. Beş deney numunesi için de maksimum kayma mukavemeti değeri, numune çapının %10'u kadar deplasman yapıldığı andaki kayma gerilmesi değerine eşit kabul edilmiştir. Bu çalışmada farklı derinliklerdeki numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkileri Şekil 2.9'da görülmektedir. Şekil 2.8'den görüldüğü üzere gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açıları literatürdeki diğer çalışmalardan yüksek, kohezyon değerleri ise düşüktür (Landva ve Clark, 1990). Araştırmacılar birinci yorum çizgisini oluşturan numunelerin büyük oranda zemin içerdiğini, ikinci yorum çizgisini oluşturan numunelerde ise daha iri daneli atıkların bulunduğunu belirtmiştir. Buna benzer olarak Siegel ve diğ., (1990) çeşitli boyutlardaki

(D_{maks}=106 mm) atık malzemeler ile gerçekleştirdikleri direk kesme deneyleri sonucunda daha iri daneli KKA'ların yüksek içsel sürtünme açılarına sahip olduğunu rapor etmiştir. Buna paralel olarak Manassero ve diğ. (1997) dane boyutunun kayma dayanımı üzerindeki etkisinin incelediği çalışmalarında, içsel sürtünme açısının dane boyutu artışına paralel olarak arttığını belirtmişlerdir.

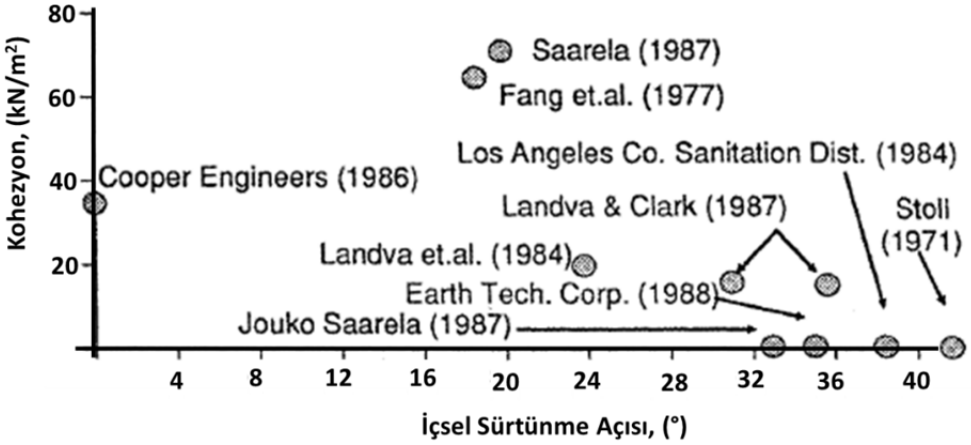


Şekil 2.9 Küçük ölçekli direk kesme deneyi sonuçları (Siegel ve diğ., 1990)

Oweis ve Khera (1990) çalışmasında laboratuvar ortamında KKA'ların kayma mukavemetlerinin belirlenmesine yönelik yaptığı deneylerde numunelerde net bir yenilme gözlenmediğini belirtmiş, kayma mukavemeti değeri olarak %15 - %20'lik deformasyona karşılık gelen kayma gerilmeleri değerlerini vermiştir. Bu çalışmada, 15,4 kN/m^3 birim hacim ağırlığa sahip atık numunesinin 45° içsel sürtünme açısına sahip olduğu belirtilmiştir. Bu büyük içsel sürtünme açısı değerinin malzemenin pürüzlü ve köşeli yapısından kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Singh ve Murphy (1990) KKA'ların kayma mukavemeti parametrelerinin rapor edildiği küçük ölçekli laboratuvar çalışmalarından farklı kaynaklardan derledikleri verileri bir araya getirerek karşılaştırmışlardır (Şekil 2.10). Karşılaştırma sonucunda şev stabilite analizlerinde

kullanılacak kayma mukavemeti parametrelerinin seçiminde kesinlikle muhafazakar bir yaklaşımın olmaması gerektiğini belirtmişlerdir.



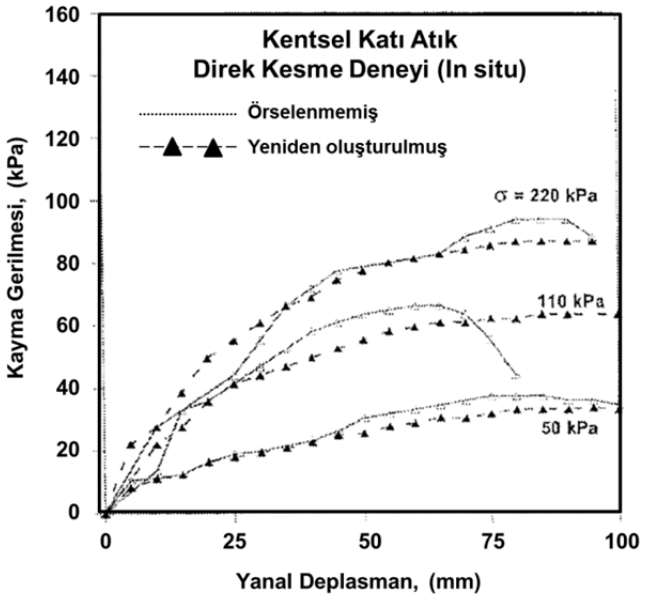
Şekil 2.10 Rapor edilmiş kayma mukavemeti değerleri (Singh ve Murphy, 1990)

KKA'ların kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde laboratuvar deneylerinin yanında arazide yapılan deneylerden de faydalanılmıştır. Withiam ve diğ. (1995) Newyork şehri Metropolitan yakınlarındaki atık depolama sahasında 1,5 m x 1,5 m boyutlarındaki hücre ile üç farklı normal gerilme değeri kullanılarak beş adet direk kesme deneyi yapmışlardır. Deneyler neticesinde oluşturulan Mohr-Coulomb kayma zarfından kohezyon değeri 10 kPa, içsel sürtünme açısı 30° olarak belirlenmiştir. Buna benzer bir çalışmada, Houston ve diğ. (1995) gerçekleştirdikleri iki deneyde kenar uzunluğu 1,22 m olan kare kesitli büyük ölçekli direk kesme sistemini kullanmışlardır. Arizona'da Northwest atık depolama sahasında yapılan deneyler sonucunda içsel sürtünme açısı 33° ve 35°, kohezyon değeri de yaklaşık 5 kPa olarak belirlenmiştir.

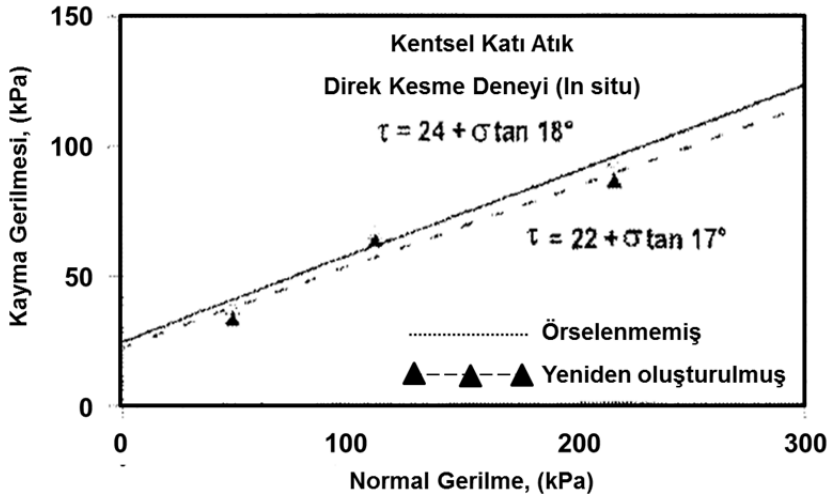
Edinçliler ve diğ. (1996), Wisconsin'in kuzey doğusunda bulunan atık depolama sahasının çeşitli bölgelerinden farklı yıllara ait iki atık numunesi ve bir kaplama (örtü) malzemesi toplamışlardır. Toplanan numuneler ile 30 cm çapında hücreye sahip direk kesme sistemiyle deneyler yapılmıştır. Deney numunelerinin içerisinde bulunan ve KKA yapısını güçlendirici etki yaptığı düşünülen 5 cm'den büyük parçalar ayıklanarak deney dışı bırakılmışlardır. Depolama sahasının farklı bölümlerinden alınan iki farklı atık numunesi benzer kayma mukavemeti özellikleri göstermiştir. Numunelerin ıslatılmasının kayma mukavemeti üzerinde önemli bir etki yapmadığı da belirlenmiştir. Deneyler sonucunda kohezyon değeri 27 kPa, içsel sürtünme açısı 42° olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada KKA numuneleri için belirlenen

kayma mukavemeti değerlerinin yapılan ayırma işlemleri nedeniyle (5 cm'den büyük parçalar) gerçekte olduğundan daha düşük değere sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Mazzucato ve diğ. (1999) İtalya'nın Verona şehrinde bulunan atık depolama sahasında 800 mm çapında, 220 mm yüksekliğindeki iki çelik halkadan oluşan sistem kullanarak büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sistem yeniden oluşturulan atık numunelerinde kullanıldığı gibi arazi ortamındaki örselenmemiş atıklar için de kullanılmıştır. Deney numunelerinin birim hacim ağırlığının 7 kN/m^3 olduğu tahmin edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yeniden oluşturulan (reconstituted) ve örselenmemiş (undisturbed) numunelerin kayma mukavemeti değerleri arasında önemli bir fark olmadığı rapor edilmiştir. Yeniden oluşturulan numunelerde kohezyon 22 kPa, içsel sürtünme açısı 17° olarak belirlenirken, örselenmemiş numunelerde kohezyon değeri 24 kPa, içsel sürtünme açısı 18° olarak bulunmuştur. İki numune arasında göze çarpan en önemli fark örselenmemiş malzemenin pik noktaya ulaşıp yenildikten sonra kayma mukavemetinin düşüşe geçmesi buna karşılık yeniden oluşturulan numunede böyle bir pik noktanın oluşmamasıdır. Şekil 2.11.a büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda örselenmemiş (undisturbed) ve yeniden oluşturulmuş (reconstituted) numuneler için elde edilen kayma gerilmesi – yanal deformasyon ilişkisini göstermektedir. Maksimum kayma gerilmeleri ve bu değerlere karşılık gelen normal gerilme değerleri Şekil 2.11.b'de görülmektedir.



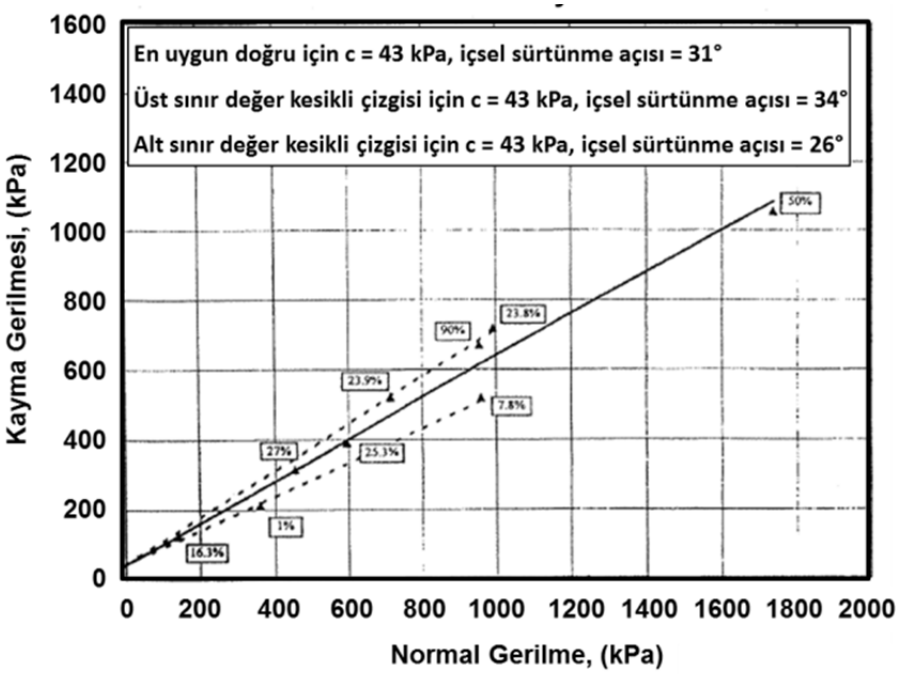
(a)



(b)

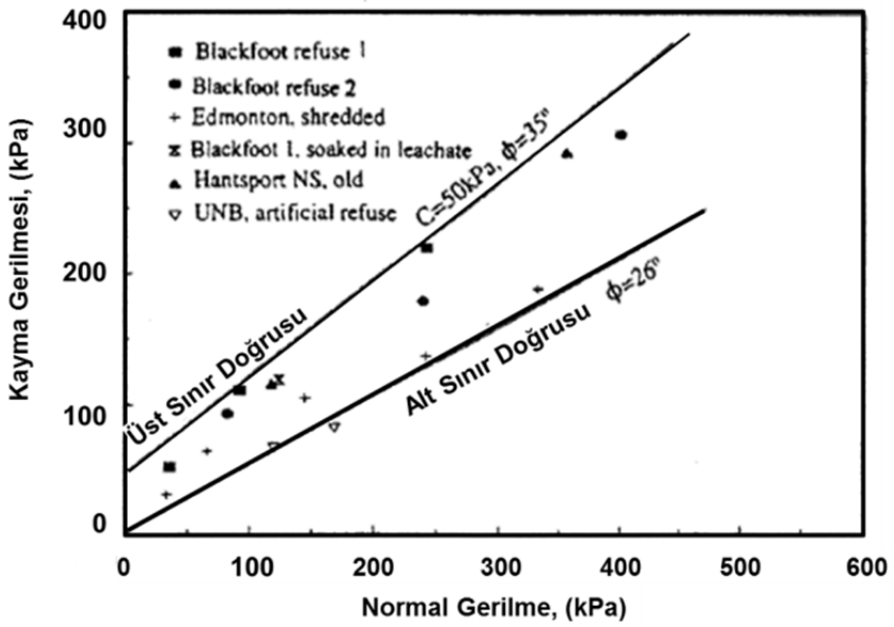
Şekil 2.11 Büyük direk kesme deneyi a) τ-ε ilişkisi b) τ-σ ilişkisi (Mazzucato ve diğ., 1999)

Kavazanjian ve diğ. (1999) Kaliforniya'da bulunan atık depolama sahasından aldıkları doğal atık numuneleri ile basit kesme ve direk kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 460 mm çapında numuneler kullanılmış ve oluşturulan en uygun (the best fit line) kayma zarfı ile kohezyon değeri 43 kPa, içsel sürtünme açısı 31° olarak belirlenmiştir. Şekil 2.12 elde edilen deney sonuçları kullanılarak çizilen üst sınır, alt sınır çizgileri ve en uygun doğruyu göstermektedir.



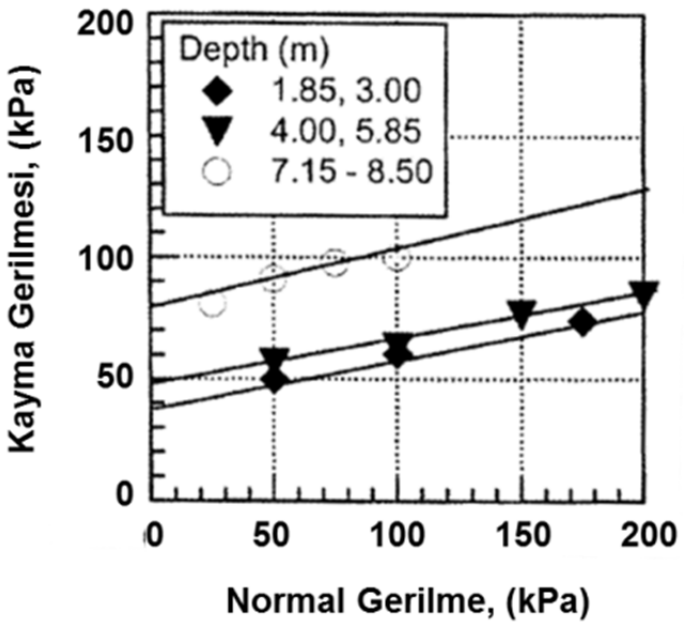
Şekil 2.12 Direk kesme kayma zarfı (Kavazanjian ve diğ., 1999)

Pelkey ve diğ. (2001) birim hacim ağırlıkları 9 ile 15,5 kN/m^3 arasında değişen ve su içeriği %32 ile %315 arasında değer alan, farklı bölgelerden alınarak yeniden oluşturulan (reconstituted) KKA numuneleri ile direk ve basit kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler de kullanılan direk kesme sisteminin boyutları 450 mm x 305 mm kesitinde ve her bir kutu (alt ve üst) 300 mm yüksekliğindedir. Maksimum kayma mukavemetinin %40'lık birim şekil değiştirmeye karşılık geldiği belirlenmiştir. Deney sonuçlarından içsel sürtünme açısının 26° - 35° arasında değer aldığı ve basit kesme sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.13).



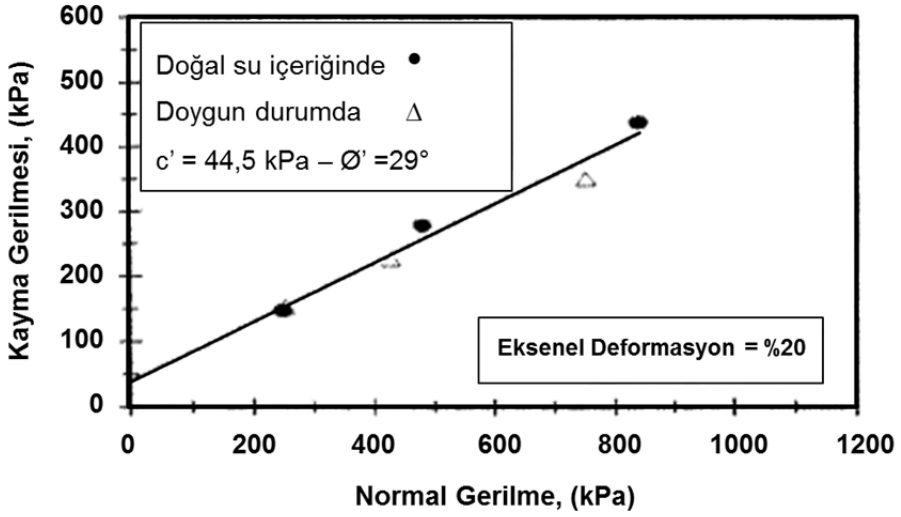
Şekil 2.13 Maksimum deformasyona ait kayma dayanımı parametreleri (Pelkey ve diğ., 2001)

Caicedo ve diğ. (2002) çalışmalarında atık sahasında (in-situ) kullanılmak üzere tasarlanmış, kesit alanı 0,63 m^2 olan büyük eksenli direk kesme ile laboratuvar kullanımı için tasarlanmış kesit alanı 0,09 m^2 (300 mm x 300 mm) olan küçük eksenli direk kesme sistemlerini kullanmışlardır. Gerçekleştirilen direk kesme deneyleri neticesinde doğal KKA numunesinin kohezyonu 78 kPa, içsel sürtünme açısı 23° olarak belirlenmiştir. Şekil 2.14'te üç farklı derinlikten alınan numuneler ile gerçekleştirilen direk kesme deney sonuçları gösterilmiştir. İlk iki aralıkta (1,85 - 3,00 ve 4,00 - 5,85) kayma mukavemeti parametreleri birbirine yakın değer alırken, daha derinde 7,15 – 8,50 m aralığında numunelerin daha büyük kayma mukavemeti parametrelerine sahip olduğu belirlenmiştir.

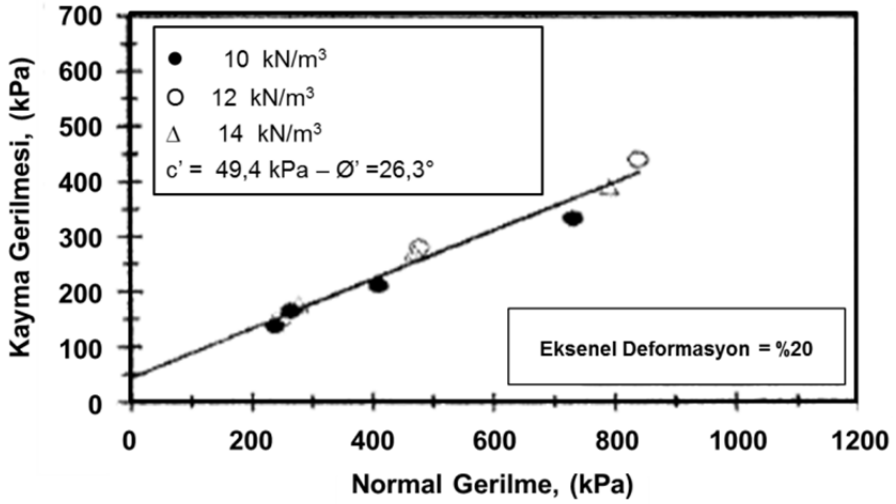


Şekil 2.14 Farklı derinliklerdeki KKA numunelerin kayma zarfları (Caicedo ve diğ., 2002)

Vilar ve Carvalho (2004) Brezilya'nın Sao Paolo yakınlarındaki Bandeirantes düzenli atık depolama sahasından aldıkları farklı dane boyutlarındaki doğal atık numuneler ile deneyler yapmışlardır. Numune boyutları 150 mm ile 200 mm çapında olup, nominal birim hacim ağırlık değerleri 10, 12 ve 14 kN/m^3 olarak belirtilmiştir. Numunelerin hazırlanması sırasında 150 ve 200 mm'lik numuneler için maksimum dane boyutunun 30 mm ve 40 mm'yi aşmaması sağlanmıştır. Doğal su içeriğinde hazırlanan üç eksenli numunelerin %20'lik eksenel deformasyona karşılık gelen kohezyon değeri 44,5 kPa, içsel sürtünme açısı 29° olarak belirlenmiştir (Şekil 2.15.a). Doygun durumdaki üç eksenli numuneleri ile yapılan deneylerde kohezyon değeri 49,4 kPa, içsel sürtünme açısı 26,3° olarak rapor edilmiştir. Genellikle doygun numuneler ile yapılan deneylerde doğal su içeriğindeki numunelere kıyasla içsel sürtünme açıları daha düşük kohezyon değerleri daha yüksek bulunmuştur. Farklı birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak (10, 12 ve 14 kN/m^3) yapılan üç eksenli deneyler sonucunda birim hacim ağırlığın kayma mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır (Şekil 2.15.b). Buna karşılık artan birim şekil değiştirmelerde (strains) içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin arttığı belirtilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.15 Doğal atık numuneler direk kesme deneyi sonuçları a) Farklı su içeriğindeki numunelerin kayma zarfı, b) Farklı birim hacim ağırlıktaki numunelerin kayma zarfı (Vilar ve Carvalho, 2004)

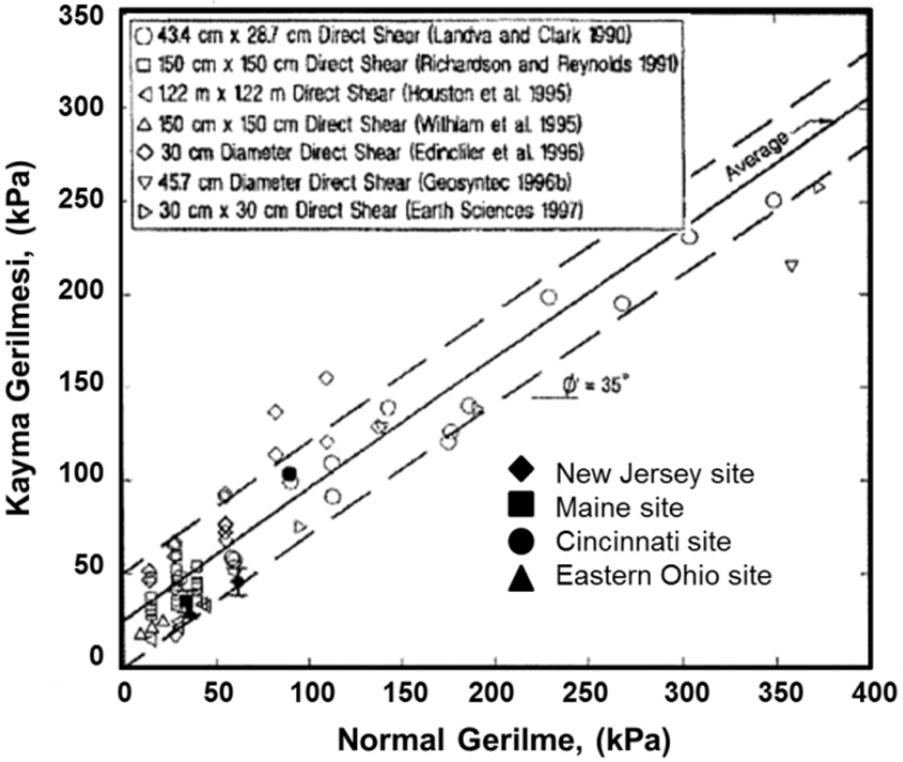
Ayrıca bu çalışmada numune boyutlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi de incelemiştir. Büyük boyutlu numune (200 mm) aynı birim şekil değiştirme değerinde, küçük numuneden (150 mm) daha düşük deviatör gerilme değerine sahiptir.

Mahler ve De Lamare Netto (2003) Brezilyanın Rio de Janeiro şehrindeki atık sahasından aldıkları atık numuneleri ile çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 20 mm ve daha düşük boyutlardaki atık numuneleri kullanılmıştır. Boyutları 400 x 250 x 100 mm olan direk

kesme sistemi ile kayma mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Deneyler sırasında 25, 50, 75 ve 100 kPa'lık normal gerilme değerleri kullanılmıştır. Kayma mukavemeti parametreleri farklı miktarlardaki yatay deplasmanlardan yola çıkılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

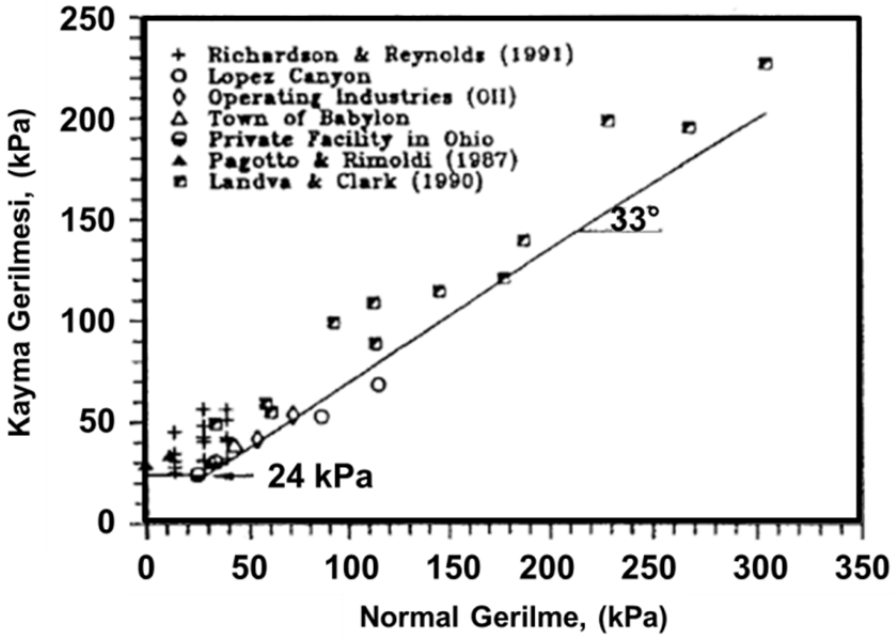
Towhata ve diğ. (2004) çalışmalarında Almanya'dan ithal ettikleri organik atıkları ve Tokyo'dan edindikleri yakılmış boyutları 1 cm'den küçük olan atık malzemeleri kullanmışlardır. 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğindeki atık numuneler kullanılarak üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin 7,4 ile 7,7 kN/m^3 arasında değiştiği belirtilmiştir. Yapılan deneylerde organik atık numunelerinin maksimum (pik) kayma mukavemeti değerlerine ulaşamadığı belirtilmiştir. Bu nedenle doğrusal gerilme – birim şekil değiştirme davranışları birim deformasyon değeri yaklaşık %20'ye ulaşıncaya kadar kayıt ve gözlem altında tutulmuştur.

Literatürdeki birçok araştırmacı tarafından KKA'ların kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde büyük ölçekli direk kesme sistemlerinin kullanılması önerilmiştir (Kavazanjian ve diğ., 1995; Eid ve diğ., 2000). Singh ve Murphy (1990) duraylılığını yitirmiş dört atık depolama sahasında yaptıklan geriye dönük analiz (back-calculation) sonuçlarıyla, büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Şev duraylılığını yitirmiş dört atık depolama sahasından (New Jersey, Maine, Cincinnati, Eastern Ohio atık depolama sahaları) alınan KKA numuneler ile gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Şekil 2.16'da görülmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından farklı büyüklük ve kesitlerdeki (daire, kare, dikdörtgen) kesme kutularıyla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin sınırlarının belirli bir bant aralığında kaldığı görülmektedir. Oluşturulan bu bant aralığından KKA'lara ait ortalama kohezyon değerinin 25 kN/m^2, ortalama içsel sürtünme açısının 35° olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.16 Farklı araştırmacılar tarafından rapor edilen τ - σ değerleri, (Eid ve diğ., 2000)

Landva ve Clark (1986), Landva ve Clark (1990), Withiam ve diğ. (1995), Houston ve diğ. (1995), Kavazanjiian ve diğ. (1999) Mazzucato ve diğ. (1999) gerçekleştirdikleri çalışmalar sonucunda KKA'lara ait kohezyon değerinin 0 – 50 kPa aralığında, içsel sürtünme açısının 27° - 41° arasında değer alabileceğini belirtmişlerdir. Kavazanjian ve diğ. (1995) çok genel bir ifadeyle tasarım aşamasında içsel sürtünme açısının 33° alınabileceğini rapor edilmiştir (Şekil 2.17).

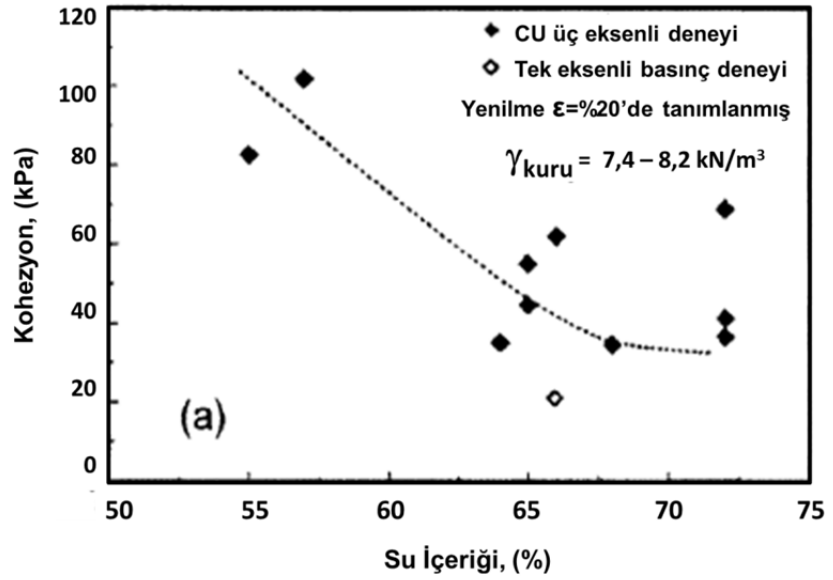


Şekil 2.17 Kavazanjian ve diğ. (1995) tarafından önerilen kayma zarfı

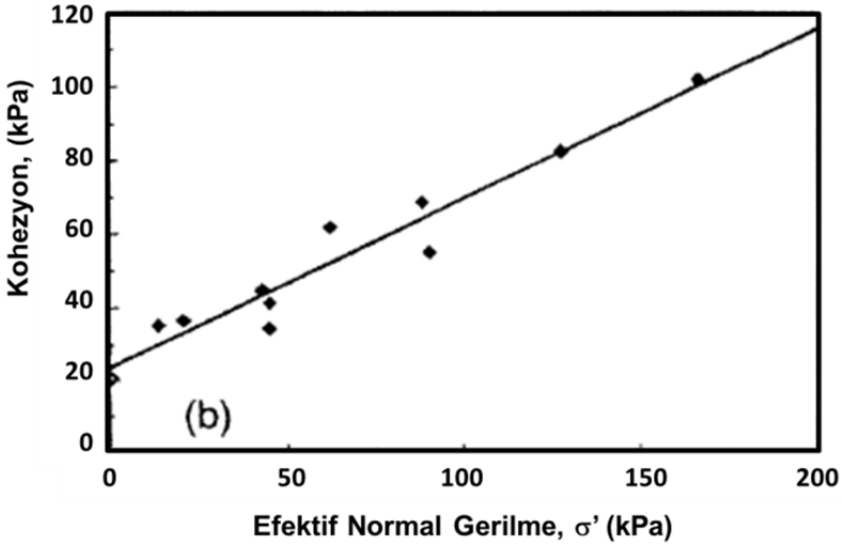
Yıllanma etkisinin KKA'ların mühendislik özellikleri üzerinde önemli değişikliklere neden olduğu bilinmektedir. Kentsel katı atık depolama sahalarında muhafaza edilen atıklar, biyolojik ve kimyasal degradasyona ve fiziksel değişikliklere uğrarlar. Bu değişimler KKA numunelerinin su içeriği, organik madde miktarı, birim hacim ağırlık, dane boyu dağılımı ve içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi mühendislik parametrelerinde önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Degradasyon sonucu lifli ve şerit halindeki atıklar yapısındaki bozulmalar nedeniyle güçlendirme etkilerini yitirmektedirler. Örneğin, Kölsch (1996) taze atıkların içsel sürtünme açısının yıllanmış atıklardan daha düşük değere sahip olduğunu öne sürmüştür. Oweis ve Khera (1990) ise zamanla kentsel katı atıkların dayanımındaki artışın birim hacim ağırlığa bağlı olarak değiştiğini rapor etmiştir. Zaman içerisinde birim hacim ağırlıktaki artış nedeniyle katı atık iskeletinin daha sıkı ve kuvvetli bir yapıya dönüştüğünü, buna karşın lifli malzemelerin yapısının bozulduğunu belirtmiştir.

Bu değişikliklerin kayma mukavemeti davranışlarını ne şekilde etkilediğinin belirlenmesi amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Gabr ve Valero (1995), 15–30 yıllık atık numuneleri kullanarak küçük ölçekli konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli (CU-TX) ve küçük ölçekli direk kesme deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin su içeriğinin arttıkça kohezyon değerinin azaldığını belirlemişlerdir. Su içeriği değeri %55 olan numunenin kohezyon değeri 100 kPa olurken, %72'lik su içeriğine sahip numunenin kohezyon değeri 40 kPa olarak belirlenmiştir. Efektif çevresel basınç arttıkça kohezyon değerinin arttığı da rapor edilmiştir.

Kayma mukavemeti olarak %20'lik deformasyona karşılık gelen gerilme değerleri kullanılmış ve kohezyon değeri 17 kPa, içsel sürtünme açısı 34° olarak bulunmuştur. Şekil 2.10'da yıllanmış KKA numuneler kullanılarak gerçekleştirilen küçük ölçekli konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deneyinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 2.18.(a) su içeriği – kohezyon değerleri arasındaki ters orantı ilişkisini gösterirken, Şekil 2.18.(b)'de kohezyon – efektif normal gerilme arasındaki ilişki görülmektedir.



(a)

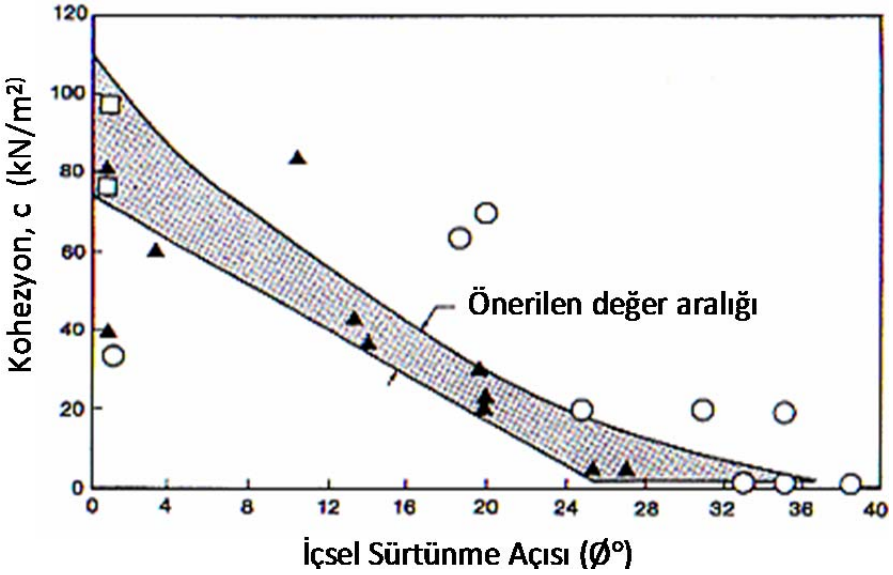


(b)

Şekil 2.18 Yıllanmış KKA numunelerin CU deneyi sonuçları, a) Kohezyon-su içeriği ilişkisi, b) kohezyon – efektif normal gerilme ilişkisi (Gabr ve Valero, 1995)

Yıllanmanın KKA'ların kayma mukavemeti üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarda kayma mukavemeti parametrelerinin ayrışma süresi arttıkça azaldığı rapor edilmiştir. Turczyski (1988) çalışmasında, 3, 5 ve 15 yıllık KKA numunelerinin kayma dayanımlarını incelediğinde içsel sürtünme açısı değerlerinin sırasıyla 40°-38°' den 35°-32° seviyelerine oradan da 26°lik içsel sürtünme açısına indiğini rapor etmiştir. Kohezyon değeri de 50-40 kPa'dan sırasıyla 15-12 kPa'ya ve son olarakta 10 kPa'ya düşüş yapmıştır. Kolsch ve Ziehmann (2004) gerçekleştirdikleri tüm deneylerde aynı paralellikteki sonuçları elde edemeseler de ayrışmış KKA'ların daha zayıf yapıda olduğunu belirtmişlerdir.

Singh ve Murphy (1990) yaptıkları çalışmalarında yllanmış katı atıkların kayma mukavemeti parametreleri için değer aralığı önermişlerdir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Yıllanmış katı atıklar için sürtünme açısı-kohezyon diyagramı (Singh ve Murphy, 1990)

KKA'ların kayma dayanımının tanımlanmasında karşılaşılan belirsizliklere halen çözüm bulunabilmiş değildir. Atık sahalarına ait kayma dayanımının; su muhtevası, atık madde içeriği, sıkıştırma miktarı, yıllanma miktarı vb. birçok parametreye bağlı olduğu bilinmektedir (Dixon ve Jones, 2005). Doğal ortamdan örselenmemiş numune almanın ve numune alındıktan sonra zarar vermeden deneye hazır hale getirmenin neredeyse imkansız olduğu kentsel katı atıkların kayma dayanımı parametrelerini laboratuvar ortamında belirlemek çok zordur. Bunun yanı sıra büyük çoğunluğu heterojen durumda bulunan ve ayrışma özelliğinden dolayı zamana bağlı büyük değişiklikler gösterebilen atıkların zeminlerden çok farklı karakteristiklere sahip olduğu açıktır. Ancak ne yazık ki, katı atıklar için deney numunelerinin

doğal ortamından alınması, malzeme özelliklerinin sınıflandırılması, yapılan deneylerin bir standarda bağlanmasını sağlayacak çalışmalar mevcut değildir. KKA numunelerinin deneye hazırlanmasında uygulanması gereken adımlar ve deney süresince izlenmesi gereken süreç belirli kaynaklar ya da standartlar ile belirtilmemiş bu nedenle her araştırmacı kendisi tarafından geliştirdiği metotları benimseyerek deneylerini gerçekleştirmiştir. Deneyler sırasında kullanılan atık numunelerinin dane boyutlarının sınır değerleri ve kullanılan maksimum dane boyutlarının da hemen her çalışmada farklılık göstermesi genel bilginin tutarlılığı konusunu çıkmaza sürüklemektedir.

Şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde KKA'ların kayma dayanımlarının belirlenmesinde Mohr-Coulomb kayma kriterlerinin yaygın olarak kullanıldığı göze çarpmaktadır. Literatür araştırmaları sonucunda KKA'ların kohezyon değerinin 0 ile 80 kPa arasında değer aldığı görülürken, içsel sürtünme açısının 0 ile 60° arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Zekkos, 2005; Kavazanjian ve diğ., 1995).

Kavazanjian ve diğ., (1995) düşük çevresel basınçlar altında (37 kPa'dan küçük) katı atıkların kohezyon değerinin 24 kPa, yüksek çevresel basınçlar (37 kPa'dan büyük) altında içsel sürtünme açısı değerinin 33° olarak kullanılmasını önermiştir. Ancak, kayma mukavemeti üzerinde önemli etkisi olan ayrışma üzerine sınırlı sayıda araştırmacı çalışma yapılmıştır (Hossain, 2002; Landva ve Clark, 1990; Harris ve diğ., 2006). Hossain (2002) yaptığı çalışmada kayma dayanımını, ayrışmanın 4 farklı safhasının her biri için direk kesme deneyi ile belirlemiştir.

Bir çok araştırmacı tarafından gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinin, kullanılan numunelerin özelliklerini ve elde edildikleri bölgelerin özeti Çizelge 2.11'de göstermiştir.

Çizelge 2.11 Laboratuvar ortamındaki kayma mukavemeti deneyleri (Stark ve diğ, 2009)

Kaynak	Test metodu ve numune boyutları (B, L, D*)	Numunenin alındığı bölge	Atık birleşimi ve özellikleri
Landva ve Clark (1990)	Laboratuvar direk kesme cihazı (L=434 x B=287 mm)	Mississauga, Waterloo Kanada	20–55% Kağıt, 5–42% mutfak, 4–20% Bahçe, 6–15% metal, 2–15% plastik. Kuru bha= 10–14 kN/m^3
Edincliler ve diğ. (1996)	Laboratuvar direk kesme cihazı (D=30 cm)	Southeastern Wisconsin	Taze atık. Kuru bha=7.5–14.2 kN/m^3
Siegel ve diğ. (1990)	Laboratuvar direk kesme cihazı (D=13 cm)	Kaliforniya	10–48 yıllık yıllanmış katı atık Kuru bha =9.6–17.3 kN/m^3
Jessberger ve Kockel (1993)	Laboratuvar direnajlı üç eksenli basınç deneyi (H=60 cm, D=30 cm)	Almanya	1– 3 yıllık katı atık
Taylor (1995)'dan Van Impe (1998)	Laboratuvar direk kesme cihazı (boyut verilmemiş)	-	38% kağıt, 18% plastik, 17% tekstil; 3 aylık atık
Gabr ve Valero (1995)'dan Van Impe (1998)	Laboratuvar direk kesme cihazı (D=6.4 cm)	Pensilvalya	33% kül, zemin ve kaya, 23% tekstil, 13% plastik, 10% metal, vb.; 15–30 yıllık. Kuru bha=10-12,1 kN/m^3
Kavazanjian ve diğ. (1999)	Laboratuvar direk kesme cihazı (D=46 cm)	Kaliforniya	11–35 yıllık katı atık
Pelkey ve diğ. (2001); Pelkey (1997)	Laboratuvar direk kesme cihazı (L:45cm B:30.5cm)	Kanada	2–5 yıllık atık. Toplam bha= 10–16 kN/m^3
Gabr ve diğ. (2002)	Laboratuvar direk kesme cihazı (B=L=10 cm) Kare	Sentetik atık	-
Machado ve diğ. (2002)	Laboratuvar CD üç eksenli basınç deneyi (L_1:30 ve L_2:40cm - D_1:15 ve D_2:20cm)	Sao Paulo, Brezilya	%55 zemin ve organik atık, %17 plastik, %10 taş. 15 yıllık atık. Toplam bha= 10 kN/m^3
Vilar ve Carvalho (2004)	Laboratuvar CD üç eksenli basınç deneyi (30 ve 40 cm uzunluk, 15 ve 20 cm numune çapı)	Sao Paulo, Brezilya	%55 zemin ve organik atık, %17 plastik, %10 taş. 15 yıllık atık. Toplam bha= 10 kN/m^3
Gomes ve diğ. (2005)	Laboratuvar CD üç eksenli basınç deneyi	Portekiz	37% Plastik, 33% tekstil, 11% zemin ve 10% metal. Toplam bha= 11,5 kN/m^3
Itoh ve diğ. (2005)	Laboratuvar CD üç eksenli basınç deneyi (23 x 24 x 57.5 cm)	Tokyo	Maksimum kuru bha=0,6–0.7 g/cm^3
Harris ve diğ. (2006)	Laboratuvar direk kesme cihazı (D=15 cm, H=5 cm yükseklik)	Mohawk NY ve Outer Loop	2–10 yıllık katı atık. Toplam bha= 11–17.5 kN/m^3
Isenberg (2003)	Laboratuvar direk kesme cihazı 15x15x5 cm	Hiriya, Israil	Toplam bha= 16 kN/m^3
Jessberger ve Kockel (1993)	Laboratuvar üç eksenli basınç deneyi aleti	-	-

* L: Uzun kenar, B: Kısa kenar, H: Yükseklik, D: Çap

Çizelge 2.12'de çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen dayanım parametrelerinin özeti verilmiştir. Görüldüğü üzere içsel sürtünme açısı 0 - 49° arasında değerler alırken kohezyon değeri 0 ile 51 kN/m^2 arasında değişim göstermektedir.

Çizelge 2.12 Laboratuvar ortamında elde edilen kayma dayanımı parametreleri (Aykol, 2008)

Ø (Derece)	c (kN/m^2)	Kaynak
0	35	Coopers Engineers (1986)
20	15	Saarela (1997)
31 ~ 36	15	Landva ve Clark (1986)
33	0	Joulo Saare (1987)
35	0	Earth Tech. Corp. (1988)
0 ~ 39	16 ~ 41	Landva ve Clark (1990)
42 ~ 49	41 ~ 51	Kockel ve Jessberger (1995)

Atıkların dayanım parametrelerini doğal ortamında belirlemek için, laboratuvar deneylerinin büyük ölçekli tasarımları sıklıkla kullanılmaktadır. Çizelge 2.13'de çeşitli araştırmacıların kullandıkları deney metodu, numune özellikleri ve deneylerin gerçekleştirildiği bölgeleri özetlemektedir.

Çizelge 2.13 Arazi ortamındaki kayma mukavemeti deneyleri (Stark ve diğ, 2009)

Kaynak	Test metodu ve numune boyutları	Numunenin alındığı bölge	Atık birleşimi ve özellikleri
Richardson ve Reynolds(1991)	Arazi direk kesme cihazı(150 x 150 mm)	Maine, ABD	Kuru bha = 16 kN/m^3 (Gerber 1991)
Houston ve diğ. (1995)	Arazi direk kesme cihazı (120 x 120 cm)	Northwest Arizona	-
Withiam ve diğ. (1995)	Arazi direk kesme cihazı (150 x 150 cm)	Dekorte Park New Jersey	Cam, kağıt, plastik, metal. Toplam bha = 10,8–12,8 kN/m^3
Mazzucato ve diğ.(1999)	Arazi direk kesme cihazı (80 cm çap)	Italya	Toplam bha = 7 kN/m^3
Thomas ve diğ. (1999)	Arazi direk kesme cihazı (100 x 100 cm)	Torcy, Fransa	20% plastik, 21% kağıt, 11% tekstil. Toplam bha = 7,8–16 kN/m^3
Caicedo ve diğ., (2002)	Arazi direk kesme cihazı (90 cm çap)	Dona Juana. Colombia	48% Org. atık, 45% kağıt, tekstil, ve plastik, 7% zemin, metal, ve cam. Taze katı atık. Toplam bha=10

Arazide yapılan dayanım deneylerinde atıklara ait elde edilen parametreler Çizelge 2.14'te belirtilmiştir.

Çizelge 2.14 Arazi yükleme deneylerinden elde edilen dayanım parametreleri (Aykol, 2008)

Ø (°)	c (kN/m^2)	Kaynak
0 ~ 27	0 ~ 80	Converse (1975), Volpe (1985)
0	35 ~ 38	Cooper ve Clark (1982)
4 ~ 16	60 ~ 80	PRA (1987)
14 ~ 20	18 ~ 35	EMCON (1989)
20	30	HLA (1987)
20	25	Dames ve Moore (1988)
8	80	PRA (1987) Earthquake
25	0	PRA (1987) Earthquake
20 ~ 38	0 ~ 40	Siegel ve diğ., (1990)
0 ~ 27	0 ~ 24	Oweis ve Khera (1990)
0 ~ 30	0 ~ 48	Oweis ve Khera (1990)

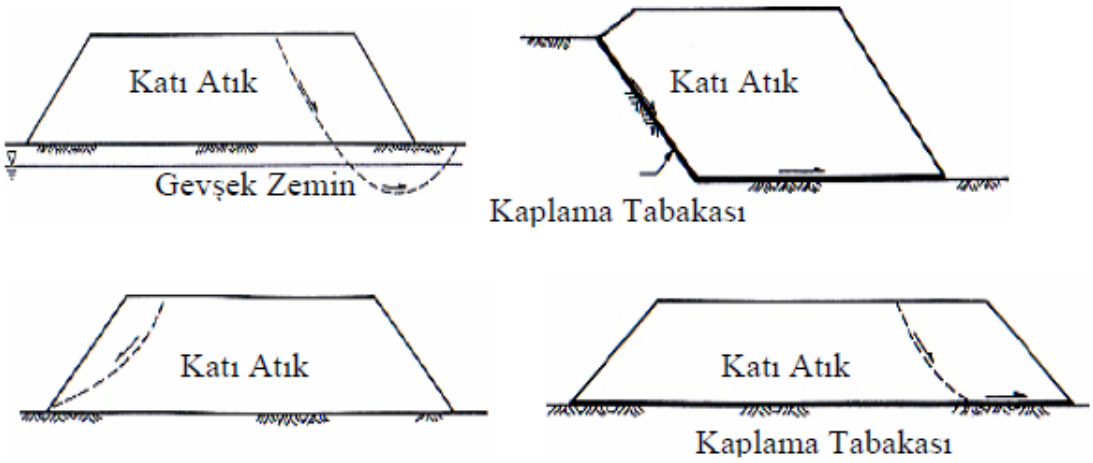
Arazi ortamında gerçekleştirilen kayma mukavemeti deneyleri incelendiğinde içsel sürtünme açısının maksimum 38° değerini aldığı görülmektedir. Çizelge 2.14'teki tüm değerler incelendiğinde oralama içsel sürtünme açısının 20 - 25° aralığında kohezyon değerininse 40-50 kPa arasında ortalama değer aldığı gözlenmektedir.

2.3.6 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılığı

Atık depolama sahasının duraylılığı, bir tesisin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli özelliklerden birisidir. Birçok depolama sahasının insan nüfusunun yoğun olarak yaşamını sürdürdüğü bölgelere yakın kurulduğu düşündüğünde atık sahasında meydana gelecek bir kaymanın çevreye ve insan hayatına büyük zararlar verebilir. Ne yazık ki yakın geçmişte atık depolama sahalarında birçok kaza meydana gelmiş ve büyük kayıplara yol açmıştır. Filipinlerin Patayas bölgesindeki atık depolama sahasında, 2000 yılının temmuz ayında meydana gelen göçme, Yunanistan'ın Ano Liossia atık sahasında 2003 yılındaki ve Endonezya' da Leuwigajah atık depolama sahasında 2005 yılında meydana gelen olaylar atık şevinin duraylılığı konusuna dikkatleri yoğunlaştırmıştır. Birçok göçme olayının atıkların kaymaya karşı dayanımlarını yitirmeleri ile gerçekleştiği bilinmektedir. Şev duraylılığı analizleri dayanımını yitirip göçmeyle sonuçlanmış atıklara ait mühendislik özellikleri kullanılarak yapılır. Kolsch ve Ziehmann (2004) şev duraylılığı analizlerinde klasik kayma poligonu metodunu kullanmışlardır (DIN 4084 standardına uygun olarak). Analizler sırasında gerek duydukları

atık parametrelerini Almanya'nın Ihlenberg atık depolama sahasından aldıkları örnekler üzerinde yaptıkları laboratuvar deneylerinden elde etmişlerdir. Yapılan analizlerde, araştırmacılar en elverişsiz kayma dairesinin şevin topuk bölgesinden geçtiğini belirlemişlerdir. Bogner ve diğ. (2001) ise atık şevine ait en düşük güvenlik sayısının, atıkların su içeriğinin arttığı durumlarda oluştuğunu belirtmiştir.

Katı atık sahasındaki stabilite; katı atık sahasının altındaki zemin tabakalarının özelliklerine, katı atığın mukavemet parametreleri ve ağırlığına, katı atığın istifleme eğimine, katı atık suyunun iyi drene edilip edilmemesine, kaplama tabakalarının cinsine ve kaplama tabakalarının erozyona karşı direncine bağlıdır (Aykol, 2008). Katı atık sahalarında karşılaşılabilecek stabilite problemlerinin başında kazılan zeminin duraylılığı gelmektedir. İstiflenen katı atıkların kendi içerisindeki duraylılığı, atık sahasının duraylılığını direkt olarak etkilemektedir. Depolanan atıklar arasında oluşacak bir kayma yüzeyi onlarca metre yüksekliğince depolanan olan atık gövdesinin ve tesisin duraylılığını tehlikeye atar. Katı atık gövdesinde oluşabilecek muhtemel kayma düzlemleri Şekil 2.20'de belirtilmiştir. Katı atıkların kendi bünyesinde bulunan ya da yağışların etkisiyle daha sonraları oluşan ve süzülerek alttaki tabakalara ilerleyen atık suların çevre zemin tabakalarını ve yeraltı suyunu kirletmesini önlemek gerekir. Bu amaçla tasarım aşamasında belirlenmesi gereken malzemeler belli kalınlık ve açıda atık sahasında kaplama tabakası olarak inşaa edilir. Bu tabakanın mühendislik özellikleri detaylı şekilde belirlenmeli, malzemenin muhtemel bir kayma yüzeyi oluşturmayacak özellikte olmasına ve duraylılığını koruyacak açıda inşaa edilmesine dikkat edilmelidir (Koelsch ve diğ., 2005).



Şekil 2.20 Katı atık gövdesinde oluşması muhtemel kayma düzlemleri (Aykol, 2008)

Çok farklı mühendislik özelliklerini bünyesinde bulundurabilen atıkların bu özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvarda ve arazide çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Atık depolama sahalarının şev duraylılığını konu alan çalışmalar sınırlı sayıda literatürde bulunmaktadır. Turer ve Turer'in 2011 yılındaki çalışmalarında Bishop metodu kullanılarak çeşitli özelliklerdeki (değişik birim hacim ağırlığı ve sıkılık) şevlerin duraylılık analizleri yapılmış ve bu sonuçlar bir abak halinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak atık depolama sahasındaki depolanmış malzemenin oturma miktarlarını ve yanal genleşmelerini inceleyen çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. KKA'nın kohezyonsuz ve gevşek durumda olması, laboratuvar ortamına getirilmesi ve deneye hazırlanması sırasında büyük deformasyonlar oluşmasına neden olur. Bu nedenle numunelerin arazideki su muhtevasında, sıkılığında hazırlanması ve sıkıştırılması gerekir. Kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda bulunan verilerin çok geniş bir aralıkta değişim gösterdiği ve bu durumun da KKA'nın tutarsız yapısından kaynaklandığı rapor edilmektedir (Jones ve diğ.,1997; Kavazanjian, 2001).

Günümüzde kentsel katı atıkların heterojen özellikte, çok farklı dane dağılımına sahip olması, iklimsel ve sezonsal koşullara göre farklılık göstermesi ve zamana bağlı olarak değişebilmesi nedenleri ile kayma dayanımları hakkında sınırlı bilgi vardır (Dixon and Jones, 2005). Depolanma zamanları arasında farklılık olan eski ve taze atıkları ayıran bir düzlemin potansiyel bir kayma yüzeyi gibi davranabileceği belirtilmekte ve şev duraylılığı analizlerinde bunun gözönünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir (Dixon ve Jones, 2005). KKA'ların kayma dayanımının dış etkenlere bağlı olarak (yağmur, nem, sıcaklık, don, sismik etkiler) zaman içerisinde değişiklik gösterebileceği belirtilmektedir. Bu nedenle uzun yıllardır durağan olan bir şevin bir müddet sonra durağanlığını kaybetmesi muhtemel olabilmektedir.

Kentsel katı atıkların deprem sırasındaki sismik performansı 1994 Northridge depremi için Augello ve diğ. (1995) tarafından incelenmiştir. Analizde Kavazanjian ve diğ. (1995)'nin önermiş olduğu birim hacim ağırlık ve kayma dayanımı değerleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda güvenlik sayısını 1,20, statik ve dinamik sürtünme açılarını sırasıyla 19 - 35°, 30 - 40° aralıklarında belirlemişlerdir. Atık gövdesinin dinamik dayanımının statik dayanımından daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Augello ve diğ. (1998) daha sonra Northridge depremini bir kez daha gelişmiş kentsel katı atık özelliklerini kullanarak incelemişlerdir. Gerçekleştirilen statik ve dinamik analizlerde Kavazanjian ve diğ. (1995)'nın önerdiği birim hacim ağırlık ve kayma dalgası hızları kullanılmıştır. Statik analizlerde güvenlik sayısı 1,3 olarak kabul edilmiş, geriye dönük hesaplamalarda içsel sürtünme açısı 25 - 41° arasında değişiklik göstermiştir. Geriye dönük dinamik

hesaplamalarda ise sürtünme açısı 27 ile 45° arasında değer almıştır. Bu sonuçlardan yola çıkılarak dinamik dayanımın statik dayanımdan daha yüksek olduğunun kararına varmışlardır. Yazarlar tarafından tasarım ve analizlerde kullanılabilecek içsel sürtünme açısı değerlerinin 33 - 38° arasında kabul edilebileceği rapor edilmiştir.

Laboratuvar ve arazi deneylerinden başka geriye dönük çözümleme metodu da atık kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu metotta güvenlik katsayısı 1.0 kabul edilen ve geometri özellikleri belirlenen bir katı depolama şevinin dayanım parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır (Huvaj-Sarihan ve Stark, 2008; Stark ve diğ., 2000). Buna karşılık yenilmiş şev olayının sıklıkla görülmemesi, yenilme yüzeyinin tam olarak saptanamaması, ya da analizi yapılan şevin özelliklerinin çok önceden belirlenmesi nedeniyle daha yüksek sonuçlar elde edilmiş olması (henüz sınır değerlere ulaşmamış, kuvvetli durumdayken) ayrıca şevi oluşturan materyallerin yoğunluğunun tam bilinemeyip tahmin ediliyor olması bu konuyla ilgili olumsuzlukların başında gelmektedir (Kavazanjian ve diğ., 1995).

3. MALZEME VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında kullanılan KKA numuneler laboratuvar ortamında belirli kompozisyonlarda oluşturulmuş sentetik KKA numuneler ve atık depolama sahalarından alınmış doğal atık numuneler olmak üzere başlıca iki ana gruba ayrılmaktadır. Yıllanmanın KKA'ların mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla sentetik ve doğal atıklar kendi içerisinde taze (günlük) ve yıllanmış olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çalışma kapsamında KKA malzemelerin öncelikle fizkokimyasal özellikleri olan doğal su içeriği, özgül ağırlık, pH, organik madde değerleri belirlenmiştir. Sentetik ve doğal numunelerin granülometri eğrileri oluşturulmuş, sıkışabilirlik özellikleri incelenmiş, kompaksiyon ve kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiş ve duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.1 Malzeme Karakterizasyonu

Bu çalışma kapsamında kullanılan olan kentsel katı atık malzemeleri iki ana başlık altında toplanmıştır. Bunlardan ilki laboratuvar ortamında belirli yüzdelerde hazırlanan sentetik kentsel katı atıklardır. Diğeri ise katı atık depolama sahasından alınan taze ve yıllanmış doğal numunelerdir.

3.1.1 Sentetik Malzemelerin Karakterizasyonu

Kentsel katı atık kompozisyonlarının mevsime, iklime, gelir düzeyine, kanunlara, sosyal yaşama, sanayi ve endüstrinin gelişmişlik düzeyine bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Dixon ve Jones, 2005; Reddy ve diğ., 2009d; Karimpour-Fard ve diğ., 2011). Bu nedenle çalışmada üç farklı sentetik KKA kompozisyonu seçilmiştir. Bunlar, Türkiye kentsel katı atık kompozisyonunu temsil eden T-1 kompozisyonu, Amerika Birleşik Devletleri kentsel katı atık kompozisyonunu temsil eden U-1 kompozisyonu ve Avrupa ortalama kentsel katı atık kompozisyonunu temsil eden E-1 kompozisyonudur. (ÇOB, 2006; OECD, 2007; EPA, 2009; TUİK, 2010). Üç farklı kentsel katı atık kompozisyonu (Türkiye [T-1], Avrupa [E-1] ve Amerika [U-1]) için doğal malzemeler ile belirlenen yüzdelerde karışımlar yapılarak sentetik kentsel katı atık kompozisyonları oluşturulmuştur.

Sentetik kentsel katı atık kompozisyonlarının oluşturulmasında 11 farklı malzeme kullanılmıştır (Kağıt, karton, plastik, metal, ahşap, cam, park-bahçe atığı, mutfak atığı, zemin, kül ve tekstil) (Şekil 3.1). Seçilen bu malzemeler KKA kompozisyonu içerisinde en çok karşılaşılan materyallerdir. Oluşturulan üç farklı kompozisyon karışımı için (T-1, E-1 ve U-1)

maksimum dane boyutları, özgül ağırlık değerleri, başlangıç su içerikleri, organik madde miktarları ve pH değerleri belirlenmiştir.

Şekil 3.1 Sentetik KKA kompozisyonlarında kullanılan malzemeler

Laboratuvar ortamında hazırlanan sentetik KKA'lar kendi içerisinde iki alt başlığa ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi, KKA numunelerinin üretiminden hemen sonra, biyolojik bozunma ve kimyasal çürümenin ileri seviyelere ulaşmadığı sentetik taze KKA'lardır. Laboratuvar ortamında belirli kompozisyon yüzdelerine uygun olarak üretilen taze sentetik kentsel atıklar yıllanmış sentetik kentsel atıklara kıyasla doğal yapısını ve dış görünümünü çok fazla kaybetmemiş durumdadırlar. Diğer tip numuneler ise biyolojik bozunma ve kimyasal çürümenin ilerlediği atık numunelerin rengini ve doğal dokusunu büyük ölçüde yitirdiği sentetik yıllanmış KKA'lardır. Bu numuneler ise laboratuvar ortamında sentetik olarak yıllandırılan ve katı atık depo sahasından alınan doğal yıllanmış numuneler olarak ikiye ayrılmaktadır. Sentetik yıllanmış kentsel katı atık numunelerinin üretimi, sentetik taze atıkların üretimiyle bire bir aynıdır. Belirlenmiş yüzdelerdeki materyaller bir araya getirilip homojen hale gelinceye kadar karıştırılmışlardır. Daha sonra hazırlanan sentetik atık numuneler büyük plastik tanklar içerisinde açık hava ortamında yıllanmaya bırakılmıştır (Şekil 3.2).

Şekil 3.2 Plastik tanklar içerisine yerleştirilmiş sentetik numuneler

Açık ortamdaki numuneler depolama tesislerindeki doğal atıklara benzer şekilde tüm atmosferik etkilere açık durumdadır (sıcak-soğuk, kar, yağmur, güneş vb). Kış mevsiminde yağış miktarının çok artması nedeniyle tankların suyla dolup taşmasını önlemek amacıyla plastik tankların alt bölümlerine ince tahliye delikleri açılmıştır.

3.1.1.1 T-1 Kompozisyonu

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinde 2008 yılı toplam kentsel katı atık miktarı 24.360.863 ton/yıl olarak rapor edilmiştir. Kişi başına düşen günlük atık ortalaması 1,15 kg/gün olduğu hesaplanmıştır. Ülke nüfusunun % 82'si, belediye nüfusunun ise % 99'u atık toplama hizmetinden yararlanmaktadır. Belediyelerden toplanan atığın %46'sı atık yönetimi mevzuatına uygun yöntemlerle düzenli depolama tesislerinde depolanmakta ya da kompostlaştırılmaktadır. Geri kalan %54'lük kısım düzensiz (kontrolsüz) depolama ve diğer yöntemlerle uzaklaştırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Türkiye kentsel katı atık kompozisyonunu temsil eden T-1 KKA numunesine ait kompozisyona ait değerler Çevre ve Orman Bakanlığı'na ait raporlar (ÇOB, 2006), Türkiye İstatistik Kurumu verileri ve akademik çalışmalardan derlenmiştir (Aykol, 2008; Gören, 2006). Çizelge 3.1'de Türkiye için belirlenen ortalama kentsel katı atık kompozsiyonuna ait değerleri göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri (U-1) ve Avrupa ortalama (E-1) kompozisyonlarıyla karşılaştırıldığında T-1 kompozisyonunun çok daha büyük organik madde miktarı bulundurduğu görülmektedir. Türkiye'nin sahip olduğu büyük kömür madeni rezervleri, ısınmada kömür tüketimini cazip

kılmaktadır, bu nedenle T-1 kompozisyonu diğer E-1 ve U-1 kompozisyonlarında bulunmayan %15 gibi büyük bir oranda kül atık bulundurmaktadır.

3.1.1.2 E-1 Kompozisyonu

Kentsel katı atık kompozisyonu gelir düzeyi, sanayi, sosyal çevre, iklim ve mevsimsel olarak değişiklik göstermektedir. Avrupa kentsel katı atık kompozisyonları incelendiğinde birbirinden çok farklı kompozisyonlar göze çarpmaktadır (OECD, 2007). İsveç'e ait kentsel katı atık kompozisyonundaki kağıt atık değerleri son 25 yılda %50'den yüksek değerler alırken, Macaristan ve Yunanistan'da bu değer %25'in altında kalmaktadır. Bu duruma benzer olarak İspanya ve Yunanistan'a ait organik madde atıkları %40 - %50 arasında değerler alırken, Almanya'ya ait kentsel katı atık kompozisyonu içerisindeki organik madde miktarı %25'i geçmemektedir. Bu geniş kompozisyon dağılımından yola çıkılarak Avrupa ülkeleri için ortalama değerlerden bir atık kompozisyonu oluşturulmuştur. Sanayi alanında gelişmiş (Almanya), okuma yazma oranının yüksek olduğu (Finlandiya), turizmde öne çıkan (Fransa, İtalya) yüksek nüfuslu ülkelerin kentsel katı atık kompozisyonlarının ortalaması alınarak Avrupa ortalama KKA kompozisyonu oluşturulmuştur (E-1). Bu ülkelerin kompozisyonlarına ait veriler Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) 2007 ve 2012 raporlarından elde edilmiştir. Çizelge 3.1'de E-1 kompozisyonu KKA yüzdeleri özetlenmiştir. E-1 kompozisyonunun T-1 ve U-1 kompozisyonları ile karşılaştırıldığında daha büyük kağıt-karton atık yüzdesine sahip olduğu görülmektedir.

3.1.1.3 U-1 Kompozisyonu

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Kuruluşu (USEPA) 2009 yılı raporu günlük kentsel katı atık üretiminin 1,953 kg olduğunu belirtmiştir. Bu miktarın %34'ü yeniden dönüşümle (recycling), %12'si yakma (combustion) ile bertaraf edilirken, %54'lük kısım depolanmak üzere atık depolama sahalarına gönderilmektedir. Bu rapordan elde edilen yüzdelere göre temsili ABD kompozisyonu (U-1) belirlenmiş ve Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Çizelge 3.1'den görüldüğü üzere dünyanın en büyük ekonomilerinden birisine sahip olan Amerika Birleşik Devletleri'nin kentsel katı atık kompozisyonunda önemli ölçüde plastik ve metal atık bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum gelişmiş sanayi ve yüksek üretim miktarının bir sonucudur.

Çizelge 3.1 T-1, E-1, U-1 kompozisyonlarının KKA birleşim oranları

No	Malzeme	Kompozisyon Oranları (%)		
		T-1	**E-1**	**U-1**
1	Mutfak Atığı	22,5	17,5	16
2	Cam kırıkları	4	6	7
3	Park-Bahçe Atığı	22,5	17,5	16
4	Plastik parçacıklar	10	8	12
5	Ağaç talaşı	4	6	7
6	Metal talaşı-tozu	2	5	9
7	Kül	15	0	0
8	Kağıt parçacıkları	12	28	22
9	Karton parçacıkları	3	7	6
10	Tekstil parçacıkları	5	3	5
11	İnce daneli zemin	0	2	0

Kentsel katı atık depolama tesislerinin temel malzemesi KKA'ların bizzat kendisidir. Ancak diğer malzemelere kıyasla belirgin mühendislik özelliklerinden bahsetmek oldukça zordur. Yapısında çok farklı özelliklerde materyalleri bulunduran KKA'lar heterojen yapıda olup büyük boşluk oranlarına sahiptirler. Bunun yanısıra zaman ve çevre şartlarına bağlı olarak birim hacim ağırlık, su içeriği, kayma dayanımı, permeabilite ve sıkışabilirlik gibi mühendislik parametreleri değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan doğal ve sentetik KKA numunelerinin mühendislik özelliklerinin belirlenebilmesi için laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar hem kullanılan malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışlarının daha kolay anlaşılmasına olanak sağlayacak hem de çalışmanın baştan sona üniform özellikteki numuneler ile tamamlanmasına olanak sağlayacaktır.

Bu çalışmada üretilen kompozisyonların başka çalışmalarda kullanılabilmesi amacıyla herbir kompozisyona (T-1, E-1 ve U-1) ait bileşim formülleri Ek-I'de verilmiştir. Bu formüller, diğer araştırmacıların benzer özelliklerde sentetik numune üretebilmesine ve sonuçları karşılaştırabilmesine olanak sağlayacaktır.

3.1.2 Doğal Malzemelerin Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılacak olan doğal kentsel katı atıklar, Manisa ili Şahindere Mevkiinde, Spil dağı eteklerinde 38°36'29'' Kuzey, 27°28'44'' Doğu kordinatlarında bulunan vahşi atık depolama sahasından Manisa Büyük Şehir Belediyesi'nin izniyle temin edilmiştir. Şekil 3.3'de vahşi atık depolama sahasının uydu görüntüsü verilmiştir.

Şekil 3.3 Manisa ili vahşi katı atık depolama sahasının uydu görüntüsü

Manisa vahşi atık depolama sahasının kontrolsüz depolama yüksekliği bölgeden bölgeye 30-40 m arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 3.4 depolama sahası yüksekliğini ve sahaya transferi yapılan doğal atıkları göstermektedir.

Şekil 3.4 Manisa ili vahşi katı atık depolama sahasından görüntüler

Katı atık depo sahasından alınan numuneler doğal taze ve doğal yıllanmış numuneler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Laboratuvar deneylerinde, deneyin güvenilirliği açısından standartlarda belirlenmiş dane boyutu sınırlamalarına uyulması gerekmektedir. Bu amaçla açıklığı 50 mm x 50 mm olacak şekilde imal edilen büyük ölçekli elekler (150 cm x 150 cm) kullanılarak deneylerde kullanılması uygun olmayan dane boyutları bertaraf edilmiştir (Şekil 3.5). Alınan numuneler nemini kaybetmeyecek şekilde poşetlenip ağızları kapatılarak laboratuvara getirilmişlerdir.

Şekil 3.5 Doğal katı atık numunelere uygulanan eleme işlemi

Doğal KKA numuneleri de sentetik KKA'lar gibi kendi içerisinde taze ve yıllanmış olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal taze atıklar depolama sahasında maksimum bir hafta kadar beklemiş atıklardan elde edilmiştir. Şekil 3.6'da laboratuvar ortamına getirilmiş henüz elenmemiş doğal taze kentsel katı atık numuneleri görülmektedir.

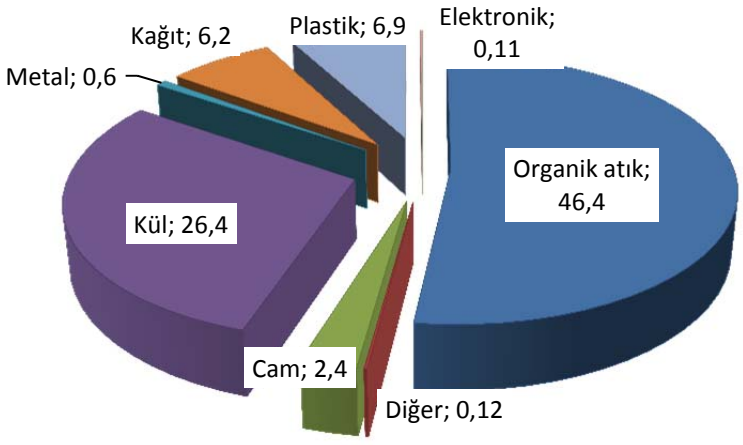
Şekil 3.6 Manisa katı atık sahasından alınan doğal taze KKA numunesi

Manisa ili katı atık depolama tesisinde depolanma geçmişi 25-30 yıla ulaşan doğal yıllanmış kentsel katı atık numuneleri, doğal taze atık numunelerine benzer şekilde plastik torbalar içerisinde su içeriğini kaybetmeyecek şekilde paketlenerek laboratuvara getirilmiştir.

Yıllanmanın etkisi ile biyolojik bozunma ve kimyasal çürüme sonucu numunelerin rengi koyulaşmış ve materyallerin büyük şekil bozukluğuna uğradığı Şekil 3.7'de net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 3.7 Manisa katı atık sahasından alınan doğal yıllanmış KKA numunesi

Vahşi atık depolama sahasından alınan atık numunelerinin kompozisyon değerleri Manisa Belediyesi 2010 yılı faaliyet raporundan elde edilmiştir. Manisa ili atık kompozisyon yüzdeleri Şekil 3.8'de görülmektedir.

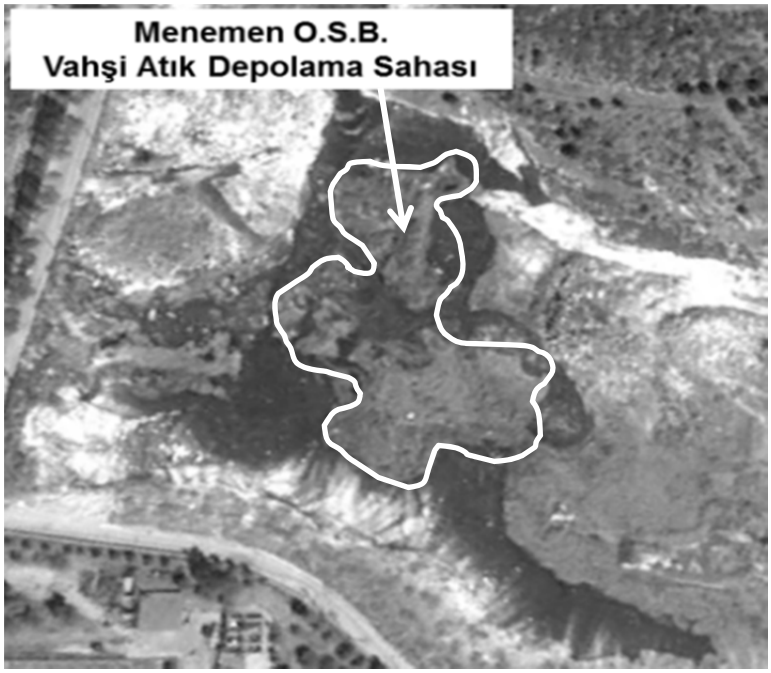


Şekil 3.8 Manisa ili KKA kompozisyon yüzdeleri

Manisa ili KKA kompozisyon yüzdeleri ile Türkiye genel KKA kompozisyon yüzde değerleri genel olarak benzerlik göstermektedir. Şekil 3.8'den de görüldüğü üzere KKA

kompozisyonunun yaklaşık %50'sini organik atıklar oluşturmaktadır. Bölgenin sahip olduğu büyük kömür madeni rezervlerinin bir sonucu olarak kül atık kompozisyon içerisinde büyük bir yüzdeye sahiptir.

Tez çalışmasında kullanılan bir diğer doğal numune İzmir ili Menemen ilçesi Maltepe Köyü Panaztepe mevkiinde bulunan vahşi atık depolama sahasından temin edilmiştir. Menemen Organize Sanayi Bölgesi (OSB) bünyesinde kösele, süet, güderi, kürk, deri konfeksiyon üreten imalathane ve işletmelerle birlikte deri makinaları ve deri sanayinde kullanılan yardımcı madde araç gereçleri üreten işletmeler bulundurmaktadır. Endüstriyel ürünlerin imalatı sırasında ortaya çıkan atıklar bölgenin kuruluşundan beri hemen yakınındaki bir alanda vahşi şekilde depolanmaktadır. Şekil 3.9'da Menemen OSB vahşi endüstriyel atık depolama sahasının uydu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.9 Menemen OSB vahşi endüstriyel atık depolama sahasının uydu görüntüsü

Arazi ortamında yapılan ilk gözlemler sonucunda endüstriyel atıkların yüksek oranda organik madde bulundurdukları belirlenmiştir. Arazi ortamında yapılan incelemelerden sonra ekskavatör yardımıyla tüm depolama sahasındaki endüstriyel atıkları temsil eden homojen bir atık numunesi oluşturulmaya çalışılmıştır (Şekil 3.10a-b)

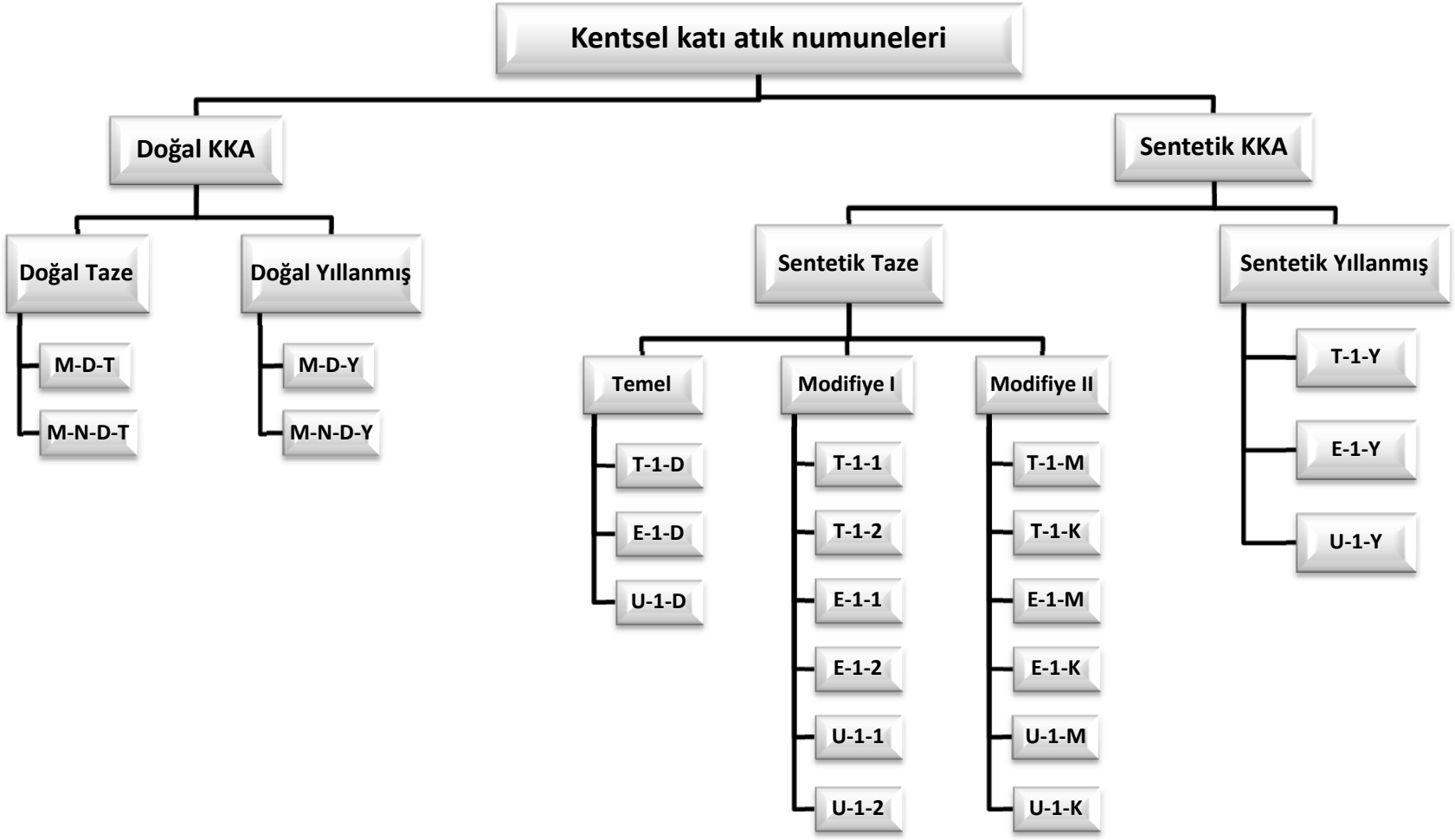
(a) **(b)**

Şekil 3.10 Endütriyel katı atıkların (a) ayrılması ve (b) poşetlenmesi

Depolama sahasının içerisinde bulunan çok büyük parçalar laboratuvar deneylerinde kullanılamayacağından çalışmalara dahil edilmemiştir. Ayrım işlemi tamamlandıktan sonra laboratuvar çalışmalarında kullanılacak olan endüstriyel katı atık numuneler hava almayacak ve doğal nemini kaybetmeyecek şekilde poşetlenerek laboratuvara transferi yapılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin grupları ve adlandırılması Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Kentsel katı atık numune grupları



3.2 Yöntem

Bu çalışma kapsamında farklı özelliklerdeki sentetik taze, sentetik yıllanmış, doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerinin mühendislik davranışları incelenmiştir. Günümüzde KKA'ların mühendislik özelliklerine yeterli önemin verilmemesi, gerekse çeşitli bilim disiplinleri arasında kalması nedeniyle genel geçer standartlara sahip değildirler. Bu nedenle KKA'ların mühendislik parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan birçok deneyde halen zemin mekaniği deneylerine ait standartlara ve metotlara bağlı kalınmaktadır. Ancak zeminlere kıyasla çok daha büyük dane boyutlarına ve boşluk oranlarına sahip olabilen KKA'ların zemin mekaniği laboratuvarlarındaki standart test ekipmanlarıyla deneylerini gerçekleştirmek yanıltıcı olabilecektir. Bu nedenle çalışma kapsamında KKA'ların mühendislik parametrelerini belirlemeye yönelik yapılan deneyler ya modifikasyon işlemi geçirmiş büyük ölçekli test ekipmanlarıyla ya da standartların belirttiği dane boyutu sınırlamalarına uyularak gerçekleştirilmektedir.

3.2.1 Kentsel Katı Atıkların Fiziko Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

Laboratuvar ortamında üretilen sentetik atık numuneleri belli bir standarda uyması ve bunun her deney için kontrol edilebilir olması açısından belirlenmiş boyut aralıklarında üretilmiştir. KKA kompozisyonlarını oluşturan materyallerin dane boyutlarının belirli bir düzen içerisinde tutulabilmesi amacıyla maksimum dane boyutu sınırlaması yapılmıştır. Zemin mekaniği laboratuvarında zemin danelerinin granülometrik analizlerinde kullanılan elek setleri yardımıyla malzemeler belirlenen eleklerden elenmiş sınırların dışarısında kalan daneler bertaraf edilmiştir. Çalışma kapsamında tekstil parçacıkları 1''(25,4 mm), kağıt ve karton parçacıkları 1/2'' (12,5 mm), krom metal talaşları 1/4'' (6,3 mm), mutfak atığı, bahçe atığı ve plastik parçacıkları No.4 (4,75 mm), cam kırıkları ve ağaç talaşı No.10 (2 mm) ve kül, zemin daneleri No.40 (0,425 mm)'lik eleklerden elenmiştir. Kullanılan malzemeler arasında en büyük dane boyutu, oldukça esnek ve kolay deforme olabilen tekstil parçalarına aittir. Tekstil parçalarını dane büyüklüğü açısından takip eden kare parçacıklara ayrılmış kağıt ve karton parçacıklarıdır. Sonrasında metal talaşı (krom metaline ait), plastik parçacıkları ve organik maddeler (mutfak atığı ve parçacıkları ve park-bahçe atığı) dane boyu sıralamasında yerlerini almaktadır. Kompozisyonlar içerisindeki en küçük dane boyutları ise cam kırıkları (öğütülmüş $\geq$ 2 mm.), ağaç talaşı (freze makinesinden çıkmış $\geq$ 2 mm.), kül ve ince zemin (kaolin kili) danelerine aittir (-No.40). Kullanılan malzemeler Çizelge 3.3'te belirtilen eleklerden elendikten sonra karışımlar hazırlanmış ve üç farklı kompozisyon için oluşturulan granülometri eğrileri belirlenmiştir.

Çizelge 3.3 Deneylerde kullanılan malzemelerin standart dane boyu özellikleri

No	Malzeme	Elek No	Elek Açıklığı (mm)
1	Mutfak Atığı	No.4	4,75
2	Cam kırıkları	No.10	2,00
3	Bahçe atığı	No.4	4,75
4	Plastik parçacıklar	No.4	4,75
5	Ağaç talaşı	No.10	2,00
6	Metal talaşı-tozu	1/4''	6,30
7	Kül	No.40	0,425
8	Kağıt parçacıkları	1/2''	12,50
9	Karton parçacıkları	1/2''	12,50
10	Tekstil parçacıkları	1''	25,4
11	İnce daneli zemin	No.40	0,425

Dane boyutu KKA'ların mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen temel (ince daneli) numune boyutlarına ek olarak daha büyük dane boyutlarına sahip KKA numuneleri de (iri daneli) hazırlanmış ve bunların kompaksiyon ve direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İri ve ince daneli numunelerin elde edilmesinde kullanılan maksimum ve minimum elek boyutları Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Deneylerde kullanılan ince ve iri dane boyut aralıkları

No	Malzeme	İnce Daneli KKA Numunesi		İri Daneli KKA Numunesi	
		Elek No	D_{max}, (mm)	Elek No	D_{max}, (mm)
1	Mutfak atığı	No.4	4,75	No.4	16
2	Cam kırıkları	No.10	2,00	No.4	16
3	Park-Bahçe atığı	No.4	4,75	No.4	63
4	Plastik parçacıklar	No.4	4,75	No.4	4,75
5	Ağaç talaşı	No.10	2,00	No.10	16
6	Metal talaşı-tozu	1/4''	6,30	No.4	16
7	Kül	No.40	0,425	No.40	16
8	Kağıt parçacıkları	1/2''	12,50	1/2''	63
9	Karton parçacıkları	1/2''	12,50	1/2''	63
10	Tekstil parçacıkları	1''	25,4	1/2''	50
11	İnce daneli zemin	No.40	0,425	No.40	4,75

Çalışma kapsamında kullanılan 11 farklı materyalin özgül ağırlık değerleri iki farklı şekilde belirlenmiştir. İlk olarak literatürde kullanılan materyallerin ayrı ayrı kendi özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Ancak kullanılacak materyalin bölgeden bölgeye, ülkeden ülkeye farklılık gösterebileceği göz önünde bulundurularak her bir materyalin özgül ağırlık değeri laboratuvar ortamında da ASTM (American Society of Testing Materials) D854-14 (2014) standardına uygun olarak ayrıca belirlenmiştir. Üç farklı kompozisyonda (T-1, E-1 ve U-1) üretilen sentetik atık numunelerinin özgül ağırlıkları ilk olarak literatür araştırmaları sonucunda elde edilen özgül ağırlık değerleri kompozisyonlarda kullanılacak her bir malzemenin özgül ağırlıklarının ağırlıkça yüzde değerleriyle çarpıp toplanmasıyla elde edilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi literatür araştırmaları sonucunda elde edilen değerler ülkeden ülkeye ve bölgeden bölgeye farklılık gösterebileceğinden 11 malzemenin her biri için ASTM D854-14 (2014) standartlarına uygun olarak özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Sentetik KKA numuneleri ilk olarak etüvde 105°C'de sıcaklıkta kurutulmuştur. Daha sonra özgül ağırlık değeri belirlenmek istenen numuneden 30 g tartılarak karıştırıcının içerisine konulmuştur. Karıştırıcıya belirli bir miktar (yaklaşık 100-150 ml) saf su eklenerek numuneyle yeterli derecede karışması sağlanmıştır. Numune-su karışımı cam huni yardımıyla 500 ml'lik cam piknometre içerisine alınarak karışıma üç kademe halinde saf su eklenerek ve her eklemeden sonra 30 dakika vakum uygulanmıştır (Şekil 3.11.a-b).

Şekil 3.11.a Piknometre deneyinde numunelere vakum uygulaması

Ayrıca deneyler sırasında sıcaklık ölçümleri yapılmış ve sonrasında ölçümler üzerinde sıcaklık düzeltmesi yapılmıştır.

Kompozisyonların her biri için ayrı ayrı özgül ağırlık deneylerinin gerçekleştirilmesinin yanı sıra, deneylerde kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerleri ağırlıkça yüzdeleri ile çarpılıp toplanmış ve kompozisyonlar için özgül ağırlık değerleri elde edilmiştir. Yapılan bu iki farklı işlem sonucunda birbirine çok yakın (±%10) özgül ağırlık değerleri elde edilmiştir.

Şekil 3.11.b Üç KKA kompozisyonun cam piknometreler içerisindeki görünümü

Literatürde karşılaşılan birçok çalışmada özgül ağırlık değerlerinin, bu çalışma için hesaplanmış değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Babu ve diğ. (2010) atık sahasından alınmış taze, yıllanmış ve laboratuvarda sentetik olarak üretilmiş üç farklı KKA numunesi üzerindeki çalışmada doğal taze, doğal yıllanmış ve sentetik numunelerin özgül ağırlık değerlerini sırasıyla 0,85 – 0,97 – 1,09 olarak rapor etmişlerdir. Reddy ve diğ. (2009) çalışmalarında laboratuvarda hazırlanmış Amerika Birleşik Devletleri KKA örneği için özgül ağırlık değerini 1,60 olarak rapor etmişlerdir. Nijerya'nın Akure bölgesindeki atık depolama sahasında yapılan çalışmada üç farklı derinlikteki atıkların özgül ağırlık değerleri 1,40 ile 2,10 arasında değişen değerler olarak elde edilmiştir (Ojuri, 2012).

KKA'ların su içeriği değerleri mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Depolama sahasına getirilen KKA numunelerin başlangıç (doğal) su içeriği değeri depolama işlemi sonrasında bulunduğu ortam, iklim, yağış dönemi, yeraltı su seviyesi vb. etmenlere bağlı olarak büyük değişiklik gösterebilmektedir (Sowers, 1973; Landva ve Clark, 1990; Gabr ve

Valero, 1995; Hossain, 2002). Bu durumun oluşmasında KKA içerisinde bulunan kağıt, karton, tekstil gibi su adsorbsiyon kapasitesi yüksek malzemelerin etkisi büyüktür. Beaven ve Powrie (1996) KKA numunelerinin su içeriği değerini su ağırlığının kuru dane ağırlığına oranı olarak tamnımlamıştır. Bu tanım zemin mekaniğinde kullanılan ağırlığa bağlı (gravimetric) su içeriği tanımlamasıyla aynıdır. Çalışmada kullanılan 11 farklı malzemenin bunlara ek olarak sentetik olarak üretilen farklı kompozisyonların doğal su içerikleri ASTM D 2216-10 (2010) standart test metoduna bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 3.12). Hazırlanan numuneler 24 saat süresince 105°C sabit sıcaklıkta kurumaya bırakılmış, deney öncesinde ve deney sonrasında yapılan tartım değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda su içeriği değerleri elde edilmiştir. Kompozisyon içerisindeki lifli malzemelerin (kağıt, karton, tekstil) kompozisyonun toplam su içeriğinin ne kadarına sahip olduğunu belirlemek amacıyla T-1-D numunesi optimum su içeriği değerinde (%138) hazırlanmıştır. Karışım içerisinde sadece lifli malzemelere ait su içeriği değerinin %2'den %143 değerine yükseldiği görülmüştür. Bu sonuçlara dayanarak kompozisyon içerisindeki su içeriğinin büyük bir bölümünün lifli malzemeler tarafından absorbe edildiği söylenebilir.

Kompozisyonların içerisinde bulunan yüksek organik madde miktarında 105°C sıcaklıktan dolayı herhangi bir malzeme kaybı olup olmadığını kontrol etmek amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Zeccos (2005) organik madde kaybının önüne geçmek için KKA numunelerini 55°C sabit sıcaklıkta kurumaya bırakmıştır. Yine buna benzer olarak Siegel ve diğ., (1990), Hu ve diğ., (1999) numunelerinin su içeriği değerini belirlemek için 60°C'lik sıcaklık kullanmışlardır. Bu çalışmalardan yola çıkılarak aynı şekilde hazırlanan numuneler 60°C ve 105°C'lik sabit sıcaklıklarda kurumaya bırakılmış ve elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. İki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen su içeriği tayini deneyleri sonuçları arasında kayda değer bir farklılık olmadığı gözlenmiştir.

Şekil 3.12 Su içeriği belirlenmiş KKA numuneleri

KKA'lar içerisinde yüksek oranda organik madde bulundurmaktadırlar. Organik madde içeriği; birim hacim ağırlık, su içeriği, sıkışma miktarı, hidrolik iletkenlik gibi KKA'ların mühendislik özelliklerinde etkin bir role sahiptir. Literatürde KKA'lar için rapor edilen organik madde miktarları çok geniş bir yelpaze içerisinde değer almaktadır. Gabr ve Valero (1995) yaptıkları arazi çalışmalarında organik madde miktarını %33 olarak belirlemişlerdir. Landva ve Clark (1990), Barlaz ve diğ. (1990) ve Gifford ve diğ. (1990) gerçekleştirdikleri çalışmalar sonucunda KKA'lardaki organik madde miktarının selüloz ve hemiselüloz içeriğine bağlı olarak %5 ile %75 arasında değer aldığını rapor etmişlerdir. Hu ve Chen (1999) Çin'de bulunan bir atık depolama sahasında yaptıkları çalışmada organik madde miktarını %41,6 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca organik madde miktarının derinlik arttıkça azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal yıllanmış, doğal taze, sentetik yıllanmış ve sentetik taze numunelerinin organik madde miktarları belirlenmiştir. KKA numunelerinin organik madde (OM) miktarları ASTM D 2974-14 (2014) test standartlarına uygun şekilde belirlenmiştir. Belirli miktarlarda hazırlanan KKA numuneler doğal (başlangıç) su içeriklerinin kuruması amacıyla 24 saat 105°C sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Daha sonra başlangıç su içeriklerini kaybeden numuneler porselen potalar içerisinde yüksek ısılı fırına yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Numuneler 24 saat süresince 440°C sabit sıcaklıkta bekletilerek organik maddelerin tamamen yok olması sağlanmıştır. Deney sırasında kayıt edilen hassas tartım değerlerinden yararlanılarak OM yüzdeleri hesaplanmıştır.

Şekil 3.13 Porselen potalar içerisindeki organik madde deney numuneleri

KKA'ların fiziko-kimyasal özelliklerinin incelenmesi sırasında numunelerin pH ölçümleri de yapılmışır (Şekil 3.14). Bunun için Kocasoy (1994)'un katı atıkların pH ölçümü için geliştirdiği yöntem kullanılmıştır. Bu yönteme göre 50 gr' lık numuneler 125 ml karbondioksitsiz su içerisine dökülmüş ve numuneler tamamen ıslanana kadar cam çubukla karıştırılmıştır.

Süspansiyon karışımı içinde bulunduran beherin ağzı hava almayacak şekilde parafilm ile kapatıldıktan sonra karışımın dengeye gelmesi amacıyla 24 saat beklemeye bırakılmıştır. Süre tamamlandıktan sonra pH probu süspansiyon karışıma daldırılmış, değer sabitleninceye kadar beklenilmiş ve numuneye ait pH değeri kaydedilmiştir. Numunenin pH ölçme işlemi tamamlandıktan sonra yeni numuneye geçmeden önce pH probu saf su ile temizlerek kontaminasyon önlenmiştir.

Şekil 3.14 Sentetik KKA numunelerinin pH değerlerinin ölçülmesi

3.2.2 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Deneyleri

Kompaksiyon en basit şekliyle, danelerin titreşim ve darbe gibi mekanik enerjiler aracılığıyla daha yoğun daha sıkı hale getirilmesi işlemidir. Kompaksiyon işlemi süresince daneler arasındaki mesafe ve hava boşlukları azalır (Wong, 2009). KKA'ların depolama tesisilerinde daha az yer kaplaması, daha yüksek ve daha dik açılarla güvenli yerleştirme yapılabilmesi için düzenli atık depolama tesislerinde yapılacak kompaksiyon işleminin önemi büyüktür. İyi sıkıştırılmış KKA'lar mühendislik özellikleri bakımından daha güvenilir ve yüksek dayanımlı olmalarının yanı sıra, hacimsel olarak daha az yer kaplamaları sayesinde depolama tesislerinin kullanım ömürlerini uzatarak ekonomiye katkı sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında doğal ortamdan alınan taze ve yıllanmış numuneler ile, laboratuvar ortamında hazırlanan sentetik taze ve sentetik yıllanmış numunelerin kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Kompaksiyon deneylerinde Standart ve Modifiye Proctor deneyleri kullanılmıştır. Deneylerin uygulanmasında ASTM D698-12 (2012) ve ASTM D1557-12 (2012) standartlarında belirtilen dane boyutu sınırlamalarına uyulmuştur.

3.2.2.1 Sentetik Taze ve Yıllanmış Numunelerin Kompaksiyonu

Laboratuvar ortamında üç farklı kompozisyonda (T-1, U-1 ve E-1) hazırlanan sentetik taze numuneler farklı su içeriklerinde homojen bir şeklide karıştırılarak hazırlanmış ve çeşme suyu numune karışımlarının tam olarak dengeye gelmesi amacıyla 24 saat hava almayan kaplar içerisinde bekletilmiştir. U-1 ve E-1 kompozisyonlarına ait numuneler için 6 farklı su içeriğinde hazırlanırken (%20 - %40 - %60 - %80 - %100 - %120), T-1 kompozisyonuna ait numunelerde 8 farklı su içeriğinde ayrı ayrı hazırlanmıştır (%0 - %10 - %20 - %40 - %60 - %80 - %100 - %120). T-1 kompozisyonuna ait kompaksiyon deneylerinin daha fazla başlangıç su içeriği değeri ile yapılmasının nedeni kompaksiyon eğrisinin diğer iki kompozisyona (U-1 - E-1) oranla daha kuru tarafta kalıyor olmasıdır. Sentetik taze numuneler ile yapılan deneylerde iki farklı kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Standart Proctor deneyinde 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile 305 mm yükseklikten herbir katmana 25 düşü yaptırılacak şekilde malzeme kalıbın içine 3 tabaka halinde sıkıştırılmıştır (Proctor, 1933). Kalıp içerisine sıkışmış numune hidrolik kriko yardımıyla çıkarılarak su içeriğinin belirlenmesi için belli bir miktar ayrılmıştır (Şekil 3.15). Zemin mekaniği numunelerine kıyasla çok daha heterojen özellikte olan KKA numunenin su içeriğinin belirlenmesi için çok daha büyük miktarda numune ayrılmıştır (her sıkışma katmanının yarısı). Kalıbın içinden alınan numunelerin su içeriği değeri belirlendikten sonra gerekli hesaplamalar yapılarak malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{d\ max}$) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri belirlenmiştir. Modifiye Proctor testi sırasında ise numune 5 tabaka halinde sıkıştırılmakta ve Standart Proctor deneyine oranla numuneye yaklaşık 4,5 kat daha fazla enerji etki etmektedir (Standart Proctor Enerji: 12,375 ft·lb/ft^3, Modifiye Proctor Enerji: 56,250 ft·lb/ft^3).

Şekil 3.15 Sentetik taze numunenin kalıptan hidrolik kriko yardımıyla çıkartılması

Sentetik taze KKA numunelerinin yanı sıra aynı kompaksiyon deneyleri laboratuvar ortamında sentetik olarak belirli kompozisyonda hazırlanmış sentetik yıllanmış KKA numunelerinin üzerlerinde gerçekleştirilmiştir. T-1, E-1 ve U-1 kompozisyonlarında hazırlanan numuneler yıllanma etkisinin incelenmesi amacıyla büyük plastik variller içerisinde dış ortam koşullarında belirlenen sürede bekletildikten sonra kompaksiyon deneylerine tabii tutulmuşlardır. Bir ay boyunca atmosfer etkilerine (yağmur, kar, güneş, sıcaklık değişimleri) maruz bırakılan numunelerin kompaksiyon deneyleri de ASTM-D 698-12 (2012) ve ASTM-D 1557-12 (2012) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sentetik yıllanmış numunlere ait kompaksiyon deneyleri de sentetik taze numuneler gibi iki farklı kompaksiyon enerjisi için gerçekleştirilmiştir.

Dane boyutunun kompaksiyon davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla sentetik taze KKA numunelerinin dane boyutlarında değişiklikler yapılarak kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak kompozisyonun oluşturulduğu malzemelerin hemen hemen tamamının daha büyük boyutlarda kullanıldığı (plastik atık haricinde) numunelerin kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Daha büyük boyutlardaki malzemeler kullanılarak (kağıt-karton, tekstil, cam, metal, mutfak ve park-bahçe atığı) üretilen KKA numunelerinin kompaksiyon deneylerinde standartlarda belirtilen boyut sınırlamalarına uyularak büyük kompaksiyon kalıbı kullanılmıştır (D=152,4 mm). Daha önceki deneylerden Standart Proctor ekipmanlarıyla elde edilen sonuçların uygulamada olması gerekenin çok altında sıkışma sağladığı (very poor compaction) belirlendiğinden, bu deneylerde sadece Modifiye Proctor ekipmanları kullanılmıştır. Dane boyutunun kompaksiyon üzerindeki etkisinin incelenmesine diğer malzemelerin boyutları sabit tutulurken, kompozisyon içerisinde baskın yüzdeye sahip olan malzemelerin boyutlarının arttırılmasıyla devam edilmiştir. Laboratuvar ortamında üretilen üç kompozisyon incelendiğinde en büyük yüzdelerin kağıt-karton ve mutfak atıklarına ait olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkılarak diğer malzeme boyutları sabit tutulurken sadece mutfak atıkların boyutlarının büyütüldüğü daha sonrada sadece kağıt-karton atıkların boyutlarının büyütüldüğü numuneler ile kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

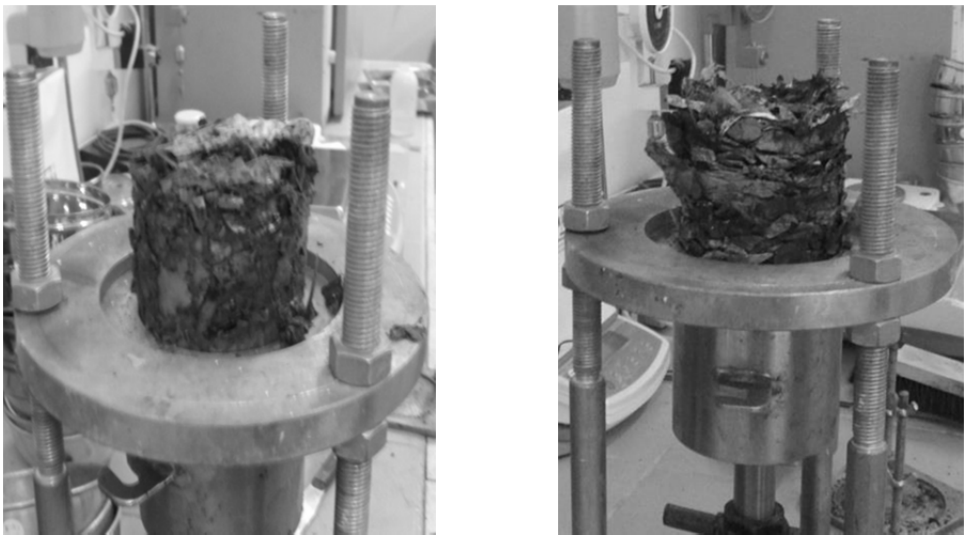
Atık kompozisyonunu oluşturan malzemelerin kompaksiyon davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla çalışmanın temelini oluşturan üç kompozisyonun (T-1, E-1 ve U-1) birleşim yüzdeleri değiştirilerek ya da bazı malzemeler kompozisyondan tamamen çıkarılarak modifiye kompozisyonlar oluşturulmuştur (T-1-1, T-1-2, U-1-1, U-1-2, E-1-1 ve E-1-2). T-1-1 modifiye kompozisyonu orijinal T-1 kompozsyonun içerisindeki %15'lik kül atığın kompozisyon içerisinden tamamen çıkartılmasıyla oluşturulmuştur. T-1-2 kompozisyonu, T-1 orijinal kompozisyonu içerisindeki %45 gibi çok büyük bir yüzdeye sahip organik madde miktarının

%20'ye indirilmesiyle meydana gelmiştir. E-1 kompozisyonunun %35'lik bölümünü kağıt-karton atık, %35'lik bölümünü organik atıklar oluşturmaktadır. Kağıt ve karton atık oranının %35'ten %10'a indirilmesiyle E-1-1, organik atık miktarının %35'ten %10'a indirilmesiyle E-1-2 modifiye kompozisyonları oluşturulmuştur. U-1 kompozisyonu diğer iki kompozisyona göre daha fazla plastik ve metal atık içermektedir. Orijinal U-1 kompozisyonundan %12'lik plastik atık tamamen çıkartılarak U-1-1 modifiye kompozisyonu oluşturulmuştur. Yine buna benzer şekilde %9'luk metal atık çıkartılarak tamamen kompozisyondan çıkartıralarak U-1-2 modifiye kompozisyonu meydana getirilmiştir. Oluşturulan bu yeni modifiye kompozisyonlar üzerinde Modifiye Proctor deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.2 Doğal Taze ve Yıllanmış Numunelerin Kompaksiyonu

Manisa vahşi atık depolama tesisinin farklı bölüm ve derinliklerinden alınan taze ve yıllanmış KKA numuneleri üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Kompaksiyon deneyleri sırasında standartlarda yer alan ekipmanlara uyumlu olarak kullanılması gereken maksimum dane boyutları sınırlamaları deneylerde göz önünde bulundurulmuştur. Büyük parçalar ayrıldıktan sonra kompaksiyon deneyleri maksimum boyutu 40-50 mm olan parçalar ile büyük kompaksiyon kalıbı kullanılarak yapılmıştır (D=152,4 mm).

Doğal taze atık numuneler, atık sahasından ağzı sıkıca kapatılmış büyük naylon poşetler içerisinde alınarak laboratuvara getirilmiştir. Doğal nemini kaybetmesine izin vermeden hızlı şekilde kompaksiyon deneyleri tamamlanmıştır. Kompaksiyon deneylerinde bir kez kullanılan sıkıştırılan numunenin içerisindeki materyallerin büyük deformasyona uğraması nedeniyle bir daha kullanılmamasına dikkat edilmiştir. Doğal yıllanmış numuneler de doğal taze numuneler ile aynı koşullarda deneye hazırlanmış ve deneyler tamamlanmıştır. Şekil 3.16 (a) doğal taze KKA numunesinin, 3.16 (b) yıllanmış KKA numunesinin hidrolik kriko ile kalıptan çıkartılmasını göstermektedir. Şekil 3.16'dan görüldüğü üzere doğal KKA numuneleri kalıptan çıkartıldığında kendi kendini tutabilen bir yapıdadır.



(a) **(b)**

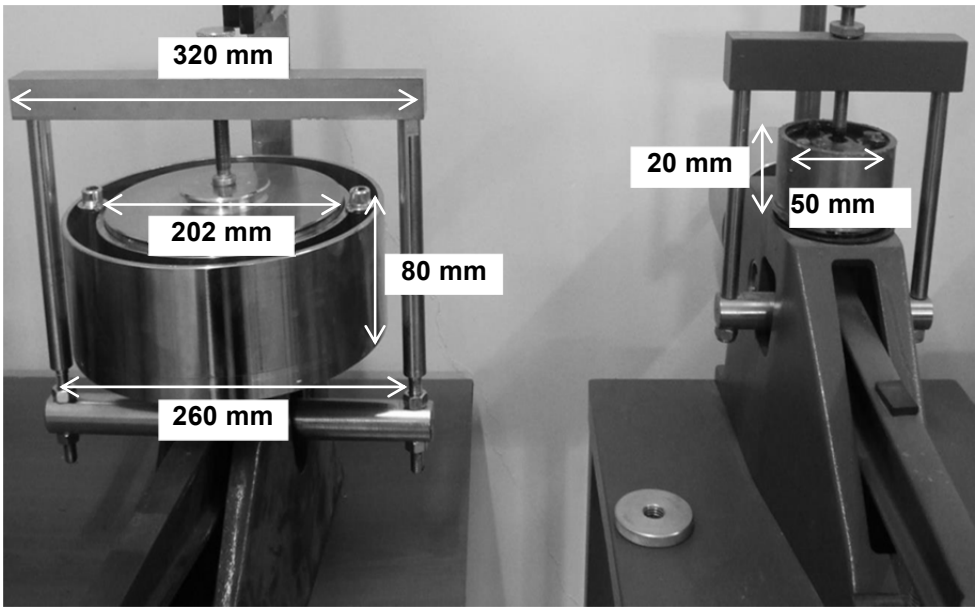
Şekil 3.16 a) Doğal taze, **b)** doğal yıllanmış KKA numunelerin kalıptan çıkartılması

3.2.3 Kentsel Katı Atıkların Sıkışma Deneyleri

Düşey yük altındaki KKA'lar içlerinde bulunan hava ve suyun artan basınç nedeniyle drene olması sonucunda düşey yönde deplasman yaparlar. KKA'ların sıkışma davranışlarının incelenmesi amacıyla laboratuvar ortamında büyük ölçekli sıkışma deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sentetik ve doğal katı atık numunelerinin dane boyutları zemin danelerine kıyasla çok daha büyük olduğundan, zemin mekaniği deneyleri için geliştirilmiş olan sıkışma hücrelerinin boyutları yeterli olmamaktadır. Bu nedenle büyük ölçekli sıkışma deneylerinin yapılacağı özel üretilmiş bir sistem tasarlanarak, İzmir Bornova 4. Sanayi Sitesi'nde bulunan EM-YA Makine Tic. Ltd. Şti.'ne imal ettirilmiştir. Büyük ölçekli sıkışma deneyleri sırasında, sistemde yanal deformasyonların oluşmaması için numune halkasının et kalınlığı 5-6 mm paslanmaz çelik malzeme olarak seçilmiştir. Ayrıca korozyonu önlemek amacıyla sistem parçalarına kromaj kaplama yapılmıştır. Sistem sıkışma deneyine benzer şekilde rijit bir halka içerisine belirli yoğunluk ve su içeriğinde yerleşirilen numunenin, düşey yöndeki gerilmenin etkisiyle zaman içerisinde yapacağı düşey deformasyonun gözlenmesi prensibine dayanır (ASTMD 4186-12, 2012). Tek eksenli sıkışma numunesinin minimum çapı standartlarda 50 mm olarak verilmiştir. Bu çalışma için geliştirilen rijit halkanın çapı 202 mm, yüksekliği 80 mm olarak seçilmiş ve standartlarda belirtilen (D/H = 2,50) çap-yükseklik sınırlamalarına uygun olarak tasarlanmıştır. Numunenin koyulacağı halkayı metal dış hücre çevrelemektedir. Dış hücre numunelerin doygun ortamda oturma davranışlarını incelemek amacıyla içine su konulabilecek şekilde sızdırmaz ve paslanmaz özelliklerde imal ettirilmiştir

(D:260 mm – H:90 mm). Sıkışma sistemi üzerine yerleştirilen büyük ölçekli oturma hücresinin üzerine metal plakadan imal edilen rijit yükleme başlığı yerleştirilecek şekilde imalat yaptırılmıştır.

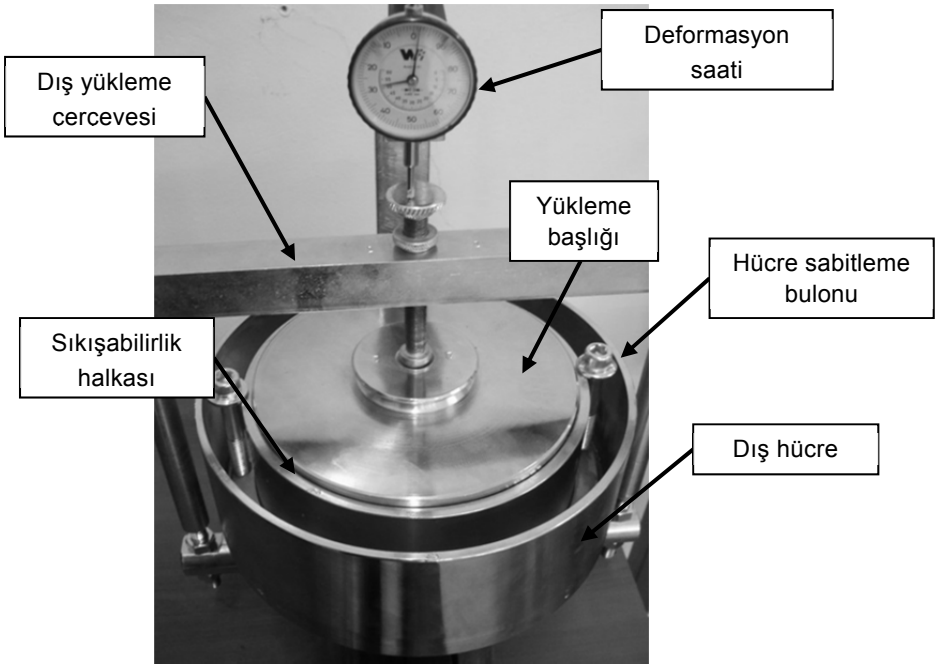
Zemin mekaniği laboratuvarlarında bulunan tek boyutlu konsolidasyon deney sistemi ile KKA numunelerin sıkışma deneyleri için modifiye edilmiş sistem karşılaştırması Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Numune halkası ve dış hücrenin büyütülmesine ek olarak dış yükleme çerçevesinin de modifikasyonu yapılmıştır. Sistemin modifikasyon işlemleri sırasında 50 mm çapındaki sıkışabilirlik halkası 202 mm boyutlarında üretilmiştir. Bu çap değerine uygun gelecek şekilde sıkışabilirlik halkasının yüksekliği 80 mm olarak tasarlanmıştır. Sıkışabilirlik halkasının taban ve üst kısmında suyun drene olmasına izin verecek şekilde radyal su kanalları bulunduran metal plakalar yer almaktadır. Sıkışabilirlik hücresinin en üst kısmında gerilmenin homojen şekilde yayılmasını sağlayacak olan yükleme başlığı bulunmaktadır. Sıkışabilirlik halkasının deney süresince stabil kalması amacıyla hücrenin sağ ve solunda iki adet sabitleme bulonu bulunmaktadır (Şekil 3.17). Dış sıkışabilirlik hücresi sızdırmazlığı sağlanmış şeklide imal edilmiş ve doygun durumda deney yapılmasına olanak sağlayacak şeklide sıkışabilirlik halkasından daha yüksek boyutludur (90 mm).



Şekil 3.17 Büyük ölçekli ve standard 1-D boyutlu sıkışabilirlik hücreleri

Doğal ya da sentetik KKA numunesi belirli kompozisyon ve birim hacim değerinde sıkışma halkasının içerisine yerleştirildikten sonra dış hücrenin içerisine oturtulmuştur. Dış hücre ile iç halkayı birbirine bağlayan sabitleme bulonları sıkılarak hareketsizlik sağlanmıştır. (Şekil 3.18).

Deneyin doğal su içeriğinde ya da doygun durumda gerçekleştirilecek olmasına göre dış hücrenin içerisine su konulmuştur.



Şekil 3.18 Büyük ölçekli 1-D sıkışabilirlik hücresinin bileşenleri

Standart boyutlardaki sıkışabilirlik hücresinin büyütülmesi sıkışabilirlik sisteminin çerçeve boyutlarınında büyütülmesini gerektirmiştir. Sistemin birçok parçasında yapılan modifikasyonlar sistemin düzgün çalışıp çalışmadığının kontrolünün yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle S tipi yükleme hücresi kullanılarak sistemin moment kolunun düzgün şekilde işleyip işlemediği kontrol edilmiştir. Sıkışma sistemi moment prensibine dayanan 1/9 – 1/10 ve 1/11'lik kuvvet arttırımı yapabilen şekilde tasarlanmıştır. Numune kesit alanı büyük olduğundan dolayı sistemin büyük kuvvetlere ihtiyacı olduğundan 1/11'lik yük kademesine uygun moment kolu mesafesinde çalıştırılması planlanmıştır. Kalibrasyon işleminde numunenin bulundurulduğu dış hücre çıkartılarak yerine S tipi yükleme hücresi yerleştirilmiştir. Daha sonra 2 kg'lık yük 1/11'lik moment koluna takılarak kalibrasyon cihazının ekranından sistemde oluşan kuvvet 22 kg olarak olması gerektiği gibi okunmuştur (Şekil 3.19).

Şekil 3.19 Büyük ölçekli sıkışabilirlik sisteminin kalibrasyonu

Sıkışma deneylerinde laboratuvar ortamında üretilen taze ve yıllanmış sentetik numuneler ile Manisa atık depolama sahasından alınan taze ve yıllanmış doğal KKA numuneler kullanılmıştır. Doğal numuneler ile yapılan sıkışma deneyleri doğal taze ve doğal yıllanmış olarak ikiye ayrılmıştır. T-1, E-1 ve U-1 kompozisyonlarının taze numuneleri üzerinde doygun (su seviyesi altında) ve doğal su içeriğinde olmak üzere toplamda altı sıkışma deneyi gerçekleştirilmiştir. Yine üç kompozisyonda üretilen sentetik yıllanmış numunelerin deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler gerçekleştirildikten sonra modifiye edilmiş kompozisyon numuneleri kullanılarak 6 adet deney daha gerçekleştirilmiştir.

Kompozisyon içerisinde öne çıkan bu atıkların yüzdeleri değiştirilerek ya da tamamen kompozisyondan bertaraf edilerek sıkışabilirlik deneyleri için yeni modifiye kompozisyonlar oluşturulmuştur (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Modifiye sentetik KKA kompozisyonları ve özellikleri

No	Kompozisyon	İçerik
1	T-1-1	Kül atık içermeyen T-1 kompozisyonu (%15)
2	T-1-2	Organik atık oranı %45'ten %20'ye azaltılmış T-1 kompozisyonu
3	E-1-1	Kağıt-karton atık oranı %35'ten %10'a azaltılmış E-1 kompozisyonu
4	E-1-2	Organik atık miktarı %35'ten %10'a azaltılmış E-1 kompozisyonu
5	U-1-1	Plastik materyali içermeyen Amerika kompozisyonu (%12)
6	U-1-2	Metal materyali içermeyen Amerika kompozisyonu (%9)

Böylece üç temel kompozisyon (T-1, E-1, U-1) ve bu temel kompozisyonlardan türetilen altı modifiye kompozisyon ile farklı mühendislik özelliklerine sahip dokuz farklı sentetik taze KKA numunesi sıkışma deneylerinde kullanılmıştır.

Sıkışma deneylerinde kullanılan değişkenlerden bir diğeri de su içeriğidir, bu nedenle deneyler doygun ve doğal su içeriğinde koşullarında ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. KKA depolama sahalarında yıl içerisinde mevsimsel meydana gelebilecek değişiklikler KKA numunelerinin sıkışma özelliklerini önemli şekilde değiştirebilmektedir. Zemin yüzeyinin altına inşaa edilen depolama sahalarındaki atıklar yer altı su seviyesinin derinliğine, mevsim, yağış dönemi vb. koşullara bağlı olarak doygun ya da belirli bir su içeriğinde bulunabilmektedirler. Bu nedenle aynı kompozisyonlarda, doğal su içeriğinde ve birim hacim ağırlığında hazırlanmış sentetik KKA numunelerinin doygun (dış hücre su ile dolu) ve kuru ortamda (dış hücre boş) sıkışma deneyleri gerçekleştirilerek deney dış koşullarının sıkışma davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.6'da sıkışma deney programı ve numune özellikleri özetlenmektedir. Sıkışma deneylerinde kompozisyon içeriği (üç temel numune ve altı modifiye numune), yıllanma etkisi ve numune doygunluk derecesi (doygun ve kuru durum) değişkenler olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.6 Büyük ölçekli sıkışma deney programı ve numune özellikleri

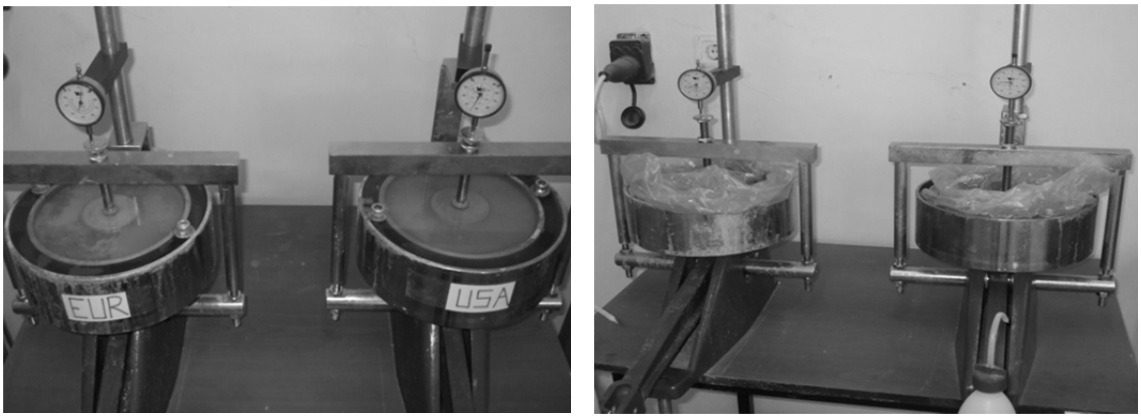
Komp.	Numune özellikleri	Numune Su içeriği		Deney Koşulu	
		Doğal	Optimum	Islak	Kuru
E-1-I	Taze, orijinal kompozisyon	✓		✓	
E-1-D	Taze , orijinal kompozisyon	✓			✓
E-1-Y	Yıllanmış, orijinal kompozisyon		✓		✓
E-1-1	Taze, kağıt atık %25 azaltılmış	✓			✓
E-1-2	Taze, organik atık %25 azaltılmış,	✓			✓
T-1-I	Taze, orijinal kompozisyon	✓		✓	
T-1-D	Taze, orijinal kompozisyon	✓			✓
T-1-Y	Yıllanmış , orijinal kompozisyon		✓		✓
T-1-1	Taze, kül atık kaldırılmış	✓			✓
T-1-2	Taze, organik atık %25 azaltılmış,	✓			✓
U-1-I	Taze , orijinal kompozisyon	✓		✓	
U-1-D	Taze , orijinal kompozisyon	✓			✓
U-1-Y	Yıllanmış , orijinal kompozisyon		✓		✓
U-1-1	Taze, plastik atık kaldırılmış	✓			✓
U-1-2	Taze, metal atık kaldırılmış	✓			✓
M-D-T	Manisa depolama sahasından taze	✓			✓
M-D-Y	Manisa depolama sahasından yıllanmış	✓			✓

Laboratuvar ortamında üretilen sentetik KKA numunelerin zamana bağlı düşey yöndeki deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sıkışma deneylerindeki ilk adım numunelerin hazırlanmasıdır. Daha önceki bölümlerde detaylı açıklamaları verilen üç sentetik taze doğal su içeriğinde (E-1-D, U-1-D ve T-1-D), üç sentetik taze ıslak (E-1-I, U-1-I ve T-1-I), üç sentetik yıllanmış doğal su içeriğinde (E-1-Y, U-1-Y ve T-1-Y) altı doğal su içeriğinde modifiye (E-1-1, E-1-2, T-1-1, T-1-2, U-1-1 ve U-1-2) ve doğal yıllanmış – doğal taze olmak üzere KKA numunelerinin sıkışma deneyleri yapılmıştır. Sıkışma deneylerinde kullanılacak numuneler belirlenmiş kompozisyon yüzdelerinde biraraya getirilmiş ve kullanılan tüm malzemelerin numune içerisinde homojen dağılım göstermesi için iyice karıştırılmıştır (Şekil 3.20).

Şekil 3.20 Sıkışma deneyi numunelerinin hazırlanışı

Sıkışma deneyine ait numuneler ilk başta doğal su içeriğindedir, daha sonra deneyin yapılacağı su içeriğine göre eğer gerekli ise su eklemi işlemi yapılarak suyun numune içerisinde homojen karışımı sağlanmıştır. Gerçekleştirilen ilk deneylerde doğal su içeriğinde hazırlanan KKA numunelerin fazla kuru olması nedeniyle numune halkası içerisine istenilen yoğunlukta yerleştirilememesi problemi ile karşılaşılmıştır. Numunelerin sıkışma hücresi içerisine istenilen (6,0 – 9,0 kN/m^3) birim hacim ağırlık değerinde yerleştirilebilmesi için numune ağırlığının %25'ine denk gelen oranda su eklenmiştir. Bu sayede hem numuneler kompaksiyon deneylerinde belirlenen optimum su içeriğine yakın bir değerde hazırlanmış hem de istenilen birim hacim ağırlık değer aralığına ulaşılmıştır. Büyük ölçekli sıkışma sisteminde sabitleme bulonları numunenin sıkıştırılma işlemi sırasında hücrelerin birbiri içerisinde hareket etmemesini sağlamaktadır. Alt drenaj plakası numune hücresinin tabanına yerleştirilmiş, drenaj plakasının deliklerinin ufak daneler tarafından kapanmaması için numunenin alt kısmına filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Sıkıştırma deneylerinde sabit bir sıkıştırma prosedürü uygulanmıştır. Numune hücresi beşte birine kadar doldurulmuş (yaklaşık 1,50 cm) daha sonra

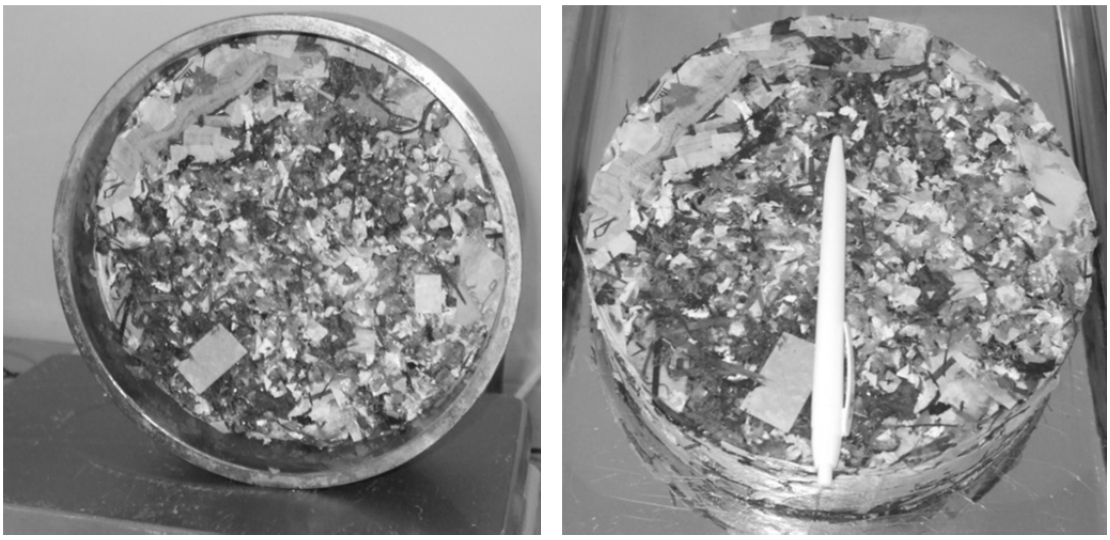
her darbede sabit enerji veren Standart Proctor tokmağıyla 100 darbe vurulmuştur. Bu işlem yaklaşık eşit yükseklikteki beş katmanın herbiri için uygulanmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numunenin hemen üstüne filtre kağıdı, filtre kağıdının üzerinede üst drenaj plakası yerleştirilmiştir. Numune hücresinin en üst kısmına yükleme plakası koyulmuş ve hücre sıkışma yükünün verileceği sehpanın üstüne yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilecek deneyin türüne göre (ıslak ya da kuru) dış hücrenin içi boş bırakılmış ya da su ile doldurulmuştur. Kuru durumda hazırlanan numunelerin doğal su içeriğini kaybetmemesi açısından naylon ile sarılarak dışarıdan hava ile teması engellenmiştir (Şekil 3.21).



(a) **(b)**

Şekil 3.21 Sıkıştırma deneyleri a) Islak durum b) Kuru durum

Sıkışma deneyelerine ilk olarak 0,125 kg/cm$^{2'}$lik bir önyükleme basıncı ile başlanılmıştır. Bu gerilme altında 24 saatlik beklendikten sonra sıkışabilirlik deneylerinde kullanılan en düşük düşey gerilme (0,25 kg/cm^2) ile deneye devam edilmiştir. Sıkışabilirlik deneylerinde numuneye uygulanan en yüksek gerilme değeri 4 kg/cm^2 olarak uygulanmıştır. Deney başlatıldıktan sonra 10, 15, 30 saniye; 1, 2, 4, 8, 15, 30 dakika; 1, 2, 4, 8, 24, 48 ve 72 saat okumaları kayıt edilmiştir. Deformasyon okumaları deformasyonlar sabite yakın bir duruma gelinceye kadar kaydedilmiştir. Deney tamamlandıktan sonra numune zarar görmeyecek şekilde numune hücresinin içerisinden çıkartılıp, su içeriğinin belirlenmesi için tepsiye yerleştirilerek tartılmıştır. Şekil 3.22'de sıkıştırma deneyi sonrası KKA numunesinin hücre içerisindeki durumunu göstermektedir.

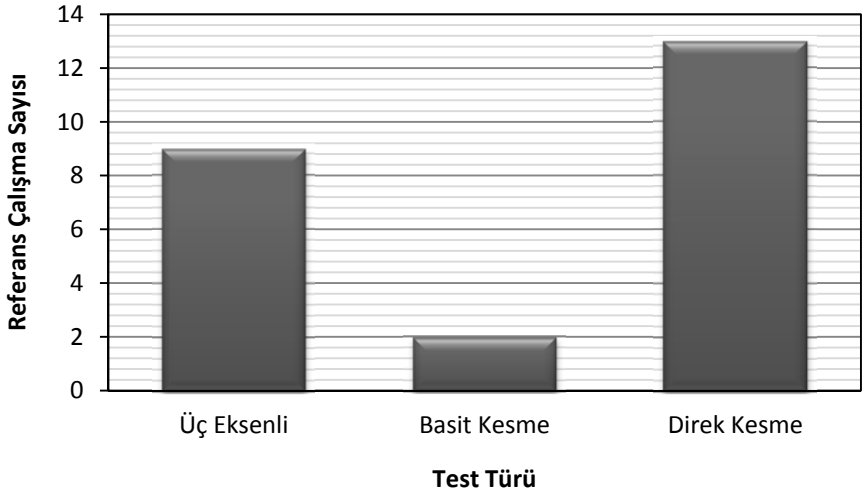


Şekil 3.22 Sıkıştırma deneyi sonrası KKA numunesinden görüntüler

Sıkışma deneyleri sonunda KKA numunelerinin sıkışma indisleri (C_c) boşluk oranı (e) – logaritmik gerilme grafiğinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Tüm sıkışma indisi değerleri 2 - 4 kg/cm^2'lik gerilme aralığından yararlanılarak hesaplanmıştır.

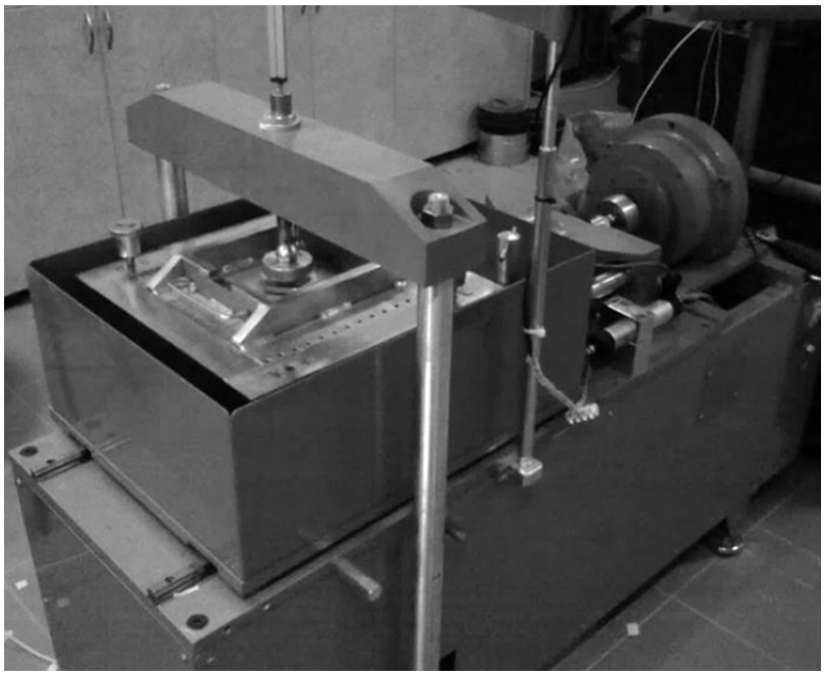
3.2.4 Kentsel Katı Atıkların Direk Kesme Deneyleri

Kentsel katı atıklar üzerinde gerçekleştirilen kayma mukavemeti deneylerinde direk kesme deneyinin yaygın olarak kullanılan diğer kayma mukavemeti deneylerine kıyasla çalışmalarda daha fazla tercih edildiği görülmüştür (Zeccos, 2005). Şekil 3.23'den görüldüğü üzere kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda ilk sırayı direk kesme deneyi alırken, onu sırasıyla üç eksenli (triaxial) basınç ve basit kesme (simple shear) deneyleri izlemiştir.



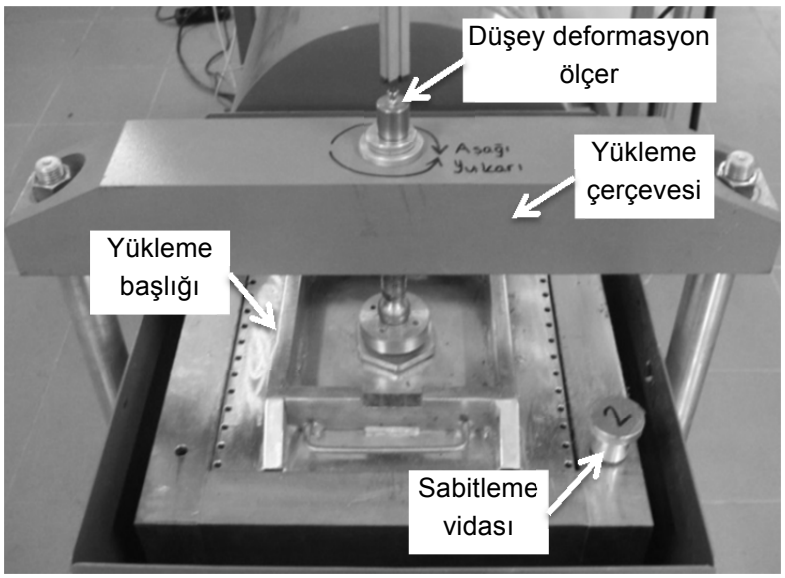
Şekil 3.23 KKA'ların kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılan test türleri (Zeccos, 2005)

KKA numunelerini oluşturan malzemeler çok geniş bir dane dağılımı aralığına sahip olduğu için deney standartları incelendiğinde zemin mekaniği laboratuvarlarında bulunan küçük ölçekli direk kesme cihazlarının, sentetik KKA numunelerinde kullanılmasının doğru sonuçlar vermeyebileceği belirlenmiştir ($D_{Hücre} \geq 10.D_{maks.dane}$, [ASTMD 3080-11, 2011]). Bu nedenle zemin numunelerine oranla çok daha büyük daneler bulunduran KKA numunelerinin kayma mukavemeti değerlerinin belirlenmesi için büyük ölçekli direk kesme cihazı imal ettirilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Büyük ölçekli direk kesme cihazı

Yüksek kapasiteli tam otomatik büyük ölçekli direk kesme cihazı (TC-S001-01) Ankara, Ostim'deki Test Center firmasına özel olarak imal ettirilmiştir. Kesme kutusu 300 mm boyutunda kare kesitli olup (900 cm^2) net yüksekliği 150 mm'dir. Düşey ve yatay yönde 10 ton (100 kN) yükleme kapasitesine sahip olup, step motor sistemiyle sabit yükleme sağlanmaktadır. Kesme hızı 0,2 mm/dakika ile 9,99 mm/dakika arasında yapılabilmektedir. Yatay ve düşey yönde elektronik deplasman ölçerler (transducer) ve yükleme hücreleri verileri otomatik olarak bilgisayara gönderilmektedir. Kesme kutusu su geçirimi önlenmiş dış hücrenin içine oturmaktadır, bu sayede doygun durumda kayma mukavemeti belirlenmesi için gerekli koşullar oluşturulabilmektedir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Kesme kutusunun bölümleri

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda KKA numunelerin sıkı zemin numunelerine benzer şekilde pik (maksimum değer noktası) bir kayma gerilmesi değerinin olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle direk kesme deneylerinin yanal deformasyon kontrollü yapılması planlanmıştır. Gerçekleştirilen araştırmalar neticesinde maksimum yanal deformasyonun %20 olarak (60 mm) seçilmesi uygun görülmüştür. Deneyler sırasında kullanılacak kesme hızı ASTMD 3080-11 (2011)'de belirtilen Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$t_f = 50 \cdot t_{50} \quad (3.1)$$

$$t_{50} = t_{90} / 4{,}28 \quad (3.2)$$

Sıkışma deneyleri sonucunda, %50 sıkışmanın tamamlanmasına karşılık gelen zaman t_{50} olarak grafikten okunmaktadır. KKA numuneleri ile yapılan sıkışma deneyleri sonucunda

karekök – zaman metodunun Casagrande metoduna kıyasla daha uygun eğriler oluşturduğu belirlenmiştir. Bu nedenle karekök – zaman eğrisinden %90 sıkışmanın gerçekleşmesi için gerekli süre olan t_{90} değeri alınarak aradaki bağlantı denklemleri ile t_{50} değerine ve oradanda t_f değerine ulaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ortalama 2-3 mm/dakika'lık kesme hızlarının uygun olacağı belirlenmiştir.

Direk kesme kutusu eşit yükseklikteki (2 x 10 cm) iki hazneden meydana gelmektedir. Alt hazne yükleme pistonlarına bağlı olarak raylı sistemin üzerinde hareket ederken üst hazne hareketsiz durmaktadır. Direk kesme kutusunun içerisine çeşitli kompozisyon, su içeriği ve birim hacim ağırlıklarda yerleştirilen numunelere kayma kuvvetleri etki ettirilerek ve bu kuvvetler yük hücreleri tarafından belirlenip elde edilen değerler bilgisayarda kaydedilmektedir.

Bu çalışma kapsamında laboratuvar ortamında taze hazırlanan üç farklı kompozisyondaki (E-1, U-1 ve T-1) KKA numuneleri ve bu kompozisyonların bileşiminde bulunan baskın malzemelerin oransal olarak azaltılması ya da tamamen çıkartılmasıyla türetilmiş altı farklı modifiye KKA numunesi kullanılmıştır (E-1-1, E-1-2, U-1-1, U-1-2, T-1-1 ve T-1-2). Ayrıca kompozisyon içerisindeki lifli malzemelerin (kağıt, karton ve tekstil atık) kayma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sadece lifli atık malzemeler kullanılarak (%25 tekstil, %60 kağıt, %15 karton) oluşturulan numunenin büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve kayma dayanımı parametreleri elde edilmiştir. Taze KKA numunelerine ek olarak bir yıl önce plastik konteynırların içerisinde dış ortam koşullarında bırakılmış üç farklı kompozisyondaki (E-1, U-1 ve T-1) yıllanmış KKA numunelerinin de direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kentsel katı atık depolama sahaları zemin yüzey seviyesinin altında inşaa edildiğinden ve su içeriğinin KKA'ların mühendislik parametreleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğundan dolayı KKA'ların su altındaki kayma mukavemetlerinin de incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla üç kompozisyon numunesinin su altındaki (kesme kutusu dış hücresi su ile doldurulmuş) (doygun) direk kesme deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Sentetik numuneler ile gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden sonra doğal atık numuneleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Manisa Büyükşehir Belediyesi atık depolama sahasından alınan doğal taze ve doğal yıllanmış numuneler ile büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak İzmir ili Menemen Organize Sanayi Bölgesi Endüstriyel atık depolama sahasından alınan doğal numuneler ile direk kesme deneyleri yapılmıştır. Doğal su içeriğindeki endüstriyel katı atık numuneler iki farklı birim hacim ağırlık değerinde hazırlanarak direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7 Büyük ölçekli direk kesme deney programı ve deney özellikleri

Komp.	Numune özelliği	Numune Su içeriği		Deney Koşulu	
		Doğal	Optimum	Islak	Kuru
E-1-D	Taze, orijinal kompozisyon	✓			✓
E-1-I	Taze, orijinal kompozisyon		✓	✓	
E-1-Y	Yıllanmış, orijinal kompozisyon		✓		✓
E-1-1	Taze, kağıt atık %25 azaltılmış numune		✓		✓
E-1-2	Taze, organik atık %25 azaltılmış numune		✓		✓
T-1-D	Taze, orijinal kompozisyon	✓			✓
T-1-I	Taze, orijinal kompozisyon		✓	✓	
T-1-Y	Yıllanmış, orijinal kompozisyon		✓		✓
T-1-1	Taze, kül atık kaldırılmış		✓		✓
T-1-2	Taze, organik atık %25 azaltılmış numune		✓		✓
U-1-D	Taze, orijinal kompozisyon	✓			✓
U-1-I	Taze, orijinal kompozisyon		✓	✓	
U-1-Y	Yıllanmış, orijinal kompozisyon		✓		✓
U-1-1	Taze, plastik atık kaldırılmış		✓		✓
U-1-2	Taze, metal atık kaldırılmış		✓		✓
M-T	Manisa atık depolama sahasından alınmış taze numune	✓			✓
M-Y	Manisa atık depolama sahasından alınmış yıllanmış numune	✓			✓
Mnmn B. bha	Menemen Endüstriyel atık depolama sahasından alınmış büyük bha	✓			✓
Mnmn. K. bha	Menemen Endüstriyel atık depolama sahasından alınmış küçük bha	✓			✓

Direk kesme deneyinin ilk adımını KKA numunesinin kesme kutusu içerisine yerleştirilmesi işlemi oluşturmaktadır. Alt plaka numunenin iyi tutunması için kanallı ve suyun drene olabilmesi için delikli şekilde imal edilmiştir ve bu plaka üzerine filtre kağıdı yerleştirimiştir. Belirlenmiş su içeriğindeki numune beş eşit katman halinde ve her bir katmana Standart Proctor tokmağı ile 100 darbe vurularak yerleştirilmiştir. Yerleştirme ve sıkıştırma işlemi tamamlandığında kullanılan numune miktarı kesme kutusu hacmine bölünerek içerideki numunenin birim hacim ağırlık değeri hesaplanmış ve istenilen değer aralığının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.26).

Şekil 3.26 Kesme kutusunun içine yerleştirilmiş sentetik KKA numunesi

Direk kesme deneyleri 49, 98 ve 196 kPa olmak üzere üç farklı normal gerilme değeri için gerçekleştirilmiştir. Deneyin ilk aşamasını normal kuvvetin düşey yönde belirtilen değere ulaşıncaya step motor vasıtasıyla numuneye uygulanması oluşturmaktadır. Her deneye başlamadan önce sabitleme vidaları, sabitleme deliklerinden çıkarılarak kesme kutusu üzerindeki diğer iki deliğe takılmıştır. Alt ve üst kutu birbirinden ayırıp, kutular arasındaki temas yüzeyi minimuma indirgemiştir. Bu sayede iki kutunun birbirine sürtünmesi sonucu oluşacak sürtünme kuvvetleri engellenmiştir. Sisteme girilen normal kuvvet değerine ulaştığı anda otomatik olarak kesme işlemine başlanmıştır. Kesme aşaması boyunca sistem tarafından düşey ve yatay yöndeki deformasyonlar kayıt altına alınmaya devam edilmiştir. KKA'ların belirgin bir maksimum göçme gerilmesi değeri olmadığından kesme kutusu deneyleri yanal deformasyon kontrollü yapılmıştır. Deneyler için daha önceden belirlenmiş

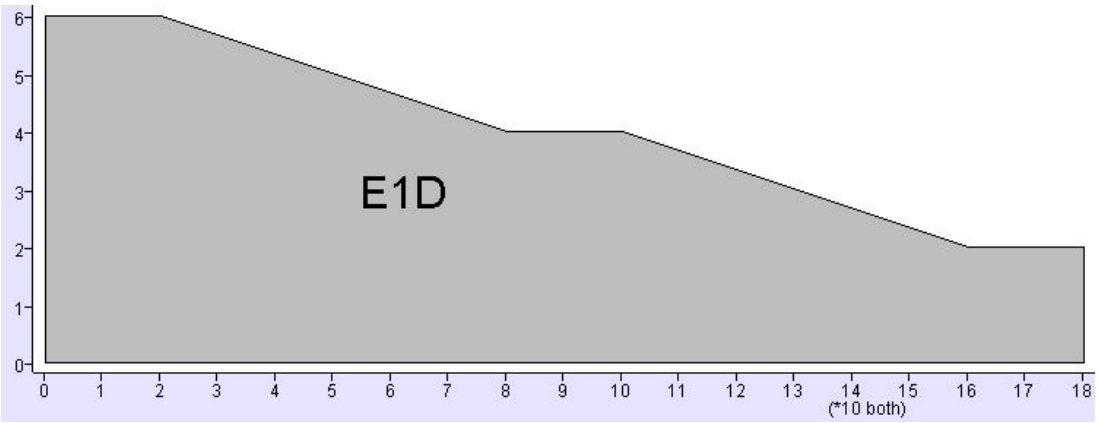
%20 yanal deformasyon değeri kullanılmıştır (ε = 60 mm / 300 mm). Bu nedenle 60 mm'lik yatay deplasman yapıldığında alt hazne ilerlemesini durdurulmuş ve deney tamamlanmıştır. Deney tamamlandıktan sonra elde edilen bilgisayara kaydedilen veriler normal kuvvet, kayma kuvveti, düşey deplasman ve yatay deplasman yardımıyla normal ve kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Her deney setinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi – normal gerilme değerleri bir grafik üzerinde birleştirilerek her bir KKA numunesi için kayma mukavemeti parametreleri (içsel sürtünme açısı ve kohezyon) belirlenmiştir.

3.2.5 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılık Analizleri

Depolama sahasına getirilen KKA'lar belli bir eğimle depolanırlar. Atıkların depolama yüksekliği ve şev açısı KKA'ların temel mühendislik parametrelerine bağlı olarak belirlenir. Laboratuvar ya da arazi ortamında belirlenen parametreler kullanılarak KKA'ların şev duraylılık analizleri gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında farklı birim hacim ağırlıklarda, çeşitli geometrik özelliklerdeki sentetik taze sentetik yıllanmış, doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerinin şev duraylılık analizleri yapılmıştır. Duraylılık analizlerinde sonlu farklar metodunu kullanan FLAC-2D ve sonlu elemanlar metodunu kullanan Plaxis-2D programları kullanılmıştır. Ayrıca Manisa doğal taze (M-D-T) ve Manisa doğal yıllanmış (M-D-Y) numunelerinin duraylılık analizleri Talren (V.4) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

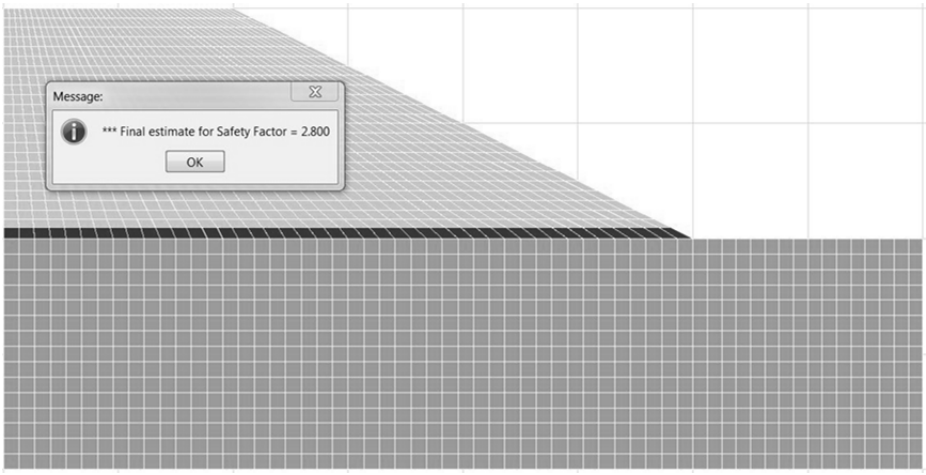
İlk şev modelleri FLAC programının bünyesinde bulunan FLAC-Slope modülü kullanılarak oluşturulmuş, farklı özellik ve geometrideki depolama sahalarının güvenlik sayıları belirlenmiştir. Elde edilen güvenlik sayılarının kontrol edilmesi amacıyla aynı özelliklerdeki şevlerin Plaxis programıyla da duraylılık analizleri yapılmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında KKA'ların birim hacim ağırlık değerlerinin 4 ile 16 kN/m^3 arasında kaldığı görülmüştür (Kavazanjian ve diğ., 1995; Zekkos ve diğ., 2006). Sentetik ve doğal KKA numuneleri kullanılarak yapılan deney sonuçlarından birim hacim ağırlık değerlerinin 8 ile 13 kN/m^3 arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak analizlerde gevşek, sıkı ve ortalama birim hacim ağırlıktaki KKA durumunu temsil eden üç farklı birim hacim ağırlık değerinin kullanılması uygun görülmüştür ($\gamma_{gevşek}$=7 kN/m^3 ,γ_{orta}=10 kN/m^3 -$\gamma_{sıkı}$=14 kN/m^3). Analizlerde malzeme tanımlamasında kullanılacak kayma mukavemeti parametreleri (c: kohezyon, $\varnothing$: içsel sürtünme açısı) gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilmiştir. Yıllanmış, taze, doğal ve sentetik numuneler için gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri farklı özelliklerdeki malzemelerin tanımlanması aşamasında kullanılmıştır. Depolama sahalarındaki KKA'ların durayılık analizlerinin yapılabilmesi için tasarım

geometrilerinin oluşturulması gerekmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında ve çevre bölgelerde inşaa edilmiş düzenli atık depolama sahalarında yerinde yapılan araştırmalardan yararlanılarak iki farklı şev geometrisi belirlenmiştir. Bu geometrilerden birincisi 3 birim yatay 1 birim düşeye karşılık gelen şev açısının yaklaşık 18°'ye karşılık geldiği şev modeli, diğeri de 2 birim yatay 1 birim düşey uzunluğun yatayla 26,5° açı yaptığı ikinci şev geometrisi modelidir. KKA sahalarının depolama yüksekliği sahanın ekonomik ömrünü etkileyen en önemli parametredir. Duraylılık analizlerinde temel olarak 20 m. ve 40 m. olmak üzere iki farklı depolama yüksekliği seçilmiş sonraki çalışmalarda güvenlik sayısı (Gs) 1,50 için farklı depolama yükseklikleri ile de çalışılmıştır. Vahşi atık sahaları genellikle tek kademeli olarak hizmet ömürlerini sürdürürlerken, düzenli atık depolama sahalarında palyalı tasarımlar uygulanmaktadır. Duraylılık analizlerinde tek kademeli, iki kademeli ve çok kademeli (iki kademeden fazla) şev geometrilerinin analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.27).



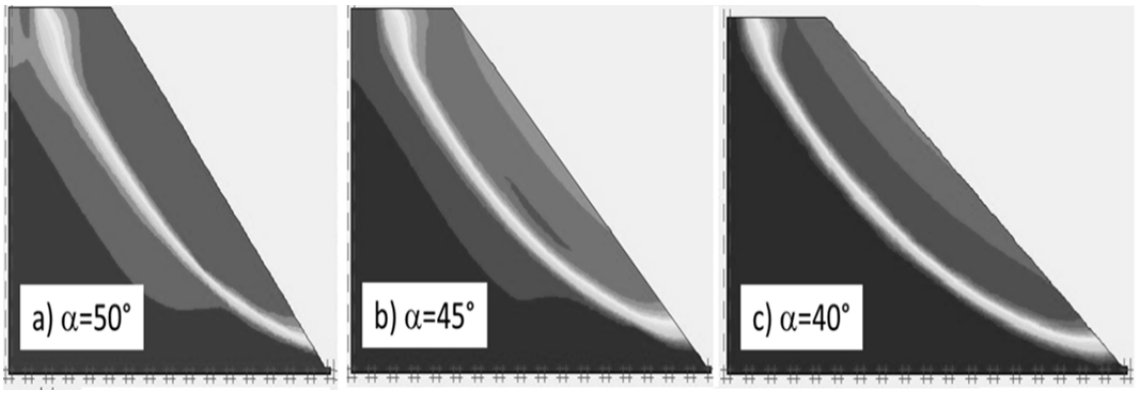
Şekil 3.27 İki kademeli modellenmiş şev geometrisi

Yeraltı su seviyesi konumu KKA numunelerin birim hacim ağırlık değerlerini buna bağlı olarak gerilme dağılışını ve duraylılığını etkiler. Farklı yüksekliklerdeki su seviyelerinin şev duraylılık faktörüne etkisi de incelenmiştir. Düzenli atık depolama sahaları çok uzun yıllar boyunca hizmet verebilmektedir. Bu süreç içerisinde yıllanmış atık katmanı ile üzerine yerleştirilen taze atık katmanı arasında potansiyel bir kayma yüzeyinin oluşabileceği düşünülmektedir. Bu durum alt kısımda yıllanmış üst ısımda taze KKA'lara ait kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak modellenmiş ve şev güvenlik sayıları belirlenmiştir (Şekil 3.28).



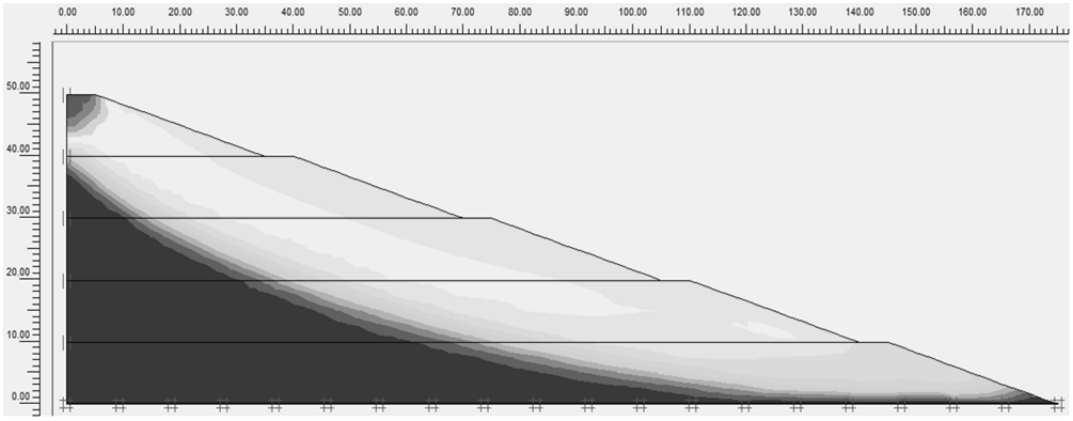
Şekil 3.28 Kum (SW) bandıyla ayrılmış yıllanmış ve taze KKA tabakaları

Şev duraylılık analizlerine mevcut durumda kullanılan Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasının duraylılık analizleri ile devam edilmiştir. Atık depolama sahasından alınan doğal numunelerin kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiş, yapılan çok sayıda arazi ziyareti sonrasında şev geometrisi gerçeğe yakın şekilde oluşturulmuştur. Elde edilen bu veriler kullanılarak üç farklı şev açısı için (α=40° - 45° - 50°) ve 50 m'lik depolama yüksekliği için şev duraylılık analizleri gerçekleştiriilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Plaxis-2D programıyla üç farklı eğimde gerçekleştirilen duraylılık analizleri

Analizlere İzmir ili Menemen ilçesindeki Organize Sanayi Bölgesi düzenli atık depolama sahası için gerçekleştirilen duraylılık analizleri ile devam edilmiştir. Atık depolama sahasından alınan endüstriyel atık numunelere ait kayma mukavemeti parametreleri büyük ölçekli direk kesme deneyi iki farklı birim hacim ağırlık için belirlenmiştir (büyük b.h.a. ve küçük b.h.a.). Arazi çalışmalarından elde edilen verilerinde yardımıyla düzenli atık depolama sahasının güvenlik sayıları çeşitli durumlar için belirlenmiştir (Şekil 3.30).



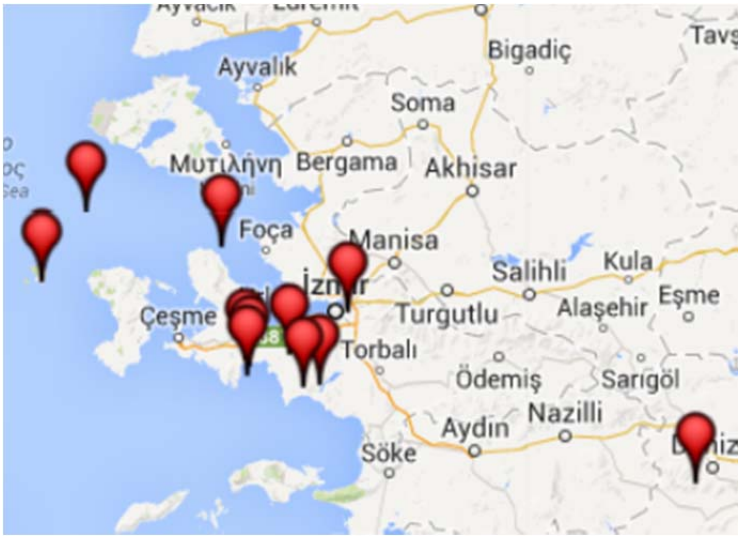
Şekil 3.30 Menemen düzenli atık depolama sahasının şev güvenlik analizi

Analizlerde statik kuvvetlere ek olarak dinamik kuvvetlerin de şev duraylığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Manisa vahşi atık depolama sahası ile Menemen endüstriyel atık depolama sahalarının merkez koordinatları belirlenmiş, sonrasında doğu, batı, kuzey ve güney yönlerinde 100 km'lik sınırlarla her depolama sahası için 40.000 km^{2}'lik sismik inceleme alanları belirlenmiştir (Şekil 3.31).

Şekil 3.31 Manisa atık depolama sahası için belirlenmiş sismik inceleme sahası

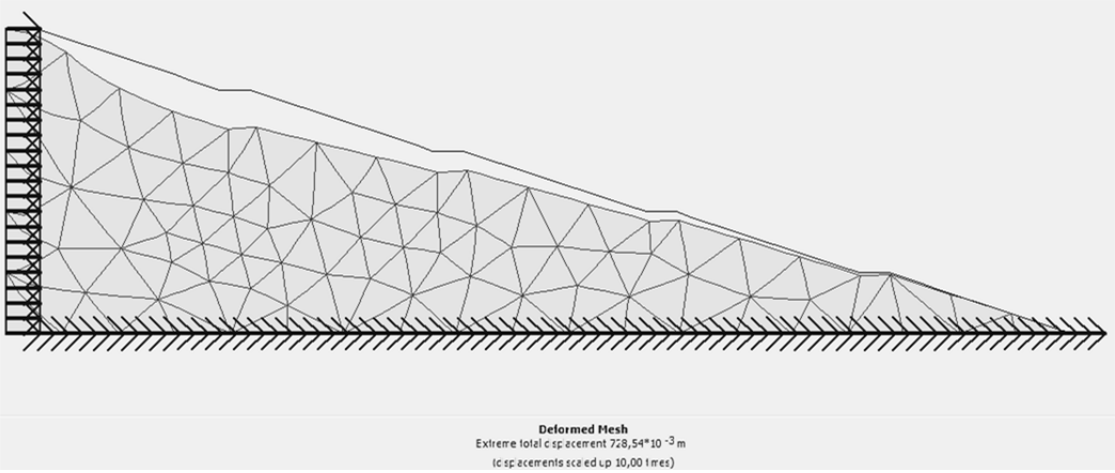
Depolama sahaları için belirlenen inceleme alanlarında meydana gelen büyüklüğü 5,5 ile 8,0 arasında değişiklik gösteren sismik faliyetler 1976 yılından günümüze (2014 yılı) kadar araştırılmıştır. Bölgeye uygun oluşabilmesi muhtemel dinamik deprem ivmeleri Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yönetilen

kuvvetli yer hareketleri gözlem ağı sitesinden elde edilmiştir (http://kyh.deprem.gov.tr/). Şekil 3.32 sismik inceleme sahasında belirlenen özelliklerde meydana gelmiş depremleri göstermektedir.



Şekil 3.32 İnceleme sahası içerisinde meydana gelmiş depremler

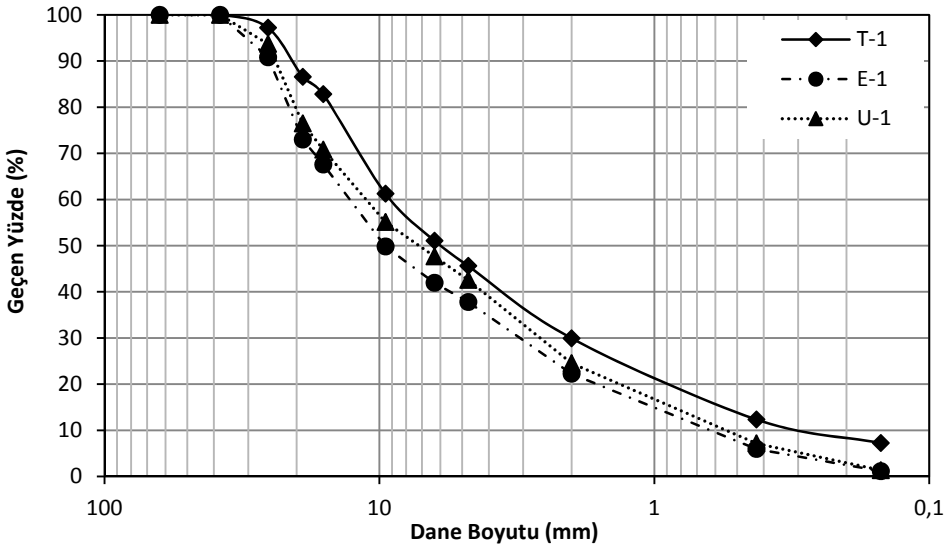
Elde edilen deprem kayıtları uygun veri formatına dönüştürüldükten sonra şev modellerine etki ettirilmiştir. Deprem kayıtlarından maksimum ivme değerleri belirlenmiş daha sonra maksimum değere göre 0,4g – 0,2g – 0,1g – 0,05g'lik dört farklı ölçeklendirme oluşturulmuştur. Dört farklı maksimum ivme değeri modellenen taban kayasına tanımlanmış deplasman olarak girilmiş ve şev gövdesinde oluşan maksimum deplasmanlar elde edilmiştir. Dinamik kuvvetler etkisinde deforme olmuş şev gövdesi Şekil 3.33'de görülmektedir.



Şekil 3.33 Dinamik kuvvetler etkisinde deforme olmuş şev gövdesi

4. KENTSEL KATI ATIKLARIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Çalışma kapsamında kullanılan sentetik ve doğal KKA'ların fizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla doğal su içeriği, organik madde miktarı, dane çapı dağılımı, pH tayini ve özgül ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında üç farklı kompozisyonda üretilen sentetik KKA numuneler belirlenen oranlarda doğal su içeriğindeki atık malzemelerle hazırlanmış ve tamamen homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Numunelerin dane çapı dağılım grafiklerinin belirlenebilmesi amacıyla zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan standart elekler ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) kullanılmıştır. Çizelge 3.2'de belirtilen elekler kullanılarak sentetik taze KKA numunelerin eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üç farklı kompozisyondaki sentetik taze KKA numunelerininin orijinal dane boyu dağılımını gösteren granülometri eğrileri Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekil 4.1'den görüldüğü üzere üç kompozisyonda birbirine benzer dane dağılım eğrilerine sahiptir. Granülometri eğrileriyle yapılan hesaplamalar sonucunda numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (UCSC)'e göre iyi derecelenme özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir ($1<C_C<3$ ve $C_U>6$).



Şekil 4.1 T-1, E-1, ve U-1 kompozisyonları granülometri eğrileri

Manisa atık depolama sahasından alınan doğal atık numuneler, standartlarda belirtilen dane boyu sınırlamalarına uygun olarak, özel olarak üretilen büyük boyutlardaki elek sistemleri kullanılarak 50 mm açıklıklı eleklerden elenerek deneylere hazırlanmış ve daha büyük daneler atık numunelerden çıkartılmıştır. Elde edilen numuneler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma

Sistemi (USCS)'nin iyi derecelenme koşullarını sağlamamaktadır. Yapılan incelemeler sonucunda tüm kompozisyonların %20 - %30 oranında zemin danesi benzeri (soil like materials ≤ 2 mm.) materyaller ihtiva ettiği belirlenmiştir.

Sentetik KKA numunelerin üretiminde kullanılan 11 farklı malzemenin özgül ağırlık değerleri her bir materyal için ayrı ayrı piknometre metoduyla (ASTM D 854-14, 2014) vakum uygulanarak belirlenmiştir. Literatür araştımaları ve laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen özgül ağırlık değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi en büyük özgül ağırlık değeri 7,41 değeri ile metal atığa, en düşük özgül ağırlık değeri ise 0,76 olarak plastik atığa aittir. Literatürden elde edilen değerler ile laboratuvar deney sonuçları karşılaştırıldığında özgül ağırlık değerlerinin birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.1 Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık (G_s) değerleri

No	Malzemeler	G_s (Literatür)	G_s (Laboratuvar)
1	Mutfak Atığı [3]	1,10	1,32
2	Cam kırıkları [1]	2,60	2,41
3	Bahçe atığı [4]	0,90	1,05
4	Plastik parçacıklar [4]	0,93	0,76
5	Ağaç talaşı [5]	0,53	0,96
6	Metal talaşı-tozu [1]	7,19	7,41
7	Kül [3]	0,66	-
8	Kağıt parçacıkları [5]	1,20	1,77
9	Karton parçacıkları [5]	0,69	0,95
10	Tekstil parçacıkları [2]	1,31	1,18
11	İnce daneli zemin [1]	2,65	2,57

[1] http://www.reade.com/Particle_Briefings/spec_gra.html

[2] http://www.cottoninc.com/CottonFiberChart/?Pg=8

[3] http://www.csgnetwork.com/specificgravmattable.html

[4] http://wiki.roblox.com/index.pHp/SpecificGravity_%28Property%29

[5] http://www.reade.com/Particle_Briefings/spec_gra.html

Deneyler ve literatür araştırmaları sonucunda elde edilen 11 malzemeye ait özgül ağırlık değerleri kompozisyon içerisindeki yüzde oranlarına bağlı ağırlıklı olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen özgül ağırlık değerlerine ek olarak her bir kompozisyonun 30 gr'lık örnekleri ile de özgül ağırlık deneyleri ASTM D 854-14 (2014) standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler, hesaplanan değerlere kıyasla %10 - %20 oranında daha düşük sonuç vermiştir. Çizelge

4.2'de T-1, E-1 ve U-1 numunelerinin literatür, laboratuvar ve hesaplanan ortalama özgül ağırlık değerlerini karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Çalışmada ortalama özgül ağırlık değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 4.2 T-1, E-1 ve U-1 kentsel katı atıknumunelerinin özgül ağırlık (G_s) değerleri

KKA kompozisyonu	Literatür	Laboratuvar	Ortalama
T-1	1,20	1,27	1,24
E-1	1,52	1,72	1,62
U-1	1,73	1,90	1,82

Literatürde karşılaşılan birçok çalışmada özgül ağırlık değerlerinin bu çalışma için hesaplanmış değerlere yakın olduğu görülmüştür. Babu ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada atık sahasından alınmış taze, yıllanmış ve laboratuvarda sentetik olarak üretilmiş üç farklı KKA numunesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kullanılan bu üç numune için (doğal taze, doğal yıllanmış ve sentetik) özgül ağırlık değerleri sırasıyla 0,85; 0,97; 1,09 olarak rapor edilmiştir. Reddy ve diğ. (2009) çalışmalarında laboratuvarda hazırlanmış Amerika KKA örneği için özgül ağırlık değerini 1,60 olarak rapor etmişlerdir. Nijerya'nın Akure bölgesindeki atık depolama sahasında yapılan çalışmalarda üç farklı derinlikteki atıkların özgül ağırlık değerlerinin 1,40 ile 2,10 arasında değiştiği belirtilmiştir (Ojuri, 2012).

Çalışma kapsamında oluşturulan sentetik kompozisyon numuneleri atık malzemelerin ağırlıkça yüzde değerleri göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır. Atık malzemelerin kompozisyon içerisindeki ağırlık ve hacim ilişkilerini belirleyebilmek amacıyla kompozisyon içerisindeki hacimsel yüzde değerleri özgül ağırlık değerlerine bağlı olarak her bir atık malzeme için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 4.3 atık malzemelerin kompozisyon içerisindeki hacim – ağırlık yüzdeleri ilişkisini göstermektedir. Kentsel katı atıklar yapılarında çok farklı özelliklerde çeşitli malzemeler bulundurmaktadır. Atık malzemelerin KKA numuneleri içerisinde kapladıkları hacim özgül ağırlık değerlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çizelge 4.3'ten görüldüğü üzere talaş atığın hacimce yüzde oranı, ağırlıkça yüzde oranının yaklaşık olarak iki katı değer almıştır. Metal atık, U-1 kompozisyonunda ağırlıkça %9 değer alırken, sahip olduğu yüksek özgül ağırlık değeri sayesinde (Gs=7,3) numune içerisinde %1,4'lük hacim kaplamıştır. Kompozisyonların oluşturulmasında kullanılan diğer atık malzemelerin ağırlık ve hacim yüzdeleri arasında önemli bir farklılık olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.3 T-1, E-1 ve U-1 numuneleri oluşturan malzemelerin hacim ve ağırlık oranları

No	Malzeme	Kompozisyon Oranları					
		Ağırlık (%)			Hacim (%)		
		T-1	E-1	U-1	T-1	E-1	U-1
1	Mutfak Atığı	22,5	17,5	16	24,1	18	16,4
2	Cam kırıkları	4	6	7	1,8	2,6	3,0
3	Park-Bahçe Atığı	22,5	17,5	16	24,1	18	16,4
4	Plastik parçacıklar	10	8	12	15,5	11,9	17,8
5	Ağaç talaşı	4	6	7	8,6	12,3	14,3
6	Metal talaşı-tozu	2	5	9	0,3	0,8	1,4
7	Kül	15	0	0	6,3	0	0
8	Kağıt parçacıkları	12	28	22	11,8	26,3	20,6
9	Karton parçacıkları	3	7	6	2,9	6,6	5,6
10	Tekstil parçacıkları	5	3	5	4,7	2,7	4,5
11	İnce daneli zemin	0	2	0	0	0,9	0
	Toplam (%)	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

KKA'ların su içeriği değerleri çok geniş bir aralıkta değerler almaktadır. Sentetik KKA numunelerin üretiminde kullanılan farklı özelliklerdeki 11 malzemenin ayrı ayrı doğal su içeriği değerleri laboratuvar deneylerinde belirlenmiştir. Etüvde 24 saat 105°C sıcaklıkta bekletilerek belirlenen atık malzemelerin doğal su içeriği değerleri Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.4 Kullanılan malzemelerin başlangıç su içeriği değerleri

No	Malzemeler	Su içeriği (w, %)
1	Mutfak Atığı	620
2	Cam kırıkları	0,1
3	Park-bahçe atığı	468
4	Plastik parçacıklar	0
5	Ağaç talaşı	8
6	Metal talaşı-tozu	0,1
7	Kül	1
8	Kağıt parçacıkları	3
9	Karton parçacıkları	2
10	Tekstil parçacıkları	0
11	İnce daneli zemin	1,5

Yüksek oranda organik madde bulunduran KKA numunelerinin su içeriğinin belirlenmesinde kullanılan sıcaklığın organik madde kaybına neden olup olmadığı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Siegel ve diğ., 1990; Hu ve diğ., 1999; Zeccos, 2005). Bu çalışmada sentetik KKA numunelerinin üretiminde kullanılan organik malzemelerin kurutma sıcaklığı değişiminden nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bunun için numuneler 65 °C ve 105 °C sıcaklıklarda kurutularak sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi iki farklı sıcaklıkta kurutulan mutfak ve park-bahçe atığı numunelerinin ortalama doğal su içeriği değerleri incelendiğinde iki sıcaklıkta elde edilen değerler arasında çok büyük bir farklılık olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.5 Farklı sıcaklıklarda test edilen su içeriği değerleri

Organik numune türü	Kap no	Sıcaklık (°C)	w (%)	Ort. w (%)
Mutfak Atığı	1	65°	632	636
	2	65°	640	
	3	105°	618	623
	4	105°	628	
Park ve Bahçe Atığı	5	65°	476	468,5
	6	65°	461	
	7	105°	465	464
	8	105°	463	

Etüv sıcaklığı 65°C ve 105°C'ye ayarladığında elde edilen su içeriği arasındaki farklar %1-2 arasında, organik madde içeriğindeki fark ise %1'den az olmaktadır. Bu nedenle çalışmada kullanılan numuneler 105°C'lik sabit sıcaklıkta kurutulmuştur.

4.1 Sentetik KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Sentetik KKA numuneleri kendi içerisinde sentetik taze, sentetik yıllanmış ve sentetik modifiye olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Sentetik taze numuneler çalışma kullanılan üç temel kompozisyondan (T-1, E-1 ve U-1), sentetik yıllanmış numuneler ise bu temel kompozisyonların yıllandırılmış haldeki numunelerinden oluşmaktadır.

4.1.1 Sentetik Taze KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Sentetik taze T-1-D kompozisyonunun fizikokimyasal özellikleri Çizelge 4.6'da gösterilmektedir. T-1 numunesinin yüksek oranda organik madde içermesi buna karşılık metal, cam, zemin gibi özgül ağırlığı yüksek malzemelerden düşük oranda içermesi diğer

kompozisyonlara kıyasla özgül ağırlık değerinin daha düşük olmasına neden olmuştur. Buna karşılık yüksek oranda organik madde içermesi, doğal su içeriği ve organik madde miktarı değerlerinin diğer kompozisyonlardan yüksek olmasına neden olmuştur. Gerçekleştirilen pH deneyleri sonucunda, T-1-D numunesinin diğer numunelere göre yüksek pH değerine sahip olup bazik özellikte olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni diğer kompozisyonlarda bulunmayan yüksek oranda kül atıktır.

E-1-D kompozisyonu diğer kompozisyonlara göre daha yüksek oranda kağıt-karton atık içermektedir. Doğal su içeriği bakımından T-1-D kompozisyonuna göre daha az su içeriğine sahipken, organik madde içeriği bakımından T-1-D kompozisyonuna yakın değere sahiptir. Yapılan pH deneyleri sonucunda kompozisyonun asidik (pH=5,94) özelliğe sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.6).

Metal atık bakımından diğer kompozisyonlardan daha yüksek içeriğe sahip olması U-1-D numunesinin özgül ağırlık değerinin diğer iki kompozisyondan yüksek değer almasına neden olmuştur. Aynı zamanda U-1-D numunesi doğal su içeriği ve organik madde miktarı bakımından diğer kompozisyonlardan daha düşük değerlere sahiptir. U-1-D numunesinin pH değeri belirlendiğinde, E-1-D kompozisyonuna çok yakın pH değeri elde edilmiştir ve asidik (pH: 5,9) özelliktedir. Çizelge 4.6'da U-1-D numunesinin fizikokimyasal özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 T-1-D, E-1-D ve U-1-D KKA numunelerinin fizikokimyasal özelllikleri

Kompozisyon	**T-1-D**	**E-1-D**	**U-1-D**
Sentetik	☒	☒	☒
Doğal	☐	☐	☐
Taze	☒	☒	☒
Yıllanmış	☐	☐	☐
Özgül ağırlık (G_s)	1,24	1,62	1,82
Doğal su içeriği (w, %)	62	44	40
Organik madde miktarı (%)	65	64	58
pH	10,5	5,9	5,9

Laboratuvar ortamında üretilen sentetik taze KKA numunelerden diğer iki kompozisyona kıyasla daha yüksek metal atık yüzdesine sahip olan U-1-D numunesi en yüksek özgül ağırlık değerine sahiptir. Özgül ağırlığı düşük olan, organik atık bakımından zengin olan T-1-D numunesi diğer iki kompozisyondan düşük özgül ağırlık değerine sahiptir. Organik atıklar su içeriği bakımından diğer atık malzemelere göre daha yüksek su içeriği değerine sahiptirler. Bu

durumun bir sonucu olarak, organik atık bakımından en büyük yüzdeye sahip olan T-1-D numunesi diğer iki kompozisyona kıyasla %50 değeri gibi daha büyük su içeriği değerine sahiptir. Üç kompozisyonun organik madde miktarları karşılaştırıldığında, organik atık bakımından zengin olan T-1-D numunesi ile kağıt-karton atık bakımından zengin olan E-1-D numunesi birbirine yakın değer almıştır. Plastik ve metal atık bakımından daha büyük yüzdeye sahip olan U-1-D numunesi, T-1-D ve E-1-D numunelerine göre daha az organik madde içeriğine sahiptir. E-1-D ve U-1-D kompozisyonlarının pH değerleri birbirine yakın değer alırken, bazik özellikli kül atık bakımından zengin olan T-1-D numunesinin pH değeri çok daha büyük değer almıştır.

4.1.2 Sentetik Yıllanmış KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlandıktan sonra dış ortama bırakılarak yıllanması sağlanan KKA numunelerinin de fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Sentetik yıllanmış T-1-Y numunesinin organik madde miktarı 3 ay sonunda %62 iken, 12 ay sonunda bu değer %52 olarak belirlenmiştir. Yıllanmış T-1-D numunesinin doğal su içeriği değeri %114 olarak belirlenmiştir. Henüz dış ortamda yıllandırılmamış numunenin pH değeri 10,47 iken, 12 ay sonundaki pH değeri 9,42 olarak belirlenmiştir. Yıllanmış numunelerin fizikokimyasal özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan deneyler yağış miktarının yüksek olduğu sonbahar döneminde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle yıllanmış numunelerin doğal su içeriği yüksek değer almıştır. Çizelge 4.7'de T-1-Y numunesinin fizikokimyasal özellikleri gösterilmektedir.

E-1-Y numunesinin doğal su içeriği değerinin kompozisonundaki yüksek orandaki kağıt-karton atık nedeniyle diğer numunelere kıyasla çok daha fazla olmaktadır (w=%125). Organik madde miktarı değeri 3 ay sonunda %55, 12 ay sonunda %42 olarak belirlenmiştir. Yıllanmış numunelerin pH değeri ise taze numunelere kıyasla daha yüksek değer almıştır (Çizelge 4.7).

U-1-Y numunesinin doğal su içeriği %109 olarak elde edilirken, pH değeri taze numuneye oranla daha yüksek 6,73 olarak ölçülmüştür. Organik madde miktarı 3 ay sonunda %57, 12 ay sonunda % 47 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

Sentetik yıllanmış KKA numunelerinin fizikokimyasal özellikleri incelendiğinde, sentetik taze numunelere kıyasla her üç kompozisyonunun organik madde miktarlarında azalma olduğu gözlenmektedir. Kompozisyonlar içerisindeki en büyük pH değerine sahip T-1 kompozisyonunun, yıllanma etkisiyle pH değeri taze numuneye göre azalırken (T-1-Y), E-1 ve U-1 kompozisyonlarının yıllanmış numunelerinde (E-1-Y ve U-1-Y) pH değerlerinde artış gözlenmiştir. Yıllanmış numunelerin (T-1-Y, E-1-Y ve U-1-Y) dış ortam koşulları altında

yağmura maruz kalmış olması, doğal su içeriği değerlerinin sentetik taze (T-1-D, E-1-D ve U-1-D) numunelerden daha yüksek değer almasına neden olmuştur (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 T-1-Y, E-1-Y ve U-1-Y KKA numunelerinin fizikokimyasal özelllikleri

Kompozisyon	**T-1-Y**	**E-1-Y**	**U-1-Y**
Sentetik	☒	☒	☒
Doğal	☐	☐	☐
Taze	☐	☐	☐
Yıllanmış	☒	☒	☒
Doğal su içeriği (w, %)	114	125	109
Organik madde miktarı (%)	52	42	47
pH	9,4	6,68	6,73

4.1.3 Sentetik Modifiye KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Kompozisyon içerisindeki etkin özellikli malzemelerin belirli bir yüzdede azaltılması ya da tamamen kompozisyondan çıkartılması ile oluşturulan toplam altı adet modifiye kompozisyonların (T-1-1, T-1-2, E-1-1, E-1-2, U-1-1, U-1-2) fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir.

T-1 kompozisyonu içerisinde %15 oranında bulunan kül atığın kompozisyondan tamamen çıkartılması ile T-1-1 modifiye kompozisyonu oluşturulmuştur. Çizelge 4.8'den görüldüğü üzere T-1-1 kompozisyonunun doğal su içeriği %83, özgül ağırlığı 1,34 olarak belirlenmiştir. T-1 kompozisyonundan türetilen T-1-2 modifiye kompozisyonunda %45'lik organik madde miktarı %25 azaltılarak, %20 oranına indirilmiştir. Doğal su içeriğinin yükselmesine büyük katkısı bulunan organik atığın yarıdan fazlası çıkarılınca doğal su içeriği %22 değerine gerilemiştir. T-1-2 kompozisyonunun özgül ağırlığı 1,30 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8 T-1-D, T-1-1 ve T-1-2 KKA numunelerinin fizikokimyasal özelllikleri

Kompozisyon	**T-1-D**	**T-1-1**	**T-1-2**
Sentetik	☒	☒	☒
Doğal	☐	☐	☐
Taze	☒	☒	☒
Yıllanmış	☐	☐	☐
Özgül ağırlık (G_s)	1,24	1,34	1,30
Doğal su içeriği (w, %)	62	83	22
Organik madde miktarı (%)	65	-	-
pH	10,5	-	-

Orijinal T-1-D kompozisyonu ile modifiye T-1-1 ve T-1-2 kompozisyonlarının özgül ağırlık değerleri arasında çok büyükbir fark (< %7-8) bulunmamaktadır. Buna karşılık kül atığın çıkarıldığı T-1-1 numunesinin doğal su içeriği değeri orijinal numuneye kıyasla artarken, organik atığın %25 azaltıldığı T-1-2 numunesinin doğal su içeriği değerinde büyük düşüş gözlenmiştir.

Avrupa ortalama kompozisyonunu temsil eden E-1 numunesi diğer numunelere göre daha fazla oranda kağıt-karton atık içermektedir. Kağıt-karton atığın kompozisyon içerisinde ne gibi etkilere neden olduğunun araştırılması amacıyla %35'lik oran %25 azaltılarak %10 kağıt karton atık içeriği değerine düşürülmüştür. Diğer materyallerin oranları eşit oranda arttırıldığında kompozisyon içerisindeki organik madde içeriği artmıştır ve E-1-1'in doğal su içeriği %72 değerine yükselmiştir. Özgül ağırlık değeri Çizelge 4.9'dan görüldüğü gibi 1,68 olarak belirlenmiştir. E-1-2 kompozisyonunda organik madde miktarı E-1 kompozisyonuna göre %25 oranında azaltılmıştır. Modifiye kompozisyonun doğal su içeriği %12, özgül ağırlığı 1,82 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9 E-1-D, E-1-1 ve E-1-2 KKA numunelerinin fizikokimyasal özelllikleri

Kompozisyon	**E-1-D**	**E-1-1**	**E-1-2**
Sentetik	☒	☒	☒
Doğal	☐	☐	☐
Taze	☒	☒	☒
Yıllanmış	☐	☐	☐
Özgül ağırlık (G_s)	1,62	1,68	1,82
Doğal Su İçeriği (w, %)	44	72	12
Organik madde miktarı (%)	64	-	-
pH	5,94	-	-

Orijinal kompozisyon E-1-D numunesi ile kağıt-karton atık yüzdesi azaltılmış E-1-1 numunesinin özgül ağırlık değeri birbirine oldukça yakın değer alırken, organik atık yüzdesinin azaltıldığı E-1-2 numunesinin özgül ağırlık değeri daha yüksek değer almıştır. Kağıt-karton atık yüzdesinin düşürülmesi E-1-1 kompozisyonundaki organik atık yüzdesinin ve buna bağlı doğal su içeriği değerinin yükselmesine neden olmuştur. Buna karşılık %35'lik organik atık oranının %10'a düşürüldüğü E-1-2 numunesinin doğal su içeriği değeri orijinal kompozisyona kıyasla oldukça düşük değer almıştır.

U-1 kompozisyonu diğer kompozisyonlara kıyasla daha büyük oranlarda plastik ve metal atık içermektedir. Bu iki materyalin kompozisyon içerisindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla yeni modifiye kompozisyonlar oluşturulmuştur. U-1 kompozisyonu içerisinde %12 oranındaki plastik atık çıkarılarak oluşturulan U-1-1 kompozisyonunun doğal su içeriği değeri %47, özgül ağırlık değeri 1,95 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.10). U-1-2 modifiye kompozisyonu %9 oranındaki metal atığın U-1 kompozisyonundan tamamen çıkartılması ile oluşturulmuştur. Kompozisyonu oluşturan malzemeler arasındaki en büyük özgül ağırlık değerine sahip metal atık çıkarıldığında özgül ağırlık değerinde büyük bir düşüş gerçekleşmiştir. Buna ek olarak doğal su içeriğinde küçükte olsa bir artış söz konusudur. Çizelge 4.9'da modifye kompozsisyonlar olan U-1-1 ve U-1-2'nin temel kompozisyon U-1-D ile karşılaştırmalı fizikokimyasal özellikleri verilmektedir.

Çizelge 4.10 U-1-D, U-1-1 ve U-1-2 KKA numunelerinin fizikokimyasal özelllikleri

Kompozisyon	**U-1-D**	**U-1-1**	**U-1-2**
Sentetik	☒	☒	☒
Doğal	☐	☐	☐
Taze	☒	☒	☒
Yıllanmış	☐	☐	☐
Özgül ağırlık (G_s)	1,82	1,95	1,27
Doğal su içeriği (w, %)	40	47	45
Organik madde miktarı (%)	58	-	-
pH	5,93	-	-

Çizelge 4.10'dan görüldüğü üzere plastik atığın kompozisyondan çıkartılması sonucu U-1-1 numunesinin özgül ağırlık değeri orijinal U-1-D numunesine kıyasla yükselmiştir. Buna karşılık metal atığın orijinal kompozisyon içerisinden çıkartıldığı U-1-2 numunesinin özgül ağırlık değerinde büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Plastik ve metal atıkların orijinal kompozisyon içerisinden çıkartılmasıyla kompozisyon içerisindeki organik atık miktarı yükselmiş ve bu durum modifiye numunelerin daha yüksek doğal su içeriği değerlerine sahip olmasına neden olmuştur.

4.2 Doğal KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal KKA numuneleri Manisa Büyük Şehir Belediyesi atık depolama sahasından temin edilmiştir. Sentetik numunelere benzer şekilde doğal atıklar taze ve yıllanmış olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Taze atıklar depolama sahasında maksimum 5-7 gün kalmış numunelerden oluşurken, depolama sahasının farklı bölgelerinden alınan yıllanmış atıkların depolama süresi 5 yıldan başlayıp 10 yıla kadar ulaşabilmektedir. Depolama sahasından alınan doğal atıkların fizikokimyasal özellikleri laboratuvar deneyleri sonucunda belirlenmiştir. Doğal atıklar depolama sahasında 50 mm'lik elekten elenerek poşetlenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan incelemelerde doğal taze atıkların doğal yıllanmış atıklara oranla daha ufak danelere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan bir diğer doğal atık numunesi İzmir Menemen Organize Sanayi Bölgesi düzenli atık depolama sahasından alınan endüstriyel atık numuneleridir. Bu numunelerde Manisa doğal atık numunelerinde olduğu gibi maksimum dane boyutu sınırlamaları yapıldıktan sonra doğal su içeriği ve organik madde miktarı değerleri belirlenmiştir.

4.2.1 Doğal Taze KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Manisa doğal taze (M-D-T) KKA numunesinin fizikokimyasal özellikleri Çizelge 4.11'de özetlenmiştir. Numunenin doğal su içeriği %94, organik madde miktarı %61 olarak belirlenmiştir. Doğal taze numunenin özgül ağırlık değeri T-1 kompozisyonuna yakın bir değerde 1,12 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.11). Manisa taze doğal numunesinin doğal su içeriği T-1-D numunesinden daha büyük değer almıştır (w_{MDT}= %94, w_{T1D}= %62). Bu durumun oluşmasında doğal atığın depolama sahasından alındığı yağmurlu dönem etkili olmuş ve doğal su içeriği değerini arttırmıştır. Birbirlerine benzer kompozisyon özelliklerine sahip M-D-T numunesiyle T-1-D numunesi organik madde yüzdesi bakımından birbirine oldukça yakın değer almıştır (OM_{MDT}= %61, OM_{T1D}= %65).

4.2.2 Doğal Yıllanmış KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

Manisa yıllanmış doğal (M-D-Y) KKA numunesinin fizikokimyasal özellikleri Çizelge 4.11'de özetlenmiştir. Yıllanma süresince organik madde miktarı azalmış bunun bir sonucu olarak özgül ağırlık değeri M-D-T'den ve T-1-D kompozisyonundan daha büyük bir değer almıştır. Numunelerin yağışlı dönemde alınmasından dolayı numunelerin doğal su içeriği %68 bulunmuştur. Depolama sahasında çalışan belediye elemanlarının verdiği bilgilere göre alınan

yıllanmış atıkların depolama süresi 5-10 yıldır. Organik madde miktarı %41 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.11 Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerin fizikokimyasal özelliklerini göstermektedir. Manisa taze doğal (M-D-T) ve Manisa yıllanmış doğal (M-D-Y) KKA numunelerin özgül ağırlık değerleri karşılaştırıldığında, yıllanmış numunenin özgül ağırlık değerinin taze numuneden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşmasının nedeni taze numunenin içerisinde yüksek oranda bulunan organik atıkların biyolojik bozunmaları sonucu yerini daha yüksek özgül ağırlıklı atıklara bırakmış olmasıdır. Doğal taze ve yıllanmış numunelere ait doğal su içeriği değerleri karşılaştırıldığında taze numunenin, yıllanmış numuneye kıyasla %35-40 daha büyük su içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum taze atığın yüksek yüzdede organik atık içermesiyle açıklanabilmektedir. Yine bu sonuçlara paralel olarak taze atık, yıllanmış atıktan çok daha büyük yüzdede organik madde bulundurmaktadır. Bir başka değişle yaklaşık taze atık 5-10 yıl içerisinde, organik madde miktarının %30-35'lik bölümünü yıllanma etkisiyle yitirmektedir.

Çizelge 4.11 M-D-T ve M-D-Y KKA numunelerinin fizikokimyasal özelllikleri

Kompozisyon	**M-D-T**	**M-D-Y**
Sentetik	☐	☐
Doğal	☒	☒
Taze	☐	☐
Yıllanmış	☒	☒
Özgül ağırlık (G_s)	1,12	1,43
Doğal su içeriği (w, %)	94	68
Organik madde miktarı (%)	61	41

4.2.3 Menemen Endüstriyel KKA Numunelerinin Fizikokimyasal Özellikleri

İzmir ili, Menemen ilçesinde kurulu Organize Sanayi Bölgesi'nde kurulu düzensiz (vahşi) endüstriyel katı atık depolama sahasından alınan doğal numunelerin fizikokimyasal özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Maksimum dane boyutu sınırlaması diğer doğal atıklarda olduğu gibi maksimum 50 mm ile sınırlandırılmıştır. Doğal atıklara ait dane boyutunda alt sınır değer kullanılmamıştır. Yapılan deneyler sonucunda numuneye ait organik madde ve doğal su içeriği değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4.12 endüstriyel doğal KKA numunesinin fizikokimyasal özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 4.12 Menemen OSB Endüstriyel KKA numunesinin fizikokimyasal özelllikleri

Menemen OSB Endüstriyel KKA			
Sentetik	☐	Taze	☐
		Yıllanmış	☐
Doğal	☑	Taze	☐
		Yıllanmış	☑
Organik madde miktarı (%)			41
Doğal su içeriği (w_n %)			85

Menemen OSB vahşi depolama sahasından alınan endüstriyel KKA'lara ait organik madde miktarı M-D-Y numunesiyle aynı değere sahiptir. Bu durum alınan atık numunesinin uzun yıllardır depolama sahasında bulunduğunun bir işaretidir. Endüstriyel atık numunesinin doğal su içeriği %85 gibi ortalama kabul edilebilecek bir değer almıştır.

5. KENTSEL KATI ATIKLARIN KOMPAKSİYON ÖZELLİKLERİ

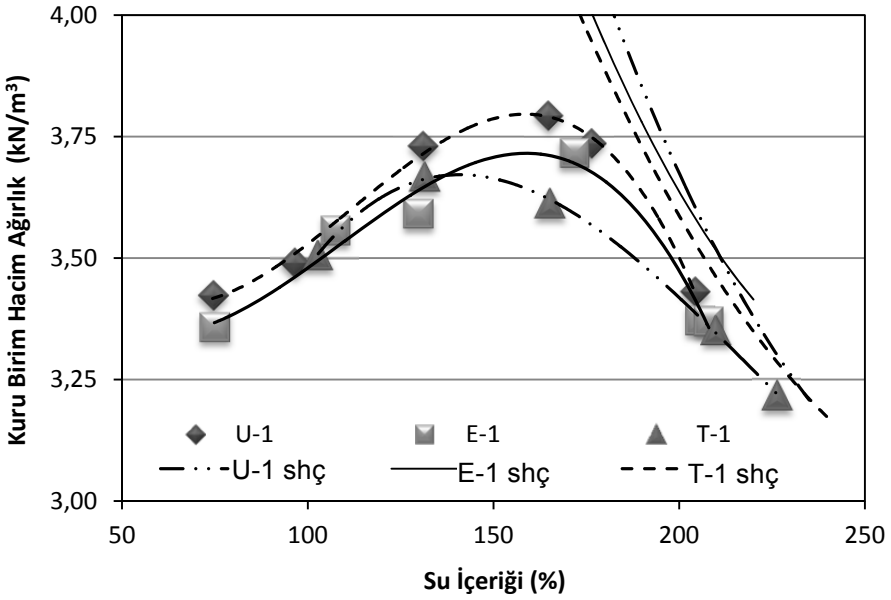
Artan dünya nüfusuna paralel olarak ortaya çıkan atık miktarı her geçen gün büyümektedir. Atıkların tamamiyle ortadan kaldırılması mümkün olmadığından hacimlerinin en aza indirilmesi, düzenli bir şekilde depolanması ve geri dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir. Depolama sahasına getirilen atıklar boşaltma, serme, örtme, sıkıştırma (kompaksiyon) gibi çeşitli işlemlerden geçirilerek depolanırlar. Depolama süreci içerisindeki en önemli adımlardan biri şüphesiz atıkların kompaksiyonudur. Bu çalışmada KKA'ların kompaksiyon özellikleri sentetik ve doğal atık numuneler için ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi sentetik ve doğal numuneler kendi içerisinde taze ve yılanmış numuneler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Sentetik taze numunelerde ilk kompaksiyon deneyleri temel kompozisyonlar ile gerçekleştirilmiş sonrasında kompozisyon ve dane boyu etkisinin incelenmesi amacıyla modifiye numuneler oluşturularak bu numunelerin de kompaksiyon özellikleri belirlenmiştir. Dane boyutu etkisinin incelenmesi amacıyla temel kompozisyonlar ince ve iri daneli olmak üzere iki granülometride oluşturulmuş, etkin atık malzemelerin boyutları arttırılarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Doğal atık numuneler de sentetik KKA numuneler gibi yıllanmış ve taze olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Standartlarda belirtilen boyut sınırlamalarına bağlı kalınarak doğal numunelerin kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon deneylerinde enerji etkisinin incelenmesi amacıyla Standart Proctor ve Modifiye Proctor olmak üzere iki deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür ve arazi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında Standart Proctor deneyinde uygulanan enerjinin KKA numuneleri için çok düşük kaldığı belirlenmiştir. Bu nedenle bu aşamadan sonraki deneylerde sadece Modifiye Proctor deneyleri uygulanmıştır.

5.1 Sentetik Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

Sentetik kentsel katı atıklar üzerinde yapılan kompaksiyon deneylerinde enerji etkisi, kompozisyon etkisi ve dane boyutu etkisi incelenmiştir. Sentetik kentsel katı atıkların kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesinde ilk olarak üç temel kompozisyonun (T-1, E-1 ve U-1) Standart Proctor deneyleri yapılmıştır. Sonrasında kompaksiyon enerjisinin etkilerinin araştırılması amacıyla aynı özellikteki numunelerin Modifiye Proctor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kompozisyonun kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla farklı özelliklerde üretilen modifiye kompozisyonların Modifiye Proctor deneyleri sentetik KKA numuneleri üzerinde tamamlanmıştır. Dane boyutunun kompaksiyona etkisinin incelenmesi amacıyla ise farklı dane boylarında üretilen KKA numunelerinin Modifiye Proctor deneyleri gerçekleştirilmiştir.

5.1.1 Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

KKA'ların kompaksiyon davranışlarının incelenmesine ilk olarak T-1, E-1 ve U-1 numunelerin Standart Proctor deneyleri ile başlanmıştır. Daha önce 3. bölümde belirtildiği gibi laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan KKA numuneler üç tabakanın her birine 25 darbe vurularak sıkıştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen T-1, E-1 ve U-1 kompozisyonlarına ait Standart Proctor eğrileri ve bu numuneler ait sıfır hava çizgileri (shç) Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

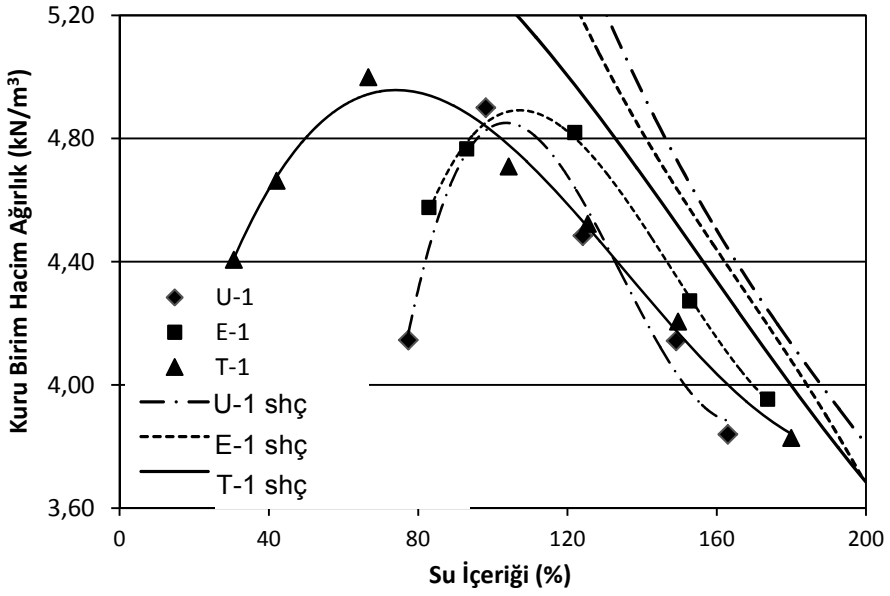


Şekil 5.1 Sentetik taze KKA kompozisyonlarına ait Standart Proctor deney sonuçları

Deneyler sonucunda en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerinin U-1 kompozisyonuna ait olduğu görülmektedir (≅ 3,8 kN/m^3). U-1 numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine karşılık gelen optimum su içeriği değeri ise yaklaşık %163 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.1'den görüldüğü gibi U-1 ve E-1 kompozisyonları birbirine oldukça yakın optimum su içeriği değerlerine sahipken, T-1 kompozisyonunun optimum su içeriği değeri diğer iki kompozisyona oranla çok daha düşük değer almaktadır (≅ %134). Üç temel kompozisyona ait Standart Proctor kompaksiyon eğrileri incelendiğinde eğrilerin zeminlere kıyasla daha basık (yassı) bir şekil aldığı görülmektedir. Bu duruma daha önceki çalışmalarda da (Dixon ve Jones, 2005; Reddy, 2009; Wong, 2009) rastlanılmış ve KKA'ların genel bir karakteristiğidir. Hanson ve diğ. (2010) kentsel katı atıkların kompaksiyon davranışlarını su içeriği, kompaksiyon enerjisi ve sezonsal etkilere bağlı olarak incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri arazi ve laboratuvar deneyleri

sonucunda KKA'ların zeminlere benzer bir kompaksiyon davranışına sahip olduğunu, ancak su artışına karşı zeminlerin daha duyarlı olduğunu rapor etmişlerdir. Büyük su içeriği değerlerine karşı KKA'ların daha dar bir maksimum kuru birim hacim ağırlık aralığına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

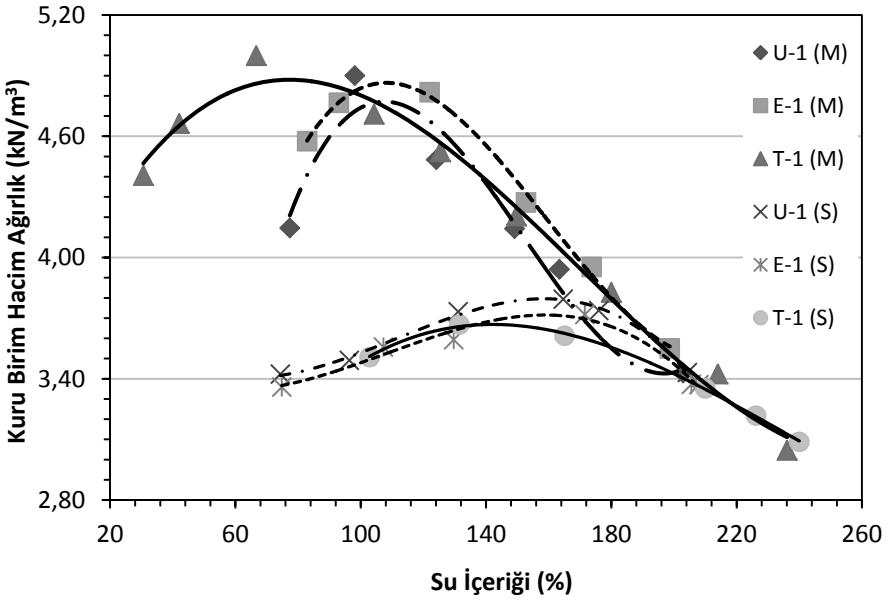
Sentetik T-1, E-1 ve U-1 numunelerine ait Modifiye Proctor kompaksiyon deneyi sonuçları ve %0 hava çizgileri Şekil 5.2'de görülmektedir. Sentetik taze KKA numuneleri arasında en büyük maksimum kuru birim b.h.a. değerine T-1 kompozsiyonu sahiptir (≅ 4,9 kN/m^3). E-1 kompozsiyonuna ait maksimum kuru b.h.a. değeri 4,9 kN/m^3 olurken, U-1 kompozisyonu en düşük kuru b.h.a. değerine sahiptir (≅ 4,8 kN/m^3). T-1 kompozsiyonunun, U-1 ve E-1 numunelerine oranla daha yüksek maksimum kuru b.h.a. değerine sahip olmasının nedeni, yüksek sıkışabilme özelliğine sahip organik atık ve dokusal boşlukları doldurabilen küçük dane boyutlu kül atık bakımından zengin olmasıdır. Üç farklı kompozisyon birarada değerlendirildiğinde ise maksimum kuru b.h.a. değerlerinin ($\gamma_{maks.kuru}$=4,0 – 4,8 kN/m^3) dar bir aralıkta değer aldığı, buna karşılık optimum su içeriği değerlerinin (w=%40 - %180) çok geniş bir değer aralığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2 Sentetik taze KKA kompozisyonlarına ait Modifiye Proctor deney sonuçları

Şekil 5.3 farklı kompaksiyon enerjilerinin sentetik taze KKA kompozisyon numunelerinin kompaksiyon davranışı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 5.3'den de görüleceği üzere Standart Proctor deneyine ait kompaksiyon eğrileri, Modifiye Proctor deneyine ait eğrilere

oranla daha düşük maksimum kuru birim hacim değerleri alırken, bu değerlere karşılık gelen optimum su muhtevası değerleri daha büyük olmuştur.



Şekil 5.3 Farklı kompaksiyon enerjilerinin sentetik taze numuneler üzerindeki etkileri

Sentetik taze KKA numunelerinin sergilediği bu davranış zemin mekaniğindeki zemin danelerinin kompaksiyon davranışına paralellik göstermektedir. Literatürde de buna benzer sonuçlar elde edilmiştir. KKA'ların genel kompaksiyon davranışı zeminlerin davranışına benzer olarak; su içeriği arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri artmakta, belirli bir su içeriği değerinden sonra maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde azalmalar meydana gelmektedir (Hanson ve diğ., 2010).

5.1.1.1 KKA Kompozisyonunun Kompaksiyon Davranışı Üzerindeki Etkisi

Kompaksiyon özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri de numunenin kompozisyonudur (Gidarakos ve diğ., 2005; Seo ve diğ., 2004; Staley ve Barlaz, 2009). KKA'lar içerisinde çok farklı özelliklerde ve boyutlarda materyaller barındırmaktadır. KKA numune içerisinde rijitliği çok yüksek metal atık bulunabileceği gibi, su içeriği çok yüksek buna karşın sıkışma özelliği yüksek mutfak atıkları da bulunabilmektedir. Ayrıca KKA kompozisyonu ülkeden ülkeye, şehirden şehire, mevsimden mevsime değişiklik göstermektedir (Dixon ve Jones, 2005; Reddy ve diğ., 2009d; Karimpour-Fard ve diğ., 2011). Bu nedenle kompozisyon etkisinin KKA davranışı üzerindeki özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Laboratuvar ortamında sentetik olarak belirli oranlarda üretilen KKA numuneleri ile kompaksiyon deneyleri

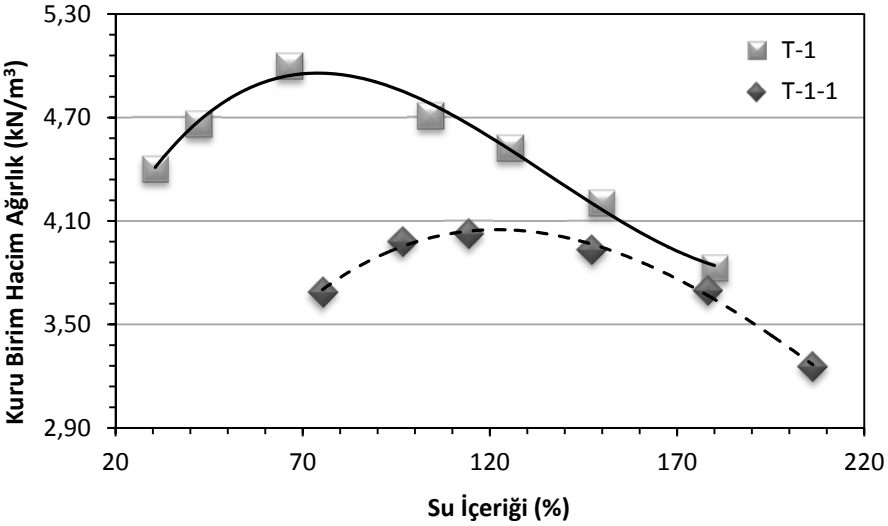
yapılmış ve elde edilen kompaksiyon eğrileri önce verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında farklı özellikteki malzemelerin kompozisyon içerisindeki yüzdelerinin değiştirilmesi ya da tamamen kompozisyondan çıkarılması ile oluşturulan yeni modifiye kompozisyonların kompaksiyon davranışları incelenmiştir.

Bu amaçla oluşturulan altı modifiye kompozisyon ve üç temel KKA numunelerinin kompozisyon özelliikleri Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Kompozisyon etkisinin incelenmesi için kullanılan numuneler

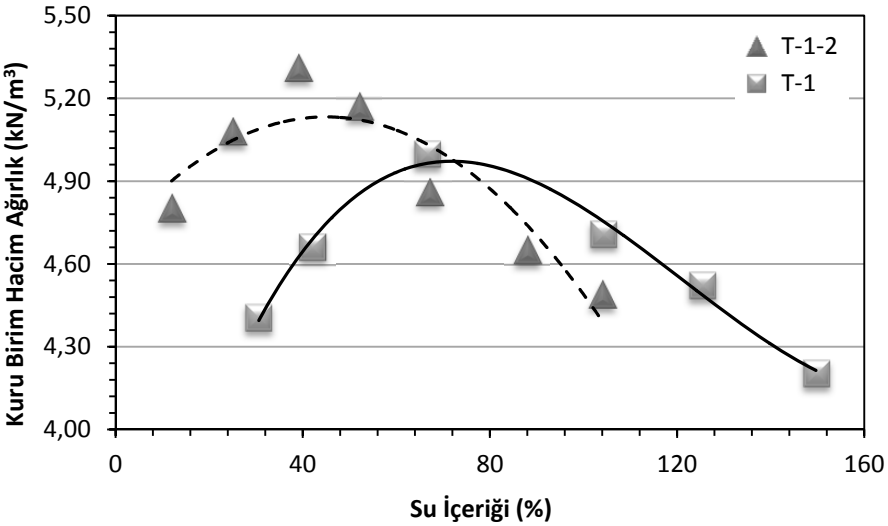
Numune	Kompozisyon özellikleri
E-1	Orijinal temsili Avrupa ortalama atık kompozisyonu E-1
E-1-1	Kağıt oranı %35'ten %10'a azaltılmış E-1 kompozisyonu
E-1-2	Organik madde miktarı %35'ten %10'a azaltılmış E-1 kompozisyonu
T-1	Orijinal temsili Türkiye atık kompozisyonu T-1
T-1-1	Kül materyali içermeyen T-1 kompozisyonu
T-1-2	Organik atık oranı %45'ten %20'ye azaltılmış T-1 kompozisyonu
U-1	Orijinal temsili ABD kompozisyonu U-1
U-1-1	Plastik materyali içermeyen U-1 kompozisyonu
U-1-2	Metal materyali içermeyen U-1 kompozisyonu

T-1 kompozisyonunda %15'lik yüzdeye sahip kül atık diğer E-1 ve U-1 kompozisyonlarında bulunmamaktadır. Diğer kullanılan materyallere oranla daha ince daneli bir yapıya sahip kül atık bazik yapıda olması sebebi ile T-1 kompozisyonunun en büyük pH değerine sahip olmasına neden olmaktadır. Şekil 5.4'den görüldüğü gibi içerisinde kül atığı bulundurmayan T-1-1 kompozisyonu, T-1 kompozisyonundan daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine (4,0 kN/m^3) ve daha yüksek optimum su içeriği değerine (w_{opt}=%120) sahiptir. Bu durum diğer materyallere kıyasla daha ince daneli yapıya sahip olan kül atığın boşlukları daha iyi doldurarak T-1 kompozisyonunun daha yüksek bir $\gamma_{kuru\ maks.}$ değerine ulaşmasını sağlamıştır. Ayrıca kuru durumda karışıma katılan kül atığın yerini alan yüksek su içeriğine sahip organik materyaller T-1-1 kompozisyonunun $w_{opt.}$ değerinin daha yüksek değer almasına neden olmuştur. Genel olarak kül atık KKA'ların maksimum kuru b.h.a. değerini arttırıp, optimum su içeriği değerini azaltmaktadır.



Şekil 5.4 T-1 ve T-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri

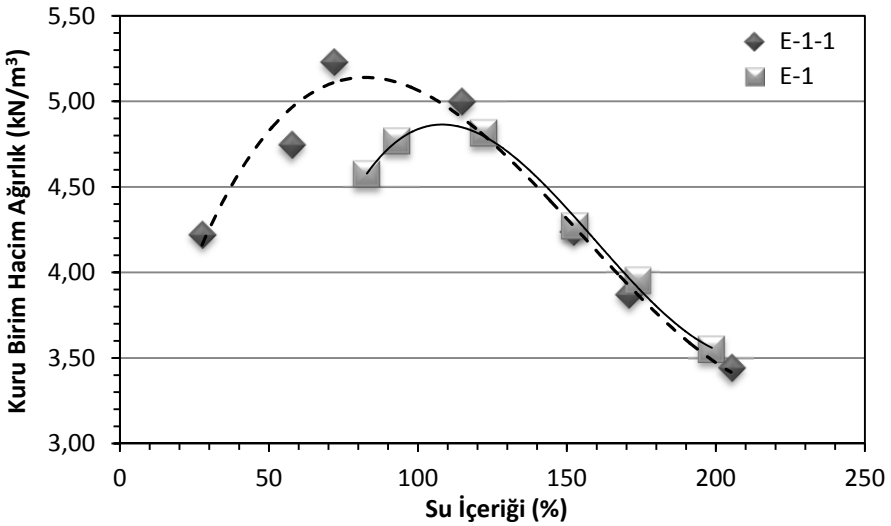
T-1 kompozisyonunu oluşturan materyaller incelendiğinde organik atık miktarının diğer E-1 ve U-1 kompozisyonlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Organik atık miktarının kompaksiyon davranışına etkisini incelemek amacıyla, T-1 kompozisyonu içerisindeki %45'lik organik atık %25 azaltılarak %20 oranına indirilmiş ve T-1-2 modifiye kompozisyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni kompozisyonla Modifiye Proctor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü üzere, T-1-2 kompozisyonunun optimum su içeriği değeri orijinal T-1 kompozisyonundan daha düşüktür.



Şekil 5.5 T-1 ve T-1-2 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri

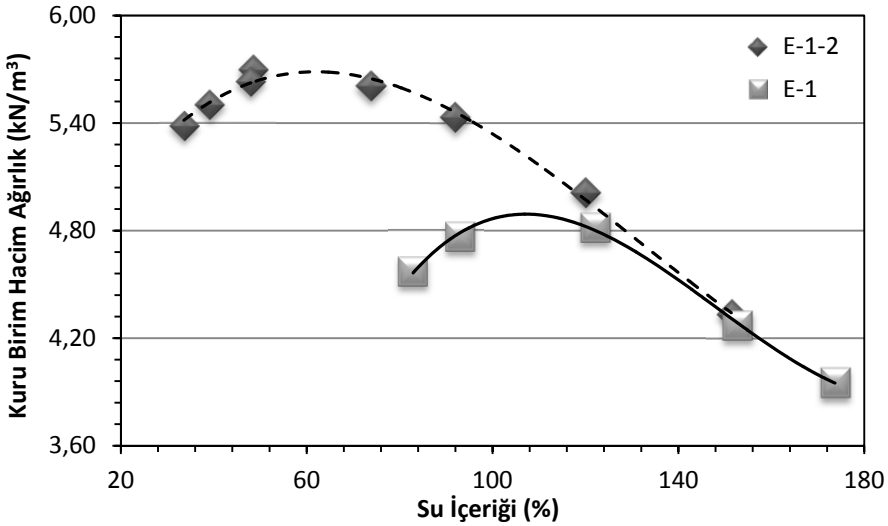
Bunun en önemli nedeni doğal su içeriği değerinin büyük bir bölümünü oluşturan organik atıkların kompozisyon içerisindeki yüzdesinin azaltılmasıdır. İki kompozisyon karşılaştırıldığında T-1-2 kompozisyonunun maksimum kuru b.h.a. değerinin (5,14 kN/m^3) T-1 (4,95 kN/m^3) kompozisyonundan daha büyük olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre organik madde miktarı %25 azaltılmış T-1-2 numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri küçük bir artış gösterirken (%4-5), T-1 numunesinde %73 olan optimum su içeriği T-1-2 numunesinde %46 değerini almışır. Kompozisyona ait su içeriği değerinin önemli bir bölümünü oluşturan organik atık miktarının azaltılması optimum su içeriği değerinin önemli ölçüde azalmasına neden olmuştur. Fakat maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

E-1 kompozisyonu diğer kompozisyonlarla karşılaştırıldığında yüksek miktarda kağıt-karton atığı bulunduran bir kompozisyon yapısına sahiptir. Kağıt-karton atıkların E-1 kompozisyonunun kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisini incelemek üzere %35 oranındaki kağıt-karton atık oranı %10 oranına indirilmiş ve E-1-1 modifiye kompozisyonu oluşturulmuştur. Şekil 5.6'da E-1 ve E-1-1 kompozisyonlarına ait Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Kağıt karton atıkların azalması maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin artmasına (5,2 kN/m^3 > 4,90 kN/m^3), optimum su içeriği değerinin azalmasına (%73 < %108) neden olmuştur. Bu durum aynı ağırlıktaki birçok malzemeye kıyasla (metal, organik atıklar, cam zemin vb.) daha büyük bir hacim kaplayan kağıt-karton atıkların oranlarının azaltılmasıyla yerine gelen diğer malzemelerin daha yüksek b.h.a. değerine sahip olmaları ile açıklanabilir.



Şekil 5.6 E-1 ve E-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri

E-1 ($\gamma_{kuru\ maks.}$ =4,9 kN/m^3 – w $_{opt.}$=%108) kompozisyonunda kağıt-karton atık oranıyla aynı yüzde değerine sahip olan mutfak ve bahçe atıklarının kompaksiyon davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla toplam yüzdesi %35 olan organik atıkların oranları %10'a indirildikten sonra yeni oluşan E-1-2 kompozsiyonu ile kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Orijinal E-1 kompozisyon numunesine ait kompaksiyon eğrisi ile organik atık oranı azaltılmış E-1-2 kompozisyonuna ait kompaksiyon eğrisi Şekil 5.7'de görülmektedir.

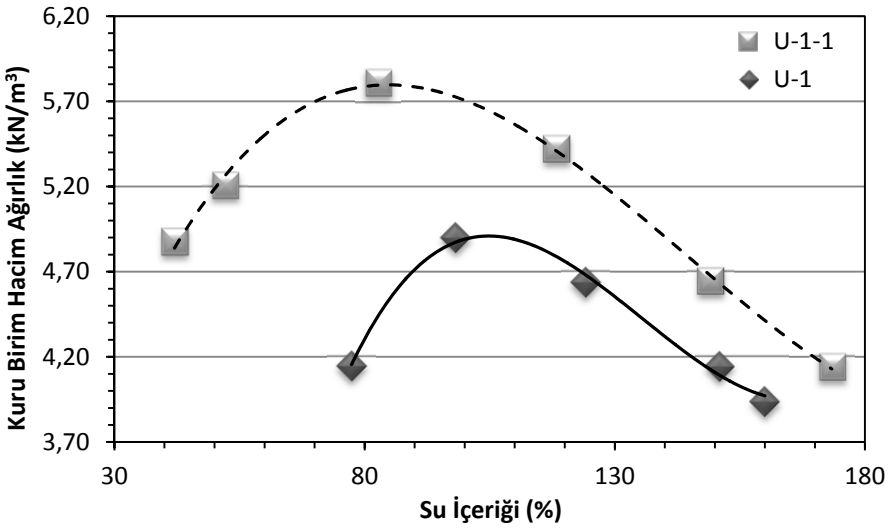


Şekil 5.7 E-1 ve E-1-2 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri

Mutfak ve bahçe atıklarının birleşimi olan organik atık oranının azaltılması, kompaksiyon eğrilerinde kağıt-karton atık azaltılmasına benzer bir etki ortaya koymuştur. Şekil 5.7'den görüldüğü gibi E-1-2 kompozisyonunun E-1 kompozsiyonuna kıyasla daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık (5,7 kN/m^3) değeri ve daha düşük optimum su içeriği (%55) değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum diğer materyallere kıyasla çok daha büyük başlangıç su muhtevası değerine sahip olan organik atıkların kompozisyon içerisinde yerini alan daha düşük su içeriğine sahip ve daha yüksek özgül ağırlığa sahip malzemelerin oranlarının artışı ile açıklanabilir.

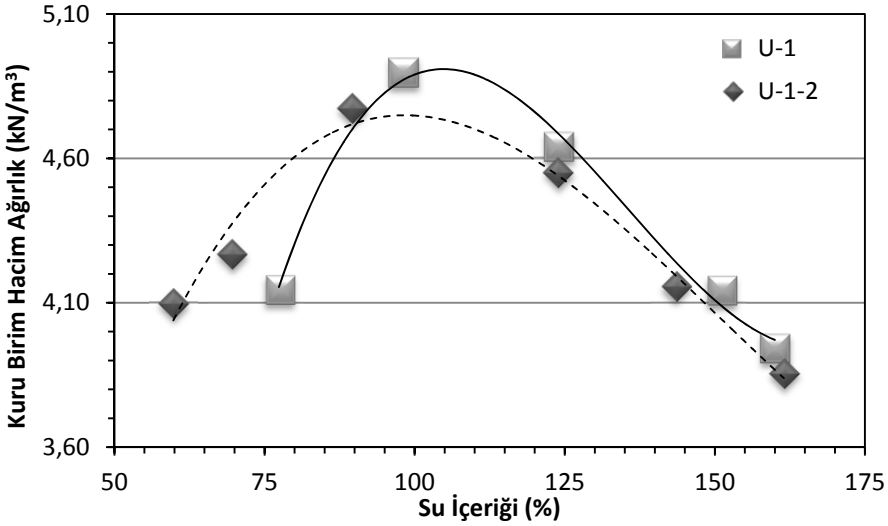
U-1 kompozisyonu içerisinde diğer iki kompozisyona (T-1 ve E-1) oranla daha yüksek plastik ve metal atık oranı bulunmaktadır. Plastik atıkların kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla U-1 kompozisyonundaki %12 oranına sahip plastik atık içeriği tamamen kaldırılarak U-1-1 kompozisyonu oluşturulmuştur. Şekil 5.8'de U-1 ve U-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.8'den görüldüğü üzere plastik atığın U-1 kompozisyonundan kaldırılması ile yeni oluşan U-1-1 kompozisyonu daha

yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerine sahipken ($\gamma_{kuru\ maks.}$ =5,8 kN/m^3) buna karşılık gelen optimum su içeriği değeri ise orijinal U-1 numunesine oranla azalmıştır ($w_{opt.}$=%80). Plastik malzemelerin diğer malzemelere kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle plastik atığın çıkarılması yeni oluşan kompozisyonun daha iyi sıkışma özelliklerine sahip olmasını sağlamıştır.



Şekil 5.8 U-1 ve U-1-1 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri

Kompozisyon etkisinin incelenmesi amacıyla, U-1 kompozisyonundan %9 oranındaki metal atık tamamen çıkartılarak U-1-2 numunesi oluşturulmuş ve Şekil 5.9'da kompaksiyon karakteristikleri U-1 numunesi ile karşılaştırılmıştır. İki kompaksiyon eğrisi incelendiğinde metal atığın çıkartıldığı U-1-2 kompozisyonunun orijinal kompozisyon U-1'den daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine ($\gamma_{kuru\ maks.}$ = 4,8 kN/m^3) ve daha düşük optimum su içeriği değerine ($w_{opt.}$=%95) sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9 U-1 ve U-1-2 kompozisyonlarına ait kompaksiyon eğrileri

Bu durum kullanılan malzemeler arasındaki en yüksek özgül ağırlık değerine sahip olan metal atığın yokluğunda kompozisyon yoğunluğunun düşmesiyle ve yerini alan metal atığa oranla daha yüksek başlangıç su içeriğine sahip olan malzemelerin oranlarının artışıyla açıklanabilir.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan temel kompozisyonlar (U-1, E-1 ve T-1) ile kompozisyon etkisinin belirlenmesine yönelik hazırlanan modifiye kompozisyonlara (U-1-1, U-1-2, E-1-1, E-1-2 ve T-1-1 ve T-1-2) ait Modifiye Proctor (MP) kompaksiyon deneyi sonuçları ve kompozisyondaki materyallerin etkileri Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 Sentetik taze KKA'ların MP kompaksiyon karakteristikleri üzerinde kompozisyon etkisi

Kompozisyon	Tamamen çıkarılan ya da azaltılan materyal	$\gamma_{dry.max.}$ (kN/m^3)	$\gamma_{dry-max}$ üzerindeki etki	$w_{opt.}$ (%)	w_{opt} üzerindeki etki
U-1	Orjinal	4,83	-	104	-
U-1-1	Plastik	5,80	Artış	83	Azalma
U-1-2	Metal	4,75	Azalma	95	Azalma
T-1	Orjinal	4,95	-	73	-
T-1-1	Kül	4,00	Azalma	120	Artış
T-1-2	Organik madde	5,14	Artış	38	Azalma
E-1	Orjinal	4,90	-	108	-
E-1-1	Kağıt	5,20	Artış	73	Azalma
E-1-2	Organik madde	5,70	Artış	55	Azalma

Genel olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kompozisyon içerisindeki plastik, kağıt ve organik madde içeriğinin KKA'ların kompaksiyon davranışı üzerinde benzer etkiler yarattığı gözlenmiştir. Plastik atığın çıkartılmasıyla oluşturulan U-1-1 numunesi, kompozisyon içerisindeki kağıt-karton atık oranının %25 azaltıldığı E-1-1 numunesi ve organik madde miktarının %25 azaltılarak oluşturulan E-1-2 numunelerinde maksimum kuru b.h.a. değeri artarken, optimum su içeriği değeri azalmıştır.

5.1.1.2 Dane Boyutunun Kompaksiyon Davranışı Üzerindeki Etkisi

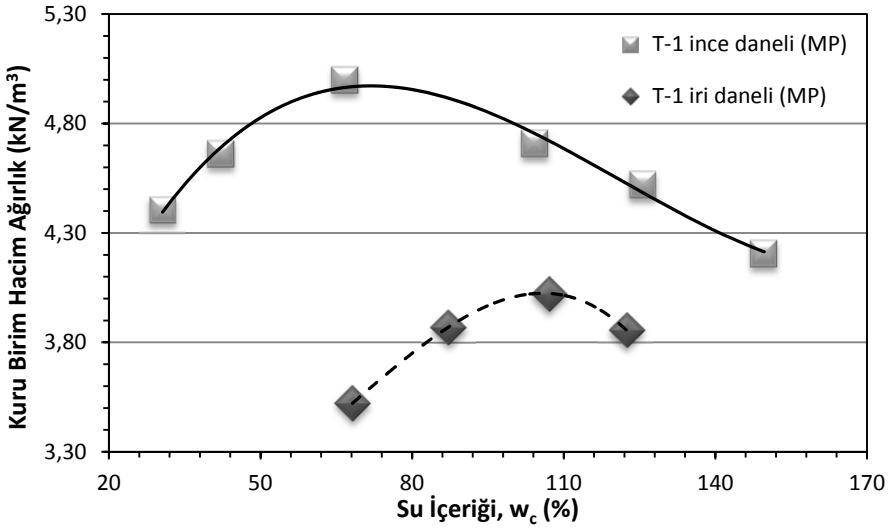
KKA'ların kompaksiyon davranışını etkileyen önemli bir diğer parametre de malzemeleri oluşturan danelerin dane boyu dağılımıdır. KKA'ların dane boyunun kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisini incelenmesi amacıyla farklı granülometrik özelliklere sahip KKA numunelerin kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ASTM-D 698-12 (2012) ve ASTM-D 1557-12 (2012) (Standart ve Modifiye Proctor) standartlarının belirlediği kullanılan ekipmanlara göre maksimum dane boyutu sınırlamalarına uyulmuştur.

Bu çalışmada daha önceki kompaksiyon deneylerinde ve diğer tüm deneylerde kullanılan sentetik KKA numunelerin boyutları ince daneli (standart) atık numunesi olarak isimlendirilmiştir. Dane boyutu etkisinin incelenmesi için daha büyük dane boyutlarında üretilen KKA numunesi ise iri daneli numune olarak adlandırılmıştır. Çizelge 5.3'de ince daneli (standart) ve iri daneli KKA numunelerin maksimum ve minimum boyutlarını göstermektedir. Belirli ve sınırlanmış dane boyutları ile çalışmanın amacı tüm deneylerin aynı özellikteki uniform numuneler ile yapılmasını sağlamaktır.

Çizelge 5.3 Deneylerde kullanılan ince ve iri dane boyu aralıkları

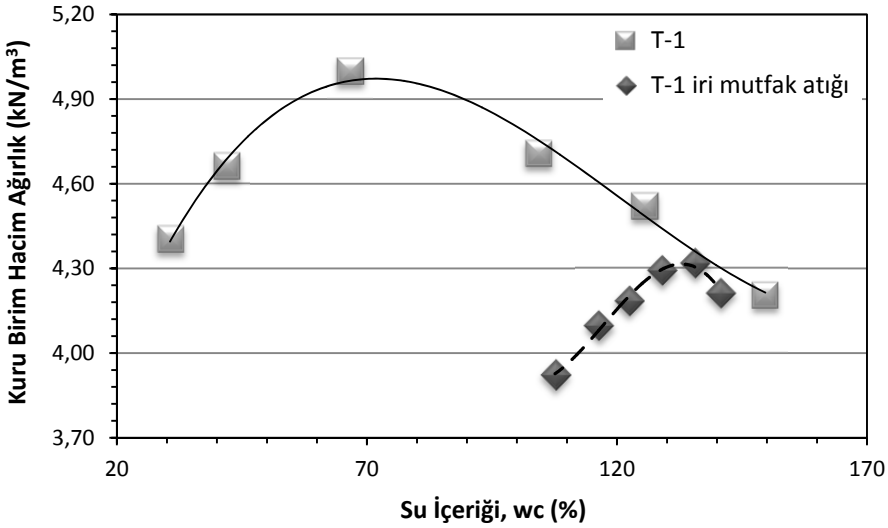
No	Malzeme	İnce daneli KKA numunesi		İri daneli KKA numunesi	
		Elek No	D_{max}, (mm)	D_{min}, (mm)	D_{max}, (mm)
1	Mutfak atığı	No.4	4,75	4,75	16
2	Cam kırıkları	No.10	2,00	4,75	16
3	Park-bahçe atığı	No.4	4,75	4,75	63
4	Plastik parçacıklar	No.4	4,75	4,75	4,75
5	Ağaç talaşı	No.10	2,00	2,00	16
6	Metal talaşı-tozu	1/4''	6,30	4,75	16
7	Kül	No.40	0,425	0,425	16
8	Kağıt parçacıkları	1/2''	12,50	12,5	63
9	Karton parçacıkları	1/2''	12,50	12,5	63
10	Tekstil parçacıkları	1''	25,4	12,5	50
11	İnce daneli zemin	No.40	0,425	0,425	4,75

Şekil 5.10'da iki farklı dane boyu dağılımına sahip aynı kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmış T-1 kompozisyonundaki numunelerin kompaksiyon eğrileri gösterilmektedir. Modifiye Proctor deneyleri sonucunda büyük dane boyutlarından oluşan numunenin küçük dane boyutlarına sahip numuneye oranla daha kötü sıkışma davranışına sahip olduğu görülmüştür. Büyük ve küçük dane boyutlarından oluşan numuneler karşılaştırıldığında sıkıştırma kalıbının içine daha efektif biçimde yerleşebildiği düşünülen küçük dane boyutlu numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin daha yüksek, optimum su içeriğinin daha düşük olduğu görülmektedir.



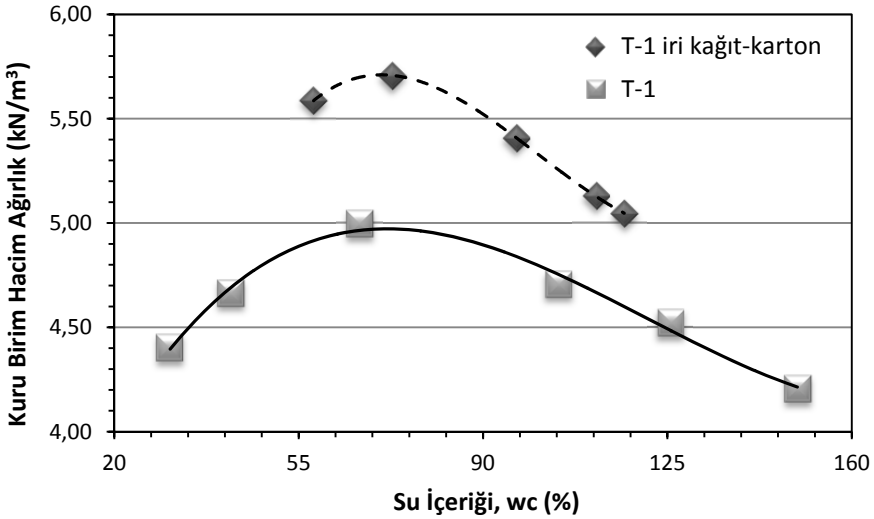
Şekil 5.10 Dane boyu dağılımının T-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

Aynı kompozisyona sahip ayrı granülometrideki iki numunenin karşılaştırılmasından sonra T-1 kompozisyonundaki sadece mutfak atıklarının boyutları büyütülerek oluşturulan numune üzerinde Modifiye Proctor deneyleri yapılmıştır. Şekil 5.11'den görüleceği üzere standart dane boyutlarındaki numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri mutfak atığının boyutları büyütülmüş numuneden daha büyüktür ($\gamma_{kuru\ mak.}$= 5,0 kN/m^3 > 4,4 kN/m^3). İki numunenin optimum su içeriği değerleri karşılaştırıldığında iri mutfak atıklı numunenin orijinal T-1 kompozisyonundan çok daha büyük optimum su içeriği değerine sahip olduğu görülmektedir ($w_{opt.}$ =%73 < %107). Kompozisyonlar içerisindeki organik atıklar kompaksiyon numunesinin sıkışma için gerekli su ihtiyacını önemli ölçüde karşılamaktadır. Ufak parçalar içerisinde numune içerisine yayılan mutfak atıkları daha çok materyalin su içeriğini yükselterek daha iyi şekilde sıkışmasına olanak sağlamaktadır. İri mutfak atığı dane boyutlarında numunenin belirli bölgelerinde daha yüksek su içeriği bulunabilirken bazı bölümler daha kuru kalmış ve numunenin sıkışma performansı düşmüştür.



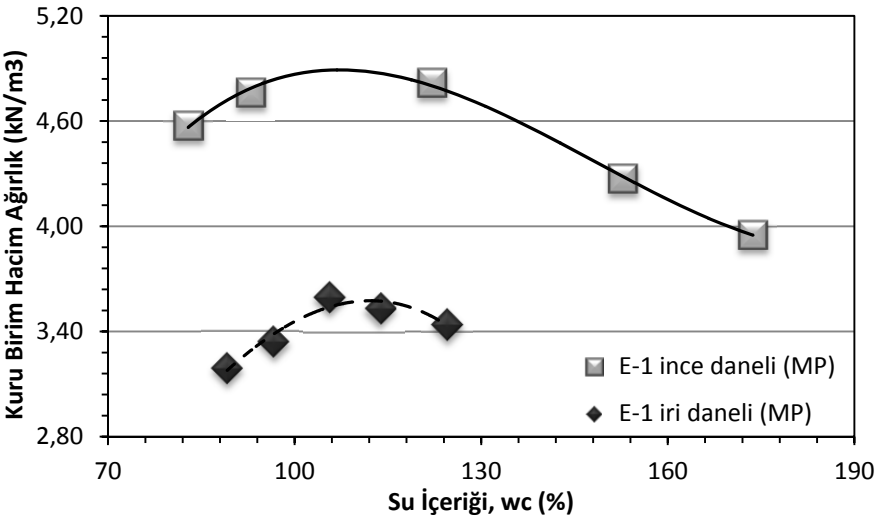
Şekil 5.11 İri daneli mutfak atığının T-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

Mutfak atığının boyutlarının büyütülmesine benzer şekilde, kağıt-karton atıkların boyutları standart boyuta kıyasla daha büyük hale getirilerek T-1 numunesi üzerinde kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan iri daneli kağıt karton atıkların kesit alanları orjinal atık boyutlarının beş katı olacak şekilde üretilmiştir ($A_{İRİ}$=5 x A_{ORJ}). Kağıt-karton atıklar aynı ağırlıktaki diğer atıklara kıyasla daha büyük hacim kaplamaktadır. Kağıt-karton atıkların bir diğer önemli özelliği ise kuru durumda ıslak duruma göre sıkıştırılabilirliğinin büyük değişime uğramasıdır. Kuru durumda uygulanan kompaksiyon enerjisine karşı büyük direnç gösterebilen kağıt-karton malzemeler ıslatıldığında direncini yitirmektedir. Şekil 5.12'de iri kağıt-karton atıklarıyla oluşturulmuş numune ile orijinal dane boyutlarındaki numuneden elde edilen kompaksiyon eğrileri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Orijinal T-1 kompozisyonundaki numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri, iri kağıt-karton atıklı numuneden daha düşük değer almıştır ($\gamma_{kuru\ mak.}$=5,0 kN/m^3 < 5,7 kN/m^3). İki numunenin optimum su içeriği değerleri karşılaştırıldığında arada büyük farklılık olmadığı gözlenmiştir ($w_{opt.}$ =%73 ≅ %77). İki numuneye ait kompaksiyon eğrileri şekilsel olarak birbirine benzer yapıdadır.



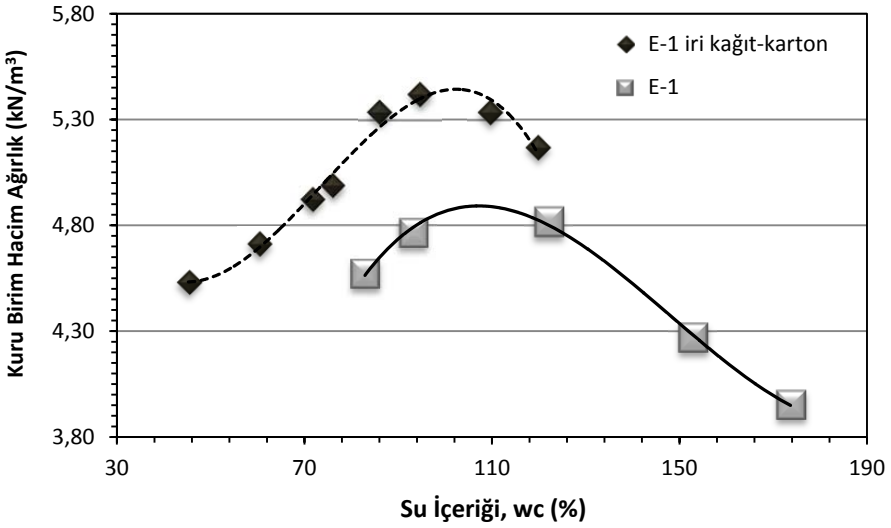
Şekil 5.12 İri daneli kağıt-karton atığının T-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

İki farklı granülometride sentetik olarak üretilen E-1 kompozisyonundaki KKA numunelerin Modifiye Proctor deneyi sonucunda oluşturulan kompaksiyon eğrileri Şekil 5.13'de verilmiştir. Aynı kompoziyonda farklı dane boyutlarında üretilen iki numunenin optimum su içerikleri birbirine yakın değer alırken maksimum kuru b.h.a. değerlerinin birbirinden çok farklı olduğu gözlenmiştir. Orijinal dane dağılımına sahip E-1 kompozisyonunun maksimum kuru b.h.a. değeri 5,0 kN/m^3, optimum su içeriği %73 olarak belirlenmişken, iri daneli E-1 numunesinin maksimum kuru b.h.a. değeri 3,6 kN/m^3, optimum su içeriği %76 olarak belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, aynı kompozisyonda, aynı kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmış farklı dane boyu dağılımındaki numunelerin optimum su içeriği birbirine yakın değer alırken, maksimum kuru b.h.a. değeri dane boyu büyüdükçe azalmıştır.



Şekil 5.13 Dane boyu dağılımının E-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

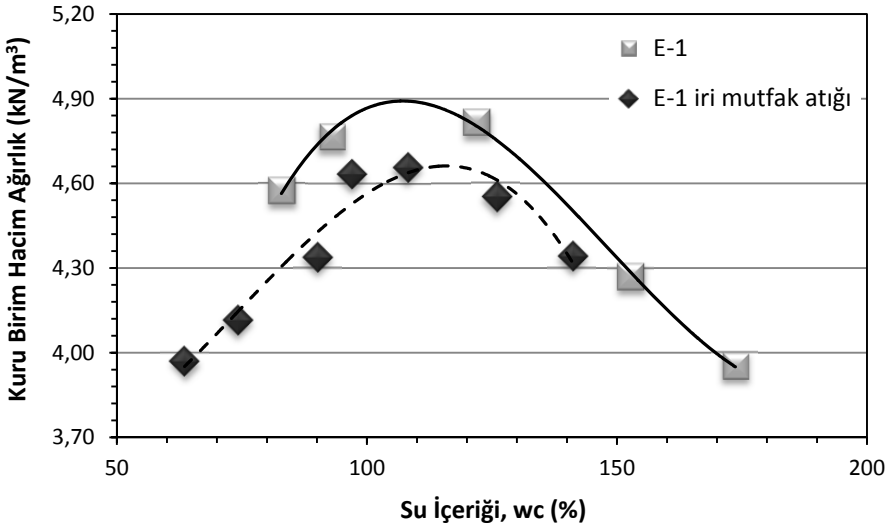
E-1 kompozisyonu diğer kompozisyonlara göre daha fazla oranda kağıt-karton atık içermektedir. Orijinal kompozisyonlarda kullanılan kağıt-karton atığın kesit alanı yaklaşık olarak 2 cm^2 civarında iken, iri kağıt-karton atık kompozisyonunda bu değer 25 $cm^{2,}$ye yükseltilmiştir. Orijinal dane boyutlarındaki E-1 numunesi ile kağıt-karton atık boyutları büyütülmüş E-1 numunesinin kompaksiyon eğrileri Şekil 5.14'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere iri kağıt-karton atık içeren numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri orijinal numuneninkinden daha büyüktür. İki numunenin optimum su içeriği değerlerinin ise birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. İri kağıt atıkların yüzey alanı orijinal kağıt atık numunelere oranla çok daha geniştir. İri kağıt-karton atıklar yapraksı kil danelerinin yatay şekilde yerleşmesine benzer şekilde sıkıştırma işleminde yatay pozisyonda kalmışlardır (disperse yapı). Yatay olarak üstüste gelebilen iri kağıt-karton atıklar hem az hacim kaplamış hem de kompaksiyon enerjisini alt katmanlara iyi iletmiştir, böylece daha iyi sıkışma sağlanmıştır. Orijinal numunelerde ise daha ufak kağıt boyutları birbiri üzerine diklemesine ya da çapraz yerleşerek floke yapıya benzer bir şekil oluşturmuşlardır. Danelerin birbirlerine göre yerleşim konumlarının (flok ya da dispers yapı) bir sonucu olarak iri kağıt-karton atıktan oluşan numunelerin orijinal numunelerden daha iyi sıkıştığı görülmektedir.



Şekil 5.14 İri daneli kağıt-karton atığının E-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

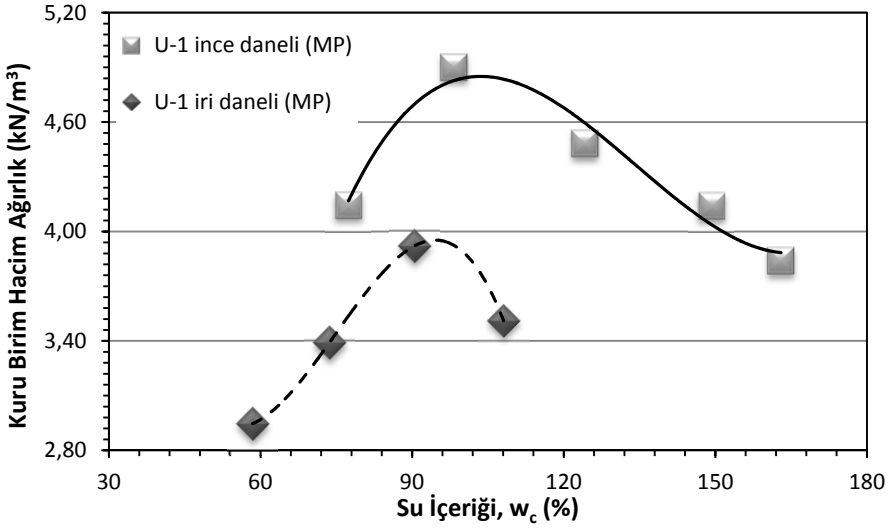
E-1 kompozisyonunun içerisindeki organik mutfak atıklarının boyutları arttırılarak yapılan Modifiye Proctor kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrisi orijinal kompozisyon ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.15'de gösterilmektedir. İki numunenin optimum su içeriği değerleri birbirine yakın değer alırken, orijinal E-1 numunesinin maksimum kuru b.h.a. değerinin iri mutfak atığı içeren numuneninkinden daha büyük değer aldığı

belirlenmiştir. KKA numuneleri için önemli bir su içeriği kaynağı olan mutfak atıklarının boyutlarının büyütülmesi ile suyun numune içerisindeki dağılımının heterojen gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu durum numunenin sıkıştırılabilirliğini negatif yönde etkilemektedir.



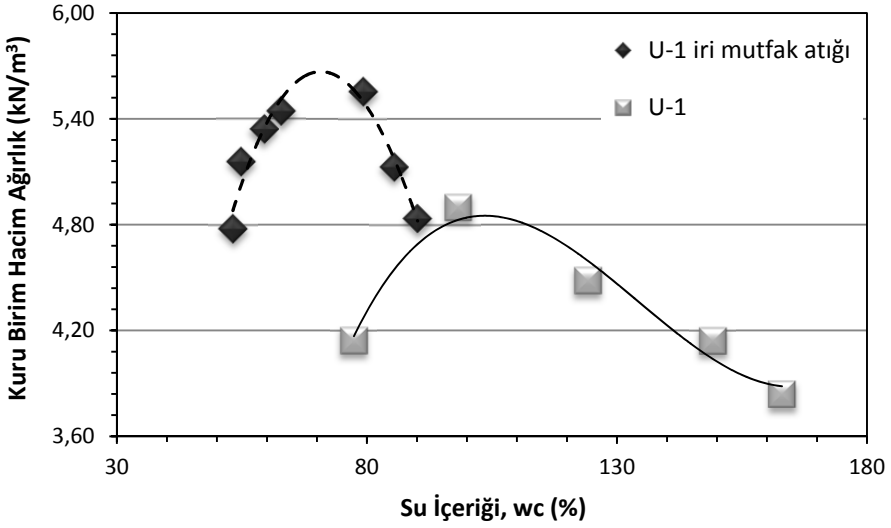
Şekil 5.15 İri daneli mutfak atığının E-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

Standart U-1 numunesiyle iri daneli olarak hazırlanan modifiye numunenin kompaksiyon eğrileri Şekil 5.16'da görülmektedir. Daha önce T-1 ve E-1 numunelerine benzer şekilde U-1 kompozisyonunda da ince daneli numuneye ait maksimum kuru b.h.a. değeri iri daneli numuneninkinden yüksektir. Standart dane boyutlu (ince) numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri 4,8 kN/m^3, optimum su içeriği %104 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık iri daneli numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri 4,0 kN/m^3 ve optimum su içeriği %94 olarak bulunmuştur. Kompozisyon içerisindeki iri daneli tekstil, cam, metal, kağıt, karton v.b. malzemeler numune içerisinde sıkışmaya karşı direnç oluşturmakta, boşluk miktarını arttırmakta ve kompaksiyon performansını düşürmektedir.



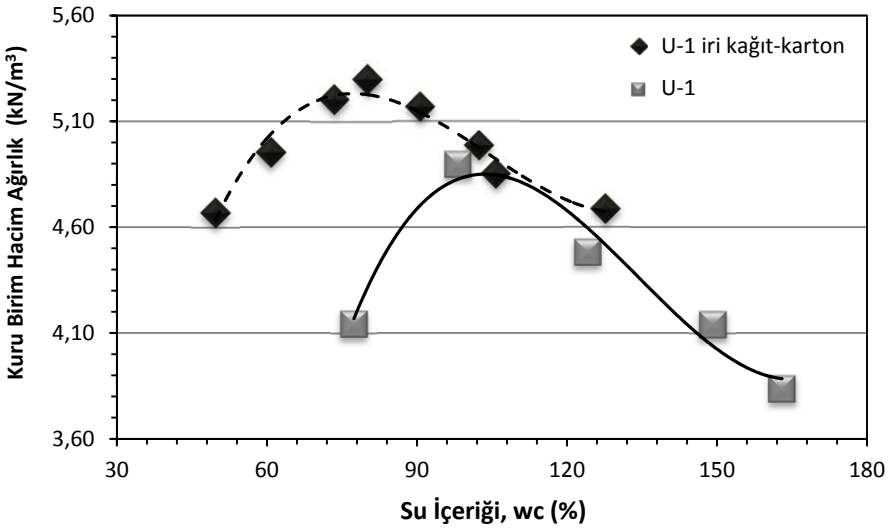
Şekil 5.16 Dane boyu dağılımının U-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

Mutfak atıkları boyutlarının standart kompozisyona kıyasla arttırılması, T-1 ve E-1 numunelerinde benzer etki yaratmış ve iri mutfak atıklı numuneler daha düşük maksimum kuru b.h.a. ve daha yüksek optimum su içeriği değerlerine sahip olmuştur. Ancak aynı koşul ve şartlar altında U-1 kompozisyonuyla yapılan Modifiye Proctor kompaksiyon deneylerinde elde edilen sonuçlar daha önce görülen davranışın tam tersidir. İri mutfak atığı ile oluşturulan numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri standart numunenin maksimum kuru b.h.a. değerinden büyük, optimum su içeriği ise küçük değer almıştır. Modifiye Proctor deneyi sonucunda iri mutfak atıklı U-1 numunesinin $\gamma_{kuru\ maks.}$=5,7 kN/m^3 ve $w_{opt.}$=%72 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 İri daneli mutfak atığının U-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

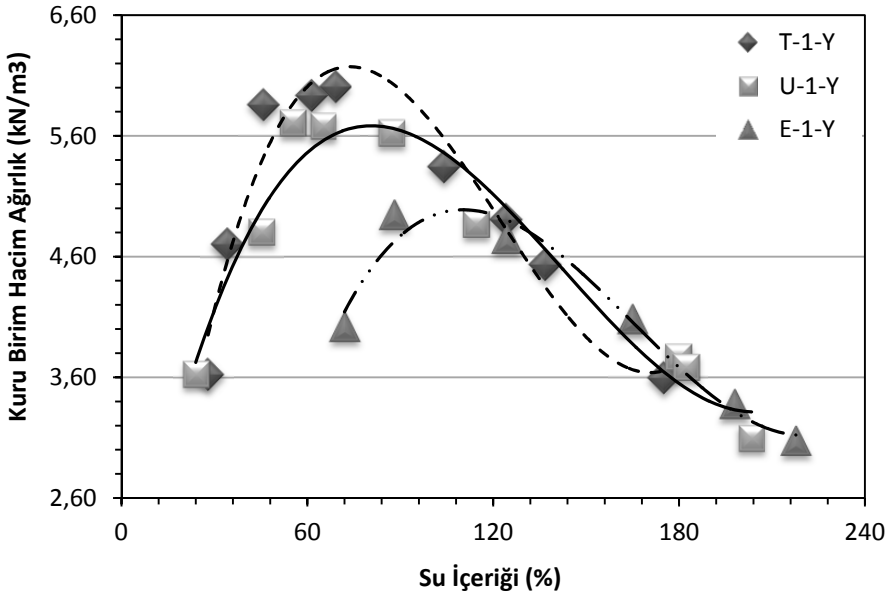
U-1 kompozisyonu içersinde kağıt-karton hariç tüm malzeme boyutlarının sabit tutulduğu, sadece kağıt-karton malzemelerinin boyutları büyütülerek oluşturulan numunenin Modifiye Proctor kompaksiyon eğrisi Şekil 5.18'de görülmektedir. İri kağıt-karton atık bulunduran numunenin maksimum kuru b.h.a. değeri 5,2 kN/m^3 bu değere karşılık gelen optimum su içeriği değeri de %80 olarak belirlenmiştir. U-1 kompozisyonunda iri kağıt-karton atık kullanılarak gerçekleştirilen kompaksiyon deneyi sonuçları, diğer iki kompozisyona benzer davranış göstermektedir. Bu durum daha önce açıklandığı gibi dane yerleşme yöneliminin bir etkisi olarak açıklanabilmektedir. Yatay olarak yerleşme eğiliminde olan büyük kağıt atıklar aynı ağırlıktaki standart dane boyutuna kıyasla daha az hacim kaplamakta, kompaksiyon enerjisini daha iyi iletmekte ve daha iyi bir sıkışma performansı elde edilmektedir.



Şekil 5.18 İri daneli kağıt-karton atığının U-1 numunesinin kompaksiyon davranışına etkisi

5.1.2 Sentetik Yıllanmış Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

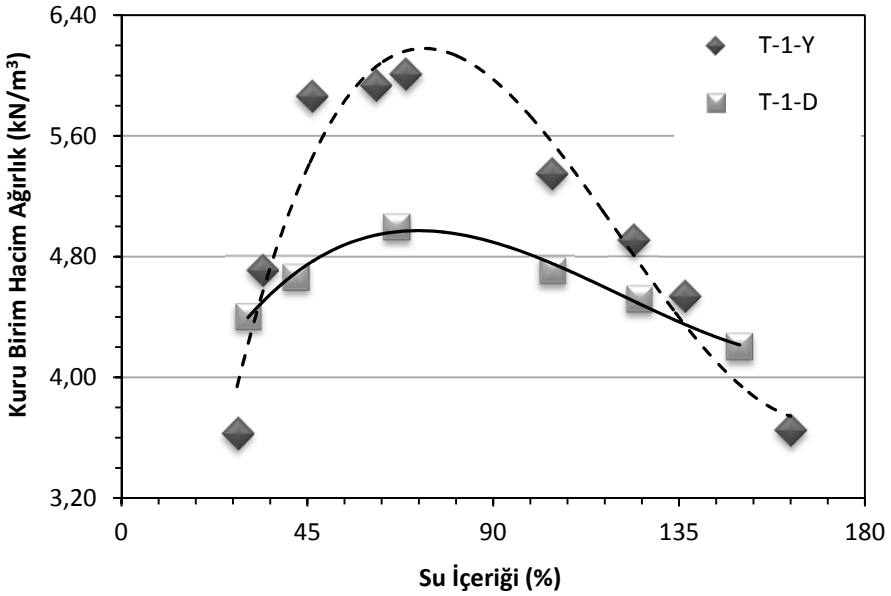
Laboratuvar ortamında belirli kompozisyonlarda sentetik taze numuneler ile aynı koşullarda hazırlanan sentetik yıllanmış numunelerin farkı üç ay boyunca dış ortamda atmosfer etkilerine maruz bırakılıp (yağmur, güneş, kar, sıcak-soğuk hava değişimi) daha sonra kompaksiyon deneylerinin yapılmasıdır. Dışardaki ortamdan alınan sentetik yıllanmış numunelerin farklı su içeriklerinde Modifiye Proctor kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Farklı su içerikleri numunelere su eklenerek ya da laboratuvar ortamında sabit sıcaklıkta (22°C) kurumaya bırakılarak oluşturulmuştur. Şekil 5.19'da üç farklı kompozisyondaki sentetik yıllanmış KKA numunelerine ait kompaksiyon eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 5.19 Sentetik yıllanmış KKA numunelerin kompaksiyon eğrileri

Sentetik yıllanmış KKA kompozisyonlarıyla yapılan Modifiye Proctor deneyleri sonucunda T-1 kompozisyonunun üç kompozisyon içerisinde en büyük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine sahip olduğu gözlenmektedir ($\gamma_{Kuru\ maks} \cong 6{,}1$ kN/m^3). T-1 kompozisyonuna ait optimum su içeriği değeri de $w_{opt.}$= %79 olarak belirlenmiştir. Sıralamada ikinci sırayı U-1 kompozisyonuna ait maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri almaktadır ($\gamma_{Kuru\ maks} \cong 5{,}7$ kN/m^3) bu değere karşılık gelen optimum su içeriği değeri de $w_{opt.}$= %82 olarak belirlenmiştir. E-1 kompozisyonu diğer iki kompozisyona (T-1 ve U-1) oranla daha düşük maksimum kuru b.h.a. değeri ve daha yüksek optimum su içeriği değerlerine sahip olmuştur ($\gamma_{Kuru\ maks.} \cong 5{,}13$ kN/m^3 ve $w_{opt.}$= %108).

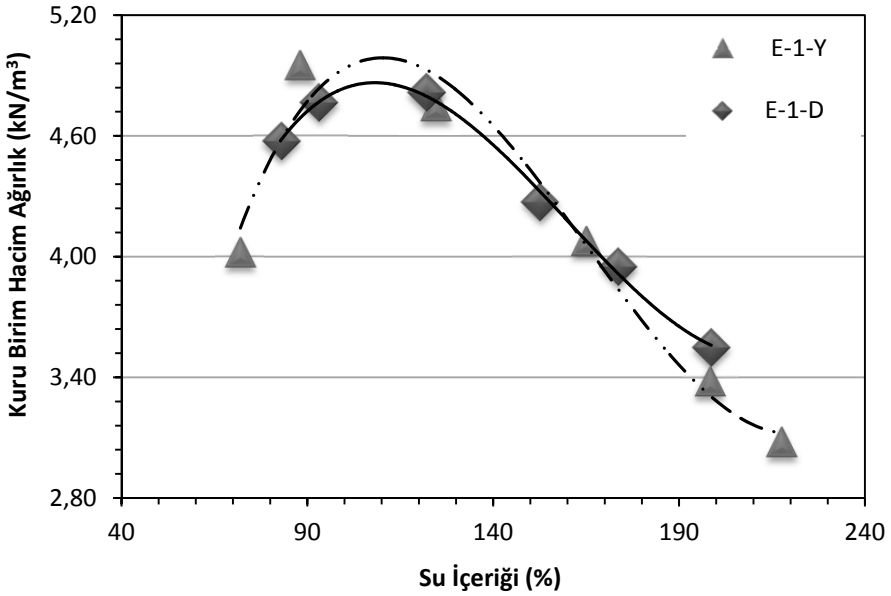
Sentetik taze ve sentetik yıllanmış (3 ay açık havada bekletilmiş) numunelerin Modifiye Proctor sonuçlarının karşılaştırılması yapılarak yıllanma etkisinin kompaksiyon değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5.20'de T-1 kompozisyonuna ait sentetik yıllanmış ve sentetik taze numunelerin kompaksiyon eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 5.20 Sentetik yıllanmış – taze (T-1) KKA numuneleri MP kompaksiyon eğrileri

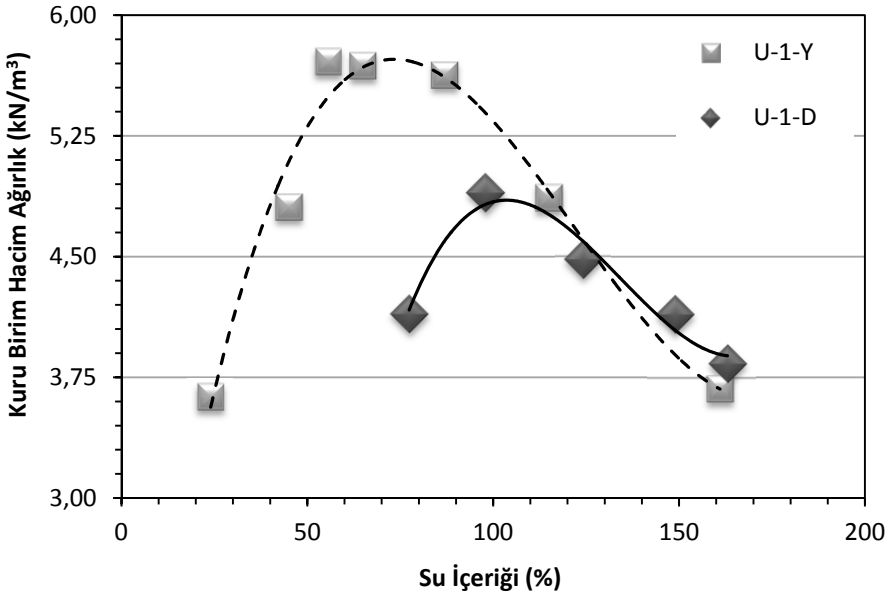
Aynı kompozisyonda ve aynı enerji seviyesinde sıkıştırılmış taze ve yıllanmış sentetik KKA numunelerinin Modifiye Proctor eğrilerini incelendiğinde, yıllanmış numuneye ait maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin (6,20 kN/m^3) taze numuneninkine (4,96 kN/m^3) göre çok daha büyük olduğu görülmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri arasındaki %25 oranına ulaşan bu farklılıkla optimum su muhtevası değerleri arasında karşılaşılmamış ve yıllanmış ve taze atıklar birbirine yakın değerler almıştır ($w_{opt.} \cong$ %73 - %78).

Yıllanmış ve taze KKA numunelerinin Modifiye Proctor kompaksiyon deneyleri sonucunda birbirine en yakın sonuçlar E-1-Y ve E-1-D numuneleri arasında elde edilmiştir. Taze E-1 numunesinin maksimum kuru b.h.a. 4,9 kN/m^3 buna karşılık gelen optimum su içeriği %108 olarak belirlenmiştir. Dış ortam koşullarında bekletildikten sonra Modifiye Proctor deneyi yapılan E-1-Y numunesinin maksimum kuru b.h.a. değeri ise 5,1 kN/m^3, optimum su içeriği %110 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.21). Kağıt ve karton atık bakımından zengin olan E-1 kompozisyonunun yapısal olarak büyük değişikliğe uğramamış olması kompaksiyon parametrelerinin birbirine yakın değerler almasına neden olmuştur (Reddy ve diğ., 2009).



Şekil 5.21 E-1-D ve E-1-Y numuneleri Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri

U-1 kompozisyonunda hazırlanan taze ve yıllanmış sentetik KKA numunelerin Modifiye Proctor deneyleri sonucunda yıllanmış ve taze numunelerin maksimum kuru b.h.a. değerleri sırasıyla 5,7 kN/m^3 ve 4,9 kN/m^3 bu değerlere karşılık gelen optimum su içeriği değerleri %74 ve %104 olarak belirlenmiştir. (Şekil 5.22) Diğer T-1 ve E-1 kompozisyonlarında olduğu gibi yıllanmış numuneye ait maksimum kuru b.h.a. değeri, doğal numuneninkinden daha yüksek değer almıştır. Bu durumun oluşmasındaki en önemli nedenlerden birinin yıllanma içerisinde dane boylarının doğal duruma kıyasla daha küçük hale gelmesidir. Daha küçük dane boyutları bulunduran numunenin boşluk oranı daha az olmaktadır. Yıllanmış numunelerin daha yüksek maksimum kuru b.h.a. değerine sahip olmasını sağlayan bir diğer nedenin de dış ortamda malzemelerin atmosfer şartları altında yıpranıp yumuşaması ve uygulanan kompaksiyon enerjisine daha az direnç göstermiş olmasıdır.



Şekil 5.22 U-1-D ve U-1-Y numuneleri Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri

Yıllanma etkisinin üç farklı kompozisyondaki sentetik numuneler üzerindeki etkisi Modifiye Proctor deneyleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin üç kompozisyon için de arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasında fiziksel koşulların etkisiyle atık dane boyutunda meydana gelen küçülmeler (ufalanmalar) rol oynamıştır. U-1 ve T-1 numunelerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değerindeki artış %15-25 arasında değişirken, E-1 kompozisyonundaki artış oldukça düşük kalmıştır. Yıllanmış ve taze numunelerin optimum su içeriği değerleri karşılaştırıldığında E-1 ve T-1 numunelerinde değişiklik gözlemlenmezken, U-1-Y numunesinin optimum su içeriği değeri taze numuneye kıyasla %20'lik bir düşüş göstermiştir.

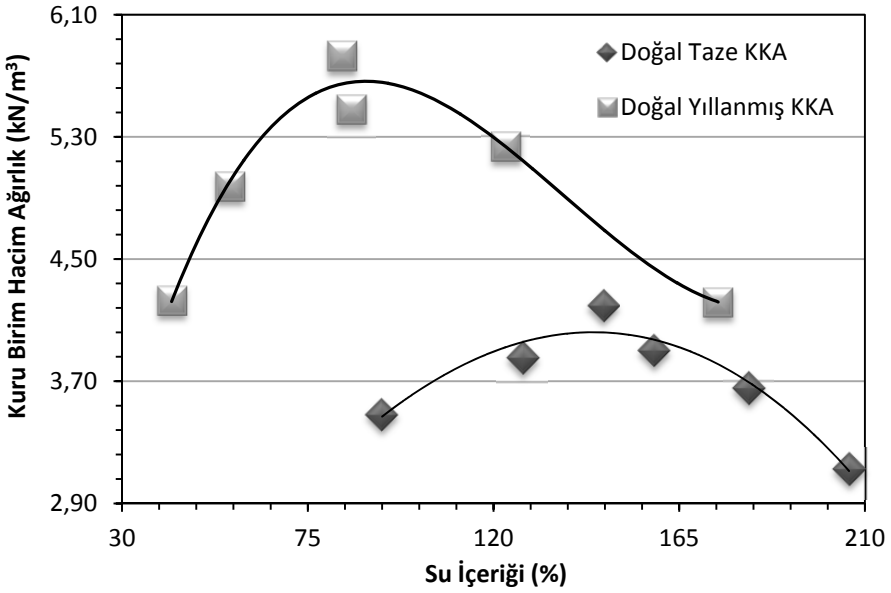
5.1.3 Doğal Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

Laboratuvar ortamında hazırlanan üç farklı kompoziyona ait kompaksiyon deneyleri tamamlandıktan sonra Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze ve doğal yıllanmış atık numunelerinin de kompaksiyon deneyleri yapılarak sentetik numuneler ile aralarındaki benzer ve farklı yönler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Doğal taze atıklar laboratuvara getirildikten sonra, deneylere başlanmadan önce ASTM D 1557-12 (2012) standardı tarafından belirtilen maksimum dane boyutu sınırlamalarına uyulmuş ve büyük dane boyutları doğal numuneler içerisinden ayıklanmıştır. Sentetik numunelerle yapılan Standart ve Modifiye Proctor deneyleri, arazide yapılan sıkıştırma

işlemleriyle karşılaştırıldığında Standart Proctor deneyinin sağladığı enerjinin gerçek değerlere oranla yetersiz kaldığı belirtilmektedir (Fahker, 2006; Zekkos ve diğ, 2006; Hanson ve diğ, 2010). Bu nedenle doğal atık numuneler ile sadece Modifiye Proctor deneyleri yapılmıştır.

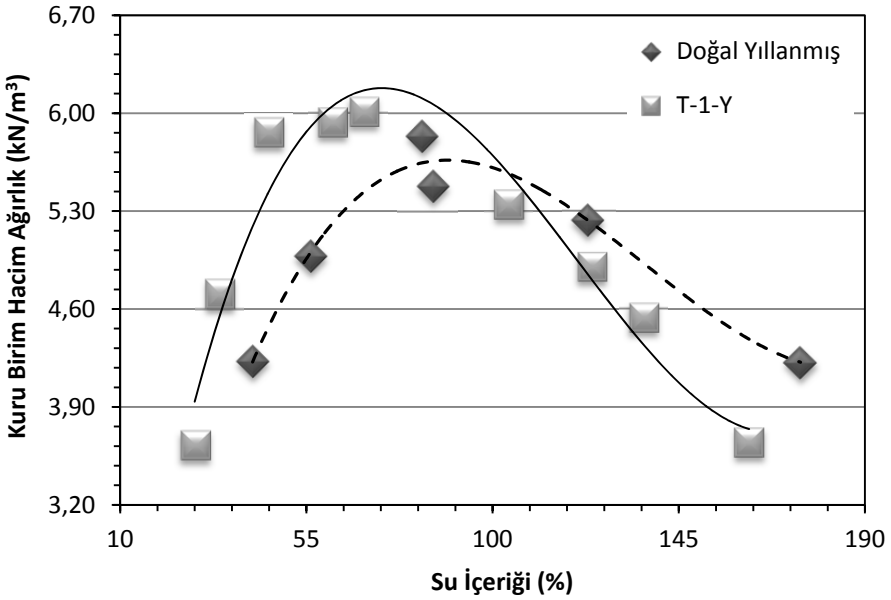
Şekil 5.23'de Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerine ait Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 5.23 Doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numunelerine ait MP kompaksiyon eğrileri

Elde edilen sonuçlara göre, yıllanmış KKA numunesine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 5,7 kN/m^3 ve bu değere karşılık gelen optimum su içeriği değeri $w_{opt.} \cong$ %87 olarak belirlenmiştir. Doğal ortamından alınan taze KKA numunesine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 4,1 kN/m^3, optimum su içeriği değeri %147 olarak belirlenmiştir. Yıllanmış numuneler taze numunelere göre daha büyük kuru birim hacim ağırlık değerine ve daha küçük optimum su içeriği değerine sahiptir (Wong, 2009).

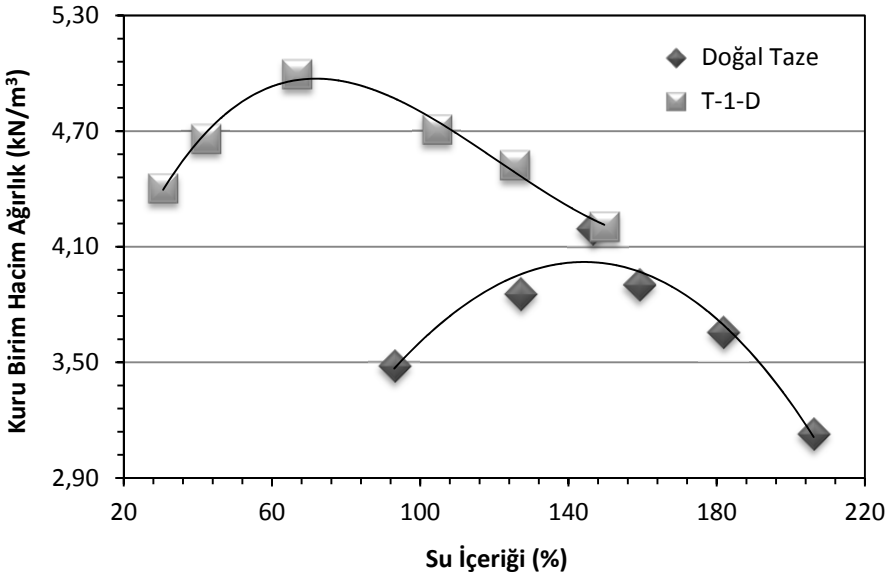
Laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan T-1 KKA numunesi ile Manisa vahşi atık depolama tesisinden alınan doğal yıllanmış numunelerin Modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri Şekil 5.24'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.24 Doğal ve sentetik yıllanmış KKA numunelerine ait MP kompaksiyon eğrileri

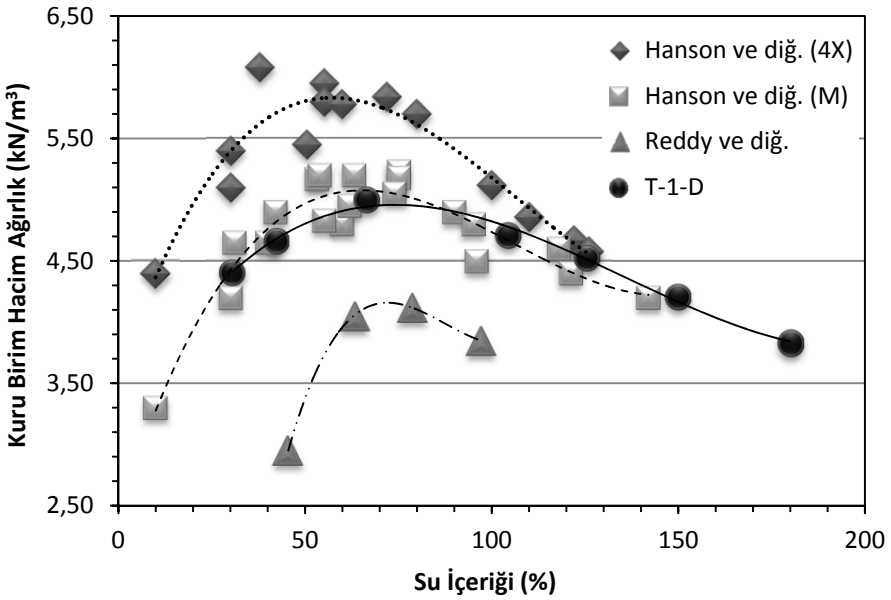
Şekil 5.24'den görüldüğü gibi sentetik yıllanmış KKA numunesi doğal yıllanmış KKA numunesinden daha büyük maksimum kuru b.h.a. değerine sahiptir (6,2 kN/m^3 > 5,7 kN/m^3). Sentetik olarak hazırlanıp yıllandırılmış numune ile doğal yıllanmış numune arasında maksimum kuru b.h.a. değerleri arasında çok büyük farklar görülmezken, optimum su içeriği değerlerinde arasında farklılık olduğu gözlenmiştir.

Sentetik taze KKA numunesi (T-1-D) ile Manisa vahşi depolama sahasından alınmış taze atığın Modifiye Proctor deneyi kompaksiyon eğrileri Şekil 5.25'de görülmektedir. Sentetik taze KKA'ın sıkıştırılabilme özelliği doğal taze atıktan daha iyidir. Aynı enerji seviyeleri uygulanarak yapılan sıkıştırma sonucunda sentetik taze KKA numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 5,0 kN/m^3 ve bu değere karşılık gelen optimum su içeriği değeri yaklaşık %73 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 4,1 kN/m^3 ve bu değere karşılık gelen optimum su içeriği değeri yaklaşık %147 olarak belirlenmiştir. Benzer kompozisyonlara sahip iki numunenin kompaksiyon parametreleri arasındaki farklılık dane boyu dağılımından kaynaklanmaktadır. Laboratuvar ortamında hazırlnmış sentetik numune, doğal atık numuneye kıyasla daha küçük dane yapısına sahiptir. Bu durum maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin daha büyük optimum su içeriği değerinin daha küçük çıkmasına neden olmuştur.



Şekil 5.25 Doğal ve sentetik taze KKA numunelerinin MP kompaksiyon eğrileri

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürden elde edilen KKA'ların kompaksiyon deneyi sonuçları Şekil 5.26'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Hanson ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmalarında Modifiye Proctor deneyini ve 4X modifiye diye adlandırdıkları tabaka başına 225 düşü yapılan bir deney sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem Modifiye Proctor deneyinin sağladığı enerjiye oranla çok daha büyük bir sıkışma enerjisi uygulamaktadır. Hanson ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmadaki Modifiye Proctor deney sonuçları ile bu çalışmadan elde edilen deney sonuçları uyum içerisindedir. Reddy ve diğ. (2008) çalışmalarında Standart Proctor deneyi kullanmışlardır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere Standart Proctor deneyinin sağladığı enerji arazi ortamındaki sıkıştırma enerjisine oranla düşük ve yetersiz kalmaktadır (Fahker, 2006; Zekkos ve diğ, 2006; Hanson ve diğ, 2010).



Şekil 5.26 Çeşitli çalışmalardaki kompaksiyon eğrilerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.4 farklı özelliklere sahip numunelerin kompaksiyon deneyleri sonuçlarını özetlemektedir.

Çizelge 5.4 Kompozisyon etkisinin KKA'ların kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisi

No	Numune Türü	Kompozisyon	$\gamma_{kuru\ max.}$ (kN/m^3)	$w_{opt.}$ (%)	Test Türü
1	Sentetik taze	U-1	3,80	160	SP
2		T-1	3,67	138	SP
3		E-1	3,71	158	SP
4	Sentetik taze	U-1	4,83	104	MP
5		T-1	4,95	73	MP
6		E-1	4,90	108	MP
7	Sentetik yıllanmış	U-1	5,70	81	MP
8		T-1	6,20	73	MP
9		E-1	4,93	110	MP
10	Sentetik taze-iri daneli	U-1	3,95	95	MP
11		T-1	4,02	107	MP
12		E-1	3,58	113	MP
13	Sentetik taze-iri mutfak atığı	U-1	5,66	72	MP
14		T-1	4,32	133	MP
15		E-1	4,66	117	MP
16	Sentetik taze-iri kağıt-karton atık	U-1	5,23	78	MP
17		T-1	5,71	72	MP
18		E-1	5,45	103	MP
19	Sentetik taze modifiye	U-1-1	5,80	87	MP
20		U-1-2	4,75	98	MP
21		T-1-1	4,04	122	MP
22		T-1-2	5,14	46	MP
23		E-1-1	5,13	84	MP
24		E-1-2	5,68	63	MP
25	Doğal taze	Manisa	4,05	147	MP
26	Doğal yıllanmış	Manisa	5,67	88	MP

Gerçekleştirilen kompaksiyon deneyleri sonucunda kompaksiyon enerjisinin KKA numunelerin sıkışmasında çok önemli bir etkisi olduğu Çizelge 5.4'den görülmektedir. Yapılan tüm deneylerde Modifiye Proctor maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, Standart Proctor deney sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca sentetik veya doğal yıllanmış özellikli KKA numuneleri, taze numunelerden daha yüksek sıkışma değerlerine sahiptir. Standart Proctor deney sonuçlarında optimum su içeriği değerleri Modifiye Proctor sonuçlarına oranla çok daha büyük değerlere sahiptir ki bu durum zemin davranışına yakın bir davranış olduğunu

göstermektedir. Sentetik olarak hazırlanan üç kompozisyon arasında çok büyük farklılıklar olmasa da Standart Proctor deneyinde en büyük kuru b.h.a. değerine U-1 numunesi sahipken, Modifiye Proctor deneylerinde en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri T-1 numunesinde elde edilmiştir. Manisa Belediyesi'ne bağlı vahşi atık depolama sahasından alınan doğal numuneler ile sentetik T-1 kompozisyonu (benzer kompozisyon özelliklerine sahip olduklarından) numunelerini karşılaştırdığımızda; laboratuvar ortamında üretilen numunelerin taze ve yıllanmış numunelerde daha yüksek sıkışma değerleri verdiği görülmektedir. Sentetik numuneler doğal atık numunelere kıyasla daha küçük dane boyutlarından oluşmaktadır. Ayrıca laboratuvar ortamında üretilen sentetik atıklar doğal atıklara kıyasla daha dengeli (iyi derecelenmiş) bir granülometre dağılımına sahiptir.

Yapılan kompaksiyon deneylerinin tekrar edilebilirliğinin kontrolü amacıyla T-1, E-1 ve U-1 numunelerinin Modifiye Proctor deneyleri tekrar edilmiştir. Bu sonuçlar Ek.II'de verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere deneyler arasında tutarlılık söz konusudur.

6. KENTSEL KATI ATIKLARIN SIKIŞABİLİRLİK ÖZELLİKLERİ

Kentsek katı atıklar; heterojen yapılı, geniş dane boyutu aralığına sahip, büyük miktarda organik madde içeren, porozite ve boşluk oranı değerleri yüksek malzemelerdir. Düzenli olarak atık depolama sahasına getirilen KKA'lar yığışımlı olarak depolandıklarından depolama yüksekliği arttıkça alt tabakalarda basınç da kademeli olarak artmaktadır. KKA'ların kendi ağırlığından oluşan her geçen gün artan bu düşey basınç ve büyük boşluklu yapı alt tabakaların düşey ve yatay deformasyonuna sebep olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, sentetik olarak laboratuvarda üretilen sentetik taze, sentetik yıllanmış, sentetik modifiye kompozisyonlu ve Manisa vahşi katı atık depolama sahasından alınmış doğal taze ve doğal yıllanmış numunelerin sıkışabilirlik davranışları incelenmiştir. KKA'ların sıkışma deneyleri için büyük ölçekli sıkışma hücreleri özel olarak imal ettirilmiştir. Büyük ölçekli sıkışabilirlik sistemi, ASTM standartlarına uygun, tek boyutlu konsolidasyon deney ekipmanlarının boyut oranlarına orantılı olacak şekilde tasarlanmıştır ($D \geq 2{,}5xH$). Standartların belirlediği dane boyu sınırlamalarına uygun olarak oluşturulan KKA numuneler belirlenen birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanarak sabit yükler altındaki sıkışma davranışları incelenmiştir. 3. bölümde açıklandığı gibi, gerçekleştirilen deneylerde 72 saatlik yüklemelerin çalışma kapsamında incelenen birincil sıkışmaların tamamlanması için yeterli olduğu belirlenmiştir. Sıkışabilirlik deneylerinde hazırlanan KKA deney numunelerinin tümü önceden belirlenen birim hacim ağırlık değer aralığı (6,00 – 9,00 kN/m^3) içerisinde hazırlanmıştır. KKA'ların deney başlangıcındaki ve sonundaki su içeriği değerleri belirlenmiştir. KKA numunelerine ait özgül ağırlık değerleri ve numune yükseklikleri kullanılarak her bir numunenin boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Kompozisyonlara ait sıkışma indisi (C_c) değerleri tüm numuneler için 98 – 196 kPa'lık gerilme aralığındaki değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

KKA'ların düşey deformasyonları düşey gerilme miktarı, yeraltı su seviyesi konumu, atık birim hacim ağırlığı, su içeriği, kompozisyonu, organik madde içeriği gibi birçok etkene bağlı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki sıkışabilirlik deneylerinde farklı kompozisyonlara sahip sentetik KKA numuneleri kullanılmıştır. İlk deney setlerinde aynı kompozisyonda ve aynı şartlarda oluşturulmuş numunelerin doygun (su dolu numune hücresi) ve doğal su içeriğindeki (susuz numune hücresi, kuru durum) sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler tamamlandıktan sonra kompozisyon içerisindeki bileşenlerin sıkışabilirlik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla oluşturulan modifiye kompozisyonlar ile sıkışabilirlik deneyleri yapılmıştır. Daha sonra doğal ortamda büyük tanklar içerisinde yıllanmaya bırakılan sentetik

yıllanmış numunelerin doğal su içeriğinde sıkışabilirlik deneyleri yapılmıştır. Manisa Büyükşehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze ve doğal yıllanmış numunelerin sıkışabilirlik deneyleri yine doğal su içeriklerinde gerçekleşirilmiştir. Böylece sentetik ve doğal KKA numunelerin sıkışabilirlik davranışları arasındaki farklılıklar da incelenebilmiştir.

6.1 Sentetik Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

Laboratuvar ortamında belirli kompozisyonlarda üretilen sentetik KKA numunelerinin sıkışabilirlik deneylerinde ilk olarak üç temel KKA kompozisyonunun suya doygun haldeki deneyleri, daha sonra bu numunelerin doğal su içeriğindeki (kuru) sıkışabilirlik deneyleri gerçekleşirilmiştir. Orijinal kompozisyonların bileşenlerinden bazılarının tamamen çıkarılması ya da kompozisyon içerisindeki yüzdesinin azaltılmasıyla oluşturulan altı adet modifiye kompozisyonun (T-1-1, T-1-2, E-1-1, E-1-2, U-1-1, ve U-1-2) sıkışabilirlik deneyleri ise doğal su içeriğinde (kuru) gerçekleştirilmiştir. Sentetik numunelerin sıkışabilirlik deneyleri temel kompozisyonlarda doğal su içeriğinde hazırlanarak yıllandırılmış numuneler ile tamamlanmıştır.

6.1.1 Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

Bertaraf edilmek üzere depolama sahalarına getirilen KKA numunelerinin su içeriği değerleri; atık kompozisyonu, mevsim, yağış rejimi, yeraltı su seviyesinin konumu, depolama taban ve üst kotuna bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. KKA'ların sıkışabilirlik, permeabilite, kayma mukavemeti gibi birçok mühendislik özellikleri su içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Numune su içeriği ve deney koşullarının KKA numunelerinin sıkışabilirlik davranışına olan etkilerinin incelenmesi amacıyla laboratuvar ortamında sentetik olarak çeşitli kompozisyonlarda hazırlanan numunelerin büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında belirlenen kompozisyonlarda hazırlanan E-1, T-1 ve U-1 numuneleri belirli birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanarak sıkışabilirlik deneyi numune halkasının içerisine aynı koşullarda yerleştirilmiş ve doygun (dış hücre su ile dolu, ıslak) ve doğal su içeriğinde (dış hücreleri boş, kuru) sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar ortamında hazırlanan E-1 numunesinin doğal su içeriği ASTM-D 2216-10 (2010) standartına göre %44 olarak belirlenmiştir. E-1 kompozisyonunun % 70'lik bölümünü kağıt-karton ve organik atıklar oluşturmakta bunu sırasıyla plastik, ağaç talaşı, cam, metal talaşı, tekstil ve moloz atıklar takip etmektedir. Sıkışabilirlik deneylerinde kullanılan E-1 numunesinin

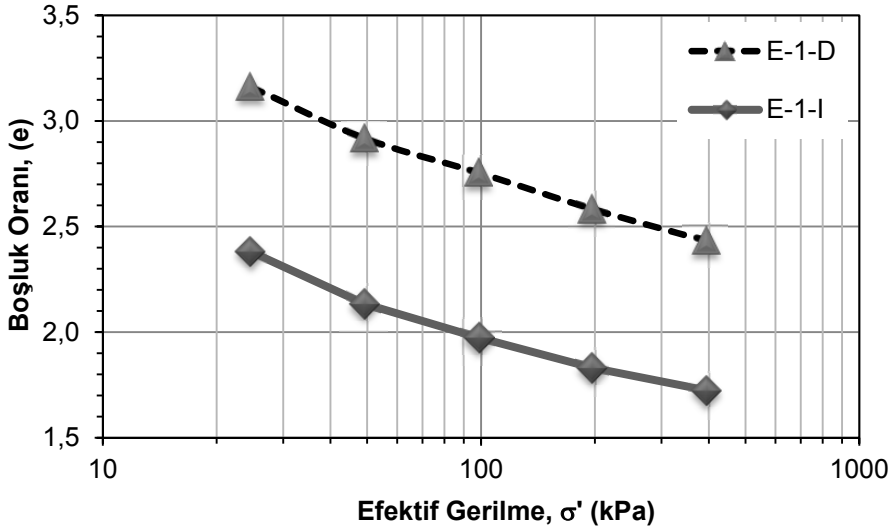
özgül ağırlık değeri 1,62'dir. E-1 kompozisyonunun içerdiği organik madde miktarı ASTM-D 2974-14 (2014)'ye uygun olarak gerçekleştirilmiş ve organik madde içeriği %64 olarak belirlenmiştir.

E-1 kompozisyonuna ait sıkışabilirlik deneylerinden ilki doygun durumda (ıslak) gerçekleştirilmiştir (E-1-I). Doğal su içeriğinde hazırlanan E-1-I numunesinin içerisine %25 oranında su eklenerek (w=%80) daha iyi sıkışabilirlik performansı ve daha yüksek birim hacim ağırlık değeri (7-10 kN/m^3) elde edilmiştir. Numunelere ilk olarak 24 saat süresince 12,3 kPa'lık ilk oturma gerilmesi (seating pressure) uygulanmıştır. Sıkışabilirlik deneyi süresince numuneye 25, 49, 98, 196, 392 kPa olarak düşey gerilmeler uygulanmıştır. KKA'ların sıkışabilirlik davranışlarının tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla ilk gerçekleştirilen testlerde 432 saat (18 gün)'i bulan deformasyon saati okumaları yapılmıştır. Daha sonra elde edilen veriler deformasyon saati – logaritmik zaman eksenli grafiklere yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda 72 saatlik deformasyon saati okumalarının birincil sıkışmaların tamamlanması açısından yeterli olduğu görülmüştür. Sıkışabilirlik deneyleri sonunda numune üzerine etki eden düşey gerilmeler kaldırılmış ve numune hücre içerisinden çıkarılarak deney sonu numune su içeriği değeri %99 olarak hesaplanmıştır. E-1-I kompozisyonundaki KKA numunesinin sıkışma indisi (C_c) 98 – 196 kPa'lık düşey gerilme aralığı için hesaplanmış ve C_c = 0,476 olarak belirlenmiştir.

Aynı koşullarda hazırlanan E-1 kompozisyonuna ait KKA numunesinin sıkışabilirlik deneyi doğal su içeriğinde (kuru) (E-1-D) olarak gerçekleştirilmiştir. E-1 kompozisyonunda hazırlanan KKA numunesinin içerisine %25 oranında su eklenerek daha yüksek sıkışabilirlik performansı ve daha büyük doğal birim hacim ağırlık değeri elde edilmiştir. Sıkışabilirlik hücresine yerleştirilen numunenin kurumasını engellemek amacıyla numune hücresi naylon poşet içerisine alınarak hücre-poşet birleşim yüzeyleri silikon ile kapatılmıştır. E-1-D numunesi için 24,5 kPa'dan başlayan ve 392 kPa' a kadar beş farklı düşey gerilme uygulanarak sıkışabilirlik deneyi tamamlanmıştır. Sıkışabilirlik deneyi tamamlandıktan sonra hücre içerisinden çıkarılan numunenin su içeriği değeri %64 olarak belirlenmiştir. Deney sonunda numunenin su içeriği belirlendiğinde, deney süresince (5 [yükleme kademesi] x 72 [saat] = 360 [saat] = 15 gün) numunede yaklaşık %5'lik bir su kaybı olduğu belirlenmiştir. Daha sonra (Δe) numunenin boşluk oranı değişimi – logaritmik gerilme değerleri grafiğinden yararlanılarak 98 – 196 kPa'lık düşey gerilme aralığı için sıkışma indisi değeri C_c=0,573 olarak belirlenmiştir.

E-1 kompozisyonunda hazırlanan KKA numunelerinin ıslak ve kuru ortamda gerçekleştirilmiş sıkışabilirlik deneylerinden elde edilen boşluk oranı – logaritmik efektif gerilme grafiği Şekil 6.1'de görülmektedir. E-1-D numunesinde boşluk oranı 3,15'den başlayıp 2,45'te son

bulurken, E-1-I numunesinde boşluk oranı 2,40'tan 1,75'e düşmüştür. Islak ve kuru ortam koşullarında gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyleri karşılaştırıldığında kuru durumda, daha düşük su içeriğine sahip numunenin daha yüksek sıkışma indisine (C_c) sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.1). İlk gerilme kademelerinde numunede daha büyük boşluk oranı değişimleri gözlenirken, gerilme kademeleri ilerledikçe (büyüdükçe), boşluk oranı farklılıkları azalmaktadır (doğrunun eğimi azalır).



Şekil 6.1 E-1-D ve E-1-I numunelerin sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Temsili Amerika Birleşik Devletleri KKA kompozisyonu olan U-1 numunesi diğer kompozisyonlara oranla daha yüksek miktarda plastik ve metal atık bulundururken, organik madde miktarı (%58) diğer T-1 ve E-1 numunelerine kıyasla daha düşük orandadır. Laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan KKA numunesinin başlangıç su içeriği değeri %40 olarak belirlenmiştir. U-1 kompozisyonun özgül ağırlık değeri içerdiği %9 oranındaki metal atık nedeniyle diğer kompozisyonlara kıyasla daha yüksek bir değer almıştır. Büyük ölçekli sıkışabilirlik deneylerinde U-1 kompozisyonunun özgül ağırlığı literatür ve laboratuvar değerlerinin ortalaması olan 1,82 kullanılmıştır.

U-1 kompozisyonuna ait sıkışabilirlik deneylerinden ilki dış hücrenin tamamen su ile dolu olduğu doygun haldeki KKA numunesiyle gerçekleştirilmiştir (U-1-I). Sıkışabilirlik deneylerine numune hazırlanırken numune ağırlığının %25'i kadar su eklenerek hem numunenin daha rahat sıkıştırılması sağlanmış hem de belirlenen birim hacim ağırlık değer aralığına (6,00 – 9,00 kN/m^3) ulaşılmıştır. Numune halkası içerisine beş eşit tabakada yerleştirilen numunenin her bir tabakasına 100 Standart Proctor darbesi ile sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. U-1-I kompozisyonunda gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyi KKA numunelerinin birincil sıkışma

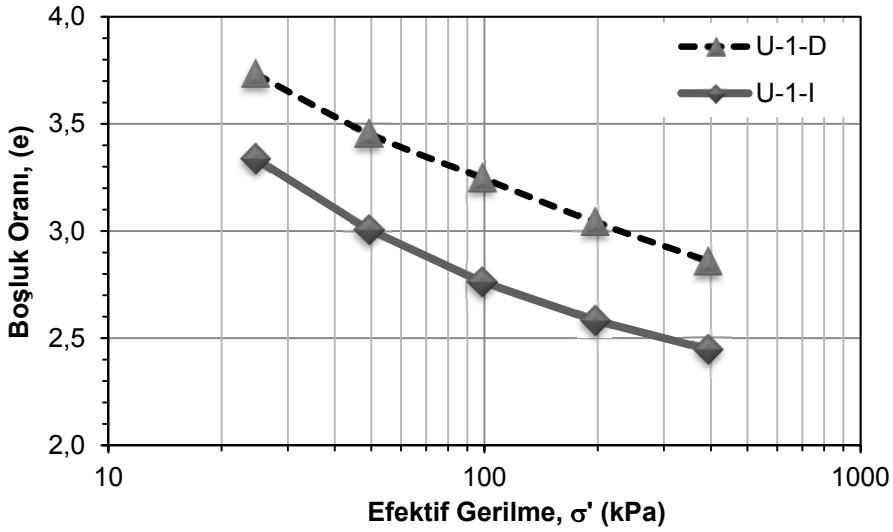
davranışının belirlenmesi amacıyla 432 saatte (18 gün) tamamlanmıştır. Geçen bu uzun süre içerisinde su dolu dış hücre içerisinde kalan numunenin deney sonu su içeriği %130 olarak belirlenmiştir.

U-1-I kompozisyonundaki KKA numunesinin sıkışma indisi (C_c) 98 – 196 kPa'lık düşey gerilme aralığı için 0,598 olarak belirlenmiştir. Doygun ortamda gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyinin yükleme kademeleri arasındaki sıkışma indeksleri incelendiğinde, gerilme miktarı arttıkça sıkışma indisinin azaldığı belirlenmiştir.

Deney koşullarının (ıslak, kuru) ve numune su içeriğinin KKA numunelerinin sıkışabilirlik davranışına etkisinin incelenmesi amacıyla, U-1 kompozisyonunda bir önceki deney numunesiyle (U-1-I) aynı şekilde, aynı birim hacim ağırlıkta hazırlanan numunenin doğal su içeriğindeki (dış hücre boş, kuru) sıkışabilirlik deneyi gerçekleştirilmiştir. Hücrenin etrafı naylon ile sarılarak kuruması engellenmiştir. Sıkıştırma deneylerinde kullanılacak tüm numunelerin üniform yapıda ve belirli birim hacim ağırlık değer aralığında kalması için numuneye eşit miktarda enerji uygulanmıştır. Deney sonrası etüvden çıkarılmış U-1-D numunesi Şekil 6.2'de görülmektedir.

Şekil 6.2 Etüvden çıkarılmış U-1-D numunesinden görünüm

U-1-D numunesi ile gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyi sonucunda sıkışma indisi 0,684 olarak belirlenmiştir. Sıkışabilirlik deneyi sonunda küçük gerilmelerde büyük sıkışma indisi değerleri elde edilirken gerilme değerleri büyüdükçe sıkışma indeksleri daha küçük değerler almıştır. Şekil 6.3'de doygun ve doğal su içeriğinde sıkışabilirlik deneyi gerçekleştirilen U-1 kompozisyonunun e - σ' arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 6.3 U-1 doğal ve doygun numunelerin sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Şekil 6.3'den görüldüğü gibi ilk yükleme kademelerinde doğru eğimi daha dik, ilerleyen yükleme kademelerinde doğrunun eğimi daha düşüktür. Islak ve kuru numunelerin sıkışabilirlik katsayıları karşılaştırıldığında kuru durumda (doğal su içeriğindeki) numunenin daha büyük sıkışma indisi (C_c) değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Türkiye KKA kompozisyonu değerleri kullanılarak oluşturulan T-1 kompozisyonu %45 oranında organik atık (park-bahçe-mutfak atığı) ve %15 oranında kül atık bulundurmasıyla diğer kompozisyonlardan farklı özelliklere sahiptir. Organik madde içeriği kompozisyonun doğal su içeriğini arttırmaktadır. T-1 kompozisyonuna ait laboratuvar deneylerinde doğal su içeriği %62, organik madde miktarı %65 olarak belirlenmiştir. T-1 kompozisyonunun içerisinde bulundurduğu yüksek miktardaki organik atık kompozisyona ait özgül ağırlık değerinin diğer iki numuneye kıyasla daha düşük değerde olmasına neden olmuştur. Sıkışabilirlik deneylerinde T-1 kompozisyonunun özgül ağırlığı olarak laboratuvar ve literatür değerlerinin ortalaması olan 1,24 değeri kullanılmıştır.

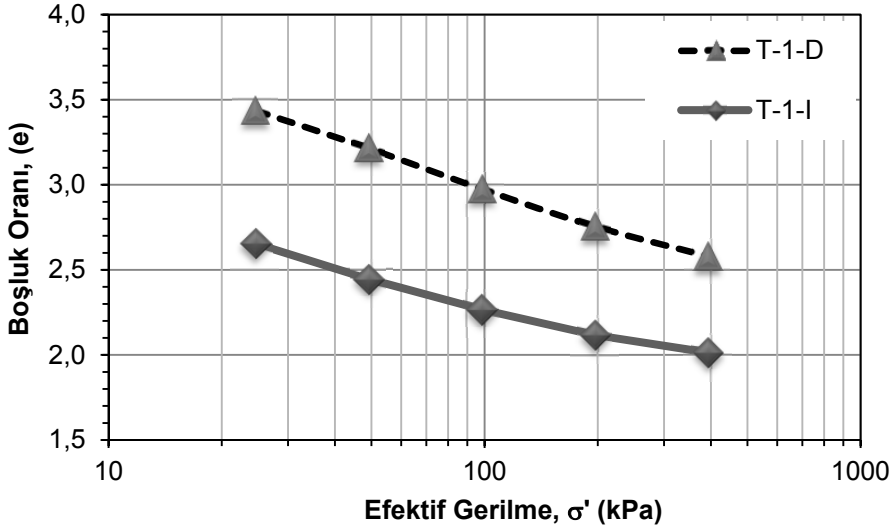
Laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan T-1 numunesinin sıkışabilirlik deneylerinde, ilk olarak numune dış hücresi su ile doldurularak T-1-I numunesine ait deney

gerçekleştirilmiştir. Diğer numunelerde olduğu gibi numune ağırlığının %25'i kadar su eklemesi yapılmıştır. Deney tamamlandığında T-1-I numunesinin deney sonu su içeriği %114 olarak belirlenmiştir. T-1-I kompozisyonundaki KKA numunesinin sıkışma indisi (C_c) 0,499 olarak belirlenmiştir.

T-1 kompozisyonunda oluşturulan numune ile depolama sahasındaki kuru ortam koşullarını temsil eden sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplam deney süresi 432 saati bulan test deneyleri sonucunda 72 saatlik okumaların birincil sıkışmaların tamamlanması için yeterli olacağı görülmüştür. KKA numunelerine ait sıkışabilirlik deneylerinde 72 saat sonrasında da düşey deformasyonlar devam etmektedir. Ancak toplam deformasyon miktarının %90 - 95'lik kısmı ilk 72 saatte tamamlanmaktadır. Ayrıca KKA numunelerinde meydana gelen düşey deformasyonların 432 saat sonunda bile tam olarak sonlanmadığı ve bundan sonraki kısımda ayrışma ve fiziko kimyasal tepkimelerin oluşmasıyla düşey deformasyonların devam ettiği edeceği açıktır.

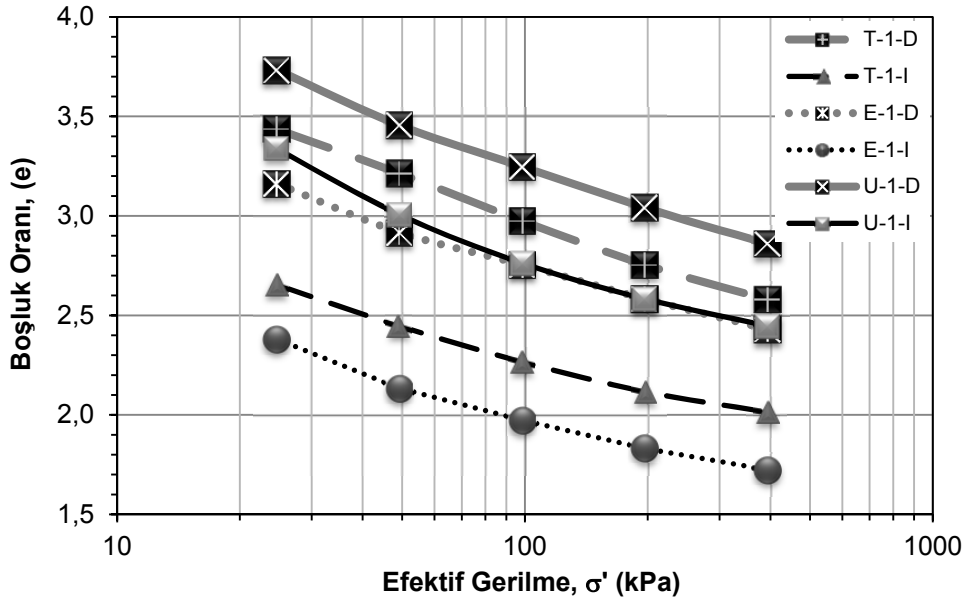
Yapılan deneyler sonucunda T-1-D numunesinin deney sonu su içeriği değeri %72 olarak belirlenmiştir. Deney başlangıç su içeriği değeri %62 olan numuneye yerleştirme işleminin istenilen özelliklerde yapılabilmesi için ek olarak %25'lik su eklenmiştir. Böylece deney başlangıç su içeriği değerinin yaklaşık %80-85 aralığında olması gerekmektedir. Yapılan hesaplamalar sonunda sıkışabilirlik deneyi boyunca T-1-D numunesinde %10-15'lik su kaybının oluştuğu belirlenmiştir. Yükleme kademelerine ait boşluk oranı değerleri ile düşey efektif gerilme değerleri grafiği Şekil 6.4'te görülmektedir. T-1-D kompozisyonundaki KKA numunesinin sıkışma indisi (C_c) 0,732 olarak belirlenmiştir. Doygun olarak gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyinin yükleme kademeleri arasındaki sıkışabilirlik katsayıları incelendiğinde, gerilme miktarı arttıkça C_c katsayısının azaldığı belirlenmiştir.

Doğal su içeriğinde (T-1-D) ve doygun durumda (T-1-I) gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyleri sonucunda, kağıt, karton, tekstil gibi atıkların suyla temaslarında yapılarına su alarak hacim artışı gösterdikleri ve bu artışın düşey gerilmelere karşı bir direnç oluşturduğu belirlenmiştir. İki numuneninin sıkışma indisi değerleri incelendiğinde doygun numunenin daha düşük sıkışma indisi değerine sahip olduğu görülmüştür ($C_{cT\text{-}1\text{-}I} < C_{cT\text{-}1\text{-}D}$).



Şekil 6.4 T-1 doğal su içeriğinde ve doygun numunelerin sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Üç farklı kompozisyonda, doygun ve doğal su içeriğindeki sentetik taze KKA numunelerinin sıkışabilirlik deneyleri farklı su içeriklerinde (doygun ve doğal su içeriği) gerçekleştirilerek doygunluk durumunun sıkışabilirlik davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 6.5'te üç farklı kompozisyonda, iki farklı deney koşulundaki (doygun ve doğal su içeriği) sentetik taze KKA numunelerinin boşluk oranı (e), efektif gerilme (σ') eğrileri görülmektedir. Doğal su içeriğindeki ve doygun durumdaki numunelerin sıkışma indeksleri karşılaştırıldığında, doğal su içeriğindeki KKA numunelerin sıkışma indisi değerlerinin her üç numune için de doygun numunelerden daha büyük değer aldığı görülmüştür.



Şekil 6.5 Doğal ve doygun durumdaki üç kompozisyonun sıkışabilirlik eğrileri

KKA numunelerinin zemin numunelerine oranla çok daha büyük boşluk oranlarına ve yüksek hidrolik iletkenliğe sahip olduğu bilinmektedir. Doygun durumda gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneylerinde numunenin tüm boşluklarının su ile dolarak numunenin doygun duruma ulaştığı düşünülmektedir. Sıkışabilirlik deneyi sonucunda doygun numunelerin sıkışma indekslerinin kuru numunelere kıyasla daha küçük değer almış olması, gözenekli dokuya sahip atıkların suyla teması sonucu şişerek sıkışmaya karşı koyan bir direnç kuvveti oluşturduğunu göstermiştir. Sıkışabilirlik deneylerinde numunelerin ilk yükleme kademelerinde daha büyük boşluk oranı değişimi (Δe) değerlerine sahip olduğu, normal gerilme değerleri arttıkça boşluk oranı değişim değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Sıkışabilirlik deneyleri sonucu KKA numunelerinde meydana gelen düşey deformasyonların meydana geliş şekli iki farklı araştımacının görüşleriyle açıklanmaktadır. Edil ve diğ. (1990) KKA'ların sıkışabilirliğini beş aşamada incelemiştir. Birincisi mekanik bükülme, eğilme, ezilme ve yeni düzene geçmenin (reorientation) neden olduğu fiziksel sıkışmadır. İkincisi küçük parçacıkların boşluklara ya da büyük parçacıkların arasına girmesiyle gerçekleşen (Ravelling settlement) çözülme oturmasıdır. Viskoz (kıvamlı) ve konsolidasyon olaylarının neden olduğu tüm atık iskeletinde ya da bölgesel meydana gelen sıkışmalar üçüncü sırada yerini alır. Dördüncü sırada organik maddelerin biyolojik bozunması sonucu meydana gelen ayrışma (çürüme) sıkışmasıdır. Son sıkışmalar fiziko kimyasal olayların bir sonucu olarak birleşenlerde meydana gelen yıkılma ve çökmelerin neden olduğu sıkışmalardır. Grisolia ve Napoleoni (1996)'de KKA'ların sıkışma evrelerini beş aşamada incelemişlerdir. Birinci aşama yüklemenin yapıldığı anda ani olarak meydana gelmektedir. İkinci aşama, zeminlerde de görülen zamana bağlı aşırı boşluk suyu basınçlarının dağılmasıyla meydana gelmektedir. İkincil oturma KKA danelerinin oksidasyon ve korozyona bağlı bükülme, eğilme mekanizmalarının sonucunda gerçekleşir. Organik maddelerin zaman içerisinde ayrışması sonucu dördüncü evre gerçekleşir ve süreç diğer aşamalara kıyasla çok daha uzun sürer. Son olarak nihai oturma aşaması KKA'ların beşinci oturma aşaması olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan sıkışabilirlik deneylerinde Manessero (1996)'nın belirlediği aşamalardan birinci ve ikincisi tamamen üçüncü aşama kısmen gözlenmiştir. Biyolojik bozunma ve ayrışmaların gözlemlendiği dördüncü ve beşinci aşamalar tez çalışmasının içeriğine dahil edilmemiştir. Grisolia ve Napoleoni (1996)'nin çalışmaları ele alındığında tanımları yapılan birinci ve ikinci aşamalar tam olarak gözlenmiştir.

6.1.2 Sentetik Yıllanmış Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

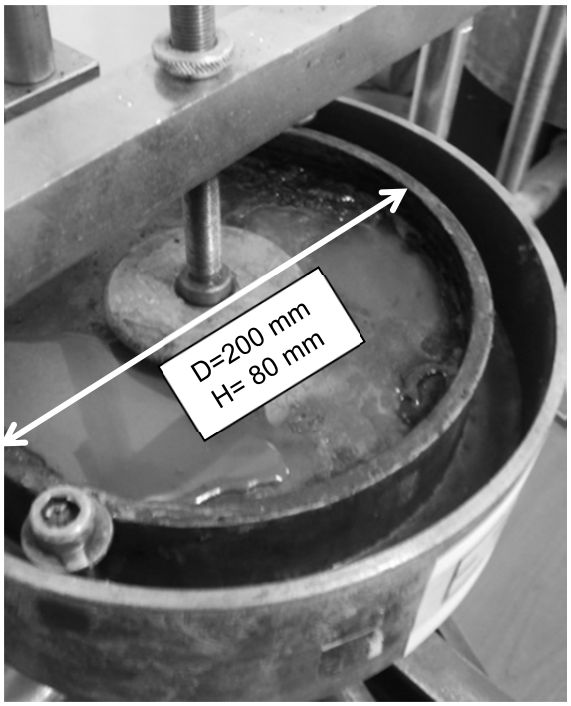
Katı atık depolama sahalarında meydana gelebilecek deformasyonların önceden tahmin edilmesi oldukça zordur. KKA'lar içerisinde farklı özelliklere sahip materyaller içerisinde zemin, metal gibi inorganik maddeler olsa da büyük bir çoğunluğunu insanların günlük tüketiminin bir ürünü olan organik maddeler oluşturmaktadır. KKA'ların sıkışabilirlikleri birçok aşamada incelenebilmektedir. KKA'ların mekanik düşey deformasyonları yüklemenin yapılmasından kısa süre sonra tamamlanırken ayrışma, fiziko kimyasal etkiler sonucu uzun zamanda gerçekleşen deformasyonlarla devam etmektedir.

Laboratuvar ortamında üretilmiş sentetik KKA numunelerinin sıkışabilirlik davranışları üzerinde yıllanmanın etkisi incelenmiştir. Üç farklı kompozisyonda günlük (taze) üretilmiş KKA numuneleri, üretildikten sonra 12 ay süresince dış ortam koşullarında bekletilmiş ve daha sonra bu numuneler üzerinde büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yıllanmış numuneler üzerindeki sıkışabilirlik deneylerinde herhangi bir su ekleme çıkarma işlemi yapılmadan doğal su içeriklerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Dış ortamda 12 ay boyunca yıllanmış numuneler laboratuvar ortamına getirilince deney başlangıç su içeriği değerlerini belirlemek için numune alınarak etüve yerleştirilmiştir. KKA numuneleri ile daha önce gerçekleştirilen deneylerde 432 saate varan deformasyon saati okumaları gerçekleştirilmiş, yapılan değerlendirmeler sonucunda 72 saatten sonra sıkışmaların önemli bölümünün gerçekleştiği belirlendiğinden deneyler 72 saatte sonlandırılmıştır. Tüm deneylerde numunelere 24,5 kPa'dan başlayan ve 392 kPa değerine ulaşan düşey gerilmeler uygulanmıştır. Bu bölümde sıkışabilirlik deneylerinin tamamında kuru ortam koşullarını temsil ettiği kabul edilen dış hücrenin su ile doldurulmadığı sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney hücrelerinin çevresi naylon poşetle sarılıp, birleşim noktaları silikon ile kapatılarak nem alışverişi olmayacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Yıllanma etkisinin E-1 kompozisyonu üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla E-1-Y numunesi üzerinde büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyi gerçekleştirilmiştir. E-1-D numunesinin başlangıç su içeriği %42 iken, E-1-Y numunesinin sıkışabilirlik deneyi başlangıç su içeriği değeri %130 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.6). Bir yıl süresince dış ortam koşullarına bırakılan E-1 numunesinin organik madde içeriği 12 ay sonunda %64'ten, %42'e düşmüştür. olarak belirlenmiştir.

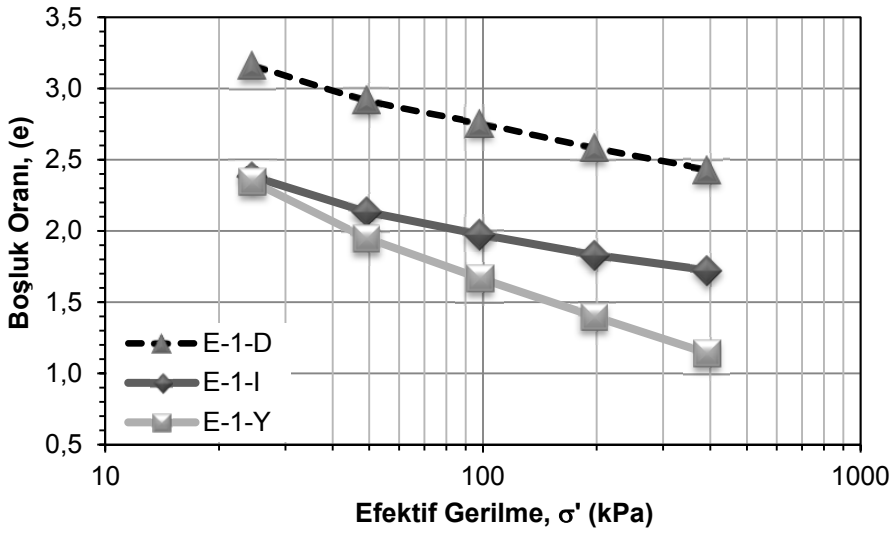
Şekil 6.6 Yıllanmış E-1-Y kompozisyonundan bir görünüm

Bu durumun bir sonucu olarak numune halkasının içerisine yerleştirilen numunenin birim hacim ağırlığı diğer numunelerden (E-1-D ve E-1-I) çok daha büyük değer almıştır (11,60 kN/m^3). (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Yıllanmış E-1-Y numunesinin sıkışabilirlik deneyinden bir görünüm

E-1-D numunesinin sıkışma indisi 0,573 iken, E-1-Y kompozisyonun sıkışma indisi değeri 0,883 olarak belirlenmiştir. Sıkışabilirlik deneyi sonucunda numunenin 24,5 kPa 'lik gerilme altındaki boşluk oranı 2,346 olarak hesaplanmıştır. Tamamlanan sıkışabilirlik deneyi sonucunda E-1-Y numunesinde meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi ($\Sigma\Delta e=e_1 - e_{son}$) 1,204 olarak bulunurken, E-1-D numunesinde ise bu değer 0,73 olarak belirlenmiştir. Boşluk oranında meydana gelen bu büyük değişimin ve büyük deformasyonların en büyük nedeni E-1-Y numunesinin sahip olduğu büyük su içeriği değeridir. Şekil 6.8'de E-1 kompozisyonunda farklı özelliklere sahip üç numunenin e - σ' ilişkilerini göstermektedir. Bu üç numunenin sıkışabilirlik katsayıları karşılaştırıldığında E-1-D ve E-1-Y numuneleri için 98 – 196 kPa gerilme aralığında sırasıyla 0,573 ve 0,883 değerleri elde edilirken, E-1-I numunesinin 98 – 196 kPa gerilme aralığındaki sıkışma indisi 0,476 bulunmuştur. Bu üç numunenin sıkışma indisi değerleri karşılaştırıldığında kağıt, karton, tekstil gibi gözenekli yapıya sahip atıkların suyla teması sonucunda hacimlerinde meydana gelen artışın normal gerilmelere karşı bir direnç kuvveti oluşturduğu ve bunun sonucunda E-1-I'nın en düşük C_c değerine sahip olmasını sağladığı belirlenmiştir. E-1-Y numunesinde ise atık malzemeler çok uzun süre dış ortam koşullarında yüksek su içeriği değerlerinde bekletilmiş bunun sonucunda atık yapısında önemli bozulmalar gözlenmiştir. Normal gerilmeye maruz kalan bu yüksek su içerikli zayıf yapılı numunede büyük su çıkışı ve düşey deformasyonlar gözlenmiştir. Doğal su içeriğindeki E-1-D numunesi E-1-I'dan büyük, E-1-Y numunesinden küçük sıkışma indisi değerine sahiptir.



Şekil 6.8 E-1-D, E-1-I ve E-1-Y numunelerinin sıkışabilirlik deneyi e - σ' ilişkileri

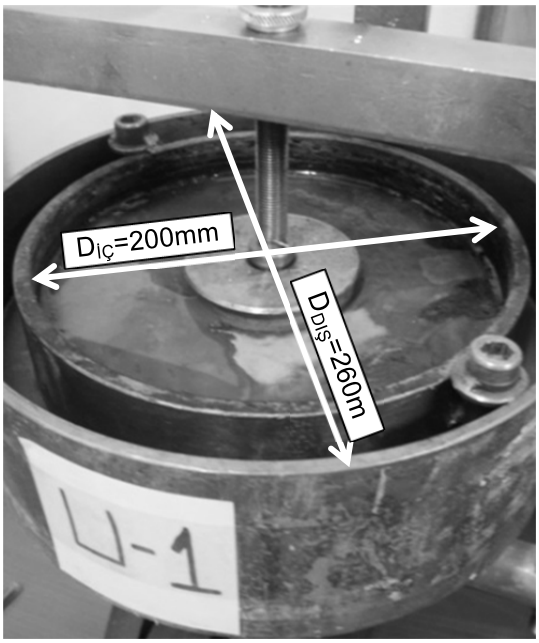
Laboratuvar ortamında sentetik olarak üretildikten sonra dış ortam koşullarında 12 ay süresince bekletilen U-1-Y numunesinin sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve sıkışma

indisi 1,072 olarak elde edilmiştir. Bu değer U-1-D numunesi için daha önce 0,687 olarak belirlenmiştir.

Tamamlanan sıkışabilirlik deneyi sonucunda U-1-Y numunesinde 24,5 kPa ile 392 kPa' lik gerilme değerleri arasında meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi ($\Sigma\Delta e=e_1 - e_{son}$) 1,464 olarak bulunmuştur. Boşluk oranında deney başından sonuna kadar meydana gelen bu değişim gerçekleştirilen tüm sıkışabilirlik deneylerindeki elde edilen en büyük değerlerden biridir. Bu durumun oluşması yıllanmış numunenin deney başlangıcında sahip olduğu büyük su içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.9 numune hücresi içerisine yerleştirilmiş U-1-Y numunesini göstermektedir.

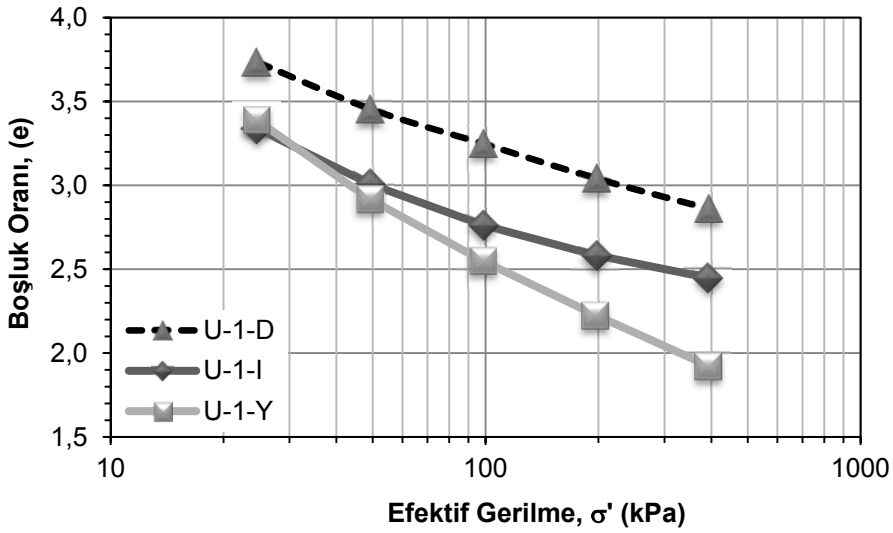
Şekil 6.9 Sıkışabilirlik hücresi içerisindeki U-1-Y numunesi

Şekil 6.10'da U-1-Y numunesine etki eden 392 kPa'lik yüklemenin neden olduğu düşey deformasyonu ve numuneden drene olan atık suyu gösterilmektedir.



Şekil 6.10 Yıllanmış U-1-Y kompozisyonu sıkışabilirlik deneyinden bir görünüm

U-1 kompozisyonunda hazırlanan ancak birbirinden farklı özellikler ile sıkışabilirlik deneyi gerçekleştirilen üç numunenin e - σ' ilişkilerini gösteren grafik Şekil 6.11'de görülmektedir. Gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyleri sonucunda U-1-D, U-1-I ve U-1-Y numuneleri için elde edilen sıkışabilirlik katsayıları sırasıyla 0,687; 0,598 ve 1,072 olarak belirlenmiştir. Şekil 6.11'den de açık şekilde görüldüğü üzere en büyük düşey deformasyonlar U-1-Y numunesinde gerçekleşirken bunu kuru durumda sıkışabilirlik deneyi gerçekleştirilmiş olan U-1-D izlemektedir. En düşük düşey deformasyonlar E-1 kompozisyonunda olduğu gibi su dolu dış hücre içerisinde sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilen ıslak U-1-I numunesinde oluşmuştur.

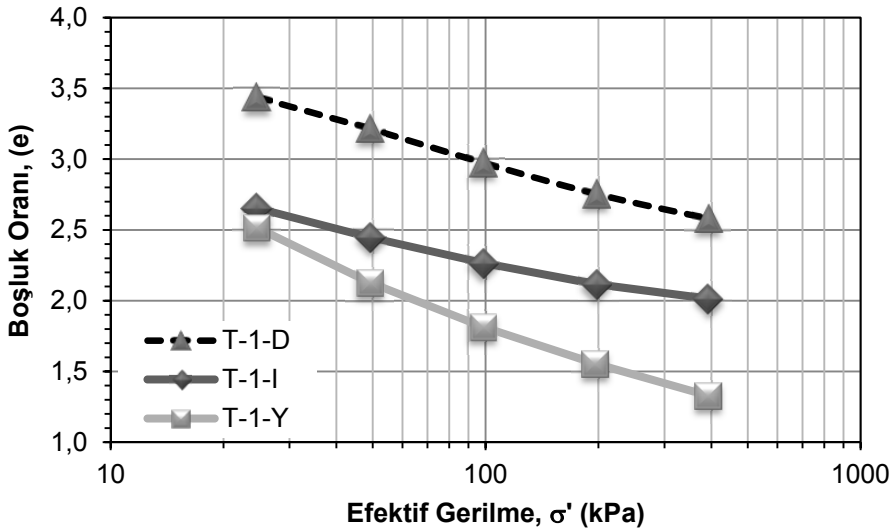


Şekil 6.11 U-1-D, U-1-I ve U-1-Y numunelerinin sıkışabilirlik deneyi e - σ' ilişkileri

T-1 kompozisyonu organik atık bakımından diğer kompozisyonlara kıyasla daha zengindir. Ancak 12 aylık süre içerisinde T-1 kompozisyonunun organik madde miktarının %65'ten %52'ye düştüğü yaklaşık %20 oranında bir azalmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Yıllanmış numune doğal su içeriğinde numune hücresinin içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 6.12). T-1-Y numunesinin büyük ölçekli sıkışma deneyi sonucunda sıkışma indisi değeri 0,870 olarak belirlenmiştir.

Şekil 6.12 Yıllanmış T-1-Y kompozisyonundan bir görünüm

Doğal su içeriğindeki taze T-1-D, doygun durumdaki taze T-1-I ve doğal su içeriğindeki yıllanmış T-1-Y numunelerine ait e - σ' ilişkileri Şekil 6.13'de gösterilmektedir.



Şekil 6.13 T-1-D, T-1-I ve T-1-Y numunelerinin sıkışabilirlik deneyi e - σ' ilişkileri

Tüm kompozisyonlarda doygun numuneler ile (T-1-I, E-1-I, U-1-I) yıllanmış numunenin (T-1-Y, E-1-Y, U-1-Y) başlangıç boşluk oranı değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı gözlenmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasındaki en büyük neden yıllanmış numunelerin sahip olduğu doğal su içeriği değerinin doygun durumdaki deney sonu su içeriği değerlerine oldukça yakın olmasıdır. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, yıllanmış numuneler taze numunelere kıyasla daha büyük sıkışma indisi değerlerine sahiptir. Yıllanma süresince kağıt, karton tekstil gibi gözenekli atıklar yapılarına aşırı su almıştır. Sıkışma deneyleri sırasında normal gerilme altında bu aşırı su tahliye olmuş ve büyük düşey deformasyonlar meydana gelmiştir.

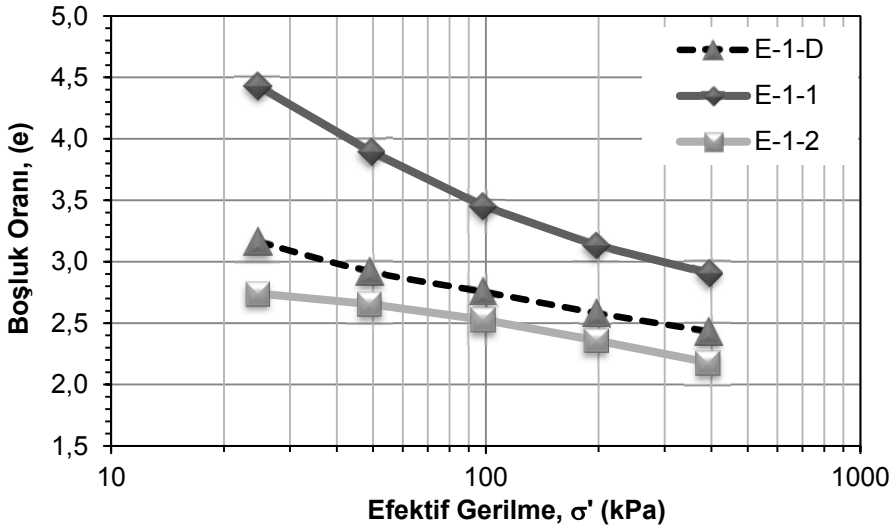
6.1.3 Kompozisyonun Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirliği Üzerindeki Etkisi

Katı atıklar farklı mühendislik özelliklerine sahip çok sayıda maddeyi yapısında bulundurmaktadır. Farklı özelliklere sahip olan bu materyaller KKA'ların davranışları üzerinde önemli etkilere sahip olabilmektedir. Kompozisyon etkisinin KKA'ların sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla kompozisyon içerisinde baskın yüzdeye sahip bazı bileşenlerin yüzdeleri azaltılarak ya da tamamen kompozisyon içerisinden çıkartılarak oluşturulan 6 adet modifiye kompozisyonlar (E-1-1, E-1-2, T-1-1, T-1-2, U-1-1 ve U-1-2) ile temel kompozisyonların (E-1, U-1, T-1) sıkışabilirlik özellikleri karşılaştırılmıştır.

6.1.3.1 Kompozisyon etkisinin E-1 kompozisyonunun Sıkışabilirlik Özelliğine Etkisi:

Kompozisyonun sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla E-1 kompozisyonunda büyük bir orana ve baskın bir özelliğe sahip olan kağıt atık oranı %35'ten %10'luk değere indirilerek modifiye E-1-1 kompozisyonu oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyi sonucunda numunenin çok büyük bir başlangıç boşluk oranı değerine sahip olduğu belirlenmiştir (e_0=5,086). Bu durum kuru durumdaki kağıt-karton atığın yerini çok büyük su içeriğine sahip olan organik atıkların almış olmasından kaynaklanmaktadır. E-1-1 kompozisyonun sıkışma indisi değeri 1,058 olarak belirlenmiştir. Büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri süresince meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi incelendiğinde ($\Sigma\Delta e=e_1 - e_{son}$) E-1-1 numunesinin E-1-D numunesinden çok daha büyük boşluk oranı değişimine olduğu belirlenmiştir ($\Sigma\Delta e_{E\text{-}1\text{-}1}$=1,526 > $\Sigma\Delta e_{E\text{-}1\text{-}D}$=0,731) (Şekil 6.14). Elde edilen sonuçlara göre, kağıt-karton atığın sıkışmaya karşı direnç gösteren bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Sıkışabilirlik deneylerine ait yükleme kademeleri incelendiğinde hem E-1 hem de E-1-1 numunesi için düşük gerilmelerde daha büyük, büyük gerilme değerlerinde ise daha küçük sıkışabilirlik katsayılarının elde edildiği görülmüştür. Bu durum her kademe ilerlemesiyle numunenin daha büyük birim hacim ağırlığı değerine ulaşması, numune içerisindeki boşluk miktarının azalması, numunenin içinde bulundurduğu hava ve suyun tahliye olması ve geriye kalan danelerin sıkışmaya karşı direnç göstermesiyle açıklanabilir.

E-1-D kompozisyonun sıkışabilirlik özelliğinin karşılaştırıldığı bir diğer numune, kompozisyon içerisindeki organik madde miktarının %35'ten %10'a düşürülerek oluşturulan E-1-2 modifiye numunesidir. E-1-2 numunesinin başlangıç boşluk oranı (e_0) 2,879 olarak belirlenmiştir. Tamamlanan sıkışabilirlik deneyi sonucunda E-1-2 numunesinde meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi, orijinal E-1-D kompozisyonundan daha küçüktür ($\Sigma\Delta e_{E\text{-}1\text{-}1}$=0,579). E-1-2 kompozisyonun sıkışma indisi değeri de 0,561 olarak belirlenmiştir. Şekil 6.14' de E-1-D, E-1-1 ve E-1-2 kompozisyonlarındaki numunelerin e - σ' ilişkileri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.14 E-1-D (orijinal) E-1-1 ve E-1-2 kompozisyonları sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

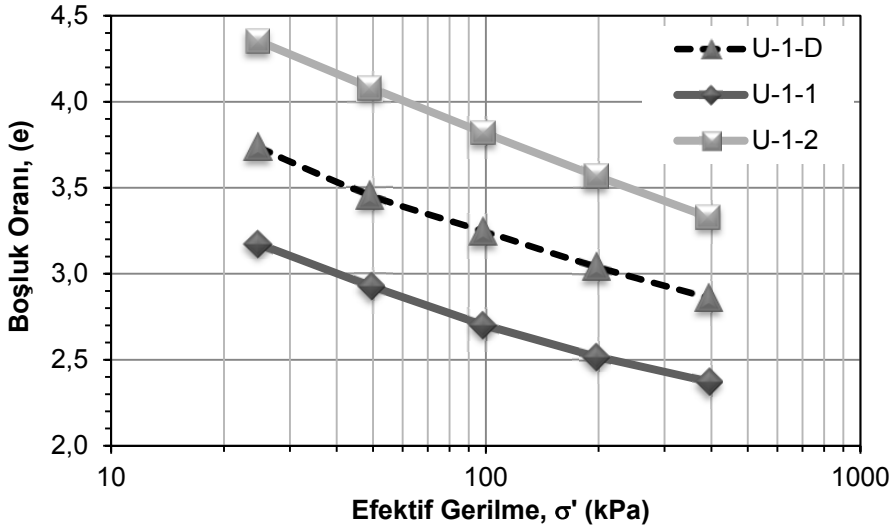
Sıkışabilirlik eğrileri karşılaştırıldığında E-1-2 numunesinin E-1 numunesine oranla çok daha az sıkışabilirlik gösterdiği görülmektedir. Organik atıklar içerdikleri büyük su içeriği nedeniyle etki eden gerilmeler karşısında büyük hacim ve şekil değişikliği yapabilirler. Orijinal yüzdelere sahip olan E-1-D ve organik atık yüzdesi azaltılmış E-1-2 numunesinin sıkışabilirlik özellikleri karşılaştırıldığında organik atığa sahip olan kompozisyonların çok daha büyük düşey deformasyonlar gerçekleştirilebileceği anlaşılmaktadır.

6.1.3.2 Kompozisyon etkisinin U-1 kompozisyonunun Sıkışabilirlik Özelliğine Etkisi:

Kompozisyon etkisinin U-1 kompozisyonunun sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla U-1 kompozisyonunda önemli bir yüzdeye ve baskın bir özelliğe sahip olduğu düşünülen plastik atığın (%12) kompozisyondan tamamen kaldırılmasıyla oluşturulan U-1-1 kompozisyonunun sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunenin deney başlangıç su içeriği değeri %85, deney sonu su içeriği değeri %66 olarak belirlenmiştir. U-1-1 kompozisyonun 98 - 196 kPa gerilme aralığı için hesaplanmış sıkışma indisi değeri 0,836 olarak belirlenmiştir. Tamamlanan sıkışabilirlik deneyi sonucunda U-1-1 numunesinde meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi ($\Sigma\Delta e=e_1 - e_{son}$) 1,025 olarak hesaplanmıştır. Plastik atığın orijinal U-1 kompozisyonundan kaldırılması deney numunesinde meydana gelen sıkışma miktarının artmasına neden olduğu belirlenmiştir (orijinal numuneye göre). Sıkışabilirlik deneylerinin hemen hemen tamamında meydana gelen durum U-1-1 numunesi içinde geçerliliğini korumuştur, küçük gerilme kademelerinde, büyük kademelere oranla daha büyük boşluk oranı değişiklikleri görülmüştür (Şekil 6.15). Örneğin; 49 – 98 kPa gerilme aralığı

için hesaplanan sıkışma indisi değeri 0,869 olarak hesaplanırken, 196 – 392 kPa gerilme aralığı için bu değer 0,794 olarak bulunmuştur (C_c= 0,869 > 0,836 > 0,794).

U-1 kompozisyonundan modifiye olarak oluşturulan bir diğer kompozisyon %9 oranındaki metal atığın kaldırılmasıyla oluşturulan U-1-2 numunesidir. Sıkıştırma deneyleri sonucunda U-1-2 kompozisyonunun sıkışma indisi (C_c) değeri 0,613 olarak belirlenmiştir. U-1-D kompozisyonu ile U-1-2 kompozisyonuna ait sıkışabilirlik katsayılarının yakın değerlere sahip olmasının yanı sıra sonuçlanan sıkışabilirlik deneyleri sonucunda meydana gelen toplam boşluk oranı değişimleri ($\Sigma\Delta e=e_1 - e_{son}$) de birbirine yakın değerler almıştır (U-1-2 0,804; U-1-D 0,875). Şekil 6.15 üç kompozisyona ait sıkışabilirlik deneyi sonuçlarını göstermektedir.



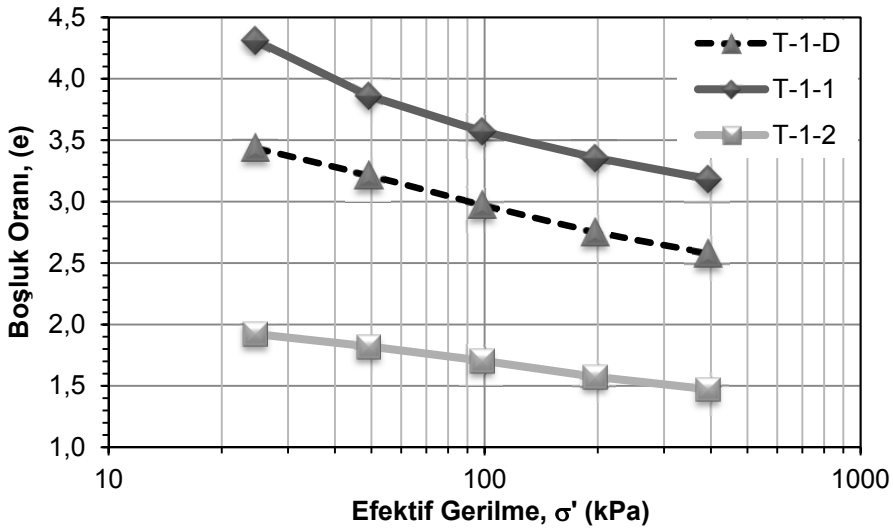
Şekil 6.15 U-1-D (orijinal) U-1-1 ve U-1-2 kompozisyonları sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Elde edilen bu sonuçlar ışığında U-1 orijinal kompozisyonundan çıkarılan metal atığın kompozisyonun sıkışabilirlik davranışı üzerinde çok etkili bir rolünün olmadığını göstermiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda U-1-D ile U-1-2 numunesi birbirine daha benzer yapıda bir sıkışma davranışı sergilemiş (C_c ve Δe), buna karşılık U-1-1 numunesi daha büyük C_c ve Δe değerlerine sahip olmuştur. Bu durumun oluşmasındaki en önemli nedenin ağırlık olarak hissedilir bir değere sahip olan metal atığın hacimsel olarak numune içerisinde çok küçük kaldığı ve bu nedenle sıkışma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olamadığı düşünülmektedir.

6.1.3.3 Kompozisyon etkisinin T-1 kompozisyonunun Sıkışabilirlik Özelliğine Etkisi:

T-1 kompozisyonu diğer kompozisyonlara oranla daha yüksek oranda organik atık (park-bahçe, mutfak atığı) ve kül atık ihtiva etmektedir. Temel T-1 kompozisyonundan üretilen iki modifiye kompozisyondan birincisi kül atığın tamamen kompozisyondan çıkarıldığı T-1-1 numunesidir. Kompozisyon içerisinde %15 oranında bulunan kül atık sentetik numunelerin üretiminde kullanılan en küçük dane boyutuna ve bazik özelliğe sahiptir. Modifiye T-1-1 kompozisyonunun gerçekleştirilen deney sonucunda sıkışma indisi değeri 98 - 196 kPa gerilme aralığı için 0,715 olarak hesap edilmiştir. Tamamlanan sıkışabilirlik deneyi sonucunda T-1-1 numunesinde meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi ($\Sigma\Delta e = e_1 - e_{son}$) 1,131 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.16). Elde edilen bu sonuçlar ışığında diğer atıklara oranla çok daha küçük dane boyutuna sahip olan kül atığın boşlukları doldurucu, boşluk oranı değerini düşürücü ve bağlayıcı etkisinin olmasına rağmen sıkışabilirlik özelliğine çok büyük bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilir.

T-1-2 kompozisyonu, T-1 kompozisyonu içerisindeki %45'lik organik atık miktarının %25 azaltılarak %20'lik değerine indirgendiği modifiye kompozisyondur. T-1 kompozisyonu içerisindeki azalan (%25 oranında) organik atık (park-bahçe- mutfak atığı) miktarının yerini kompozisyonun içerisinde yer alan kağıt-karton, kül, talaş, plastik, metal, cam ve tekstil atıkları almıştır. T-1-2 kompozisyonunun sıkışabilirlik deneyi sonucunda numunenin sıkışma indisi 98 - 196 kPa gerilme aralığı için 0,438 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.16). Bu değer T-1-D numunesinde daha önce 0,732 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.16 T-1-D (orijinal) T-1-1 ve T-1-2 kompozisyonları sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Yapılan sıkışabilirlik deneyi sonucunda T-1-D ve T-1-2 numunesinde meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi ($\Sigma\Delta e=e_1 - e_{son}$) sırasıyla 0,857 ve 0,450 olarak hesaplanmıştır.

T-1 kompozisyonu ile modifiye T-1-2 kompozisyonunun sıkışabilirlik deney sonuçları karşılaştırıldığında organik madde miktarı azaltılmış T-1-2 numunesinin toplam sıkışabilirlik miktarının, T-1 kompozisyonundan çok daha az olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, yüksek organik madde içeriğinin düşey yöndeki deformasyonları arttırıcı yönde bir etkisinin olduğunu göstermektedir.

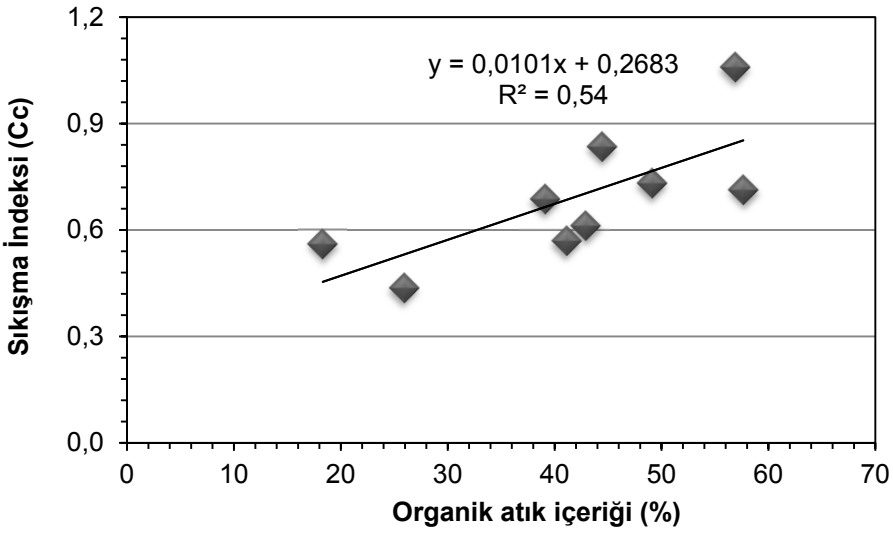
Tez kapsamında gerçekleştirilen tüm sıkışabilirlik deneyleri bir arada değerlendirildiğinde E-1 kompozisyonunun hem doygun (ıslak) hem de doğal su içeriğindeki (kuru) koşullar altında T-1 ve U-1 kompozisyonundan daha düşük sıkışma indisi değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum E-1 kompozisyonu içerisindeki yüksek kağıt-karton atığın sıkışmaya karşı sahip olduğu direnç kuvvetlerinin etkisiyle açıklanabilmektedir. Yıllanmış numunelerin sıkışma indeksleri incelendiğinde E-1-Y'nin T-1-Y numunesinden az da olsa daha düşük değer aldığı görülmektedir. Bu durum yıllanma etkisiyle direncini yitiren kağıt karton atığın yapısının bozunması ve düşey gerilmelere karşı koyamamasıyla açıklanabilmektedir. T-1 kompozisyonunun diğer kompozisyonlardan en büyük farkı %15 oranında bulundurduğu kül atıktır. Bazik karakteriyle kompozisyonun kimyasal özelliklerine, dane boyu karakteristiğiyle numunenin boşluk oranı ve hidrolik iletkenliği üzerinde önemli etkisi olan kül atığın sıkışma davranışı üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Doygun (ıslak) ve doğal su içeriğindeki (kuru) deney koşullarının temsil edildiği koşullarda sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve doygun durumda gerçekleştirilen tüm deneylerin doğal su içeriğindeki (kuru) duruma kıyasla daha düşük sıkışma indisi değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum kağıt, karton ve tekstil gibi göznekli yapıdaki atıkların suyu adsorbe etmesi sonucu haciminin artması ve bu artışın sıkışmaya karşı direnç oluşturduğunun bir kanıtı niteliğindedir. Aynı kompozisyonda ve aynı özelliklere sahip numunelerde gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneylerinde doygun durumdaki numunelerin düşey deformasyon miktarları kuru duruma kıyasla daha düşük kalmaktadır (Çizelge 6.1).

T-1-Y, E-1-Y ve U-1-Y yıllanmış numunelerinin T-1-D, E-1-D ve U-1-D numunelerine kıyasla çok daha büyük boşluk oranına, daha büyük sıkışma indisi değerine ve çok büyük düşey deformasyonlara sahip olduğu görülmüştür. Bu durum yıllanmış numunelerin sahip olduğu yüksek su içeriğine bağlı olarak açıklanabilir. Yüksek su içeriğine sahip numunelerin üzerine etkiyen gerilmeler numune içerisindeki suyun drenaj plakalarından numune hücresinin dışına çıkmasına neden olmaktadır. Numunelerin içerisinde drene olan büyük miktardaki su düşey yönde büyük deformasyonların oluşmasının ve büyük sıkışma indekslerinin temel sebebi

olmaktadır. Ayrıca zaman içerisinde dane boyutlarında meydana gelen küçülmeler de yıllanmış numunelerde meydana geln büyük deformasyonların bir başka önemli sebebidir.

Sıkışabilirlik deneyi üzerindeki kompozisyon etkisinin incelendiği çalışmalarda plastik atığın çıkarıldığı durumda sıkışabilirlik miktarının arttığı (U-1 & U-1-1), metal atık bertaraf edildiğinde sıkışabilirlik indeksinde çok büyük bir değişikliğin gözlenmediği (U-1 & U-1-2) belirlenmiştir. Kağıt atık oranının azaltıldığında düşey deformasyonların arttığı sıkışma indisinın büyüdüğü (E-1- % E-1-1), buna karşılık organik atık miktarı azaltıldığında sıkışabilirlik direncinin artarak sıkışma indisinin düştüğü (E-1 & E-1-2) gözlenmiştir. Kompozisyon etkisinin incelendiği T-1-kompozisyonunda kül atığın bertarafının sıkışabilirlik miktarını ve sıkışma indisini önemli ölçüde değiştirmediği (T-1 & T-1-1) buna karşılık organik atık oranındaki azalmanın sıkışma indisini, sıkışabilirlik miktarını azalttığı ve aynı zamanda E-1 & E-1-2 sıkışabilirlik deneyinde elde edilen sonuçlara benzer özellikte olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneylerinden elde edilen tüm sıkışma indisi değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Sentetik üç temel ve altı modifiye kompozisyon numunesi kullanılarak gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneyleri sonucunda elde edilen sıkışma indisi değerleri ile organik atık içeriği bağlı değişimi ilişkisi Şekil 6.17'de gösterilmektedir.



Şekil 6.17 Sıkışma indisi – organik atık içeriği ilişkisi

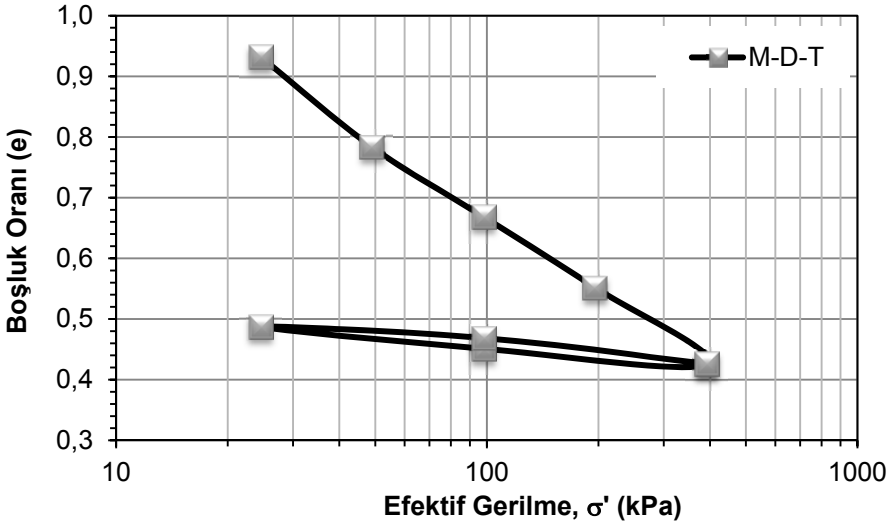
Şekil 6.17'den görüldüğü üzere sentetik taze KKA numunelerin organik atık yüzdeleri arttıkça sıkışma indisi değerleri de artmıştır. Organik atık deformasyonları arttırıcı yönde etki yapmaktadır.

6.2 Doğal Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

Manisa Büyükşehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze ve doğal yıllanmış KKA numuneler kullanılarak sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Doğal taze atıkların maksimum depolama süreleri 7 günle sınırlandırılırken, yıllanmış atıkların depolama süresi 5-10 yıl arasında değişmektedir. Kullanılan doğal atıklar maksimum dane boyutu sınırlamalarına uyulması açısından 50 mm kare gözlü eleklerden elenmişlerdir. Sonrasında beş katman halinde numune halkasına yerleştirilen numuneler Standart Proctor tokmağı kullanılarak her katmana 100 darbe vurularak sıkıştırılmıştır. Numuneler hazırlanıp yükleme başlığı yerleştirildikten sonra numunenin tam olarak dengeye gelebilmesi için 12,3 kPa gerilme 24 saat boyunca etki ettirilmiştir.

6.2.1 Doğal Taze Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

Manisa Büyükşehir Belediyesi atık depolama sahasından temin edilen numuneler kapalı poşetler içerisinde doğal su içeriğini kaybetmeden laboratuvara getirilmiştir. Sıkışabilirlik deneyleri için boyut sınırlamasının üzerinde kalan daneler elenerek ayıklanmıştır. Doğal taze KKA numunelerinin organik madde içeriği yapılan deneyler sonucunda %61 olarak belirlenmiştir. Bu değer sentetik taze T-1 kompozisyonunun organik madde içeriğine oldukça yakındır (OM_{T-1}=%65). Doğal taze KKA numuneler sıkışabilirlik deneylerine hazırlanırken doğal su içeriğinde hücrelere yerleştirilmiştir, herhangi bir su eklemesi yapılmamıştır. Doğal taze numunesin sıkışabilirlik deneyi başlangıç birim hacim ağırlık değeri 13,8 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Bu yüksek b.h.a. değerinin oluşmasındaki neden, yüksek su içeriği değeridir. Deney sonu su içeriği değeri %56 olarak belirlenmiş ve numunenin sıkışabilirlik deneyi süresince büyük su içeriği kaybına uğradığı görülmüştür. Şekil 6.18'de Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze numunelerle gerçekleştirilen büyük ölçekli sıkışma deneyinden elde edilen e - σ' ilişkisini göstermektedir.



Şekil 6.18 Manisa Doğal taze KKA numunesi sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Gerçekleştirilen büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri sonucunda doğal taze numunenin 98 – 196 kPa' gerilme aralığındaki sıkışma indisi değeri (C_c) 0,385 olarak belirlenmiştir. Numuneye uyuglanan normal gerilmeler sonunda numunede meydana gelen boşluk oranı değişimi Δe = 0,508 olarak elde edilmiştir.

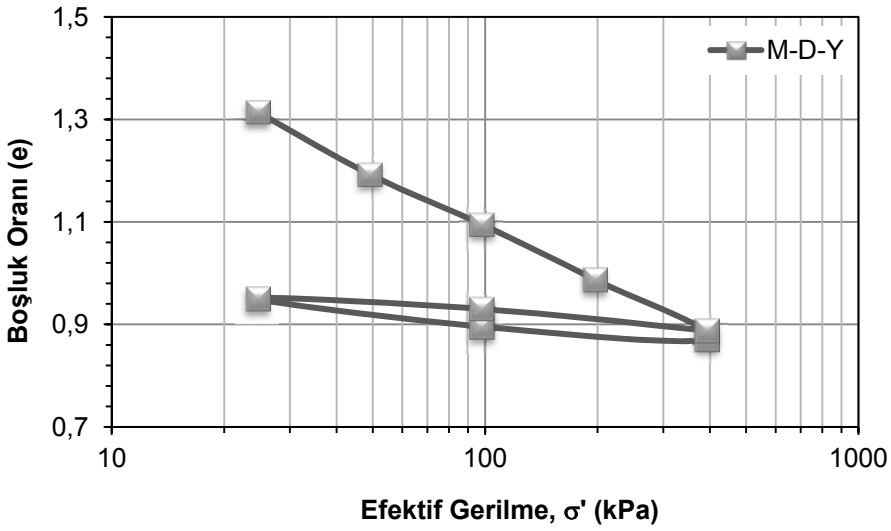
Doğal numunelerin sıkışabilirlik deneyleri maksimum normal gerilmeyle sonlandırılmamış, numunelerin şişme davranışları da incelenmiştir. Dengeleme gerilmesinin uygulanması tamamlandıktan sonra 24,5 kPa ile başlayan ve her kademede ikiye katlanarak 392 kPa'ya ulaşan normal gerilmeler uygulanmaktadır. Şişme davranışının belirlenmesi amacıyla normal gerilme değeri önce 98 kPa değerine sonrasında 24,5 kPa değerine düşürülmüştür. Son olarak numuneye tekrar yükleme işlemleri yapılmış ve normal gerilme önce 24,5 kPa'den 98 kPa değerine sonrasında 98 kPa'dan 392 kPa değerine yükseltilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, numunenin şişme miktarının çok küçük olduğu ve şişme olmayan özellikte olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak gerçekleştirilen yeniden yükleme işlemleri sonucunda oluşan yeni eğrinin ilk eğriyle aynı noktada kesiştiği gözlemlenmiştir.

6.2.2 Doğal Yıllanmış Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından temin edilen doğal yıllanmış KKA'ların büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Doğal yıllanmış KKA numuneler tüm sıkışabilirlik deneylerinde uygulanan numune hazırlama sürecinden geçirilerek sıkışabilirlik deneylerine hazırlanmıştır. Doğal yıllanmış KKA numunesinin şişme davranışının

incelenmesi amacıyla kademeli artan beş normal gerilmeden sonra normal gerilmeler adım adım azaltılmıştır. Şişme davranışı incelendikten sonra normal gerilmeler yine kademeli olarak arttırılmış ve yeniden yükleme eğrisi oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyi sonucunda yıllanmış doğal KKA numunesinin 98 – 196 kPa gerilme aralığındaki sıkışma indisi değeri 0,338 olarak hesaplanmıştır. Beş normal gerilme kademesi süresince numunede meydana gelen boşluk oranı değişimi Δe=0,438 olarak elde edilmiştir. Yıllanmış doğal numunenin şişme miktarı taze doğal numuneye benzer şekilde oldukça küçük bir değer almıştır. Yine taze doğal numuneye benzer şekilde yeniden yükleme eğrisi eski eğrinin bitiş noktasına çok yakın bir noktadan geçmektedir (Şekil 6.19).



Şekil 6.19 Manisa Doğal yıllanmış KKA numunesi sıkışabilirlik deneyi e - σ' grafiği

Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan taze ve yıllanmış doğal KKA numuneleri ile yapılan büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri sonucunda yıllanmış doğal atık numunesine ait sıkışma indisi değerinin taze numuneye kıyasla daha düşük değer aldığı belirlenmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasında taze numunenin yüksek sıkışabilme özelliğine sahip organik atık bakımından zengin olması önemli rol oynamıştır. Yıllanmış numunede organik madde miktarı azalmış, düşey gerilmelere daha fazla direnç gösterebilecek atık malzemelerin kompozisyon içerisindeki oranı artmıştır.

Çizelge 6.1 bu bölüm kapsamında ele alınan 17 farklı özellikteki KKA numunesinin sıkışabilirlik deneyleri sonucunda elde edilen sıkışma indisi değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.1 Gerçekleştirilen büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri ve sıkışma indisi değerleri

Deney no	Kompozisyon	Sıkışma indisi (C_c)
1	E-1-I	0,476
2	U-1-I	0,598
3	T-1-I	0,499
4	U-1-D	0,687
5	E-1-D	0,571
6	T-1-D	0,732
7	E-1-1	1,058
8	T-1-1	0,715
9	U-1-1	0,836
10	U-1-2	0,613
11	E-1-2	0,561
12	T-1-2	0,438
13	U-1-Y	1,072
14	E-1-Y	0,883
15	T-1-Y	0,870
16	Manisa taze	0,385
17	Manisa yıllanmış	0,338

Sowers (1973) KKA'ların sıkışma indisini başlangıç boşluk oranı ve organik madde içeriğine bağlı olarak ifade etmiştir. Düşük organik madde içeriğine sahip KKA'larda $0,15e_0$ yüksek organik madde içeriğinde ise $0,55e_0$ dolaylarında değer aldığını belirtmiştir. Bir başka değişle yüksek miktarda organik atık daha yüksek sıkışabilirliğe neden olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde; örneğin E-1-D numunesinin başlangıç boşluk oranı 3,70'tir. Bu değer Sowers'ın önerdiği 0,15 katsayısı ile çarpıldığında sıkışma indisi (C_c) 0,56 bulunmaktadır ve bu sonuç büyük ölçekli sıkışabilirlik deneylerinden elde edilen C_c=0,57 değerine neredeyse eşit değer almıştır.

Gabr ve Valero (1995) ise yıllanmış numuneler (15-30 yıl) ile yaptıkları sıkışabilirlik deneyleri sonucunda başlangıç boşluk oranları 1 ile 3 arasında değişiklik gösteren KKA numuneleri için sıkışma indisi değerlerinin 0,4 ile 0,9 arasında değer aldığını belirlemişlerdir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sıkışabilirlik deneylerinde sıkışma indisi değerleri 0,34 ile 1,06 arasında kalarak belirtilen değer aralığına paralellik göstermiştir.

Yapılan deneyler sonucunda düşey gerilmelere karşı en büyük direnci gösteren ve en düşük sıkışma indisi değerlerine sahip olan numunelerin doğal KKA numuneler olduğu belirlenmiştir. Doğal atıklar her ne kadar kompozisyon açısından T-1 kompozisyonuna benzese de dane boyu dağılımındaki farklılık sıkışma davranışında belirleyici olmuştur. Doğal atık numunelerin yapıları sentetik numunelere kıyasla daha iri daneli atıklardan oluşmaktadır. Bu iri daneler düşey gerilmelere karşı daha fazla direnç göstererek, doğal numunelerin sıkışma indisinin sentetik numunelere kıyasla daha düşük değer almasını sağlamıştır.

Aynı kompozisyonlarda doğal su içeriğinde ve doygun durumdaki sentetik KKA numunelerin büyük ölçekli sıkışabilirlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve doygun durumdaki numunelerin doğal su içeriğindeki numunelerden daha düşük sıkışma indisi değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. KKA kompozisyonları içerisinde kağıt, karton, tekstil, talaş gibi gözenekli yapıya sahip malzemeler bulundurmaktadır. Doygun durumda gerçekleştirilen deneylerde atık malzemeler içerisindeki gözenekler suyla dolmaktadır ve bu durum hem hacimsel bir artışa hem de sıkışmaya karşı ekstra bir kuvvet oluşmasına neden olmuştur.

Kompozisyonun sıkışma davranışı üzerindeki etkisi üç farklı sentetik KKA kompozisyonu oluşturularak incelenmiştir. E-1 kompozisyonunun sıkışma indekslerinin doğal su içeriğinde de doygun durumda da T-1 ve U-1 kompozisyonlarından daha düşük değer aldığı belirlenmiştir. E-1 kompozisyonu, sıkışma gerilmelerine karşı direnç gösteren kağıt-karton atık yüzdesince diğer kompozisyonlardan daha zengindir. Bu durum E-1 kompozisyonundaki numunelerin daha düşük sıkışma indisi değerlerine sahip olmasına neden olmuştur.

Kentsel katı atık numunelerinin büyük ölçekli sıkışma deneylerinde zamana bağlı deformasyon saati okumaları da kayıt edilmiştir. Bu veriler Ek.III'de verilmiştir.

7. KENTSEL KATI ATIKLARIN KAYMA MUKAVEMETİ ÖZELLİKLERİ

Günümüzde insan yaşamının kaçınılmaz bir ürünü olan atıkların güvenli şekilde depolanıp insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek şekilde muhafaza edilmesi gerekmektedir. Depolama sahalarının tasarımının yüksek verimli ve güvenilir olarak inşaa edilebilmesi için KKA'ların temel mühendislik özelliklerinin en iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Kayma mukavemeti parametreleri de KKA depolama sahalarında belirlenmesi gereken en önemli mühendislik özelliklerden birisidir.

Tez çalışmasının bu bölümünde sentetik ve doğal KKA numunelerinin kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesi amacıyla büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamındaki büyük ölçekli direk kesme deneyleri kullanılan numune özelliklerine göre iki gruba ayrılmaktadır. Birinci grupta laboratuvar ortamında belirlenmiş kompozisyon ve özelliklerde üretilen sentetik KKA numuneler kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirlenmiş kompozisyonlarda ve farklı mühendislik özelliklerinde üretilen sentetik KKA numuneler kendi içerisinde taze (günlük olarak üretilip deneye tabi tutulmuş) ve yıllanmış (dış ortam koşullarında 12 ay bekletilmiş) olarak ikiye ayrılmaktadır. İkinci grupta Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından temin edilen doğal KKA numuneler kullanılarak yapılan büyük ölçekli direk kesme deneyleri bulunmaktadır.

7.1 Sentetik Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti

Sentetik olarak hazırlanan KKA numunelerinin büyük ölçekli direk kesme deneyleri iki alt bölüme ayrılmıştır. Sentetik taze (günlük) numunelerin büyük ölçekli direk kesme deneyleri malzeme üretiminin yapıldığı gün gerçekleştirilirken, yıllanmış numunelerin 12 ay dış ortam koşullarında bekletildikten sonra direk kesme deneyleri yapılmıştır.

7.1.1 Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda bir çok parametrenin KKA'ların kayma mukavemeti özelliklerini etkileyebildiği belirlenmiştir. Bu amaçla farklı parametrelerin KKA'ların kayma mukavemeti özellikleri üzerindeki etkisi bu çalışmada incelenmiştir. Üç farklı kompozisyondaki (E-1, T-1 ve U-1) sentetik taze KKA'ların kayma mukavemeti özelliklerinin incelenmesinde ilk olarak doygun ve doğal durumdaki numunelerin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yeraltı su seviyesinin altında kalan ya da çok büyük miktarda yağmur alan bölgelerde KKA'lar doygun duruma gelebilmektedir. Bu durumun laboratuvar ortamında temsil edilebilmesi için direk

kesme kutusunun dış haznesi su ile doldurularak numune doygun durumdayken deneyler gerçekleştirilmiştir. Yeraltı su seviyesinin üzerinde kalan doğal su içeriğindeki KKA'ların kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenebilmesi için dış haznede suyun bulunmadığı durumda optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerin deneyleri yapılmıştır. KKA'ların kayma mukavemeti içerisinde bulundurdukları malzemeler ile direk bağlantılıdır. Bu amaçla kompozisyonda büyük yüzdeye ya da baskın karaktere sahip olan malzemelerin kompozisyon içerisindeki yüzdeleri azaltılarak veya tamamen çıkartılarak yeni modifiye kompozisyonlar oluşturulup (E-1-1, E-1-2, U-1-1, U-1-2, T-1-1 ve T-1-2) büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilerek kayma mukavemeti özelliklerine kompozisyon etkisi incelenmiştir.

Sentetik taze KKA'ların kayma mukavemeti parametrelerine dane boyutunun etkisi de belirlenmiştir. Üç temel kompozisyon içerisindeki en büyük yüzdelere sahip olan kağıt-karton ve mutfak atıklarının boyutları büyütülerek farklı granülometri özelliklerinde sentetik KKA numuneleri üretilmiştir. Daha büyük dane boyutlarında üretilmiş yeni numunelerin büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve kayma mukavemeti parametreleri üzerinde dane boyunun etkisi belirlenmiştir.

7.1.1.1 Su İçeriğinin Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemetine Etkisi

Laboratuvar ortamında sentetik olarak üretilen taze KKA numunelerinin doğal su içeriği değerleri yapılan deneylerde daha önce belirlenmişti (E-1=%44, T-1=%62 ve U-1=%40). KKA numunelerinin su içeriği değerinin atıkların mühendislik davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir. Depolama sahasına getirilen ilk anda doygun olmayan atıkların kayma mukavemetlerinin incelenmesi için laboratuvar ortamında hazırlanan sentetik numuneler doğal su içeriği değerleriyle kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş ve dış hücre boşken (kuru durum) deneyler yapılmıştır. İkinci kısımda ise numuneler kompaksiyon deneyinde belirlenen su içeriği değerlerinde (optimum su içeriği) hazırlanmış ve kesme kutusu dış hücresi su ile doldurularak (doygun durum) deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede atıkların sahip oldukları doygunluk durumunun kayma mukavemeti ve parametreleri üzerindeki etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

7.1.1.1.1 Su İçeriğinin E-1 Kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi

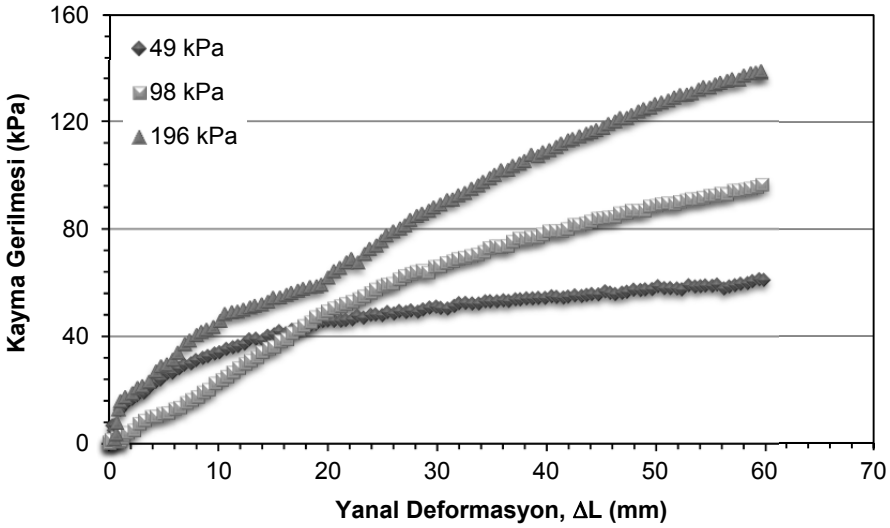
Dört Avrupa ülkesinin (Almanya, Finlandiya, İtalya ve Fransa) atık kompozisyonlarının ortalaması olan E-1 kompozisyonunun %70'lik kısmını kağıt-karton ve organik maddeler (park-bahçe ve mutfak atığı) oluşturmaktadır (Şekil 7.1).

Şekil 7.1 Optimum su içeriğinde kesme kutusuna yerleştirilmiş E-1 numunesi

Doğal su içeriğindeki E-1 numunesi (E-1-D)'nin su içeriği değeri %44 olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen Modifiye Proctor deneyleri sonucunda sentetik taze E-1 numunesinin optimum su içeriği değeri ise %108 olarak belirlenmiştir. E-1 numunesi taze olarak hazırlanmış (w=%44) daha sonra optimum su içeriğine ulaşması için gerekli olan su miktarı hesaplanarak kompozisyona eklenmiş ve numune tam homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Optimum su içeriğindeki numuneler kesme kutusu içerisine direk kesme deneyleri için standartlaştırılmış sıkıştırma aşamalarıyla (beş katman halinde her bir katmana 100 Standart Proctor darbesi) yerleştirilmiş ve deney başlangıç birim hacim ağırlık değeri deney başında yaklaşık 9,0 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır.

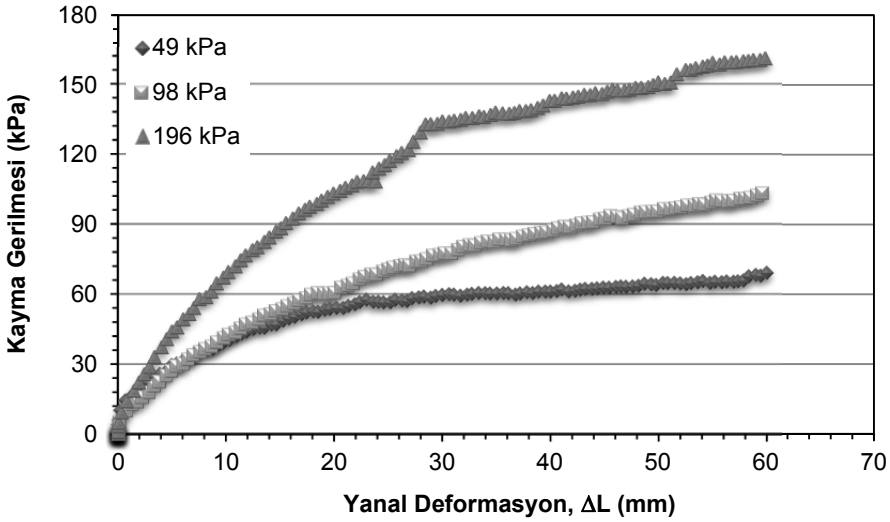
Optimum su içeriğinde hazırlanan E-1-D numunesi üzerinde üç farklı normal gerilme değeri ile (49 kPa – 98 kPa – 196 kPa), 3 mm/dakikalık kesme hızında direk kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney süresince dış haznede su bulundurulmamıştır. Böylece deney optimum su içeriğindeki KKA numunenin, yeraltı su seviyesinin üzerinde bulunduğu durumu temsil etmiştir. Direk kesme deneyinin kayma gerilmesi (τ) – yanal deformasyon (ε) davranışının gösterildiği Şekil 7.2'den görüldüğü üzere üç normal gerilme değeri içinde net bir maksimum (pik değer) kayma gerilmesi değerine ulaşılmamış yanal deformasyon artışına paralel olarak kayma gerilmeleri artış göstermiştir. Kayma gerilmeleri değerlerinde herhangi bir pik değer gözlenemediğinden deneyler yanal deformasyon sınırlamalı gerçekleştirilerek, yanal deformasyon %20 (60 mm) değerine ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Pik kayma mukavemetinin görülmediği benzer davranış Mazzucato ve diğ. (1999)'nin İtalya'nın Verona

şehrinde bulunan atık depolama sahasında yaptıkları büyük ölçekli direk kesme deneylerinde de görülmüştür. Deneylerde yeniden oluşturulan (reconstituted) ve örselenmemiş (undisturbed) numunelerin kayma mukavemeti değerleri arasında önemli bir fark olmadığı fakat iki numune arasında göze çarpan en önemli farkın örselenmemiş malzemenin pik noktaya ulaşıp yenildikten sonra kayma mukavemetinin düşüşe geçmesi buna karşılık yeniden oluşturulan numunede böyle bir pik noktanın oluşmaması olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar tezde görülen kayma gerilmeleri davranışına paralellik göstermektedir.



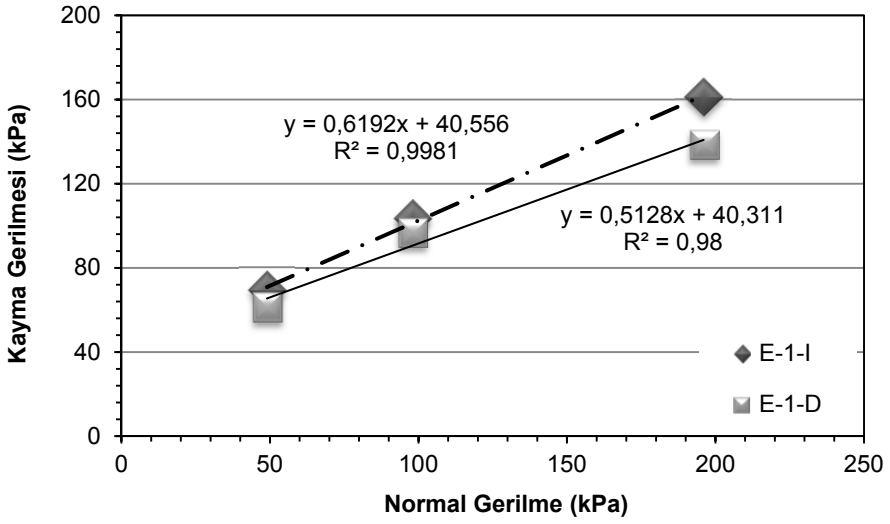
Şekil 7.2 Optimum su içeriğindeki E-1-D numunesi τ – ΔL ilişkisi

E-1-D numunesiyle aynı şekilde deneye hazırlanan E-1-I numunesi optimum su içeriğinde (w=%108) hazırlanmıştır. Numune yerleştirildikten sonra dış hazne su ile doldurularak numunenin tamamının su altında kalması sağlanarak yeraltı su seviyesinin altında kalan atıkların doygun haldeki durumu incelenmeye çalışılmıştır. Büyük ölçekli direk kesme deneyi üç farklı normal gerilme değeri ile (49 – 98 – 196 kPa), 3 mm/dakikalık kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi (τ) – yanal deformasyon (ε) ilişkisi Şekil 7.3'de gösterilmektedir.



Şekil 7.3 Optimum su içeriğindeki E-1-I numunesi τ – ΔL ilişkisi

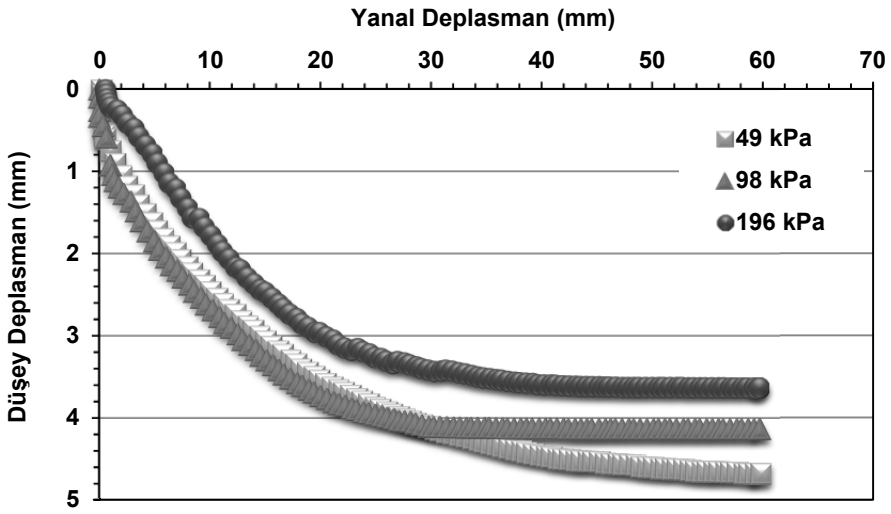
Şekil 7.3'den de açık bir şekilde görüleceği üzere E-1-I numunesi içinde pik bir kayma gerilmesi değerinden bahsetmek söz konusu değildir. E-1-D ve E-1-I numuneleri için üç farklı normal gerilme değerine karşılık gelen maksimum kayma gerilmesi değerleri Şekil 7.4'de görülmektedir. Sentetik taze E-1-D numunesinin deney (dış hücre boş-kuru durum) sonucunda efektif içsel sürtünme açısı 27,1°, efektif kohezyon değeri 40,3 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 7.4). Optimum su içeriğinde hazırlanmış ve direk kesme kutusu dış hücresi su ile dolu şekilde deneye tabi tutulmuş E-1-I numunesinin ise efektif içsel sürtünme açısı değeri 31,8°, efektif kohezyon değeri 40,6 kPa olarak belirlenmiştir.



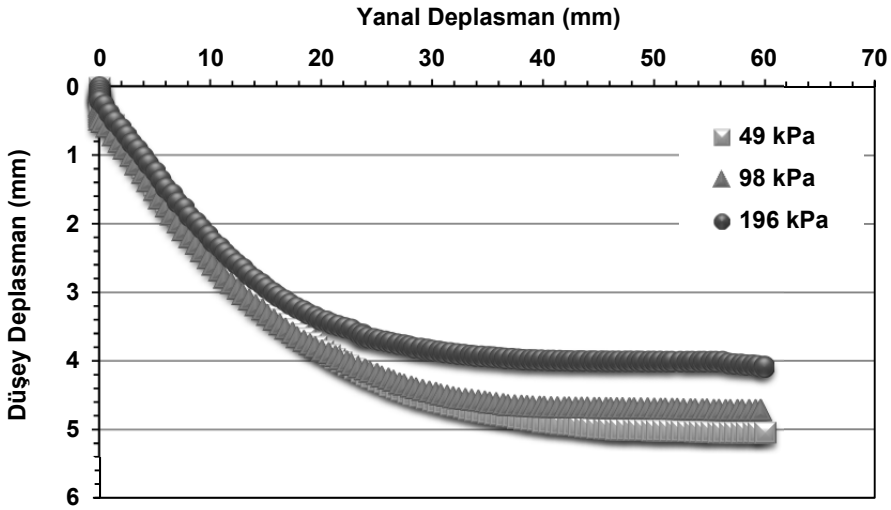
Şekil 7.4 E-1-D ve E-1-I numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Gerçekleştirilen deneylerde su içeriğinin (doygun ve kuru durum) E-1 kompozisyonunun mukavemet parametreleri üzerindeki etkisi incelendiğinde optimum su içeriğindeki doygun E-1-I numunesinin, optimum su içeriğinde hazırlanmış ve kuru durumda deneyi gerçekleştirilmiş E-1-D numunesine kıyasla daha büyük bir efektif içsel sürtünme açısına sahip olduğu görülmektedir (32° > 27°). Kağıt-karton atıklar yapraksı yapıda kompozisyon içerisinde bulunmaktadırlar, doygun durumda su altında kalan bu yapraklar şişerek birbirine yapışarak bir arada daha kuvvetli bir doku oluşturmaktadırlar, bu durum da kayma dayanımını arttırıcı bir etki yapmaktadır. İki kompozisyonun kayma dayanımı değerleri hakkında dikkat çekilmesi gereken bir diğer önemli nokta da aynı normal gerilme değerlerinde (196 kPa), doygun ortamda deneyi yapılmış E-1-I numunesinin kuru ortamda deneyi gerçekleştirilmiş E-1-D numunesine kıyasla çok daha büyük kayma gerilmesi değerine sahip olmasıdır (161 kPa > 139 kPa). İki numunenin efektif kohezyon değerleri ise hemen hemen birbirine eşit değer almıştır.

E-1-D ve E-1-I numunelerinin direk kesme deneylerinden elde edilen düşey – yatay deplasman ilişkilerini gösteren grafikler Şekil 7.5 ve 7.6'da görülmektedir.



Şekil 7.5 E-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

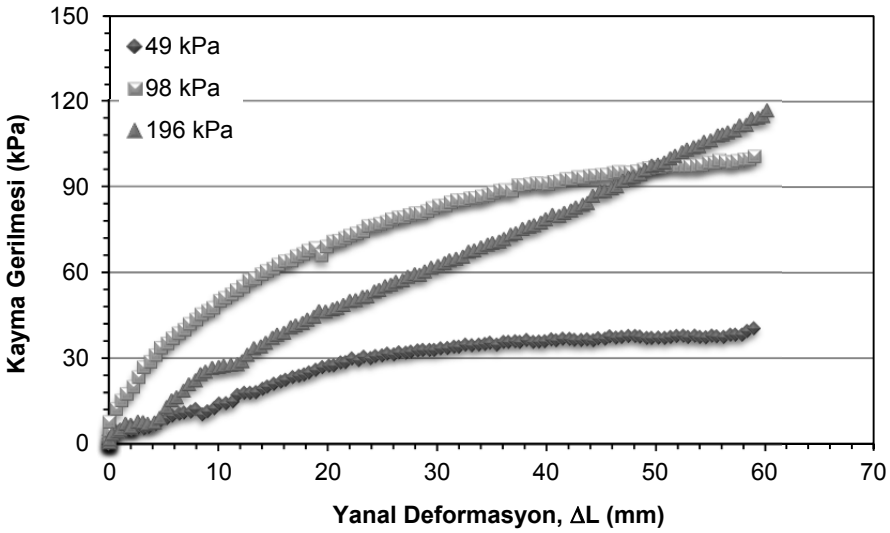


Şekil 7.6 E-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

Şekil 7.5 ve 7.6'dan görüldüğü üzere doygun (ıslak) ve optimum su içeriğindeki numunelerde kayma sırasında oturma davranışları gözlemlenmektedir. Genel olarak kayma sırasında düşey deplasman miktarının 3 - 5 mm arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

7.1.1.1.2 Su İçeriğinin U-1 Kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi

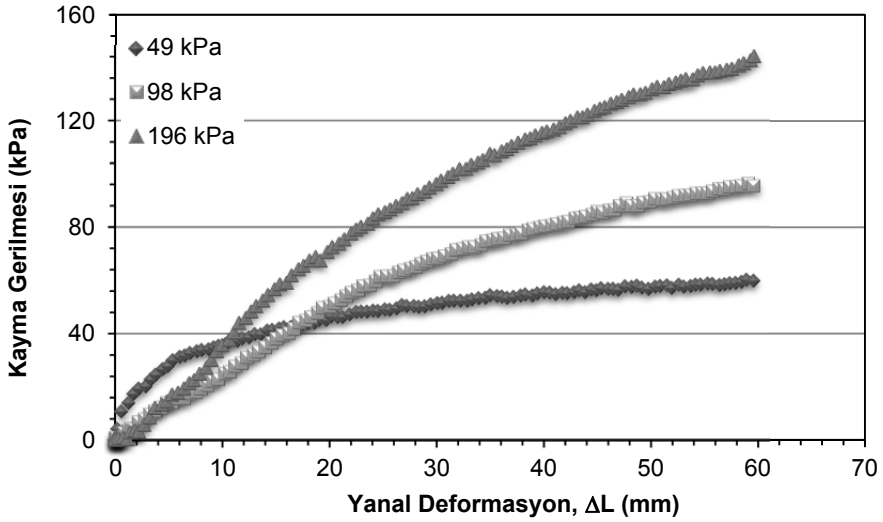
Amerika Birleşik Devletleri'ne ait temsili KKA numunesi olan U-1 kompozisyonunun doğal su içeriği değeri %40 olarak belirlenmiştir. U-1 numunesinin doğal su içeriği değerinin diğer iki kompozisyon numunesine kıyasla (E-1=%44 ve T-1=%62) daha düşük olmasının nedeni içerdiği metal ve plastik atık gibi su adsorbe etme kapasitesi olmayan malzemelerin yüzdesinin fazla olmasıdır. Optimum su içeriğinde (%104) hazırlanan U-1-D numunesinin her bir katmana Standart Proctor tokmağı ile 100 vuruş yapılarak beş katman halinde kesme kutusu içerisine yerleştirildikten sonra deney başlangıç birim hacim değeri $\cong$ 9,50 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Direk kesme deneyi sonucunda elde edilen kayma gerilmesi – yanal deformasyon davranışı Şekil 7.7'de görülmektedir.



Şekil 7.7 Optimum su içeriğindeki U-1-D numunesi τ – ΔL ilişkisi

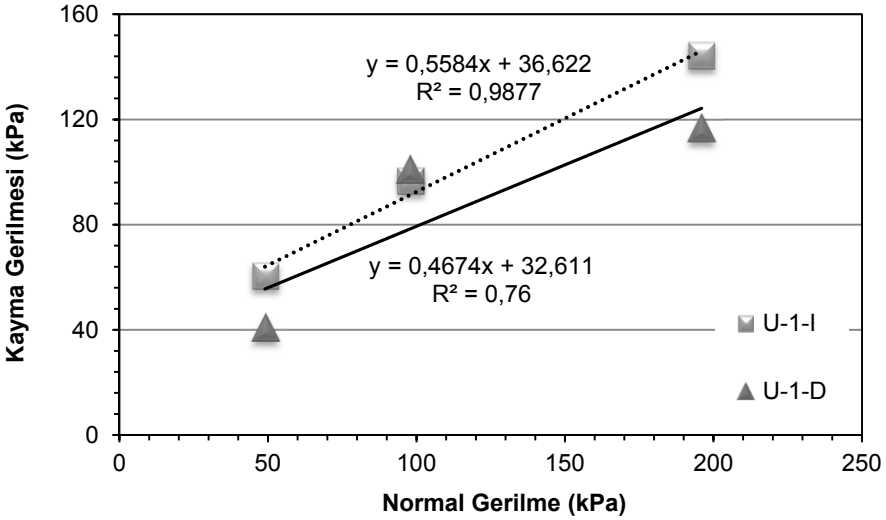
Şekil 7.7'den görüldüğü üzere üç gerilme değeri içinde net bir maksimum (pik değer) kayma gerilmesi değerine ulaşılamamış yanal deformasyon artışına paralel olarak kayma gerilmeleri artış göstermiştir. Sonuç olarak büyük ölçekli direk kesme deneyi %20'lik yanal deformasyonda (60 mm) sonlandırılmıştır (Towhata ve diğ., 2004; Oweiss, 1993; Gabr ve Valero, 1995; Stark ve diğ., 2009).

Optimum su içeriğinde hazırlanan U-1-I numunesi standartlaştırılmış sıkıştırma adımları uygulanarak kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş ve deney başlangıcındaki birim hacim ağırlık değeri $\cong$ 10,00 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. U-1-I numunesi üzerinde kesme kutusu dış hücresi su ile dolu (doygun) şekilde direk kesme deneyi üç farklı normal gerilme değeri (49 – 98 – 196 kPa) altında, 3 mm/dakikalık kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi – yanal deformasyon ilişkisi Şekil 7.8 'de gösterilmektedir.



Şekil 7.8 Optimum su içeriğindeki U-1-I numunesi τ – ΔL ilişkisi

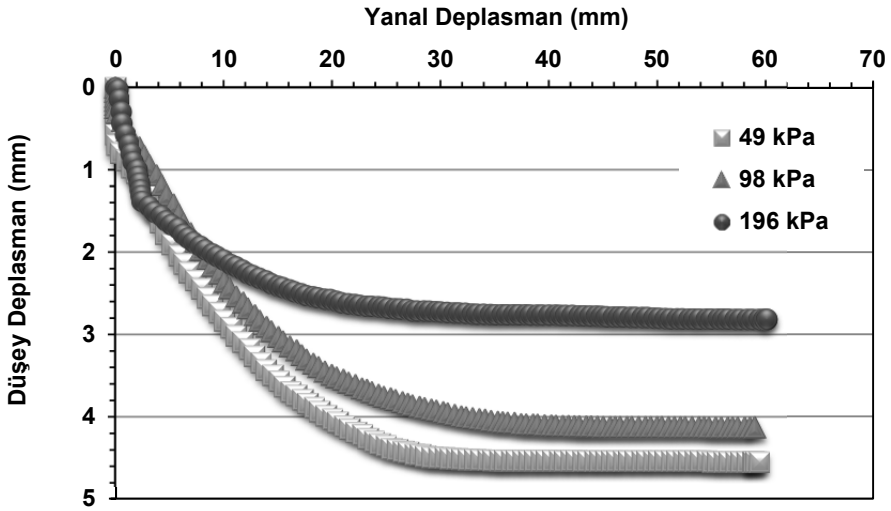
Şekil 7.9'da U-1-D ve U-1-I numunelerine ait kayma zarfları birarada gösterilmektedir. Maksimum kayma mukavemeti değerlerinden geçirilen doğrunun korelasyon katsayısı değerinin diğer deneylere kıyasla biraz daha küçük (R^2=0,76) kalmasının nedeni 98 kPa'lık normal gerilmedeki kayma gerilmesi değeriyle 196 kPa'lık normal gerilmeye karşılık gelen kayma gerilmesi değerinin birbirine yakın değerler almış olmasıdır (101 kPa ve 117 kPa). Gerçekleştirilen büyük ölçekli kesme kutusu deneyi sonucunda U-1-D numunesinin efektif içsel sürtünmesi 25,1° ve efektif kohezyon değeri 32,6 kPa olarak belirlenmiştir. U-1-I numunesine ait efektif içsel sürtünme açısı 29,2°, efektif kohezyon değeri ise 36,6 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.9 U-1-D ve U-1-I numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

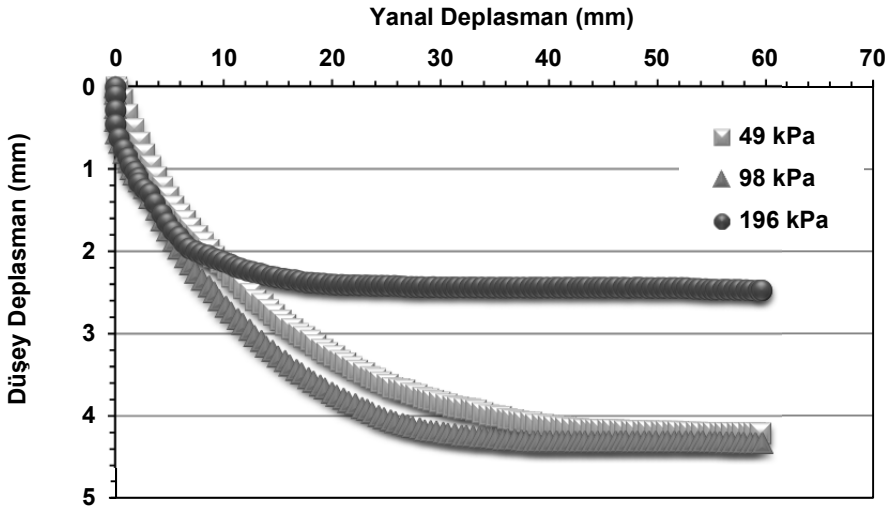
Doygunluk durumunun (optimum su içeriğinde ve doygun) U-1 numunesinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan büyük ölçekli kesme kutusu deneylerinde, optimum su içeriğinde hazırlanan U-1-I numunesinin hem efektif içsel sürtünme açısının hem de kohezyon değerinin doğal su içeriğinde hazırlanan U-1-D numunesinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu farklılığın en temel nedeni yapraksı ince yapıya sahip kağıt karton atıkların suyla temas ettiğinde birbirine yapışarak daha dirençli bir doku oluşturmalarıdır. Deneyler sonucunda elde edilen bu davranış E-1 numunesinde elde edilen davranışa benzerdir.

Şekil 7.10 ve 7.11'de U-1-D ve U-1-I numunelerinin yatay-düşey deplasman ilişkileri görülmektedir.



Şekil 7.10 U-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

Büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda 49 kPa'lık normal gerilme değerinde 4,5 mm'lik düşey deplasman gözlenirken, 196 kPa'lık normal gerilmede bu değer 2,8 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.11 U-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

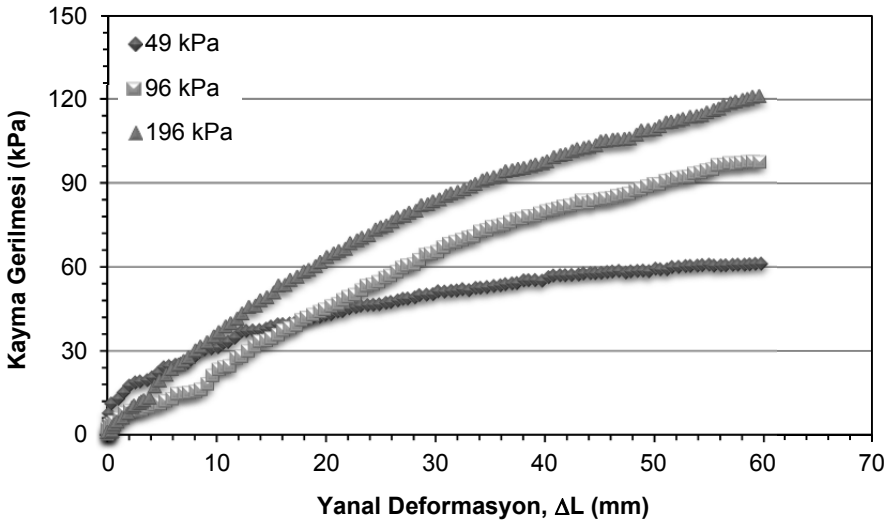
Şekil 7.11'den görüldüğü üzere U-1-I numunesinde 49 kPa'lık normal gerilme altında 2,4 mm'lik düşey deplasman meydana gelirken, 196 kPa'lık normal gerilmedeki düşey deformasyon miktarı 4,3 mm olarak belirlenmiştir.

7.1.1.1.3 Su İçeriğinin T-1 Kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi

Çevre ve Orman Bakanlığı'nın 2006 yılında yayınlamış olduğu katı atık ana planı projesi, Türkiye İstatistik Kurumu verileri ve birçok akademik çalışmadan yararlanılarak oluşturulan temsili Türkiye KKA numunesi T-1 kompozisyonu diğer iki kompozisyona kıyasla (E-1 ve U-1) çok daha yüksek organik atık yüzdesine sahiptir (%45). T-1 kompozisyonunda yer alan bir diğer baskın malzeme bazik özelliği bulunan kül atıktır. Bu iki atık malzeme kompozisyonun %60'lık bölümünü oluşturmaktadır. Organik madde miktarının yüksek olması T-1 kompozisyonunun doğal su içeriği değerinin de (%62) diğer kompozisyonlara oranla daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu kompozisyonun Modifiye Proctor deneyleri sonucunda optimum su içeriği değeri %73 olarak belirlenmiştir. Kompozisyon yüzde değerleri olarak aynı ancak deney sırasındaki doygunluk durumu farklılık gösteren iki numune ile direk kesme deneyleri yapılmış ve doygunluğun kayma mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

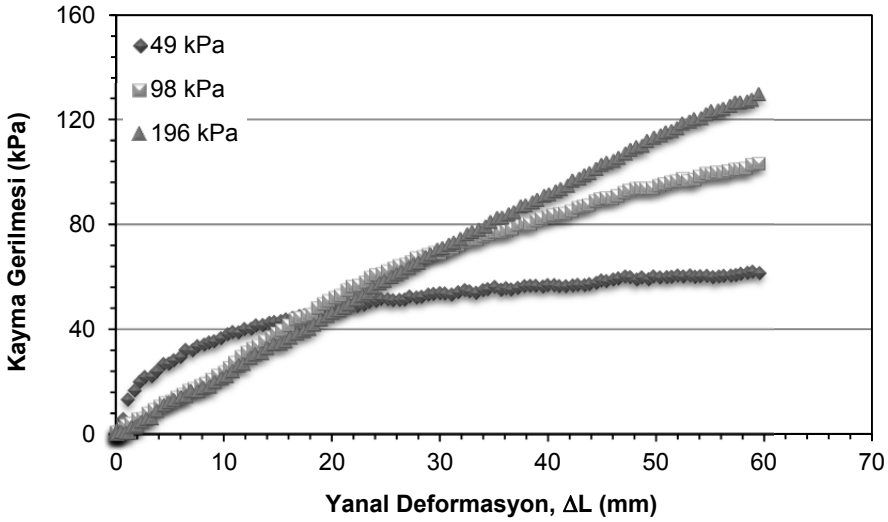
Doğal su içeriğinde (%62) laboratuvar ortamında sentetik olarak üretilen T-1-D numunesine optimum su içeriğine (%73) gelmesi için gerekli olan su miktarı eklenmiştir. Gerekli su kompozisyona eklendikten sonra karışım suyun homojen şekilde dağılıması için karıştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda T-1-D numunesinin deney başı başlangıç

birim hacim ağırlığı 10,5 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan T-1-D numunesi 3 mm/dakikalık kesme hızı ile kuru yani deney dış haznesinin içinde suyun olmadığı durumda direk kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deney süresince meydana gelen yanal deformasyonlar ve karşılık gelen kayma gerilmeleri Şekil 7.12'de görülmektedir. E-1 ve U-1 numunelerine benzer şekilde T-1-D numunesinde de maksimum kayma gerilmesi değeri görülmemiş, yanal deformasyon arttıkça kayma gerilmesi değeri de artış göstermiştir.



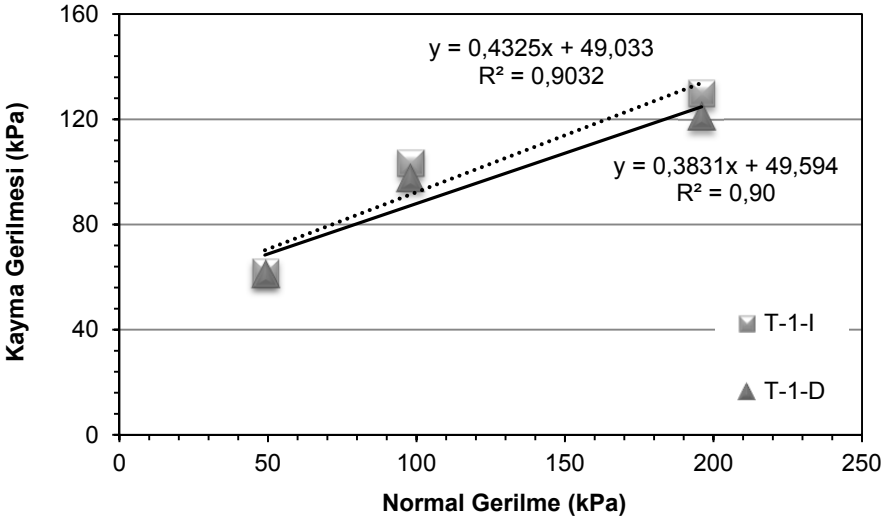
Şekil 7.12 Optimum su içeriğindeki T-1-D numunesi τ – ΔL ilişkisi

Optimum su içeriğinde (%73) ve 9,5 kN/m^3'lük birim hacim ağırlığı değerinde hazırlanan T-1-I numunesinin kayma gerilmesi yanal deformasyon ilişkisi Şekil 7.13'de görülmektedir. Şekil 7.13'den görüleceği üzere 49 ve 98 kPa'lık normal gerilmelerde gerilme artışları devam ederken, 196 kPa'lık normal gerilmede sabit bir kayma gerilmesi gözlenebilmiştir.



Şekil 7.13 Optimum su içeriğindeki T-1-I numunesi τ – ΔL ilişkisi

Üç farklı normal gerilme değeri için maksimum kayma gerilme değerleri ile karşılık gelen normal gerilme değerleri T-1-D ve T-1-I numuneleri için Şekil 7.14'te görülmektedir. Gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda T-1-D numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 20,9°, efektif kohezyon değeri 49,6 kPa olarak belirlenmiştir. T-1-I numunesinin ise efektif içsel sürtünme açısı 23,4°, efektif kohezyon değeri 49 kPa olarak belirlenmiştir.

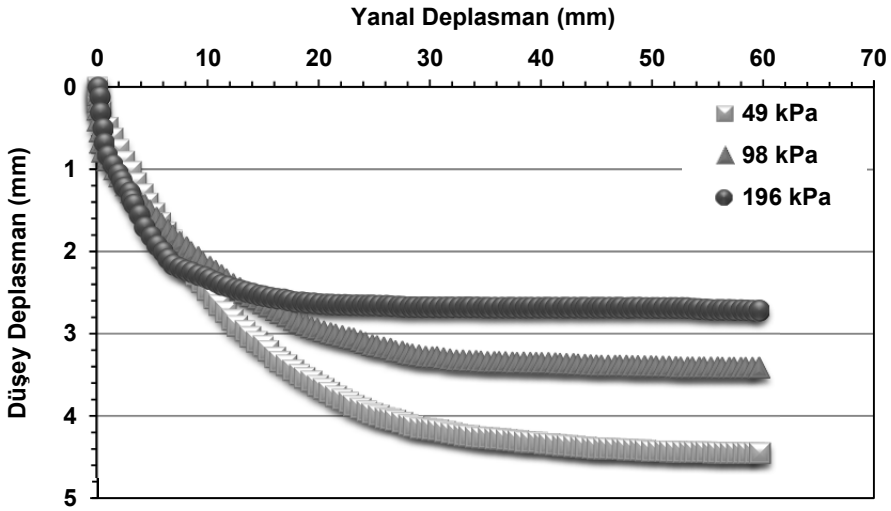


Şekil 7.14 T-1-D ve T-1-I numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

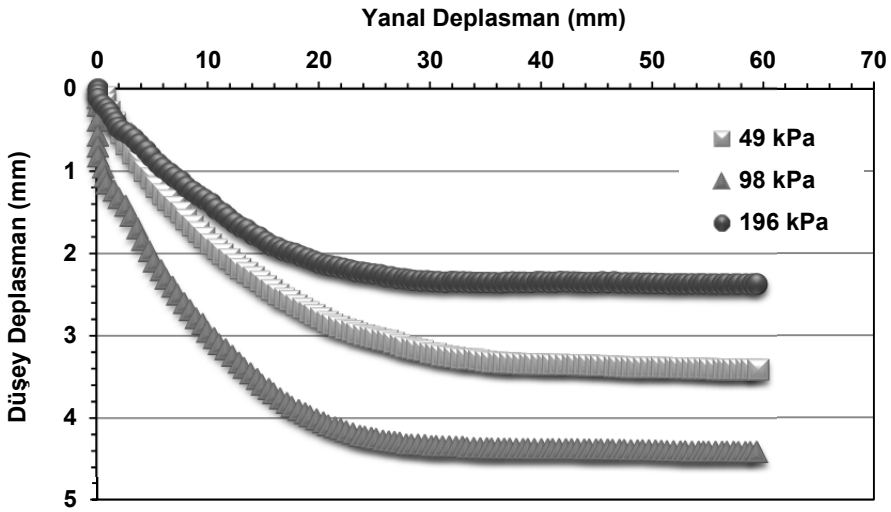
Optimum su içeriğinde sentetik taze olarak hazırlanan T-1 numunesinin iki farklı doygunluk durumunda büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yeraltı su seviyesinin

altındaki durumun temsil edildiği T-1-I numunesine ait içsel sürtünme derecesi değerinin T-1-D numunesine ait değerden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Aynı numunelerin iki farklı deney koşulu altında içsel sürtünme değerleri farklılık gösterirken, kohezyon değerlerinin hemen hemen birbirine eşit olduğu belirlenmiştir.

Büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda T-1-D ve T-1-I numuneleri için elde edilmiş yatay-düşey deplasman ilişkileri Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da görülmektedir.



Şekil 7.15 T-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



Şekil 7.16 T-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'dan görüldüğü üzere genel olarak kayma sırasında oturma davranışı üç farklı normal gerilme değeri içinde gözlemlenmiştir. T-1-D ve T-1-I numuneleri için düşey deformasyonlar kayma sırasında 2,4 ile 4,4 mm arasında değer almıştır.

Üç farklı kompozisyon ve iki farklı deney koşulu (optimum su içeriği (kuru) ve doygun (ıslak)) altında, altı farklı sentetik taze deney numunesiyle gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 7.1'de özetlenmiştir. Üç farklı kompozisyonun doygun durumdaki numunelerinin içsel sürtünme açılarının optimum su içeriğindeki (kuru) numunelerden %12-17 oranında daha yüksek değer aldığı belirlenmiştir. Üç kompozisyonun doygun ve kuru ortamda gerçekleştirilen deneylerindeki kohezyon değerlerinin birbirine oldukça yakın değer aldığı belirlenmiştir. Kompozisyonlar içerisinde kayma mukavemeti değerleri incelendiğinde en büyük içsel sürtünme açılarının hem doygun (E-1-I) durum için hem de doğal su içeriğindeki (E-1-D, kuru) durum için E-1 kompozisyonuna ait olduğu belirlenmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasındaki en önemli nedenin E-1 kompozisyonun içerdiği yüksek orandaki kağıt-karton atık olduğu düşünülmektedir. Kağıt-karto atık lifli yapıları sayesinde kayma anında çekme mukavemetleri sayesinde kaymaya karşı direnç göstermektedirler (Kölsch, 1996). İçsel sürtünme açısında ikinci en büyük değer U-1 kompozisyonuna aitken, iki su içeriği koşulunda da en düşük içsel sürtünme açıları T-1 kompozisyonuna aittir. Üç kompozisyonun doygun ve kuru koşullar altındaki kohezyon değerleri incelendiğinde en yüksek değerin T-1 kompozisyonuna ve daha sonra sırasıyla E-1 ve U-1 kompozisyonuna ait olduğu görülmektedir. T-1 kompozisyonunun kuru ve doygun durumda en yüksek kohezyon değerine sahip olmasının nedeninin içerdiği yüksek organik atıktan kaynaklanmaktadır. Organik atık bakımından en yüksek ikinci orana sahip E-1 kompozisyonu kohezyon değerinde de ikinci sırada yerini almıştır. Buna karşılık diğer iki kompozisyona kıyasla daha yüksek inorganik özellikli atık bulunduran U-1 kompozisyonu en düşük kohezyon değerine sahiptir (Çizelge 7.1). Kohezyon ince daneli zeminlerde daneler arasındaki kimyasal ve fiziksel bağ kuvvetlerinden meydana gelirken, kentsel katı atıklarda ise kohezyon zeminlerden farklı şekilde numuneyi meydana getiren bileşenlerin birbirine kenetlenmesi (interlocking) etkisinden meydana gelmektedir (Langer, 2005). Literatürde bu parametre kapilarite kuvvetlerinin neden olduğu zahiri kohezyon şeklinde de tanımlanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, kenetlenme etkisinin yanında organik madde içeriğinin de kohezyon değeri üzerinde etkisi olduğu görülmektedir. Kompozisyon içerisinde artan organik madde içeriği elde edilen kohezyon değerinin de artmasına neden olmaktadır.

Çizelge 7.1 Sentetik taze KKA numunelerin direk kesme deney sonuçları

Numune	Kayma Mukavemeti Parametreleri	
	İçsel Sürtünme Açısı, Ø (°)	Kohezyon, (kPa)
E-1-D	27,1	40,3
E-1-I	31,8	40,6
U-1-D	25,1	32,6
U-1-I	29,2	36,6
T-1-D	20,9	49,6
T-1-I	23,4	49

7.1.1.2 Kompozisyonun Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemetine Etkisi

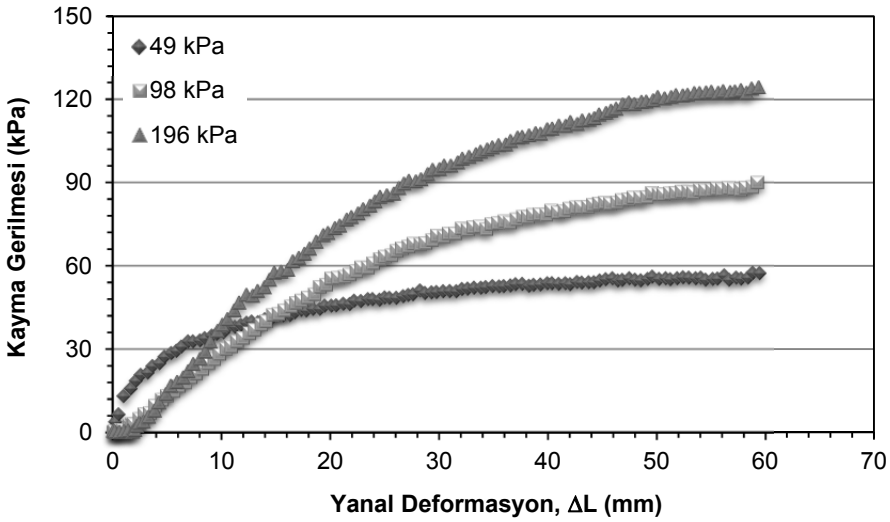
Kompozisyon KKA'ların mühendislik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu bölümde kompozisyon etkisinin KKA numunelerinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kompozisyon içerisinde baskın yüzdeye sahip bazı bileşenlerin yüzdeleri azaltılarak ya da tamamen kompozisyon içerisinden çıkartılarak oluşan yeni altı adet modifiye kompozisyon (E-1-1, E-1-2, T-1-1, T-1-2, U-1-1 ve U-1-2) ile temel kompozisyonun kayma mukavemeti davranışları karşılaştırılmıştır.

7.1.1.2.1 Kompozisyonun E-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi

Okuma – yazma oranının en yüksek olduğu Finlandiya, sanayi alanında gelişmiş Almanya, turizm ve yüksek nüfus özellikleriyle İtalya ve Fransa'ya ait KKA oranlarının ortalaması alınarak E-1 kompozisyonu oluşturulmuştur. E-1 kompozisyonu içerisinde %35 yüzdeye sahip olan kağıt-karton atıkların oranı %25 azaltılıp %10 oranına indirgenerek yeni modifiye E-1-1 numunesi oluşturularak kayma mukavemetinde meydana gelen değişiklikler araştırılmıştır.

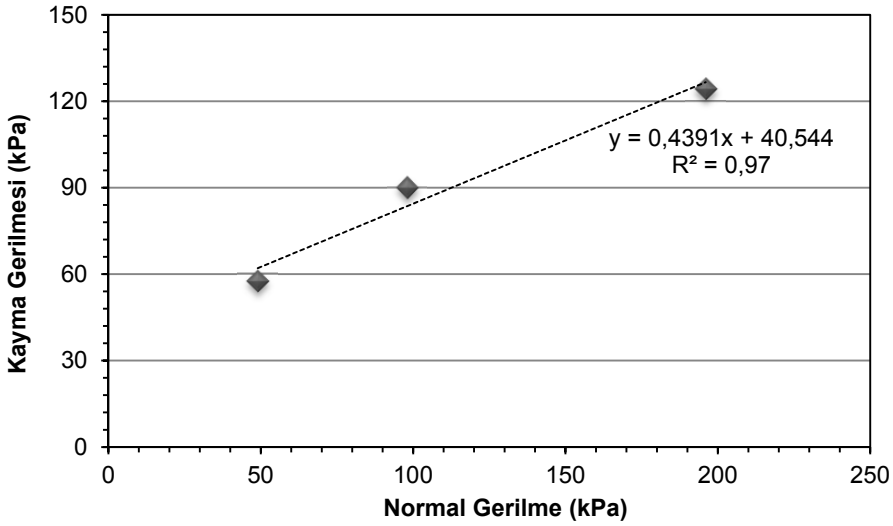
Laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan E-1-1 modifiye KKA numunesinin doğal su içeriği %72 olarak belirlenmiştir. E-1-1 kompozisyonuna ait Modifiye Proctor deneyleri sonunda optimum su içeriğinin %73 olduğu daha önce yapılan deneylerde belirlenmiştir. Direk kesme deneylerinde kullanılacak modifiye kompozisyon numuneleri optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Bu amaçla doğal su içeriğinde hazırlanan numunenin optimum su içeriğine ulaşması için gerekli olan su miktarı hesaplanarak numune içerisine eklenmiş ve numunenin eklenen suyun homojen olarak emilinin gerçekleşmesi için numune dikkatli şekilde karıştırılmıştır. Optimum su içeriğinde hazırlanmış numune direk kesme deneyleri için

standartlaştırılmış sıkıştırma prosedürüne uygun olarak her bir tabakaya Standart Proctor tokmağı ile 100 darbe vurularak beş eşit tabakada sıkıştırması yapılmıştır. E-1-1 numunesi başlangıç birim hacim ağırlık değeri 8,3 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. E-1-1 numunesi için gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerine ait kayma gerilmesi – yanal deformasyon ilişkisi Şekil 7.17'de gösterilmektedir. Şekil 7.17'den görüldüğü üzere E-1-1 kompozisyonunda hazırlanan direk kesme numunesinin kayma gerilmesine ait maksimum bir değer bulunmamaktadır. Yanal deformasyonun artışına paralel olarak kayma gerilmesi değeri de artış göstermiştir.



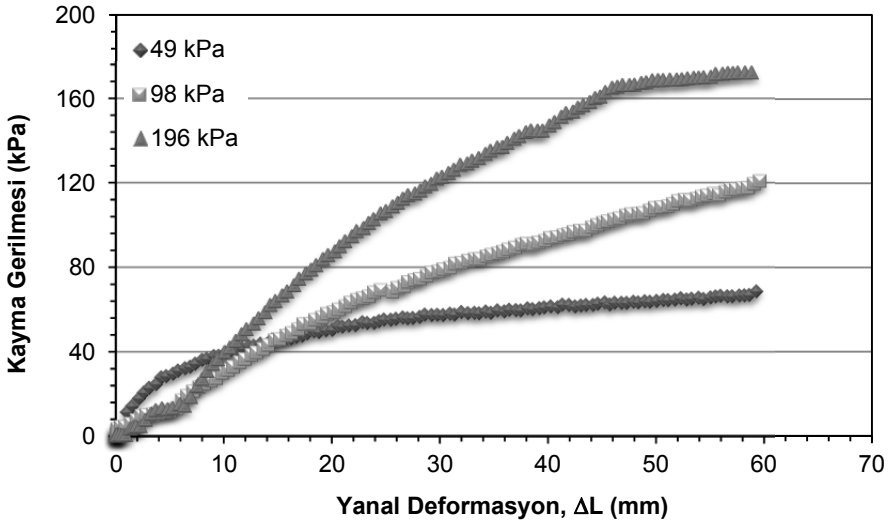
Şekil 7.17 Modifiye E-1-1 numunesi τ – ΔL ilişkisi

Direk kesme deneylerinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri ve bu değerlere karşılık gelen normal gerilme değerleri bir araya getirilerek Mohr-Coulomb kayma zarfları oluşturulmuştur. E-1-1 numunesi için gerçekleştirilen direk kesme deneyinin üç farklı normal gerilme altındaki deneyinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerlerinin uyum içerisinde olduğu kayma zarfı doğrusunun yüksek korelasyon katsayısı değeri tarafından da doğrulanmaktadır (R^2=0,97). Şekil 7.18'den görüldüğü üzere alan düzeltmesi yapılmamış değerlerden elde edilen kayma zarfından efektif içsel sürtünme açısı 23,7°, efektif kohezyon değeri 40,5 kPa olarak elde edilmiştir.



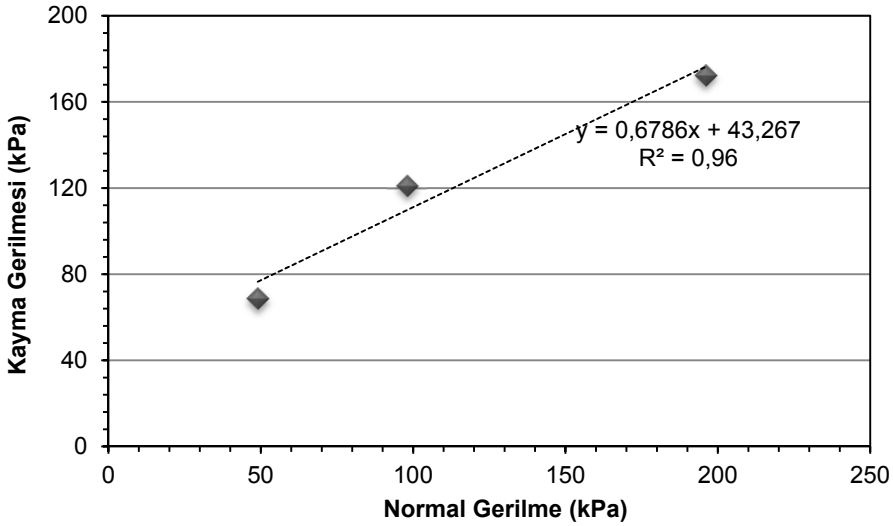
Şekil 7.18 E-1-1 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisİ

E-1 kompozsiyonu içerisindeki organik atıklar yüzde olarak, kağıt-karton atık yüzdesi ile eşit değere sahiptir. Organik maddeler yüksek su içerikleri, diğer atıklara oranla çok daha kısa sürede ayrışabilmeleri, yüksek sıkışabilme potansiyelleri ile KKA'ların davranışlarını önemli ölçüde etkileyebilirler (Landva ve Clark, 1990; Dixon ve Langer, 2006). Organik maddelerin E-1 kompozisyonun kayma mukavemetini ne şekilde etkilediğini incelemek amacıyla %35 oranındaki organik atıklar %25 azaltılarak, %10 değerinde organik atık ihtiva eden yeni modifiye E-1-2 kompozisyonu oluşturulmuştur. Organik atıklar kompozisyonun başlangıçta sahip olduğu doğal su içeriği değerinin çok büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Orijinal E-1 kompozisyonunun doğal su içeriği %45 iken organik atık yüzdesinin %25 düşürülmesi ile oluşturulan yeni modifiye E-1-2 kompozisyonunun doğal su içeriği %12 değerine gerilemiştir. E-1-2 kompozisyonundaki numuneler kullanılarak gerçekleştirilen Modifiye Proctor deneylerinden kompozisyonun optimum su içeriği değeri %55, maksimum kuru b.h.a. değeri 5,7 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. E-1-2 numunesinin optimum su içeriğine ulaşması için %43 oranında çeşme suyu eklenerek, numune homemjen bir şekilde karıştırılmıştır. E-1-2 numunesinin sıkıştırma işleminden sonra başlangıç b.h.a. değeri 8,0 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Direk kesme deneyi sonucunda kaydedilen yanal deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşılık gelen kayma gerilmeleri Şekil 7.19'da görülmektedir.



Şekil 7.19 Modifiye E-1-2 numunesi τ – ΔL ilişkisi

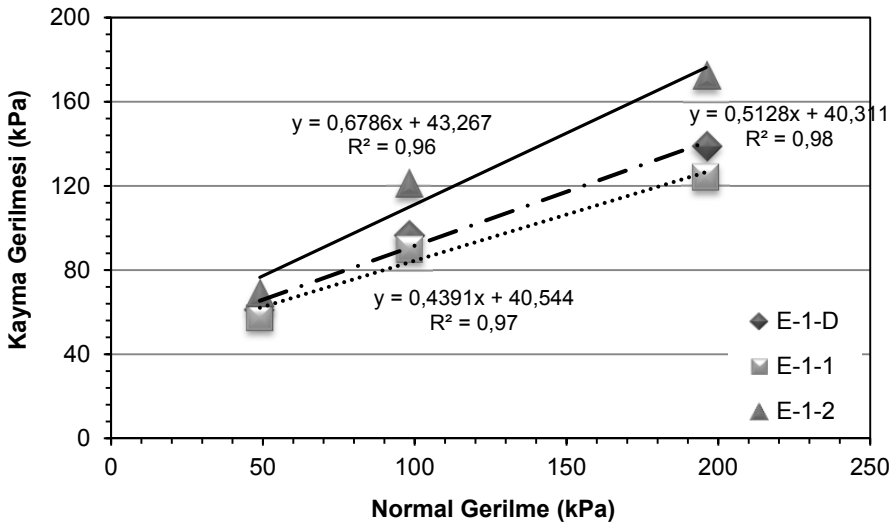
Kayma gerilmesi değerlerine karşılık gelen normal gerilme değerleri ile oluşturulan Mohr-Coulomb kayma zarfı Şekil 7.20'de görülmektedir.



Şekil 7.20 E-1-2 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Şekil 7.20'den görüldüğü üzere alan düzeltmesi yapılmamış kayma zarfına ait efektif içsel sürtünme açısı 34,2°, efektif kohezyon değeri 43,3 kPa olarak elde edilmiştir. Temel E-1-D kompozisyonuna ait kayma zarfı, modifiye E-1-1 ve E-1-2 kompozisyonlarına ait kayma zarfları birarada Şekil 7.21'de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Gerçekleştirilen direk kesme deneyleri sonucunda, organik madde miktarının %35'ten %10'a düşürüldüğü E-1-2 numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 34,2°, efektif kohezyon değeri 43,3 kPa olarak elde

edilirken, temel E-1-D kompozisyonunun efektif içsel sürtünme açısı 27,1°, efektif kohezyon değeri 40,3 kPa olarak belirlenmiştir. Kağı-karton atık oranının %35'ten %10'a düşürüldüğü E-1-1 kompozisyonuna ait efektif içsel sürtünme açısı 23,7°, efektif kohezyon değeri 40,5 kPa olarak elde edilmiştir.



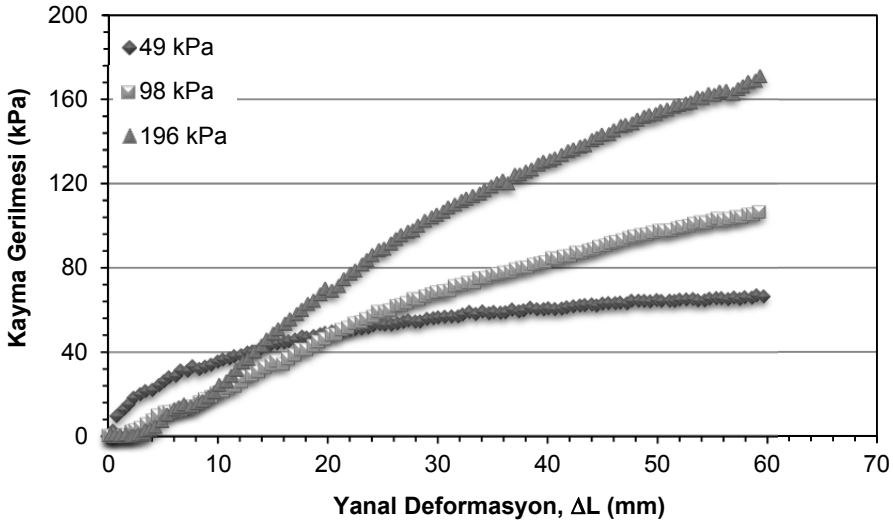
Şekil 7.21 Kompozisyon etkisinin E-1 numunesinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi

Bu sonuçlara göre, organik atık miktarının kompozisyon içerisindeki yüzdesinin azalması ile kayma mukavemeti parametrelerinin orijinal kompozisyon değerlerine oranla daha yüksek değerler aldığı görülmektedir ($\varnothing_{E\text{-}1\text{-}2} > \varnothing_{E\text{-}1\text{-}D}$). Buna karşılık lifli yapısı ile kayma mukavemeti direncini arttırıcı etki yapan kağıt-karton atık yüzdesi azaltıldığında kayma mukavemeti parametrelerinde orijinal kompozisyona kıyasla düşüş yaşandığı görülmektedir ($\varnothing_{E\text{-}1\text{-}D} > \varnothing_{E\text{-}1\text{-}1}$). Literatürde de bu çalışmada elde edilen sonuçlara paralel olarak kağıt-karton atık gibi lifli materyallerin içsel sürtünme açısını doğru orantılı şekilde etkilediği rapor edilmiştir (Kölsch, 1995; Bray ve diğ., 2009; Bray ve diğ., 2013).

7.1.1.2.2 Kompozisyonun U-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi

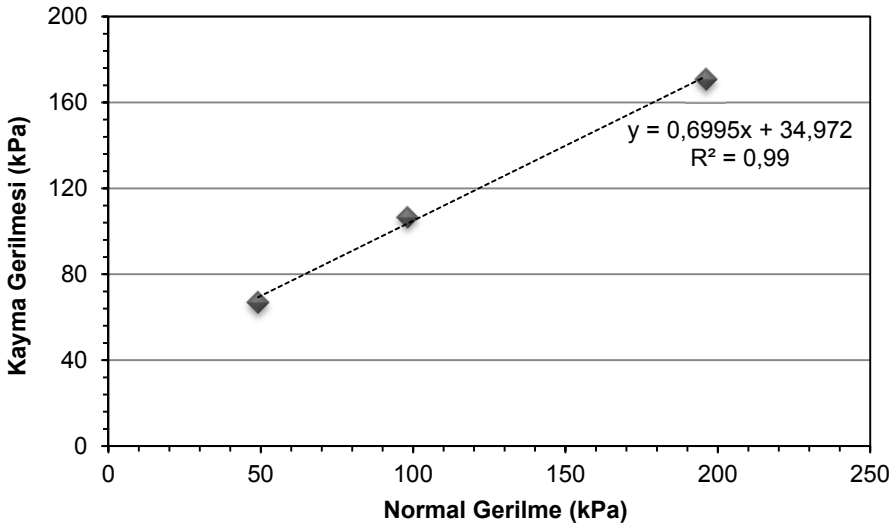
Amerika Birleşik Devletleri KKA kompozisyonunu temsil eden U-1 kompozisyonunda gelişmiş sanayinin doğal bir sonucu olarak diğer kompozisyonlara oranla daha yüksek miktarda plastik (%12) ve metal (%9) atık bulunmaktadır. Laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan U-1 numunesinin doğal su içeriği %40, organik madde miktarı %58 olarak daha önce belirlenmiştir. U-1 kompozisyonu kullanılarak gerçekleştirilen Modifiye Proctor deneylerinde

optimum su içeriği değeri %104, bu değere karşılık gelen maksimum kuru b.h.a. değeri 4,83 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Plastik atıklar diğer atık malzemelere oranla ağırlığına oranla büyük hacim kaplayan, büyük boşluklu yapıda, ayrışma süreleri organik maddelere oranla uzun, sıkışabilirliği yüksek özelliklere sahiptir. Plastik atık etkisinin kayma mukavemeti üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla U-1 kompozisyonu içerisindeki %12'lik plastik atık tamamı kompozisyondan çıkartılmış ve oluşturulan yeni modifiye kompozisyona U-1-1 adı verilmiştir. U-1-1 kompozisyonunun doğal su içeriği %47, optimum su içeriği değeri %83 olarak belirlenmiştir. Numunenin optimum su içeriğine ulaşması için gerekli su miktarı hesaplanarak U-1-1 numunesinin içerisine eklenmiştir. Suyun numune içerisinde homojen emiliminin sağlanması amacıyla numuneye yeterli süre karıştırma işlemi uygulanmıştır. U-1-1 numunesi beş katmanın herbirine 100 standart Proctor darbesi etki ettirilecek şekilde sıkıştırma işlemine tabii tutulmuştur. Sıkıştırma işlemi sonucunda U-1-1 numunesinin direk kesme deneyi başlangıç birim hacim ağırlık değeri 8,5 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Direk kesme deneyi sonucu elde edilen verilere ait yanal defromasyon – kayma gerilmesi ilişkisi Şekil 7.22'de gösterilmektedir.



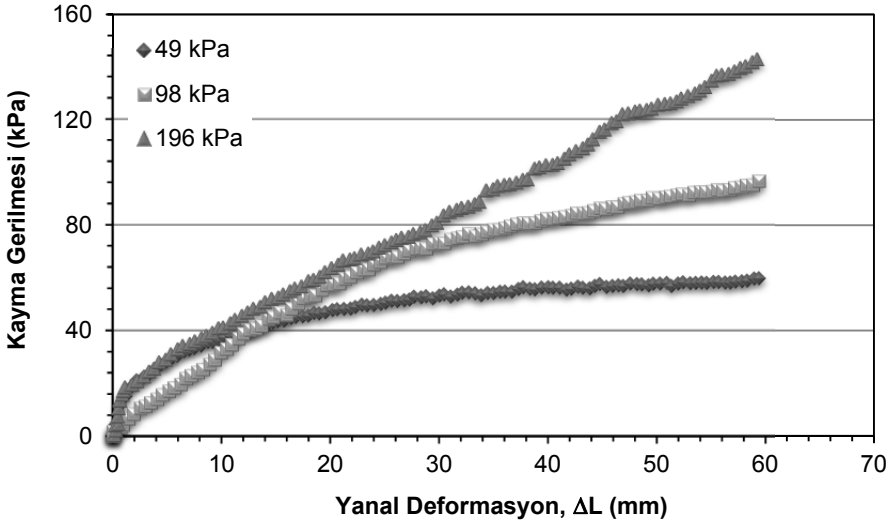
Şekil 7.22 Modifiye U-1-1 numunesi τ – ΔL ilişkisi

Şekil 7.22'den görüldüğü üzere U-1-1 numunesinin belirgin bir maksimum kayma gerilmesi değeri bulunmamaktadır. Şekil 7.23'de ise U-1-1 numunesi için kayma yüzeyi alan düzeltmesi yapılmamış kayma zarfı gösterilmektedir. U-1-1 numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 35°, efektif kohezyon değeri ise 35 kPa olarak belirlenmiştir.



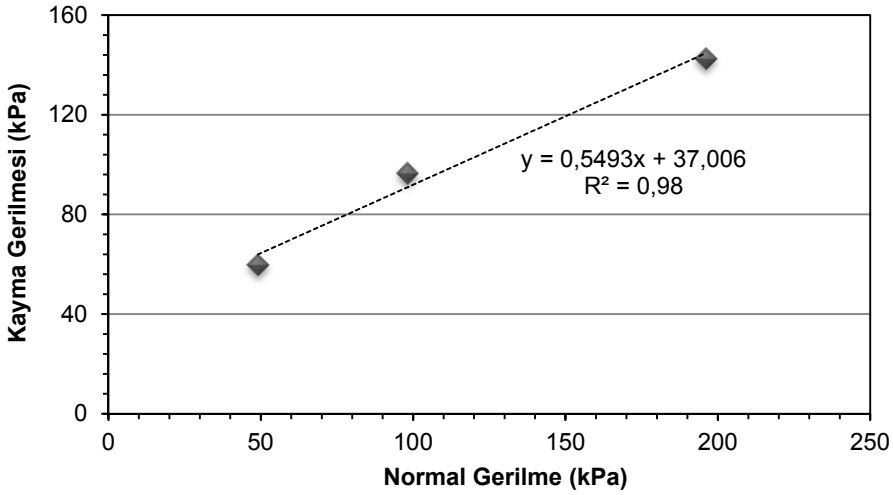
Şekil 7.23 U-1-1 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Metal atıklar KKA kompozisyonları içerisinde en büyük özgül yoğunluğa sahip olan malzemelerdir. Metal atıklar sıkışabilirliği düşük, oksitlenme özelliğine sahip, daneler arası elektriksel çekim gücü bakımından zayıf özelliktedirler. Orijinal U-1 kompozisyonunda %9 gibi diğer kompozisyonlara kıyasla büyük bir paya sahip olan metal atıklar kompozisyon içerisinden tamamen çıkartılmış ve U-1-2 numunesi oluşturulmuştur. U-1-2 kompozisyonunun doğal durumdaki su içeriği değeri %45 olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen Modifiye Proctor deneyleri sonucunda U-1-2 numunesinin optimum su içeriği %95, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 4,75 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Sıkıştırma işleminden sonra U-1-2 numunesine ait direk kesme deneyi başlangıç birim hacim ağırlık değeri 9,1 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Direk kesme deneyinden elde edilen yanal deformasyon – kayma gerilmesi ilişkisini gösteren grafik Şekil 7.24'te görülmektedir.



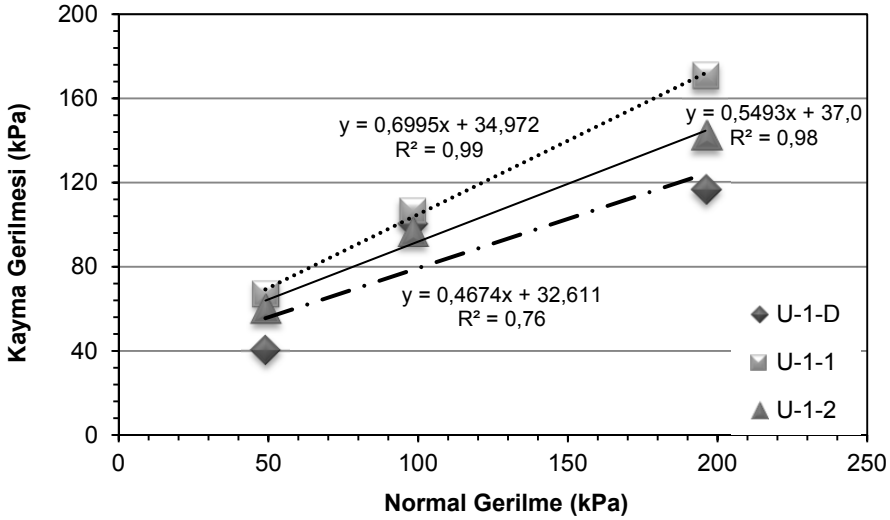
Şekil 7.24 Modifiye U-1-2 numunesi τ – ΔL ilişkisi

U-1-2 modifiye kompozisyonu için elde edilen kayma gerilmesi – yanal deformasyon grafiğinden görüleceği üzere numunenin belirgin bir maksimum kayma gerilmesi değeri bulunmamaktadır. Uygulanan normal gerilmeler ile bunlara karşılık elde edilen maksimum kayma gerilmeleri ile U-1-2 numunesi için Mohr-Coulomb kayma zarfı oluşturulmuştur (Şekil 7.25). Alan düzeltmesi yapılmamış kayma zarfından U-1-2 numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 28,8°, efektif kohezyon değeri 37 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.25 U-1-2 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Plastik ve metal atıkların kompozisyon içerisinden çıkartılmasıyla elde edilen yeni modifiye U-1-1 ve U-1-2 kompozisyonlarının büyük ölçekli direk kesme deney sonuçları Şekil 7.26'da U-1-D numunesi ile karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.26 Kompozisyon etkisinin U-1 numunesinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi

U-1-1 numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 35°, efektif kohezyon değeri 35 kPa olarak elde edilirken, orijinal U-1-D kompozisyonunun efektif içsel sürtünme açısı 25,1°, efektif kohezyon değeri 32,6 kPa belirlenmiştir ve son olarak U-1 kompozisyonu içerisinde %9 oranında bulunan metal atığın çıkarıldığı U-1-2 kompozisyonuna ait efektif içsel sürtünme açısı 28,8°, efektif kohezyon değeri 37 kPa olarak elde edilmiştir. Üç kompozisyon içerisindeki en büyük efektif içsel sürtünme açısı değeri plastik atığın çıkartıldığı modifiye U-1-1 kompozisyonuna aittir. Plastik atık aynı ağırlıktaki diğer atık malzemelere oranla büyük boşluklu yapısı ve düşük yoğunluğu nedeni ile çok daha büyük hacim kaplamaktadır. Plastik atığın kompozisyon içerisinden çıkarılması ile oluşturulan yeni modifiye U-1-1 kompozisyonu çok daha sıkı ve sert yapıdadır. Plastik atığın çıkarılması sonucu oluşan bu yeni doku efektif içsel sürtünme açısının diğer iki kompozisyona oranla daha büyük değer almasını sağlamıştır. U-1-1 kompozisyonunun orijinal U-1 kompozisyonuna kıyasla daha yüksek kayma mukavemeti parametrelerine sahip olmasının bir diğer nedeni de %12'lik plastik atığın yerini alan kağıt-karton atığın içsel sürtünme açısını, organik atığın ise kohezyon değerini arttırıcı yönde etki yapmalarıdır. Direk kesme deney setlerine ait maksimum kayma gerilmesi değerlerinin verildiği Çizelge 7.7 incelendiğinde U-1-1 numunesine ait maksimum kayma gerilmelerinin diğer iki kompozisyona oranla çok daha büyük değerler aldığı görülmektedir.

U-1 kompozisyonu içerisinde %9 oranında bulunan metal atığın çıkarılmasıyla elde edilen U-1-2 modifiye kompozisyonunun kayma mukavemeti parametrelerinin U-1-D kompozisyonundan çok daha yüksek değerler almıştır. Modifiye numunenin (U-1-2), efektif içsel sürtünme açısının daha büyük değer almasında metal atığın yerini alan kağıt, karton, tekstil gibi kayma mukavemetini arttıran lifli malzemelerin yüzdesinin büyümesi rol almıştır. Kohezyon değerinin artmasında ise kompozisyon içerisindeki organik atık miktarının artmasıyla gerçekleşmiştir ($\varnothing_{U\text{-}1\text{-}2} > \varnothing_{U\text{-}1\text{-}D}$ ve $c_{U\text{-}1\text{-}2} > c_{U\text{-}1\text{-}D}$). Langer (2005) sıkışabilirlik özelliği olmayan malzemelerden oluşturduğu kompozisyona ait mobilize sürtünme açısı ve zahiri kohezyon değerlerinin orijinal kompozisyonlu numunelere kıyasla daha yüksek değer aldığını belirtmiştir. Langer (2005) çalışmasında kompozisyon içerisindeki metal, cam, zemin, talaş vb. sıkışma özelliği olmayan malzemelerin kayma dayanımını arttırıcı etki yaptığını belirtmektedir. Bu çalışmada ise metal atığın çıkartılması ile daha düşük kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Bunun nedeni ise şu şekilde açıklanabilir: U-1 numunesi ağırlık olarak %9 oranında metal atık içermektedir. Özgül ağırlık açısından diğer atık numunelerden çok daha büyük değer alan metal atık ağırlık olarak kompozisyonun %9'unu oluşturuken, hacim açısından çok küçük bir yüzdeye sahiptir. U-1-1 kompozisyonunda metal atığın yerini düşük özgül ağırlıklı, büyük hacim kaplayan güçlendirici etkili kağıt-karton atıklar almıştır. Bunun bir sonucu olarak U-1-1 numunesine ait içsel sürtünme açısı U-1-D'den daha büyük değer almıştır.

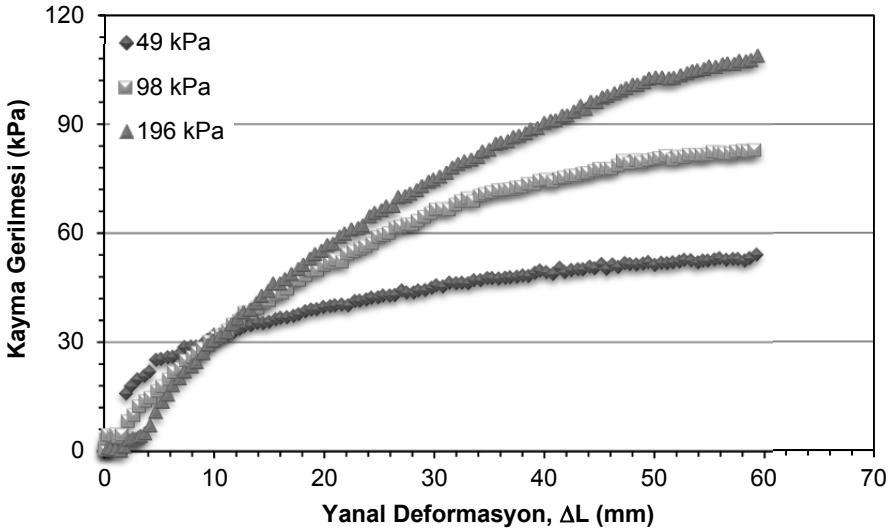
7.1.1.2.3 Kompozisyonun T-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi:

Ülkemize ait KKA yüzdeleri Çevre ve Orman Bakanlığının 2006 yılında yayınladığı Katı Atık Ana Planı Projesi, Manisa Belediyesi 2010 yılına ait faliyet raporu, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verileri ve akademik çalışmalardan (Gören, 2006) derlenip biraraya getirilmiş ve bu çalışmada T-1 temsili kompozisyonu olarak isimlendirilmiştir. T-1 kompozsiyonu diğer iki kompozisyon ile karşılaştırılıdığında (U-1 ve E-1) organik atık ve kül atık bakımından diğer kompozisyonlardan daha büyük yüzdelere sahip olduğu göze çarpmaktadır.

Kompozisyon etkisinin T-1 temsili kompozisyonunun kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla T-1 kompozisyonu içerisinde %15'lik orana sahip olan kül atık çıkarılmış ve oluşan yeni modifiye kompozisyon T-1-1 olarak isimlendirilmiştir. Kül atık diğer atık kompozisyon içerisindeki diğer malzemelere oranla çok daha ufak danelidir. Diğer materyallere oranla daha büyük özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle diğer materyallere göre daha fazla su tutma kapasitesine sahiptir. Kül atığın bazik yapıda olması kompozisyonun pH değerini ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. T-1

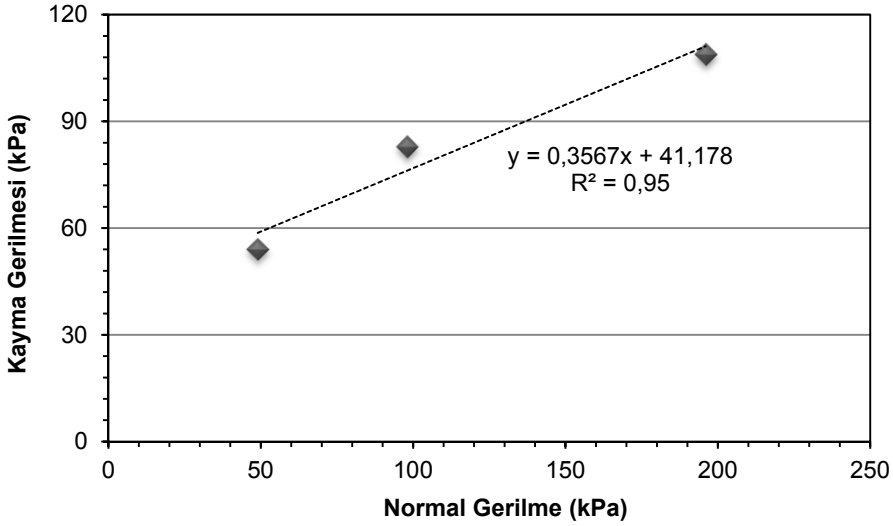
kompozisyonu içerisinden %15 oranındaki kül atığın çıkarılmasıyla zaten büyük yüzde dilimine sahip olan organik madde miktarı yeni modifiye kompozisyon içerisinde daha da büyük bir orana ulaşmıştır. T-1 kompozisyonunun doğal (başlangıç) su içeriği %62, organik madde miktarı %65 olarak belirlenmiştir. T-1-1 kompozisyonuna ait doğal su içeriği değerinin organik atık oranının kompozisyon içerisindeki payının artması nedeniyle %83'e yükseldiği belirlenmiştir. Gerçekleştirilen Modifiye Proctor deneylerinde T-1 kompozisyonunun optimum su içeriği değeri %73, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 4,95 kN/m^3 olarak belirlenirken, T-1-1 numunesinin optimum su içeriği değeri %120, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 4,0 kN/m^3 olarak bulunmuştur.

Genel olarak KKA numuneleri üzerinde gerçekleştirilen direk kesme deneylerinde numunelerin belirgin bir maksimum göçme (kayma) gerilmesine sahip olmadığı görülmektedir ve bu durumun T-1-1 numunesi içinde geçerli olduğu Şekil 7.27'de görülmektedir. Üç normal gerilme değeri içinde numunelerin belirgin bir maksimum kayma gerilmesi bulunmamaktadır. Ayrıca deneyde uygulanan ilk normal 49 kPa gerilme altında ilk başlangıç (%5 yanal deformasyona kadar) yanal deformasyon değerleri için elde edilen kayma gerilmesi değerlerinin 98 ve 196 kPa'lık kayma gerilmesi değerlerinden daha büyük olmasıdır. Bu durumun sebebi belirlenmiş prosedüre göre sıkıştırılmış numunenin deney başında daha fazla direnç göstermesi, diğer setlerde ise kesmenin gerçekleşmesi ve numunenin potansiyel kayma yüzeyinin örselenmesi nedeniyle aynı direnci gösterememesi olarak açıklanabilir.



Şekil 7.27 Modifiye T-1-1 numunesi τ – ΔL ilişkisi

Direk kesme deneyi sonucunda üç normal gerilme değerine karşılık elde edilen üç kayma gerilmesi değeri Şekil 7.28'de bir araya getirilmiştir. Alan düzeltmesi yapılmamış kayma zarfına ait efektif içsel sürtünme açısı 19,6°, efektif kohezyon değeri 41,2 kPa olarak belirlenmiştir.

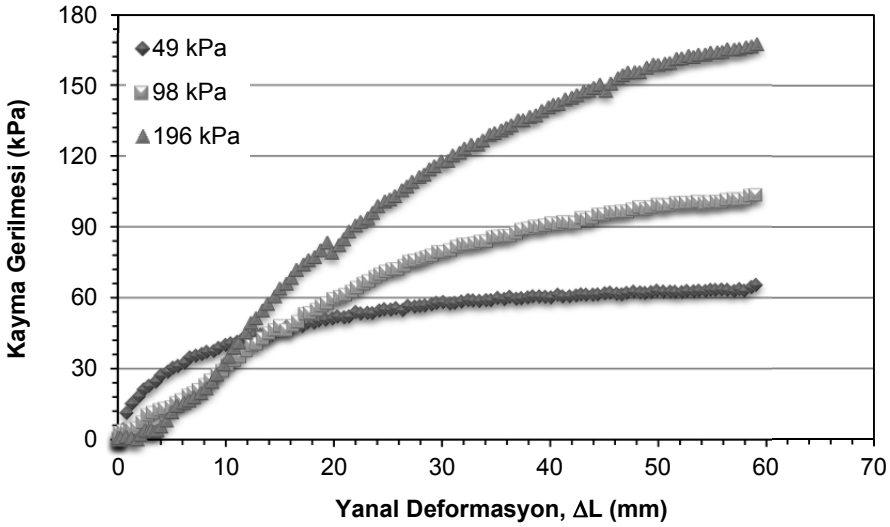


Şekil 7.28 T-1-1 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

T-1 kompozisyonu içerisinde diğer iki kompozisyona oranla çok daha büyük yer kaplayan organik atıkların %45'lik kompozisyon oranlarının %25 oranında azaltılarak %20 değerine düşürülmesiyle kayma mukavemeti parametrelerindeki değişimler yeni modifiye kompozisyon T-1-2 üzerinde incelenmiştir. Organik atıklar yüksek su içeriği değerine sahip olup, yüksek sıkışabilirlik özelliğine sahiptir. Ayrıca diğer atık malzemelere kıyaslandığında çok daha kısa sürede ayrışabilme özelliğindedir. Daha önce de belirtildiği gibi organik atıklar T-1 kompozisyonunun su içeriğinin ve organik madde yüzdesinin çok önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Meydana getirilen modifiye T-1-2 numunesinde organik madde miktarının önemli ölçüde azaltılmasıyla orijinal T-1 kompozisyonda %62 olan doğal su içeriği değeri %22 değerine gerilemiştir. Yine orijinal T-1 kompozisyonunda %73 olan optimum su içeriği değeri T-1-2 numunesi için %38 olarak belirlenmiştir. Kompozisyon içerisindeki organik atık miktarının azaltılması sonucu orijinal T-1 numunesi için 1,24 olan özgül ağırlık değerinin T-1-2 numunesi için 1,30 değerine çıktığı belirlenmiştir. Uygulanan sıkıştırma prosedürü sonucunda T-1-2 numunesinin direk kesme deneyi numune başlangıç birim hacim ağırlığı 7,6 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır.

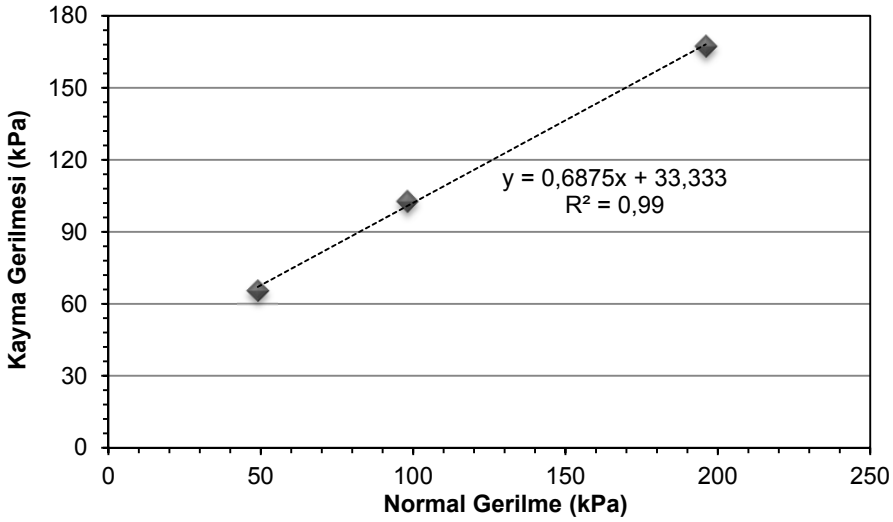
Şekil 7.29'da T-1-2 numunesi için yanal deformasyon- kayma gerilmesi arasındaki ilişkisi gösterilmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre T-1-2 numunelerinin belirgin bir

göçme (yenilme) değeri bulunmamaktadır. Bu nedenle deney setleri %20'lik yanal deformasyona tekabül eden 60 mm'lik deplasmanlara ulaşıldığında sonlandırılmıştır. Şimdiye kadar gerçekleştirilen tüm büyük ölçekli direk kesme deneylerinde olduğu gibi T-1-2 numunesi içinde 49 kPa'lık normal gerilme altında %5'lik yanal deformasyona kadarki kayma gerilmesi değerlerinin 98 ve 196 kPa'lık normal gerilmeler altındaki kayma gerilmelerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durumun daha önce belirtildiği gibi numunenin belirlenmiş kayma yüzeyinin henüz deney başında örselenmemiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



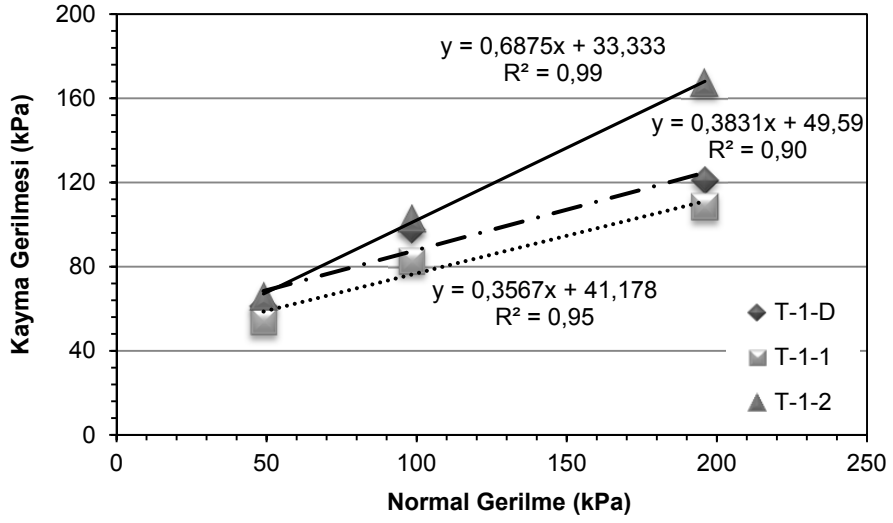
Şekil 7.29 Modifiye T-1-2 numunesi τ – ΔL ilişkisi

Üç farklı normal gerilme değeri ve bu normal gerilmeler altında elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri bir araya getirilerek T-1-2 numunesine ait Mohr-Coulomb kayma zarfları oluşturulmuştur (Şekil 7.30). Alan düzeltmesi yapılmamış kayma zarfına ait efektif içsel sürtünme açısı 34,5°, efektif kohezyon değeri 33,3 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.30 T-1-2 numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

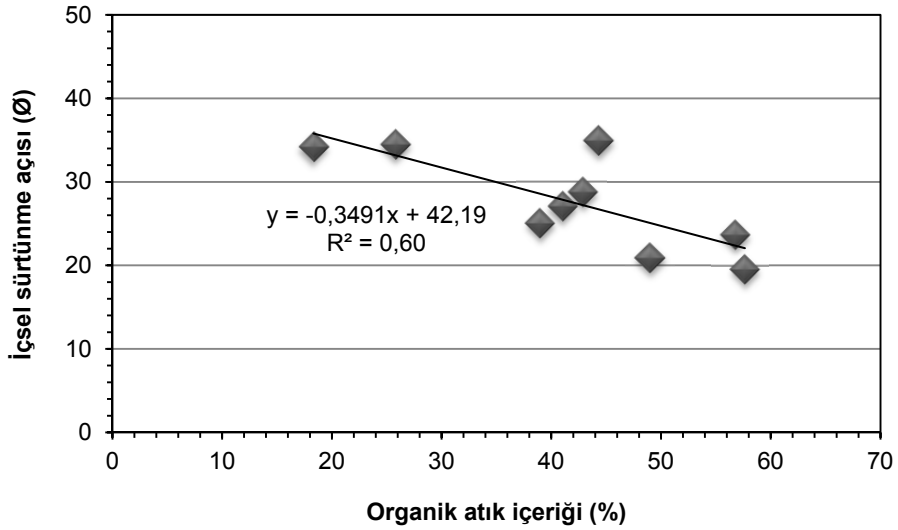
Orijinal T-1-D kompozisyonu ve modifiye T-1-1 ve T-1-2 kompozisyonlarına ait kayma zarfları birarada Şekil 7.31'de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Gerçekleştirilen direk kesme deneyleri sonucunda, T-1 kompozisyonunda %15 oranında bulunan kül atık miktarının çıkartıldığı T-1-1 numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 19,6°, efektif kohezyon değeri 41,2 kPa olarak elde edilirken orijinal T-1-D kompozisyonunun efektif içsel sürtünme açısı 20,9°, efektif kohezyon değeri 49,6 kPa belirlenmiştir ve son olarak T-1 kompozisyonu içerisinde %45 oranında bulunan organik atığın %25 azaltılarak %20 oranına indirildiği T-1-2 kompozisyonuna ait efektif içsel sürtünme açısı 34,5°, efektif kohezyon değeri 33,3 kPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.31 Kompozisyon etkisinin E-1, U-1 ve T-1 numunelerinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi

Şekil 7.31'den görüldüğü üzere en büyük efektif içsel sürtünme açısı T-1-2 numunesine ait iken bunu sırasıyla orijinal T-1-D ve T-1-1 kompozisyonu takip etmiştir. Üç kompozisyon arasındaki organik madde oranları karşılaştırıldığında en büyük organik atık yüzdesi T-1-1 numunesine ait iken ikinci sırayı T-1-D numunesi ve son sırayı da T-1-2 numunesi almıştır. Kayma zarflarından da anlaşılabileceği üzere T-1 kompozisyonu içerisindeki organik atık miktarının azaltılması efektif içsel sürtünme açısının artmasına neden olmaktadır ($\varnothing_{T-1-2} > \varnothing_{T-1}$). Bu durum organik atıkların kompozisyon içerisindeki yüzdesinin azalmasıyla ve organik atıkların yerini lifli özellikteki kağıt-karton atıkların almasıyla numune direncinin artmasıyla açıklanabilir. Kül atık, sentetik kompozisyonların oluşturulmasında kullanılan malzemelerin içerisindeki en ufak dane boyutuna sahiptir. Bu özelliği ile kül atık KKA numunelerin boşluklarını doldurarak boşluk oranını düşürerek, kayma mukavemetini olumlu yönde etkilemektedir. Kül atığın çıkarılması sonucu meydana gelen T-1-1 numunesine ait kayma zarfının mukavemet parametrelerinin orijinal T-1 kompozisyonuna ait parametrelerden daha düşük değerler aldığı görülmüştür ($\varnothing_{T-1-D} > \varnothing_{T-1-1}$, $c_{T-1-D} > c_{T-1-1}$). Kül atığın numune içerisinden çıkarılması, organik atığın kompozisyon içerisindeki yüzdesinin artmasına ve buna bağlı kayma dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum kül atığın yerini alan organik atıkların kompozisyon içerisinde zaten yüksek olan yüzde değerlerinin daha da artmasının kayma mukavemetini olumsuz etkilemesiyle ve ayrıca numune dokusu içerisinde bağlayıcı ve boşluk doldurucu özelliği sağlayan kül atığın kaybolmasıyla açıklanabilir.

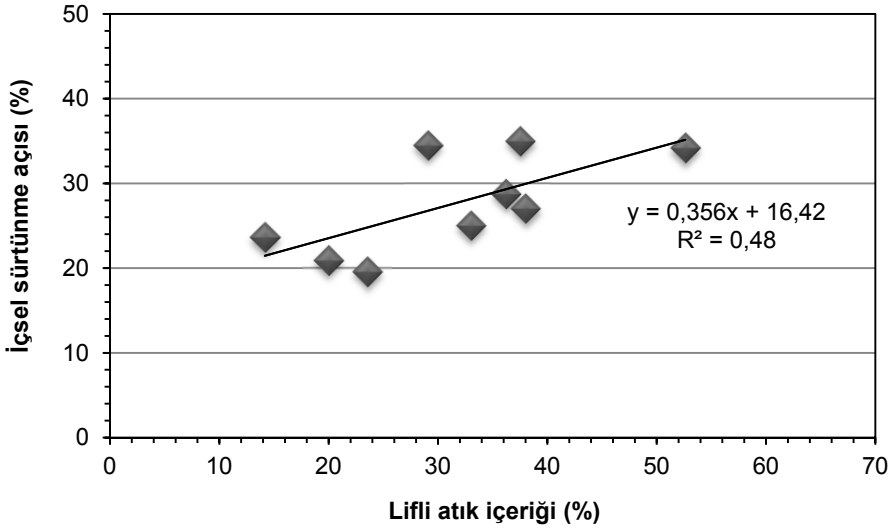
Üç temel ve altı modifiye kompozisyon numunesi kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda içsel sürtünme açısının organik atık içeriğine bağlı değişimi Şekil 7.32'de görülmektedir.



Şekil 7.32 İçsel sürtünme açısı – organik atık içeriği ilişkisi

Şekil 7.32'den görüldüğü üzere bir kaç noktanın saçılması nedeniyle R^2 değeri 0,60 değerini alsa da KKA kompozisyonu içerisinde organik atıkların yüzdesi arttıkça, içsel sürtünme açılarının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.

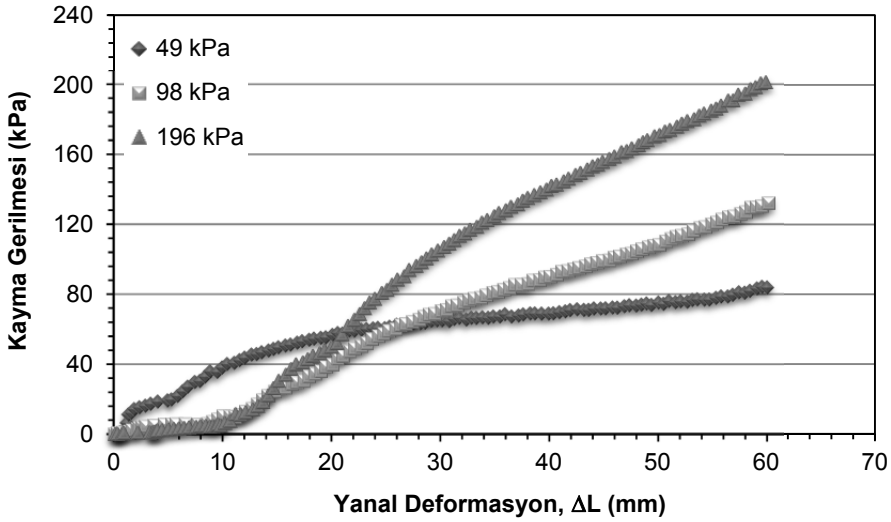
Temel ve modifiye kompozisyon numuneleri ile gerçekleştirilen tüm büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda içsel srtünme açısı lifli atık (kağıt-karton, tekstil) yüzdesi ilişkisi Şekil 7.33'de görülmektedir.



Şekil 7.33 İçsel sürtünme açısı – lifli atık yüzdesi içeriği ilişkisi

Şekil 7.33'den görüldüğü üzere genel davranışa bakıldığında kompozisyon içerisindeki lifli atık miktarı arttıkça içsel sürtünme açısı artmaktadır. Kağıt-karton ve tekstil gibi lifli atık malzemeler kayma sırasında çekme mukavemetleri nedeniyle zeminlerden farklı olarak kaymaya karşı koymaktadırlar. Bu malzemelerin kompozisyon içerisindeki yüzdelerinin artışı daha yüksek kayma mukavemeti elde edilmesine neden olmaktadır.

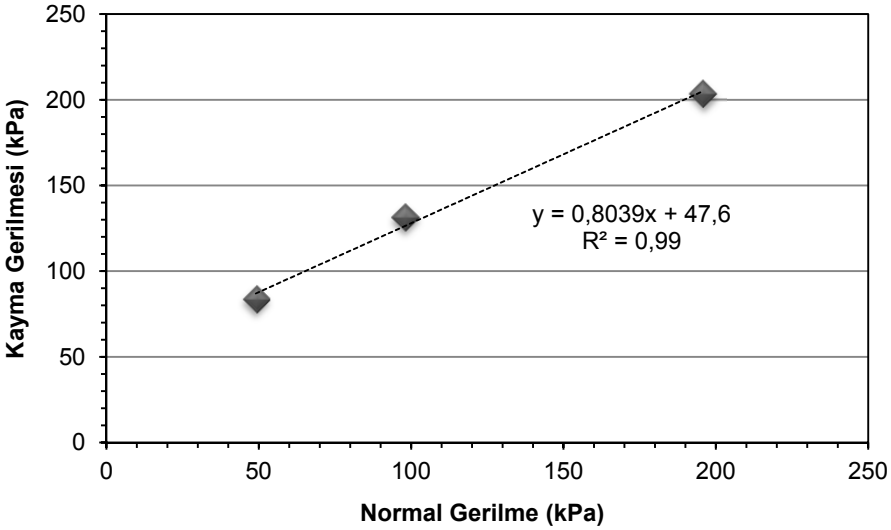
Kentsel katı atıkların içerisinde bulunan lifli atık miktarının kayma dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla sadece lifli atık (kağıt, karton ve tekstil) malzemelerden oluşan numune üretilerek büyük ölçekli direk kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen kompozisyon oranlarında (%25 tekstil, %60 kağıt, %15 karton) hazırlanan lifli numunenin yanal deformasyon-kayma gerilmesi ilişkisi Şekil 7.34'de görülmektedir.



Şekil 7.34 Lifli atık numunesine ait τ - ΔL ilişkisi

Şekil 7.34'ten görüldüğü üzere üç normal gerilme (49 kPa, 98 kPa, 196 kPa) içinde net bir yenilme değeri gözlenmemiştir.

Büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda üç farklı normal gerilmeye karşılık gelen maksimum kayma gerilme değerleri kullanılarak lifli atığın kayma zarfı doğrusu oluşturulmuştur (Şekil 7.35).



Şekil 7.35 Lifli atık malzemelerin kayma mukavemeti parametreleri

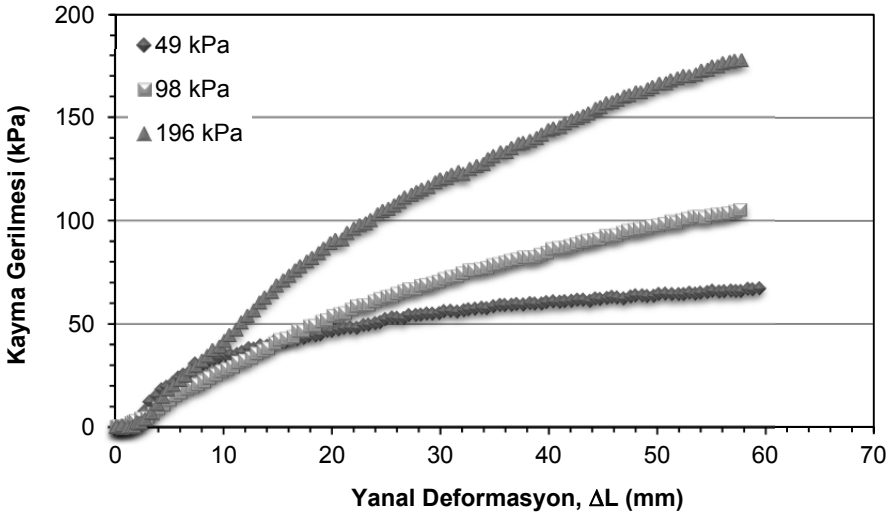
Şekil 7.35'ten görüldüğü üzere sadece lifli atıklardan (%25 tekstil, %60 kağıt, %15 karton) üretilen numunenin efektif içsel sürtünme açısı 39°, efektif kohezyon değeri 48 kPa olarak belirlenmiştir. Büyük ölçekli direk kesme deneyinden lifli atık numunesi için elde edilen bu değerler, T-1-D numunesinin kayma dayanımı parametreleriyle karşılaştırıldığında (Ø'=21° ve c'=49 kPa), lifli atıkların numunenin kayma dayanımı parametrelerini arttırıcı bir etkisi olduğunu göstermiştir.

7.1.1.3 Dane Boyutunun Sentetik Taze Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemetine Etkisi

Kentsel katı atıkların mühendislik davranışlarını belirleyen en önemli özelliklerden bir tanesi de atıkların dane boyutudur. Kompozisyonun dane boyutunda meydana gelecek değişiklikler numunenin granülometri özelliklerinden, boşluk oranına, porozitesinden, permeabilitesine, sıkıştırılabilirliğinden, kayma mukavemetine birçok özelliğini etkileyebilir (Vilar ve Carvalho, 2004; Palaypayon ve Ohta, 2007; Stark ve diğ., 2009; Bray ve diğ., 2009; Zekkos ve diğ., 2010; Canizal ve diğ., 2011). Dane boyutu etkisinin belirlenebilmesi için üç kompozisyonda da önemli yüzdeye sahip kağıt-karton ve mutfak atıklarının boyutları değiştirilerek yeni numuneler ile büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında hangi atığın kayma mukavemeti parametrelerini ne şekilde etkilediğinin belirlenebilmesi açısından diğer atık malzemelerin boyutları sabit tutulmuş sadece araştırılan malzemelerin boyutları değiştirilmiştir. Bu bölüm kapsamında üç farklı kompozisyonun her biri için iri kağıt-karton ve iri mutfak atığı içeren numuneler oluşturularak altı adet büyük ölçekli direk kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Direk kesme deneyleri daha önceki numunelerin hazırlanış prosedürüyle aynı şekilde hazırlanmıştır.

7.1.1.3.1 Dane Boyutunun E-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi

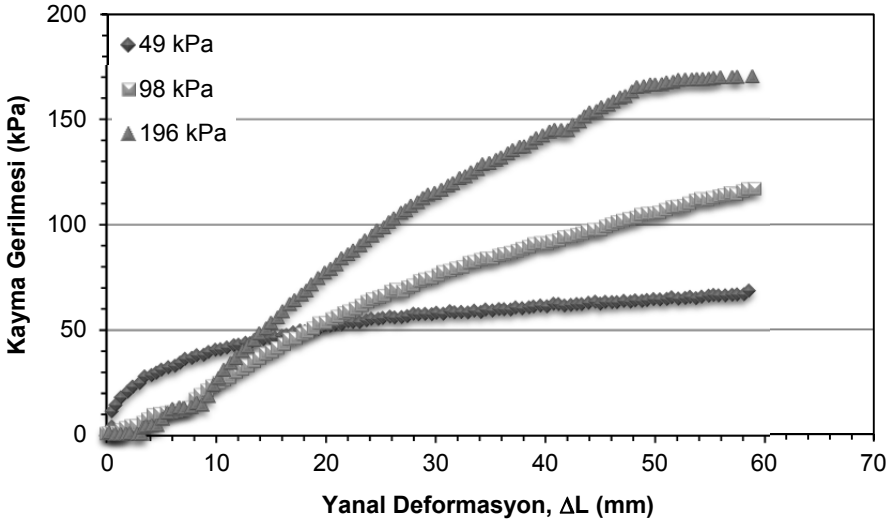
E-1 numunesi içerisindeki kağıt-karton atıkların boyutları 2 cm'den 5 cm'e çıkartırlarak E-1-K numunesi oluşturulmuştur. Şekil 7.36'da kağıt-karton atık boyutlarının büyütülmesi ile oluşturulan E-1-K numunesinin kayma gerilmesi – yanal deformasyon ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 7.36 E-1-K numunesine ait τ - ΔL ilişkisi

Büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda E-1-K numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 36,8°, efektif kohezyon değeri 31,4 kPa olarak belirlenmiştir.

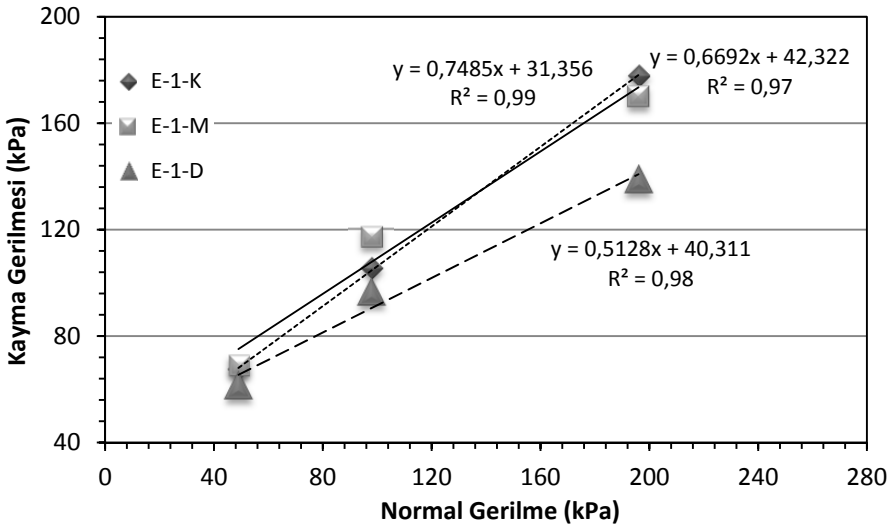
Diğer atık numune boyutları sabit kalırken mutfak atık numunelerinin boyutlarının arttırıldığı E-1-M numunesinin kayma gerilmesi – eksenel deformasyon ilişkisi ise Şekil 7.37'de görülmektedir. Eksenel deformasyon ekseninin ilk %5'lik bölümü incelendiğinde 49 kPa'lık normal gerilme altında numunenin diğer normal gerilmelere kıyasla daha büyük kayma gerilmelerine sahip olduğu görülmüştür. Bunu takip eden aşamada (%5 - %20) eksenel deformasyondaki artış devam ederken kayma gerilmelerindeki artış başlangıca kıyasla çok düşük olmuştur.



Şekil 7.37 E-1-M numunesine ait τ - ΔL ilişkisi

Büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda E-1-M numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 33,8°, efektif kohezyon değeri 42,3 kPa olarak belirlenmiştir.

E-1 kompozisyonun orijinal dane boyutlarındaki E-1-D, büyük boyutlardaki kağıt-karton atıklarıyla üretilmiş E-1-K ve büyük boyutlarda mutfak atıklarından meydana gelen E-1-M numunelerinin kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkileri karşılaştırılmalı olarak Şekil 7.38'de gösterilmiştir.



Şekil 7.38 Atıkların dane boyutunun E-1 kompozisyonun kayma mukavemeti üzerindeki etkisi

Gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneyleri neticesinde en büyük efektif içsel sürtünme açısının daha büyük boyutta kağıt-karton atık içeren E-1-K numunesine ait olduğu belirlenmiştir. Bu numuneyi sırasıyla büyük mutfak atık içeren E-1-P ve doğal E-1-D numuneleri takip etmektedir ($\phi_{E1K} > \phi_{E1P} > \phi_{E1D}$). Kağıt-karton atık E-1 kompozisyonunda önemli ve etkili bir paya sahiptir. Lifli yapısıyla numune dayanımına katkıda bulunan kağıt-karton atığın dane boyutundaki büyüme, efektif içsel sürtünme açısını yaklaşık %20 oranında arttırmıştır. Literatürde de bu sonuçlara benzer olarak, Siegel ve diğ. (1990) çeşitli boyutlardaki (D_{maks}=106 mm) atık malzemeler ile gerçekleştirdikleri direk kesme deneyleri sonucunda daha iri daneli KKA'ların yüksek içsel sürtünme açılarına sahip olduğunu rapor etmiştir. Manassero ve diğ. (1997) ise dane boyutunun kayma dayanımı üzerindeki etkisinin incelediği çalışmalarında, içsel sürtünme açısının dane boyutu artışına paralel olarak arttığını belirtmişlerdir. Çizelge 7.2'de E-1-K, E-1-P ve E-1-D numunelerine ait kayma mukavemeti parametreleri özetlenmektedir.

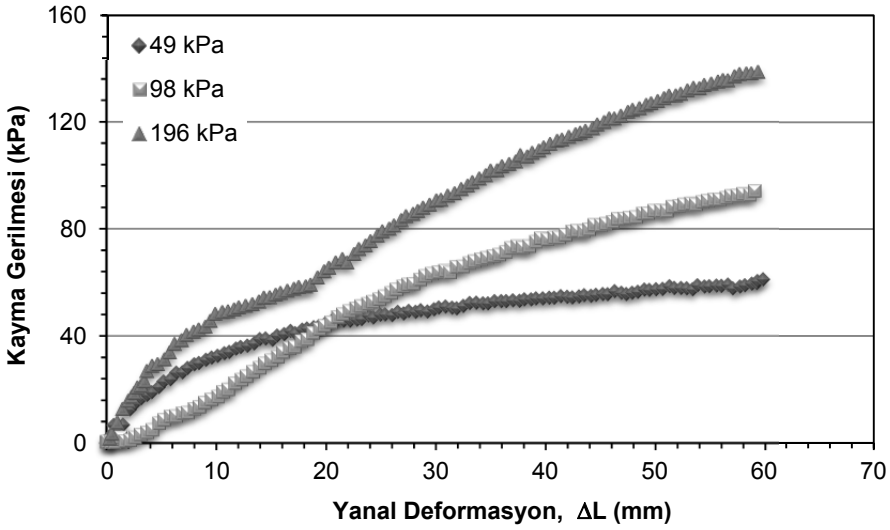
Çizelge 7.2 Farklı dane boyutu özelliklerindeki E-1 numunesinin kayma mukavemeti parametreleri

Numune	ϕ (°)	c (kPa)
E-1-K	36,8	31,4
E-1-M	33,8	42,3
E-1-D	27,1	40,3

Çizelge 7.2'den görüldüğü üzere gerçekleştirilen direk kesme deneyleri sonucunda en büyük efektif içsel sürtünme değerinin kağıt-karton atık boyutu büyütülmüş E-1-K numunesine ait olduğu belirlenmiştir. Bu numuneyi sırasıyla E-1-M ve E-1-D numuneleri takip etmiştir. Numunelerin kohezyon değerleri incelendiğinde E-1-M ve E-1-D numunelerinin birbirine yakın değer aldığı gözlenirken, E-1-K numunesi yaklaşık %20 - %25 oranında daha düşük kohezyon değerine sahiptir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda atık dane boyutundaki artışın efektif içsel sürtünme açısında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık dane boyutundaki değişimin kohezyon değeri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

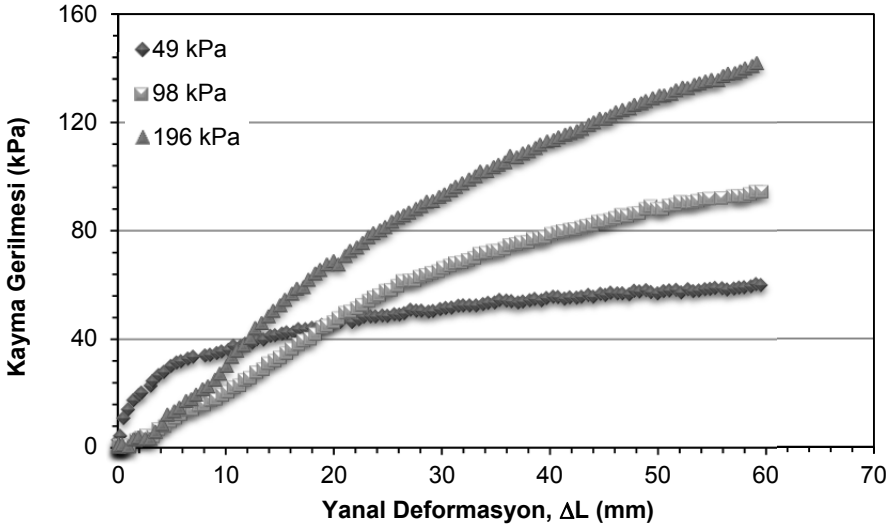
7.1.1.3.2 Dane Boyutunun U-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi:

Amerika Birleşik Devletleri kentsel katı atık kompozisyonunu temsil eden U-1 numunesinin mutfak atık boyutları arttırılarak U-1-M numunesi oluşturulmuş ve büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yeni oluşturulan numunelerde (U-1-M) mutfak atık boyutları orijinal boyutun 4-5 katı olacak şekilde büyütülmüştür. Bu deneylerden elde edilen kayma gerilmesi – eksenel deformasyon değerleri Şekil 7.39'da görülmektedir. İri boyutlu mutfak atığı içeren U-1-M numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 27,3°, efektif kohezyon değeri 39,2 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.39 U-1-M numunesine ait τ - ΔL ilişkisi

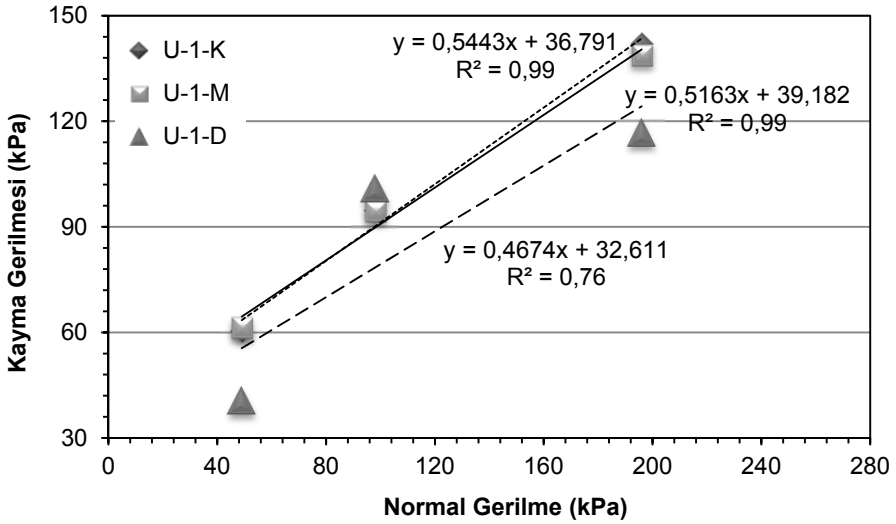
İçeriğinde %28 oranında kağıt-karton atık bulunduran U-1 kompozisyonunun kağıt-karton atık büyüklüğü arttırılarak U-1-K numunesi oluşturulmuştur. Üç farklı normal gerilme değeri için gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi – eksenel deformasyon değerleri Şekil 7.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 7.40 U-1-K numunesine ait τ - ΔL ilişkisi

Büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda U-1-K numunesi için elde edilen efektif içsel sürtünme açısı 28,5°, efektif kohezyon değeri 36,8 kPa olarak elde edilmiştir.

U-1 kompozisyonun orijinal dane boyutlarındaki U-1-D, büyük boyutlardaki kağıt-karton atıklarıyla üretilmiş U-1-K ve büyük boyutlarda mutfak atıklarından meydana gelen U-1-M numunelerinin kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkileri Şekil 7.41'de gösterilmiştir.



Şekil 7.41 Atıkların dane boyutunun U-1 kompozisyonun kayma mukavemeti üzerindeki etkisi

Farklı dane boyutu özelliklerindeki U-1 kompozisyonu numunelerinin büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 7.3'de özetlenmiştir.

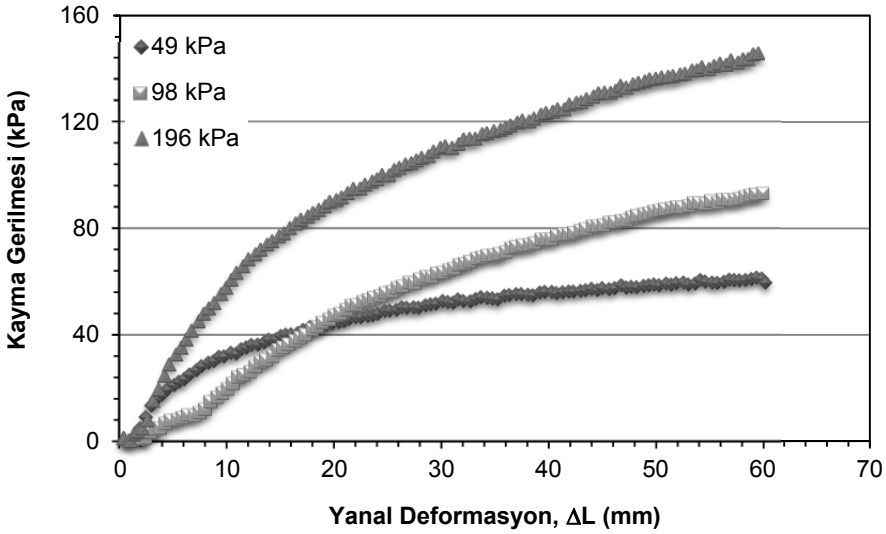
Çizelge 7.3 Farklı dane boyu özelliklerindeki U-1 numunesinin kayma mukavemeti parametreleri

Numune	ϕ' (°)	c' (kPa)
U-1-K	28,5	36,8
U-1-M	27,3	39,2
U-1-D	25,1	32,6

Atık dane boyutu büyütülmüş U-1-M ve U-1-K numunelerinin kayma mukavemeti parametrelerinin orijinal dane boyutundaki numunenin değerlerinden (U-1-D) daha büyük olduğu belirlenmiştir. Çizelge 7.3'de görülen numunelerden en büyük efektif içsel sürtünme açısı kağıt-karton atık boyutunun büyütüldüğü U-1-K numunesine aittir. Bunu sırasıyla U-1-M ve U-1-D numuneleri izlemiştir. Elde edilen sonuçlara göre dane boyutunun büyütülmesi ile KKA numunelerinin kaymaya karşı daha fazla bir direnç gösterdiği görülmektedir.

7.1.1.3.3 Dane Boyutunun T-1 Numunesinin Kayma Mukavemetine Etkisi

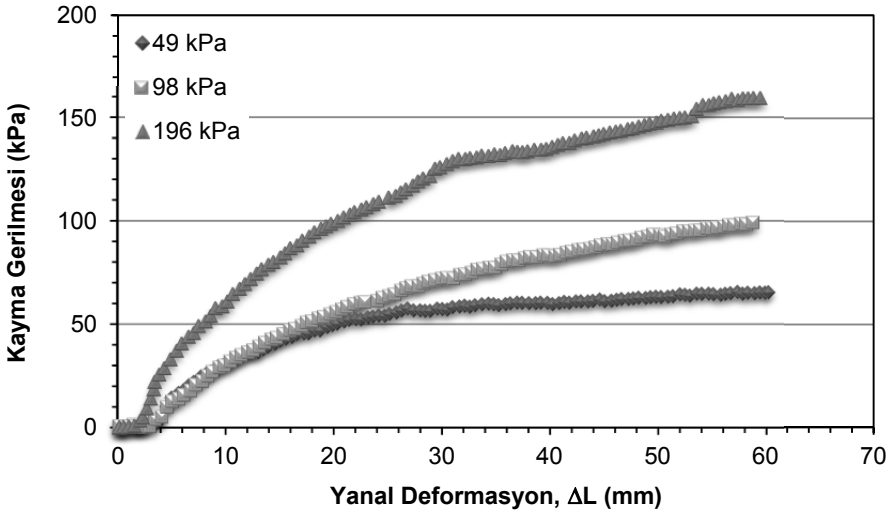
T-1 kompozisyonundaki mutfak atıklarının büyütülmesi ile oluşturulan T-1-M numunesi ile büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Diğer atık boyutları sabit tutulurken mutfak atıklarının boyutları orijinal boyutunun yaklaşık 4-5 katı arttırılmıştır. Tamamlanan deneyler sonucunda elde edilen kayma gerilmesi yanal deformasyon ilişkisini gösteren grafik Şekil 7.42'de görülmektedir.



Şekil 7.42 T-1-M numunesine ait τ - ΔL ilişkisi

Şekil 7.42'den görüldüğü üzere direk kesme numunelerinde net bir yenilme gerçekleşmemiştir. Üç farklı normal gerilme değeri içinde deneyler izin verilen maksimum eksenel deformasyona ulaşıldığında (ε = %20) sonlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde T-1-M numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 29,5°, efektif kohezyon değeri 35,4 kPa olarak bulunmuştur.

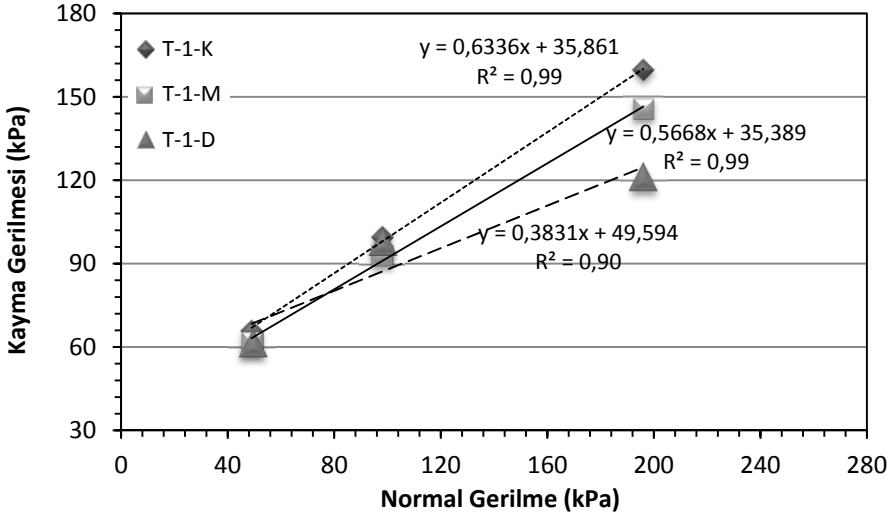
Kağıt – karton atıklar diğer atıklara kıyasla ağırlıklarına göre daha büyük hacim kaplamaktadırlar. Buna karşılık lifli dokuları sayesinde güçlü ve dayanım arttırıcı yapıya sahiptirler. Kağıt atıkların dane boylarının kayma mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kağıt atık boyutları 25 mm x 25 mm'den 25 mm x 105 mm boyutlarına büyütülerek (T-1-K) (yaklaşık 4-5 kat) büyük ölçekli direk kesme deneyleri yapılmıştır. Üç farklı normal gerilme altında tamamlanan deneylerin kayma gerilmesi – yanal deformasyon ilişkisi Şekil 7.43'te görülmektedir.



Şekil 7.43 T-1-K numunesine ait τ - ΔL ilişkisini

Şekil 7.43'ten görüldüğü üzere %1 - %10 yanal deformasyonlarda kayma gerilmesi değerleri çok hızlı bir artış gerçekleştirmiş, %10' deformasyondan sonra bu artış azalmıştır. Özellikle 49 kPa'lık normal gerilmeye ait ilk eğride %10'luk yanal deformasyondan sonra kayma gerilmesi değerinin neredeyse sabit bir değer aldığı gözlenmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda T-1-K numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 32,4°, efektif kohezyon değeri 35,9 kPa olarak belirlenmiştir.

Kağıt-karton atık boyutları büyütülerek üretilen T-1-K, mutfak atıklarının büyütülmesiyle oluşturulan T-1-M ve orijinal boyutlardaki T-1-D numunelerinin normal gerilme – kayma gerilmesi ilişkileri Şekil 7.44'te gösterilmektedir.



Şekil 7.44 Atıkların dane boyunun T-1 kompozisyonun kayma mukavemeti üzerindeki etkisi

Çizelge 7.4 büyük ölçekli direk kesme deneyleri tamamlanan T-1-D, T-1-K ve T-1-P numunelerinin kayma mukavemeti parametrelerini özetlemektedir.

Çizelge 7.4 Farklı dane boyu özelliklerindeki T-1'in kayma mukavemeti parametreleri

Numune	ϕ' (°)	c' (kPa)
T-1-K	32,4	35,9
T-1-M	29,5	35,4
T-1-D	20,9	49,6

Çizelge 7.4'ten görüldüğü üzere efektif içsel sürtünme açısı iri dane boyutlu kompozisyonlarda (T-1-M ve T-1-K), orijinal kompozisyona (T-1-D) kıyasla daha büyük değer almıştır. İçsel sürtünme açısının artışında büyük boyutlu kağıt-karton atığın büyük boyutlu mutfak atığından daha parametreleri olumlu yönde arttırıcı rol oynadığı görülmektedir ($\phi_{T1K} > \phi_{T1P} > \phi_{T1D}$). Buna karşılık T-1-K ve T-1-M numuneleri birbirine yakın kohezyon değeri alırken, T-1-D numunesi bunlardan daha büyük kohezyon değerine sahiptir.

Kompozisyon içerisindeki yüzdece fazla atıkların dane boyutlarının büyütülmesiyle oluşturulan yeni numunelerin büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve kayma mukavemeti parametrelerindeki değişimler belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde dane boyutu büyük olan altı yeni numunenin tümü için efektif içsel sürtünme açısını diğer orijinal numune boyutundaki numunelere kıyasla arttırdığı söylenebilir.

Çizelge 7.5 Dane boyunun kayma mukavemeti parametrelerine etkisi

Numune	**Kayma Mukavemeti Parametreleri**	
	İçsel Sürtünme Açısı Ø' (°)	**Kohezyon c' (kPa)**
T-1-K	32,4	35,9
T-1-P	29,5	35,4
T-1-D	20,9	49,6
E-1-K	36,8	32,4
E-1-P	33,8	42,3
E-1-D	31,8	40,6
U-1-K	28,6	36,8
U-1-P	27,3	39,2
U-1-D	25,1	32,6

Kağıt-karton atıkların lifli yapısıyla dayanımı artırıcı özelliği olduğu bilinmektedir. Kağıt-karton ve mutfak atıklarının efektif içsel sürtünme açısı üzerindeki olumlu etkileri incelendiğinde boyutları büyütülmüş kağıt-karton atıkların daha etkili olduğu belirlenmiştir. Dane boyunun büyümesinin kohezyon parametresi üzerindeki etkisi incelendiğinde; T-1-K ve T-1-P numunelerinin kohezyon değerlerinin orijinal T-1-D kompozisyonunun daha küçük değerler aldığı görülmüştür. E-1-P numunesinin kohezyon değeri orijinal E-1-D numunesine yakın değer alırken, E-1-K numunesinin kohezyon değeri bu numunelere göre daha küçük değerler almıştır. U-1-K ve U-1-P numunelerinin gerek efektif içsel sürtünme açısı gerekse efektif kohezyon değerleri orijinal U-1-D numunesinden daha yüksek değerler almıştır. Kağıt-karton atık dane boyutunun büyütülmesi ile içsel sürtünme açısındaki en yüksek artış (yaklaşık %55 oranında) organik madde bakımından en zengin olan T-1 numunesinde görülmüştür.

Elde edilen tüm sonuçlar dane boyutu arttırılmış yeni numunelerin (E-1-K, E-1-P, U-1-K, U-1-P, T-1-K ve T-1-P) efektif içsel sürtünme açısı bakımından orijinal numunelere kıyasla (E-1-D, U-1-D ve T-1-D) daha büyük değerlere sahip olduğunu göstermiştir. Dane boyutunun kentsel katı atıkların kayma dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili literatürde de çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Siegel ve diğ., (1990) çeşitli boyutlardaki (D_{maks}=106 mm) atık malzemeler ile gerçekleştirdikleri direk kesme deneyleri sonucunda daha iri daneli KKA'ların yüksek içsel sürtünme açılarına sahip olduğunu rapor etmiştir. Buna paralel olarak Manassero ve diğ. (1997) dane boyutunun kayma dayanımı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarında, içsel sürtünme açısının dane boyutu artışına paralel olarak arttığını belirtmişlerdir.

7.1.2 Sentetik Yıllanmış Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti

Kentsel katı atıkların kayma mukavemeti su içeriği, kompozisyon, birim hacim ağırlık, dane boyu dağılımı gibi birçok etkene bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Zaman içerisinde KKA'ların mühendislik parametrelerinin bir çoğunda olduğu gibi kayma mukavemetinde de önemli değişiklikler meydana gelebilmektedir. Çizelge 7.6 üç farklı kompozisyondaki sentetik KKA numunelerinin zaman içerisindeki organik madde içeriklerinin değişimlerini göstermektedir.

Çizelge 7.6 Organik madde içeriğinin zaman içerisindeki değişimi

Kompozisyon	Organik madde içeriği (%)		
	Günlük	3 ay	12 ay
T-1	65	62	52
E-1	64	55	42
U-1	58	57	47

Çalışmanın bu bölümünde sentetik olarak laboratuvarda üretildikten sonra doğal ortamda yıllanmaya bırakılan KKA numunelerinin kayma mukavemeti özelliklerinin yıllanma etkisiyle ne şekilde etkilendiği araştırılmıştır. Bu amaçla taze (günlük) olarak üretilmiş numuneler ile büyük plastik konteynırlar içerisinde 12 ay süresince dış ortam koşullarına bırakılarak yıllandırılmış KKA'ların kayma mukavemeti değerleri büyük ölçekli kesme deneyler ile belirlenmiştir.

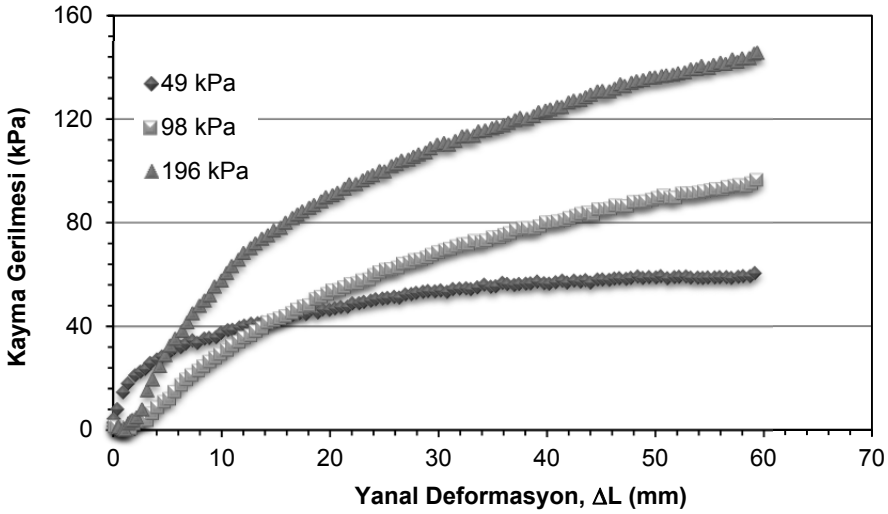
7.1.2.1 Yıllanmanın E-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi:

Laboratuvar ortamında sentetik olarak üretilen günlük (taze) ve 12 ay süresince dış ortam koşullarında bekletilerek yılllandırılmış E-1 kompozisyonunun kayma mukavemeti parametreleri karşılaştırılarak yıllanma etkisinin kayma mukavemeti üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Dış ortamda yıılandırılan KKA numunelerinin organik madde miktarı ile su içerikleri belirlenmiştir. Mühendislik parametrelerinin belirlenmesine yönelik deneylerde su içeriği mevsimsel olarak değişim göstermiş, organik madde miktarı geçen süre içerisinde azalma göstermiştir (Şekil 7.45).

Şekil 7.45 E-1 kompozisyonundaki yıllanmış KKA numunesi görünümü

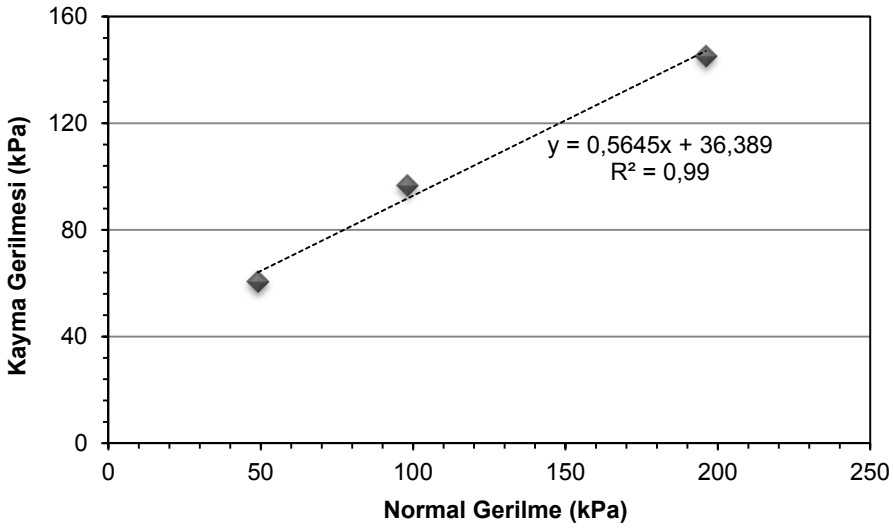
Bir yıl süresince dış ortamda bırakılan E-1-Y numunesinin organik madde miktarı %42, deney başlangıç su içeriği değeri %131 olarak belirlenmiştir (deney sonunda %10 - % 20 azalma gerçekleşmektedir). Numune standart sıkıştırma prosedürü ile (beş katmanın herbirine 100 Standart Proctor darbesi) kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş ve sıkıştırma sonucunda 12,2 kN/m^3'lük birim hacim ağırlık değeri elde edilmiştir. Orjinal E-1-D numunesine kıyasla daha büyük birim hacim ağırlık değerinin elde edilmesinde hiç şüphesiz yüksek su içeriği ve dane boyutlarının yıllanmanın bir sonucu olarak daha ufak hale gelmesi etkin rol oynamıştır.

Yıllanmış E-1-Y numunesi kullanılar üç farklı normal gerilme değeri için direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yıllanmış numunelerin direk kesme deneylerinde kullanılacak kesme hızı değeri sıkışabilirlik deneylerinden elde edilmiştir. E-1-Y numunesi için direk kesme deneyinden elde edilen kayma gerilmesi – yanal deformasyon arasındaki ilişkisi Şekil 7.46'da gösterilmektedir.



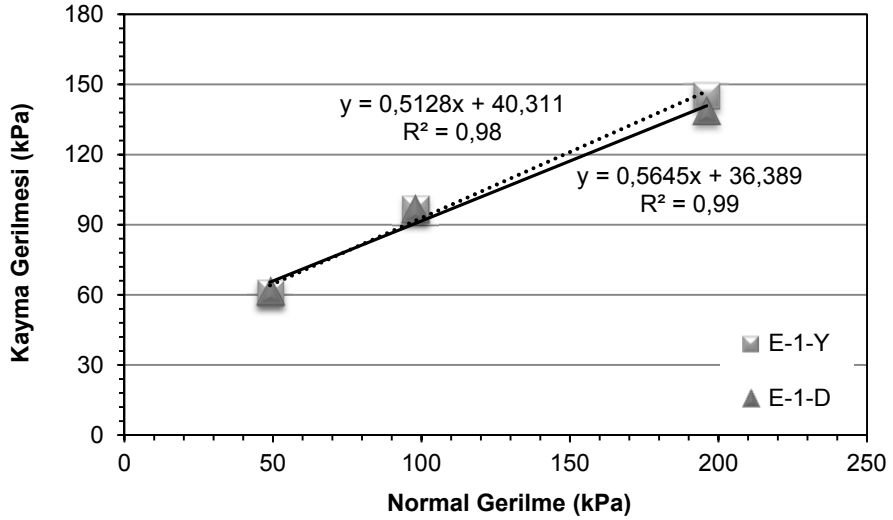
Şekil 7.46 Yıllanmış E-1-Y numunesi τ – ΔL ilişkisi

E-1-Y numunesi için elde edilmiş maksimum kayma gerilmesi değerleri ve bu değerlere karşılık gelen normal gerilme değerleri Şekil 7.47'de verilmiştir. Alan düzeltmesinin yapılmadığı kayma zarfında efektif içsel sürtünme açısı 29,4°, efektif kohezyon değeri 36,4 kPa olarak belirlenmiştir. Şekil 7.47'den görüleceği üzere gerçekleştirilen deneyde hesaplanan korelasyon belirleme katsayıları oldukça yüksek değer almıştır (R^2=0,99).



Şekil 7.47 E-1-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Yıllanma etkisinin KKA'ların kayma mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla günlük (taze) ve yıllanmış (1 yıl süresince) numuneler kullanılarak gerçekleştirilen direk kesme deneylerinde iki numune için elde edilen kayma zarfları Şekil 7.48'de görülmektedir.



Şekil 7.48 E-1 kompozisyonundaki yıllandırılmış ve günlük numunelerin kayma zarfları

Gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda E-1-Y numunesine ait içsel sürtünme açısının E-1-D numunesinden büyük, kohezyon değerinin ise daha küçük olduğu görülmektedir ($\varnothing_{E\text{-}1\text{-}Y}$= 29,4° > $\varnothing_{E\text{-}1\text{-}D}$= 27,1° ve $c_{E\text{-}1\text{-}D}$= 40,3 kPa > $c_{E\text{-}1\text{-}Y}$= 36,4 kPa). Bu durum yıllanma sonucunda kompozisyon içerisindeki organik madde miktarının azalmasıyla açıklanabilir. Organik madde miktarının yıllanma sonucu azalması içsel sürtünme açısını

arttırıcı yönde etkilerken, kohezyon değerinin düşmesine sebep olmuştur. Kentsel katı atıklarda danelerin kilitlenmesinden meydana gelen zahiri kohezyon yıllanma etkisi sonucu dane boyutlarının daha küçük hale gelmesi ve organik madde miktarındaki azalma nedeniyle azalmaktadır.

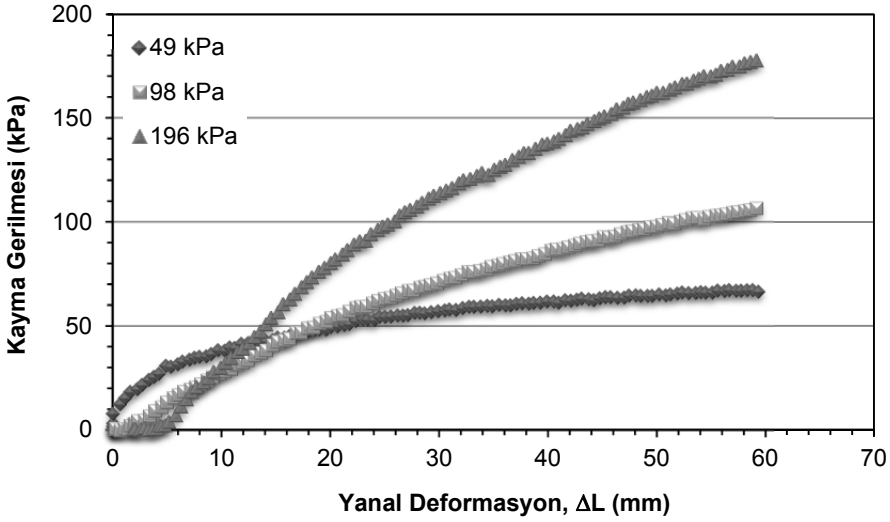
7.1.2.2 Yıllanmanın U-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi:

Yıllanma etkisinin U-1 kompozisyonundaki numunelerin kayma mukavemeti üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla büyük ölçekli direk kesme deneyleri yapılmıştır. Numuneler içerisindeki organik madde içeriğinin zaman içerisindeki değişiminin belirlenebilmesi için günlük, üç aylık ve 12 aylık organik madde değerleri belirlenmiştir (Çizelge 2.4). U-1 kompozisyonunda hazırlanan numuneler büyük plastik variller içerisinde 12 ay boyunca dış ortama bırakılmış bu süre sonunda numuner üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde su içeriği değeri %93, organik madde değeri %47 olarak belirlenmiştir (Şekil 7.49).

Şekil 7.49 U-1 kompozisyonundaki yıllanmış KKA numunesi görünümü

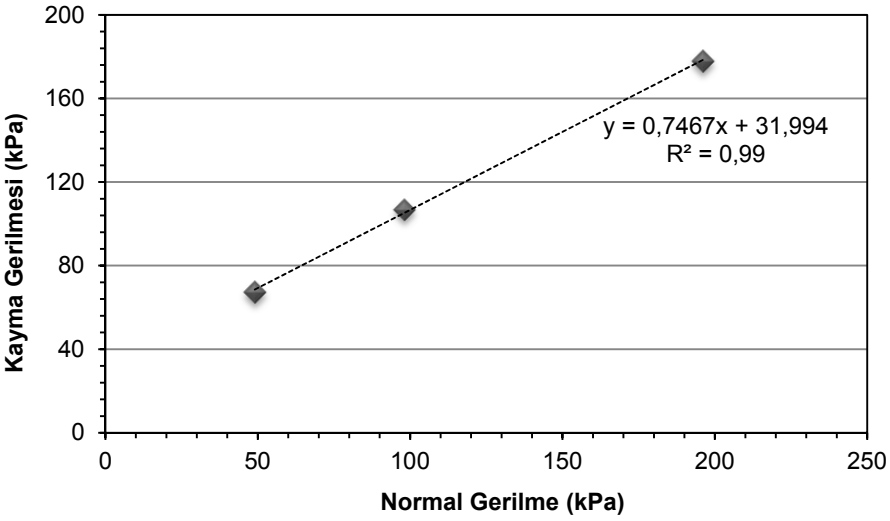
U-1-Y numunesi kesme kutusunun içerisine her birine Standart Proctor tokmağı ile 100 darbe yapılan beş eşit katmanda yerleştirilmiştir. Direk kesme kutusunun içerisindeki U-1-Y numunesinin deney başlangıç b.h.a. değeri 10,05 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Üç farklı normal gerilme değeri uygulanarak (49 – 98 – 196 kPa) gerçekleştirilen direk kesme

deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi – yanal deformasyon ilişkisini gösteren grafik Şekil 7.50'de verilmiştir.



Şekil 7.50 Yıllanmış U-1-Y numunesi τ – ΔL ilişkisi

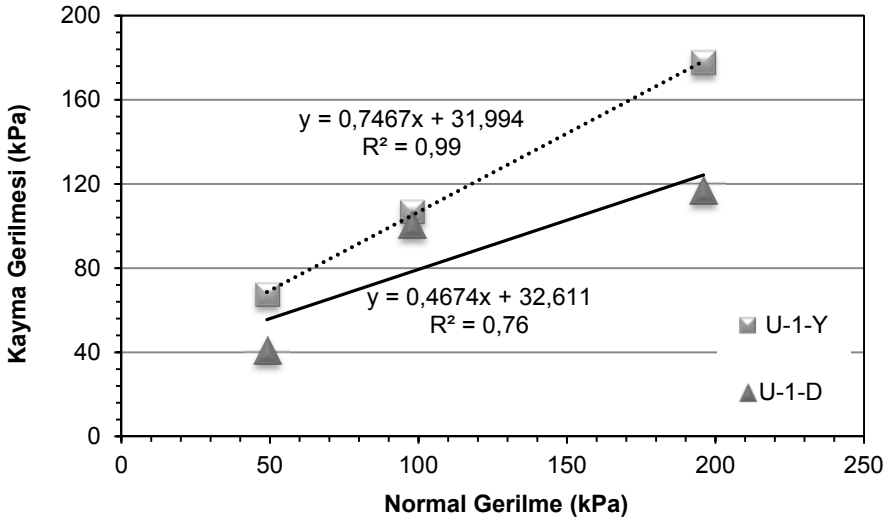
Şekil 7.50'den görüleceği üzere yıllanmış U-1-Y numunesinde de belirgin bir maksimum (pik) kayma gerilmesi değeri yoktur. U-1-Y numunesine ait üç farklı normal gerilme değeri ve bu normal gerilme değerlerine karşılık gelen maksimum kayma gerilmesi değerleri Şekil 7.51'de bir araya getirilmiştir.



Şekil 7.51 E-1-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Tamamlanan büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda U-1-Y numunesi için efektif içsel sürtünme açısı 36,7°, efektif kohezyon değeri 32 kPa olarak belirlenmiştir.

Doğal su içeriğinde (%40), günlük olarak üretilen U-1-D numunesi ile 12 ay süresince dış ortam koşullarına bırakılmış U-1-Y numunesine ait kayma zarfları Şekil 7.52'de karşılaştırılmalı olarak görülmektedir.



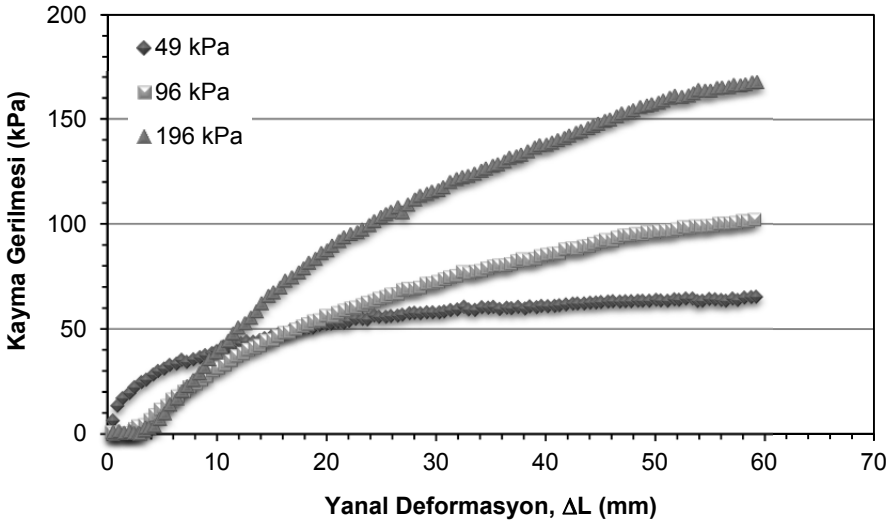
Şekil 7.52 U-1 kompozisyonundaki yıllandırılmış ve günlük numunelerin kayma zarfları

İki numuneye ait kayma zarfları karşılaştırıldığında U-1-Y numunesinin efektif içsel sürtünme açısının, U-1-D numunesine kıyasla daha büyük değer aldığı görülmektedir ($\varnothing_{U\text{-}1\text{-}Y}$ = 36,7° > $\varnothing_{U\text{-}1\text{-}D}$= 25,1°). Numunelerin efektif kohezyon değerlerinin hemen hemen birbirine eşit olduğu Şekil 7.52'den görülmektedir. Geçen zaman içerisinde organik madde miktarının azalmış olması buna karşılık metal ve plastik gibi kayma mukavemetini olumlu etkilediği düşünülen malzemelerin kompozisyon içerisindeki oranının yükselmesi kayma mukavemetini olumlu etkilediği bu sebeple yıllanmış numunenin taze numuneye oranla daha yüksek kayma mukavemeti parametrelerine sahip olduğu görülmektedir.

7.1.2.3 Yıllanmanın T-1 kompozisyonunun Kayma Mukavemetine Etkisi

Yıllanma etkisinin T-1 kompozisyonundaki KKA numunelerinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla doğal su içeriğinde (w = %62) üretilen T-1-D numunesi ile 12 ay boyunca dış ortam koşullarına bırakılmış T-1-Y numunelerinin büyük ölçekli direk kesme deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

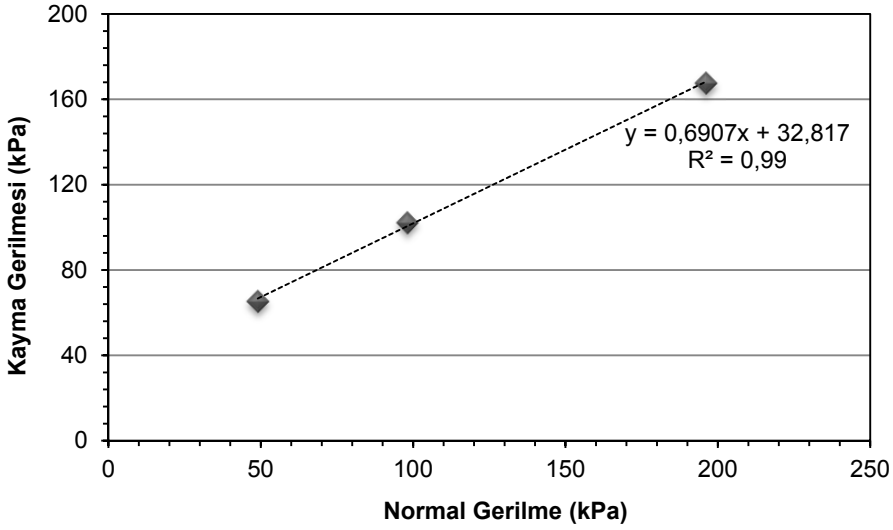
T-1-Y numunesi üzerinde yapılan laboratuvar deneyleride su içeriği %115, organik madde içeriği %52 olarak belirlenmiştir (Çizelge 2.4). Günlük (taze) olarak hazırlanmış T-1-D numunesinin organik madde miktarının %65 olduğu göz önüne alındığında 12 ay süresince organik madde miktarında %20'lik bir azalma olduğu görülmektedir. Büyük ölçekli direk kesme deneyinde sıkıştırma işlemi sonucunda T-1-Y numunesine ait başlangıç birim hacim ağırlığı değeri yaklaşık 10,0 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Üç farklı normal gerilme değeri altında oluşan yanal deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşılık gelen kayma gerilmeleri Şekil 7.53'te görülmektedir.



Şekil 7.53 Yıllanmış T-1-Y numunesi τ – ΔL ilişkisi

Şekil 7.53'ten görüleceği üzere 49 kPa'lık normal gerilmenin uygulandığı ilk sette küçük yanal deformasyonlarda 98 kPa ve 196 kPa'lık normal gerilme değerlerine kıyasla daha büyük kayma gerilmesi değerleri meydana gelmiştir (ε < %5). Bu durumun oluşmasındaki temel nedenin hazırlanan numunenin ilk sette (49 kPa) diğer setlere oranla daha az örselenmiş bir kayma yüzeyine sahip olması düşünülmektedir. Yıllanmış T-1-Y numunesinin de belirgin bir maksimum (pik) kayma gerilmesi değeri yoktur. Yanal deformasyon artışına paralel olarak kayma gerilmesi artış göstermektedir.

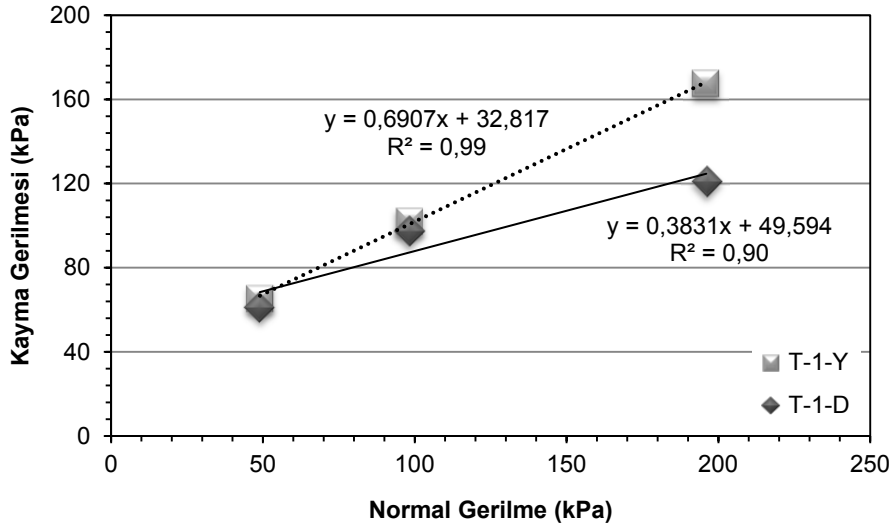
T-1-Y numunesine ait üç farklı normal gerilme değeri ve bu normal gerilme değerlerine karşılık gelen maksimum kayma gerilmesi değerleri Şekil 7.54'te bir araya getirilmiş ve alan düzeltmesi yapılmamış Mohr - Coulomb kayma zarfı oluşturulmuştur.



Şekil 7.54 T-1-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Tamamlanan büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda T-1-Y numunesi için efektif içsel sürtünme açısı 34,6°, efektif kohezyon değeri 32,8 kPa olarak belirlenmiştir.

Yıllanma etkisinin T-1 kompozisyonundaki taze ve yıllanmış KKA numunelerinin kayma zarfları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.55'te gösterilmektedir.



Şekil 7.55 T-1 kompozisyonundaki yıllandırılmış ve günlük numunelerin kayma zarfları

Yıllanmış ve taze numunelerin efektif içsel sürtünme açıları karşılaştırıldığında, yıllanmış numuneye ait kayma açısının taze numuneye oranla çok daha büyük değer aldığı görülmektedir ($\varnothing_{T\text{-}1\text{-}Y}$ = 34,6° > $\varnothing_{T\text{-}1\text{-}D}$= 20,9°). Buna karşılık iki numunenin efektif kohezyon

değerleri karşılaştırıldığında taze numunenin 49,6 kPa ‘lik kohezyon değerine karşılık yıllanmış numunenin kohezyon değerinin daha düşük (32,8 kPa) olduğu görülmektedir.

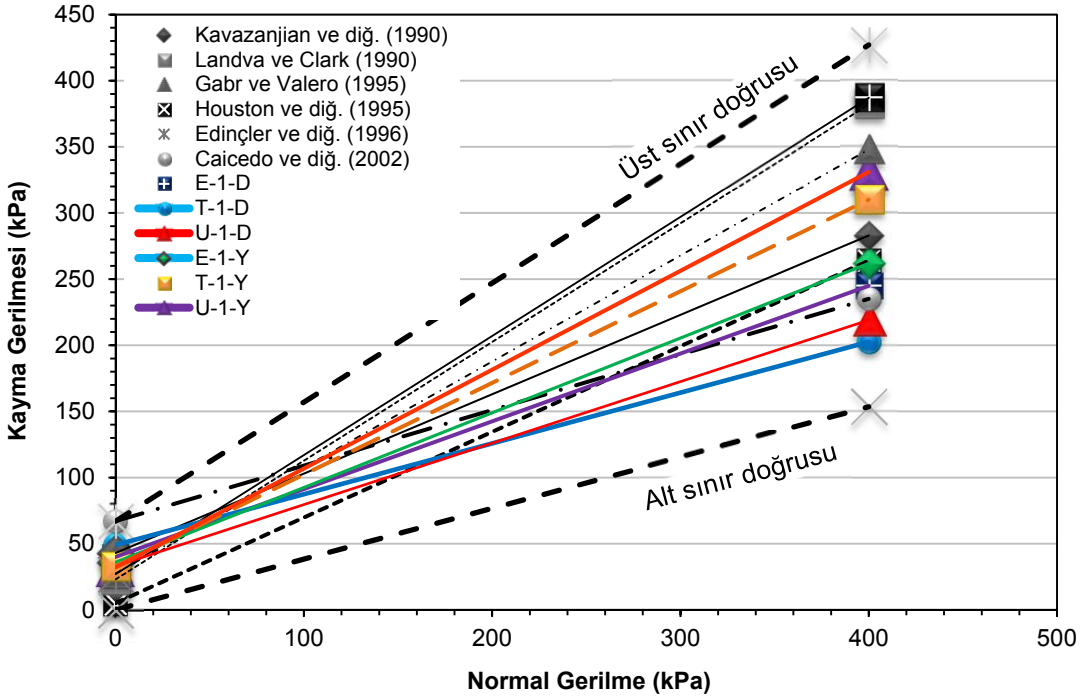
Genel olarak sonuçlar incelendiğinde yıllanma etkisi ile kayma dayanımı parametrelerinde içsel sürtünme açısı artarken, kohezyon değerlerinde azalma gözlenmektedir. Bu sonuçlara paralel olarak Kölsch (1996) taze atıkların içsel sürtünme açılarının, yıllanmış atıklardan daha küçük olduğunu belirlemiştir. Taze ve yıllanmış atıklar üzerinde yaptığı çekme deneylerinde taze atıklarda güçlendirici etki yapan bileşenlerin (kağıt, karton, plastik, tekstil) yıllanmış numuneye göre daha etkin rol oynadığını belirlemiştir. Yıllanma etkisiyle güçlendirici atık malzemelerin etkilerinin azalmasına rağmen sürtünme kuvvetlerinin artışıyla daha dirençli yapıya sahip olduklarını belirtmiştir. Yine bu görüşlere benzer olarak Oweis (1993) yıllanma sonucu birim hacim ağırlıktaki değişimler sonucunda katı atık iskeletinin daha sıkı ve güçlü bir hale geldiğini belirtmektedir. Yıllanmaya bağlı olarak kohezyon değerindeki azalmanın nedeni ise kilitlenme etkisi (interlocking) yapan malzemlerin zaman içerisinde özelliklerini yitirmesidir. Elde edilen sonuçlar ışığında zahiri kohezyon değeri üzerinde önemli etkisi olan organik madde miktarının zaman içerisinde azalmasına paralel olarak, kohezyon değerleri de azalmaktadır. Zahiri kohezyon değerinin azalmasında bir diğer etki ise yıllanma sonucunda dane boyutlarında oluşan küçülmeler nedeniyle nedeniyle daneler arası kilitlenmede (interlocking) meydana gelen azalmadır.

Üç kompozisyona ait doğal ve yıllanmış numunelerin kayma mukavemeti parametrelerinde meydana gelen değişiklikler incelendiğinde, en büyük farklılıkların T-1 kompozisyonuna ait olduğu belirlenmiştir. T-1-D numunesinin içsel sürtünme açısı yıllanma etkisi sonucunda %65’lik bir artış yaparken, kohezyon değerinde %34’lük bir düşüş gözlemlenmiştir. Yıllanmanın kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi U-1 kompozisyonunda da önemli değişikliklere sebep olmuş yıllanmış numunenin içsel sürtünme açısı doğal numuneye kıyasla %46 artmış, kohezyon değeri %2 azalmıştır. Yıllanmanın E-1 kompozisyonunun kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi diğer iki kompozisyona kıyasla daha düşük kalmıştır. Yıllanmış numunenin içsel sürtünme açısı değeri doğal numuneye kıyasla %10 artmış, kohezyon değeri %9 azalmıştır (Çizelge 7.7).

Çizelge 7.7 Sentetik KKA numunelerinin kayma mukavemeti özellikleri

No	Kompo.	Özellik	Normal gerilme değerleri (kPa)			Kayma mukavemeti parametreleri	
			49 kPa	98 kPa	196 kPa	∅ (°)	c (kPa)
			Maksimum kayma gerilmeleri (kPa)				
1	E-1-D	Kuru	69,4	103,5	161,1	27,1	40,3
2	E-1-I	Doygun	61,4	96,6	138,8	31,8	40,6
3	E-1-Y	Yıllanmış	60,7	96,8	145,4	29,4	36,4
4	E-1-1	Optimum	57,6	90,2	124,4	23,7	40,5
5	E-1-2	Optimum	68,9	121,2	172,5	34,2	43,3
6	E-1-K	Optimum	67,5	105,5	177,8	36,8	31,4
7	E-1-M	Optimum	68,9	117,3	170,4	33,8	42,3
8	T-1-D	Kuru	61,3	97,8	121,1	20,9	49,6
9	T-1-I	Doygun	62,2	103,4	129,8	23,4	49,0
10	T-1-Y	Yıllanmış	65,5	102,3	167,6	34,6	32,8
11	T-1-1	Optimum	54,1	82,9	108,8	19,6	41,2
12	T-1-2	Optimum	65,6	102,8	167,4	34,5	33,3
13	T-1-K	Optimum	65,8	99,6	159,5	32,4	35,9
14	T-1-M	Optimum	61,6	93,2	145,7	29,5	35,4
15	U-1-D	Kuru	40,6	100,7	116,8	25,1	32,6
16	U-1-I	Doygun	60,5	96,6	144,3	29,2	36,6
17	U-1-Y	Yıllanmış	67,5	106,8	177,8	36,8	32,0
18	U-1-1	Optimum	67,1	106,7	171,0	35,0	35,0
19	U-1-2	Optimum	59,9	96,8	142,7	28,8	37,0
20	U-1-K	Optimum	60,5	94,6	141,9	28,5	36,8
21	U-1-M	Optimum	61,4	94,4	138,8	27,3	39,2

Elde edilen tüm sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde yıllanmanın kompozisyonların içsel sürtünme açılarında artışa, kohezyon değerlerinde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Bu durum kompozisyonlar içerisinde önemli yüzdeye sahip organik madde miktarının yıllanma sonucu ayrışıp azalması ve daha mukavemetli malzemelerin kompozisyon içerisindeki yüzdelerinin artmış olmasıyla ilişkilidir. Yine yıllanma sonucu organik atık miktarının azalması kohezyon değerinin üç kompozisyon içinde azalmasına neden olmuştur.



Şekil 7.56 Bu çalışmadan elde edilen kayma zarflarının literatürdeki verilerle karşılaştırılması

Şekil 7.56'dan görüldüğü üzere literatürden elde edilen kayma zarfları ile bu çalışmadan elde edilen kayma zarfları karşılaştırıldığında sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

7.2 Doğal Kentsel Katı Atıkların Kayma Dayanımı

Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan doğal atık numuneler üzerinde bilgisayar kontrollü büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sentetik numunelerin direk kesme deneylerine benzer şekilde doğal atıkların direk kesme deneyleri de kendi içerisinde taze ve yıllanmış olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Direk kesme deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla doğal ortamından alınan numuneler atık dane boyu sınırlamalarına uygun şekilde eleklerden elenerek, deney standartlarına uymayan büyük daneler bertaraf edilmiştir.

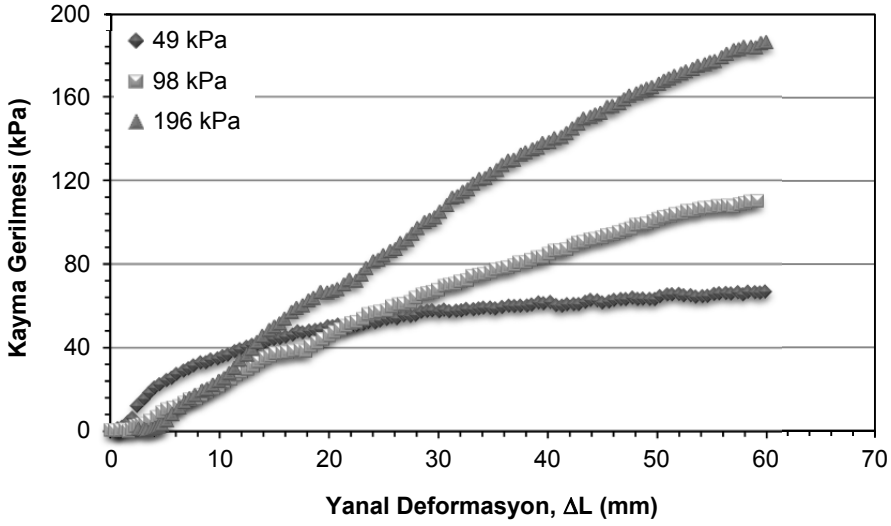
7.2.1 Doğal Taze Kentsel Katı Atıkların Kayma Dayanımı

Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze KKA numuneleri (Manisa Doğal Taze, M-D-T) su içeriği değişmeyecek şekilde naylon poşetler içerisinde Celal Bayar Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilmiştir. Doğal taze KKA numunelerin temel fiziko kimyasal özellikleri belirlendikten sonra büyük ölçekli direk

kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha önceki bölümlerde de değinildiği üzere ASTM-D 3080-11 (2011) standartında belirtilen maksimum dane boyu sınırlamalarına uyularak numuneler özel üretilmiş büyük boyutlu eleklerden elenerek direk kesme hücresine yerleştirilmiştir (Şekil 7.57).

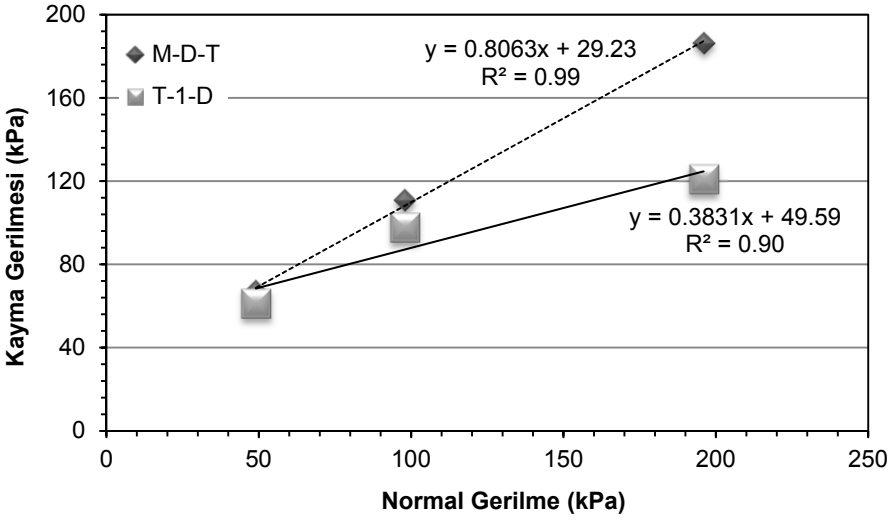
Şekil 7.57 Kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş M-D-T numunesinden görünüm

Doğal taze KKA numunesinin sıkıştırma işleminden sonra deney başlangıç birim hacim ağırlığı 11,0 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Üç farklı normal gerilme değeri altında oluşan yanal deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşılık gelen kayma gerilmeleri Şekil 7.58'de görülmektedir. Sentetik KKA numunelerine benzer şekilde doğal KKA numunelerinde de belirgin bir maksimum kayma gerilmesi değerinin olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple yanal eksenel deformasyonun %20'ye ulaştığı 60 mm 'lik yanal deplasmanda direk kesme deneyi sonlandırılmıştır.



Şekil 7.58 Doğal taze M-D-T numunesi τ – ΔL ilişkisi

Maksimum kayma gerilmeleri ve bu değerlere karşılık gelen normal gerilmeler işaretlenerek en uygun doğru geçirilmiş ve numunenin kayma zarfı oluşturulmuştur. Manisa doğal taze (M-D-T) ve T-1-D KKA numunelerine ait kayma zarfları Şekil 7.59'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.59 M-D-T ve T-1-D numuneleri kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneyi sonucunda M-D-T KKA numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 38,9°, efektif kohezyon değeri 29,2 kPa olarak elde edilmiştir. M-D-T numunesine ait içsel sürtünme açısı değeri T-1-D numunesine kıyasla çok daha büyük değer almıştır ($\varnothing_{M\text{-}T}$ = 38,9° > $\varnothing_{T\text{-}1\text{-}D}$ = 20,9°). Bu durumun oluşmasında M-D-T numunesinin T-1-D

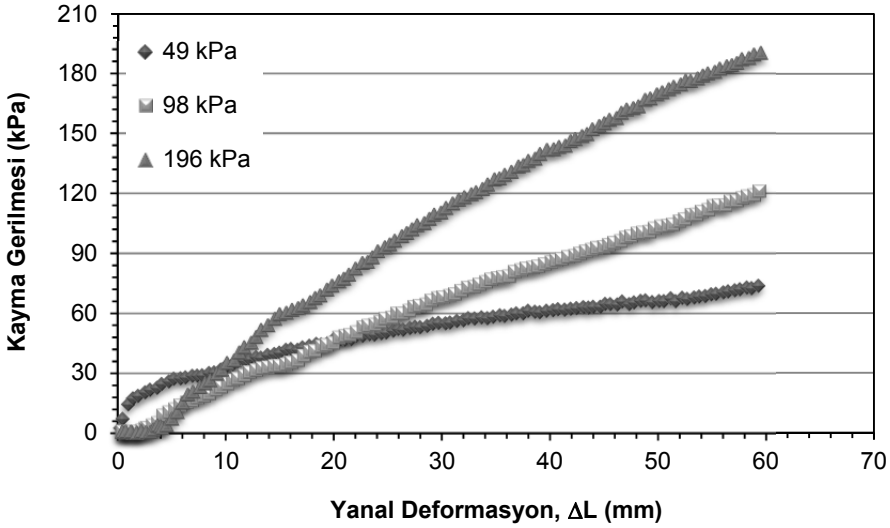
numunesine kıyasla çok daha büyük dane boyu dağılımına sahip olması rol oynamıştır. Doğal ortamdan alınan M-T numunesi çeşitli ayıklama ve eleme işlemlerinden geçirilmiş olsa da T-1-D numunesinden daha büyük daneler içermektedir. Langer (2005) doğal atıklarda kayma zarfını oluşturan noktaların sentetik atıklara kıyasla daha doğrusal bir yol izlediğini belirtmiştir. Sentetik T-1-D ve doğal M-D-T numunelerine ait kayma zarfları da incelendiğinde doğal M-D-T numunesine ait kayma zarfı noktalarının daha doğrusal bir yol izlediği görülmektedir (Şekil 7.59)

7.2.2 Doğal Yıllanmış Kentsel Katı Atıkların Kayma Dayanımı

Doğal taze KKA numuneler ile gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneylerinden sonra, Manisa ili vahşi atık depolama sahasından alınan doğal yıllanmış KKA numuneleri üzerinde direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Atık depolama sahasından su içeriği değişmeyecek şekilde laboratuvara getirilen numunenin eleme işlemleri yapılarak deneylerde kullanılamayacak daneler bertaraf edilmiştir. Sonrasında doğal yıllanmış KKA numunesinin temel fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Diğer tüm büyük ölçekli direk kesme deneylerinde uygulanan sıkıştırma süreci doğal yıllanmış KKA numunesi içinde uygulanmıştır (Şekil 7.60). Doğal yıllanmış KKA numunesinin deney başlangıcındaki birim hacim ağırlığı 12,5 kN/m^3 olarak belirlenmiştir.

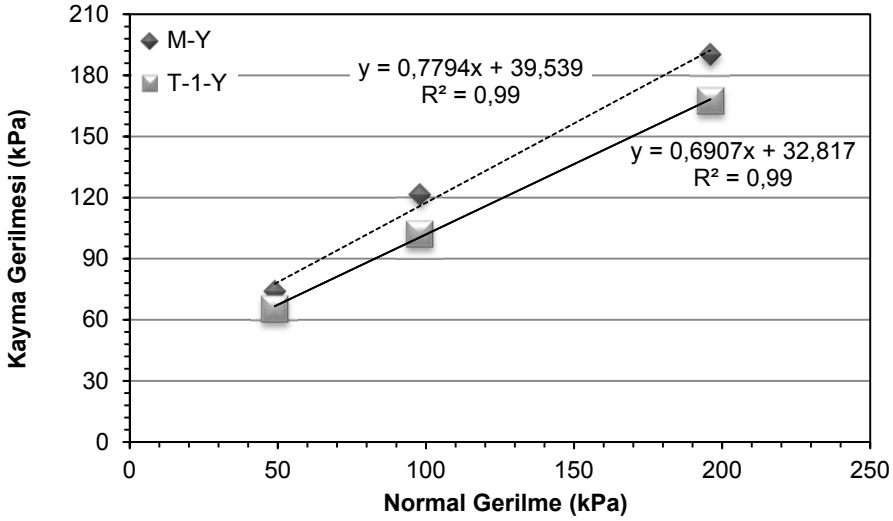
Şekil 7.60 Kesme kutusu içerisine yerleştirilmiş M-D-Y numunesinden bir görünüm

Üç farklı normal gerilme değeri altında oluşan yanal deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşılık gelen kayma gerilmeleri Şekil 7.61'de görülmektedir.



Şekil 7.61 Doğal yıllanmış M-D-Y numunesi $\tau - \varepsilon$ ilişkisi

Maksimum eksenel deformasyona karşılık gelen maksimum kayma gerilmeleri belirlendikten sonra Manisa yıllanmış (M-D-Y) ve T-1-Y numunelerinin kayma mukavemeti zarfları Şekil 7.62'de bir araya getirilmiştir.



Şekil 7.62 Doğal yıllanmış M-D-Y numunesi kayma gerilmesi – normal gerilme ilişkisi

Şekil 7.62'den görüldüğü üzere Manisa doğal yıllanmış KKA numunesinin efektif içsel sürtünme açısı 37,9°, efektif kohezyon değeri 39,5 kPa olarak elde edilmiştir. Benzer

kompozisyondaki T-1-Y numunesi ile M-D-Y numunesinin kayma mukavemeti parametreleri karşılaştırıldığında taze numunelere kıyasla birbirlerine daha yakın değer aldıkları gözlemlenmiştir. M-D-Y numunesi, T-1-Y numunesine kıyasla içsel sürtünme açısında %20, kohezyon değerinde de %10 daha büyük değerlere ulaşmıştır. Bu durumun oluşmasında doğal atık numunelerin sentetik numunelere kıyasla daha büyük dane boyu dağılımına sahip olması rol oynamıştır.

Doğal KKA numuneler kullanılarak yapılan direk kesme deneyleri incelendiğinde efektif içsel sürtünme açılarının sentetik numunelerden daha büyük değer aldığı görülmektedir. Bunun en büyük nedeninin doğal KKA numunelerin sahip olduğu daha iri danelerden oluşan granülometri özelliğinden kaynaklanmaktadır. Doğal ve sentetik numunelerin kohezyon değerleri karşılaştığında arada çok büyük bir farklılık gözlenmemiştir. Tamamlanan deneyler sonucunda gerek sentetik gerekse doğal atıkların içerdiği yüksek organik madde içeriğine bağlı olarak yüksek kabul edilebilecek kohezyon değerleri elde edilmiştir.

Kentsel katı atık numunelerinin büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda elde edilen yatay-düşey deformasyon ilişkileri Ek.IV'te verilmiştir.

8. KENTSEL KATI ATIKLARIN ŞEV DURAYLILIK ANALİZLERİ

Atık depolama sahasına getirilen kentsel katı atıklar belirli bir şev geometrisi ile zaman içerisinde yüksekliği artarak depolanırlar. Depolama işleminin insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek, ekonomik kayıplara neden olmayacak ve düzenli depolama sahasının işleyişini bozmayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Maksimum depolama yüksekliğinin ve depolama açısının (şev açısı) doğru belirlenmemesi, gerekli önlemlerin alınmaması geçmişte birçok büyük facianın gerçekleşmesine neden olmuştur. Filipinlerin Patayas bölgesindeki atık depolama sahasında 2000 yılında meydana gelen göçme, Yunanistan'ın Ano Liossia atık sahasında 2003 yılındaki atık kayması ve Endonezya'nın Leuwigajah atık depolama sahasında 2005 yılında meydana gelen şev göçmeleri atık şevinin duraylılığı konusuna daha çok önem verilmesine neden olmuştur.

Bu bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak KKA'ların gerçekleştirilen duraylılık analizleri sonuçları verilmiştir. Duraylılık analizlerinde sonlu farklar metodu üzerine geliştirilmiş, birçok geoteknik konusunda kapsamlı analizlerin yapılabildiği FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) programının iki boyutlu 7.0.419 versiyonu kullanılmıştır. FLAC programı zemin, kaya ve benzer malzemelerin ileri geotekniksel analizlerinin yapılabildiği iki boyutlu bir sayısal modelleme programıdır. Bu program ile zemin, kaya ve benzer malzemelerin göçme sınırına ulaştıkları andaki plastik davranışları modellenebilmektedir. FLAC-Slope programı şev duraylılık hesaplamalarında kullanılan gelenekselleşmiş limit denge metotlarına bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Geleneksel metot hesaplamalarında dilimler arası kuvvetler, bunların etki noktaları ve açıları gibi bir çok kabul yaparak çözüme gidilmektedir. FLAC-Slope ise dayanım azaltma tekniği (strength reduction technique)'ni kullanarak adım adım sonuca ulaşmaktadır. Şev içerisindeki kritik kayma yüzeyi binlerce potansiyel kayma yüzeyinin arasından kayma mukavemetinin adım adım azaltılmasıyla belirlenmektedir. Böylece analizlerde belirlenmiş bir kayma yüzeyinin güvenlik sayısı yerine şev geometrisi içerisindeki en güvensiz kayma yüzeyinin en düşük güvenlik sayısı belirlenmiş olmaktadır. FLAC-Slope eğer koşullar gerektiriyorsa çoklu ya da karmaşık kayma yüzeyleri belirleyerek bunların analizini de yapabilmektedir. Gelenekselleşmiş denge denklemleri sadece kuvvetleri göz önüne alırken, FLAC-Slope kinematik olarak oluşması mümkün tüm mekanizmaları kapsamaktadır (Flac 2-D, 2012).

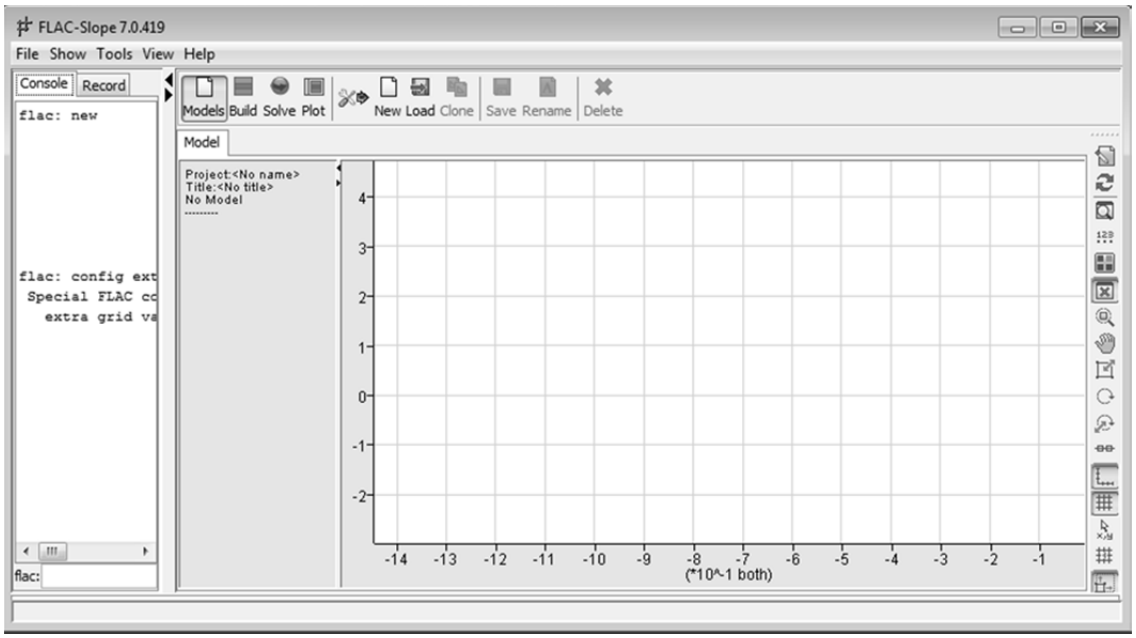
Düzenli atık depolama sahalarının şev duraylılık analizlerinde ilk olarak farklı şev açılarında oluşturulan modellerin güvenlik sayıları belirlenmiştir. Farklı kompozisyonlardaki KKA numunelerinin bir düşey iki yatay (1V/2H) ve bir düşey üç yatay (1V/3H) eğimlerindeki şev

gövdelerinin duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı şev eğiminde gerçekleştirilen analizler ince, orta ve iri olmak üzere üç farklı ağ gözü (mesh) kullanılarak yapılmış ve aradaki farklılıklar belirlenmiştir.

Depolama sahalarının uzun yıllar boyunca hizmet verebilmesi ve ekonomik olarak daha fazla kazanç sağlaması bakımından depolama yüksekliğinin olabildiğince yüksek olması istenmektedir. Depolama yüksekliğinin şev durayllılığına etkisinin incelenmesi amacıyla aynı kompozisyon ve kayma dayanımı parametrelerine sahip iki farklı yükseklikteki (20m ve 40m) şev modellerinin analizi yapılmıştır. KKA'ların mühendislik özelliklerinin zaman içerisinde önemli ölçüde değişiklik gösterebildiği bilinmektedir. Yıllanma etkisinin KKA'ların duraylılık analizlerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla şev gövdesi iki farklı katmana ayrılmış ve alt katman yıllanmış numunelerden, üst kısım taze numunelerden oluşacak şekilde modellenmiştir. Üç farklı kompozisyonun herbiri için oluşturulan üç modelin güvenlik sayıları belirlenmiştir. FLAC-Slope şev geometrileri için basit şev modeli (tek bir şev), iki katlı, üç katlı ve daha fazla şevin bulunduğu modelleri oluşturabilmektedir. Şev kademe sayısının duraylılık analizi üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla basit (tek şevli) ve iki şevli modellerin analizleri yapılarak güvenlik sayıları karşılaştırılmıştır. Son olarakta yeraltı suyunun şev gövdesinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla farklı kotlarda yeraltı su seviyesi tanımlanmış ve şevlerin duraylılık analizleri yapılmıştır.

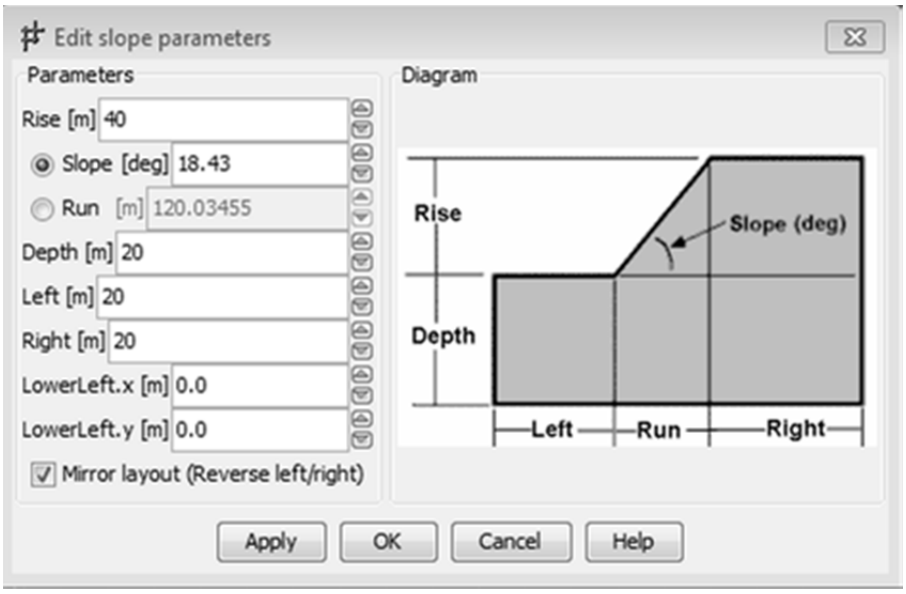
8.1 Şev Modellerinin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen şev duraylılık analizlerinde FLAC 2D programının FLAC-Slope 7.0.419 modülü kullanılmıştır. Model; kullanılacak yapısal elemanlar, yeraltı su seviyesi, modeldeki ara yüzeyler, standardın dışındaki yerçekimi kuvveti, hesaplamalarda devredışı bırakmak istenilen alanlar ve asimetrik model özelliklerinin opsiyonlu olarak seçilmesine olanak sağlar. Geometrik modelin oluşturulacağı çizim alanı aralıkları isteğe göre ayarlanabilen gridlere (karelaj) ayrılmıştır (Şekil 8.1).



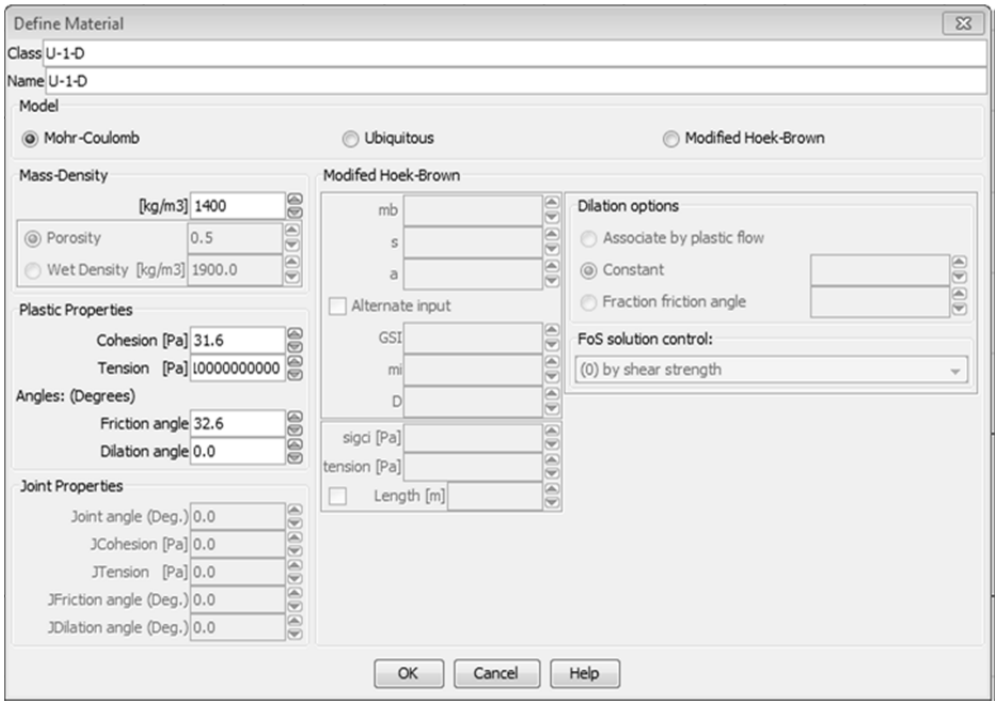
Şekil 8.1 FLAC-Slope 7.0.419 ana penceresi

Şev modeli, şevin üst kısım uzunluğu (right), alt kısım uzunluğu (left), şev derinliği (depth) ve şev açısı belirlenir. Şekil 8.2'de görüldüğü gibi şev sağdan sola eğimli kullanılabileceği gibi, "Mirror layout" kutucuğu tıklanarak şev geometrisi ters çevrilebilir.



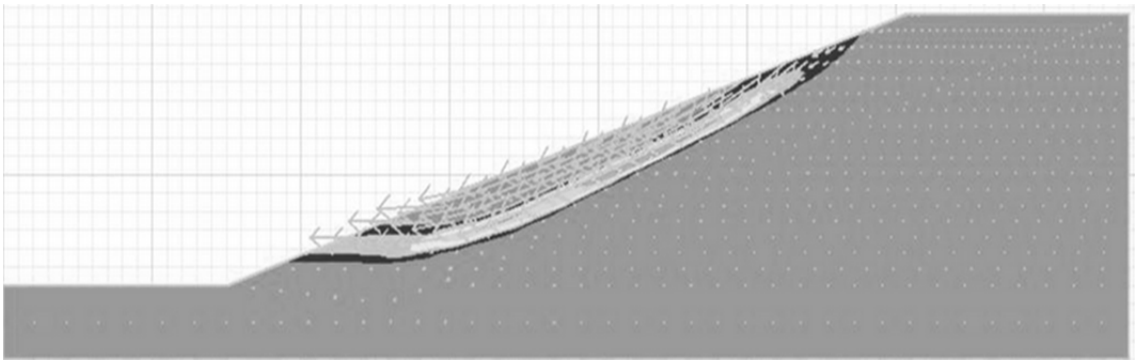
Şekil 8.2 Şev geometrisi parametrelerinin belirlenmesi

Şevin geometrisi tamamlandıktan sonra kullanılacak malzemelerin tanımlanması işlemine geçilir. (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 Malzeme modelleri ve malzeme tanımlama parametreleri

Modellenen şevin analizi sonucunda elde edilen gerilme dağılım grafiği Şekil 8.4'te görülmektedir. Maksimum gerilmelerin oluştuğu bölgeler kırmızı renkle ifade edilirken sarı ve yeşil bölgelerde oluşan gerilmeler daha düşüktür.



Şekil 8.4 Modellenen şev gövdesindeki gerilme dağılışı

8.2 Farklı Mühendislik Özelliklerindeki Şevlerin Duraylılık Analizleri

Depolama sahalarında muhafaza edilen KKA şevlerinin duraylılığını etkileyen bir çok farklı parametre bulunmaktadır. Gerçekleştirilen analizler kapsamında şev açısı, birim hacim ağırlık, yıllanma etkisi, kompozisyon etkisi, kayma mukavemeti parametreleri, analizlerde seçilen ağ özellikleri, geometrik çeşitlilikler duraylılığı etkileyen önemli parametreler olarak seçilmişlerdir. Analizler tüm bu değişkenlerin kombinasyonlu olarak değiştirilmesi ile yapılmış, parametrelerin duraylılık üzerindeki etkisi incelenmiştir.

8.2.1 Şev Açısının Şev Duraylılığı Üzerindeki Etkisi

Depolama sahasına getirilen KKA'lar çeşitli işlemlerden geçirildikten sonra belirlenen açılar ile depolanırlar. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda bu eğimlerin 15° ile 45° arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Huvaj-Sarihan ve Stark, 2008; Kölsch, 2007, 2009; Stark ve diğ., 2000). Yapılan araştırmalarda dünya genelinde karşılaşılan bazı vahşi atık depolama sahalarında şev eğiminin olması gerekenden çok daha büyük olduğu belirlenmiş, ancak bunlar çok büyük tehlike yarattığı için analizlerde kullanılmamıştır.

Gerçekleştirilen duraylılık analizlerinde 1 birim düşey 2 birim yatay (α=26,56°) ve 1 birim düşey 3 birim yatay (α=18,43°) olmak üzere iki farklı şev açısı kullanılmıştır. Analizler sırasında KKA'ların birim hacim ağırlık değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Dünya genelinde doğal KKA numuneler ile yapılan çalışmalarda KKA'ların birim hacim ağırlık değerinin 4 kN/m^3 ile 19 kN/m^3 arasında değiştiği görülmektedir. Şüphesiz gerek alt limit gerek ise üst limit normal koşullarda karşılaşılacak birim hacim ağırlık değerlerinin çok uzağında kalmaktadır. Laboratuvar ortamında doğal ve sentetik numuneler ile yapılan deneysel çalışmalarda KKA'ların birim hacim ağırlık değerinin 7 kN/m^3 ile 14 kN/m^3 arasında değiştiği görülmüş ve şev duraylılık analizlerinde bu değerlerin alt ve üst sınır değerler olarak kullanılması uygun görülmüştür. KKA'ların duraylılık analizlerinde en önemli parametreler kayma mukavemeti parametreleridir (Ø: içsel sürtünme açısı, c: kohezyon). Duraylılık analizleri iki farklı şev açısında, iki farklı birim hacim ağırlık değerinde, iki farklı zaman faktöründe (taze ve yıllanmış) ve üç farklı kompozisyonda incelenmiş toplam 24 farklı analizi içermektedir. Bunlara ek olarak iri, orta ve ince olmak üzere üç farklı ağ sıklığının güvenlik sayısına etkisi de araştırılmıştır.

Çizelge 8.1'de birim hacim ağırlık (b.h.a.), şev açısı, kompozisyon, yıllanma etkisi ve ağ boyutu değişkenlerinden yararlanılarak oluşturulmuş modellerde ile yapılan analizler sonucu elde edilen güvenlik sayılarını gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlardan ağ sıklığının güvenlik

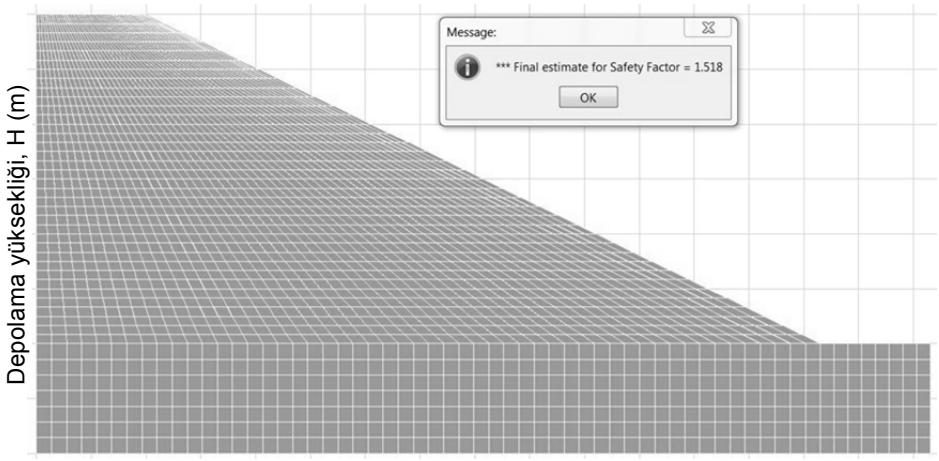
sayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde, iri ağlardan oluşturulan modellerin gerçekleştirilen analizlerin hemen hemen tamamında daha yüksek güvenlik sayısına sahip olduğu görülmüştür. Orta ve ince sıklıkta ağlardan oluşturulan modellerin güvenlik sayıları incelendiğinde değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkılarak aynı zamanda KKA şev modellerinin karmaşık yapıda olmaması ve içerisinde yapısal eleman bulundurmaması da göz önüne alındığında güvenlik sayılarının orta (medium) ağ ile yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 8.1 Farklı mühendislik parametreleri ile modellenmiş şevlerin güvenlik sayıları

No	Şev eğimi	Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Yıllanma etkisi	Komp.	Kayma mukav. parametreleri		GS (İri)	GS (Orta)	GS (İnce)
					ϕ' (°)	c' (kPa)			
1	1V/3H α=18,43°	7	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	4,56	4,48	4,45
2				E-1-D	27,1	40,3	4,67	4,58	4,54
3				U-1-D	25,1	32,6	4,03	3,95	3,91
4			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	4,99	4,89	4,85
5				E-1-Y	29,4	36,4	4,68	4,58	4,54
6				U-1-Y	36,8	32,0	5,19	5,08	5,03
7		14	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,18	3,11	3,08
8				E-1-D	27,1	40,3	3,44	3,36	3,33
9				U-1-D	25,1	32,6	3,00	2,94	2,91
10			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,89	3,79	3,75
11				E-1-Y	29,4	36,4	3,52	3,44	3,40
12				U-1-Y	36,8	32,0	4,09	3,98	3,9
13	1V/2H α=26,56°	7	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,83	3,77	3,75
14				E-1-D	27,1	40,3	3,81	3,72	3,69
15				U-1-D	25,1	32,6	3,25	3,18	3,15
16			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,93	3,83	3,80
17				E-1-Y	29,4	36,4	3,76	3,67	3,64
18				U-1-Y	36,8	32,0	4,04	3,95	3,91
19		14	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	2,56	2,49	2,47
20				E-1-D	27,1	40,3	2,66	2,60	2,58
21				U-1-D	25,1	32,6	2,29	2,25	2,23
22			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	2,90	2,82	2,79
23				E-1-Y	29,4	36,4	2,68	2,62	2,60
24				U-1-Y	36,8	32,0	3,03	2,91	2,92

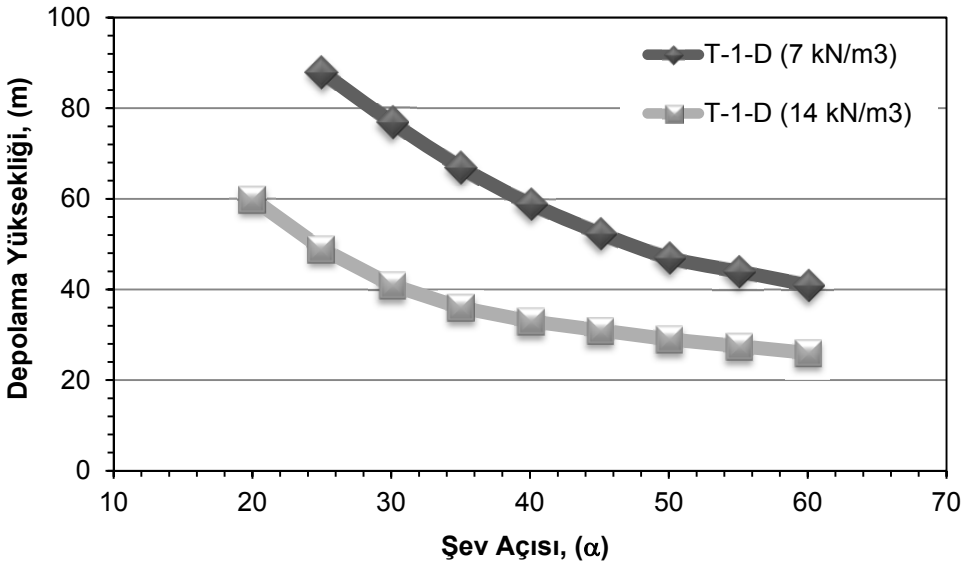
Çizelge 8.1'den görüldüğü üzere belirlenen kayma mukavemeti parametreleri, birim hacim ağırlık değerleri ve eğimlerde modellenen şevlerin güvenlik sayıları gerekenden çok daha

büyük olarak değerlendirilebilir (over design). Bu durumdan yola çıkılarak aynı kayma mukavemeti parametreleri ve birim hacim ağırlık değerleri ile modellenen şevlerin hangi yükseklik ve hangi eğimde gerekli güvenlik sayısı değerine (GS=1,5) ulaştığı incelenmiştir. Şekil 8.5'de T-1-D kompozisyonunda 14 kN/m$^{3'}$lük birim hacim ağırlık değerinde modellenmiş şevi ve analizler sonucu elde edilen güvenlik sayısını göstermektedir.



Şekil 8.5 Kritik güvenlik sayısında modellenmiş T-1-D kompozisyonu

T-1-D kompozisyonunun gerekli güvenlik sayısında, iki farklı birim hacim ağırlık değerinde (7 kN/m^3 - 14 kN/m^3) farklı depolama yüksekliği ve şev açılarında oluşturulmuş modellerinden elde edilen sonuçlar Şekil 8.6'da gösterilmektedir.



Şekil 8.6 Kritik güvenlik sayısındaki şev açılarına karşılık gelen depolama yükseklikleri

Şekil 8.6'dan görüldüğü üzere 50°'lik şev açısında 14 kN/m^3 birim hacim ağırlık değeri için yaklaşık depolama yüksekliği 30 m olurken, 7 kN/m^3 birim hacim ağırlık değerinde bu değer yaklaşık 45 m yüksekliğinde olmaktadır. Daha düşük birim hacim ağırlıktaki KKA numunesi aynı şev açılarında büyük birim hacim ağırlıklı numuneden daha büyük yüksekliklerde depolanabilmektedir. Şev açısının duraylılık üzerindeki etkisini incelendiğinde 1V/2H (α=26,56°) eğimi verilerek modellenmiş KKA şevinin, 1V/3H (α=18,43°) eğimine kıyasla analizlerin tamamında çok daha düşük güvenlik sayılarına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 8.7'de α=26,56° eğimiyle modellenmiş KKA şev geometrisi gösterilmektedir. Şev eğimi arttıkça KKA malzemelerin yüzeyindeki kayma gerilmesi de artış göstereceğinden şev gövdesinin güvenlik sayısı (GS) azalmaktadır.

Şekil 8.7 α=26,56° eğimiyle modellenmiş KKA şev geometrisi

Duraylılık analizlerinde kullanılan bir diğer önemli değişken KKA'ların birim hacim ağırlığıdır. Birim hacim ağırlık olarak 7 ve 14 kN/m^3 değerleri incelendiğinde, 7 kN/m^3 birim hacim ağırlığa sahip numunelerin iki farklı şev eğimi içinde (α=26,56° ve α=18,43°) daha yüksek güvenlik sayısı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Duraylılık analizlerinde herhangi bir dinamik kuvvetin bulunmadığı durumlarda şev gövdesi içerisindeki gerilmeler malzemelerin kendi ağırlığından kaynaklanacaktır. Bu nedenle şev gövdesinin ağırlığı ne kadar artarsa şev duraylılığı o denli azalır, güvenlik sayısı küçülür.

Yıllanma etkisinin şev duraylılığı üzerindeki etkisi incelendiğinde; T-1 ve U-1 kompozisyonlarının yıllanmış numenelerinin taze numunelerden daha yüksek şev duraylılık sayısına sahip olduğu görülmektedir. Benzer durum E-1-Y ve E-1-D numunelerinde de görülmesine karşın güvenlik sayıları arasındaki fark diğer iki kompozisyona kıyasla oldukça küçüktür. Yıllanma süresince KKA numuneler içerisindeki organik madde miktarları azalmakta, daneler arasında kimyasal ve biyolojik bağlar oluşmaktadır. Bu sayede atık

gövdesi içerisinde daneler arasında bütünlük meydana gelmektedir. Ayrıca zaman içerisinde KKA'ların içerisinde bulunan doğal su içeriği buharlaşmakta ya da süzülerek derindeki tabakalara ilerlemektedir. Böylece hem suyun etkisi ortadan kalkmakta hem de şev gövdesi hafifleyerek kaymaya karşı daha dayanımlı hale gelmektedir.

Duraylılık analizlerinden elde edilen güvenlik sayıları üç farklı kompozisyon açısından incelendiğinde taze numunelerde en büyük güvenlik sayısına E-1-D numunesi sahipken, yıllanmış numunelerde en büyük güvenlik sayısı U-1-Y numunesine ait olmuştur. Bu durum taze E-1-D kompozisyonunun lifli yapısıyla dayanım arttırıcı ve güçlendirici özelliğe sahip olan kağıt-karton atık bakımından zengin olmasından kaynaklanmaktadır. Yıllanma etkisiyle kağıt-karton atıkların yapısı bozularak yumuşamış ve direncini yitirmiş ve sonuç olarak E-1-Y numunesinin dayanımında düşüş gerçekleşmiştir. Buna karşılık T-1-D numunesinin içerdiği yüksek organik atık yıllanma süreci içerisinde azalmış buna bağlı olarak su içeriği de azalmış ve yıllanmış atık daha dirençli bir duruma gelmiştir. Yine buna benzer şekilde U-1-D kompozisyonunun içerisindeki mutfak ve kağıt-karton atıklar yıllanma içerisinde azalma göstermiştir. Kompozisyon içerisindeki organik atık oranının azalmasıyla yıllanma etkisinden daha az etkilenen dayanım arttırıcı plastik ve metal atıkların numune içerisindeki etkinlikleri artmış ve bu da yıllanmış U-1-Y numunesinin taze numuneden daha yüksek güvenlik sayısına sahip olmasını sağlamıştır.

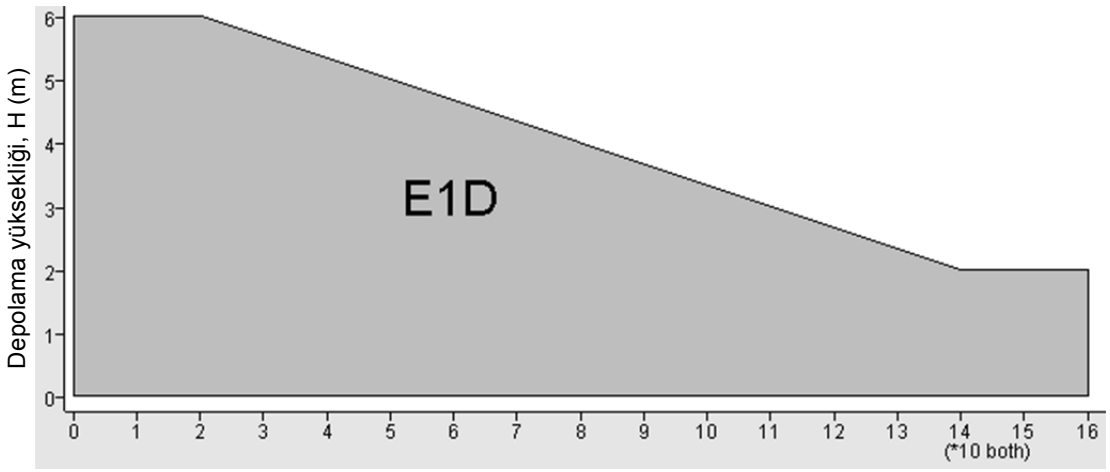
Gene olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde düşük eğimli, küçük birim hacim ağırlık değerine sahip, yıllanma etkisine maruz kalmış, organik madde içeriği ve doğal su içeriği değeri düşük olan numunelerin şev duraylılığı açısından daha güvenli olduğu söylenebilmektedir.

8.2.2 Şev Geometrisinin Duraylılık Analizleri Üzerindeki Etkisi

Depolama sahasında muhafaza edilen KKA'ların depolama şekil ve özellikleri atık gövdesinin duraylılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışmanın bu bölümünde üç çeşit kompozisyon (E-1, U-1 ve T-1), iki farklı birim hacim ağırlık (7 ve 14 kN/m^3), iki farklı yıllanma etkisi (taze ve yıllanmış) ve tek bir şev açısı (1V/3H, α=18,43°) kullanılarak iki farklı geometrideki (tek kademeli, iki kademeli) şevlerin duraylılık analizleri gerçekleştirilmiş ve şev güvenlik sayıları belirlenmiştir.

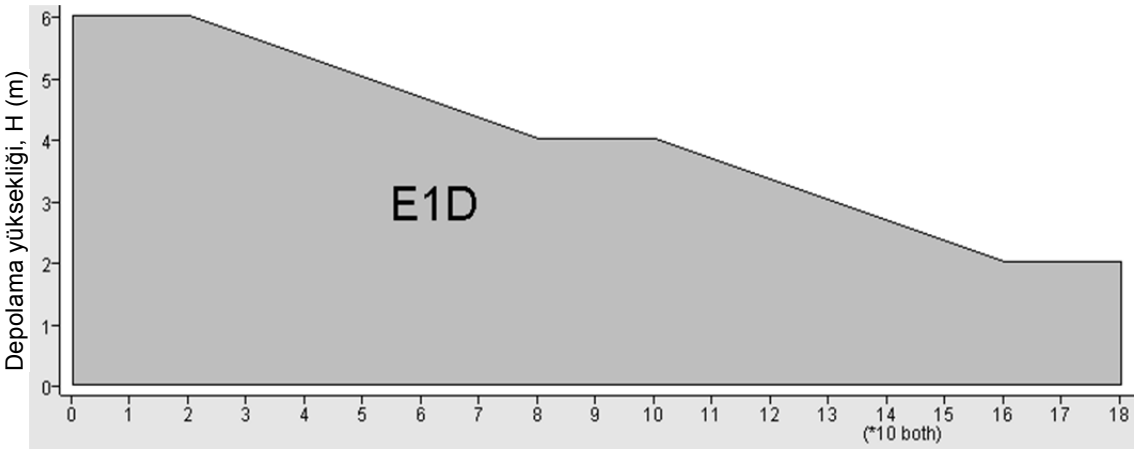
Daha önceki analizlerde olduğu gibi KKA'ların b.h.a. değerleri 7 ve 14 kN/m^3 olarak seçilmiştir. Taze ve yıllanmış olarak üzere üç farklı kompozisyonun her biri için büyük ölçekli direk kesme deneyeri gerçekleştirilmiş ve numunelere ait kayma mukavemeti parametreleri

daha önce belirlenmiştir. Şev geometrisinin duraylılık üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla ilk olarak aynı depolama yüksekliğine sahip tek ve çift kademeli şevli KKA modellerinin analizleri yapılmıştır. Duraylılık analizlerinde oluşturulan iki farklı geometri Şekil 8.8.a ve 8.8.b'de gösterilmiştir. Şekil 8.8.a tek kademeli 40 m depolama yüksekliğindeki KKA modelini göstermektedir. E-1-D kompozisyonundaki şevin eğimi 1 düşey 3 yatay olacak şekilde yatayla 18,43° açı yapmaktadır. Analiz sonucunda 14 kN/m^3 b.h.a. değerine sahip şevin güvenlik sayısı 2,94 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.8.a 40 m. depolama yüksekliğindeki tek eğimli şev geometrisi

Şekil 8.8.a. ile aynı kompozisyonda oluşturulan, aynı birim hacim ağırlık değerinde, şev açısında ancak iki kademeli şevli olarak 40 m depolama yüksekliğindeki KKA modeli Şekil 8.8.b'de gösterilmektedir.



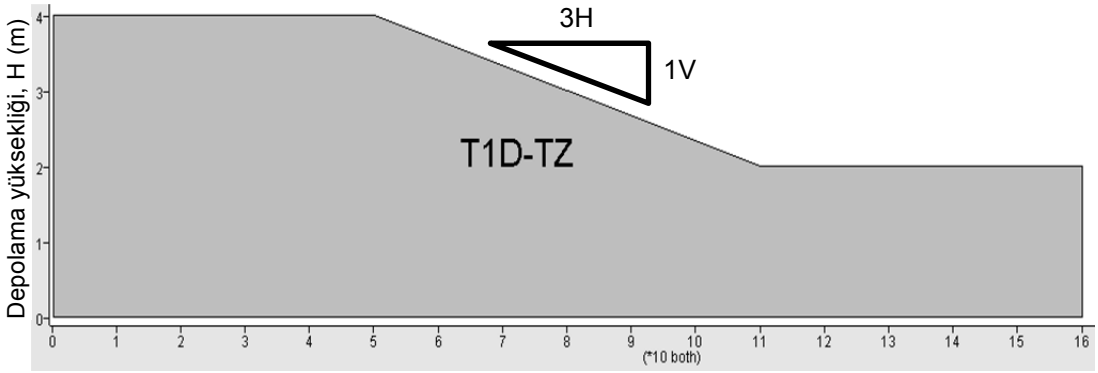
Şekil 8.8.b 40 m. yüksekliğindeki iki kademeli şev geometrisi

Şev açısı aynı tutularak (1V/3H, α=18,43°) birim hacim ağırlık, şev geometrisi, yıllanma faktörü, kompozisyon parametrelerinin kombinasyonuyla gerçekleştirilen analizlerden elde edilen güvenlik sayıları Çizelge 8.2'de görülmektedir. Çizelge 8.2'den görüldüğü üzere iki kademeli şevli modellerin tamamı tek şevli modellerden daha yüksek güvenlik sayısına sahiptir. Düşük birim hacim ağırlıklı KKA ile kurulan modeller büyük birim hacim ağırlıklı olarak modellenenlere kıyasla daha yüksek güvenlik sayısı değerine sahiptir. Yıllanma etkisinin farklı kompozisyonlardaki şevlerin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde T-1 ve U-1 kompozisyonlarındaki yıllanmış numuneler daha yüksek güvenlik sayısı değerine sahipken, E-1 numunesi için bu durum farklıdır. E-1 kompozisyonunda E-1-D'nin E-1-Y'den daha büyük güvenlik sayısı değerine sahip olmasının nedeninin taze durumda yüksek dirence sahip olan kağıt-karton atıkların yıllanma etkisiyle yapılarının bozunması sonucunda direncini kaybetmesidir.

Çizelge 8.2 Farklı kademe sayısındaki şevlerin güvenlik sayıları

No	Şev eğimi	Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Yıllanma etkisi	Komp.	Kayma mukavemeti parametreleri		GS (İnce)
					ϕ' (°)	c' (kPa)	
1	1V/3H α=18,43° Tek kademeli	7	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,02
2				E-1-D	27,1	40,3	3,25
3				U-1-D	25,1	32,6	2,84
4			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,66
5				E-1-Y	29,4	36,4	3,32
6				U-1-Y	36,8	32,0	3,84
7		14	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	2,25
8				E-1-D	27,1	40,3	2,60
9				U-1-D	25,1	32,6	2,26
10			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,02
11				E-1-Y	29,4	36,4	2,66
12				U-1-Y	36,8	32,0	3,20
13	1V/3H α=18,43° İki kademeli	7	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,42
14				E-1-D	27,1	40,3	3,78
15				U-1-D	25,1	32,6	3,28
16			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	4,27
17				E-1-Y	29,4	36,4	3,84
18				U-1-Y	36,8	32,0	4,49
19		14	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	2,61
20				E-1-D	27,1	40,3	3,08
21				U-1-D	25,1	32,6	2,66
22			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,58
23				E-1-Y	29,4	36,4	3,14
24				U-1-Y	36,8	32,0	3,80

Şev geometrisinin duraylılık üzerindeki etkisinin incelendiği analizlere ek olarak şevin alt ve üst bölümlerindeki mesafelerin boyutları değiştirilmiştir. Şekil 8.9'da depolama yüksekliği 20 m olan şevin alt ve üst düzlükleri 20 m'den 50 m'ye çıkarılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki analizlerde düzlükler büyütülerek 100 metreye çıkartılarak ve diğer tüm değişkenler aynı tutularak güvenlik sayılarındaki değişiklikler incelenmiştir.



Şekil 8.9. Üst ve alt düzlükleri 50 m olan şev modeli

Alt ve üst düzlük uzunlukları hariç diğer tüm özellikleri sabit tutulan şevlerin duraylılık analizlerinden elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 8.3'de görülmektedir. T-1-D numunesi ile yapılan analizler incelendiğinde geometrik olarak 20 m, 50 m ve 100 m alt-üst düzlüklere sahip şevlerin güvenlik sayıları sırasıyla 4,45 – 4,47 ve 4,51 olarak bulunmuştur. Buna göre alt ve üst düzlük uzunlukları arttırıldıkça güvenlik sayısı değerinde kayda değer bir artış kaydedilmemiştir.

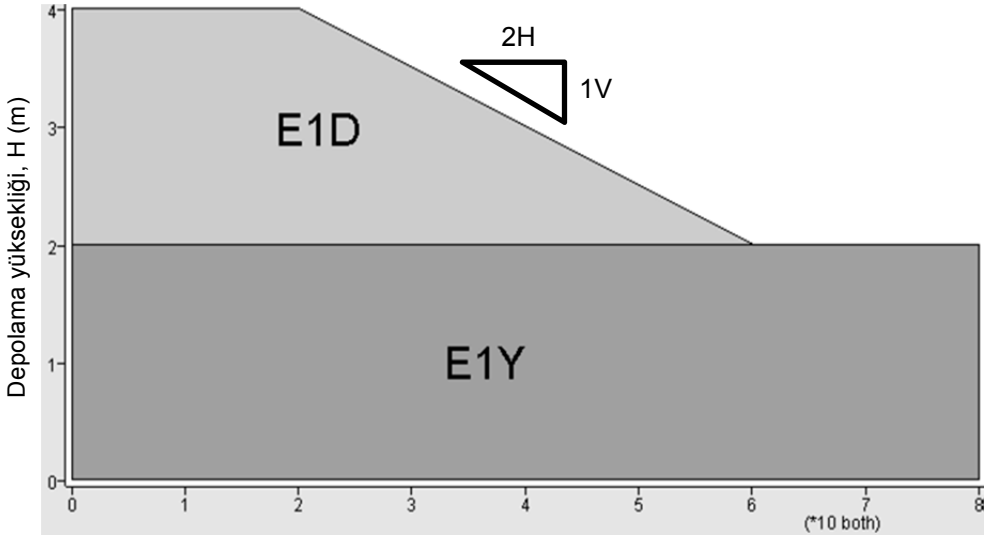
Çizelge 8.3 Farklı geometrik özelliklerdeki şev modellerinin güvenlik sayıları

No	Şev eğimi	Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Yıllanma etkisi	Komp.	Kayma mukavemeti parametreleri		GS (İnce)
					ϕ' (°)	c' (kPa)	
1	1V/3H α=18,43° $L_{SAĞ}$=50m L_{SOL}=50m	7	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	4,47
2				E-1-D	27,1	40,3	5,01
3				U-1-D	25,1	32,6	3,90
4			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	4,83
5				E-1-Y	29,4	36,4	4,53
6				U-1-Y	36,8	32,0	5,01
7		14	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,08
8				E-1-D	27,1	40,3	3,74
9				U-1-D	25,1	32,6	2,89
10			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,73
11				E-1-Y	29,4	36,4	3,39
12				U-1-Y	36,8	32,0	3,91
13	1V/3H α=18,43° $L_{SAĞ}$=100m L_{SOL}=100m	7	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	4,51
14				E-1-D	27,1	40,3	5,09
15				U-1-D	25,1	32,6	3,96
16			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	4,91
17				E-1-Y	29,4	36,4	4,59
18				U-1-Y	36,8	32,0	5,10
19		14	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,12
20				E-1-D	27,1	40,3	3,81
21				U-1-D	25,1	32,6	2,94
22			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,80
23				E-1-Y	29,4	36,4	3,44
24				U-1-Y	36,8	32,0	3,98

8.2.3 Yıllanma Etkisinin Şev Duraylılığına Etkisi

Düzenli atık depolama sahaları uzun yıllar hizmet vermek üzere tasarlanmaktadırlar. Bu uzun hizmet süresi içerisinde KKA'ların fizikokimyasal özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Yıllanma etkisine maruz kalmış taze ve yıllanmış KKA'lar depolama sırasında üst üste gelerek farklı özelliklerde iki katman gibi davranmaktadırlar (Dixon ve Jones, 2005; Chen ve diğ., 2009; Reddy ve diğ., 2011). Yıllanmış ve taze KKA katmanları arasında potansiyel bir kayma yüzeyi oluşabilir (Kremen and Tsompanakis, 2010). Çalışmanın bu kısmında yıllanmış

KKA numuneler ile bu yıllanmış katmanın üstüne yerleştirilmiş taze KKA'ların oluşturduğu şevlerin duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.10).



Şekil 8.10 Farklı yıllanma etkisindeki katmanların duraylılık analizleri

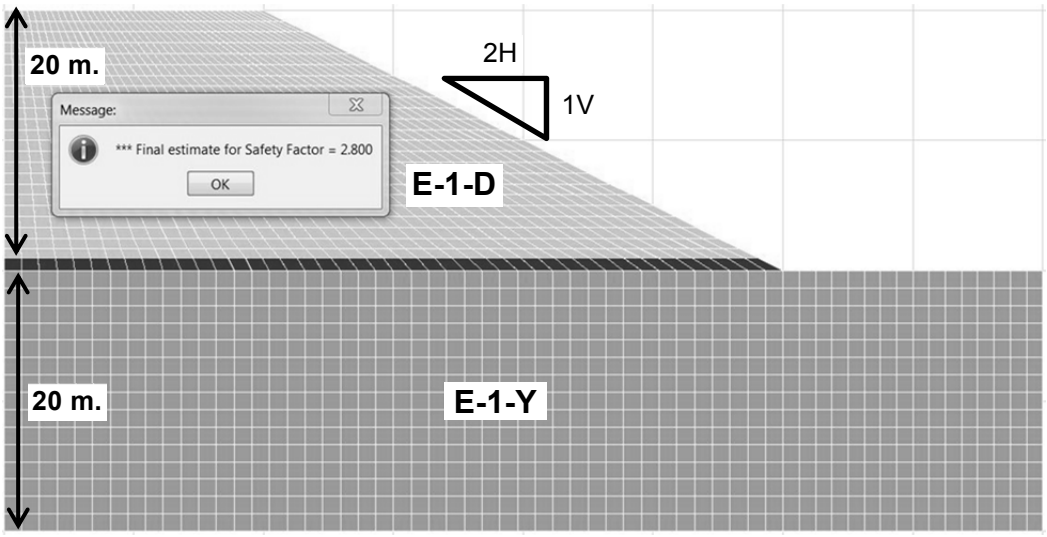
Çizelge 8.4'ten görüldüğü üzere iki farklı depolama yüksekliğinde ve iki farklı şev açısında tasarlanmış 12 adet şev modelinin duraylılık analizleri yapılmış ve güvenlik sayıları elde edilmiştir.

Çizelge 8.4 Yıllanma etkisinin şev duraylığı üzerindeki etkisi

No	Şev yüksekliği	Şev eğimi	Kompozisyonlar	Güvenlik sayısı (GS)
1	H=20m	1V/2H α=26,56°	E1Y - E1D	3,04
2			U1Y - U1D	2,70
3			T1Y - T1D	3,13
4		1V/3H α=18,43°	E1Y - E1D	3,68
5			U1Y - U1D	3,62
6			T1Y - T1D	4,03
7	H=40m	1V/2H α=26,56°	E1Y - E1D	2,21
8			U1Y - U1D	1,93
9			T1Y - T1D	2,11
10		1V/3H α=18,43°	E1Y - E1D	2,89
11			U1Y - U1D	2,58
12			T1Y - T1D	2,75

Düşük depolama yüksekliğindeki (20 m) modellerin yüksek depolama yükseklikli (40 m) modellere kıyasla daha büyük güvenlik sayısına sahip olduğu görülmüştür. Şev açısı 1V/3H (18,43°) olan modellerin güvenlik sayıları değerlerinin 1V/2H (26,56°) eğimli modellere kıyasla yaklaşık %20 daha büyük değer aldığı görülmüştür. Farklı depolama yükseklikleri ve şev eğimlerindeki üç kompozisyonunun içerisinde, E-1 ve T-1 kompozisyonlarının birbirine yakın değer aldığı fakat U-1 kompozisyonunun daha düşük güvenlik sayısına sahip olduğu görülmüştür. Analizler sonucunda E-1 kompozisyonun içsel sürtünme açısını arttıran kağıt-karton atık bakımından, T-1 kompozisyonun ise kohezyonu önemli ölçüde arttıran organik atık bakımdan zengin olmasının güvenlik sayılarını olumlu şekilde etkilediği belirlenmiştir.

Yıllanmış ve taze KKA numunelerin birlikte kullanıldığı şev duraylılık analizlerinden sonra, iki KKA numunenin arasına serilmiş kum katmanının duraylılığı ne şekilde etkileyeceği araştırılmıştır. Bu amaçla yıllanmış E-1 kompozisyonu (E-1-Y) üzerine 50 cm kalınlığında iyi derecelendirilmiş kum katmanı serildikten sonra üzerine taze E-1 kompozisyonu (E-1-D) yerleştirilerek 20 m yüksekliğinde 1V/2H eğimindeki şevin duraylılık analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.11).



Şekil 8.11 Araya serilen kum tabakasının KKA'ların duraylılığı üzerindeki etkisi

Şekil 8.11'den görüldüğü üzere yıllanmış ve taze KKA numuneler arasına serilen kum tabakasının şev güvenlik sayısını olumsuz şekilde etkilediği görülmüştür (2,96 > 2,60).

Diğer iki kompozisyonla da aynı şartlar altında gerçekleştirilen analizlerde de benzer sonuçlar elde edilmişve yıllanmış ve taze tabakalar arasına serilen iyi derecelenmiş kum tabakası güvenlik sayısının düşmesine neden olduğu görülmüştür. Ara kum tabakasının bulunmadığı

birinci durum ile yıllanmış ve taze katmanların arasına iyi derecelendirilmiş kum tabakasının serildiği ikinci duruma ait şev güvenlik sayıları Çizelge 8.5'te görülmektedir.

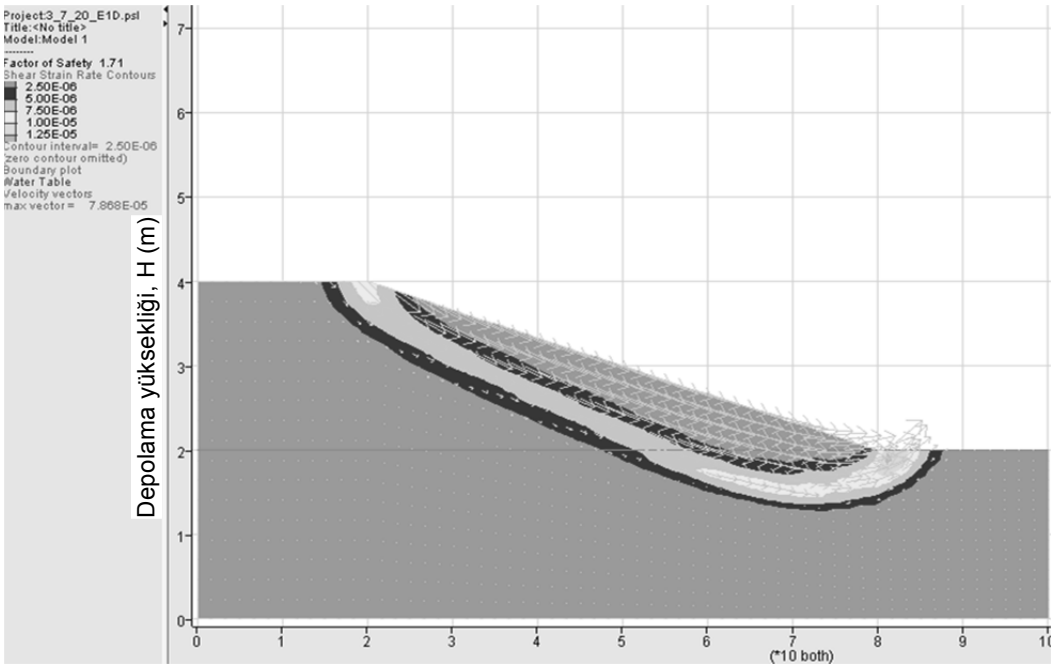
Çizelge 8.5 Kum tabakasının şevin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi

No	Şev yüksekliği	Şev eğimi	Kompozisyonlar	Güvenlik Sayısı (GS) (kum tabakasız)	Güvenlik Sayısı (GS) (Kum tabakalı)
1	H=20m	1V/2H α=26,56°	E1Y - E1D	2,96	2,60
2			U1Y - U1D	2,70	2,36
3			T1Y - T1D	3,13	2,69

Üç kompozisyonda da kum tabakasının bulunduğu ikinci durumda güvenlik sayılarının daha küçük değer aldığı görülmüştür. Bu durumun oluşma nedeni araya serilen iyi derecelenmiş kum katmanına ait kayma mukavemeti parametrelerinin hem taze hem de yıllanmış KKA numunelerin kayma mukavemeti parametrelerinden küçük olmasıdır (Ø = 33° - c = 0 kPa). Bu nedenle KKA numunelerin üstünün örtülmesinde kullanılacak malzemenin KKA numunenin kayma mukavemeti parametrelerinden daha iyi özelliklere sahip olması gerekmektedir, aksi takdirde serilen örtü malzemesi şev duraylılığını olumsuz şekilde etkileyebilir.

8.2.4 Yeraltı Suyu Seviyesinin Şev Duraylılığı Üzerindeki Etkisi

Depolama sahalarında muhafaza edilen KKA'lar yeraltı sularının etkilerine maruz kalabilmektedir. Yapılan çalışmalar su içeriği ve doygunluk derecesinin KKA'ların mühendislik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu kanıtlamıştır (Pelkey ve diğ., 2001). Bu çalışmada yeraltı suyu etkisinin modellenen KKA'ların güvenlik sayısı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 8.12'de şev modelinin topuk noktası hizasından geçen yeraltı su seviyesi ve oluşan potansiyel kayma yüzeyi gösterilmektedir. Yapılan duraylılık analizinde 20 m depolama yüksekliğindeki E-1-D numunesinin güvenlik sayısı 3,63 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.12. Yeraltı suyu etkisi altındaki E-1-D modelinin duraylılık analizi

İki farklı şev eğimde, iki farklı depolama yüksekliğinde, iki farklı yıllanma etkisi ve üç farklı kompozisyonun kombinasyonuyla oluşturulmuş şev modellerinin duraylılık analizlerinden elde edilen güvenlik sayıları Çizelge 8.6'da görülmektedir.

Çizelge 8.6 Yeraltı su seviyesinin duraylılık analizlerine etkisi

No	Şev eğimi	Depolama yüksekliği	Yıllanma etkisi	Komp.	Kayma mukav. parametreleri		GS (İnce)
					ϕ' (°)	c' (kPa)	
1	1V/3H α=18,43°	20 m	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,71
2				E-1-D	27,1	40,3	3,63
3				U-1-D	25,1	32,6	3,18
4			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,91
5				E-1-Y	29,4	36,4	3,68
6				U-1-Y	36,8	32,0	4,05
7		40 m	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	2,58
8				E-1-D	27,1	40,3	2,75
9				U-1-D	25,1	32,6	2,36
10			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,03
11				E-1-Y	29,4	36,4	2,76
12				U-1-Y	36,8	32,0	3,17

Çizelge 8.6 (Devamı) Yeraltı su seviyesinin duraylılık analizlerine etkisi

No	Şev eğimi	Depolama yüksekliği	Yıllanma etkisi	Komp.	Kayma mukav. parametreleri		GS (İnce)
					ϕ' (°)	c' (kPa)	
13	1V/2H α=26,56°	20 m	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	3,33
14				E-1-D	27,1	40,3	3,26
15				U-1-D	25,1	32,6	2,82
16			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	3,42
17				E-1-Y	29,4	36,4	3,27
18				U-1-Y	36,8	32,0	3,53
19		40 m	Taze KKA	T-1-D	20,9	49,6	2,21
20				E-1-D	27,1	40,3	2,38
21				U-1-D	25,1	32,6	2,01
22			Yıllanmış KKA	T-1-Y	34,6	32,8	2,55
23				E-1-Y	29,4	36,4	2,34
24				U-1-Y	36,8	32,0	2,66

Gerçekleştirilen duraylılık analizlerine benzer şekilde daha düşük eğimli (α=18,43°) şev modellerinin güvenlik sayıları daha dik eğimli modellerden daha büyük değer almıştır. Analizler sonucunda güvenlik sayısının depolama yüksekliği ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Duraylılık analizleri soncunda 20 m yüksekliğindeki şev modelleri 40 m depolama yüksekliğindeki şevlerden daha büyük güvenlik sayısı değerine sahiptir. Taze ve yıllanmış numunelere ait güvenlik sayıları incelendiğinde T-1 ve U-1 kompozisyonlarının yıllanmış numunelerinin taze numunelere kıyasla çok daha büyük güvenlik sayısı değerine sahip olduğu görülmektedir. E-1 kompozisyonunda ise yıllanmış ve taze KKA numunelerin güvenlik sayıları arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

Farklı özelliklerdeki şev modellerini içeren toplam 108 adet duraylılık analizi sonuçları incelendiğinde; beklenildiği üzere duraylılığı etkileyen en önemli parametrenin şev açısı olduğu görülmüştür. KKA'lar heterojen yapıda olup, büyük boşluklu yapıya sahiptirler ve bu özellikler şev gövdesinin bütünlüğü açısından büyük dezavantajlar oluşturmakta, duraylılığı negatif yönde etkilemektedir. Bu nedenle KKA'ların düşük şev açılarıyla depolanmaları önerilmektedir. Birim hacim ağırlıklarda meydana gelen artış şev gövdesi içerisindeki düşey gerilmeleri arttırmakta bu da duraylılığı olumsuz şekilde etkilemektedir. Yapılan analizlerde düşük birim hacim ağırlıklı şevlerin daha yüksek güvenlik sayısı değerine sahip olduğu görülmüştür. KKA'ların duraylılığını etkileyen en önemli parametrelerden birinin şev açısının

yanında kompozisyon olduğu belirlenmiştir. Aynı geometrik özelliklere aynı birim hacim ağırlıklara sahip numuneler içlerinde bulundurdukları materyallere bağlı olarak çok farklı güvenlik sayılarına sahip olabilmektedir. Kağıt, karton, tekstil gibi lifli, bağlayıcı özellikteki materyaller bakımından zengin olan kompozisyonlar yüksek kayma mukavemeti değerlerine ve büyük güvenlik sayısı değerlerine sahiptir. Buna karşılık organik madde bakımından zengin, yüksek doğal su içerikli numunelerin daha düşük şev güvenlik sayısı değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir.

Düzenli atık depolama sahalarının uzun süre hizmet verebilmesi ve ekonomik olabilmesi için olabildiğince büyük hacimlerdeki atığı muhafaza edebilmesi istenmektedir. Bu nedenle depolama yüksekliklerinin olabildiğince çok olması istenilmektedir. Ancak yapılan analizlerde depolama yüksekliği ile şev güvenlik sayısının ters orantılı olduğu yani depolama yüksekliği arttıkça şev güvenlik sayısının azaldığı belirlenmiştir. Atık depolama sahalarının ve diğer mühendislik yapılarının tasarımında ilk olarak sağlanması gereken şartın can ve mal güvenliği olduğu unutulmamalıdır. Depolama sırasında geçen uzun süre içerisinde KKA'ların mühendislik özelliklerinde önemli değişiklikler olabilmektedir. Yıllanmış KKA tabakası ile hemen üzerine depolanan taze KKA tabakası arasında oluşacak ara yüzeyin potansiyel bir kayma yüzeyi olabileceği tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır.

Duraylılık analizleri sırasında şevler ince ağ gözleri (fine mesh)'ne ayrılarak modellenmiş böylece gerçek duruma en yakın ve en hassas analiz sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır. Şev güvenlik sayısının belirlenmesi sürecinde Flac-Slope programı "associated plastic flow rule" kutusunu opsiyonel olarak kullanıcın kararına bırakmaktadır. Bu opsiyon aktif duruma getirildiğinde dilatasyon (δ) açısı tanımlanan içsel sürtünme açısına (Ø) eşit değer alacak şekilde hesaba dahil edilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda içsel sürtünme açısı 30°'nin üzerinde olan malzemelerde bu opsiyonun pasif durumda modellenmemesi gerektiği anlaşılmıştır. Kontrol amaçlı bahsi geçen opsiyon aktif durumda yapılan analizlerde güvenlik sayısı değerlerinin olması gerekenden çok daha küçük değer aldığı ve gerçeği yansıtmadığı belirlenmiştir.

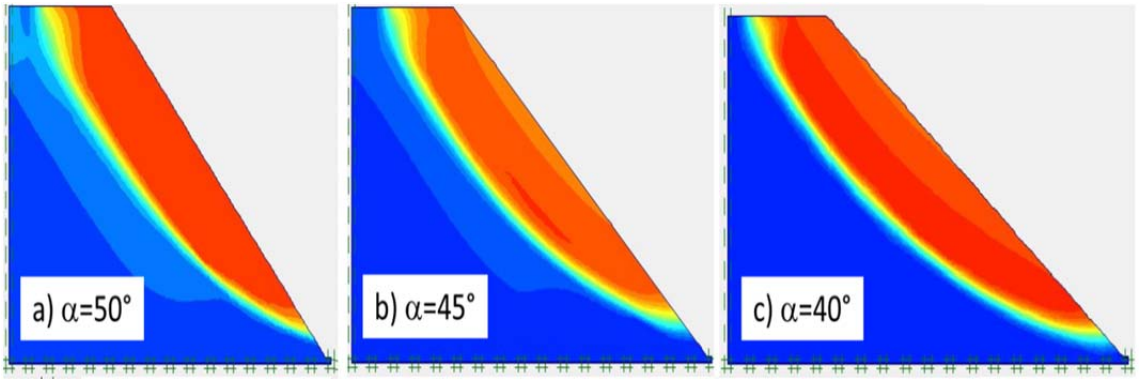
8.2.5 Manisa Vahşi Katı Atık Depolama Sahasının Duraylılık Analizleri

Manisa Büyük Şehir Belediyesi tarafından toplanan katı atıklar 40 yıldır Şahindere mevkiindeki vahşi katı atık depolama sahasına boşaltılmaktadır. Manisa şehrinde konut, işyeri ve fabrikalardan toplanan katı atık miktarının 400 ton/gün miktarında olduğu Manisa Büyük Şehir Belediyesi 2010 yılı faliyet raporunda belirtilmiştir. Çöp kamyonları tarafından vahşi depolama sahasına getirilen katı atıklar düzensiz olarak boşaltıldıktan sonra dozer yardımıyla 50 m'lik doğal şevden aşağıya yuvarlanmaktadır (Şekil 8.13).

Şekil 8.13 Manisa vahşi katı atık depolama sahası

Manisa iline ait doğal taze ve doğal yıllanmış numunelerin temel fizikokimyasal özellikleri ve kayma mukavemeti parametreleri gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda belirlenmiştir. Atık depolama sahasının geometrik özellikleri çekilen fotoğraflar ve bilgisayar programları kullanılarak belirlenmiştir. Manisa vahşi katı atık depolama sahasına ait taze ve yıllanmış numunelerin duraylılık analizleri belirlenen üç farklı şev eğimi (40° - 45° - 50°) için gerçekleştirilmiştir.

Doğal atık şevlerin duraylılık analizleri sonlu farklar metodunu kullanan FLAC-2D programına ek olarak, sonlu elemanlar metodunu kullanan Plaxis-2D ve limit denge (Bishop ve Fellenius) metodlarını kullanan Talren (V.4) programlarıyla gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmalı olarak güvenlik sayıları elde edilmiştir (Şekil 8.14).



Şekil 8.14 Plaxis-2D programıyla üç farklı eğimde gerçekleştirilen duraylılık analizleri

İki farklı analiz programı kullanılarak taze ve yıllanmış doğal KKA numuneleri için elde edilen güvenlik sayıları Çizelge 8.7'de görülmektedir.

Çizelge 8.7 Manisa vahşi katı atık depolama sahasının duraylılık analizi sonuçları

Şev Açısı	FLAC 2-D		PLAXIS 2-D		TALREN			
					Fellenius		Bishop	
	Taze	Yıllanmış	Taze	Yıllanmış	Taze	Yıllanmış	Taze	Yıllanmış
α=40°	1,70	1,86	1,64	1,80	1,52	1,64	1,66	1,77
α=45°	1,51	1,67	1,47	1,61	1,37	1,45	1,49	1,55
α=50°	1,34	1,49	1,24	1,45	1,19	1,35	1,26	1,41

Çizelge 8.7'den görüldüğü üzere gerçekleştirilen analiz sonuçarından yıllanmış numunelere ait güvenlik sayılarının taze numunelere ait güvenlik sayılarından %10-%15 oranında daha büyük değer aldığı belirlenmiştir. Aynı mühendislik özelliklerindeki şevler üzerinde yapılan analizler sonucunda FLAC-2D programının Plaxis-2D programından daha yüksek güvenlik sayıları verdiği belirlenmiştir. Limit denge metodlarını kullanan Talren programıyla yapılan analizler sonucunda elde edilen güvenlik sayıları Plaxis-2D ve Flac-2D programlarıyla elde edilen güvenlik sayılarından daha düşük değerler almıştır.

8.2.6 Deprem Kuvvetlerinin Şev Duraylılığı Üzerindeki Etkisi

Bu bölüme kadar Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasının statik durumdaki duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm kapsamında atık depolama sahasının dinamik kuvvetler altındaki davranışı incelenmiştir. İlk olarak Manisa vahşi atık depolama sahasının yaklaşık koordinatları belirlenmiştir (Şekil 8.15).

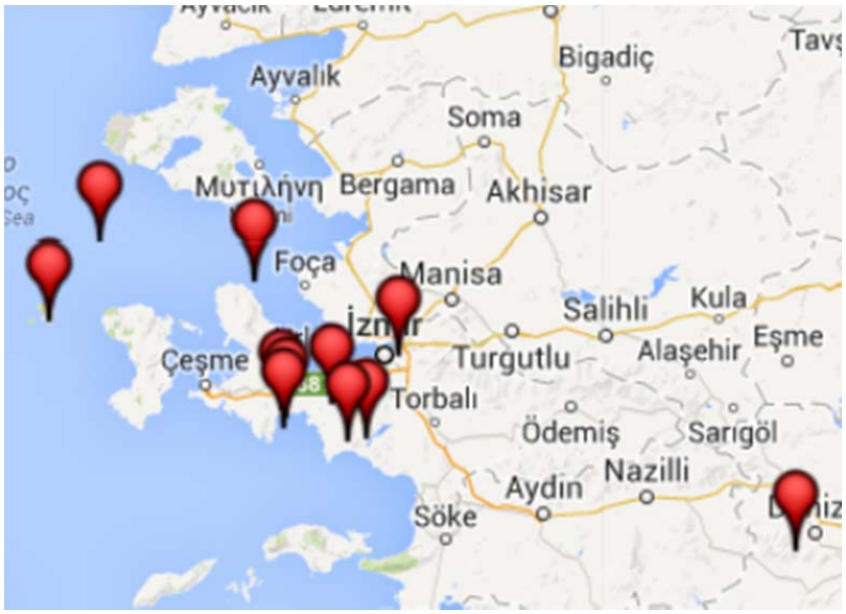
Şekil 8.15 Manisa vahşi atık depolama sahasının uydu görüntüsü

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen dinamik analizlerde KKA'lara ait parametreler literatürde daha önceden yapılan çalışmalardan alınmıştır (Kavazanjian ve diğ., 1995; Zeccos, 2005). Dinamik analizlerde kullanılacak parametrelerin tam olarak belirlenebilmesi için laboratuvar ortamında kullanılan numunelerin dinamik deneylerinin yapılması gereklidir.

Şekil 8.15'den görüldüğü üzere atık depolama sahasının 38°36'29'' Kuzey, 27°28'44'' Doğu koordinatlarında olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu nokta merkez seçilerek doğu, batı, kuzey ve güney yönünde 100 km'lik mesafede sismik hareketlerin inceleneceği toplamda 40000 km^{2}'lik bir alan belirlenmiştir. Şekil 8.16'da Manisa depolama sahasını ve sismik faliyetlerin inceleneceği alanı göstermektedir.

Şekil 8.16 Manisa atık depolama sahası ve sismik faliyetlerin inceleme alanı

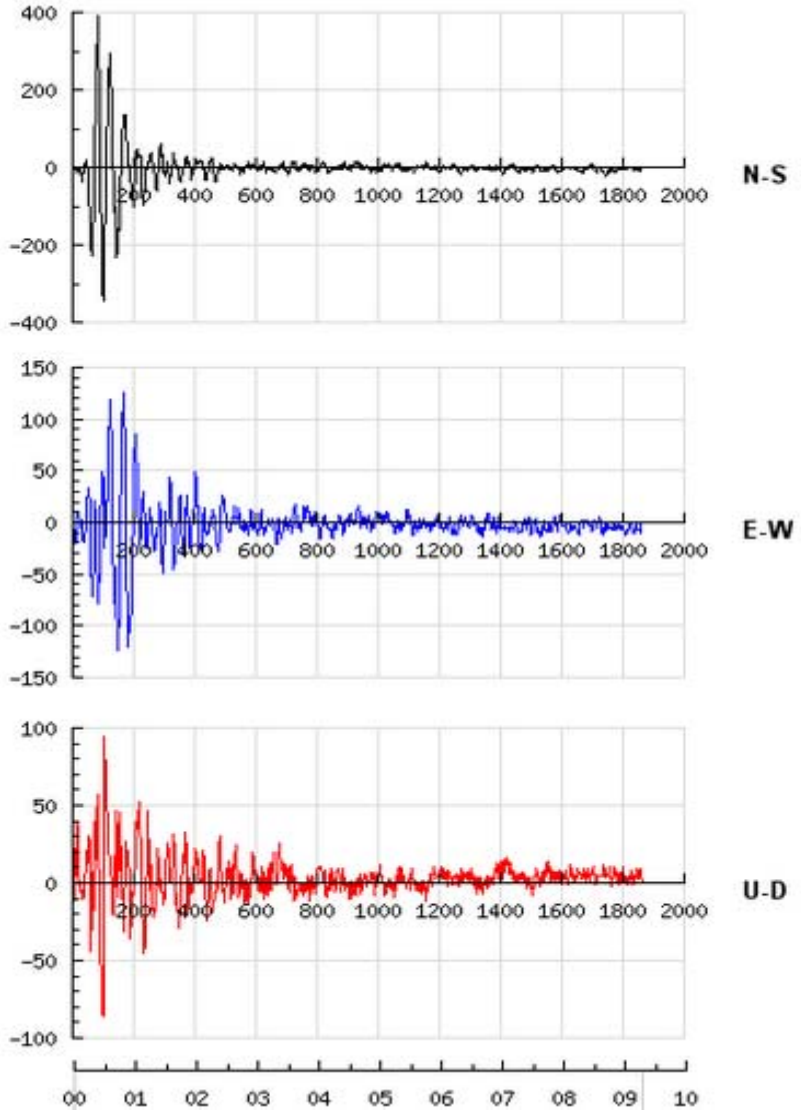
Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yönetilen kuvvetli yer hareketleri gözlem ağı sitesinden belirlenen bölge için sismik veriler elde edilmiştir (http://kyh.deprem.gov.tr/). Sismik hareketlerin inceleneceği bölge 39,60 - 36,90 enlemleri, 30,36 – 25,10 boylamları arasında kalmaktadır. Deprem büyüklüğü olarak 5,5 ile 8,0 arasındaki depremler seçilmiştir. Belirtilen özelliklerdeki depremler en eski kayıtların bulunduğu 1976 yılından günümüze araştırılmış ve 11 deprem kaydı elde edilmiştir. Şekil 8.17 belirlenen alan içerisinde büyüklüğü 5,5 ile 8,0 arasında olan 11 deprem noktasını göstermektedir. Elde edilen 11 deprem kaydı, fayın karakteristiği, depremin büyüklüğü, atık depolama sahasına mesafesi, ivme kayıtlarının temizliğine göre tek tek incelenmiş ve analizlerde kullanılacak en uygun deprem ivme kayıdı belirlenmiştir.



Şekil 8.17 Belirlenen özelliklerde bulunan deprem noktaları

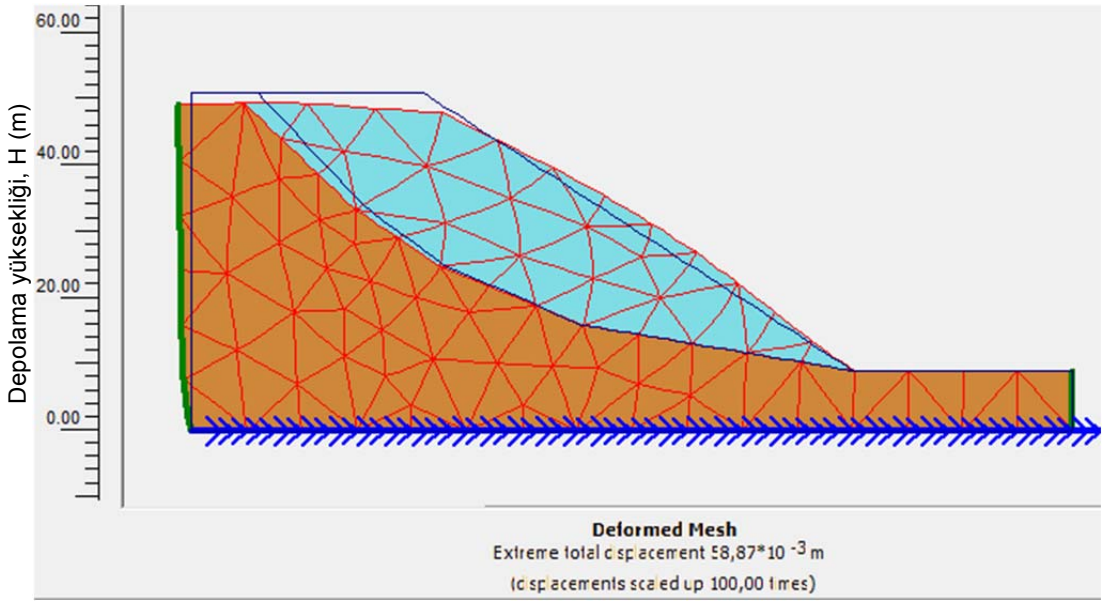
Bu değerlendirmelerden sonra 16 Aralık 1977 yılında 38,41 Kuzey – 27,19 Güney episentırında, yüzeyden 24 km derinde gerçekleşen 5,3 büyüklüğündeki Bornova depremi analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu deprem gerek belli bir büyüklüğün üzerinde olması, gerekse veri kayıtlarının temiz olması nedeniyle birçok farklı çalışmada kullanılmıştır (Yalçın ve diğ., 2008; Kuruoğlu ve diğ., 2009; Kuruoğlu ve Eskişar, 2010).

Deprem süresi 9,31 saniye, sismografın veri kayıt sıklığı (sampling interval) 0,005 saniye olarak belirtilmiştir. Kuzey-Güney, Doğu-Batı ve aşağı-yukarı olmak üzere üç farklı doğrultudaki deprem ivme kayıtları Şekil 8.18'de görülmektedir.



Şekil 8.18 Üç farklı doğrultudaki deprem ivme kayıtları

Elde edilen deprem ivme kayıtları maksimum ivme değerleri 0,4g – 0,2g - 0,1g ve 0,05g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Dört farklı maksimum ivme değeri modellenen taban kayasına tanımlanmış deplasman olarak girilmiş ve şev gövdesinde oluşan maksimum deplasmanlar elde edilmiştir. Şekil 8.19'da depolama sahasının 0,4g'lik maksimum ivme etkisi altında meydana gelen maksimum deplasmanlar gösterilmektedir.



Şekil 8.19 Deformasyona uğramış depolama sahasından görünüm

Gerçekleştirilen analizler neticesinde meydana gelen deplasmanlar Çizelge 8.8'de verilmiştir. Oluşan deplasman miktarları uygulanan maksimum ivme değeri ile paralellik göstermiştir. İlk iki ivme değerinde (0,4g ve 0,2g) sırasıyla 59 mm ve 11 mm'lik deplasmanlar oluşurken diğer iki ivmeye ait deplasmanlar oldukça küçük değer almıştır (Δ<1mm).

Çizelge 8.8 Manisa atık depolama sahasına ait maksimum deplasman değerleri

No	Maksimum ivme	Maksimum deplasman (mm)
1	0,4g	59
2	0,2g	11
3	0,1g	0,0685
4	0,05g	0,0023

Flac 2-D, Plaxis 2-D ve Talren V.8 programlarıyla yapılan şev duraylılığı analizlerinin bir bölümü Ek.V'te verilmiştir.

9. ENDÜSTRİYEL KATI ATIKLAR İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN VAKA İNCELEMESİ

Bu bölümde, İzmir ili Menemen ilçesindeki Organize Sanayi Bölgesinde inşaa edilecek olan düzenli atık depolama sahasının maksimum şev açılarının belirlenmesi ve duraylılık analizlerinin gerçekleştirilerek şev güvenlik sayılarının belirlenmesine yönelik analizler verilmektedir. İZBAŞ yönetimindeki Menemen Organize Sanayi Bölgesi'nde ortaya çıkan imalat atıklarının çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde depolanması için düzenli atık depolama sahası inşaatı tamamlanmıştır. Günümüze kadar kontrolsüz ve güvensiz bir şekilde muhafaza edilen atıkların yeni depolama sahasına transferinden sonra atıkların hangi şev açısıyla depolanması gerektiği konusunda arazi çalışmaları, laboratuvar deneyleri ve şev analizleri yapılmıştır. Yapılan ön araştırmalar ve İZBAŞ yetkililerinden alınan bilgilerden sonra arazi çalışmaları yapılarak endüstriyel atıklardan deney numuneleri alınmıştır. Araziden alınan numunelerin doğal su içeriği ve organik madde miktarları belirlenmiştir. Daha sonra iki farklı birim hacim ağırlıkta hazırlanan numuneler ile büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler ile sonlu farklar metodunu kullanan FLAC-Slope (V:7.0.419) programı ile duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Tamamlanan analizler neticesinde düzenli endüstriyel atık depolama sahasında kullanılması gereken maksimum şev açıları ve bu şevlerin güvenlik sayıları belirlenmiştir.

9.1. Menemen OSB Düzenli Katı Atık Depolama Sahası Özellikleri

İzmir ili Menemen ilçesi Maltepe Köyü Panaztepe mevkiinde İzmir'e 45 km, Çanakkale yoluna 11 km uzaklıkta bulunan İzmir Menemen Serbest Bölgesi'nin temelleri 1984 yılında atılmıştır. Bölgede deri, kösele, süet, güderi, kürk, deri konfeksiyon üreten imalathane ve işletmelerle birlikte deri makinaları ve deri sanayinde kullanılan yardımcı madde araç gereçleri üreten ve bunların üretiminde kullanılan yardımcı ve ana maddelerin ticaretini yapan işletmeler bulunmaktadır. Önceleri Yeşildere bölgesinde ve çevresinde faaliyetlerini sürdüren deri sanayi kuruluşlarının 1984 yılında yeni bir organizasyonla İzmir Deri Sanayicileri Yapı Kooperatifi'ni kurarak, İzmir Valiliği tarafından oluşturulmuş Danışmanlar Kurulu'nun "sektörün faaliyet alanına olan uygunluğu" kararı doğrultusunda yer seçimini yaptığı "Maltepe Köyü'nün 3,5 km uzağındaki" 163 hektarlık alan üzerinde kurulmuştur.

Menemen Organize Sanayi Bölgesi'nde endüstriyel ürünlerin imalatı sırasında ortaya çıkan atıklar bölgenin kuruluşundan beri hemen yakınındaki bir alanda vahşi şekilde depolanmaktadır. Ancak gerek depolama için ayrılan alanın yetersiz kalması, gerek düzensiz

depolanan atıkların insan ve çevre sağlığını tehdit eder boyutlara gelmesi kalıcı ve sağlıklı bir çözüm gerektirmiştir. Bu amaçla İZBAŞ yönetimi düzenli atık depolama sahasının inşaatına ve mevcut endüstriyel atıkların bu sahaya transfer edilmesine karar vermiştir. İZBAŞ yetkilileri mevcut durumda transfer edilecek endüstriyel atık miktarının 110.000 ton, hacminin yaklaşık 60.000 m^3 olduğunu belirtmişlerdir.

Düzenli atık depolama sahasının proje ve inşaat işlerini gerçekleştiren özel firma jeolojik, hidrolojik, ekonomik ve çevresel koşulları göz önünde bulundurarak yaptığı fizibilite çalışmalarından sonra düzenli atık depolama sahası için gerekli alanı belirlemiştir. Şekil 9.1'den görüldüğü üzere bölgenin jeolojik yapısı atık depolama sahasının şeklinin verilmesindeki temel belirleyicidir.

Şekil 9.1 Düzenli atık depolama sahasının uydu görüntüsü

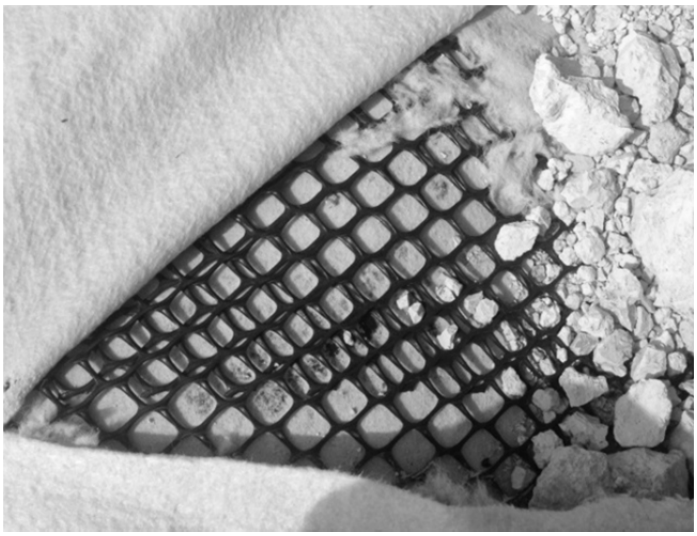
Çevresine kıyasla daha çukurda kalan depolama sahasının toplam alanı yaklaşık olarak 8300 m^2, depolama sahasının yaklaşık çevre uzunluğu 416 m olarak belirlenmiştir. Depolama sahasının en uzun köşegeni 172 m olarak ölçülmüştür (Şekil 9.1).

Şekil 9.2'de inşaatının büyük bir bölümü tamamlanmış düzenli atık depolama sahasından genel bir görünüm gösterilmektedir. Depolama sahasının tabanında atık sularının alt tabakalara sızmasını önleyen geçirimsiz kil tabakası, onun hemen üzerinde de filtre görevindeki iri daneli zemin tabakası bulunmaktadır. Atık suyunun drenajını sağlayacak olan sistem bu iri daneli zemin tabakasının içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 9.2'den görüldüğü üzere depolama sahasının taban yüzeyinde geomembran tabakası bulunmaktadır. Zaman içerisinde

endüstriyel atıkların oluşturacağı gazlar depolama sahasına homojen şekilde yerleştirilmiş tahliye bacalarıyla uzaklaştırılacaktır.

Şekil 9.2 Menemen O.S.B. düzenli depolama sahasından genel bir görünüm

Depolama sahasının eğimli yan yüzeyleri düşük permeabiliteli kil zemin ve geotekstil ve geogridlerin bir arada kullanıldığı geosentetikler ile kaplanmıştır. Eğimli yan yüzeylerin kendi kendini tutabilmesi ve depolama sahasının içine dökülmemesi gerekir. Bu nedenle yan yüzey zeminlerinin duraylılık analizleri yapılmalı ve şev açıları uygun şekilde verilmelidir. Şekil 9.3 depolama sahasında sızdırmazlık ve filtre göreviyle kullanılan kil zemin, geotekstil ve geogrid detayını göstermektedir.



Şekil 9.3 Menemen O.S.B. depolama sahasında kullanılan geotekstillerden görünüm

9.2. Endüstriyel Katı Atıkların Fiziko Kimyasal Özellikleri

Menemen Organize Sanayi Bölgesi'nde inşaatı tamamlanan düzenli atık depolama sahasına endüstriyel katı atıkların transfer işlemi gerçekleştirilecektir. Taşınması yapılacak endüstriyel katı atıkların depolama açılarının belirlenmesi için arazi ortamında gözlemler yapılmış, alınan doğal numuneler ile laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arazi ortamında yapılan ilk gözlemler sonucunda endüstriyel atıkların yüksek oranda organik madde bulundurdukları belirlenmiştir. Arazi ortamında yapılan incelemelerden sonra ekskavatör yardımıyla tüm depolama sahasındaki endüstriyel atıkları temsil eden bir atık numunesi oluşturulmaya çalışılmıştır (Şekil 9.4.a). Depolama sahasının içerisinde bulunan çok büyük parçalar laboratuvar deneylerinde kullanılamayacağından çalışmalara dahil edilmemiştir. Ayırma işlemi tamamlandıktan sonra laboratuvar çalışmalarında kullanılacak olan endüstriyel katı atık numuneler hava almayacak ve doğal nemini kaybetmeyecek şekilde poşetlenerek laboratuvara transferi yapılmıştır (Şekil 9.4.b).

(a)

(b)

Şekil 9.4 Menemen OSB depolama sahasından numune alınması, a) Endütriyel katı atıkların ayrılması, b) poşetlenmesi

Laboratuvar ortamına getirilen numunelerin ilk olarak su içeriği deneyleri ASTM-D 2216-10 (2010) standardına uygun şekilde yapılmıştır. Üç farklı numune ile gerçekleştirilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak arazi ortamındaki doğal su içerikleri belirlenmiştir (Çizelge 9.1).

Çizelge 9.1 Menemen O.S.B. endüstriyel katı atıkların ortalama doğal su içeriği değeri

Kap No	Kuru ağırlık (gr)	Su ağırlığı (gr)	Su içeriği (%)	Ortalama su içeriği (%)
1	382,1	309,1	81	
2	325,7	289,7	89	85
3	316,85	274,3	87	

Doğal atık numuneler ile yapılan üç deneyden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak endüstriyel atıkların su içeriği değeri %85 olarak belirlenmiştir. Endüstriyel atıkların organik madde miktarının belirlenmesi ASTM-D 2974-14 (2014) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney prosedüründe belirtildiği üzere 105°C sıcaklıkta 24 saat kurutulan numuneler daha sonra 440 °C'lik etüvde yakılarak ağırlık kayıpları kayıt edilmiş, organik madde değeri belirlenmiştir. Şekil 9.5 porselen potalar içerisinde yakılmış endüstriyel atık numunelerini göstermektedir.

Şekil 9.5 Menemen OSB endüstriyel katı atıklarına ait organik madde deney numuneleri

Üç farklı numune örneği kullanılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak organik madde miktarı belirlenmiştir (Çizelge 9.2).

Çizelge 9.2 Menemen O.S.B. endüstriyel atıkların ortalama organik madde miktarı

Kap No	Başlangıç numune ağırlığı (gr)	Numune kaybı (gr)	Organik madde içeriği (%)	Ortalama organik madde içeriği (%)
Menemen 1	99,94	37,47	37	
Menemen 2	73,9	33,61	45	41
Menemen 3	86,87	33,69	39	

Üç deney numunesinin organik madde miktarları bulunmuş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Deneyler sonucunda ortalama organik madde miktarı %41 olarak belirlenmiştir.

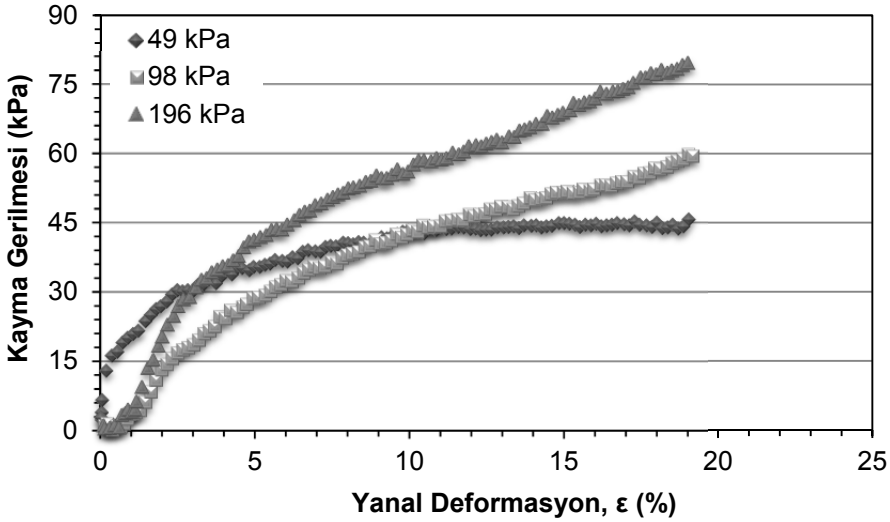
9.3. Endüstriyel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti Parametreleri

Arazi ortamından alınan doğal endüstriyel atıkların kayma mukavemeti parametreleri Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan büyük ölçekli direk kesme cihazıyla belirlenmiştir. ASTM-D 3080-11 (2011) standardına uygun olarak gerçekleştirilen direk kesme deneylerinde, standartta belirtilen dane boyutu sınırlamalarına uyulmuş, belirlenen boyutlardan daha büyük daneler ayıklanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Düzenli depolama sahasına transferi gerçekleştirilen endüstriyel katı atıklar serme, sulama, sıkıştırma gibi çeşitli işlemlerden geçirilerek depolanmaktadır. Her ne kadar gerçekleştirilen tüm bu işlemlerin belirli bir standarda ve sınır değerler içerisinde kalması istense de kompozisyon, su içeriği, organik madde miktarı, kompaksiyon enerjisi, operatör faktörü gibi nedenlerden dolayı farklı birim hacim ağırlıklardaki atık tabakalarının oluşması muhtemeldir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak büyük ölçekli direk kesme deneyleri iki farklı birim hacim ağırlık değerlerinde gerçekleştirilerek iki farklı durum için kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Farklı birim hacim ağırlık değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde numuneler aynı şekilde hazırlanmış, aynı kompaksiyon ekipmanları ve metotları uygulanmış sadece sıkıştırma enerjileri birbirinden farklı tutulmuştur.

İlk olarak düşük birim hacim ağırlıklı deney numunesine ait direk kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Beş katman halinde direk kesme hücresinin içerisine yerleştirilen endüstriyel katı atık numunelerinin her bir katmanına Standart Proctor tokmağıyla 100 darbe vurulmuştur (Şekil 9.6).

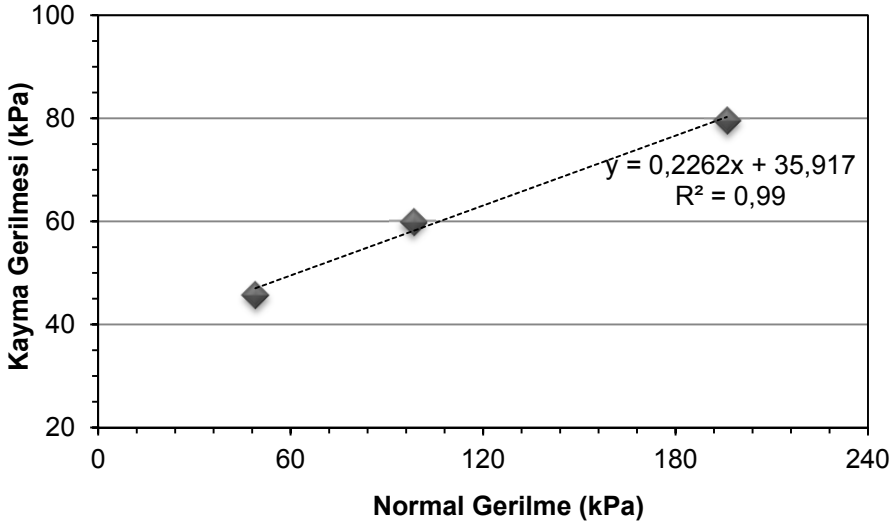
Şekil 9.6 Büyük ölçekli direk kesme deneyi hücresine yerleştirilmiş endüstriyel atık numunesi

Deney başlangıcındaki numune birim hacim ağırlığı 8,8 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Üç farklı normal gerilme değeri için yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan yanal deformasyon (ε), kayma gerilmesi (τ) eğrileri Şekil 9.7'de görülmektedir.



Şekil 9.7 Menemen OSB - küçük b.h.a. endüstriyel atık numunesi direk kesme deneyi τ - ε ilişkisi

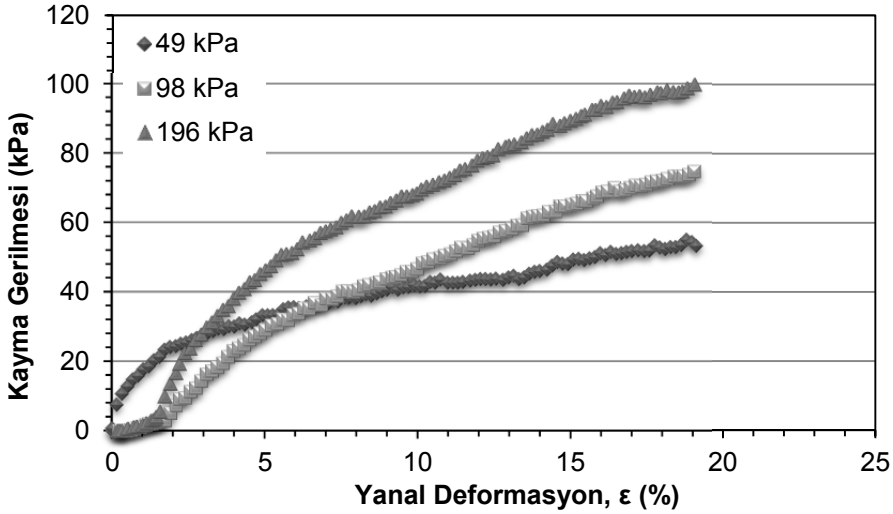
Şekil 9.7'den görüleceği üzere direk kesme deneylerinin ilk bölümlerinde düşük yanal deformasyonlarda büyük kayma gerilmeleri meydana gelmiş deformasyon arttıkça bu oran azalmıştır. Üç farklı normal gerilme altındaki üç deney numunesi için de nihai (kalıcı) gerilme değerinden bahsetmek mümkün değildir. Yanal deformasyon artışına paralel olarak az da olsa kayma gerilmesi artışı gözlenmektedir. Deney numunesi boyutlarının (B=300 mm – L= 300 mm) %20'sine karşılık gelen 60 mm'lik yanal deformasyonlarda direk kesme deneyleri tamamlanmış ve numune yenilmiş kabul edilmiştir. Tamamlanan büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda elde edilen üç farklı maksimum kayma gerilmesi değeri ve bu değerlere karşılık gelen normal gerilmeler Şekil 9.8'de bir araya getirilmiştir.



Şekil 9.8 Menemen OSB - küçük b.h.a. endüstriyel atık numunesine ait kayma mukavemeti parametreleri

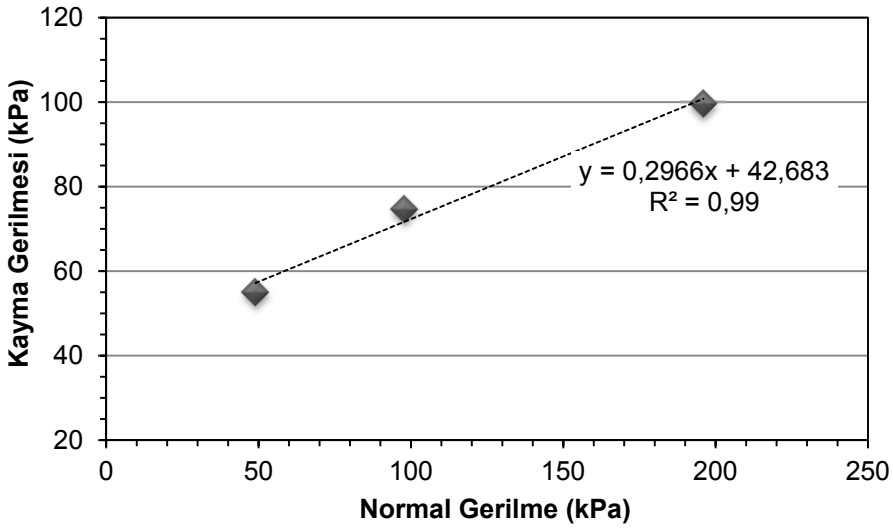
Şekil 9.8'den yararlanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda küçük b.h.a. değerine sahip direk kesme numunesinin içsel sürtünme açısı Ø= 12,8°, kohezyon değeri 35,9 kPa olarak belirlenmiştir.

Büyük ölçekli direk kesme deneylerine büyük b.h.a. değerine sahip endüstriyel katı aıtk numunesi ile devam edilmiştir. Küçük b.h.a.'lı numuneyle aynı şekilde yerleştirilen numunenin beş katmanının her birine 150 tokmak darbesi vurulmuştur. Deney başlangıcındaki numunenin b.h.a. değeri 11,9 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Üç farklı normal gerilme değeri için (49 – 98 – 196 kPa) büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen yanal deformasyon (ε), kayma gerilmesi (τ) eğrileri Şekil 9.9'da görülmektedir.



Şekil 9.9 Menemen OSB - büyük b.h.a. endüstriyel numunesi direk kesme deneyi τ - ε ilişkisi

Küçük b.h.a.'lı deney numunesine benzer şekilde nihai (kalıcı) gerilme değeri bu numune içinde elde edilememiş, %20 yanal deformasyona ulaşıldığında deney sonlandırılmıştır. Şekil 9.10 büyük b.h.a.'lı deney numunesinin maksimum kayma gerilmeleri ve bunlara karşılık gelen normal gerilme değerlerini göstermektedir.



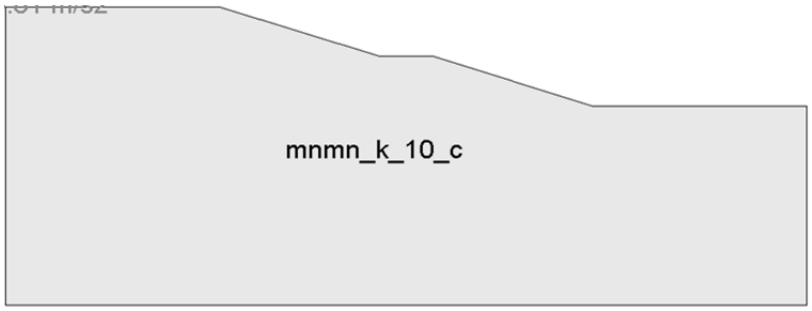
Şekil 9.10 Menemen OSB – büyük b.h.a. endüstriyel atık numunesi kayma mukavemeti parametreleri

Yapılan hesaplamalar sonucunda numunenin içsel sürtünme açısı Ø= 16,5°, kohezyon değeri 42,7 kPa olarak belirlenmiştir.

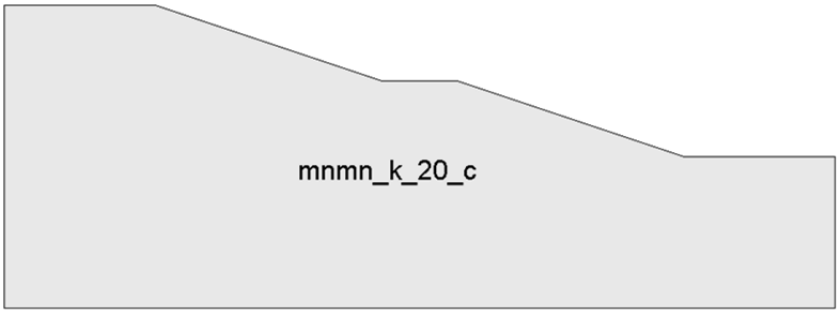
Aynı koşullarda iki farklı birim hacim ağırlık değerlerinde gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda büyük birim hacim ağırlıklı numunenin kayma mukavemeti parametrelerinin, küçük birim hacim ağırlıklı numuneninkinden daha büyük değerler aldığı görülmüştür.

9.4. Menemen OSB Düzenli Depolama Sahası Duraylılık Analizleri

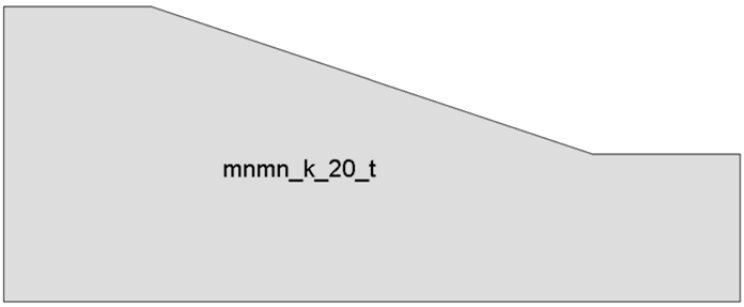
Temel mühendislik özellikleri belirlenmiş endüstriyel katı atık numunelerinin depolama sahasındaki duraylılık analizleri de gerçekleştirilmiştir. Analizler iki farklı birim hacim ağırlık (büyük ve küçük b.h.a.), iki farklı geometri, iki farklı şev eğimi ve iki farklı depolama yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. Duraylılık analizlerinde sonlu farklar metoduna göre hesap yapan FLAC programının Slope modülü kullanılmıştır. Analizlerde kayma mukavemeti parametrelerinin adım adım azaltılması esası dayanım azaltma tekniği kullanılmaktadır (strength reduction technique). Hassas ve doğruluk oranı yüksek sonuçlar elde edebilmek amacıyla analizlerin tamamında ince ağ gözlü (fine meshed) modellemeler yapılmıştır. Şekil 9.11a-d'de analizlerde oluşturulan farklı özelliklerdeki şev modelleri gösterilmektedir.



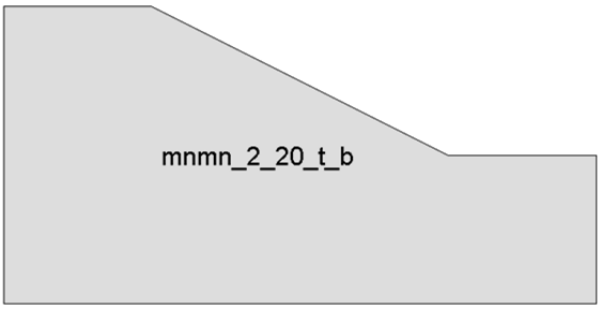
Şekil 9.11.a Küçük b.h.a.'lı çift şevli 10 m depolama yüksekliğinde 1V/3H şev modeli



Şekil 9.11.b Küçük b.h.a.'lı çift şevli 20 m depolama yüksekliğinde 1V/3H şev modeli



Şekil 9.11.c Küçük b.h.a.'lı tek şevli 20 m depolama yüksekliğinde 1V/3H şev modeli



Şekil 9.11.d Büyük b.h.a.'lı tek şevli 20 m depolama yüksekliğinde 1V/2H şev modeli

Yapılan arazi çalışmalarında yeraltı su seviyesinin depo tabanının altında bulunduğu, endüstriyel atıklara herhangi bir etkisinin olmadığı belirlendiğinden analizler doğal duruma göre gerçekleştirilmiştir. Farklı özelliklere sahip 16 farklı şev modelinin geometrik özellikleri tanımlanmış, sınır koşulları belirlenmiş malzeme özellikleri tanımlanıp ilgili bölgelere atamaları gerçekleştirilmiştir. Yeraltı su seviyesi tanımlaması yapılmamış ince ağ gözlü bölümleme işlemi yapıldıktan sonra şev güvenlik sayısı analizine geçilmiştir. Çizelge 9.3'de analizleri gerçekleştirilen 16 farklı şev modelinin özellikleri ve elde edilen güvenlik sayılarını verilmektedir.

Çizelge 9.3 Menemen OSB depolama sahası şev duraylılık analizleri sonuçları

No	Numune özellikleri	Şev eğimi	Depolama yüksekliği (m)	Şev kademesi	Güvenlik sayısı (GS)
1	γ = 8,8 kN/m^3 Ø' = 12,8° c' = 35,9 kPa	1V/3H α=18,43°	10	Tek	4,01
2				Çift	4,30
3			20	Tek	2,57
4				Çift	2,82
5		1V/2H α=26,56°	10	Tek	3,50
6				Çift	3,90
7			20	Tek	2,18
8				Çift	2,48
9	γ = 11,9 kN/m^3 Ø' = 16,5° c' = 42,7 kPa	1V/3H α=18,43°	10	Tek	4,03
10				Çift	4,39
11			20	Tek	2,70
12				Çift	3,01
13		1V/2H α=26,56°	10	Tek	3,56
14				Çift	3,90
15			20	Tek	2,23
16				Çift	2,58

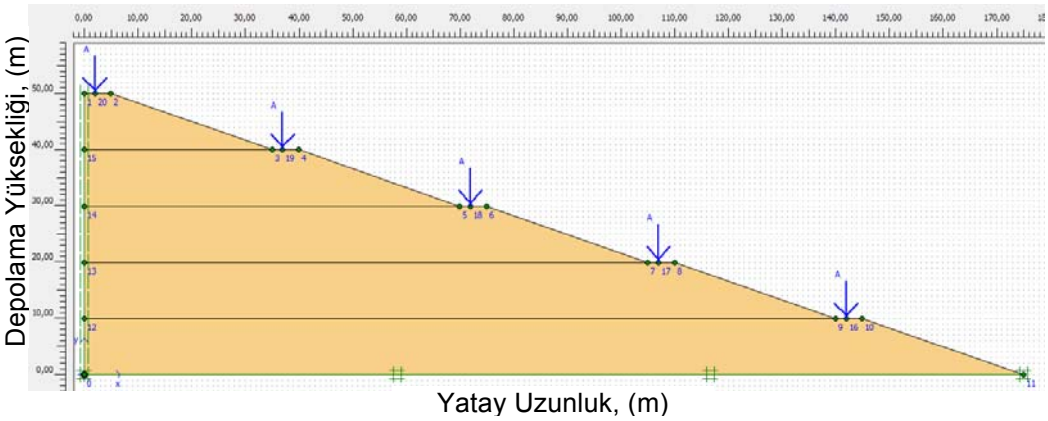
Menemen Organize Sanayi Bölgesi düzenli endüstriyel katı atık sahası için yapılan şev duraylılık analizlerinde büyük birim hacim ağırlıklı modellerin güvenlik sayılarının küçük birim hacim ağırlıklı numunelerinkinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun ortaya çıkmasının en büyük nedeni büyük birim hacim ağırlıklı numunelerin daha yüksek değerli kayma mukavemeti parametrelerine sahip olmasıdır. Şev açısının duraylılık üzerindeki etkisi incelendiğinde; 1 düşey 3 yatay eğimle modellenmiş şevlerin güvenlik sayılarının daha dik eğimle modellenmiş şevlere (1 düşey 2 yatay) kıyasla %10 -15 daha yüksek değer aldığı belirlenmiştir. Duraylılık analizleri sonucunda depolama yüksekliğindeki artışın şev güvenlik sayısını olumsuz etkileyerek azalttığı görülmüştür. Aynı özelliklerde sadece depolama yüksekliği farklı olan şev modellerinde 20 m'lik şevlere ait güvenlik sayıları 10 m'lik şevlerden daha düşük kalmıştır. Son olarak tek şevli ve iki şevli modellerin güvenlik sayıları karşılaştırıldığında iki şevli modellerin daha yüksek güvenlik sayılarına sahip olduğu belirlenmiştir. Analizler sonuçları incelendiğinde en güvenli koşulların 10 m depolama yüksekliğinde, 1/3 şev eğimiyle depolanmış, büyük birim hacim ağırlıklı, çift kademeli geometrideki şev modelinde oluştuğu belirlenmiştir (GS=4,39). Buna karşılık gerek depolama

yüksekliğinin ve şev eğiminin düşük tutulması gerekse çift kademeli bir modelin seçilmesi depolama sahasının ekonomikliğini ve hizmet ömrünü olumsuz şekilde etkilemektedir. Bu nedenle güvenliği göz ardı etmeden ekonomik koşulları da göz önünde bulundurarak düzenli depolama sahasının tasarımı yapılmalıdır. Atık depolama işlemleri sırasında muhakkak uygun özelliklere sahip zemin ile ara filtre katmanları oluşturulmalı ve sıkıştırma işlemleri belirli standartlarda titiz bir şekilde gerçekleştirilmelidir.

Menemen OSB'de faliyete geçmesi planlanan payandalı düzenli endüstriyel atık depolama sahasının şev güvenlik sayısı Plaxis 2-D bilgisayar programıyla belirlenmiştir. İZBAŞ yetkilileriyle yapılan görüşmeler sonucunda düzenli depolama sahasının boyutları yaklaşık olarak belirlenmiştir. Alınan numuneler ile gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda endüstriyel atık numunelerin mühendislik özellikleri analizlerde girdi olarak kullanılmıştır. Depolama sahası birbiri üzerine oturan 10 m kalınlığındaki 5 tabakadan meydana gelecek ve yan yüzeylerin şev eğimleri 1 düşey 3 yatay (1V/3H) olacak şekilde depolama yapılacaktır. Plaxis 2-D analizlerinde plastik durumda kademeler tanımlanarak, hesaplamalardaki yüklemeler aşamalı inşaat (staged construction) şeklinde yapılmıştır. Her bir kademe için şev duraylılık analizleri (phi/c reduction) durumunda yapılmıştır. Tüm kademeler tanımlandıktan ve depolama sahası maksimum yüksekliğine ulaştıktan sonra tüm geometrinin kullanıldığı genel şev duraylılık analizi de gerçekleştirilmiştir.

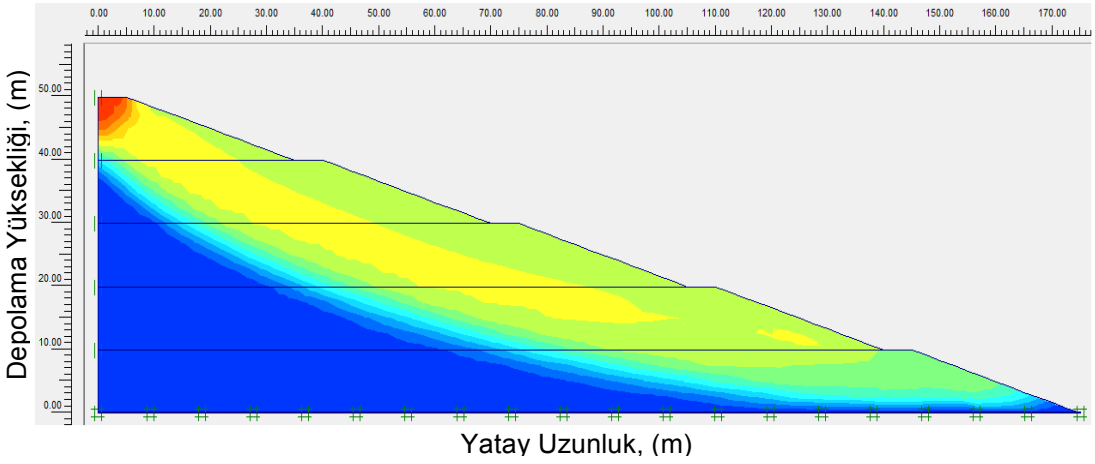
Depolama sahasındaki her bir kademenin oluşturulmasında ekskavatör yardımıyla şev yüzeyinin düzgün ve istenilen eğimde olması sağlanır. Analizler sırasında ekskavatörün ağırlığı da göz önünde çizgisel yük olarak göz önünde bulundurulmuştur. Kademe inşaatı tamamlandıktan sonra ekskavatör yüklemesi önceki kademeden kaldırılmış yeni inşaa edilen kademe için tanımlanmıştır. Analizlerde tanımlanacak ekskavatör yüklemesinin gerçeğe olabildiğince yakın olması için düzenli depolama sahalarında rahatlıkla çalışabilecek bom ve kol uzunluğu 10 metre üzerinde olan midi ekskavatörlerin ağırlığı yapılan araştırmalar sonucunda ortalama 200 kN olarak belirlenmiştir (http://www.cukurovaithalat.com; http://www.temsaismakinalari.com).

Şekil 9.12'de 1V/3H (1 düşey – 3 yatay) şev eğimi ile 10 m kalınlıklarındaki 5 katmandan oluşturulmuş atık gövdesi ve her şevin uç kısmında tanımlanmış çizgisel yükler görülmektedir.



Şekil 9.12 Endüstriyel atık depolama sahasına ait tanımlanmış geometri ve yükler

Analizlerin ilk bölümünü oluşturan aşamalı inşaat kısmı tamamlandıktan sonra tüm şev geometrisini kapsayan duraylılık analizi gerçekleştirilmiştir. Plaxis 2-D programında kayma mukavemeti parametrelerinin adım adım azaltılarak (phi/c reduction) güvenlik sayısının elde edildiği hesaplama türü kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda şev gövdesinde meydana gelen potansiyel kayma yüzeyi Şekil 9.13'de görülmektedir. Atık gövdesinin en üst kademesinin şev duraylılığı bakımından en kritik durumda olduğu görülmektedir. Oluşan potansiyel kayma yüzeyi şev gövdesinin en üst kademesinden başlayıp topuk noktasına kadar uzanmakta, çok büyük bir atık hacmini etkisi altına almaktadır.



Şekil 9.13 Menemen O.S.B. şev gövdesinde meydana gelen toplam deplasmanlar

İzmir Menemen OSB endüstriyel atık depolama sahasına ait duraylılık analizlerinde tanımlanan şev gövdesinin güvenlik sayısı 3,4 olarak elde edilmiştir.

9.5 Deprem Kuvvetlerinin Endüstriyel Katı Atık Depolama Sahasındaki Etkisi

İzmir ili Menemen ilçesi Organize Sanayi Bölgesinde ortaya çıkan endüstriyel atıkların bertarafı için düzenli atık depolama sahası inşaa edilmiştir. Düzenli atık depolama sahası olmadığından 20-30 yıl süresince endüstriyel atıklar bölge yakınındaki bir alana boşaltılmıştır (Şekil 9.14).

Şekil 9.14 Uzun yıllar endüstriyel katı atıkların boşaltığı vahşi depolama alanı uydu görüntüsü

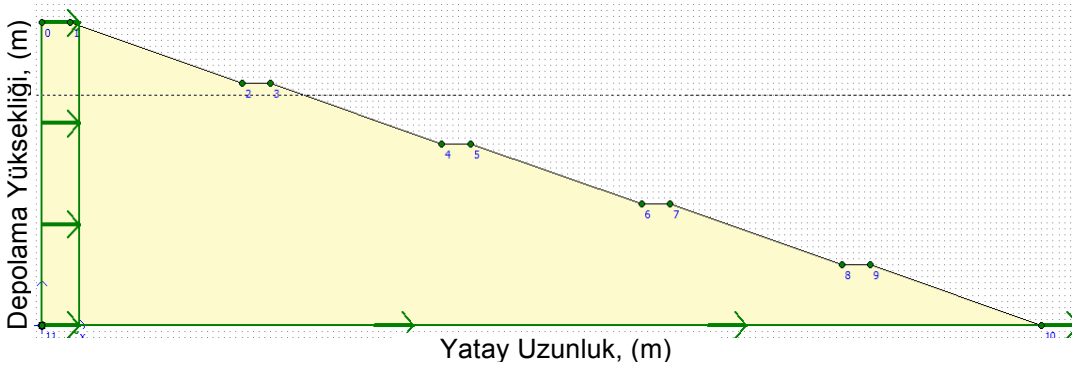
Vahşi depolama sahasında bekleyen atıklar inşaatı tamamlanan düzenli atık depolama sahasına transfer edilecektir (Şekil 9.15).

Şekil 9.15 İnşaatı tamamlanan düzenli katı atık depolama sahası

Şekil 9.15'de görülen Menemen düzenli atık depolama sahası 38°36'55'' kuzey, 26°55'07'' doğu koordinatlarında bulunmaktadır. Depolama sahasının taban alanı yaklaşık 8335 m^2 olarak hesalanmıştır.

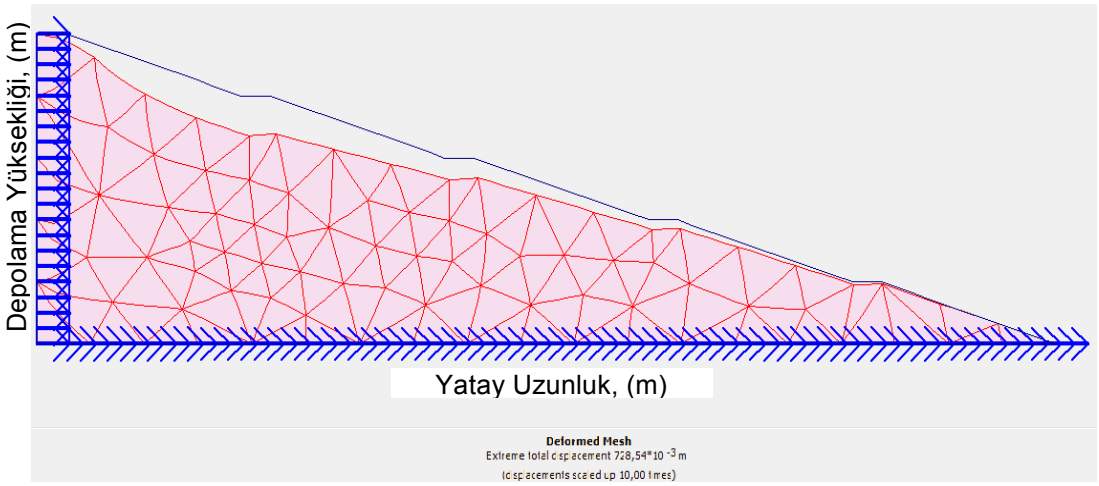
Bu bölümde düzenli atık depolama sahasına etki edecek deprem kuvvetlerinin şev duraylılığını ne şekilde etkileyeceği araştırılmıştır. Arazi çalışmaları ve proje taslaklarından şevin yaklaşık geometrisi oluşturulmuştur. Düzenli depolama sahasına transferi yapılacak olan endüstriyel atıkların laboratuvar deneyleri gerçekleştirilerek temel mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Bölgeye uygun oluşabilmesi muhtemel dinamik deprem ivmeleri Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yönetilen kuvvetli yer hareketleri gözlem ağı sitesinden elde edilmiştir (http://kyh.deprem.gov.tr/). Geçmiş dönemde gerçekleşmiş büyüklüğü 5,5 ile 8,0 arasında değişiklik gösteren 1976 yılından günümüze kadarki depremler incelenmiştir. İlgili bölge için belirtilen özelliklerde 11 deprem kaydı elde edilmiştir (Şekil 8.17). İzmir Güzelyalı Meteoroloji Müdürlüğü'nde kayıt edilen bu çalışmada seçilen deprem 9,31 saniye uzunluğunda olup, veri kayıt sıklığı (sampling interval) 0,005 saniye olarak belirtilmiştir. Kuzey-Güney, Doğu-Batı ve aşağı-yukarı olmak üzere üç farklı doğrultudaki deprem ivme kayıtları Şekil 8.18'de görülmektedir.

Deprem kayıtlarından maksimum ivme değerleri belirlenmiş daha sonra maksimum değere göre 0,4g – 0,2g – 0,1g – 0,05g'lik dört farklı ölçeklendirme oluşturulmuştur. Dört farklı maksimum ivme değeri modellenen taban kayasına tanımlanmış deplasman olarak girilmiş ve şev gövdesinde oluşan maksimum deplasmanlar elde edilmiştir. Şekil 9.16'da analizlerde kullanılan model gösterilmektedir.



Şekil 9.16 Deplasmanları taban kayasına tanımlanmış şev modeli

Şev geometrisi oluşturulduktan sonra malzeme tanımlaması ve ataması gerçekleştirilmiştir. Deprem durumunu temsil eden sınır koşulları belirlendikten sonra taban ve şevin sırt kısmına deplasmanlar (prescribed displacement) tanımlanmıştır. Orta gözlü ağ sistemi oluşturulduktan sonra başlangıç koşulları (initial conditions) tanımlanmıştır. Hesaplama bölmünde başlangıç durumunun oluşturulduğu plastik aşama ve dinamik kuvvetlerin şeve etki ettirildiği dinamik aşama tanımlanmıştır. Hesaplama aşaması tamamlandıktan sonra deforme olmuş şev modeli ve meydana gelen maksimum deplasman değerleri elde edilmiştir (Şekil 9.17).



Şekil 9.17 Menemen O.S.B. depolama sahası deforme olmuş şev modeli

Gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda 0,4g'lik maksimum ivme değerinde 73 cm'lik deformasyonların oluştuğu belirlenmiştir. Diğer maksimum ivme değerleri için bulunan maksimum deformasyon değerleri Çizelge 9.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 9.4 Menemen OSB endüstriyel atık şevdeki maksimum deplasman değerleri

No	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (m)
1	0,4	728.10^{-3}
2	0,2	254.10^{-3}
3	0,1	86.10^{-3}
4	0,05	17.10^{-3}

Oluşturulan şev modeli için tanımlanan deprem modelinin lokal göçmelere ve küçük bloklar halinde kaymalara neden olacağı ancak bu hareketlerin büyük kütlelerin duraylılığını bozmayacağı yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde çalışma kapsamında elde edilen tüm sonuçlar ve ileride bu konuda yapılması gereken araştırmalar için önerilere yer verilmiştir.

10.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında doğal ve sentetik kentsel katı atıkların geoteknik karakterizasyonu laboratuvar deneyleriyle belirlenmiş, elde edilen mühendislik parametreleri kullanılarak mevcut ve tasarlanmış şev modellerinin duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deneyleri ve bilgisayar analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

10.1.1 Kentsel Katı Atıkların Fizikokimyasal Özellikleri

1. Üç farklı kompozisyonda (T-1, E-1 ve U-1) üretilen sentetik kentsel katı atık numunelerinin ve Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal atık numunelerinin granülometri eğrileri USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi)'e göre iyi derecelenme koşullarına sahiptir ($1 < C_c < 3$ ve $C_u > 6$).

2. Yüksek miktarda organik atık içeriği kompozisyonunun daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasına neden olmaktadır. Üç kompozisyon içerisinde metal atık yüzdesi en fazla olan U-1 numunesi en yüksek değere sahiptir (G_s = 1,90). Organik atık bakımından en büyük yüzdeye sahip olan T-1 kompozisyonu en düşük özgül ağırlık değerine sahiptir (G_s = 1,27).

3. KKA numuneleri içerisinde en büyük su içeriği değerlerine organik atıkların (mutfak (w=%620) ve park-bahçe (w=%468) atıkları) sahip olduğu belirlenmiştir. Plastik, cam, kağıt, karton, kül, tekstil, zemin, metal atıkların su içeriği değerlerinin %5'in altında değer aldığı belirlenmiştir. Organik atık bakımından en büyük yüzdeye sahip olan sentetik taze T-1-D kompozisyonu en yüksek su içeriği (%62) değerine sahiptir.

4. T-1 numunesinin içerisinde yüksek oranda (%15) kül atık bulundurması en yüksek pH (10,5) değerine sahip olmasına neden olmuştur Asidik özellikte oldukları belirlenen E-1-D ve U-1-D kompozisyonlarının pH değerleri birbirine oldukça yakın değerdedir ($pH_{E\text{-}1\text{-}D}$=5,94 ve $pH_{U\text{-}1\text{-}D}$=5,89).

5. Yıllanma etkisi ile kompozisyonların organik madde içeriklerinde zamanla azalmalar meydana gelmektedir. En yüksek organik atık yüzdesine sahip T-1-D numunesinin organik madde miktarı %65'den 1 yıl sonunda %52 değerine gerilemiştir.

6. T-1 kompozisyonu içerisinden kül atığın tamamen çıkarılması ile özgül ağırlık ve su içeriği değerlerinde artış meydana gelmiştir. Mutfak ve park-bahçe atığı gibi atıkların kompozisyon içerisindeki oranının %25 azaltılması ise özgül ağırlık değerinde artışa neden olurken, doğal su içeriğinde temel kompozisyona göre çok büyük düşüşlere (%62'den %22'ye) neden olmuştur.

7. U-1 kompozisyonundaki %12'lik plastik atığın tamamen çıkartılması özgül ağırlık ve doğal su içeriği değerlerini arttırmıştır. Yine U-1 kompozisyonu içerisindeki %9 metal atığın tamamen çıkartılması özgül ağırlık değerinde düşüşe, doğal su içeriğinde artışa neden olmuştur.

8. E-1 kompozisyonu içerisindeki kağıt-karton atık oranının %25 azaltılması özgül ağırlık değerinde kayda değer bir değişim görülmezken, doğal su içeriği değeri artmıştır. Organik madde oranının %25 azaltılması ise özgül ağırlık değerinde artışa, doğal su içeriğinde kayda değer azalmaya neden olmuştur.

9. Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal taze KKA numunesinin doğal su içeriği %94, özgül ağırlık değeri 1,12 ve organik madde miktarı %61, Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal yıllanmış (M-Y-D) KKA numunesinin doğal su içeriği değeri %68, özgül ağırlık değeri 1,43 ve organik madde miktarı %41 olarak belirlenmiştir.

10. İzmir Menemen endüstriyel atık depolama sahasından alınan doğal atık numunesinin organik madde miktarı %41, doğal su içeriği değeri %85 olarak belirlenmiştir.

10.1.2 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

1. Üç farklı kompozisyonun Standart Proctor kompaksiyon deneyleri sonucunda en büyük maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri U-1-D numunesine aittir. E-1-D numunesi, U-1-D numunesine yakın değerler alırken, en küçük optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri yüksek oranda organik atık ve diğer kompozisyonlarda bulunmayan kül atık içeren T-1-D kompozisyonuna aittir.

2. Sıkıştırma enerjisi sentetik taze KKA numunelerin kompaksiyon davranışı üzerindeki etkileri incelendiğinde, Modifiye Proctor deneylerinde aynı özelliklerdeki KKA numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri Standart Proctor deneyine kıyasla %25 - %30 oranında artış gösterirken, optimum su içeriği değerleri %35 - %45 oranında azalmıştır.

3. Yıllanmış numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin taze numunelere kıyasla %20 - %25 daha yüksek değer alırken, optimum su içerikleri birbirine yakın değerler almıştır. Modifiye Proctor deneyleri sonucunda T-1-Y numunesi en büyük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine ve en küçük optimum su içeriği değerine sahiptir.

4. Dane boyu dağılımının kompaksiyon davranışı üzerindeki etkileri incelendiğinde iri daneli KKA numunelerin orijinal boyutlu numunelere kıyasla %20 - %25 daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. E-1-D ve U-1-D iri ve orijinal numunelerinin optimum su içeriğinde önemli bir farklılık gözlenmezken, T-1-D iri daneli numunenin optimum su içeriği değeri orijinal daneli numuneye kıyasla %40 artmıştır.

5. Kompozisyon içerisindeki kağıt-karton atık kesit alanının beş katına çıkartılmasıyla numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri orijinal dane boyutlu numunelere kıyasla artmış, optimum su içeriği değerleri azalmıştır.

6. Kompozisyonun kompaksiyon davranışı üzerindeki etkisi incelendiğinde, U-1 numunesinde plastik atığın tamamen çıkartılmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri artmış, optimum su içeriği değeri azalmıştır. Metal atığın orijinal kompozisyondan çıkartılmasıyla ise maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değeri orijinal kompozisyona oldukça yakın değer almıştır.

7. Kül atığın T-1 kompozisyonundan tamamen çıkartılmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri azalmış, optimum su içeriği değeri artmıştır. Organik atık oranının azaltılmasıyla ise maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri artmış, optimum su içeriği değeri azalmıştır. Organik atık miktarının fazla olması sıkıştırabilirliği engelleyici yönde etki yapmaktadır.

8. Kağıt-karton atık yüzdesinin E-1 numunesinde azaltılmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri artmış, optimum su içeriği değeri azalmıştır. Kağıt-karton atık miktarı sıkıştırabilirliği negatif yönde etkilemektedir. T-1 numunesinde elde edilen

sonuçlara benzer şekilde E-1 numunesinde organik madde miktarının azaltılması maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırırken, optimum su içeriği değerini azalmıştır.

9. Modifiye kompozisyonlar ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda kompozisyon içerisindeki organik madde miktarının azaltılmasının maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırıcı, buna karşılık optmum su içeriği değerini azaltıcı bir etkisinin olduğu hem T-1-2 hem de E-1-2 numunelerinde görülmüştür. Diğer bir öenmli sonuç ise ince daneli kül atığın maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırıcı, optimum su içeriği değerini azaltıcı bir etkiye sahip olmasıdır.

10. Sentetik numuneler için elde edilen sonuçlara benzer şekilde, Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal yıllanmış (M-D-Y) numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri doğal taze (M-D-T) numuneden büyük, optimum su içeriği değeri daha küçük çıkmıştır.

11. Benzer kompozisyon oranlarına sahip Manisa doğal KKA numunesi ile sentetik T-1 numunesinin taze ve yıllanmış numuneleri karşılaştırıldığında, sentetik numunelerin doğal numunelere kıyasla daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık ve daha düşük optimum su içeriği değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasında sentetik numunelerin daha dengeli bir dane dağılımına sahip olması önemli rol oynamıştır.

10.1.3 Kentsel Katı Atıkların Sıkışabilirlik Özellikleri

1. Doygun durumda ve optimum su içeriğinde üç farklı kompozisyondaki numunelerin sıkışma indeksleri karşılaştırıldığında en küçük değerin E-1-D ve E-1-I numunelerine ait olduğu saptanmıştır. E-1 numunesinin kağıt-karton bakımından zengin olması kağıt-karton atık içeriğinin sıkışmaya karşı direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır.

2. Organik atık oranının azaltıldığı E-1-2 numunesinde sıkışma indeksi değerinde orijinal kompozisyona kıyasla ufakta olsa bir azalma gözlenmiştir.

3. Kül atığın T-1 numunesinden çıkartılması sıkışma indeksi değeri üzerinde kayda değer bir değişime neden olmamıştır. Fakat organik atığın T-1 kompozisyonu içerisindeki yüzdesinin azaltılması sıkışma indeksinin küçülmesine neden olmuştur.

4. Organik madde miktarının kompozisyon içerisindeki yüzdesinin azaltılması sıkışabilirlik direncini arttırıcı yönde etki yapmaktadır (E-1-2 ve T-1-2 numuneleri).

5. Plastik atığın U-1 kompozisyonundan çıkarılması, sıkışma indisi değerini arttırmıştır. Metal atığın U-1 kompozisyonundan çıkarılması ise sıkışma indeksi değerini düşürmüş, dolayısıyla sıkışabilirliği azaltıcı yönde etki yapmıştır

6. Yıllanmanın sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkileri incelendiğinde, yıllanmış numunelerin sıkışma indeksi değerlerinin daha büyük olduğu daha fazla sıkışabilirliğe sahip oldukları belirlenmiştir. Deneyler sonucunda E-1-Y ve T-1-Y numunelerine ait sıkışma indeksi değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlenirken ($C_{cE\text{-}1\text{-}Y}$ = 0,883 ve $C_{cT\text{-}1\text{-}Y}$ = 0,870), U-1-Y numunesinin sıkışma indeksi değeri 1,072 olarak belirlenmiştir.

7. Yıllanma etkisi Manisa Büyük Şehir Belediyesi vahşi atık depolama sahasından alınan numuneler üzerinde incelendiğinde yıllanmış numunenin sıkışma indeksi değerinin, taze numuneye göre az da olsa daha küçük değer aldığı belirlenmiştir.

10.1.4 Kentsel Katı Atıkların Kayma Mukavemeti Özellikleri

1. Optimum su içeriğinde kuru olarak ve doygun durumda gerçekleştirilen direk kesme deneyleri sonucunda en büyük içsel sürtünme açısı kağıt-karton atık bakımından zengin E-1 numunesine, en büyük kohezyon değeri ise organik atık bakımından zengin T-1 numunesine aittir.

2. Kağıt-karton ve tekstil gibi su adorbe etme kapasitesi olan atıklar doygun durumda şişerek kaymaya karşı kuru duruma daha fazla direnç göstermişleridir. Üç kompozisyon için de doygun durumdaki numunelerin kayma mukavemeti parametrelerinin, optimum su içeriğindeki numunelerden daha büyük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

3. Yıllanma etkisinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, tüm kompozisyonlarda yıllanmış numuneler taze numunelere göre daha büyük kayma mukavemeti parametreleri değerlerine sahip olmuştur. Yıllanma etkisi ile organik atık miktarında azalma meydana gelmiş ve dane boyutları küçülmüştür, böylelikle taze numuneye göre daha büyük kayma mukavemeti elde edilmiştir.

4. Kağıt-karton atığın E-1 numunesinden çıkartılmasıyla kohezyon değerinde büyük bir değişim gerçekleşmezken, efektif içsel sürtünme açısında azalma gözlemlenmiştir. Bu durum lifli yapısıyla kayma mukavemetini arttırıcı etki yapan kağıt-karton atığın kompozisyon içerisindeki yüzdesinin azaltılmasının bir sonucudur. Organik atık

yüzdesinin azaltılması ile de E-1-2 kompozisyonunun kayma mukavemeti parametrelerinde önemli bir artış meydana gelmiştir. Organik atık kayma mukavemetini azaltıcı yönde etki yapmaktadır.

5. T-1 numunesi üzerinde kül atık kayma mukavemetini arttırıcı yönde etki yaparken, organik atık E-1 numunesine benzer şekilde kayma mukavemetini azaltıcı yönde etki yapmıştır. Organik atığın azaltılmasıyla üretilen T-1-2 kompozisyonunun kayma mukavemeti parametreleri T-1-D kompozisyonuna kıyasla daha büyük değerler almıştır.

6. Genel olarak kompozisyon etkisinin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, organik atık miktarında meydana gelen azalmanın efektif içsel sürtünme açısını olumlu şekilde etkilediği (arttırdığı) belirlenmiştir. Kompozisyonlar içerisinde önemli bir yüzdeye sahip olan kağıt-karton atıklar ise lifli yapıları nedeniyle içsel sürtünme açısı değerini arttırmaktadır.

7. KKA içerisindeki dane boyutlarının büyük olması genel olarak kayma mukavemetini arttırıcı yönde etki yapmaktadır. Kağıt-karton atık boyutunun beş katına çıkartıldığı E-1-K, T-1-K numunelerinin efektif içsel sürtünme açısı orijinal numuneye kıyasla artarken, kohezyon değeri azalmıştır. Mutfak atık boyutlarının beş katına çıkartıldığı E-1-M, T-1-M numunesinin efektif içsel sürtünme açıları daha büyük değerler almıştır. U-1-K ve U-1-M numunelerinin gerek efektif içsel sürtünme açısının gerekse kohezyon değerinin daha büyük olduğu belirlenmiştir.

8. En genel haliyle atık dane boyutlarında (kağıt-karton ve mutfak atıkları) meydana gelen artış efektif içsel sürtünme açısını arttırmaktadır. Dane boyutundaki artışın kohezyon değeri üzerindeki etkisi kompozisyona bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin atık dane boyutlarında meydana gelen büyüme U-1 kompozisyonu için kohezyon değerlerinin orijinal kompozisyona kıyasla artışına neden olurken ($C_{U-1-M} > C_{U-1-K} > C_{U-1-D}$), T-1 kompozisyonunda iri atık daneli numunelerin kohezyon değeri orijinal numuneninkinden düşük kalmıştır ($C_{T-1-D} > C_{T-1-K} > C_{T-1-M}$).

9. İri boyutlu kağıt-karton atıkların efektif içsel sürtünme açısı değerini, iri boyutlu mutfak atıklarına kıyasla daha fazla arttırdığı belirlenmiştir. Buna karşılık iri daneli mutfak atığının kohezyon değerinde kağıt-karton atığa kıyasla daha etkili rol oynadığı söylenebilir.

10. Manisa vahşi atık depolama sahasından alınan doğal yıllanmış ve doğal taze KKA numunelerin efektif içsel sürtünme açıları birbirine oldukça yakın değer almıştır. Kohezyon değerleri karşılaştırıldığında, yıllanmış M-D-Y numunesinin taze M-D-T numunesine kıyasla daha büyük değere sahip olduğu görülmüştür.

11. Sentetik T-1-D numunesi ile doğal M-D-T numunesinin kayma mukavemeti parametreler karşılaştırıldığında; doğal numunenin efektif içsel sürtünme açısının daha büyük, kohezyon değerininse daha küçük değer aldığı belirlenmiştir. Sentetik ve doğal yıllanmış numuneler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Doğal numunenin sentetik numuneye göre daha büyük danelere sahip olması daha büyük içsel sürtünme açısına sahip olmasına neden olmuştur.

10.1.5 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılığı

1. Farklı mühendislik özelliklerine sahip şev modellerinin duraylılık analizleri sonucunda 1V/2H eğimindeki şevlere ait güvenlik sayılarının 1V/3H eğimindeki modellerden %15 - %25 oranında daha küçük değer aldığı belirlenmiştir.

2. Gerçekleştirilen duraylılık analizlerinde 7 ve 14 kN/m$^{3'}$lük iki farklı birim hacim ağırlık değerinde modellenen şevlerin güvenlik sayıları karşılaştırıldığında 14 kN/m^3 birim hacim ağırlığındaki şevlerin güvenlik sayısı değerinin 7 kN/m^3 birim hacim ağırlığındaki şevlere kıyasla %20 - %30 oranında daha küçük değer aldığı belirlenmiştir.

3. Yıllanma etkisinin şev güvenlik sayısı üzerindeki etkileri incelendiğinde yıllanmış T-1-Y ve U-1-Y numunelerinin güvenlik sayısı değerleri sentetik taze T-1-D ve U-1-D numunelerinden daha büyük değer almıştır. Benzer durum E-1-Y ve E-1-D numunelerinde de görülmesine karşın güvenlik sayıları arasındaki fark diğer iki kompozisyona kıyasla oldukça küçüktür.

4. Tasarımlarda kullanılan şev güvenlik sayısını esas alınarak (GS=1,5) iki farklı birim hacim ağırlıktaki (7 ve 14 kN/m^3) T-1-D kompozisyonunun eşitli şev açılarında ve depolama yüksekliklerinde duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda daha düşük birim hacim ağırlıktaki KKA numunesi ile aynı şev açısında büyük birim hacim ağırlıklı numuneden daha büyük yüksekliklerde depolama yapılabildiği görülmüştür.

5. Şev geometrisinin şev güvenlik sayısı üzerindeki etkileri incelendiğinde, iki kademeli modellerin güvenlik sayılarının tek kademeli modele göre %12 - %20 oranında daha büyük değer aldığı belirlenmiştir.

6. Şev modelinde eğimli yüzeyin önündeki ve arkasındaki düzlük mesafesinin uzatılması şev güvenlik sayısını olumlu şekilde etkilemektedir. Yapılan şev duraylılık analizlerinde ön ve arka düzlükler sırasıyla 20 – 50 ve 100 m olacak şekilde modellendiğinde artan düzlük mesafesine paralel olarak güvenlik sayıları da %2 - %5 oranında artış göstermiştir.

7. Yıllanmış ve taze KKA numunelerin kademeli şekilde depolanmasını temsil eden alt kısımdaki yıllanmış numunenin üzerinde yerleştirilen taze atığın oluşturduğu şev modelinin güvenlik sayıları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda 20 m'lik depolama yüksekliği, 1V/3H şev açısı ile modellenmiş T1Y-T1D'nin en yüksek güvenlik sayısına sahip olduğu belirlenmiştir.

8. KKA tabakaları arasına serilen kum katmanının şev güvenlik sayısına etkileri incelendiğinde yıllanmış kademenin üzzerine serilen iyi derecelenmiş kum tabakasının ilk duruma göre güvenlik sayılarını azalttığı belirlenmiştir. Bu durum iyi derecelenmiş kum tabakasının kayma mukavemeti parametrelerinin KKA'ların kayma mukavemeti parametrelerinden daha düşük olmasından kaynaklanmıştır.

9. Aynı özelliklerde modellenmiş şevler sonlu farklar metodunu kullanan FLAC-2D ve sonlu elemanlar metodunu kullanan Plaxis 2-D programları ile modellenerek güvenlik sayıları karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda FLAC-2D programından elde edilen güvenlik sayılarının, Plaxis-2D programından elde edilen değerlerden %2 ile %8 oranında daha büyük olduğu belirlenmiştir.

10. Dinamik kuvvetlerin etkisi altındaki şevlerin davranışlarının incelenmesi amacıyla farklı maksimum ivme değerleri kademeli şev modelinin ana kayasına etki ettirilmiş ve meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir. Beklenildiği gibi maksimum ivme değeri arttıkça, şev gövdesinde meydana gelen deformasyonlar önemli şekilde büyümektedir.

10.2 Genel Sonuçlar

1. Laboratuvar ortamında üretilen sentetik KKA numunelerin mühendislik davranışı açısından doğal KKA numunelere oldukça benzer davranış gösterdiği belirlenmiştir.
2. Ülkeler arasındaki KKA kompozisyonları incelendiğinde içerdiği malzemeler ve bileşim oranları açısından farklılıklar olduğu göze çarpmaktadır. Bu farklılıkların sonucu olarak KKA'ların mühendislik parametreleri de değişiklik gösterdiği saptanmıştır.
3. Kağıt, karton ve tekstil gibi lifli atıkların KKA'ların sıkışma ve kayma dayanımı davranışına olumlu yönde etkide bulundukları gözlenmiştir.
4. Yıllanma etkisi KKA'ların sıkışma davranışını olumsuz şekilde etkilerken, kayma dayanımında az da olsa olumlu etkiye neden olduğu yapılan deneyler ve analizler sonucunda saptanmıştır.
5. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen büyük ölçekli direk kesme deneyleri sonucunda, organik atık miktarının da kohezyon değerini arttırıcı etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

10.3 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında, bundan sonra KKA'ların geoteknik özelliklerinin belirlenmesi konusunda yapılacak çalışmalar için belirlenmiş öneriler aşağıda özetlenmiştir:

Kentsel katı atıkların mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde tüm dünyada ortak kullanılabilecek standartlar bulunmamaktadır. Bu durum aynı niteliklerdeki atık numunelerin mühendislik özelliklerinin yorumlanmasında problem oluşturmaktadır. Bu nedenle KKA'lara özel deney standartlarının oluşturulması amacıyla gerekli çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Kentsel katı atıkların uzun dönemli sıkışma davranışları oksijenli (aerobik) ve oksijensiz (anaerobik) ortamlar için ayrı ayrı incelenmelidir. Bu çalışma kapsamında sadece birincil sıkışmalar ele alınmıştır, bundan sonraki çalışmalarda tüm sıkışma aşamalarını göz önünde bulunduran incelemeler gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada KKA'ların fizikokimyasal ve mekanik özellikleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda arazi ortamında yapılacak çalışmalarla mühendislik parametreleri elde edilebilir ve bu sonuçlar labratuar deney sonuçları ile karşılaştırılabilir. Arazideki davranışın belirlenebilmesi açısından depolama sahasında

yerinde yapılacak yükleme testleriyle KKA'ların sıkışma davranışları, direk kesme deneyleriyle KKA'ların kayma mukavemeti parametreleri belirlenebilir.

Laboratuvar ortamında oluşturulacak depolama sahası şev modelleme sistemiyle, KKA'ların duraylılıkları çeşitli koşullar altında incelenebilir ve elde edilen veriler analiz sonuçları ile karşılaştırılabilir.

Yıllanmanın KKA'ların mühendislik parametreleri üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda oluşturulacak KKA numunelerde yıllanma süresi daha da uzatılarak bozunma ve tamamen ayrışma geçirmiş numunelerin özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Asaoka, A, 1978. Observational procedure of settlement prediction. Soils and foundations, 18(4), 89-101.

2. ASTM D2216-10, 2010. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA.

3. ASTM-D 2974-14, 2014. Standard Test Methods for Moisture, Ash and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.

4. ASTM-D 698-12, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA.

5. ASTM-D 1557-12, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA.

6. ASTM D854-14, 2014. Standard Method of Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.

7. ASTM D4186-12, 2012. Standard Test Method for One Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA.

8. ASTM D3080-11, 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.

9. Aykol, K., 2008. Evsel katı atıkların Geoteknik özelliklerinin modellenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

10. Babu Sivakumar G.L, Reddy K.R, Chouksey S.K., 2010. Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression. Waste Manag. 2010 Jan; 30(1): 11-22. doi: 10.1016/j.wasman. 2009.09.005.

11. Barlaz M.A., Ham R.K. and Schaefer D.M. 1990. “Methane production from municipal refuse: A review of enhancement techniques and microbial dynamics.” Critical Reviews in Env. Control. 19(6): 557-584.

12. Beaven, R., and Powrie, W., 1996. Determination of the Hydrogeological and Geotechnical Properties of Refuse in Relation to Sustainable Landfilling, Proceedings of the Nineteenth International Madison Waste Conference: Municipal and Industrial Waste, University of Wisconsin, Madison, Madison, WI, 435-453.

13. Bjarngard, A., and Edgers, L., 1990. Settlement of Municipal Solid Waste Landfills, Proceedings of the Thirteenth Annual Madison Waste Conference , University of Wisconsin, Madision, Madison, WI, 192-205.

14. Bleiker, D.E., McBean, E. and Farquhar, G. 1993. "Refuse Sampling and Permeability Testing at the Brock West and Keele Valley Landfills." Proceedings of the Sixteenth International Madision Waste Conference, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison, 548-567.

15. Blight, G.E., J.M. Ball, and J.J. Blight., 1992. Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas, J. Environ. Eng. N.Y., 118 (6), 865- 877, 1992.

16. Bogner, J.E., Reddy, K., and Spokas, K., 2001. Dynamic Water Balance Aspects of Bioreactor Landfills. Proceedings Sardinia 2001, International Solid and Hazardous Waste Symposium, Calgary, Sardinia.

17. Boztuğ, D., 2002. İleri atık yönetimi CMU 527 ders notları Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.

18. Bray, J. D., Zekkos, D., Kavazanjian, E., Athanasopoulos, G. A., Riemer, M. F. 2009. “Shear strength of municipal solid waste”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE.

19. Brink, D., Day, P.W., Preez, Du, L., 1999. Failure and remediation of Bulbul Drive landfill: Kwazlu-natal, South Africa. Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 555–562.

20. Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L., Soler, N., 2002. The landslide of Dona Juana landfill in Bogota. A case study. In: Proceedings of the fourth international congress on

environmental geotechnics (4th ICEG), Rio de Janeiro, Brazil, 11–15 August 2002, pp 171– 175.

21. Canizal, J., Lapena, P., Castro, J., Costa, A.D., Sagaseta, C., 2011. Fourth International Workshop Hydro-Pyhsico-Mechanics of Landfills, 27-28 April 2011, Spain.

22. Chen, H.T., 1995. Hydraulic Conductivity of Compacted Municipal Solid Waste Bioresource Technology, 51, 205-212.

23. Chen, Y., Zhan, T., Wei, H., and Ke, H. 2009. "Aging and compressibility of municipal solid wastes." Waste Management, 10.1016/j.wasman. 2008.02.024, 86-95.

24. Chen, Y., Ke, H., Fredlund, D., Zhan, L., and Xie, Y. 2010. "Secondary Compression of Municipal Solid Wastes and a Compression Model for Predicting Settlement of Municipal Solid Waste Landfills." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000273, 706-717.

25. Cheney, L., 1983. Settlement of landfill. Proc., 3rd Harwell Waste Management Symp., Harwell, U.K., 13–29.

26. Clayton, K.C. and Huie, J.M., 1973. Solid Wastes Management The Ragional Approach, Ballinger Publisher Company, Cambridge.

27. ÇOB (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı)., 2006. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, T.C. Resmi Gazetesi No:27533, Tarih: 26.03.2010

28. Converse Davis Dixon Associates., 1975. Slope Stability Investigation, Proposed Final Slope Adjacent to the Pomona Freeway, Operating Industries Disposal Site, Unpublished Report, October 1975.

29. Cooper Engineers., 1986. Unconsolidated undrained triaxial shear test results. Job No. 2659-A3, Zanker Road Resource Recovery, May.

30. Coumoulous, D.G., and Koryalos, T.P., 1999. Prediction of long-term settlement behavior of landfill covers after closure. 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia (Italy).

31. Dames and Moore, 1988. Work Plan. Supplemental Site Investigation. Bowers Landfill, Circleville, Ohio. Job No. 00850-041-17.

32. D'Appolonia Consulting Engineers, 1978. "Potential for Hydrocarbon Explosions and Probable Related Impacts in Mechanically Mined Underground Crude Oil Storage Facilities," D'Appolonia Consulting Engineers, Pinsburg, Pennsylvania.

33. Dixon, N., Ng'ambi, S., Jones, D.R.V., 2004. Structural performance of a steep slope landfill lining system Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 157, pp. 115–125

34. Dixon, N., and Jones, D.R.V., 2005. Engineering Properties of Municipal Solid Waste, Geotextiles and Geomembranes, 23, 205-233.

35. Dixon, N., and Langer, U., 2006. Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. International Journal of Waste Management Science & Technology, 26, 3, 207-318.

36. Dixon, N., Langer, U., Gotteland, P., 2008. Classification and mechanical behavior relationships for municipal solid waste: study using synthetic waste. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 134 (1), 79–90.

37. Dodt, M.E., Sweatman, M.B., and Bergstorm, W.R., 1987. "Field measurements of landfill surface settlement." Proc., Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, Ann Arbor, Mich., Vol. 13, 406–418.

38. Durmusoglu, E., Sanchez, I.M., Corapcioglu, M.Y., 2006. Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples. Environmental Geology 50, 773–786.

39. Earth Technology Corporation., 1988. In-place stability of landfill slope, Puente Hills landfill, Los Angeles County, California. Rep. No. 88-614-1 Prepared for Los Angeles County Sanitation District, Earth Technology Corporation, Los Angeles.

40. Edil, T.B., Ranguette, V.J., and Wuellner, W.W., 1990. Settlement of municipal refuse, Geotechnics of wastefills: Theory and practice, ASTM Spec. Tech. Publ., 225-239

41. Edil, T.B., Fox, P.J., and Lan, L.T., 1991. Observational procedure for settlement of peat. Proc., Geo-Coast 91 Conf., Port and Harbor Res. Inst., Japan, 165-170.

42. Edincliler, A., Benson, C.H., Edil, T.B., 1996. Shear strength of municipal solid waste: interim report—year 1. Environmental geotechnics research report 96-2, prepared for WMX Technologies, Inc., February, 65 pp.

43. Eid, H., Stark, T., Evans, W., and Sherry, P. 2000. ”Municipal Solid Waste Slope Failure. I: Waste and Foundation Soil Properties”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(5), 397–407.

44. Eid, H., Stark, T., Evans, W., and Sherry, P. 2000. ”Municipal Solid Waste Slope Failure. II: Stability Analysis”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(5), 408–419.

45. El-Fadel, M., and Al-Rashed, H., 1998. "Settlement in Municipal Solid Waste Landfills, Field Scale Experiments," The Journal of Solid Waste Technology and Management, 25, 2, 89-98.

46. EMCON Associates., 1989. Report of Waste Discharge Geologic/Hydrogeologic Report, Owens-Corning Solid Waste Disposal Site, San Jose, California. March 1989.

47. EPA, 2009. Technical Report of United States Environmental Protection Agency, Municipal Solid Waste in The United States. www.epa.gov.

48. Erdin, E., 1996. Çevre Bilimleri ve Teknomojisi Terimler Sözlüğü, DEÜ Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir.

49. Fahker, A., 2006. Experimental Study on the Compaction of Waste. Proc. 5th ICEG, Cardiff, 1: 445- 452. Edited by H.R.Thomas.

50. Fassett, J.B., Leonards, G.A, and Repetto, P.C., 1994. “Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and their Use in Landfill Design,” Waste Tech ’94, Landfill Technology, Technical Proceedings, Charleston, SC.

51. Fungarali, A.A., and Steiner, R.L., 1979. Investigation of sanitary landfill behavior. Volume I. Final report Jul 01 1979.

52. Gabr, M.A., and Valero, S.N., 1995. Geotechnical properties of municipal solid waste. Geotech Test J ASTM 18(2):241–251

53. Gabr, M.A., Hossain, M.S., Barlaz, M.A., 2002. Review of shear strength parameters of municipal solid waste with Leachate recirculation. In: Proceedings of 2nd intercontinental landfill research symposia, October 13–16, 2002 in Asheville, NC.

54. Gandolla, M., Dugnani, L., Bressi, G., and Acaia, C., 1992. “The determination of subsidence effects at municipal solid waste.” Proc., 6th Int. Solid Wastes Congress, Madrid, Spain, 1–17.

55. Gidarakos, E., Havas, G., and Ntzamilis, P., 2005. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in The Island of Crete, Waste Management, Vol.26, No.6, pp. 1-12, 2005.

56. Gomes, C., Ernesto, A., Lopes, M.L., and Moura, C., 2002. “Sanitary landfill of Santo Tirso-municipal waste physical, chemical and mechanical properties.” Proc., 4th Int. Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol. 1, 255–261.

57. Gomes, C., Lopes, M.L., Lopes, M.G., 2005. A study of MSW properties of a Portugese landfill. In: Proceedings of international workshop on hydro-physico-mechanics of landfills, LIRIGM, Grenoble 1 University, France, 21–22 March 2005.

58. Gören, S., 2006. Sanitary Landfill, Forart Matbaası., İstanbul.

59. Gourc, J.P., Thomas, S., Vuillemin, M., 1998. Proposal of a waste settlement survey methodology. Proceedings Environmental Geotechnics, Seco e Pinto (Ed.), Balkema, pp. 195–200.

60. Grisolia, M., Napoleoni, Q., Sirini, P., Tancedi, G., 1991. Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in-situ tests. In: Proceedings of 15th conference of geotechnics of Torino, Societa` Ingegneri e Architetti in Torino (in Italian).

61. Grisolia, M., and Napoleoni, Q., 1996. "Geotechnical characterisation of municipal solid waste: Choice of design parameters", Proceedings 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka Japan , 2: 641-646.

62. Hanson, J.L., Yesiller, N., Von Stockhausen, S.A., and Wong, W.W., 2010. Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 136(8), 1095–1102.

63. Harris, J.M., Shafer, A.L., DeGroff, W., Hater, G.R., Gabr, M., Barlaz, M.A., 2006. Shear strength of degraded reconstituted municipal solid waste. Geotechnical Testing Journal 29 (2), 1–8.

64. Hendron, D.M., Fernandez, G., Prommer, P.J., Giroud, J.P., Orozco, L.F., 1999. Investigation of 27th September 1997 slope failure at the Dona Juana landfill. Proceedings Sardinia '99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, pp. 545–554.

65. Hettiarachchi, C.H., 2005. Mechanics of Biocell Landfill Settlements, PhD Dissertation, Department of Civil & Environmental Engineering. New Jersey Institute of Technology, Newark NJ.

66. Hettiarachchi, C.H., Meegoda, J.N., and Hettiaratchi, J.P.A. 2005. "Towards a Fundamental Model to Predict the Settlements in Bioreactor Landfills," GeoFrontiers Conference (ASCE, Geotechnical Special Publication No. 142), Austin, TX.

67. Hossain, M.S., 2002. Mechanics of compressibility and strength of solid waste in bioreactor landfills. Ph.D. Thesis, NC State University, Raleigh, NC.

68. Hossain, M.S., Gabr, M.A., and Barlaz, M.A., 2002. "Compressibility Parameters of Municipal Solid Waste with Leachate Recirculation ", Submitted for publication to Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, February 2002.

69. Hossain, M.S., Gabr, M.A., and Barlaz, M.A. 2003. "Relationship of Compressibility Parameters to Municipal Old Waste Decomposition." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(12), 1151-1158.

70. Hossain, M.S., Gabr, M.A., and Asce, F., 2009. The effect of shredding and test apparatus size on compressibility and strength parameters of degraded municipal solid waste, Waste Management 29 (2009) 2417–2424

71. Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A., Sanders, C.O., 1995. In-situ testing methods for dynamic properties of MSW Landfills. In: Proceedings of specialty conference on earthquake design and performance of solid waste landfills, Geotechnical 1922 Environ Geol (2009) 57:1911–1923 Special Publication 54, ASCE, San Diego, CA, October, 1995, pp 73–82.

72. Huitric, R., 1981. Sanitary landfill settlement rates, Verlangerung Der Nutzungsdauer Von Deponien, Technische Universitat Berlin, Berlin.

73. Huvaj-Sarihan, N., Stark, T.D., 2008. “Back analyses of landfill slope failures”. Sixth. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering and Symposium in Honor of Professor James K. Mitchell.

74. Isenberg, R.H., 2003. Landfill and waste geotechnical stability. Presentation at US EPA Bioreactor Workshop, February 27– 28, 2003, Arlington-VA.

75. Itoh, T., Towhata, I., Kawano, Y., 2005. Mechanical properties of municipal waste deposits and ground improvement. In: Proceedings of the 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Osaka, Japan, September, pp 2273–2276.

76. Jessberger, H.L., Kockel, R., 1993. Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials. In: Proceedings Sardinia 93, 4th international landfill symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1993, pp 1383–1392.

77. Jones, D.R.V. and Dixon, N., 1998. Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces. Geotextiles and Geomembranes, 16, 45-71.

78. Jones, D.R.V., Taylor, D.P., Dixon, N., 1997. Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis. In: Yong, R.N., Thomas, H.R. (Eds.), Proceedings Geoenvironmental Engineering Conference.Thomas Telford, 343–350.

79. Kang, S.T., Shin, H.S., Lee, C.Y., and Lee, N.H. 1997. Relationship between biological decomposition and landfill settlement at various leachate recirculation rate. Proceeding 7th KAIST-NTU-KU Tri-Lateral Seminar/Workshop on Environmental Engineering, Kyoto, Japan, 29-31.

80. Karimpour-Fard M., Machado, S.L., Shariatmadari, N., Noorzad A., 2011. A laboratory study on the MSW mechanical behavior in triaxial apparatus, Waste Management 31 (2011) 1807–1819.

81. Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G.R., 1995. Evaluation of MSW properties for seismic analysis. Geoenvironment 2000, ASCE Geotechnical Special Publication No.46 (2).

82. Kavazanjian, E., Matasovic, N., Bachus, R.C., 1999. Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste. In: Proceedings Sardinia 99, 7th

international waste management and landfill symposium, 4–8 October 1999, Cagliari, Italy.

83. Kavazanjian, E., 2001. Mechanical properties of municipal solid waste. Proceedings Sardinia ’01, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 415–424.

84. Keene, P., 1977. Sanitary Landfill Treatment, Interstate Highway 84. Proc. Geotechnical Practice for the Disposal of Solid Waste Material, ASCE, pp. 632-644.

85. Kemper, J.M. and R. B. Smith. 1981. Leachate Production by Landfilled Processed Municipal Wastes, EPA-600/9-81-002a. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

86. Kocasoy, G. 1994. Atıksu arıtma çamuru ve katı atık ve kompost örneklerinin analiz yöntemleri. 120 Pages, Published 1996 ISBN-13: 978-975-518-083-0, ISBN: 975-518-083-4.

87. Kockel, R., Jessberger, H., 1995. Stability evaluation of municipal solid waste slopes. In: Proceedings of the 11th ECSMFE (European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering), vol 2, pp 267–272.

88. Koelsch, F., and Ziehmann, N., 2004. Landfill stability – risks and challenges, Waste Management World, Issue: May-June, ISWA, Copenhagen.

89. Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., Damanhuri, E., (2005). Stability of landfills – the Bandung dumpsite disaster, Proceedings of the 10th Int. Landfill Symposium, Cagliari, Italy.

90. Korman, E.M, Horvitz, E.G., Kleppe H.J., and Dalton, G.M., 1987. Material properties of landfilled primary waste. Environmental Conference: Portland Marriott, Portland, OR, April 27-29. 179-186.

91. Kölsch, F., 1995. Material values for some mechanical properties of domestic waste, Proceedings of the 5th International Landfill Symposiumin Sardinia, Italy. 2-6 October 1995.

92. Kölsch, F., 1996. Der Einflub der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Mitteilungen des Leichtweib-institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 133/96, ISSN 0343-1223, (PhD-Thesis in German).

93. Kolsch, F. 1996. The Influence of Fibrous Constituents on Shear Strength of Municipal Solid Waste. Ph.D. Thesis, Technische Universitat Braunschweig Brauschweig, Germany Leichtweiss-Institut.

94. Kölsch, F., 2007. Stability analysis according to different shear strength concepts. 2nd International Workshop HPM, Southampton.

95. Kölsch, F., 2009. Shear strength of waste. Third International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills" Braunschweig, Germany; 10 - 13 March 2009.

96. König, D. And Jessberger, H.L., 1997. Waste Mechanics, In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics pg. 35-76.

97. Kuruoğlu, M. ve Eskişar, T. 2010. İzmir körfezi kuzey kıyı bölgesi zeminlerinin dinamik özellikleri üzerine bir araştırma. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.

98. Landva, A.O., and Clark, J., 1986. "Geotechnical Testing of Waste Fill," Proceedings of Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, 371-385.

99. Landva, A.O, Clark, J.I., 1990. Geotechnics of waste fill. Geotechnics of waste fills—theory and practice, ASTM STP 1070. In: Landva A, Knowles D (eds) American society for testing and materials. Philadelphia, Pennsylvania, pp 86–103.

100. Landva, A.O., Valsangkar, A.J., and Pelkey, S.G., 2000. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste. Canadian Geotechnical Journal, Vol.37 (2000), pp.1157-1165.

101. Langer, U., 2005. Shear and compression behaviour of undegraded municipal solid waste. Dissertation, Doctor of Philosophy, Loughborough University.

102. Lee, B.S., Hwang, K.H., Lee, K.Y., and Lee, S., 1995. Settlement characteristics of municipal wastes. J. of Korea Society of Civil Engineering, 15-(6), 1773–1782.

103. Leonard, M.L., Floom, K.J., Brown, S., 2000. Estimating method and use of landfill settlement. In: Proceeding of GeoDenver 2000 on Environmental Geotechnics. ASCE, vol. 105. Geotechnical Special Publication, Denver, pp. 1–15.

104. Ling, I., Leshchinsky, D., Yoshiyuki, M., and Toshinori, K., 1998. "Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.124, No.1, January 1998. Paper No. 15597, pp.21-28.

105. Liu C.N., Chen R.H., and Chen K.S., 2006. Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement. Waste Manage Res 2006: 24: 80–91.

106. Machado, S.L., Carvalho, F.M., Vilar, O.M., 2002. Constitutive Model for Municipal Solid Waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128 (11), 940-951.

107. Machado, S.L., Vilar, O.M., Carvalho, F.M., 2008. Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior, Computers and Geotechnics (35), 775–790.

108. Mahler, C.F., De Lamare Netto, A., 2003. Shear resistance of mechanical biological pre-treated domestic urban waste. In: Proceedings of the Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6–10 October 2003.

109. Manassero, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A., 1996. Waste disposal and containment. Proceedings Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, vol.3, pp.193–242.

110. Matasovic, N. and Kavazanjian, E., Jr. 1998. “Cyclic characterization of OII landfill solid waste,” J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124 (3), 197-210.

111. Mazzucato, A., Simonini, P., Colomo, S., 1999. Analysis of block slide in a MSW landfill. In: Proceedings Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy.

112. Menard, L., and Broise, Y., 1975. “Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation” Geotechnique, Vol.25 (1), UK.

113. Merry, S.M., Kavazanjian, E., Fritz, W.U., 2005. Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas Landfill Failure. J Perform Constructed Facilities ASCE 19(2):100–107.

114. Merz, R., and Stone, R. (1962). "Landfill Settlement Rates," Public Works , 103-106, 210-212.

115. Münnich, K., and Bauer, J., 2006. Monitoring of emssioins and mechanical behaviour of MSW landfills – new techniques for a better understanding of the long-term behaviour", Proceedings of the International Symposium on Technology and Treatment of Solid Waste), Rio de Janeiro.

116. NSWMA, 1985. Basic Data: Solid Waste Amount, Composition and Management Systems. National Solid Waste Management Association, Technical Bulletin No. 85- 6, October, p 8.

117. OECD, 2007. Environmental DataOrganisation for Economic Co□operation and Development (OECD), (2007). www2.oecd.org

118. Ojuri, O.O. 2012. Permeability and Compressibility Characteristics of Municipal Solid Waste Samples Using a Fabricated Intermediate Scale Oedometer. EJGE, Vol. 17 [2012], Bund. T.

119. O'Reilly, J.T., 1991. State & Local Government Solid Waste Management, Clark Broadman Callaghan, USA.

120. Oweis, I.S., and Khera, R.P., 1990. "Geotechnology of waste management" Butterworths, Kent, England.

121. Oweis I.S, and Khera, R.P., 1998. Geotechnology of waste management, 2nd edn. PWS Kent, Boston, pp. 472

122. Palabıyık, H., 2001. Belediyelerde Kentsel Katı Atık Yönetimi: İzmir Büyükşehir Belediyesi Örneği, Doktora Tezi, DEÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.

123. Palabıyık, H., Altunbaş, D., 2004. Kentsel Katı Atıklar ve Yönetimi, Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar: Ekolojik, Ekonomik, Politik ve Yönetsel Perspektifler, C. Marin, U. Yıldırım (Ed.), 103-124, Beta, İstanbul.

124. Pelkey, S.G., 1997. Geotechnical properties of municipal solid waste. M.Sc. thesis, University of New Brunswick

125. Pelkey, S.G., Valsangkar, A.J., Landva, A., 2001. Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituent. Geotech Test J ASTM 24 (4): 381–390.

126. Powrie, W., and Beaven, R.P., 1999. “Hydraulic Properties of Household Waste and Applications for Landfills” Proceedings Institution of civil Engineers, Geotechnical Engineering, 137, 235-247.

127. Proctor, R. 1933. "Fundamental Principles of Soil Compaction," Engineering News Record, 111, 245-248.

128. Rao, S.K., Moulton, L.K., and Seals, R.K., 1977. “Settlement of refuse landiflls.” Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, Ann Arbor, Mich., 574–599.

129. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Parakalla, N., Bogner, J., Lagier, T., 2009a. Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. Waste Management and Research 27 (6), 578–587.

130. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N.S., Gangathulasi, J., Bogner, J.E., 2009b. Waste Manag. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. 2009;29 (2): 952-959.

131. Reddy, K.R., Hettiarachchi,H., Gangathulasi, J., Bogner,J.E., and Lagier, T., “Geotechnical Properties of Synthetic Municipal Solid Waste,” International Journal of Geotechnical Engineering, Vol.3,No.3, (2009d), pp.429-438.

132. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., and Bogner, J.E., 2011 “Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste at Different Phases of Degradation,” Waste Management, Vol.31, No.11, 2011, pp.2275-2286

133. Reinhart, D.R., and Al-Yousfi, A.B., 1996. Impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. Waste Management and Research 14, 337–346

134. Richardson, G.N., Reynolds, R.D., 1991. Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays. In: Proceedings of geosynthetics '91, vol 2, Vancouver, BC, Canada, Industrial Fabrics Association International, St Paul, MN.

135. Rushbrook, P., 1998. "Guidelines for Landfilling-Decision Makers' Quide and Quidance Notes", Wokshop Report Waste Disposal Workshop '98, Collaborative Programme on MSWM in Low-and Middle-Income Countries, 8-11 September, Brasil.

136. Saarela, J., 1997. Hydraulic approximation of infiltration characteristics of surface structures on closed landfills. Monographs of the Boreal Environment Research, 3. Finnish Environment Institute. Finland. Tammer-Paino Oy. 139 pp.

137. Sanchez-Alciturri, J.M., Palma, J., Sagaseta, C., and Canizal, J., 1995. "Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill." Waste disposal by landfill-GREEN 3, Sarsby, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 365–371.

138. Seo, S., Aramaki, T., Hwang, Y., and Hanaki, K. 2004. Environmental impact of solid waste treament methods in Korea. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 130(1): 81-89.

139. Shank, K.L., 1993. "Determination of the Hydraulic Conductivity of the Alachua County Southwest Landfill" Masters Thesis, The University of Florida.

140. Sharma, H.D., Dukes, M.T., and Olsen, D.M. 1990. "Field Measurements of Dynamic Moduli and Poisson's Ratio of Refuse and Underlying Soils at a Landfill Site," Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, STP 1070, ASTM, Philadelphia, PA.

141. Sharma, H.D., Reddy, K.R., 2004. Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.

142. Singh, M.K., 2008. Characterization of Stress-Deformation Behaviour of Municipal Solid Waste. Doctor of Philosophy Thesis. University of Saskatchewan. Saskatoon, Canada.

143. Singh, S. and Murphy, B., 1990. "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills", Geotechnics of Waste Landfills - Theory and Practice, Landva, A. and Knowles, G.D., Editors, ASTMSpecial Publication 1070, proceedings of a symposium held in Pittsburgh, Pennsylvania, USA, pp. 240-258.

144. Siegel, R.A., Robertson, R.J., Anderson, D.G., 1990. Slope stability investigation at a landfill in Southern California. Geotechnics of waste fills—theory and practice, ASTM STP 1070. In: Landva A, Knowles D (eds) American society for testing and materials. Philadelphia, Pennsylvania, pp 259–284.

145. Sowers, G.F. 1968. Foundation Problems in Sanitary Landfills. 1968.

146. Sowers, G. 1973. "Settlement of Waste Disposal Fills," Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Quebec, Canada, 207-210.

147. Staley, B. and Barlaz, M. 2009. ”Composition of Municipal Solid Waste in the United States and Implications for Carbon Sequestration and Methane Yield.” J. Environ. Eng., 135(10), 901–909.

148. Stark, T.D., Eid, H.T., Evans, W.D., and Sherry, P.E., 2000. Municipal solid waste slope failure. II: Stability analyses. J. Geotech. and Geoenvir. Engrg., ASCE, 126(5), 408-419.

149. Stark, T., Huvaj-Sarihan, N., Li, G., 2009. Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. Environ Geol. 57: pp.1911–1923.

150. Stoltz, G., Gourc, J.P., Oxarango, L., 2010a. Characterisation of the physico-mechanical parameters of MSW. Waste Management, 30, 1439-1449.

151. Stoltz, G., Gourc, J.P., Oxarango, L., 2010b. ”Liquid and gas permeability of unsaturated compression”. Journal of Contaminant Hydrology, Elsevier, Vol.118, Issues 1-2 , pp 27 42.

152. Staub, M., Galietti, B., Oxarango, L., Khire, M.V., and Gourch, J.P., 2009. Porosity and hydraulic conductivity of msw using laboratory-scale tests. Third International Workshop, Hydro-Physico Mechanics of Landfills, Braunschweig, Germany 10-13 March 2009.

153. Stulgis, R.P., Soydemir, C. and Telgener, R.J., 1995. Predicting landfill settlement. In: Proc. of Geoenvironment 2000, pp. 980–994. ASCE, Reston, VA, USA.

154. Tan, T.S., Inoue, T., and Lee, S.L., 1991. Hyperbolic method for consolidation analysis. Journal of geotechnical engineering., ASCE, 117(11), 1723-1737.

155. Taylor, D.P., 1995. Strength testing of domestic waste by plate bearing and shear box tests. MS dissertation. University of Derham School of Engineering.

156. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Eliassen R., 1977. “Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues”, McGraw-Hill, New York.

157. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., 1993. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, Irwin/McGraw-Hill, Boston, MA.

158. Thomas, S., Aboura, A.A., Gourc, J.P., Gotteland, P., Billard, H., Delineau, T., Gisbert, T., Ouvry, J.F., Vuillemin, M., 1999. An in situ waste mechanical experimentation on a French Landfill. In: Proceedings Sardinia 99, seventh international waste management and landfill symposium, Cagliari, Italy.

159. Towhata, Ikuo; Kawano, Y.; Yonai, Y.; Koelsch, F. 2004. Laboratory tests on dynamic properties of municipal wastes, The 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering (11th ICSDEE). The 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (3rd ICEGE). University of California, Berkeley, January 7-9, Vol.1, pp. 688-693.

160. Turczynski, U., 1988. Geotechnical Aspects of Building Multicomponent Landfills. Ph.D. Thesis Bergakademie, Freiberg (Sachsen), Germany.

161. Turer, D., and Turer, A., 2011. A simplified approach for slope stability analysis of uncontrolled waste dumps. Waste Management & Research vol. 29 issue 2 February 2011. p. 146-156.

162. Van Impe, W.F., 1998. Environmental geotechnics: ITC 5 Activities, state of art. In: Proceedings, 3rd international congress on environmental geotechnics, vol 4, pp 1163–1187, Lisbon, Portugal.

163. Vilar, O.M., Carvalho, M.F., 2004. Mechanical properties of municipal solid waste. Geotech Test J ASTM 32(6):1–12.

164. Volpe, R. L. and Kelly, W. E. 1985. eds, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, pp. 1-30, reprinted in Embankment Dams-James L.

Sherard Contributions, S. Singh, ed, ASCE Geotechnical Special Publication No. 32, 1992

165. Wall, D.K., Zeiss, C., 1995. Municipal landfill biodegradation and settlement. ASCE Journal of Environmental Engineering 121 (3), 214–224.

166. Walsh, J. J.; Kinman, R. N., 1979. Leachate and gas production under controlled moisture conditions, municipal solid waste: Land disposal. Proceedings of the 5th. Annual research symposium, EPA-600/9-79-023a, USEPA, Cincinnati, OH, 41-57.

167. Watson, M.D., 1982. A Literature Review of Settlement Behaviour of Sanitary Landfills and Their Application to Alberta. Master Degree Report in Civil Engineering. Edmonton, Alberta.

168. Wigh, R.J., And Brunner, D.R., 1981. Summary of landfill research, Boone County field site. In Proceedings of the 7th Annual Research Symposium. EPA-600/9-81-002a, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

169. Withiam, J.L., Bushell, T.D., Germann, H.W., 1995. Prediction and performance of municipal landfill slope. In: Proceedings of specialty conference geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication 46, vol 2, pp 1005–1019. ASCE, New Orleans, LA.

170. Wong, W.W., 2009. Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions. MS thesis, California Polytechnic State Univ., San Luis Obispo, Calif.

171. Yalçın, İ.A., Kuruoğlu, M. Kayalar, A.Ş. 2008. İzmir körfezi güneydoğu kıyı zeminleri için bir geoteknik deprem mühendisliği araştırması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi, Konya.

172. Yuen, S.T.S., Styles, J.R., 2000. Settlement and characteristics of waste at a municipal solid waste landfill in Melbourne. Proceedings of GeoEng2000-International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, 19-24 November 2000, Melbourne, Vol.2, pp.309.

173. Zachary, A.S., 1995. The Environmental Policy Paradox, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

174. Zekkos., 2005. “Evaluation of static and dinamic properties of municipal solid waste”. Ph D. Thesis. Berkeley, California. (2005).

175. Zekkos, D., Bray, J., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E., Riemer, M., ve diğ. 2006. “Unit weight of municipal solid waste.” Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 132(10), 1250-1261.

176. Zhan, T.L.T., Chen, Y.M., Ling, W.A., 2008. Shear Strength Characterization of Municipal Solid Waste at the Suzhou Landfill, China, 97, 97-111.

177. Zornberg, J.G., Jernigan, B.L., Sanglerat, T.R., Cooley, B.H., 1999. Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (7) (1999), pp. 583–594

178. EPA., 1999. Cutting the Waste Stream in Half: Community Record-Setters Show How EPA-530-F-99-017), US EPA.

179. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı., 2006. AB Entegre Çevre Uyum Stratejisi (UÇES), Türkiye.

180. TÜİK, 2014. http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=16177 TÜİK Haber Bülteni Sayı: 16177 21, Şubat 2014.

181. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)., 2010. Bölgesel İstatistikler. İnternet adresi: www.tuik.gov.tr

182. Türkiye Cumhuriyeti Orman ve Su İşleri Bakanlığı resimi internet sitesi www.ormansu.gov.tr

183. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)., 2010. Bölgesel İstatistikler. İnternet adresi:

184. www.tuik.gov.tr

185. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. (2010). Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair

186. Yönetmelik, T.C. Resmi Gazetesi No:27533, Tarih: 26.03.2010

187. http://www.reade.com/Particle_Briefings/spec_gra.html

188. http://www.cottoninc.com/CottonFiberChart/?Pg=8

189. http://www.csgnetwork.com/specificgravmattable.html

190. http://wiki.roblox.com/index.php/SpecificGravity_%28Property%29

191. http://www.cukurovaithalat.com

192. http://www.bmgs.com.tr

193. http://www.temsaismakinalari.com

EK-I

KOMPOZİSYONLARIN BİLEŞİM FORMÜLASYONLARI

No	Atık Malzemesi	Kompozisyon Oranları (%)		
		U-1	**E-1**	**T-1**
1	Ağaç talaşı	7	6	4
2	Bahçe Atığı	16	17,5	22,5
3	Mutfak Atığı	16	17,5	22,5
Mutfak ve Park-bahçe atığı, (a)		**39**	**41**	**49**
4	Cam kırıkları	7	6	4
5	Plastik parçacıklar	12	8	10
6	Metal talaşı-tozu	9	5	2
7	İnce daneli zemin	0	2	0
8	Kül	0	0	15
İnorganik atıklar, (b)		**28**	**21**	**31**
9	Kağıt parçacıkları	22	28	12
10	Karton parçacıkları	6	7	3
11	Tekstil parçacıkları	5	3	5
Lifli atıklar, (c)		**33**	**38**	**20**

U-1 = 0,39a + 0,28b + 0,33c

E-1 = 0,41a + 0,21b + 0,38c

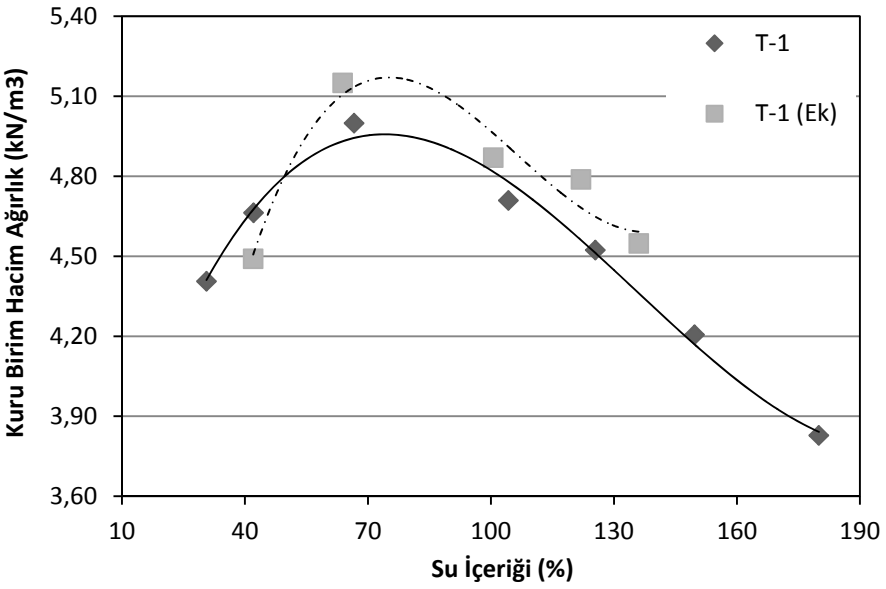
T-1 = 0,49a + 0,31b + 0,20c

EK-II

KOMPAKSİYON DENEYLERİ

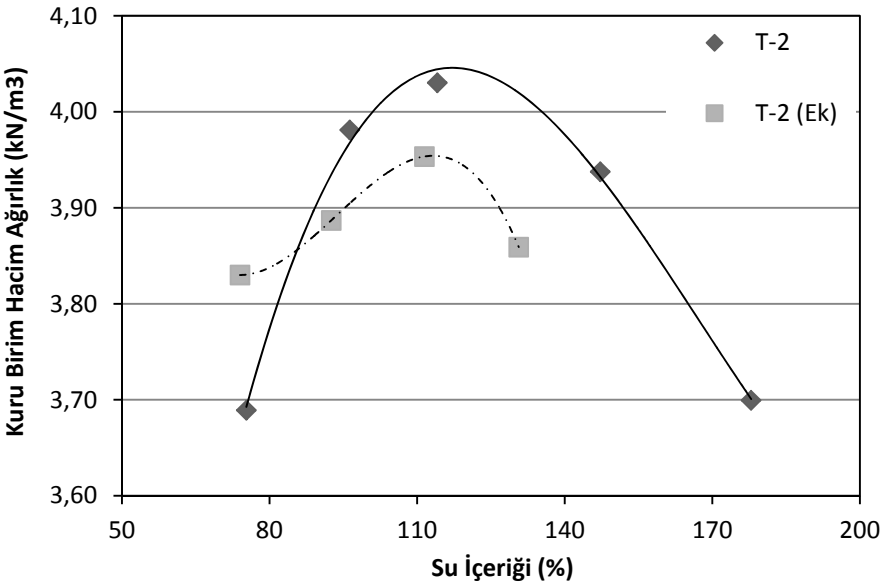
Çalışma kapsamında çok sayıda Modifiye ve Standart Proctor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin tekrar edilebilirliğinin kontrolü açısından ek kompaksiyon deneyleri yapılmıştır.

Şekil. Ek 2-1, T-1 kompozisyonuna ait yapılan iki farklı kompaksiyon deney eğrilerini göstermektedir. Görüldüğü üzere iki eğri tam olarak kesişmese de elde edilen değerlerde kabul edilebilir bir tutarlılık söz konusudur.



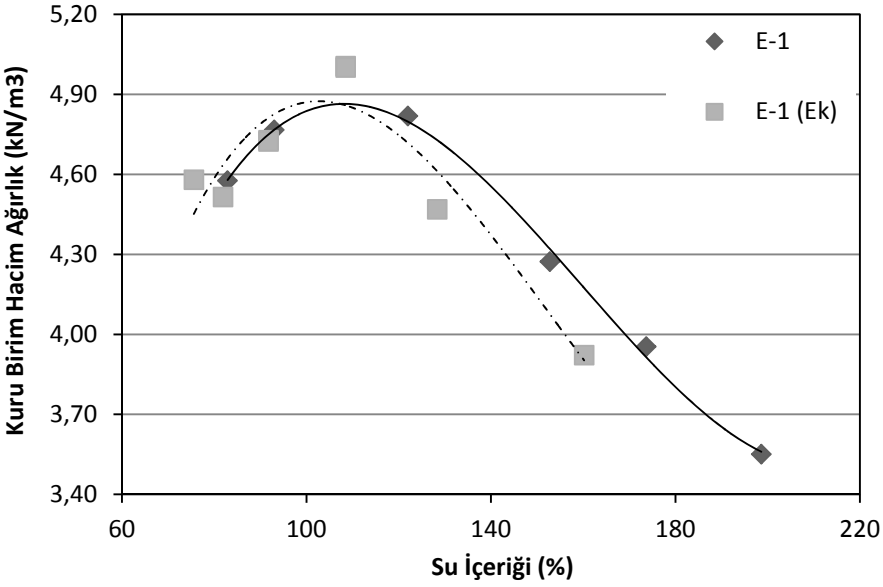
Şekil. Ek-2.1 T-1 kompozisyonuna ait kompaksiyon eğrileri

Şekil. Ek-2.2, T-1 kompozisyonundan kül atığın çıkarıldığı T-1-1 kompozisyonu ve bu kompozisyona ait yapılan ek kompaksiyon deneylerinin kompaksiyon eğrilerini göstermektedir. Gerçeklerştirilen deneyler neticesinde iki deney arasındaki maksimum kuru b.h.a. değerinin 0,1 kN/m^3 gibi çok küçük bir farka sahip olduğu görülmektedir. Buna ek olarak iki deney arasındaki optimum su içeriği değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur.



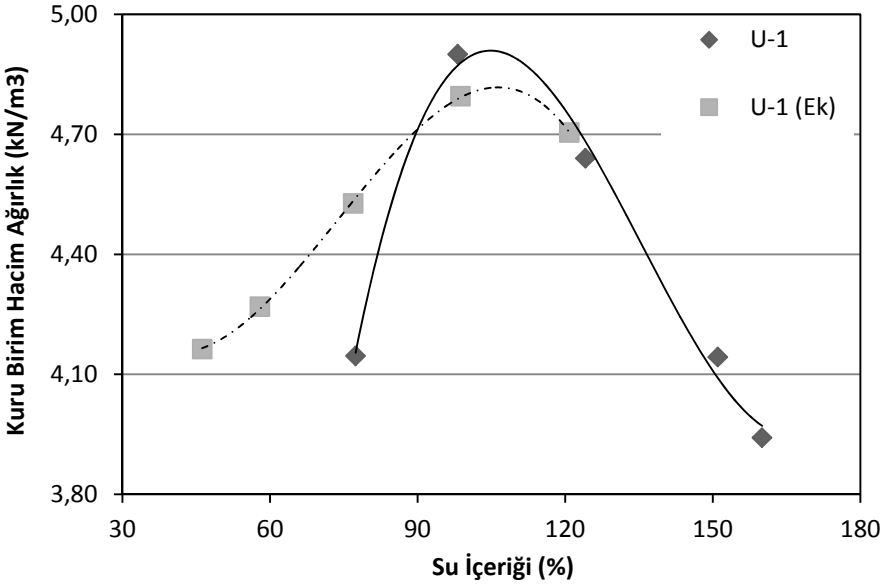
Şekil. Ek-2.2 T-2 kompozisyonuna ait kompaksiyon eğrileri

E-1 kompozisyonuna ait yapılan ilk ve daha sonra yapılan ek kompaksiyon deney eğrileri Şekil Ek-2.3'de görülmektedir. Bu deney neticesinde de yapılan temel ve ek deney sonuçlarının birbirine çok yakın sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir.



Şekil. Ek-2.3 E-1 kompozisyonuna ait kompaksiyon eğrileri

Son olarak U-1 kompozisyonuna ait yapılan asil ve ek kompaksiyon deney eğrileri Şekil. Ek-2.4'te görülmektedir. İki kompaksiyon eğrisine ait maksimum kuru b.h.a. değerleri incelendiğinde aradaki farkın sadece 0,08 kN/m^3 gibi göz ardı edilebilecek bir değer olduğu görülmektedir. İki kompaksiyon eğrisinin optimum su içeriği değerlerinin de birbirine eşit olduğu belirlenmiştir.

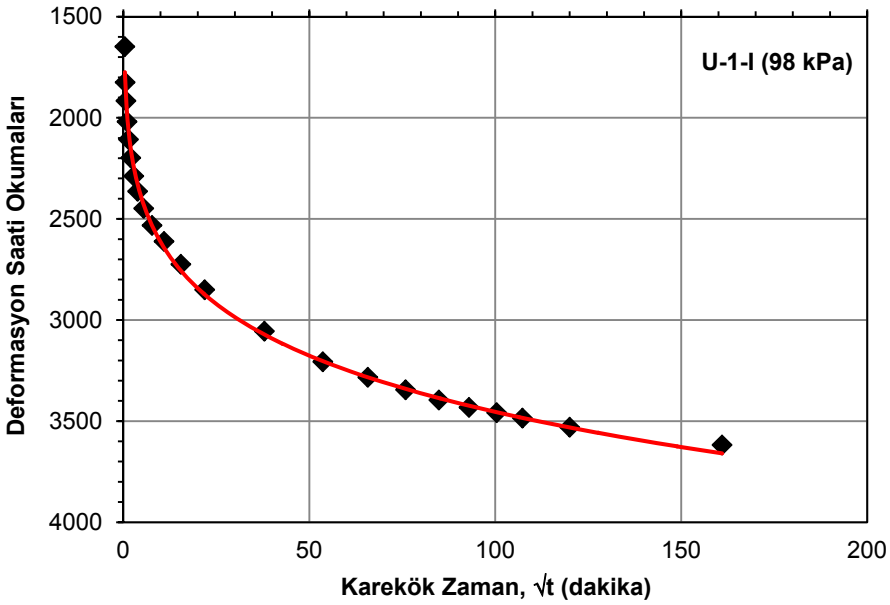


Şekil. Ek-2.4 U-1 kompozisyonuna ait kompaksiyon eğrileri

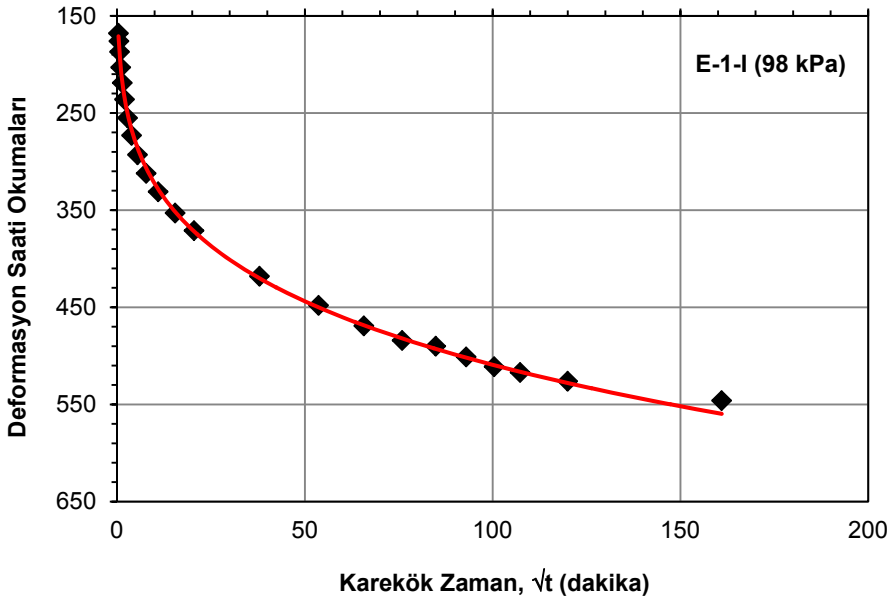
Yapılan ek deneyler sonucunda önceden gerçekleştirilen asil kompaksiyon deney sonuçlarının sonradan yapılan ek kompaksiyon deney sonuçları ile büyük bir uyum içerisinde olduğu sonucuna varılmıştır.

BÜYÜK ÖLÇEKLİ SIKIŞMA DENEYLERİ

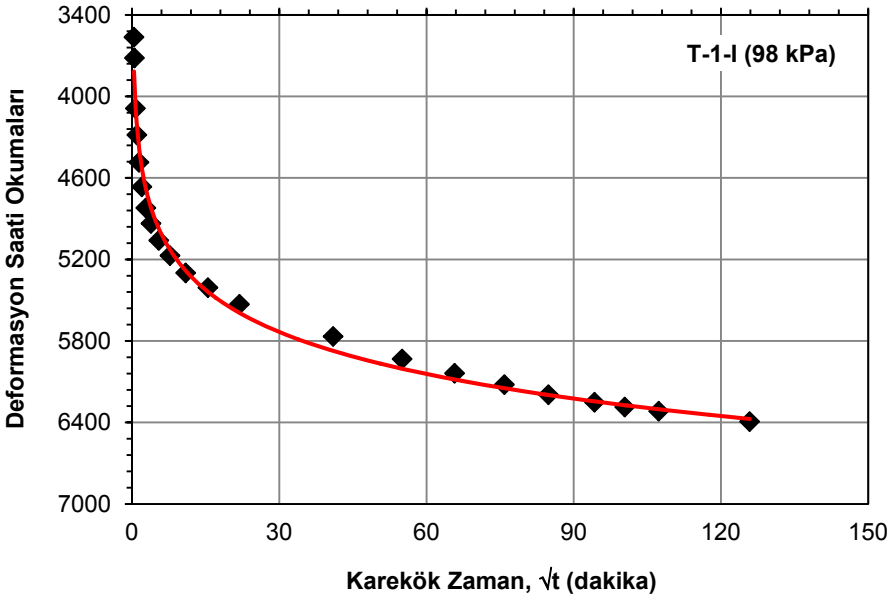
Kentsel katı atıkların sıkışma davranışlarının incelenmesi amacıyla laboratuvar ortamında büyük ölçekli sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Beş farklı yükleme kademesi (24,5 – 49 – 98 – 196 – 392 kPa) için zamana bağlı deformasyon saati okumaları gerçekleştirilmiştir. Kentsel katı atıkların zamana bağlı sıkışma davranışları hakkında fikir sahibi olunabilmesi açısından 98 kPa'lık yükleme kademelerine ait sıkışma eğrileri Ek.III içerisinde verilmiştir.



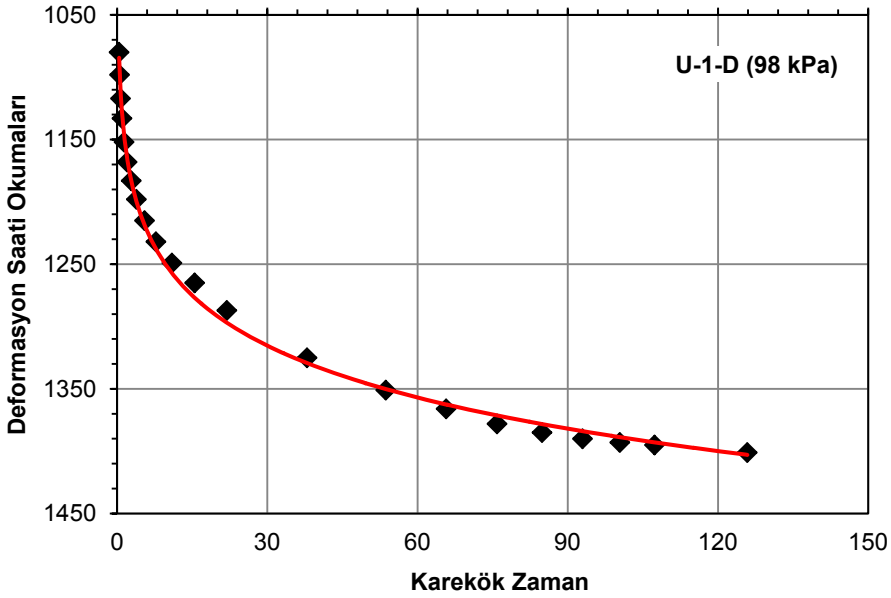
Şekil. Ek-3.1 U-1-I numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



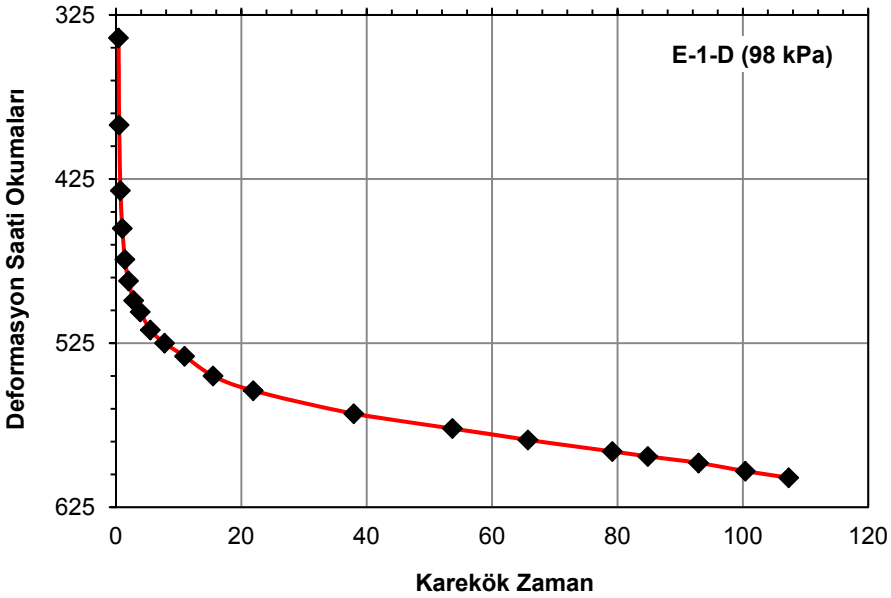
Şekil. Ek-3.2 E-1-I numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



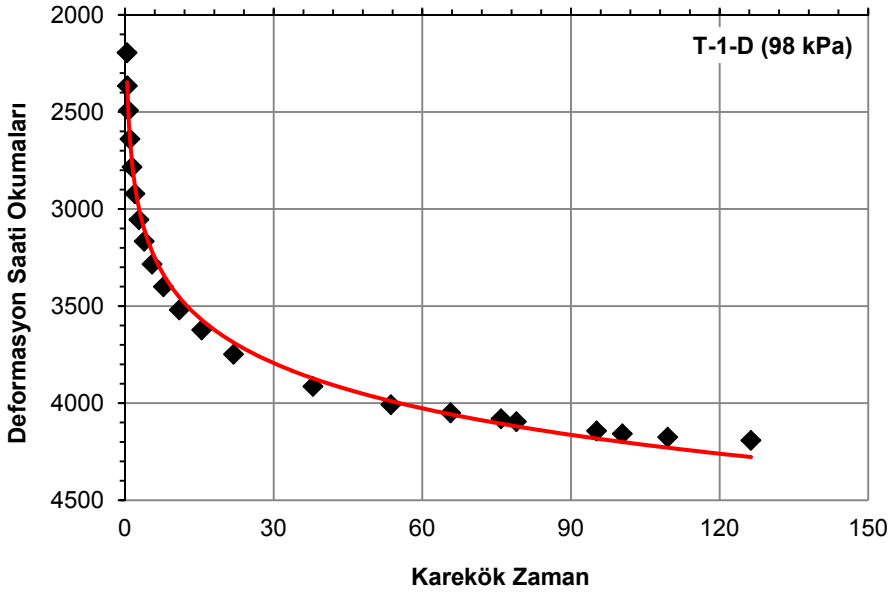
Şekil. Ek-3.3 T-1-I numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



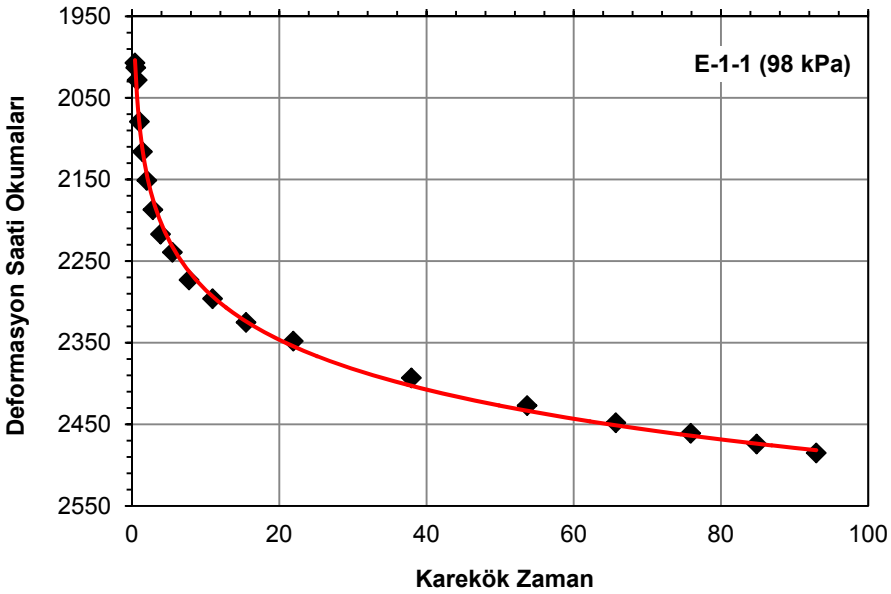
Şekil. Ek-3.4 U-1-D numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



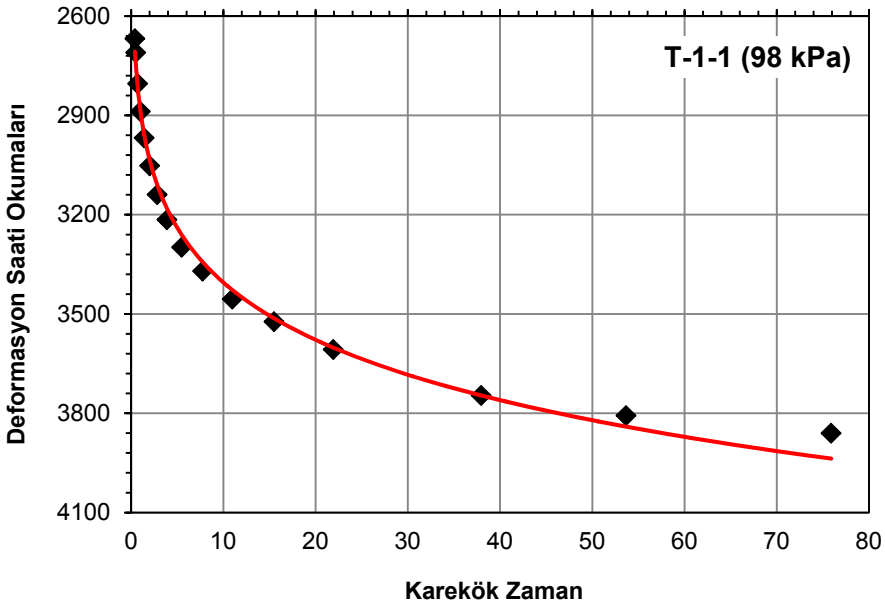
Şekil. Ek-3.5 E-1-D numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



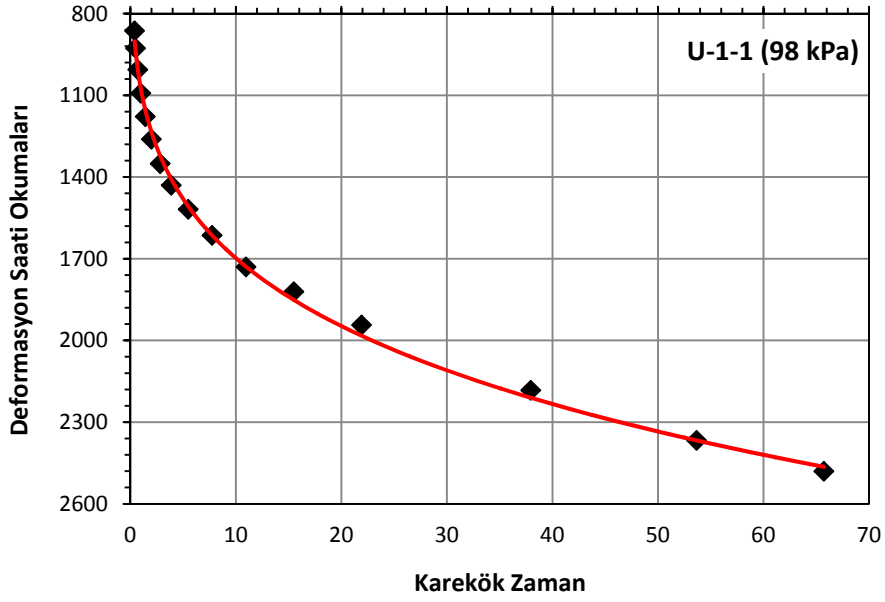
Şekil. Ek-3.6 T-1-D numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



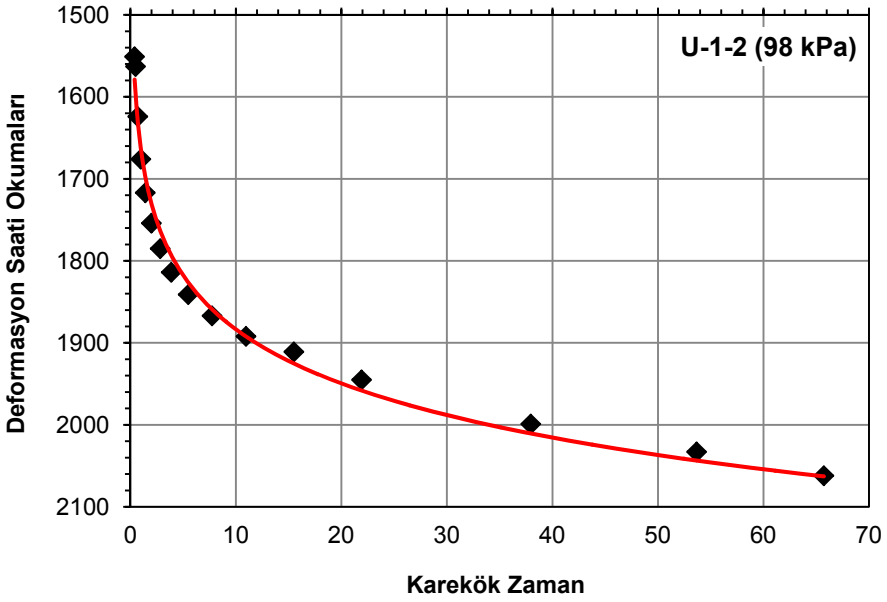
Şekil. Ek-3.7 E-1-1 numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



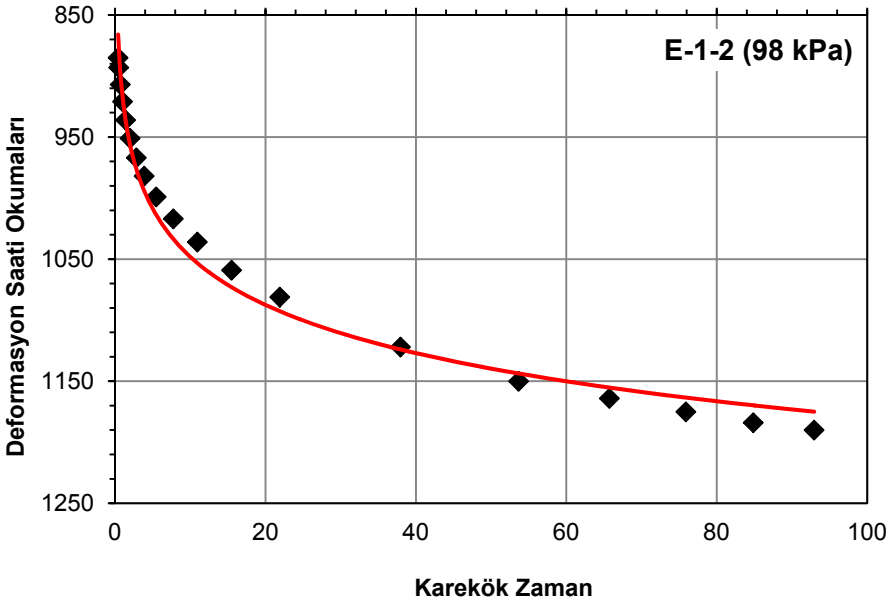
Şekil. Ek-3.8 T-1-1 numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



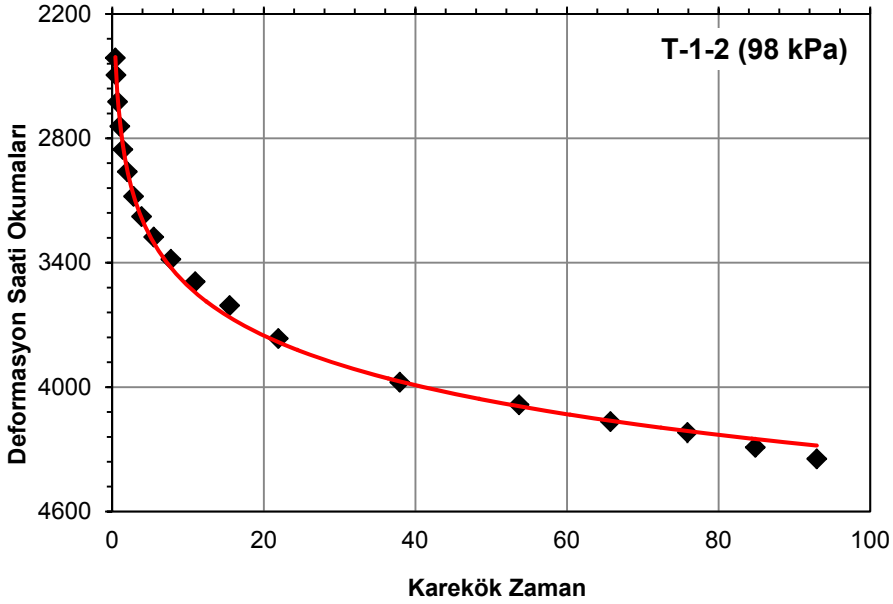
Şekil. Ek-3.9 U-1-1 numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



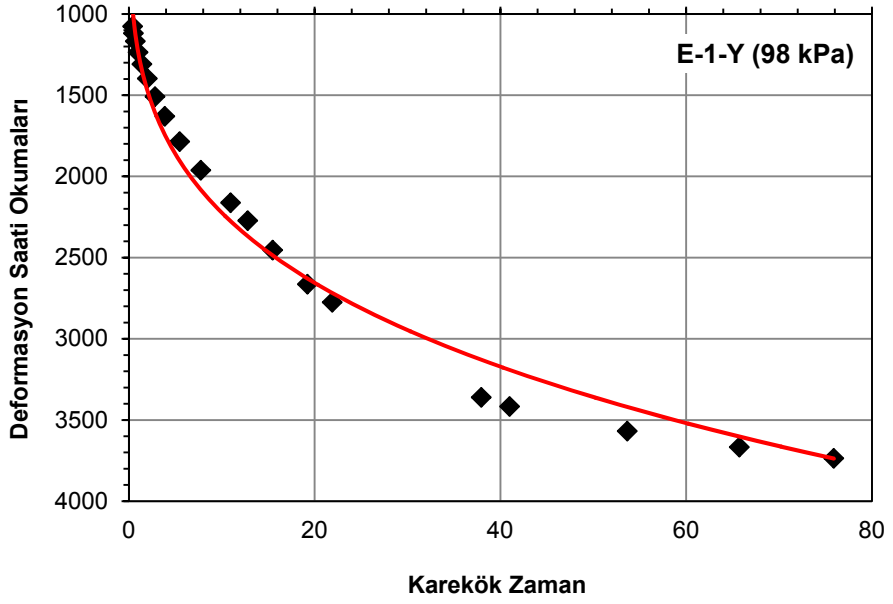
Şekil. Ek-3.10 U-1-2 numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



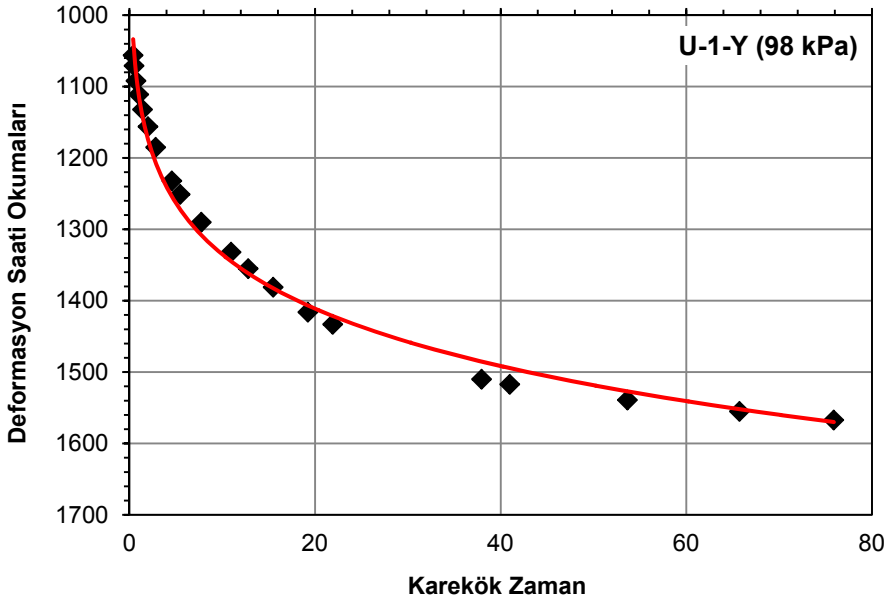
Şekil. Ek-3.11 E-1-2 numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



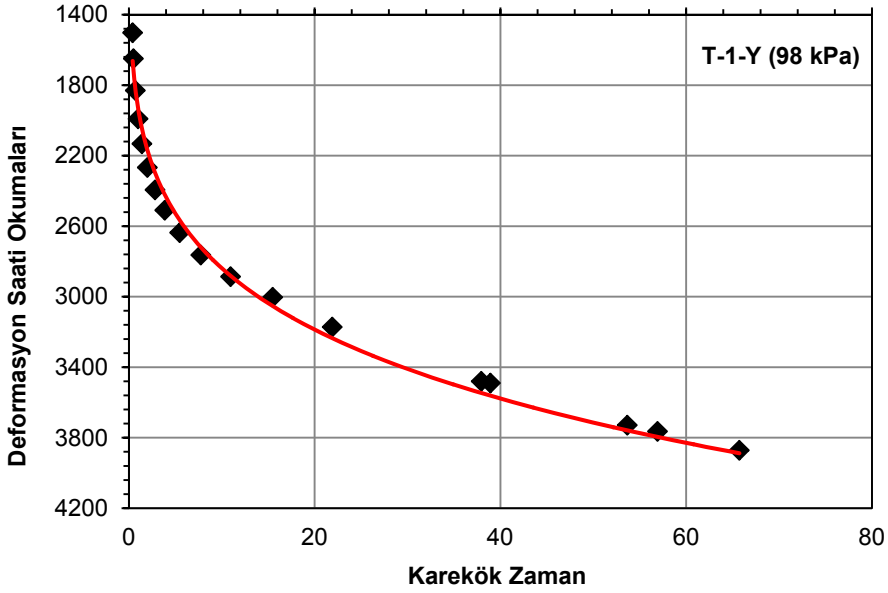
Şekil. Ek-3.12 T-1-2 numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



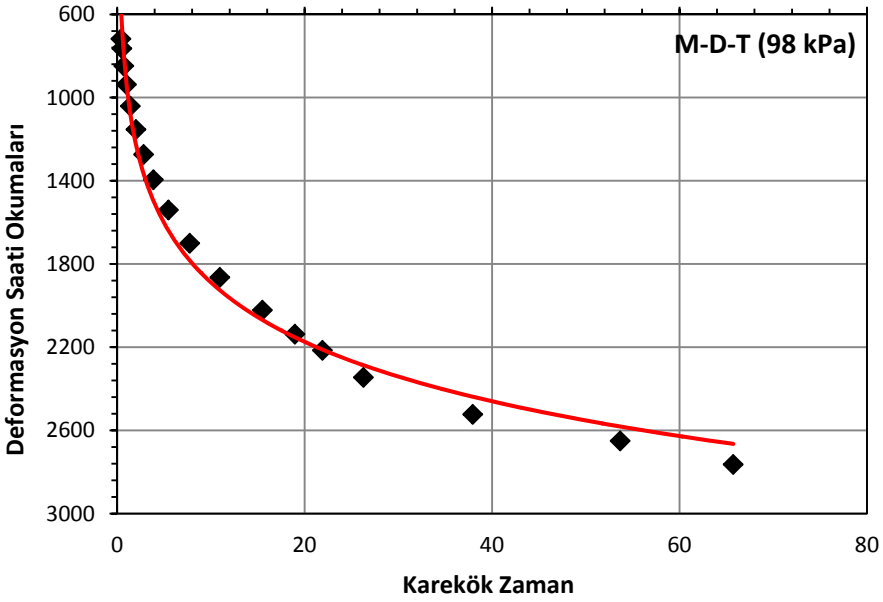
Şekil. Ek-3.13 E-1-Y numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



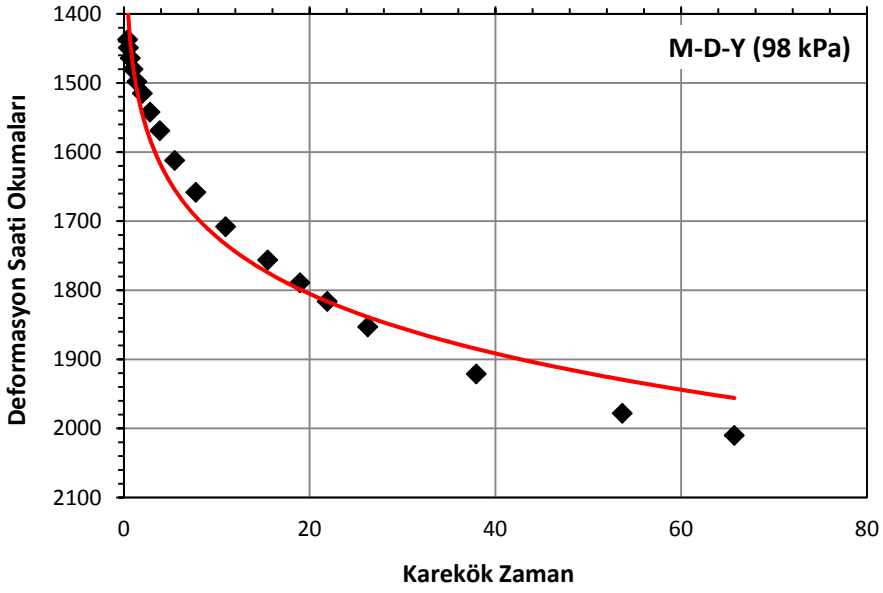
Şekil. Ek-3.14 U-1-Y numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



Şekil. Ek-3.15 T-1-Y numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)



Şekil. Ek-3.16 M-D-T numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)

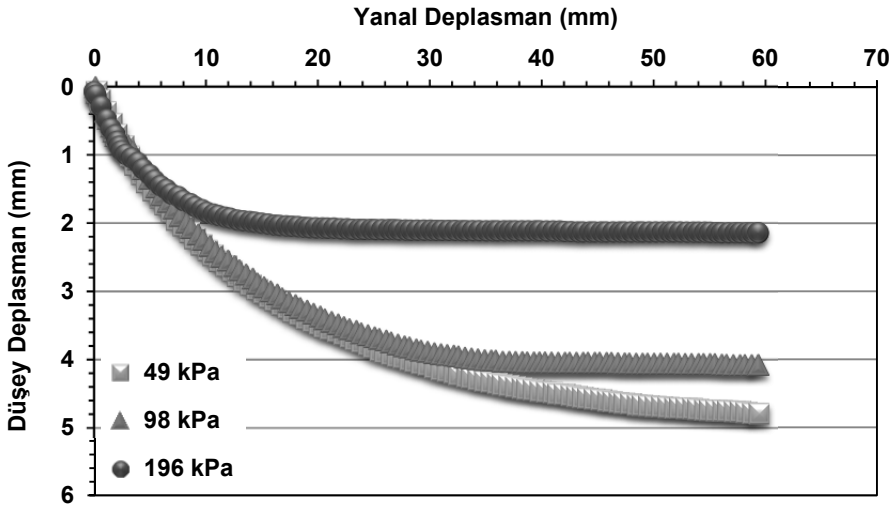


Şekil. Ek-3.17 M-D-Y numunesine ait sıkışma eğrisi (98 kPa)

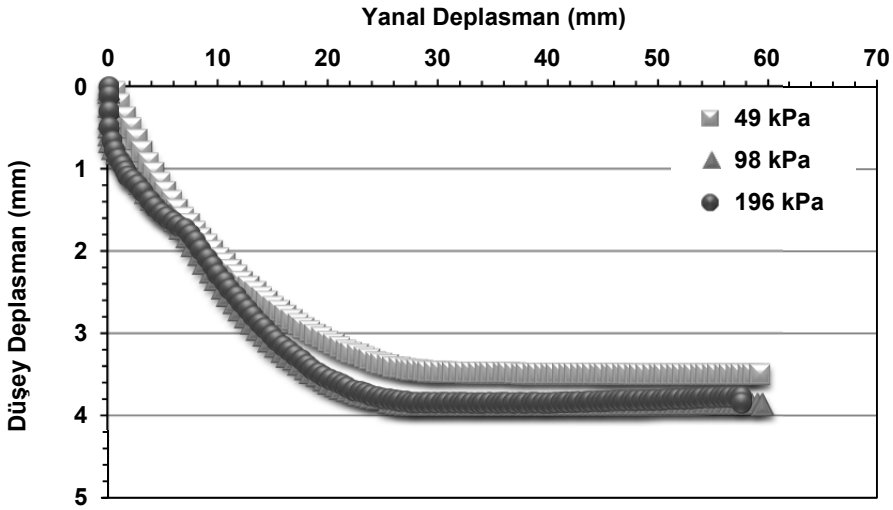
EK-IV

BÜYÜK ÖLÇEKLİ DİREK KESME DENEYLERİ

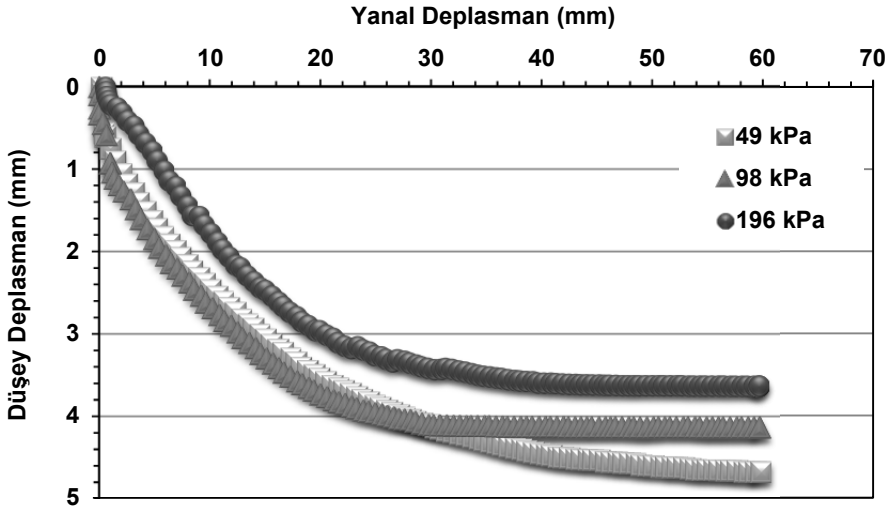
Kentsel katı atıkların kayma dayanımı parametrelerinin belirlenebilmesi amacıya büyük ölçekli direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı özelliklere sahip sentetik ve doğal atık numuneler kullanılmıştır. Bilgisayar kontrollü büyük ölçekli direk kesme deneylerinden elde edilen düşey-yatay deplasman ilişkilerini gösteren eğriler Ek.IV içerisinde sunulmuştur.



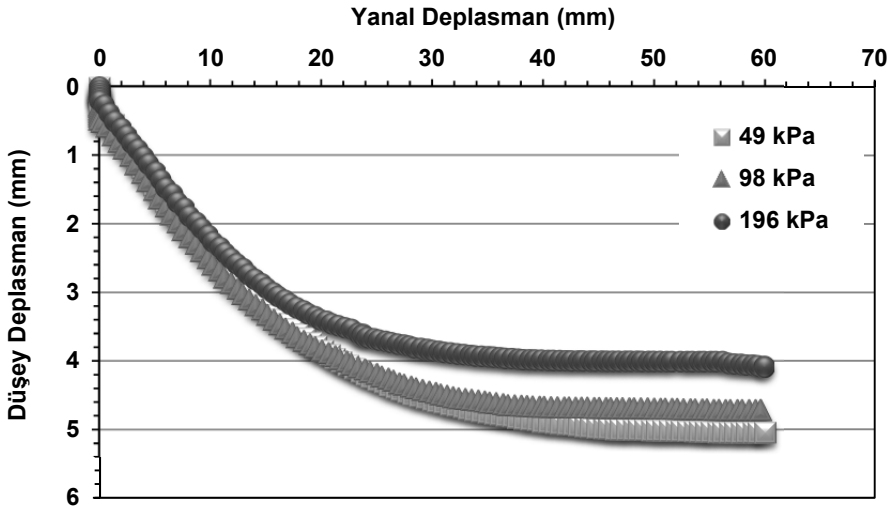
Şekil. Ek-4.1 E-1-1 kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



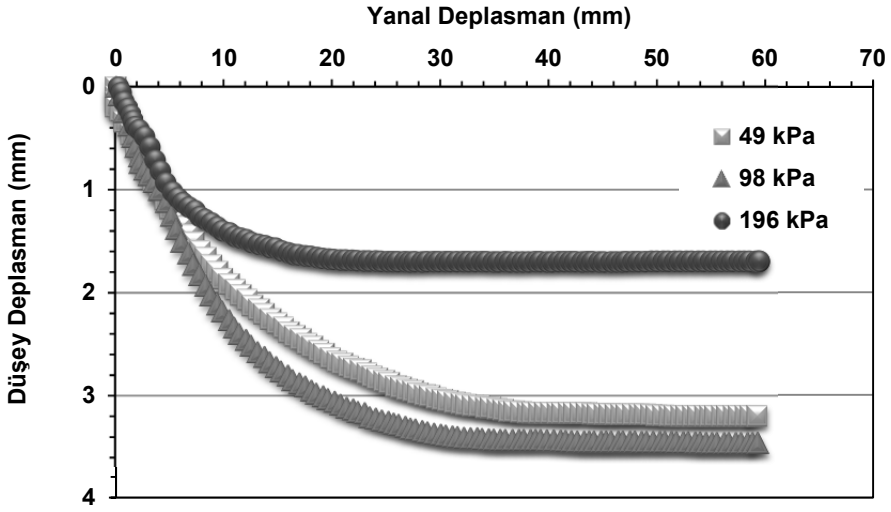
Şekil. Ek-4.2 E-1-2 kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



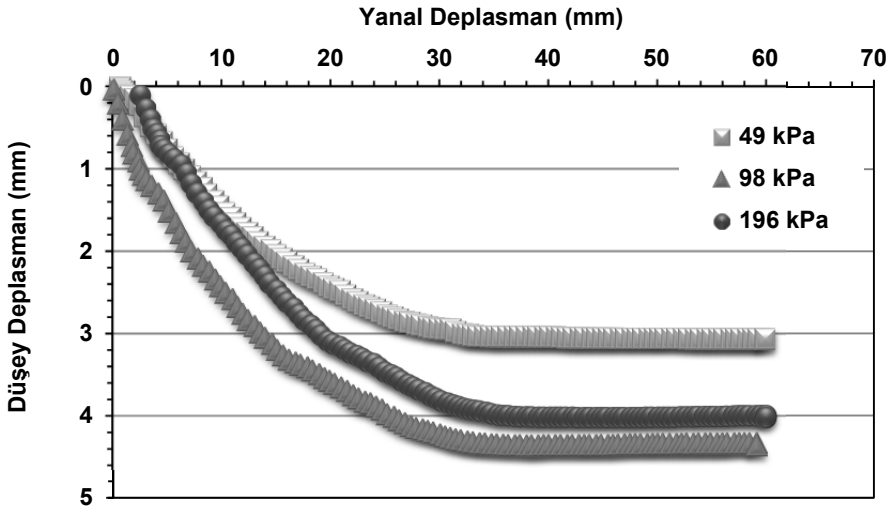
Şekil. Ek-4.3 E-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



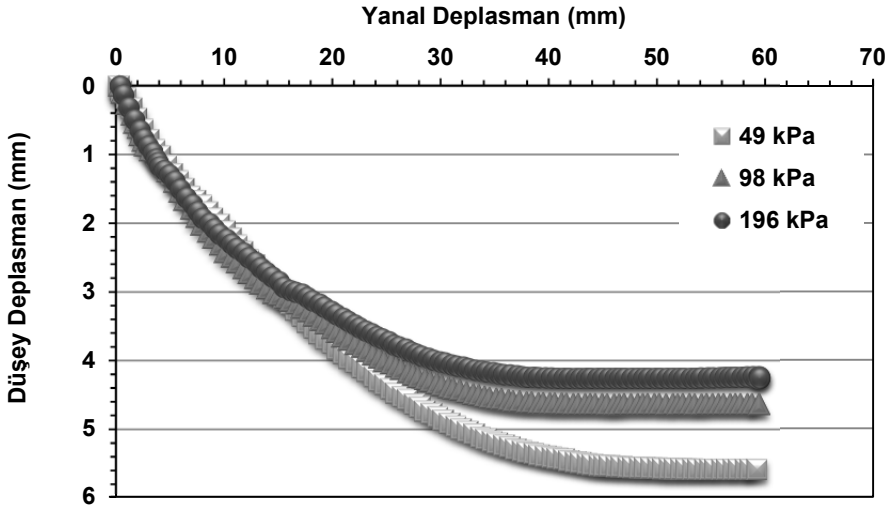
Şekil. Ek-4.4 E-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



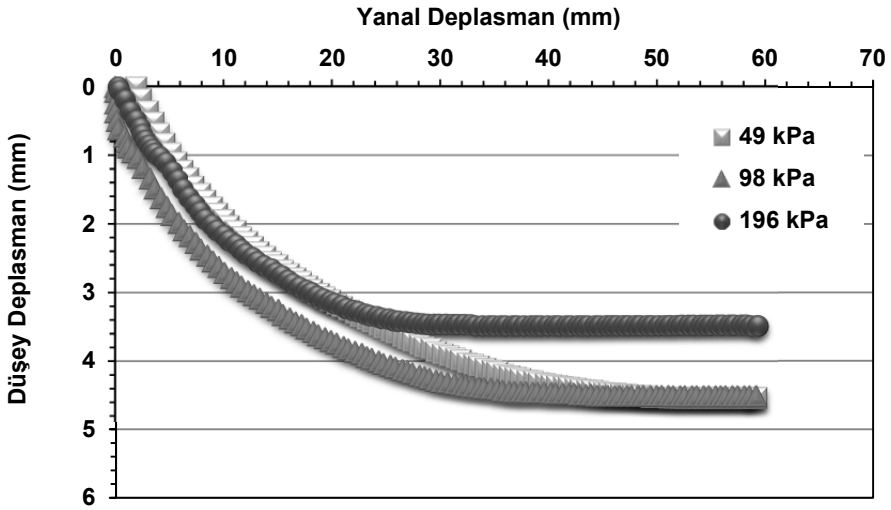
Şekil. Ek-4.5 E-1-Y kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



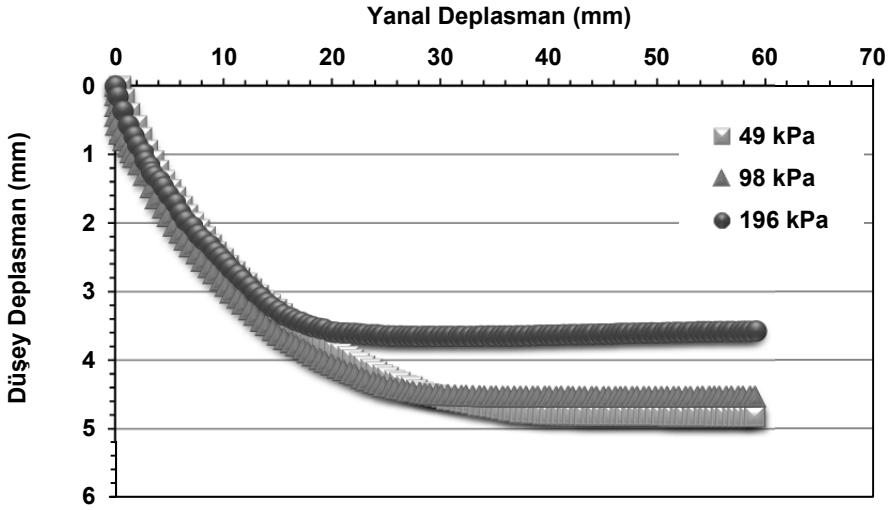
Şekil. Ek-4.6 M-D-T kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



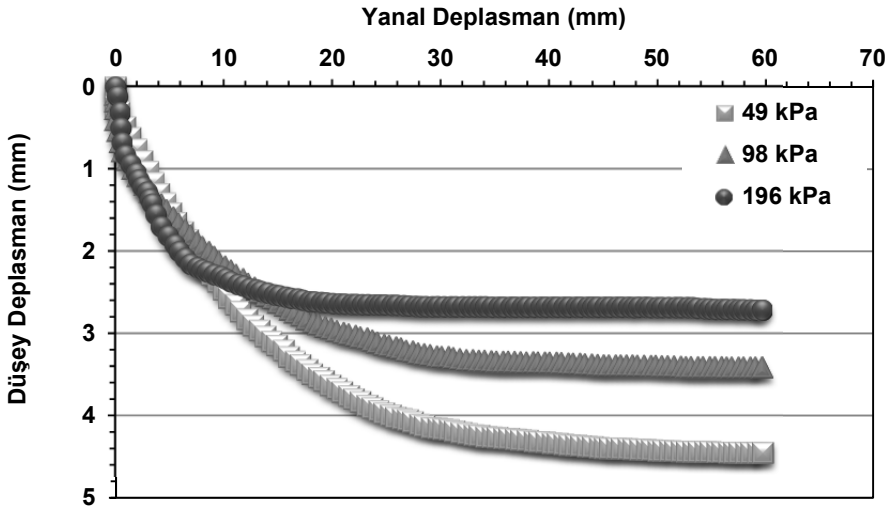
Şekil. Ek-4.7 M-D-Y kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



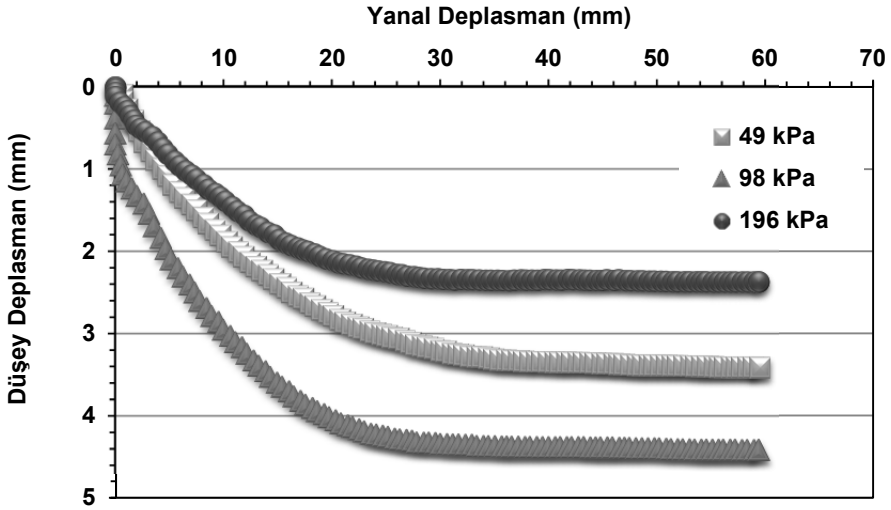
Şekil. Ek-4.8 T-1-1 kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



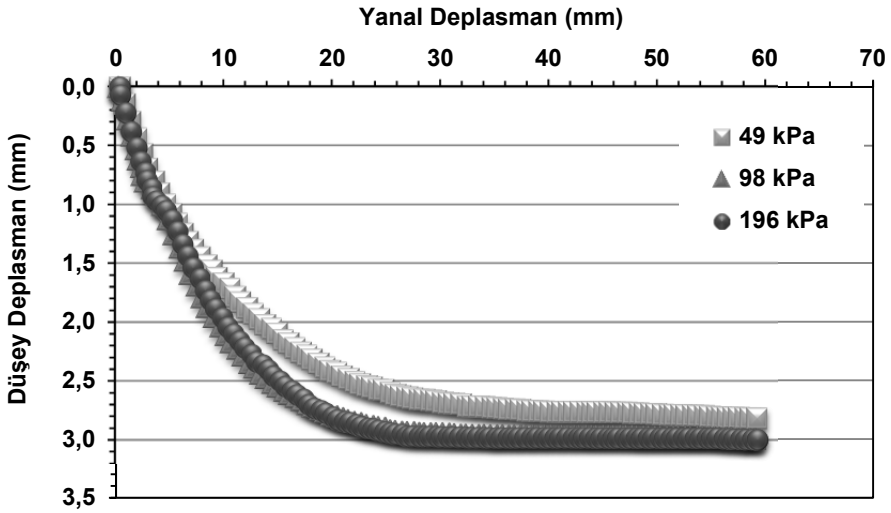
Şekil. Ek-4.9 T-1-2 kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



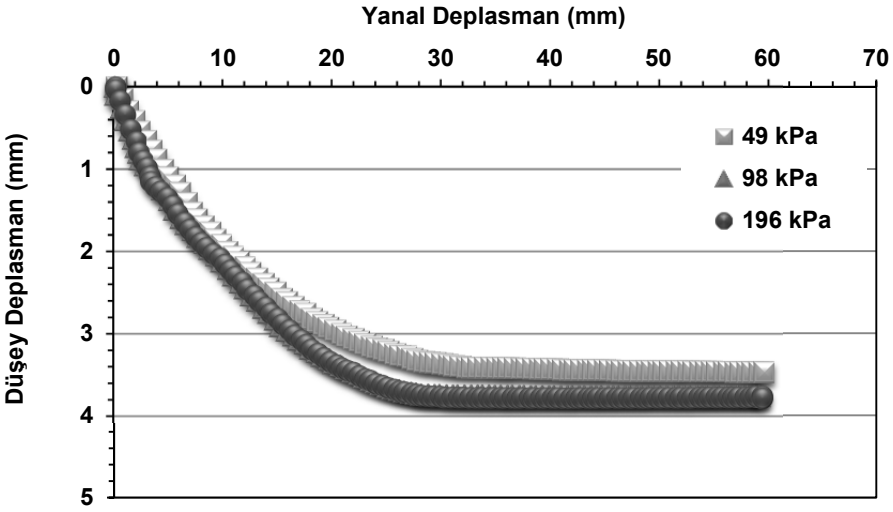
Şekil. Ek-4.10 T-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



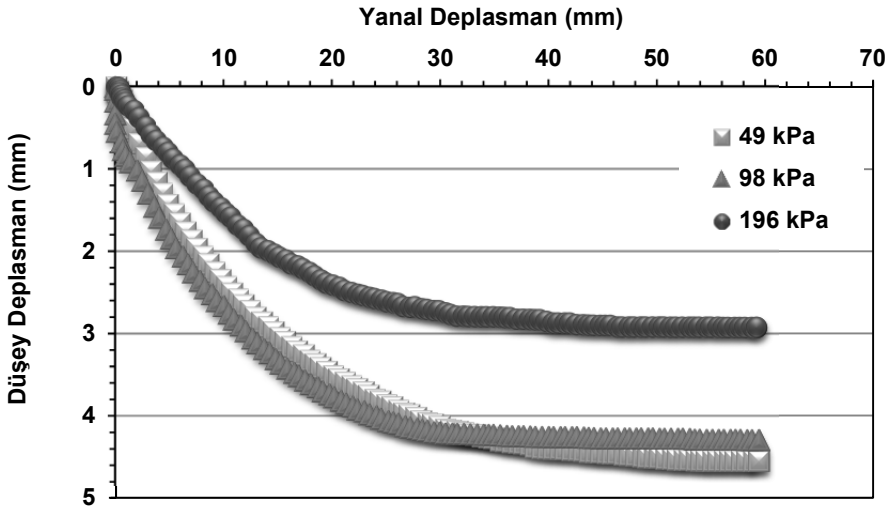
Şekil. Ek-4.11 T-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



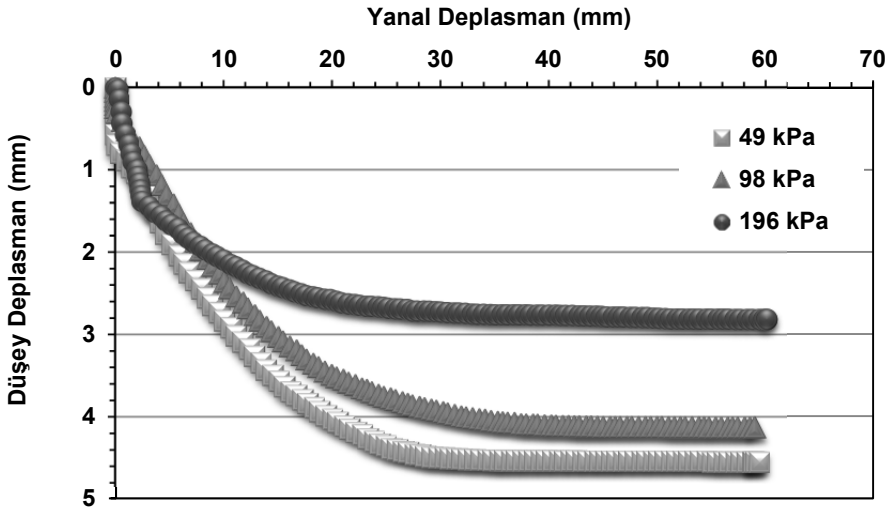
Şekil. Ek-4.12 T-1-Y kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



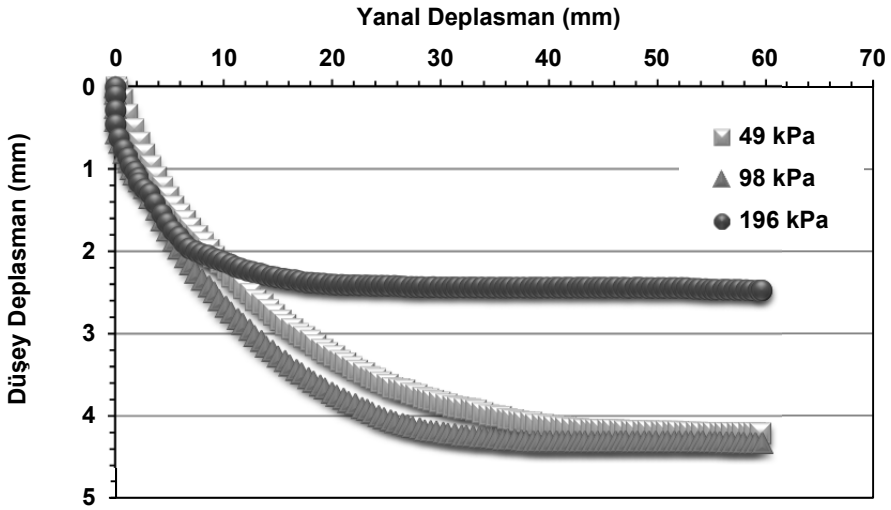
Şekil. Ek-4.13 U-1-1 kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



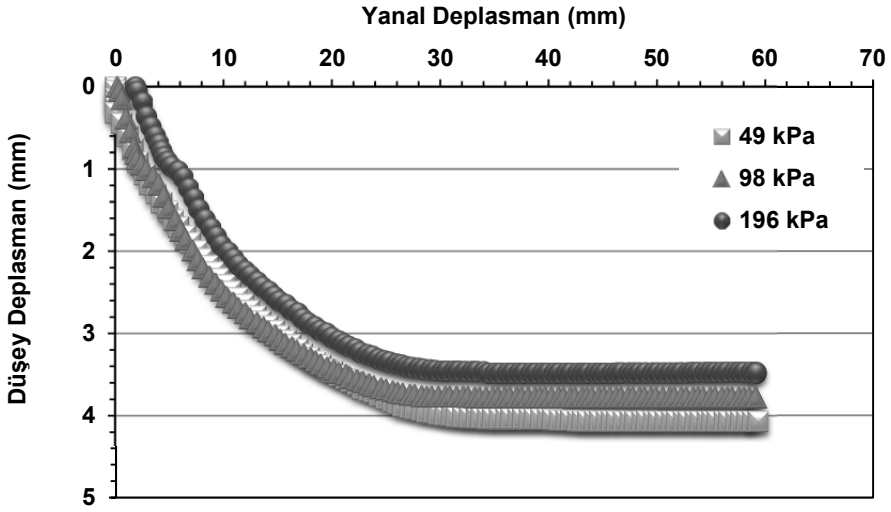
Şekil. Ek-4.14 U-1-2 kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



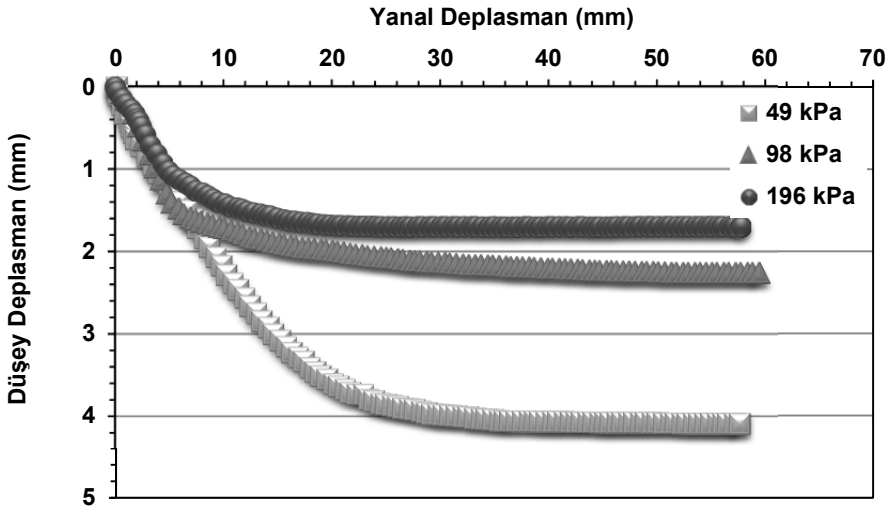
Şekil. Ek-4.15 U-1-D kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



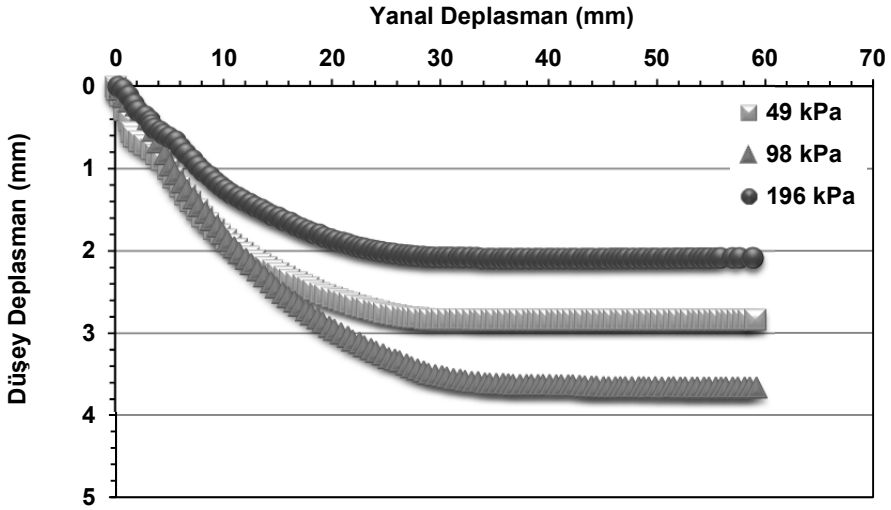
Şekil. Ek-4.16 U-1-I kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



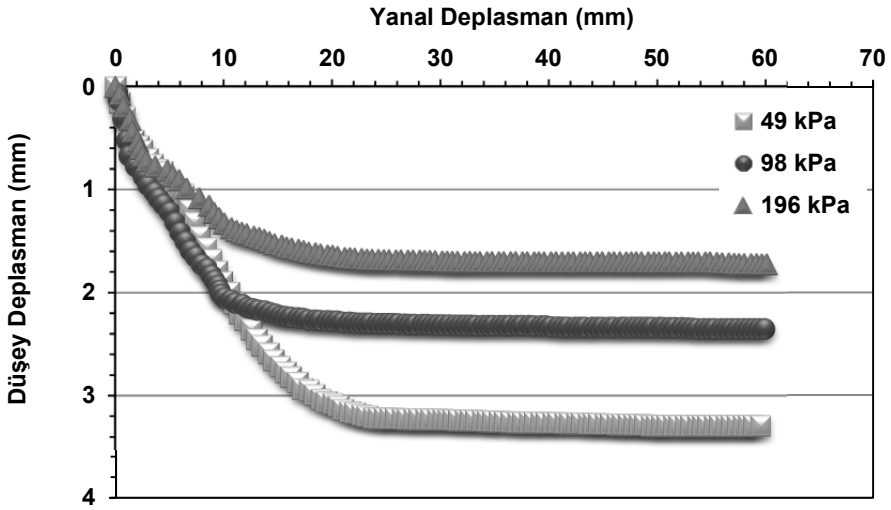
Şekil. Ek-4.17 U-1-Y kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



Şekil. Ek-4.18 E-1-K kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi



Şekil. Ek-4.19 E-1-P kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

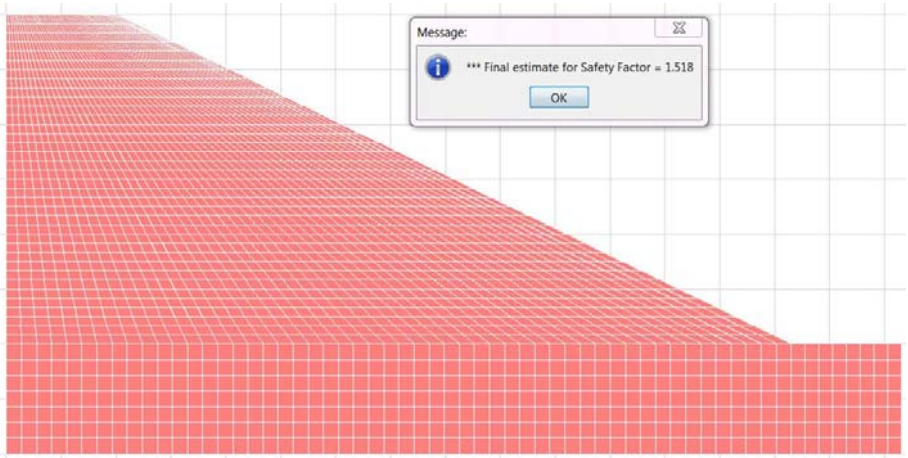


Şekil. Ek-4.20 Lifli atık kompozisyonu yatay-düşey deplasman ilişkisi

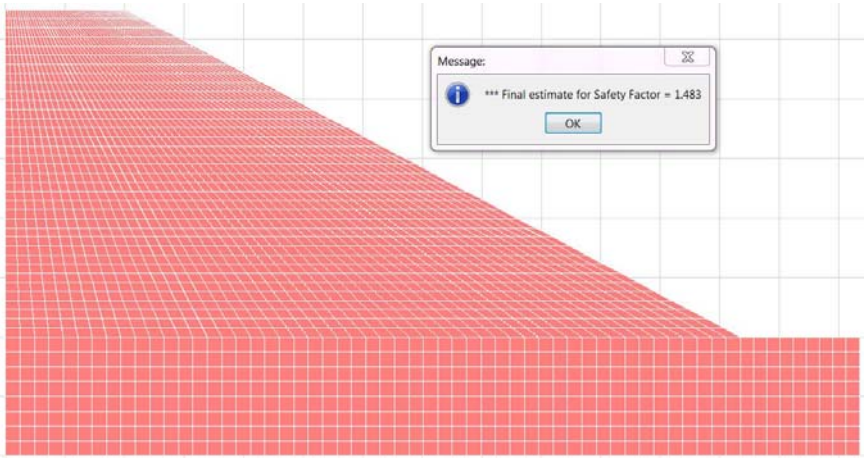
EK-V

DURAYLILIK ANALİZLERİ

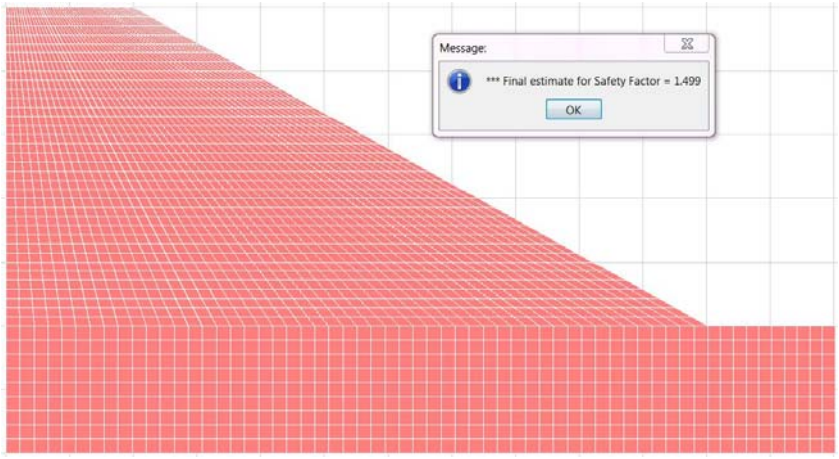
Çalışma kapsamında 250'nin üzerinde bilgisayar analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanmış ve mevcut şev modelleri için farklı depolama yükseklikleri, çeşitli şev açıları ve değişik mühendislik parametrelerinde duraylılık analizleri yapılmış, şev güvenlik sayıları elde edilmiştir. Flac 2-D, Plaxis 2-D ve Talren V.4 programlarıyla yapılan analiz sonuçlarından bazıları Ek.V'te verilmiştir.



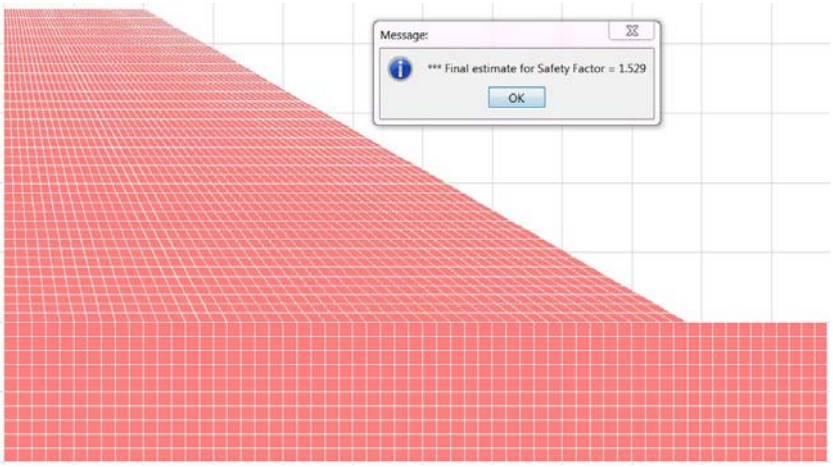
Şekil. Ek-5.1 T-1-D kompozisyonu, H=60 m, α =26°, γ=14 kN/m^3, FS=1,51



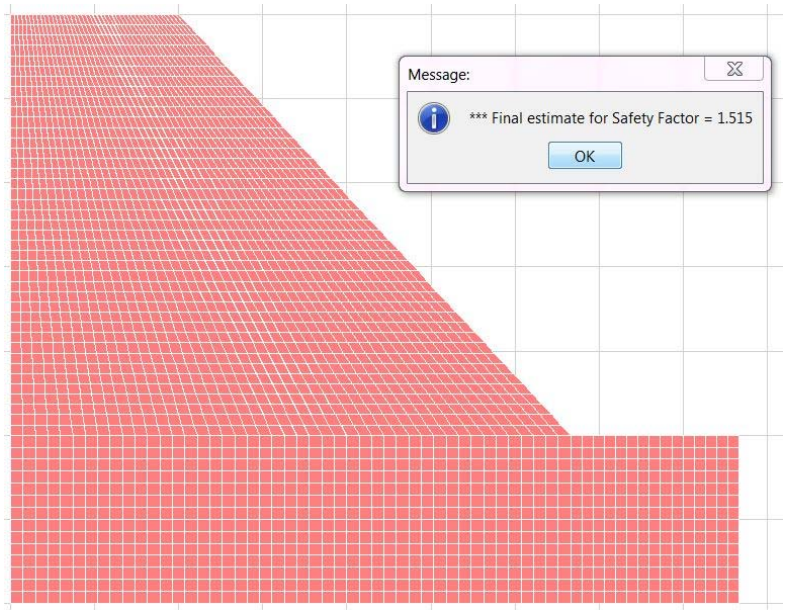
Şekil. Ek-5.2 T-1-D kompozisyonu, H=55 m, α =28°, γ=14 kN/m^3, FS=1,48



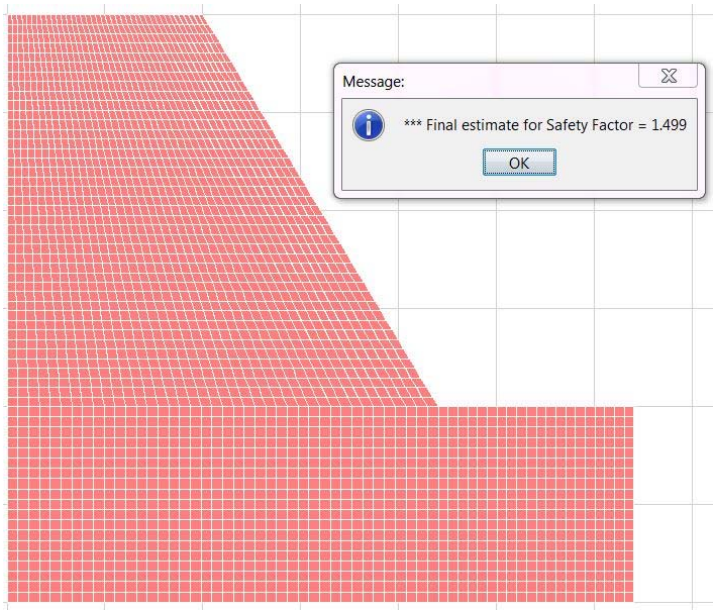
Şekil. Ek-5.3 T-1-D kompozisyonu, H=50 m, α =30°, γ=14 kN/m^3, FS=1,50



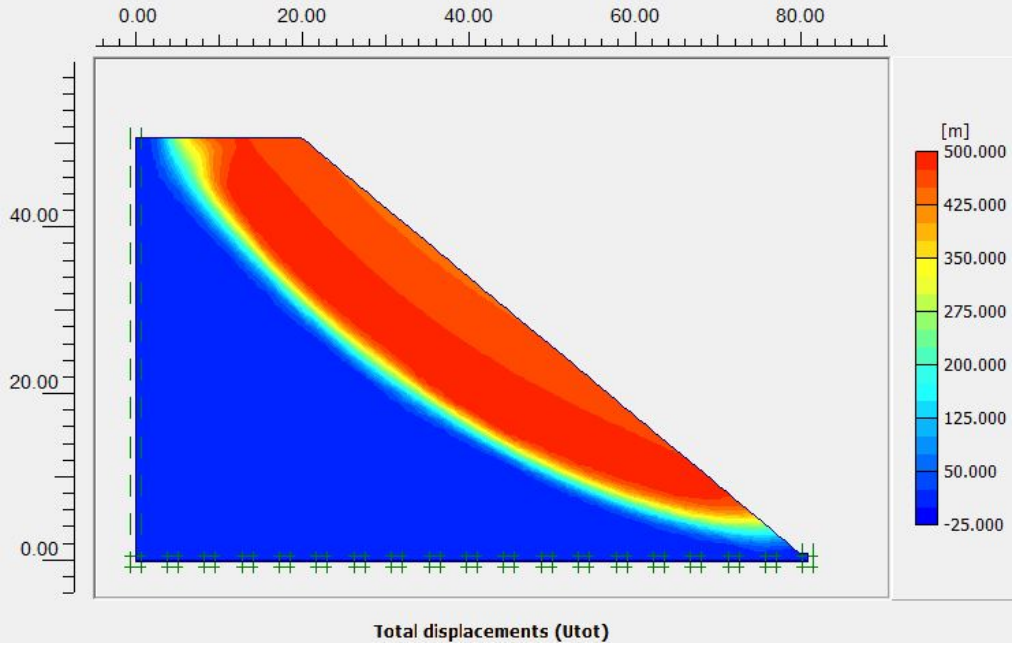
Şekil. Ek-5.4 T-1-D kompozisyonu, H=45 m, α =32°, γ=14 kN/m^3, FS=1,53



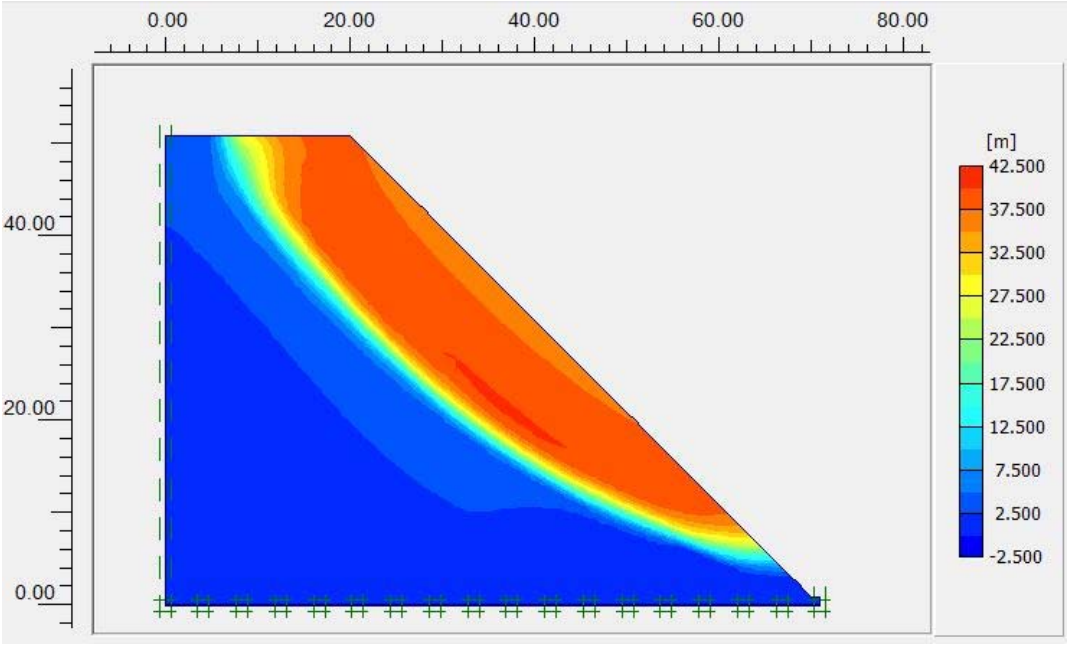
Şekil. Ek-5.5 T-1-D kompozisyonu, H=50 m, α =47°, γ=7 kN/m^3, FS=1,52



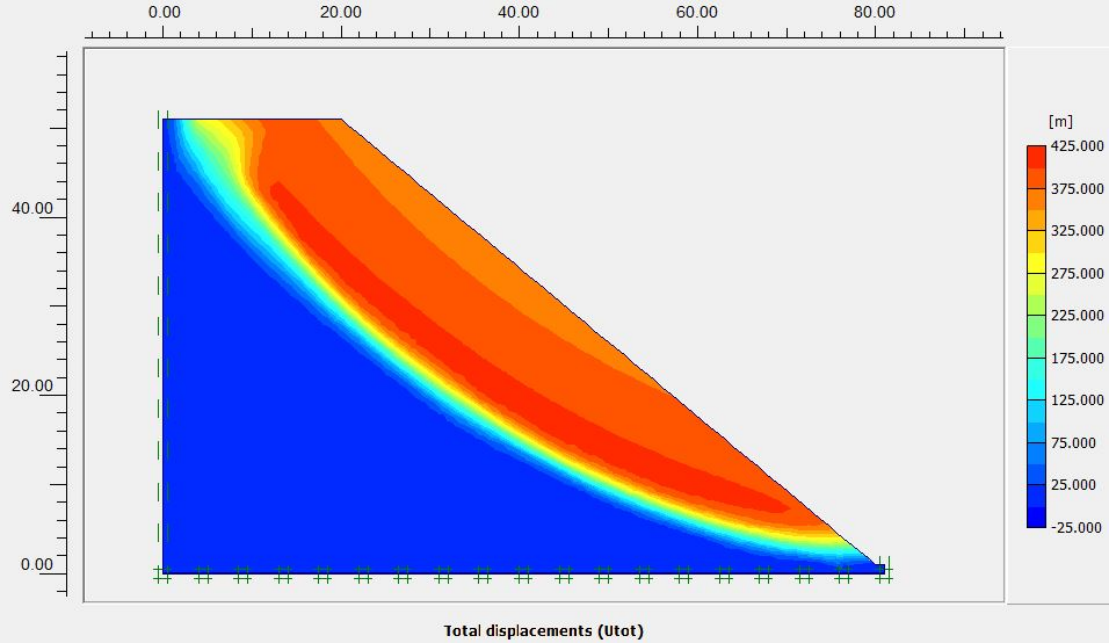
Şekil. Ek-5.6 T-1-D kompozisyonu, H=40 m, α =59°, γ=7 kN/m^3, FS=1,50



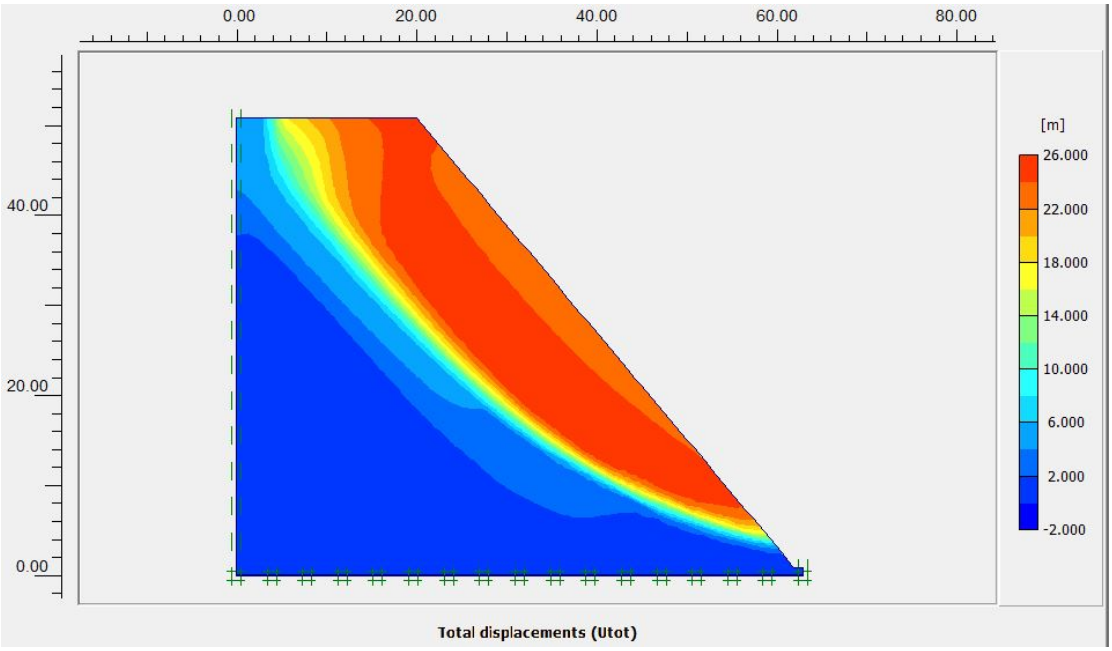
Şekil. Ek-5.7 M-T-D kompozisyonu, H=50 m, α =40°, γ=10 kN/m^3, FS=1,64



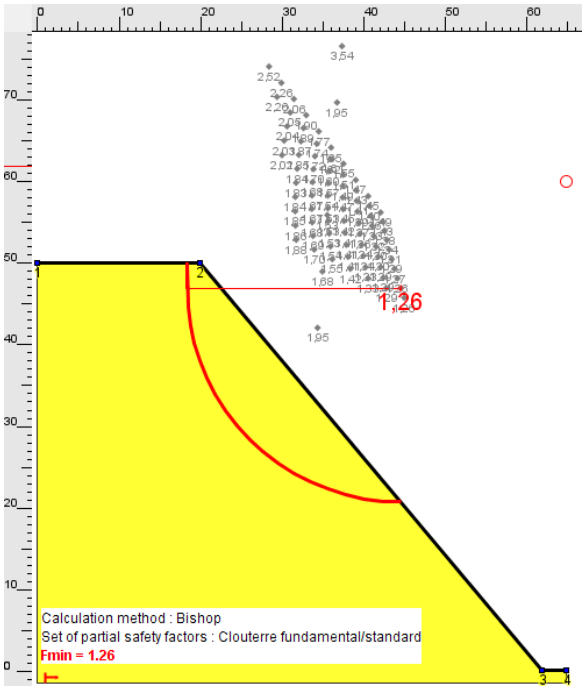
Şekil. Ek-5.8 M-T-D kompozisyonu, H=50 m, α =45°, γ=10 kN/m^3, FS=1,47



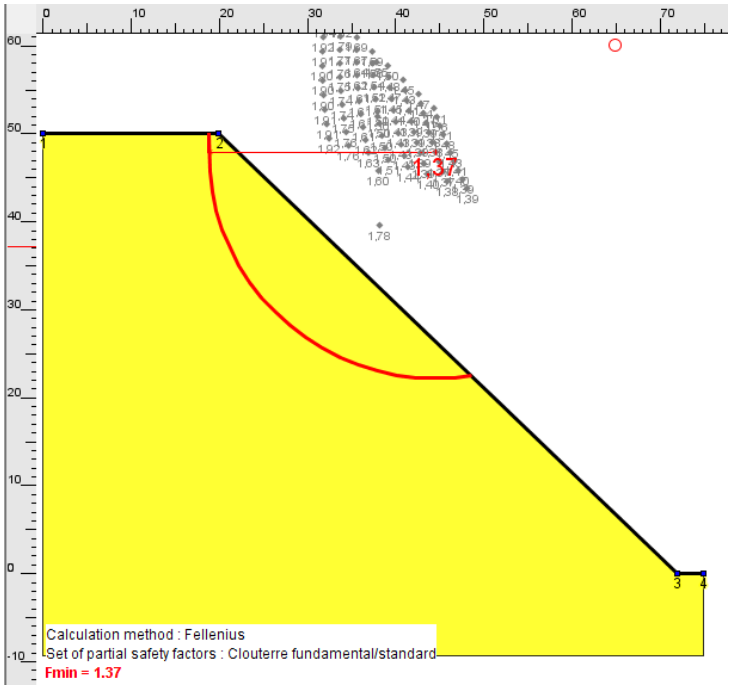
Şekil. Ek-5.9 M-T-Y kompozisyonu, H=50 m, α =40°, γ=10 kN/m^3, FS=1,80



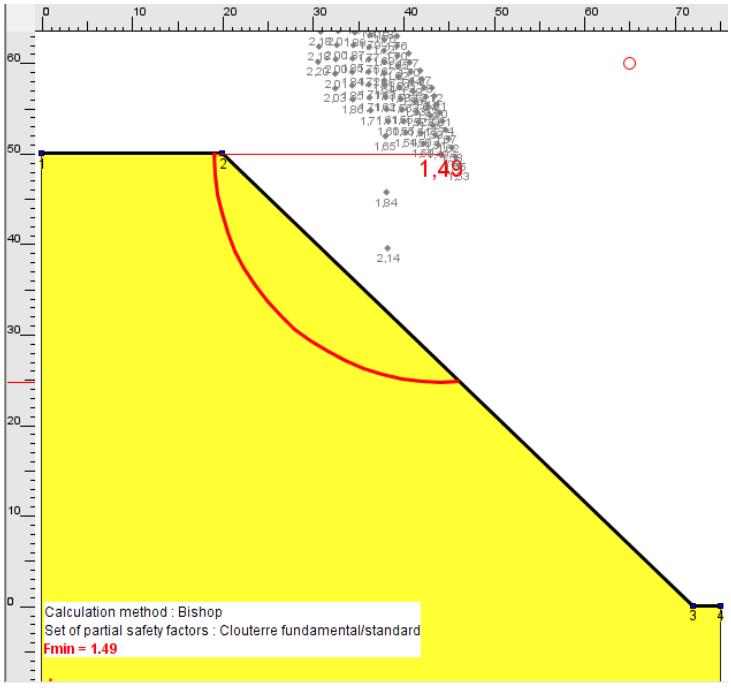
Şekil. Ek-5.10 M-T-Y kompozisyonu, H=50 m, α =40°, γ=10 kN/m^3, FS=1,45



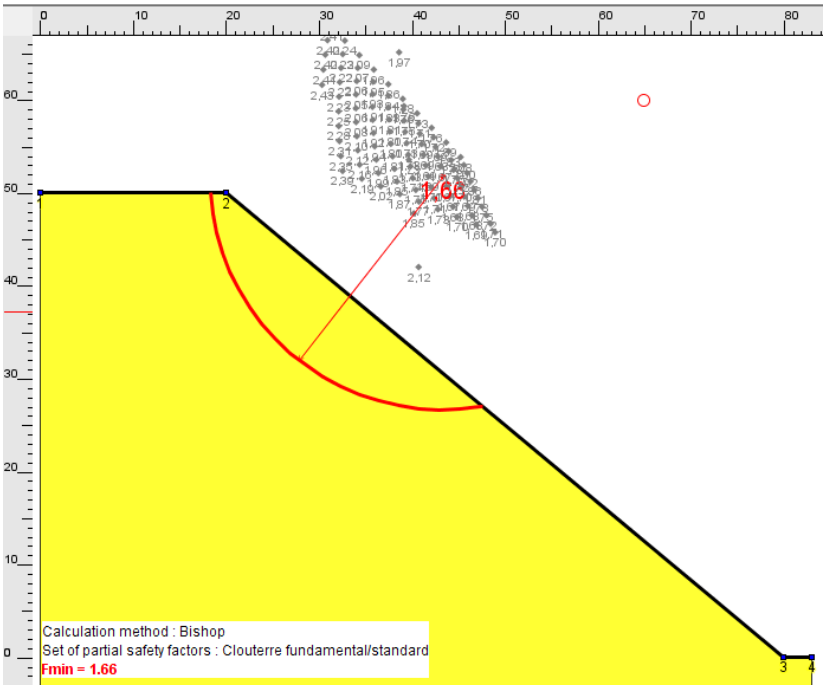
Şekil. Ek-5.11 M-D-T kompozisyonu, H=50 m, α =50°, γ=10 kN/m^3, Bishop, FS=1,26



Şekil. Ek-5.12 M-D-T kompozisyonu, H=50 m, α =45°, γ=10 kN/m^3, Fellenius, FS=1,37

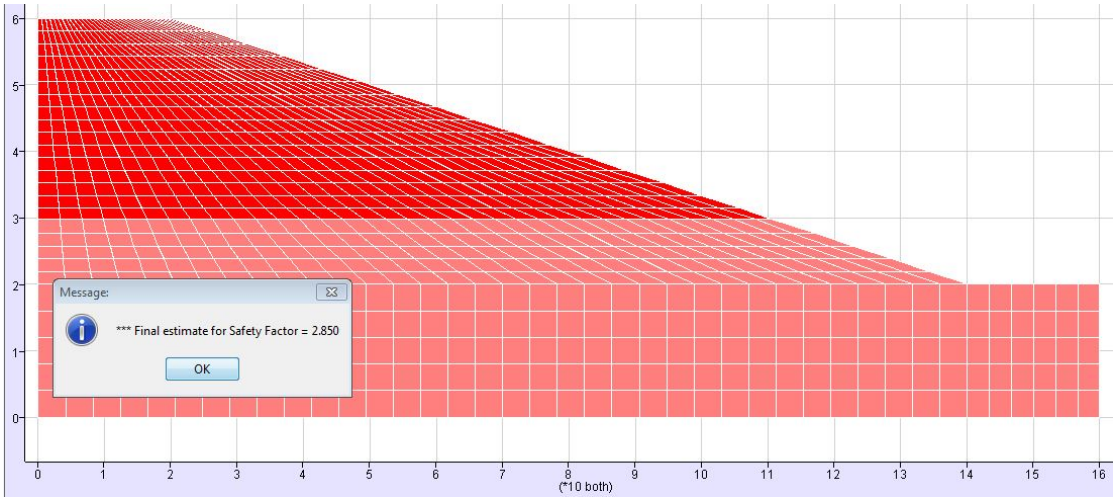


Şekil. Ek-5.13 M-D-T kompozisyonu, H=50 m, α =45°, γ=10 kN/m^3, Bishop, FS=1,49

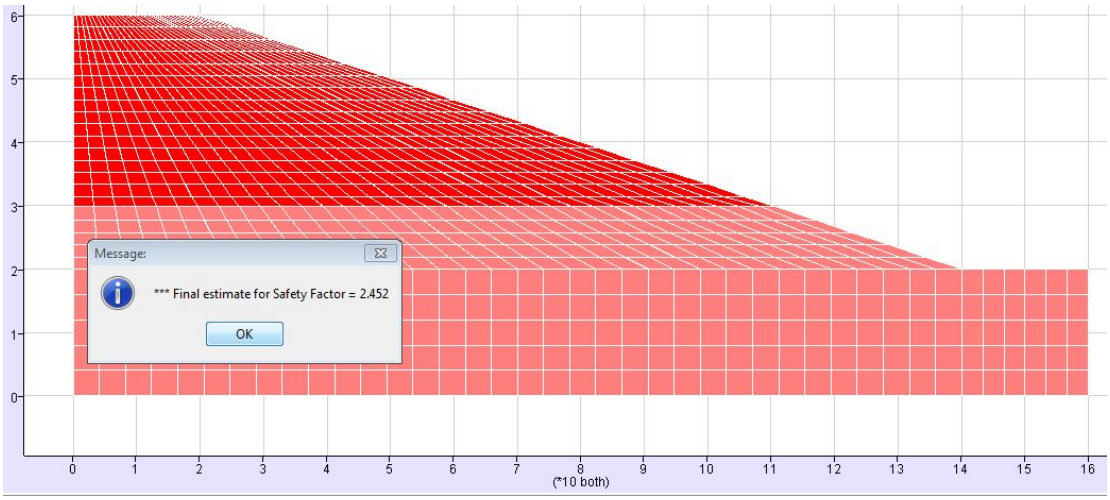


Şekil. Ek-5.14 M-D-T kompozisyonu, H=50 m, α =40°, γ=10 kN/m^3, Bishop, FS=1,66

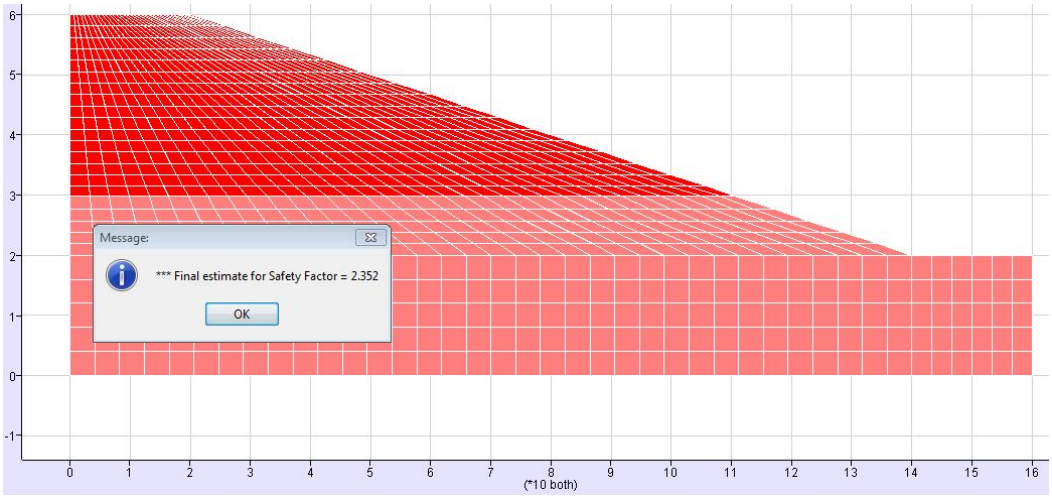
Düzenli atık depolama sahalarındaki KKA'lar büyük yüksekliklerde depolanabilmektedir. Depolama yüksekliklerindeki bu farklılıklar atık tabakalarına etki eden düşey gerilme değerlerini önemli şekilde etkilemektedir. Bu amaçla büyük ölçekli direk kesme deneylerinden iki farklı normal gerilme kademesine (49-98 kPa, 98-196 kPa) ait iki farklı kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir. İki kademe halinde modellenen KKA şevinin alt katmanında 98-196 kPa'lık normal gerilme değerine karşılık gelen kayma dayanımı parametreleri kullanılırken, daha az düşey gerilmenin etki ettiği üst katmanda 49 ile 98 kPa'ya karşılık gelen kayma dayanımı parametreleri kullanılmıştır.



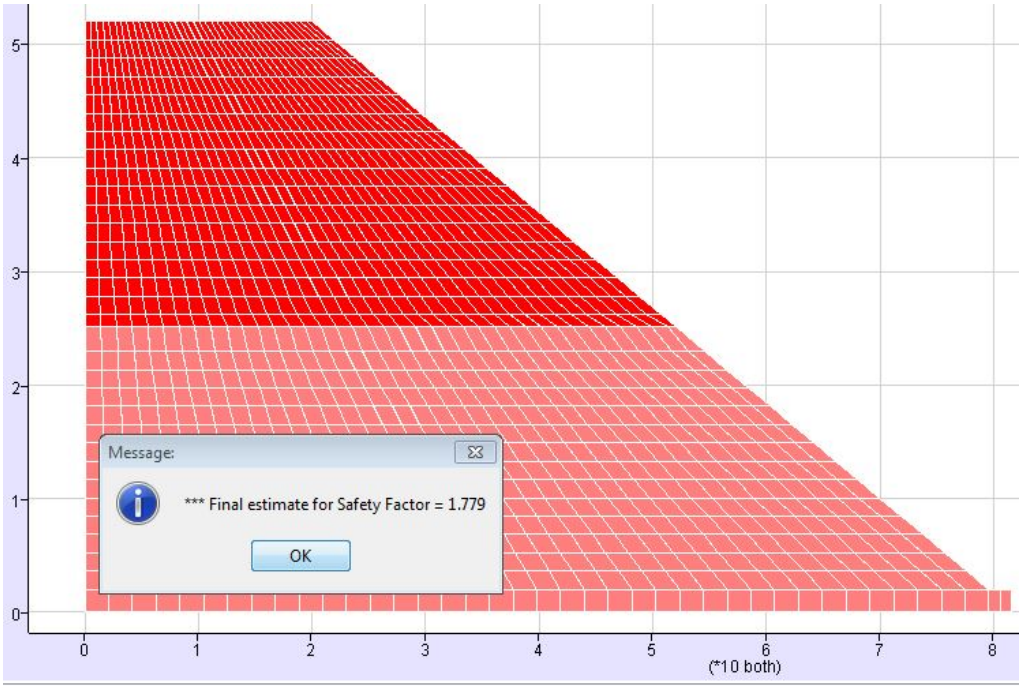
Şekil. Ek-5.15 E-1-D kompozisyonu, H=60 m, α =18,5°, γ=10 kN/m^3, FS=2,85



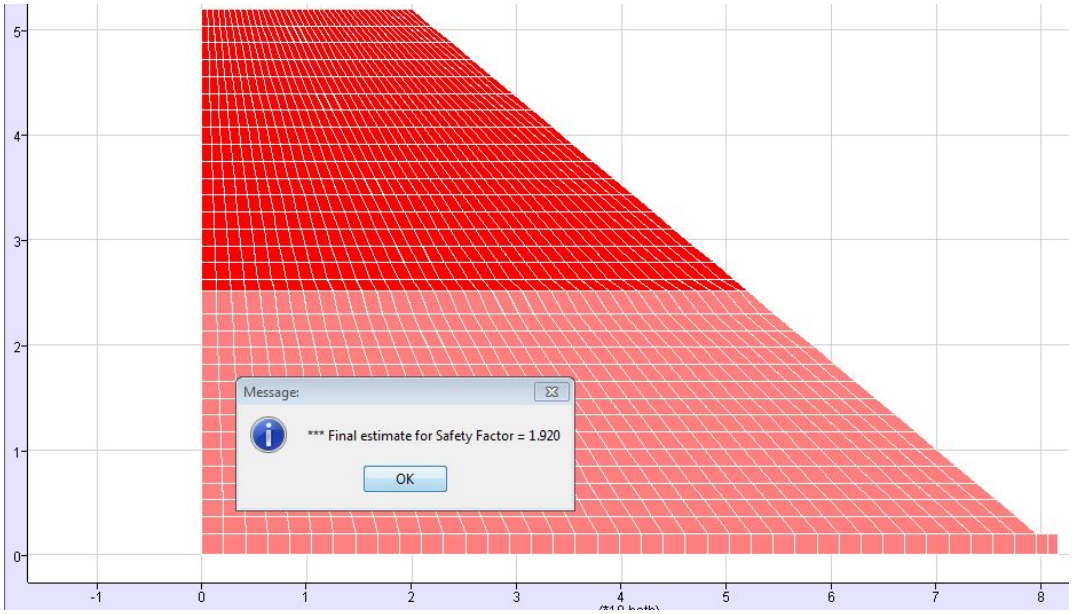
Şekil. Ek-5.16 T-1-D kompozisyonu, H=60 m, α =18,5°, γ=10 kN/m^3, FS=2,45



Şekil. Ek-5.17 U-1-D kompozisyonu, H=60 m, α =18,5°, γ=10 kN/m^3, FS=2,35



Şekil. Ek-5.18 M-D-T numunesi, H=50 m, α =40°, γ=10 kN/m^3, FS=1,78



Şekil. Ek-5.19 M-D-Y numunesi, H=50 m, α =40°, γ=10 kN/m^3, FS=1,78

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 15 Mart 1983

Doğum Yeri : İzmir

İlkokul : Agah Efendi İlkokulu, Konak İzmir – 1994

Ortaokul : Agah Efendi Ortaokulu, Konak İzmir – 1997

Lise İngilizce Hazırlık : İzmir Vali Vecdi Gönül Lisesi, Konak İzmir – 1998

Lise : İzmir Vali Vecdi Gönül Lisesi, Konak İzmir – 2001

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa – 2006

Yüksek Lisans : İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü**,** Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik A.B.D. – 2009

Doktora : Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, Manisa – 2014