

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EVSEL KATI ATIKLARIN  
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Koray AYKOL**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2008**

**EVSEL KATI ATIKLARIN  
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Koray AYKOL  
501061307**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007  
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2008**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Oğuz TAN  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. İzzet ÖZTÜRK (İ.T.Ü.)  
Doç.Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü.)**

**OCAK 2008**

## ÖNSÖZ

Gelişen toplumların çevre bilincini kazanmasıyla beraber yeni bir bilim dalı olan Çevre Geotekniği'ne verilen önem artmaktadır. Bunun sonucunda katı atık sahalarının planlaması, yönetimi ve stabilite tahkikleri çevre mühendisleri ve geoteknik mühendislerinin ortak çalışmalarıyla daha detaylı olarak incelenmektedir. Bu çalışmada, katı atıkların mukavemet parametrelerinin belirlenmesinde araziden alınan katı atık numuneleri kullanmak yerine, laboratuvarda oluşturulan suni plastik granüler numuneler kullanılarak deneyler yapılmış ve mukavemet parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmanın evsel katı atıkların mukavemet parametrelerinin, suni numuneler kullanılarak belirlenmesi için ileride yapılacak olan çalışmalara ışık tutacağı kanısındayım.

Tez çalışmam esnasında beni yönlendirirken ilgisini ve değerli yardımlarını benden esirgemeyen tez danışmanım sayın Doç Dr. Oğuz TAN başta olmak üzere, üniversite öğrenimimde bana yardımcı olan hocalarımdan sayın Doç Dr. Tuğrul ÖZKAN'a ve sayın Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK'e, laboratuvar çalışmalarım sırasında göstermiş olduğu ilgi ve yardımlardan dolayı Araş. Gör. İnş. Müh. Ahmet ŞENER'e ve tüm İ.T.Ü. Hamdi PEYNİRCİOĞLU Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

İlkokul öğretmenim sayın Mehmet YAVUZ'a, hayatım boyunca maddi manevi destek olup her zaman yanında olan Makine Teknik Resim Öğretmeni babam Zekai AYKOL'a, İlkokul Öğretmeni annem Jale AYKOL'a, Gıda Mühendisi kardeşim Burcu AYKOL'a ve tez çalışmamda bana yardımcı olan arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Barış ÖZCAN ile Yük. Mimar Özlem Yurttakal'a teşekkürü borç bilirim.

Aralık 2007

Koray AYKOL

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Amaç	3
<b>2. KATI ATIK TÜRLERİ VE ÜLKELERE GÖRE KOMPOZİSYONU</b>	<b>4</b>
2.1. Katı Atıkların Kaynağı ve Türleri	4
2.1.1. Evsel Katı Atıklar	5
2.1.2. Mineral Atıklar	6
2.1.3. Endüstriyel Atıklar	6
2.1.4. Deniz Dibi Tortuları	7
2.1.5. Zararlı ve Tehlikeli Atıklar	7
2.2. Katı Atıkların Ülkelere Göre Kompozisyonu	7
2.3. Katı Atıkların İçeriği	12
2.4. Katı Atık İçeriğinin Bölgesel, İklimsel ve Çağa Göre Değişimi	13
2.4.1. Katı Atık İçeriğinin Bölgesel Değişimi	13
2.4.2. Katı Atık İçeriğinin İklimsel Değişimi	13
2.4.3. Katı Atık İçeriğinin Çağa ve Zamana Göre Değişimi	14
2.5. Katı Atık Yönetimi	14
2.5.1. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri	14
<b>3. KATI ATIKLARIN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ</b>	<b>18</b>
3.1. Katı Atıkların Fiziksel ve İndeks Özellikleri	18
3.1.1. Porozite	18
3.1.2. Su Muhtevası	18
3.1.3. Permeabilite	18
3.1.4. Birim Hacim Ağırlık	19
3.2. Katı Atıkların Sıkışma ve Deformasyon Özellikleri	22
3.3. Katı Atıkların Mukavemet Özellikleri	26
3.3.1. Arazi Deneyleri	29
3.3.2. Model Deneyleri	31
3.3.3. Küçük Boyutlu Mukavemet Deneyleri	34

<b>4. KATI ATIK SAHALARINDA STABİLİTE</b>	<b>36</b>
4.1. Stabilite Analizi ve Hesap Yöntemleri	37
4.1.1. Limit Denge Metodu	37
4.1.2. Sonlu Elemanlar Metodu	38
4.1.3. Sismik Analiz	38
<b>5. YÖNTEM</b>	<b>43</b>
5.1. Kullanılan Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	43
5.2. Elek Analizi	46
5.3. Piknometre Deneyi	47
5.4. Rölatif Sıklık Deneyi	48
5.5. Kesme Kutusu Deneyi	49
<b>6. DENEY SONUÇLARI</b>	<b>52</b>
6.1. Piknometre ve Rölatif Sıklık Deneyleri	52
6.2. Elek Analizi Deneyleri	52
6.3. Kesme Kutusu Deney Sonuçları	55
<b>7. SONUÇLAR</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>86</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>89</b>

## KISALTMALAR

<b>MSW</b>	: Evsel Katı Atık (Municipal Solid Waste)
<b>SBP</b>	: Kendiliğinden İlerleyen Presiyometre (Self Boring Pressuremeter)
<b>HDP</b>	: Yüksek Basıncılı Dilatometre (High Pressuremeter Dilatometer)
<b>EPA</b>	: Amerikan Çevre Koruma Örgütü (U.S. Environmental Protection Agency)
<b>BK</b>	: Beyaz Renkli Kübik Granüler Plastik Numune
<b>SM</b>	: Sarı Renkli Mercimek Granüler Plastik Numune
<b>LS</b>	: Lacivert Renkli Silindirik Granüler Plastik Numune
<b>KY</b>	: Kahve Renkli Yuvarlak Granüler Plastik Numune
<b>ABS</b>	: Akrilonitril-Bütadien Sitrin
<b>HDPE</b>	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
<b>PP</b>	: Polipropilen

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 2.1</b> Bir toplulukta oluşan katı atıklar.....	5
<b>Tablo 2.2</b> Evsel katı atıkların bileşimi.....	6
<b>Tablo 2.3</b> Evsel katı atıkların kompozisyonunun belirlenmesi .....	7
<b>Tablo 2.4</b> Ülkelerin gelir düzeylerine göre katı atıkların kompozisyonu .....	9
<b>Tablo 2.5</b> Farklı ülkelerdeki katı atıkların yüzde oranları .....	10
<b>Tablo 2.6</b> EPA'nın verilerine göre Amerika'daki evsel katı atıkların 1960-1990 yılları arası içerikleri .....	11
<b>Tablo 3.1</b> Katı atıkların sıkıştırılma ve yerleştirilme şekline bağlı olarak birim hacim ağırlıkları.....	20
<b>Tablo 3.2</b> Katı atıkların sıkıştırılma derecelerine göre a ve b parametreleri ...	22
<b>Tablo 3.3</b> Katı atıkların sahalarındaki oturma oranları .....	24
<b>Tablo 3.4</b> Laboratuar deneylerinden bulunan mukavemet parametreleri .....	27
<b>Tablo 3.5</b> Arazideki SPT ve Vane deneylerinden bulunan mukavemet parametreleri .....	28
<b>Tablo 3.6</b> Arazi yükleme deneylerinden bulunan mukavemet parametreleri ..	28
<b>Tablo 3.7</b> Katı atık modellenmesinde kullanılan plastik malzemenin elastisite modülü.....	34
<b>Tablo 4.1</b> Şev stabilitesi için $F_s$ güvenlik katsayıları .....	38
<b>Tablo 5.1</b> Plastik malzemelerin önemli fiziksel özellikleri .....	45
<b>Tablo 5.2</b> Kullanılan elekler .....	46
<b>Tablo 6.1</b> Numunelere ait endeks özellikleri .....	51
<b>Tablo 6.2</b> Kesme kutusu deneyleri toplu sonuçları.....	78
<b>Tablo 6.3</b> Kesme kutusu deneyleri oturma ve deformasyon modülü tablosu ..	79

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 2.1	: Büyük şehirlerdeki kişi başına düşen katı atık miktarları..... 8
Şekil 2.2	: İstanbul'daki katı atıkların kompozisyonu..... 8
Şekil 2.3	: EPA'nın (1990) verilerine göre Amerika'daki evsel katı atıkların bileşimi..... 11
Şekil 2.4	: Katı atıkların hücre şeklinde depolanması ..... 16
Şekil 2.5	: Katı atık sahası en kesiti ..... 17
Şekil 3.1	: Katı atıkların oturma mekanizması ..... 23
Şekil 3.2	: Geçiş sayısı - birim hacim ağırlığı grafiği ..... 25
Şekil 3.3	: Katı atıklar için Singh ve Murphy'nin önerdiği sürtünme açısı-kohezyon diyagramı..... 26
Şekil 3.4	: Konsolide olmuş ve drenaja izin verilen katı atıklarda üç eksenli basınç deneyi sonuçları..... 32
Şekil 3.5	: Deformasyona bağlı olarak katı atıklardaki kayma gerilmesi parametreleri ..... 33
Şekil 3.6	: Deformasyona bağlı olarak katı atıklardaki kayma gerilmesi parametreleri..... 33
Şekil 4.1	: Kazı esnasındaki potansiyel kayma düzlemleri..... 35
Şekil 4.2	: Katı atık sahasındaki kayma düzlemleri..... 36
Şekil 4.3	: Yer değiştirme $k_y/k_{maks}$ diyagramları..... 39
Şekil 4.4	: Sönümlenme ve kayma modülü-tekrarlı kayma deformasyonu diyagramı ..... 40
Şekil 5.1	: Granüler plastik numuneler..... 43
Şekil 5.2	: Kağıt ve keçe numuneler..... 44
Şekil 5.3	: Kesme kutusu deney aleti..... 50
Şekil 6.1	: Beyaz Küp (BK) granülometri eğrisi..... 52
Şekil 6.2	: Sarı Mercimek (SM) granülometri eğrisi..... 52
Şekil 6.3	: Lacivert Silindir (LS) granülometri eğrisi..... 53
Şekil 6.4	: Kahverengi Yuvarlak (KY) granülometri eğrisi..... 53
Şekil 6.5	: Kağıt numune granülometri eğrisi..... 54
Şekil 6.6	: BK'ya ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği..... 57
Şekil 6.7	: BK'ya ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği..... 57
Şekil 6.8	: %80 BK + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği..... 58
Şekil 6.9	: %80 BK + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği..... 58
Şekil 6.10	: SM'ye ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği..... 59
Şekil 6.11	: SM'ye ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği ..... 59
Şekil 6.12	: %90 SM + %10 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği..... 60
Şekil 6.13	: %90 SM + %10 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği..... 60



<b>Şekil 6.14</b>	: %80 SM + %20 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	61
<b>Şekil 6.15</b>	: %80 SM + %20 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	61
<b>Şekil 6.16</b>	: %80 SM + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	62
<b>Şekil 6.17</b>	: %80 SM + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	62
<b>Şekil 6.18</b>	: %70 SM + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	63
<b>Şekil 6.19</b>	: %70 SM + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	63
<b>Şekil 6.20</b>	: LS'ye ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	64
<b>Şekil 6.21</b>	: LS'ye ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	64
<b>Şekil 6.22</b>	: %80 LS + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	65
<b>Şekil 6.23</b>	: %80 LS + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	65
<b>Şekil 6.24</b>	: KY'ye ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	66
<b>Şekil 6.25</b>	: KY'ye ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	66
<b>Şekil 6.26</b>	: %90 KY + %10 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	67
<b>Şekil 6.27</b>	: %90 KY + %10 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	67
<b>Şekil 6.28</b>	: %80 KY + %20 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	68
<b>Şekil 6.29</b>	: %80 KY + %20 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	68
<b>Şekil 6.30</b>	: %80 KY + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	69
<b>Şekil 6.31</b>	: %80 KY + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	69
<b>Şekil 6.32</b>	: %70 KY + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği.....	70
<b>Şekil 6.33</b>	: %70 KY + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği.....	70
<b>Şekil 6.34</b>	: BK Kırılma Zarfı.....	71
<b>Şekil 6.35</b>	: %80 BK + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı.....	71
<b>Şekil 6.36</b>	: SM Kırılma Zarfı.....	72
<b>Şekil 6.37</b>	: %90 SM + %10 kağıt karışım Kırılma Zarfı.....	72
<b>Şekil 6.38</b>	: %80 SM + %20 kağıt karışım Kırılma Zarfı.....	73
<b>Şekil 6.39</b>	: %80 SM + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı.....	73
<b>Şekil 6.40</b>	: %70 SM + %20 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı.....	74
<b>Şekil 6.41</b>	: LS Kırılma Zarfı.....	74
<b>Şekil 6.42</b>	: %80 LS + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı.....	75

	<b><u>Sayfa No</u></b>
<b>Şekil 6.43</b> : KY Kırılma Zarfı.....	75
<b>Şekil 6.44</b> : %90 KY + %10 kağıt karışım Kırılma Zarfı.....	76
<b>Şekil 6.45</b> : %80 KY + %20 kağıt karışım Kırılma Zarfı.....	76
<b>Şekil 6.46</b> : %80 KY + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı.....	77
<b>Şekil 6.47</b> : %70 KY + %20 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı.....	77

## SEMBOL LİSTESİ

<b>a</b>	: Derinlik parametresi
<b>b</b>	: Derinlik parametresi
<b>C<sub>c</sub>'</b>	: Sıkışma katsayısı
<b>C<sub>c</sub></b>	: Modifiye edilmiş sıkışma katsayısı
<b>c</b>	: Kohezyon terimi
<b>D<sub>r</sub></b>	: Rölatif sıklık
<b>e</b>	: Boşluk oranı
<b>e<sub>maks</sub></b>	: Maksimum boşluk oranı
<b>e<sub>min</sub></b>	: Minimum boşluk oranı
<b>E<sub>s</sub></b>	: Elastisite modülü
<b>E</b>	: Deformasyon modülü
<b>FS</b>	: Şev stabilitesi güvenlik katsayısı
<b>G<sub>s</sub></b>	: Kayma modülü
<b>G<sub>i</sub></b>	: Başlangıç kayma modülü
<b>G<sub>s</sub></b>	: İkincil kayma modülü
<b>H</b>	: Katı atık yüksekliği
<b>HEA</b>	: Yatay eşdeğer deprem ivmesi
<b>k<sub>y</sub></b>	: Akma ivmesi
<b>k<sub>max</sub></b>	: Depremin neden olduğu en büyük yatay ivme
<b>M<sub>r</sub>, F<sub>r</sub></b>	: Şev hareketine karşı koyan momentler, kuvvetler
<b>M<sub>d</sub>, F<sub>d</sub></b>	: Şev hareketini tetikleyici momentler, kuvvetler
<b>M<sub>w</sub></b>	: Depremin şiddeti
<b>P<sub>0</sub>'</b>	: Boşluk referans basıncı depolanma yaşı
<b>P<sub>f</sub></b>	: Başlangıç akma basıncı
<b>S<sub>u</sub></b>	: Drenajsız kayma mukavemeti
<b>T<sub>p</sub></b>	: Depremin periyodu
<b>T<sub>s</sub></b>	: Katı atık dolgusunun temel periyodu
<b>U</b>	: Yer değiştirme
<b>V<sub>s</sub></b>	: Katı atık içerisindeki kayma dalgasının hızı
<b>V<sub>s</sub></b>	: Rölatif sıklık deneyindeki pirinç silindirin hacmi
<b>W<sub>n</sub></b>	: Pirinç silindir içerisindeki numune ağırlığı
<b>W<sub>1</sub></b>	: Kuru zemin ağırlığı
<b>W<sub>2</sub></b>	: Su+piknometre ağırlığı
<b>W<sub>3</sub></b>	: Su+piknometre+zemin ağırlığı
<b>z</b>	: Derinlik

$\delta$	: Oturma modülü
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$\tau_{maks}$	: Kesme kutusunda numunenin aldığı maksimum kayma gerilmesi
$\tau_h(t)$	: z derinliğindeki yatay kayma gerilmesi
$\sigma_n$	: Normal gerilme
$\gamma$	: Kayma deformasyonu
$\gamma_n$	: Numune birim hacim ağırlığı
$\gamma_s$	: Dane birim hacim ağırlığı
$\gamma_{k maks}$	: Maksimum dane birim hacim ağırlığı
$\gamma_{k min}$	: Minimum dane birim hacim ağırlığı
$\gamma_i(t)$	: Evsel katı atığın istenen zamandaki birim hacim ağırlık
$\gamma_i(t=1)$	: Evsel katı atığın ilk günkü birim hacim ağırlığı
$\gamma_i$	: Katı atığın yüzeydeki birim hacim ağırlık
$\phi$	: Kayma mukavemeti açısı
$\alpha$	: Non-lineerlik sabiti
$\beta$	: Non-lineerlik sabiti
$\epsilon_a$	: Eksenel deformasyon
$\epsilon_v$	: Hacimsel deformasyon
$\Delta\sigma$	: Gerilme değişimi
$\Delta\epsilon$	: Deformasyon değişimi
$\rho$	: z derinliği üzerindeki katı atığın birim hacim ağırlığı

# EVSEL KATI ATIKLARIN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN MODELLENMESİ

## ÖZET

Yunanlılar ve Romalılarından itibaren tarihteki tüm uygarlıklar, evsel katı atıkların toplanmasının yaşanılan çevre açısından ne kadar gerekli olduğunun bilincindeydiler. Artan nüfus ve endüstriyelikleşmeyle birlikte çevrenin temiz tutulması insan sağlığı açısından ne kadar gerekli olduğunun bir kez daha farkına varıldı. 1970'lerde Amerika'da Aşk Kanalı (Love Channel) yakınında bir kanala gömülen ve üstü kil tabakasıyla kapatılan kimyasal atıklar Aşk Kanalı'na sızmış ve bir süre sonra çevre sakinlerinde ciddi sağlık problemleri görülmeye başlanmıştır. Bu ve benzeri olaylar sonucunda 1980'lerde bilim adamları, çevre mühendisleri ve geoteknik mühendisleri; katı atıklar depolanırken insan sağlığı ve çevrenin birlikte korunmasını da amaçlayarak kimyasal katı atık depolama alanlarını yeniden tasarlamaya başlamışlardır.

Bu çalışmada; katı atıkların kayma mukavemeti parametreleri ve oturma davranışları; kesme kutusu deneyleri ile laboratuvar şartlarında oluşturulan plastik granüler malzeme ve bu granüler malzemeye kağıt ve keçe kırpıntısı eklenmesiyle oluşturulan karışımlarla modellenmiştir.

Tarihsel süreç içerisinde farklı uygarlıklarda katı atıkların; kaynağı, toplama sistemi, katı atık depolama sahaları, bu işlemler yapılırken ortaya çıkan problemler ve Türkiye'deki katı atık kontrolünden bahsedilmiştir. Sonrasında katı atıkların kaynağı ve türleri, ülkelere göre kompozisyonu, içeriği, bu içeriğin bölgesel, iklimsel ve çağa göre değişimi ve katı atık yönetimi vurgulanmıştır.

Katı atıkların fiziksel ve indeks özellikleri, sıkışma ve deformasyon özellikleri ve mukavemet özellikleri arazi, model ve küçük boyutlu mukavemet deneylerine bağlı olarak açıklanmıştır. Buralardan elde edilen parametrelerin katı atık sahalarındaki

stabilite ve hesap yöntemlerinde nasıl kullanıldığına değinilmiştir.

Kullanılan malzemelerle ilgili gerekli bilgiler verildikten sonra bu malzemelerle yapılan deneyler ve bu deneylerde uygulanan yöntemler sunulmuştur. Sonrasında yapılan tüm deneylerin sonuçları ayrı ayrı irdelenmiş ve sonuçlar bölümünde genel anlamda bu sonuçlar bir kez daha vurgulanmıştır.

## **MODELLING GEOTECHNICAL PROPERTIES OF MSW**

### **SUMMARY**

Economists define waste as a material throwing away is cheaper than using. According to EPA (US Environmental Protection Agency), MSW (Municipal Solid Waste-known as trash or garbage) consists of everyday items such as product packaging, grass clippings, furniture, clothing, bottles, food scraps, newspapers, appliances, and batteries. Not included are materials that also may be disposed in landfills but are not generally considered MSW, such as construction and demolition debris, municipal wastewater treatment sludge, and industrial wastes.

Composition of the MSW changes from country to country according to the industrial, economical, climatic, life essential and regional conditions. Generally the composition percentage of MSW can be given as; 0-11 % metal, 0-20 % wood, 20-95 % soil, 0-45 % paper, 0-5 % glass, 0-15 % rock and brick, 0-35 % rubber and plastics, 0-15 % miscellaneous.

Important physical and mechanical properties of MSW are porosity, unit weight, water content, permeability, compressibility and deformation, consolidation and shear strength parameters. These properties are important for;

- Static and dynamic stability of waste fills in slope stability, bearing capacity.
- Deformation and settlement predictions of waste fill for structures like shafts, tunnels, gas ventilation and waste water drainage systems.
- Structures on waste fills like waste management structures or after post closure; building, parks, or sport fields.

In static and dynamic stability analysis; shear strength parameters are used for calculations. Angle of shear strength ( $\phi$ ) and cohesion intercept (c) have to be

evaluated from; laboratory tests, in-situ tests or back calculations.

In this study refuse samples are modeled by using granular plastics, paper and felt scraps in the laboratory. A square shear box, mm in dimensions 100 x 100 x 45 mm is filled with 35 mm height plastic granular test material. Shear velocity is set to 0.12 mm/min. In specific gravity test alcohol is used instead of water, because most of the plastic granular material does not sink in water.

Plastic granular materials can be divided into four groups according to their shapes;

- White colored cubic plastic granular plastic (BK) Acrylonitrile butadiene styrene (ABS); (3x3x3 mm cubic)
- Yellow colored circular plate granular plastic (SM) High Density Polyethylene (HDPE); (plate thickness 1.5 mm and diameter 4-6 mm)
- Dark colored blue cylindrical granular plastic (LS) Polypropylene (PP); (diameter 4-5 mm and height 5-7 mm)
- Brown colored round granular plastic (KY) Polypropylene (PP); (diameter 4-6 mm sphere)

Paper scraps are remained refuses after binding books. They have 4 mm x 4 mm square or 3 mm x 8 mm rectangular cross sections. Felt scraps are cut with scissors 5 x5 mm square cross sections. Index properties of the materials are shown in Table 1.

**Table 1** Index properties of materials

Sample Type	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{kmaks}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{kmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_{maks}$	$e_{min}$
BK	10.7	7.1	6.2	0.72	0.51
SM	9.2	6.3	5.9	0.57	0.46
LS	8.8	5.9	5.3	0.65	0.48
KY	7.9	5.5	5.1	0.56	0.43
Paper Scraps	12.8	4.0	2.2	4.8	2.2
Alcohol	7.9	-	-	-	-



As tests results in shear box tests; angle of shear strength ranges between 29° and 50° and cohesion is 0 as shown in Table 2. These values are very close to the experiments performed in laboratory and in situ. Shear strength parameter of MSW can also change according to composition, decomposition, loads and compaction conditions. When the paper and felt scraps are mixed to plastic granular materials in different ratios, different angles of shear strength can be obtained from shear box tests.

**Table 2** Shear box test results

Sample Type	$\gamma_k$ (t/m <sup>3</sup> )	$\tau_{maks}$ (kN/m <sup>2</sup> )			c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
		$\sigma_n$ (kN/m <sup>2</sup> )				
		100	200	300		
BK	0.66	158	296	397	0	50
%80 BK %10 Paper %10 Felt	0.59	121	224	319	0	44
SM	0.61	65	139	222	0	33
%90 SM %10 Paper	0.61	65	130	205	0	31
%80 SM %20 Paper	0.59	66	130	194	0	30
%80 SM %10 Paper %10 Felt	0.57	61	130	199	0	30
%70 SM %20 Paper %10 Felt	0.56	62	131	192	0	30
LS	0.56	97	152	250	0	37
%80 LS %10 Paper %10 Felt	0.51	62	133	197	0	31
KY	0.53	78	158	212	0	34
%90 KY %10 Paper	0.53	73	130	197	0	31
%80 KY %20 Paper	0.52	68	125	187	0	30
%80 KY %10 Paper %10 Felt	0.52	68	118	180	0	29
%70 KY %20 Paper %10 Felt	0.52	67	134	187	0	29

## 1. GİRİŞ

Tarihteki tüm uygarlıklarda insanlar sağlıkları ve yaşadıkları çevrenin ne kadar önemli olduğunun farkındaydılar. Artan nüfus ve endüstriyelikleşmeyle birlikte çevrenin temiz tutulması insan sağlığı açısından ne kadar gerekli olduğunun bir kez daha farkına varıldı.

Tarihte ilk çöp yönetiminin; M.Ö. 5. yüzyılda Yunanistan'da oluşturulduğu biliniyor. Yunan halkı evinde biriktirdiği süprüntüyü ve çöpü şehir çöplüğüne dökmekteydi (Kelly 1973). İlk çöp toplama servisinin ise Roma İmparatorluğu'nda kurulduğu bilinmektedir (Kelly 1973). Roma İmparatorluğu'nda insanlar çöplerini caddelere bırakmaktaydılar. At arabasıyla gelen çöpçüler bu çöpleri toplayıp şehrin merkezindeki çöp alanına dökmekteydiler. Hayvan ve insan cesetlerinin ise kötü koku yüzünden şehrin dışına atmaktaydılar.

Roma İmparatorluğu'ndaki bu yarı organize çöp toplama sisteminden sonra Rönesans devrinin karanlığında herhangi bir organize çöp toplama işlemi olmamıştır. 1880 yılında Amerika'daki şehirlerin %43'ünde çöp toplama işlemi yapıldığı bilinmektedir. Bu oran 1915'te %50, 1930'larda ise %100'e çıkmıştır (Blumberg ve Gotlieb, 1989).

1950'lere kadar, evsel katı atıklar bilinçsizce katı atık toplama alanlarına dökülüyorlardı; herhangi bir planlama veya katı atık toplama alanlarını en iyi şekilde kullanmak için mühendislik adına hiçbir işlem uygulanmaksızın. 1950'li yıllarda, artık katı atık toplama alanlarının üstü ince bir toprak tabakasıyla kapatılmaya başlanmıştı. Yağışla beraber oluşan yüzeysel akış katı atığın içine sızmış ve yer altı suyunu kirletmiştir. Bunun farkına varılmasıyla beraber katı atık sahasının altında su geçirgenliği az olan bir tabaka oluşturulmuş ve böylece kirli katı atık suyunun yer altı suyuna karışması engellenmiştir.

Sonrasında, 1960'larda yapılan kanun değişiklikleri ve düzenlemelerle beraber varolan katı atık sahaslarını iyileştirme ve yeni oluşturulacak katı atık sahaslarında ise

katı atığın her özelliğinin izlenmesi öngörüldü. Buradan yola çıkarak katı atık sahaları için yeni tasarım yöntemleri geliştirildi. Analitik yöntemlerle yüzeysel akışın katı atık sahasına sızması, katı atık suyunun oluşumu, oluşan bu kirli suyun yeraltı suyunu ve çevreyi kirletmesi, katı atık sahasının statik ve sismik stabiliteleri gibi problemler daha yakından gözlemlenmeye başlandı.

Sonrasında çöpler artık hücre adı verilen odacıklara konulmuş ve üzerleri toprakla kapatılmaya başlanmıştır. Böylece kötü koku ve sağlığa zararlı etkiler azaltılmıştır.

Amerika ve Avrupa'da 1970'lerde nükleer güç üretimi endüstrisinin gelişmesiyle beraber oluşan kimyasal atıkların nerede ve nasıl depolanması gerektiği düşünülmeye başlanmıştır. Bununla beraber 1970'lerde Amerika'da Aşk Kanalı (Love Channel) yakınında bir kanala gömülen ve üstü kil tabakasıyla kapatılan kimyasal atıklar Aşk Kanalı'na sızmış ve bir süre sonra çevre sakinlerinde ciddi sağlık problemleri görülmeye başlanmıştır. Bu ve benzeri olaylar sonucunda 1980'lerde bilim adamları ve geoteknik mühendisleri çevrenin korunmasını da amaçlayarak kimyasal katı atık depolama alanlarını yeniden tasarlamaya başlamışlardır.

Türkiye'de ise; katı atıkların çevreye zarar verecek şekilde, doğrudan veya dolaylı bir biçimde alıcı ortama verilmesi, depolanması, taşınması, uzaklaştırılması ve benzeri faaliyetlerin kontrolü ve planlanması için Çevre Bakanlığı'nın 20814 sayılı Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği 14/03/1991 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik; meskun bölgelerde evlerden atılan evsel katı atıkların, park, bahçe ve yeşil alanlardan atılan bitki atıklarının, iri katı atıkların, zararlı atık olmamakla birlikte evsel katı atık özelliklerine sahip sanayi ve ticarethane katı atıklarının, evsel atık su arıtma tesisinden elde edilen (atılan) arıtma çamurlarının, hafriyat toprağı ve inşaat molozunun toplanması, taşınması, geri kazanılması, değerlendirilmesi, bertaraf edilmesi ve zararsız hale getirilmesine ilişkin esasları kapsar. Depo tesisleri, en yakın yerleşim bölgesine uzaklığı 1000 metreden az olan yerlerde inşa edilemez. Ancak, depo tesislerinin çevresinde tepe, yığın ve ağaçlandırma gibi tabii engeller varsa mahalli çevre kurullarının kararı ve gerektiğinde Bakanlığın uygun görüşü ile, bu mesafeden daha az olan yerlerde de ilgili belediye ve mahallin en büyük mülki amirliğince depo kurulmasına müsaade edilebilir. Evsel ve evsel katı atık özelliğindeki endüstriyel atıklar ile bunların atık su arıtma çamurlarını depolamak üzere inşa edilen depo tesislerinin asgari kapasiteleri, nüfusu 100,000'den küçük olan

yerleşim bölgelerinde 10 yıllık depolama ihtiyacını karşılayacak şekilde, nüfusu 100,000'den büyük olan yerlerde 500,000 m<sup>3</sup> olur. Düzenli depo tesisinden, depo tabanına sızan sızıntı sularının yeraltı sularına karışmasını önlemek için depo tabanı geçirimsiz hale getirilir. Depo tabanında oluşturulan bir drenaj sistemi ile sızıntı suları toplanır. Bu amaçla; depo tabanı, tabii yeraltı suyunun maksimum seviyesinden en az 1 metre yüksekte olur. Depo tabanına; öncelikle sıkıştırılmış, kalınlığı en az 0.60 m olan kil serilir. Bu kil tabakasının geçirimsizlik katsayısı (permeabilite katsayısı) 10<sup>-8</sup> m/sn'den büyük olamaz. Az çatlaklı kaya zeminlerde ise bu değer 10<sup>-7</sup> m/sn olarak alınır. Bu tabakanın üzerine kalınlığı 2 mm. olan yüksek yoğunluklu polietilen folye (HDPE) serilir. Serilecek folyenin yoğunluğu 941-965 kg/m<sup>3</sup> arasında olmak zorundadır. Hidrolik ve statik olarak hesaplanması gereken drenaj borularının çapı minimum 100 mm. ve minimum eğimi %1 olur. Dren boruları, münferit borular şeklinde, yatayda ve düşeyde kıvrım yapmadan doğrusal olarak depo sahası dışına çıkar. Depo kütlesi üzerine düşen yağmurun kısa sürede sahayı terk edebilmesi için en üst toprak tabakasının eğiminin %3'ten büyük olması gerekir.

Katı atık bertaraf yöntemleri;

- Kompostlaştırma
- Kontrollü yakma
- Azaltma, yeniden kullanma ve geri dönüşüm
- Katı atık sahasında depolama

Katı atıklar mümkünse; azaltılmalı, yeniden kullanılmalı veya yeniden kullanılabilir hale dönüştürülmelidir.

## 1.1 Amaç

Bu çalışmada, katı atıkların mukavemet parametrelerinin belirlenmesinde araziden alınan katı atık numuneleri kullanmak yerine, laboratuvarında oluşturulan suni plastik granüler malzemeler kullanılmıştır. Sonrasında bu malzemeye belli oranlarda kağıt ve keçe kırıntısı eklenerek oluşturulan karışımlarla deneyler yapılmış ve kayma mukavemet parametrelerinin evsel katı atığa yakınlığı gözlenecektir.

## **2. KATI ATIK TÜRLERİ VE ÜLKELERE GÖRE KOMPOZİSYONU**

Ekonomistler katı atığı; kullanılmıyorsa atması daha ucuz olan materyal olarak tanımlamışlardır. Mühendislik anlamı ise; her türlü üretim ve tüketim faaliyeti sonucu oluşan, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleriyle karıştıkları alıcı ortamda doğal bileşim ve özelliklerinin değişmesine yol açan, alıcı ortama doğrudan veya dolaylı zarar verebilen katı haldeki atıklardır (TS 11708, Nisan 1995).

### **2.1 Katı Atıkların Kaynağı ve Türleri**

Katı atıklar oluşturuldukları ortama ve içeriklerine göre 5 ana başlık altında incelenebilir:

- Evsel Katı Atıklar
- Mineral Atıklar
- Endüstriyel Atıklar
- Deniz Dibiindeki Tortular
- Zararlı ve Tehlikeli Atıklar

Diğer bir kaynağa göre ise katı atıklar; evsel katı atıklar, ticari atıklar, kurumsal atıklar inşaat atıkları, belediye hizmetleri sonucu oluşan atıklar, arıtma işlemleri sonucu oluşan atıklar, endüstriyel atıklar ve tarımsal atıklar olarak da gruplandırılabilir (Tablo 2.1).

**Tablo 2.1:** Bir toplulukta oluşan katı atıklar (Tchobanoglous, 1993)

Kaynak	Katı Atıkların oluşturulduğu mekanlar	Katı Atık çeşitler
Evsel Atıklar	Tek veya aile şeklinde yaşanan apartman veya villa tarzı yapılar	Yemek, kağıt, karton, plastik, tekstil, deri, bahçe atıkları, ahşap, cam, alüminyum, kutu, lastik, pil
Ticari Atıklar	Depo, restoran, market, ofis, otel, ozalitçi, araç tamiri yapan servisler	Kağıt, karton, plastik, ahşap, yemek artığı, metal
Kurumsal Atıklar	Okul, hastane, hapisane, hükümete ait binalar, işyerleri	Kağıt, karton, plastik, ahşap, yemek artığı, metal
İnşaat Atıklar	Yeni inşaat sahaları, yıkılan veya tamir edilen bina, yol köprü, kaldırım	Ahşap, demir, beton
Belediye Hizmetleri	Cadde temizleme, peyzaj, park ve bahçeler	Çöp, süprüntü, ağaç parçacıkları, park ve bahçe çöpleri
Arıtma İşlemleri	Su, çöp suyu, endüstriyel işlemler arıtma tesisleri	Tortu, çamur
Endüstriyel Atıklar	Fabrika, İmalathane, rafineri, enerji santralleri	Endüstriyel ürün atıklar, yemek atıkları, küller
Tarımsal Atıklar	Bağ-bahçe, tarla, bostan	Bozulmuş yemek artıkları, tarımsal katı atıklar, tehlikeli atıklar

### 2.1.1 Evsel Katı Atıklar

İnsanların ticari yollardan satın aldıkları mallardan arta kalan veya bu malların kullanılmayan kısmıdır.

Evsel katı atıkların içeriği ticari ve endüstriyel gelişmişliğe göre değişmektedir. Genel olarak yemek artığı, bahçe çöpleri, kağıt artıkları, plastik, lastik, tekstil, ahşap, kül ve topraktan oluşmaktadır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2’de çeşitli bilim adamları ve kuruluşların yaptıkları araştırmalara göre katı atık kompozisyonları verilmiştir. (1) Wigh ve Brunner (1981), (2) Jones ve Malone

(1982), (3) Walsh ve Kinman (1979), (4) Fungaroli ve Steiner (1979a), (5) Fungaroli ve Steiner (1979b), (6), Kemper ve Smith (1981), (7), Emcon Associates, (8), Cameron (1975), ve son satırda da bu değerlerin ortalamaları alınmıştır.

**Tablo 2.2:** Evsel katı atıkların bileşimi (Wigh ve diğ., 1981)

	Kağıt (%)	Yemek ve bahçe artıkları (%)	Plastik, Lastik ve Deri (%)	Cam ve Seramik (%)	Tekstil (%)	Kül ve Taş (%)	Meta l (%)	Ahşap (%)	Diğer (%)
1	41.8	20.6	6.9	7.8	4.1	6.1	8.3	1.8	5.6
2	44.8	1.4	9.0	7.6	3.1	20.2	10.8	0.5	2.7
3	42.6	14.3	8.7	12.2	-	6.1	12.2	2.6	1.3
4	55.0	15.0	3.0	10.0	3.0	2.0	10.0	2.0	-
5	53.5	13.0	1.5	7.7	0.8	1.5	6.7	2.3	9.8
6	48.6	12.8	5.5	11.9	5.3	5.6	7.3	2.3	0.7
7	35.5	19.6	4.2	9.1	1.1	21.2	8.0	1.3	-
8	47.6	21.6	5.4	7.0	3.6	1.4	8.7	7.7	-
Ort.	46.2	14.8	5.5	9.2	3.0	8.0	9.0	2.2	5.2

Bunlara ilaveten Ham (1979) yaptığı araştırmada %42 kağıt,%14 bahçe çöpleri (ahşap, çimen, yeşillik, çalılık), %12 yemek artıkları, %24 metal, cam, seramik ve kül, %8 plastik, deri ve lastikten oluştuğunu görmüştür.

### 2.1.2 Mineral Atıklar

Mineral atıklar; metaller, yakıtlar, kimyasallar, katalizörler ve madenler çıkartılırken ortaya çıkan atıklardır. Bu atıklar genelde maden ocağı ve bu malzemelerin çıkartıldığı yerlerin yakınında depolanır. Bu yüzden de toprak, su ve havanın kirlenmesine neden olurlar.

### 2.1.3 Endüstriyel Atıklar

Endüstriyel atıklar; kimyasal imalatlar, yiyecek ve giyecek imalatları, petrolün arıtılması, plastik ve reçine imalatları, kağıt, kereste ve ilaç imalatlarında ortaya çıkan atıklardır. Endüstriyel atıkların bir kısmının sağlığa zararlı olduğu bilinmektedir.

#### 2.1.4 Deniz Dibi Tortuları

Okyanus veya deniz dibinde; kaya, çakıl, kum, silt ve kilin birikmesiyle oluşan doğal sedimentlerdir.

#### 2.1.5 Zararlı ve Tehlikeli Atıklar

Endüstriyel atıkların tehlikeli olanları bu gruba girer. Bu atıklar sıvı inorganik, sıvı organik, organik ve de zararlı topraklar şeklinde gruplandırılır. Köken olarak; pil, kimyasal işlemler, elektrik ve elektronik aletler, patlayıcılar, deri işlemleri, petrol ve kömür işlemleri, tekstil ve kağıt işlemleri gibi üretimler esnasında ortaya çıkarlar.

### 2.2 Katı Atıkların Ükelere Göre Kompozisyonu

Katı atıkların kompozisyonu; iklim, sosyal çevre, insanların gelir düzeyi, şehirleşme ve endüstriyellemeye göre ülkeden ülkeye farklılıklar gösterir.

Katı atıkların kompozisyonu; katı atık sahalarından numune alarak ya da madde akışı denilen bir ülkedeki üretilen veya ithal edilen mallar arasından kullanıldıktan sonra evsel katı atık niteliği taşıyacak olanlar tespit edilerek belirlenebilir. Bu iki yöntemin birbirine göre kıyaslanmasını Tablo 2.3'te görebilirsiniz.

**Tablo 2.3:** Evsel katı atıkların kompozisyonunun belirlenmesi (Kreith, 1994)

Madde Akışı Yöntemi	Numune Alma Yöntemi
Evsel ve ticari bazı endüstriyel katı atıkları içeriğinin belirlenmesinde kullanılır.	Katı atık sahalarındaki atıkların içeriğinin belirlenmesinde kullanılır.
Bütün ülkedeki katı atığın içeriğini gösterir.	Belirli bir alandaki katı atığın içeriğini gösterir.
Uzun bir zaman periyodu için değerler verir.	Sadece numune alındığı zamana ait bilgiler verir.
Katı atığın oluşumu için yıllık değerler verir.	Yeterli numune alındığı takdirde mevsimsel değerler verir.
Bölgesel değişim göz önünde bulundurulmaz.	Bölgesel değişimler göz önünde bulundurulmuş olur.
İstatistikî bilgiler toplamak daha ucuz ve zahmetsizdir.	Çok sayıda ve farklı yerlerden numune almak pahalı ve zahmetlidir.

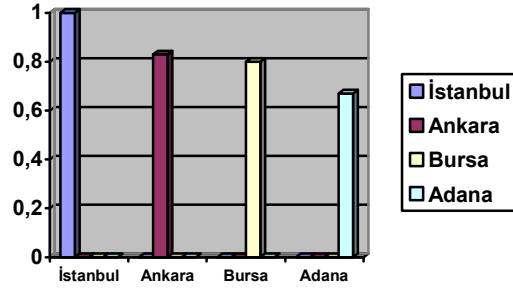


Ülkelerin gelir düzeylerine göre insanların oluşturdukları katı atıklar;

- Gelir durumu düşük olan ülkelerde ; 0.4 ~ 0.6 kg/kişi/gün
- Gelir durumu orta olan ülkelerde ; 0.5 ~ 0.9 kg/kişi/gün
- Gelir durumu yüksek olan ülkelerde ; 0.7 ~ 1.8 kg/kişi/gün

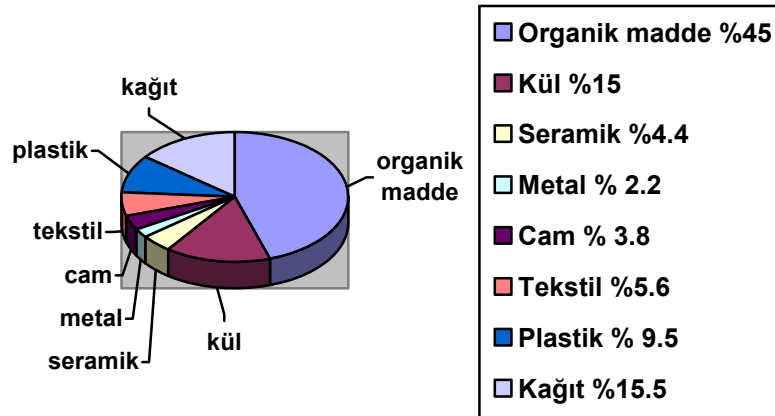
olarak gözlemlenmiştir.

Türkiye’de bu sınıflandırmaya göre orta gelir düzeyli ülkeler arasındadır. Kişi başına düşen katı atık miktarı Şekil 2.1’de görüldüğü üzere 0.7 ~ 0.9 kg/kişi/gün olarak verilmiştir.



**Şekil 2.1:** Büyük şehirlerdeki kişi başına düşen katı atık miktarları (Gören, 2006)

İstanbul’daki katı atıkların kompozisyonu ise Şekil 2.2’de verilmiştir. Buna göre İstanbul’daki katı atıklar en yüksek %45’lik bir oranla organik madde, en düşük %2.2’lik oranla metal içermektedir.



**Şekil 2.2:** İstanbul’daki katı atıkların kompozisyonu (Gören, 2006)

Gelir düzeylerine göre evsel katı atıkların bileşimi Tablo 2.4'te verilmiştir. Tabloya göre gelir seviyesi arttıkça organik maddelerde azalma, kağıt ve metallerde ise artma görülmektedir.

**Tablo 2.4:** Ülkelerin gelir düzeylerine göre katı atıkların kompozisyonu  
(Gören, 2006)

Katı Atık Bileşeni	Yüksek Gelir Düzeyli Ülkelerde (%)	Orta Gelir Düzeyli Ülkelerde (%)	Düşük Gelir Düzeyli Ülkelerde (%)
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 ve kemik	4	3	3
Diğer	11	17	23

Kanada, Finlandiya, Japonya, İsveç ve Amerika gibi gelişmiş ülkelere baktığımızda kağıt atıkların %35 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir (Tablo 2.5). Bu oran insanların yoğun olarak ofis ortamında çalıştıklarını ve daha fazla kitap, gazete, dergi gibi yayınları okuduklarını göstermektedir.

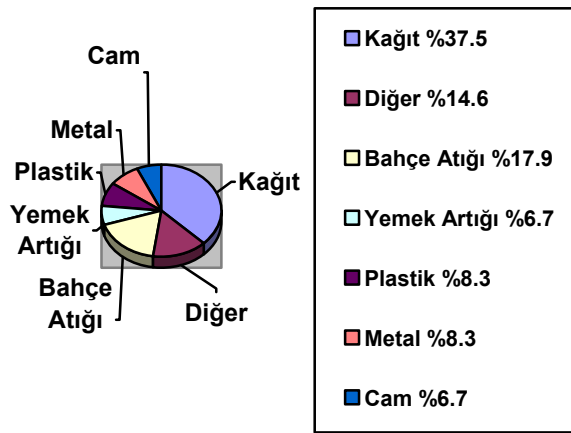
**Tablo 2.5:** Farklı ülkelerdeki katı atıkların yüzde oranları (Gören, 2006)

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	31~37	10~16	14~16	14~16	5.5~6.4	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

EPA'nın verilerine göre 1960-1990 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde; kağıt, plastik ve ahşap atıklarda bir artma gözlemlenirken; metal atıklar bahçe atıkları ve yemek artıklarında da belirgin bir azalma gözlemlenmiştir (Tablo 2.6).

**Tablo 2.6:** EPA'nın verilerine göre Amerika'daki evsel katı atıkların 1960-1990 yılları arası içerikleri (%)

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	8.0	6.7
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 Atığı	22.8	20.9	19.0	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



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

### 2.3 Katı Atıkların İçeriği

Katı atıklar genellikle, kağıt atıklar, lastik ve deriler, tekstil, ahşap, yemek artıkları, bahçe atıkları, çeşitli inorganik atıklar ve bu gruplara girmeyen diğer atıklardan oluşmaktadırlar.

- Kağıt Atıklar; kağıt atıklar, katı atıkların 1/3 oranına yakın bir kısmını oluşturmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılında katı atıklar %37.5 oranında kağıt atık içermektedir (Şekil 2.3). Kağıt atıklar; gazeteler, dergiler, kataloglar, ofislerde kullanılan kağıtlar, raporlar, broşürler ...vb. şeklinde sıralanabilir.
- Lastik ve Deriler; lastik, ev eşyası, mobilya, perde, elbise ve ayakkabılar bu gruba girer. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %2.4 oranında lastik ve deri içermektedir (Şekil 2.3).
- Tekstil; evde kullanılan çarşaf, yorgan, havlu ve giyim eşyaları bu gruba girer. Ayrıca lastik, mobilya ve ayakkabılarda da tekstil içeriği bulunmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %3 oranında tekstil içermektedir (Şekil 2.3).
- Ahşap; mobilya, dolap, kapı, elektronik eşyaların kutuları ahşap katı atıkları oluşturmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %6 oranında ahşap içermektedir (Şekil 2.3).
- Yemek Artıkları; lokanta, okul, hastane ve ev gibi binalarda yenilmeyen yemekler veya yemek hazırlanırken çöpe atılan malzemelerden oluşmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %6.7 oranında yemek artıkları içermektedir (Şekil 2.3).
- Bahçe Atıkları; ot, çimen, yaprak, budanan veya kesilen ağaç ve çalı parçaları bahçe atıklarını oluşturmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %18 oranında bahçe atığı içermektedir (Şekil 2.3).

- Çeşitli İnorganik Atıklar; toprak, taş ve beton gibi maddeler çeşitli inorganik atıkları oluşturmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %15 oranında inorganik atıklar içermektedir (Şekil 2.3).
- Diğer Atıklar; bu gruplara dahil olmayan atıklardan oluşmaktadır. Amerika Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından verilen verilere göre 1990 yılındaki katı atıklar %1.6 oranında diğer atıklar içermektedir (Şekil 2.3).

## **2.4 Katı Atık İçeriğinin Bölgesel, İklimsel ve Çağa Göre Değişimi**

Katı atıklar bölgesel, iklimsel ve çağın getirmiş olduğu şartlara göre değişik bileşimler alabilirler.

### **2.4.1 Katı Atık İçeriğinin Bölgesel Değişimi**

Bağ ve bahçe budanması; ılık ve nemli bölgelerde daha çok olur. Köy ve kasaba gibi küçük yerlerde budanan ağaçlar katı atık sahalarına götürülmezken, kentlerde ise mutlaka katı atık sahalarında depolanır.

Yemek artıkları; kentsel alanlarda yemek artıkları katı atık bileşiminden çıkartılıp kompostlaştırma işlemi uygulanabilir. Fakat kırsal kesimlerde böyle bir işlem uygulanmaz.

Gazete kağıtları; kentsel alanlarda yaşayan insanlar daha fazla gazete okurlar ve kırsal kesimdeki insanlara göre daha fazla kağıt atık oluştururlar.

### **2.4.2 Katı Atık İçeriğinin İklimsel Değişimi**

Bahçe atıkları genellikle ilkbahar ve sonbaharda yapılan genel bahçe temizliği sırasında yüksek değerler alırken, kış aylarında ise hemen hemen hiç bahçe atığı oluşmamaktadır.

### **2.4.3 Katı Atık İçeriğinin Çağa ve Zamana Göre Değişimi**

Artan nüfus; artan nüfusla birlikte daha fazla insan daha fazla katı atık ortaya çıkartacaktır.

Yükselen refah seviyesi; yükselen refah seviyesiyle insanlar daha fazla ürün satın almaktadırlar. Ayrıca aldıkları ürünleri kısa süreli kullanıp çöpe atmaktadırlar. Böylece kişi başına düşen katı atık miktarı artmaktadır.

Hayat tarzı; yalnız yaşayan insanlar veya yurtlarda kalan öğrenciler genellikle kolay hazırlanan yiyeceklerle beslenmektedirler. Bu yiyecekleri dışarıdan alıp tükettikleri zaman ortaya çıkan yiyecek paketi atıkları, normal bir aileninkinden çok daha fazladır.

Çalışma alanındaki değişiklikler; son yıllarda ofis ortamında çalışan insan sayısındaki artış ve teknolojiye yönelik değişiklikler, ofis müdürlerinin yeni bilgisayarlar, fotokopi makineleri, faks cihazları gibi yeni makineler almaya sürüklemiştir. Bunun sonucunda kağıt atıklarda artış yaşanmıştır.

Ürünlerdeki farklılaşma; teknolojinin gelişmesiyle televizyon, buzdolabı, çamaşır makinesi gibi ev aletlerinin boyutlarında küçülme veya ağırlıklarında azalmalar olmuştur. Böylelikle paketlemede daha az malzeme kullanılmaya başlanmış ve bu aletlerin paketlerinden oluşan katı atıklarda azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca günümüzde alüminyum kutular çelik kutularla, plastik kutular da cam kutularla yer değiştirmişlerdir.

## **2.5 Katı Atık Yönetimi**

Katı Atık Yönetimi; katı atık toplama, azaltma, geri dönüşüm, yeniden kullanılabilir hale getirme, sahada depolama, depolama yapılarının kontrolü gibi işlemleri belli bir plan ve program çerçevesinde yürütmektir. Bunun için mühendisler, ekonomistler, şehir ve bölge planlama uzmanları ve sosyologlar ortaklaşa çalışmalar yürütmektedirler.

### **2.5.1 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri**

Katı atıklar; kompostlaştırma, kontrollü yakma, azaltma, yeniden kullanma ve dönüştürme, katı atık sahasında depolama yoluyla bertaraf edilebilirler.

Kompostlaştırma; organik maddelerin kontrollü bir şekilde biyolojik ayrışmaya maruz bırakılmasıdır. Katı atığın içerisindeki plastik, deri ve lastik gibi malzemeler ayrılarak; organik madde olan yemek artıkları ve bahçe çöplerinin kalması sağlanır. Mikroorganizmalar yeterli oksijenin bulunduğu koşullarda ayrışma tepkimelerini başlatırlar. Nem oranı, sıcaklık ve azot ayarlaması tepkimelerde katalizör görevi görür. Sonuçta humus adı verilen bağ ve bahçelerde gübre yerine kullanılan bir malzeme ortaya çıkar.

Kontrollü Yakma; katı atıkların 900 ~ 1200 °C arasında kontrollü bir şekilde yakılmasıyla katı atık hacminde %90 azalma veya katı atık ağırlığında %75 azalma olmaktadır. Ayrıca yeterli ekipman sağlanırsa çıkan ısı ile su, buhara dönüştürülür. Isıtma işlemi ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir.

Azaltma, yeniden kullanma; kişi başına düşen katı atığın azaltılması, daha az mal satın almakla ve daha uzun süre kullanmakla olur. Ayrıca bozulan malları tamir edip yeniden kullanmak, kullanmadığımız eşyaları çöpe atmak yerine ihtiyaç sahiplerine vermekle katı atıkların azaltılmasına yardımcı olmuş oluruz.

Geri dönüşüm işlemi ise, katı atığın içindeki; cam, kağıt, plastik ve metal gibi atıkların ayıklanıp yeni bir ürün oluşturulması için fabrikalara geri gönderilmesidir.

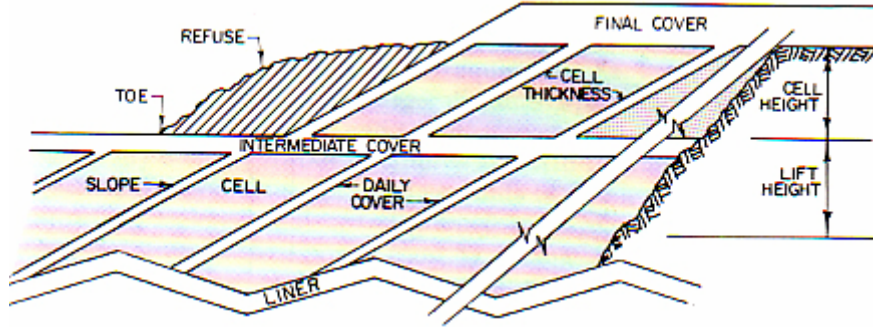
Katı atık depolama sahası uygulamaları iki şekilde olur;

- Üstü Açık Katı Atık Sahası; ayrışma sırasında oluşan mikrobiyolojik işlemler nedeniyle gaz ve çöp suyu ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan çöp suyu yüzeysel akışa karışır ve şehrin su kaynaklarını kirletebilir. Ayrıca katı atık sahası yakınında yaşayan sinek, böcek, kedi, köpek ve kuş gibi hayvanlar, katı atık sahalarından aldıkları mikropları yakınlardaki şehrin hayvanlarına ve insanlarına bulaştırabilirler. Oluşan metan gazının patlama ihtimali de üstü açık katı atık sahalarının diğer bir dezavantajıdır. Bu nedenlerden dolayı üstü açık katı atık sahaları; çevre sağlığı ve insan sağlığı açısından tehlike oluşturmaktadır.
- Üstü Kapalı Katı Atık Sahası; katı atık, sahada tabaka tabaka serilir ve sıkıştırılır. Her günün sonunda ise depolanan katı atığın üzeri ince bir toprak tabakasıyla (0.15 m) kapatılarak katı atığın çevreyle bağı kesilir. Böylece çevre kirlenmesi en aza indirilmiş ve insan sağlığı da korunmuş olur.



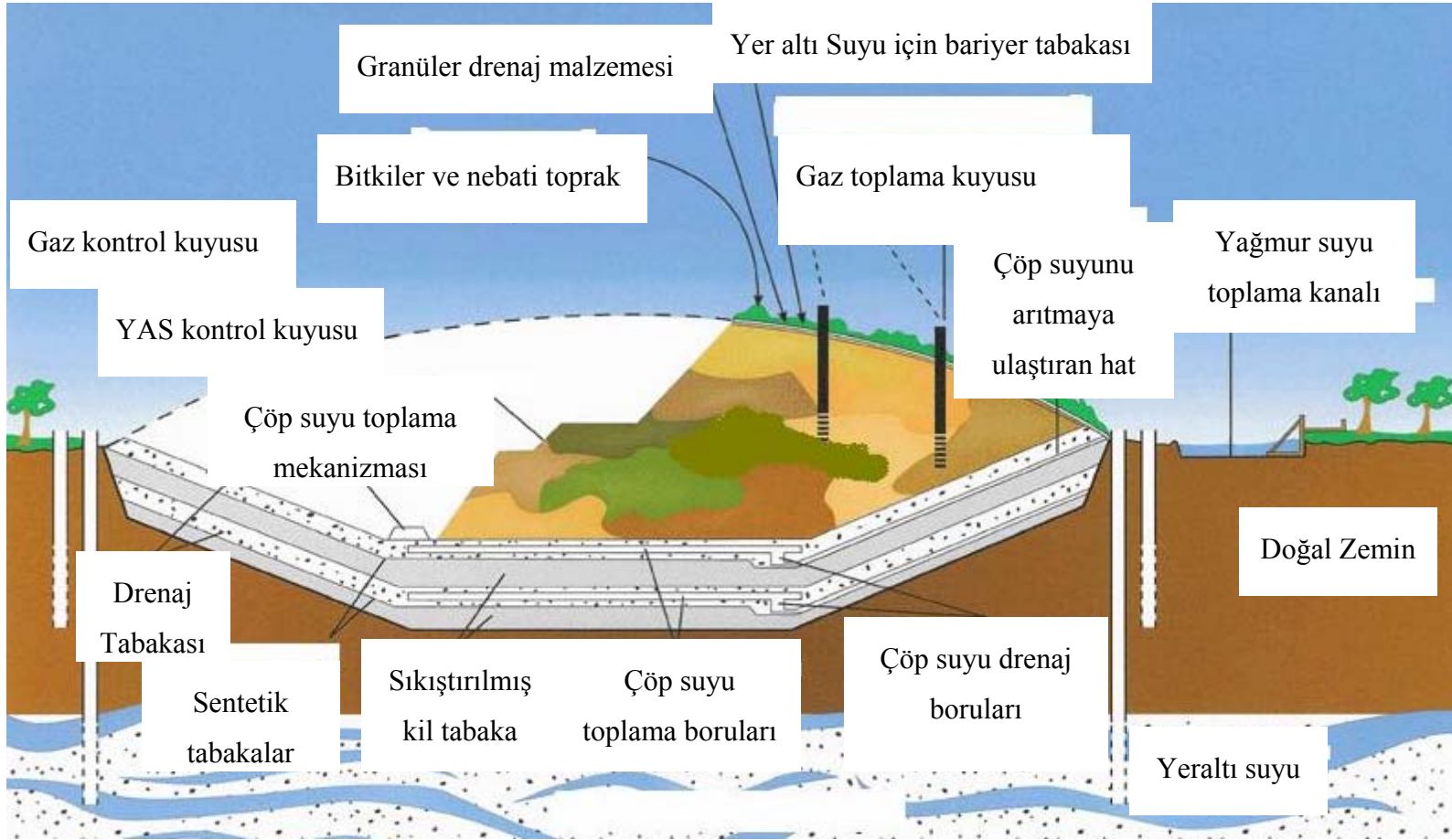
Katı atık depolanmasında dikkat edilecek noktalar şunlardır:

- Katı atıklar, atık sahalarında hücreler şeklinde depolanmalıdır (şekil 2.4). Hücre boyutları; uzunluğu en fazla 50 m, yüksekliği ortalama 2.5 m (en çok 10 m), ortalama hücre genişliği 4.6 m seçilmelidir fakat 2.4 ~ 9.1 m arası da seçilebilir, hücre kenar eğimi 3:1 oranında olmalıdır, böylece katı atık daha kolay sıkıştırılır.
- Katı atık 0.50 - 0.60 m kalınlığında serilip lastik tekerlekli veya çelik bandajlı silindirle 2 ila 5 geçiş şeklinde sıkıştırılmalıdır.
- Her günün sonunda hücreler 0.15 ~ 0.30 m'lik bir toprak tabakasıyla örtülmelidir ki çevreye kötü kokuların yayılması önlensin.
- Son kaplama tabakası 0.30 m'lik sıkıştırılmış en az 2 tabakadan (toplamda 0.60 m) oluşmalıdır. Yüzeysel akışın erozyona neden olmaması için bu tabakanın eğimi en az %2, en fazla %5 civarında olmalıdır.



**Şekil 2.4:** Katı atıkların hücre şeklinde depolanması

Katı atıklar depolanırken ayrışmadan dolayı ortaya çıkacak olan gazlar ve katı atıktan sızan sular kontrol altında tutulmalıdır (Şekil 2.5). Katı atıkların ayrışması 15 ~ 25 yıl arasında tamamlanır. Sıcaklık ve nem oranı bu sürecin belirlenmesinde önemli rol oynar. Ayrışma sonucunda metan, karbondioksit, nitrojen, hidrojen ve hidrojen sülfat gazları oluşur. Gaz çıkışı 2 yıl içerisinde en yüksek değerine ulaşmaktadır.



**Şekil 2.5:** Katı atık sahası en kesiti

### **3. KATI ATIKLARIN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ**

#### **3.1 Katı Atıkların Fiziksel ve İndeks Özellikleri**

Evsel katı atıkların mühendislik özellikleri; porozite, su muhtevası, birim hacim ağırlık, alan kapasitesi, mukavemet ve sıkışabilirlik ve permeabilitedir.

##### **3.1.1 Porozite**

Porozite %100 doygunlukta; dane içerisindeki su hacminin, toplam dane hacmine oranıdır. Normal sıkıştırılmış bir zeminde bu oran 0.40 iken, evsel katı atıklarda ise 0.67 civarına kadar çıkabilmektedir. Daha yaygın olarak ise katı atıkların porozitesi %30 ~ 60 arasında alınabilir (Tan , 2001).

##### **3.1.2 Su Muhtevası**

Dane içerisinde bulunan suyun ağırlığının, dane ağırlığına oranıdır. Evsel katı atıklarda bu oran; hava koşulları, çöp bileşim oranları ve mevsimsel olarak %15 ~ %40 aralığında değişmektedir.

Tan (2001) yaptığı çalışmada katı atıkların su muhtevasını %5 ~ 20 arasında olduğunu görmüştür. Su muhtevası OII çöp sahasında %15~42, Tri-Cities Katı Atık Sahasında %12~25, Azusa Katı Atık Sahasında %8~50, Cherry Adası Katı Atık Sahasında %20~50 arası değişen değerlerde hesaplanmıştır.

Su muhtevası deneyinde katı atıkta herhangi bir ayrışma olmaması için numuneler; 105 °C yerine 55 °C sıcaklıktaki etüvde saklanmalıdır.

##### **3.1.3 Permeabilite**

Katı atığın permeabilitesinin hesaplanmasında laboratuvar deneyleri yerine arazi deneyleri tercih edilir. Arazide pompalama deneyleri sonucunda daha doğru değerlere ulaşmaktadır.

Fang (1983) balya şeklinde hazırlanmış ve  $\gamma$  birim hacim ağırlığı  $11 \text{ kN/m}^3$  olan katı atık numunelerinde laboratuarda yaptığı deneyler sonucunda permeabilitenin  $7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  olduğu görülmüştür.

Fungarali ve Steiner (1979) katı atıklarda permeabiliteyi  $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$  olarak hesaplamışlardır.

Oweis (1990) arazide yaptığı deneylerde çöpün permeabilitesinin  $10^{-5} \text{ m/s}$  olduğunu görmüştür.

Landva ve Clark (1990) yaptıkları arazi deneylerinde  $4 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  arası değerler ölçmüşlerdir.

Yapılan çalışmalarda özetlemek gerekirse;  $\gamma$  birim hacim ağırlığı  $7 \sim 8 \text{ kN/m}^3$  lük numunelerde ortalama  $k$  permeabilite  $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  önerilmektedir. Genel olarak evsel katı atıkların permeabilitesi  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  olarak almak hesaplar için uygun sonuçlar vermektedir.

### **3.1.4 Birim Hacim Ağırlık**

Evsel katı atıkların birim hacim ağırlıkları; içerikleri, ayrışma dereceleri, yerleştirme sırasındaki tabaka kalınlığı, sıkıştırılma miktarları, katı atık sahasının toplam derinliği, numunenin alındığı derinlik vb. durumlara göre değişken değerler almaktadır. Katı atığın birim hacim ağırlıkları bu değişkenlere bağlı olarak Tablo 3.1'de verilmiştir.

Evsel katı atıkların birim hacim ağırlığının bilinmesi, çöp sahası analizleri; statik ve dinamik şev stabilitesi hesapları, geomembranlara gelen zımbalama kuvvetleri, drenaj borularına gelen kuvvetler ve çatlatma etkileri ve çöp sahasının belli bir süre sonra oturmasıyla birlikte saha depolama kapasitesi tahminleri açısından önemlidir.

Birim hacim ağırlığı; doğrudan gerilmelere etkimektedir. Bu gerilmeler katı atığın alt kısmındaki kil-geosentetik tabakaya doğrudan etkimektedir. Ayrıca birim hacim ağırlığı sismik analizler için de önemlidir. Kayma dalgası hızı ve kayma modülünün belirlenmesinde etkilidir.

**Tablo 3.1:** Katı atıkların sıkıştırılma ve yerleştirilme şekline bağlı olarak birim hacim ağırlıkları

Kaynak	Katı Atık Yerleştirme Şekli	Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
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

Tan (2001) yaptığı çalışmada katı atıkların birim hacim ağırlığını 6 ~ 14 kN/m<sup>3</sup> arasında önermiştir.

Katı atıkların balya şeklinde istiflenmesinde; sıkışması zor olan büyük parçacıklar çıkartılır bu yüzden daha iyi sıkışır ve birim hacim ağırlığının 11 kN/m<sup>3</sup> değerine kadar çıktığı gözlemlenebilir (Tchbanoglous, 1977).

Katı atığın su altındaki birim hacim ağırlığı 10.3 ~ 11 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Eski kabul edilen katı atıklar yüksekliklerinin %30 ~ 40'ı kadar oturma yaptıkları için, birim hacim ağırlıkları %67 oranında artmış olur.

Yeniden kullanma programı çerçevesinde; kağıt, cam ve plastik gibi maddeler katı atıktan çıkartılır ve yerine yemek artıkları konulursa birim hacim ağırlığının %30 oranında arttığı görülmektedir.

Kavazanjian'ın 1995'te yaptığı araştırmalarda katı atığın birim hacim ağırlığını yüzeyde 6 kN/m<sup>3</sup>, 45 m derinlikte 13 kN/m<sup>3</sup> olarak hesaplamıştır.

Matsovic ve Kavazanjian'ın 1999'da yaptıkları deneylerde San Francisco Tri-Cities Katı Atık Sahasında yüzeyde 10 kN/m<sup>3</sup>, 50 m derinlikte ise 15 kN/m<sup>3</sup> hesaplanmışlardır.

GeoSyntec (2003) Cherry Adası Katı Atık Sahasında yüzeyde 8 kN/m<sup>3</sup>, 50 m derinlikte ise 12 kN/m<sup>3</sup> olarak birim hacim ağırlığını hesaplamışlardır.

Owesis ve Khera (1998) New Jersey Katı Atık Sahasında yeni ve eski kabul edilen katı atıklarda ise yüzeyde 7 kN/m<sup>3</sup> ve 10 kN/m<sup>3</sup> olarak birim hacim ağırlığını ölçmüşlerdir.

Zekkos (2005) yaptığı değişik oranlardaki karıştırdığı atıklarda laboratuarda 0 ile 80 kPa'lık çevre basıncı altında 8 kN/m<sup>3</sup> ile 13 kN/m<sup>3</sup> arası birim hacim ağırlığı değişen katı atık numuneleri elde etmiştir. Zamana bağlı olarak;

$$\frac{\gamma_t(t)}{\gamma_t(t=1 \text{ gun})} = 0.0173 \log(t) + 1.006 \quad (3.1)$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada  $\gamma_t(t)$  istenen zamandaki birim hacim ağırlık,  $\gamma_t(t=1)$  ise ilk günkü birim hacim ağırlıktır.

Bu ifadeye göre 50 yıllık çöplerde başlangıca göre %10 dan az bir birim hacim ağırlığında artış olmaktadır.

Zekkos (2005) birim hacim ağırlığı derinliğe bağlı olarak;

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{a + b.z} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada  $\gamma_i$  yüzeydeki birim hacim ağırlık, z derinlik a ve b tablo 3.2'den seçilen derinlik parametrelerdir.

**Tablo 3.2:** Katı atıkların sıkıştırılma derecelerine göre a ve b parametreleri  
(Zekkos ve diğ., 2005)

Sıkıştırılma Derecesi	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	b (m <sup>3</sup> /kN)	a (m <sup>4</sup> /kN)
Yetersiz	5	0.1	2
Orta	10	0.2	3
İyi	15.5	0.9	6

Sonuç olarak birim hacim ağırlığının derinlik, kompaksiyon, çöp içeriği ve çevresel basınca göre değiştiği bilinmektedir. Yukarıda verilen formül 60 m derinliğe kadar birim hacim ağırlığı için uygun değerler vermektedir.

### 3.2 Katı Atıkların Sıkışma ve Deformasyon Özellikleri

Katı atıklar kendi ağırlıklarının altında yüksekliklerinin ortalama %5 ~ 30 arası oturma yaparlar. Bu oran başlangıçtaki sıkıştırılmalarına, bileşimlerine ve çevresel etkilere bağlıdır. Birincil oturma 1 ay ile 5 yıl arası, ayrışmaya ve yorulmaya bağlı ikincil oturma ise 50 yıl içerisinde gerçekleşir.

Katı atık depolama sahalarındaki oturmalar şu nedenlerden dolayı önemlidir;

- Katı atık sahası kapasitesi tahmini ve çöpün en yoğun şekilde depolanabilmesi,
- Katı atık sahası kapatıldıktan sonra ileride üzerine yapılacak olan yapıların (park, spor kompleksleri, yürüyüş yolu...) güvenliğinin sağlanması,
- Katı atık sahasının içerisindeki çöp suyu toplama sistemi ve diğer katı sahası işletim binalarının güvenliğinin sağlanması.

Çöpün sıkışabilirliği veya oturması;

- Fiziksel sıkışma; katı atığın yapısının mekanik olarak bükülmesi, çatlaması, katı atık bileşenlerinin kedi içlerinde yer değiştirmeleri vb.
- Büyük parçacıklar arasındaki boşluklara doğru küçük parçacıkların ilerlemesi
- Viskoz davranış ve konsolidasyon oturmaları

- Organik maddelerin ayrışması (çöpün bileşenlerine ayrışması)
- Korozyon ve oksitlenme gibi inorganik bileşenlerin tepkimeleri

Nedenlerinden dolayı meydana gelir.

Katı atıkların sıkışma mekanizmalarında şekil 3.1’de de görüldüğü gibi 5 evre vardır;

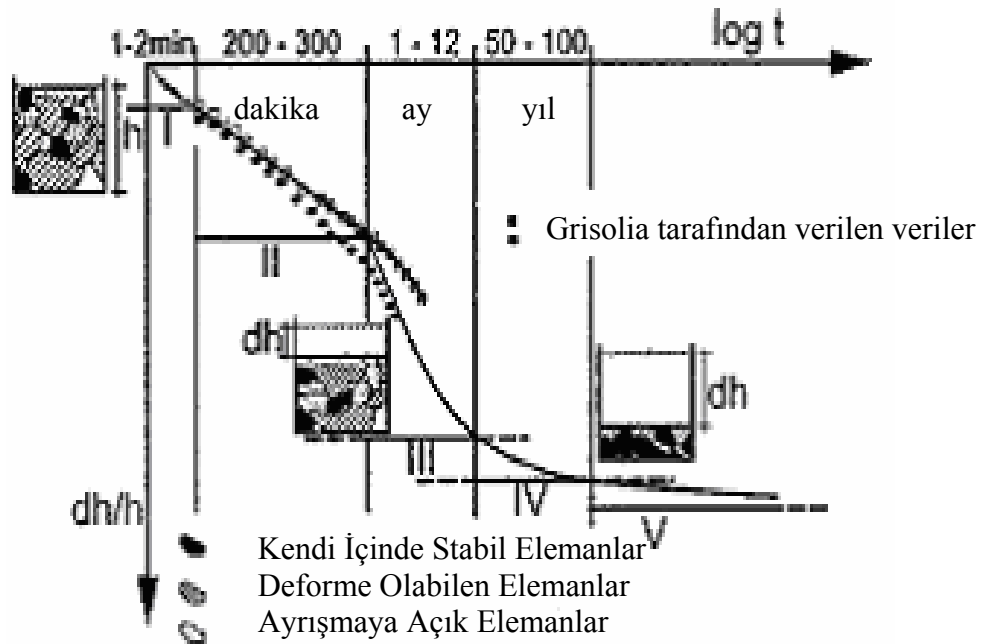
Evre I : Ani oturma; ani yükten dolayı fiziksel sıkışma

Evre II : Küçük parçacıkların büyük boşluklara doğru ilerlemesi

Evre III : Boşluklardaki suyun dışarı çıkması ve konsolidasyon oturması

Evre IV : Ayrışmaya bağlı deformasyonlar

Evre V : Korozyon, oksitlenme ve ayrışma sonucu gaz çıkışı nedeniyle azalan kütle oluşturduğu boşluklara doğru diğer parçacıkların hareketi



Şekil 3.1: Katı atıkların oturma mekanizması (Grisolia ve Napoleoni, 1996)



Evsel katı atıkların sıkışabilirlikleri şunlara bağlıdır;

- Katı atığın bileşenlerine
- Başlangıçtaki su muhtevasına
- Başlangıçtaki sıkışmasına ( önerilen Caterpillar D6 ile 3-4 geçiş)
- Ortam sıcaklığına
- Katı atık sahasının planlanması ve uygulanmasına

Yapılmış olan çalışmalarda katı atık sahalarında %1 ~ %47 arasında oturmalar gözlenmiştir (Tablo 3.3).

**Tablo 3.3:** Katı atıkların sahalarındaki oturma oranları

Yükseklik (m)	Dolgu Yaşı	En Büyük Oturma(m)	En Büyük Oturma(%)	Atık Sahası	Kaynak
15	3	0.50	3	İspanya	Sanchez (1995)
6.70	0	0.10	1	Kaliforniya	Merz ve Stone (1962)
36	2	1.90	5	Kaliforniya	Edil (1990)
15	0	2.20	15	San Jose, Kaliforniya	El-Fadel ve Al-Rashed (1998)
18.60	2	2.50	13	İngiltere	Cheney (1983)
3	0	1.40	47	A.B.D	Gandolla (1992)
1.50	0	0.20	1	A.B.D	Rao (1977)
2	0	0.60	30	Kore	Kang (1997)
2	0	0.30	15	Kore	Lee (1995)
27	3	9.78	36	Santa Monica	Hutric (1981)
3	2	0.60	20	A.B.D	Bjarngard ve Edgers (1990)
1.90	8	0.20	11	Naji Adası	Env. Sci. aEng.(1994)
24	23	1.43	6	Connecticut	Kene (1977)
50	8	3.20	6	Michigan	Dodt (1987)
9	25	1.10	12	Massachusetts	Stulgis (1995)

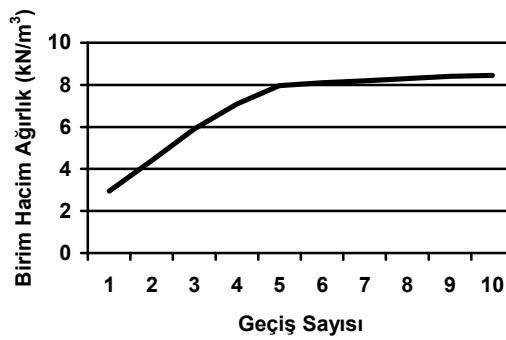
Evsel katı atıklarda  $C_c'$  modifiye edilmiş sıkışma katsayısı 0.1 ~ 0.5 arası ve  $e_0$  boşluk oranı 2 ila 10 arasında değişmektedir. Modifiye edilmiş sıkışma katsayısı ortalama 0.25 değeri için çöp sahası yüksekliğinin %22'si oranında oturmalar kaydedilmiştir.

Reinhart ve Al-Yousfi (1996) Kaliforniya Katı Atık Sahası'ndaki katı atık suyu drene edilmiş bir katı atık hücresinde katı atık derinliğinin %20'si kadar bir oturma gözlemlenmiştir. Kuru katı atıkların bulunduğu bir hücrede ise katı atık derinliğinin %8'si kadar bir oturmaya şahit olmuşlardır. View Dağı Katı Atık Sahası'nde ise 4 yıllık bir periyotta suya doymuş hücrelerde %13 - 15 civarı, kuru hücrelerde ise %8 ila %12 arası oturmalar gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak mekanik oturmaların %25'e kadar, ayrışma oturmalarının ise %20'ye kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir.

Katı atığın iyi sıkıştırılması için içerisindeki lastik, ev aletleri; çamaşır makinesi, buzdolabı...vb. dane boyutu büyük olan malzemeler çıkartılmalıdır. İyi bir sıkışma için katı atık, yüksekliği 1-2 metreyi geçmeyecek şekilde serilmelidir. Sıkıştırma sonrasında %2 ~ 17 arasında hacimsel değişiklikler gözlemlenmiştir.

Shoemaker (1972) yaptığı çalışmalarda 5 geçişle katı atıkların oldukça iyi sıkıştığını görmüştür (şekil 3.2).



**Şekil 3.2:** Geçiş sayısı - birim hacim ağırlık grafiği (Shoemaker, 1972)

Charles (1981) 15 yıldır depolanan ve yüksekliği 6 m olan katı atık sahasında dinamik kompaksiyon işlemi uygulamıştır. Taban alanı 4 m<sup>2</sup> olan 15 tonluk bir ağırlığı 20 m yüksekten 5'er metre aralıklarla bırakmıştır. Bu işlemde maksimum

2600 kNm/m<sup>2</sup> lik enerji açığa çıkmaktadır. Bu arada boşluk suyu basınçlarında da artışlar gözlemlenmiştir. Kompaksiyon sonucunda ortalama 0.5 m'lik oturmalar gözlemlenmiştir.

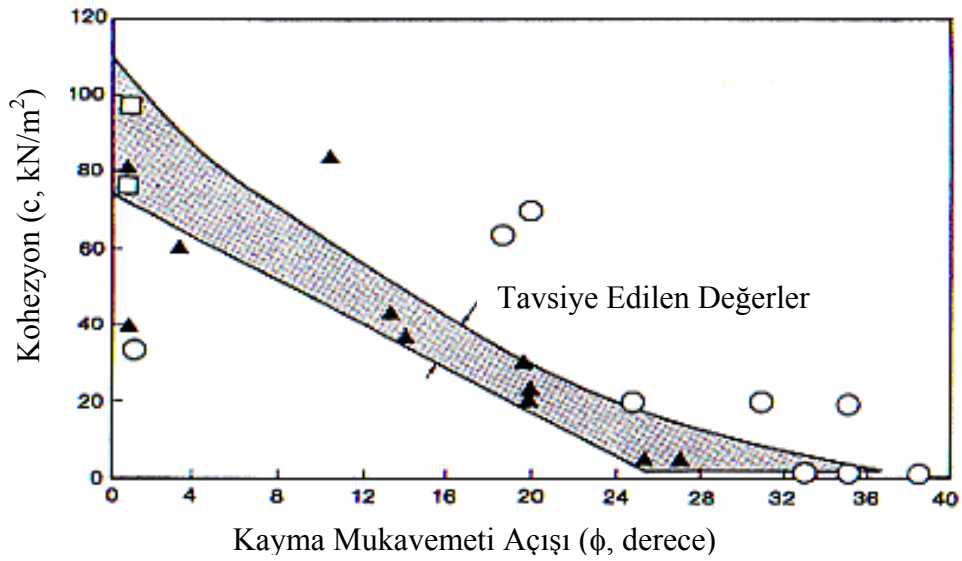
D'Appolonia (1978) Rauen, Fransa'da 6.0 ~ 9.0 m'lik bir katı atık sahasında 2 geçişle yaptığı dinamik kompaksiyon deneyinde 0.70 ~ 1.50 m'lik oturmalar gözlemlenmiştir.

Menard (1984) 6 ~ 16 m arası yükseklikteki katı atıkta 3 ve 6 geçişle 115 ve 245 ton.m/m<sup>2</sup> bir enerji uygulamıştır. Bunun sonucunda 0.4 ~ 0.5 m'lik oturmalar gözlemlenmiştir.

Dinamik kompaksiyon sonucunda katı atık sıkıştırıldığı için ayrışma ve ikincil sıkışması da azalır. Dinamik kompaksiyon sonucunda birincil oturmada %70, ikincil oturmada ise %50 azalmalar olmaktadır. Ayrıca dinamik kompaksiyon boşluk suyu basıncını arttırmaktadır.

### 3.3 Katı Atıkların Mukavemet Özellikleri

Katı atık sahasındaki stabilite analizleri için mukavemet parametreleri büyük önem taşımaktadır. Mohr-Coulomb kırılma dairesindeki kohezyon ve kayma mukavemeti açısı için Singh ve Murphy'nin önerdiği değerler şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Katı atıklar için Singh ve Murphy'nin önerdiği sürtünme açısı-kohezyon diyagramı

Hesaplarda güvenli tarafta kalmak için kayma mukavemeti açısını  $20^{\circ}$  ve kohezyonu  $19 \text{ kN/m}^2$  kullanılmalıdır.

Katı atıkların Mohr - Coulomb kırılma dairesine göre mukavemet parametreleri;

- Laboratuvar deneyleri
- Arazi deneyleri
- Katı atık şevindeki statik ve deprem yüklerine göre tersten hesap

ile bulunur.

Laboratuvar deneyleri; balya şeklinde hazırlanmış numuneler üzerinde, katı atık depo sahasından şelbi tüpleriyle alınmış örselenmemiş numuneler üzerinde, laboratuvar ortamında oluşturulan örselenmemiş numuneler üzerinde uygulanabilir.

Kayma mukavemeti parametreleri laboratuvar deneylerinde; kayma mukavemeti açısı  $0 \sim 49^{\circ}$  arası, kohezyon ise  $0 \sim 51 \text{ kN/m}^2$  değerleri arasında olduğu Tablo 3.4'te görülmektedir.

**Tablo 3.4:** Laboratuvar deneylerinden bulunan mukavemet parametreleri

$\phi$ (derece)	c ( $\text{kN/m}^2$ )	Kaynaklar
0	35	Coopers Engineers (1986)
20	15	Saarela (1987)
31~36	15	Landva ve Clark (1987)
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)

Kayma mukavemeti parametreleri arazi yükleme deneylerinde; kayma mukavemeti açısı  $0 \sim 30^{\circ}$  arası, kohezyon ise  $0 \sim 10 \text{ kN/m}^2$  değerleri arasında olduğu Tablo 3.5'te görülmektedir.

**Tablo 3.5:** Arazideki SPT ve Vane deneylerinden bulunan mukavemet parametreleri

$\phi$ (derece)	c (kN/m <sup>2</sup> )	Araştırmacılar
0	100	Earth Tech. (1988) SPT
0	80	Earth Tech. (1988) Vane

Arazideki SPT ve Vane deneylerinde kayma mukavemeti açısı sıfır gibi çok küçük bir değer alırken, kohezyon ise 100 kN/m<sup>2</sup> gibi çok yüksek değerler aldığı görölmektedir (Tablo 3.8). Arazide yapılan yükleme deneylerinde ise kayma mukavemeti açısı 0~38, kohezyon ise 0~80 kN/m<sup>2</sup> arası değerler almaktadır (Tablo 3.6).

**Tablo 3.6:** Arazi yükleme deneylerinden bulunan mukavemet parametreleri

$\phi$ (derece)	c (kN/m <sup>2</sup> )	Kaynaklar
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 (1986-87)
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(1990)
0 ~ 27	0 ~ 24	Oweis ve Khera (1990)
0 ~ 30	0 ~ 48	Oweis ve Khera (1990)

Landva ve Clark (1990) plastik çöp poşetlerinde üzerinde yaptıkları deneylerde c kohezyon 0 ve  $\phi$  kayma mukavemeti açısını 9° olarak bulmuşlardır. Ayrıca sıkışma indisi için 0.2 ~ 0.5 arası değerler önermişlerdir.

Howland ve Landva (1992) 10 - 15 yıllık katı atıklarda kayma mukavemeti açısını 33°, kohezyonu 17 kN/m<sup>2</sup> olarak bulmuşlardır. Edinciler (1995) New Jersey Katı Atık

Sahası'nda içsel sürtünme açısını  $23 \sim 31^\circ$  arası kohezyonu  $0 \sim 10 \text{ kN/m}^2$  arasında olduğunu bulmuştur. Kavazanjian (2001) Done Juana Katı Atık Sahası'nda kayma mukavemeti açısını  $28^\circ$ , kohezyonu  $19 \text{ kN/m}^2$ , OII Katı Atık Sahası'nda ise kayma mukavemeti açısını  $31^\circ$  kohezyonu  $38 \text{ kN/m}^2$  olarak bulmuştur. Eid (2000) OII Çöplüğünde yaptığı çalışmalarda içsel kayma mukavemeti açısını  $35^\circ$ , kohezyonu  $0 \sim 50 \text{ kN/m}^2$  arası olduğunu söylemiştir.

Mukavemet parametreleri değerleri ayrışmaya bağlı olarak zaman içerisinde değişiklikler göstermektedir. Landva ve Clark (1986) kayma mukavemeti açısını  $38 \sim 42^\circ$ , kohezyon değerini  $16 \sim 19 \text{ kN/m}^2$  olarak hesaplamışlar, fakat 1 yıl sonra ayrışmayla beraber bu değerler kayma mukavemeti açısı  $33^\circ$ 'ye, kohezyon ise  $16 \text{ kN/m}^2$  değerine inmiştir.

### 3.3.1 Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri; en az 3 m derinliğindeki bir test çukurundan numune alınarak yapılır. Çıkan katı atığın ağırlığı ve hacminden birim hacim ağırlığı hesaplanır.

Dixon ve diğerleri (2006) 2 tip presiyometre deneyi yapmışlardır :

- SBP (Self Boring Pressuremeter) Kendiliğinden İlerleyen Presiyometre
- HDP (High Pressuremeter Dilatometer) Yüksek Basıncılı Dilatometre

Kendiliğinden yerleşen presiyometre deneyinde %10 boşluk deformasyonuna kadar ölçümler yapılabilinmektedir.

Yüksek basınçlı dilatometrede ise deneyinde %50 boşluk deformasyonuna kadar ölçümler yapılabilinmektedir.

1.7 ~ 18.0 m derinlikler arasında 26 HDP ve 10 SBP deneyleri yapılmıştır.

Depolanma yaşı 5 yıla kadarki atıklar taze olarak kabul edilmiş ve bu atıklarda ayrışma gözlemlenmemiştir.

Depolanma yaşı 12 - 15 yıl civarındaki atıklar ise eski olarak kabul edilmiş ve bu atıklarda ayrışma gözlemlenmiştir.

Bolton ve Whittle (1999) yaptıkları araştırmada ikincil kayma modülü için aşağıdaki ifadesini önermişlerdir.

$$G_s = \alpha \gamma^{\beta-1} \quad (3.3)$$

Burada;  $\alpha$  ve  $\beta = 0.5 \sim 0.6$  non-lineerlik sabitlerini,  $\gamma$  kayma deformasyonunu ( $10^{-2} \sim 10^{-4}$  arası değerler almaktadır), ifade etmektedir.

Yükleme eğrisinden bulunan parametreler şunlardır:

$P_0'$  :boşluk referans basıncı depolanma yaşı

- 5 yaşına kadar olan katı atıklarda 5 ~ 16 kPa (2.9 ~ 13.9 m derinlikte)
- 12~15 yaşındaki katı atıklarda 100 ~ 366 kPa (3.3 ~ 17.9 m derinlikte) arası değer almaktadır.

$P_f'$  : başlangıç akma basıncı

- 5 yaşına kadar olan katı atıklarda 2.9 ~ 13.9 m derinlikte 24 ~ 420 kPa
- 12 ~ 15 yaşındaki katı atıklarda 3.3 ~ 17.9 m derinlikte 119 ~ 569 kPa arası değer almaktadır.

$G_i$  : başlangıç kayma modülü, yükleme eğrisinin eğiminden hesaplanır ve 1 ila 10 MPa arası değişen değerler alır.

$G_s$  : ikincil kayma modülü, boşaltma eğrisinin eğiminden bulunur

- deformasyon için 5 ~ 32 MPa arası
- deformasyon için 5 ~ 18 Mpa arası
- deformasyon için 4 ~ 10 Mpa arası değerler almaktadır.

SBP ve HDP testlerinde açılan test çukurları nedeniyle çukuru çevreleyen katı atık mutlaka bir miktar örselenmektedir. Ama sonuçta üniforma yakın bir çapta test çukuru oluşturulmaktadır.

Sonuç olarak eski kabul edilen atıklarda boşluk referans basıncı  $P_0'$  taze kabul edilen atıklara göre daha yüksek çıkmıştır. Eski kabul edilen atıklar, taze kabul edilen atıklara göre daha elastik olduğu anlaşılmıştır.

### 3.3.2 Model Deneyleri

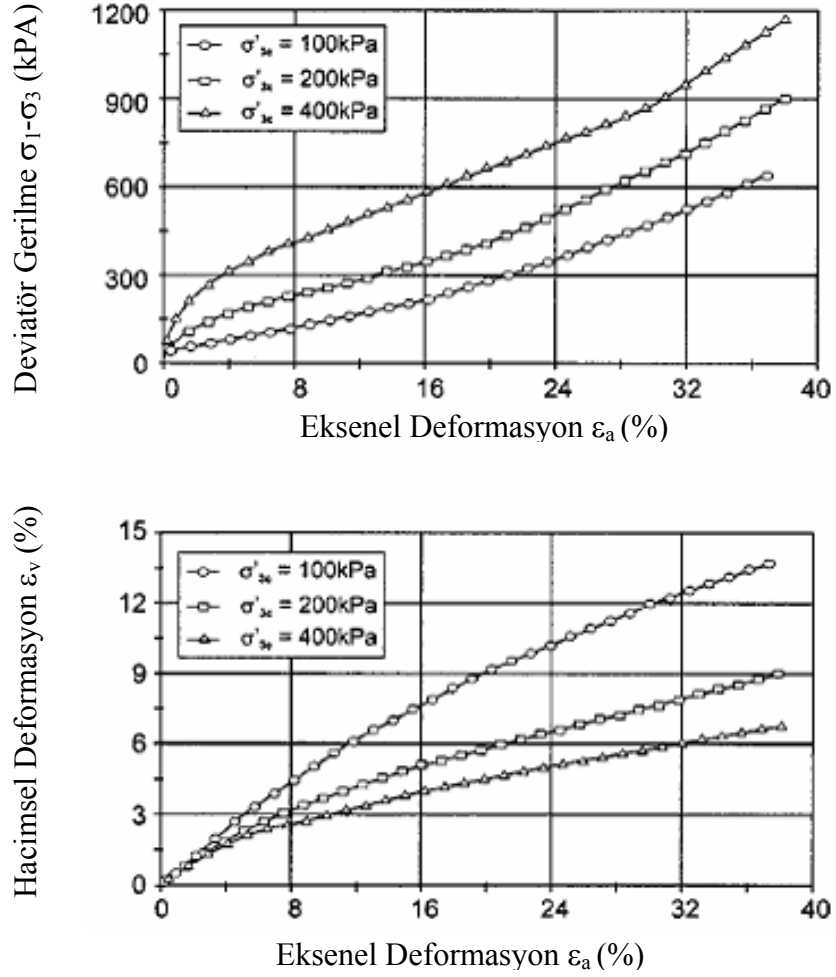
Fang'ın yaptığı (1977) balyalar şeklindeki çöplerde  $\phi$  kayma mukavemeti açısını  $15 \sim 25^\circ$ , c kohezyon değerini 65 kPa olarak hesaplamıştır. Deformasyon-yük eğrisinde kopma görülmediği için %15 ~ 20 deformasyon kopma deformasyonu olarak kabul edilmiştir.

Kaliforniya'nın kuzeyindeki bir katı atık sahasında  $19.6 \text{ kN/m}^3$  birim hacim ağırlığı elde edilen 11.6 m yüksekliğindeki katı atıkta, inklinometre yardımıyla yanal yer değiştirme ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde katı atık yerleştirme sırasında atığın üst kısımlarına doğru 0.43 m'lik yanal yer değiştirmeler ölçülmüştür.

Van Impe ve Bouzza'nın (1998) balyalar şeklinde hazırladıkları numunelerde, Belçika'nın kuzeyindeki bir katı atık sahasındaki katı atığın düşey doğrultudaki genişmesinin araştırılması amacıyla büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri uygulanmışlardır.  $18 \text{ kN/m}^2$ 'lik düşey yük altında  $1.3 \times 1 \times 0.80 \text{ m}$  ebatlarında oluşturulan bayla şeklinde sıkıştırılmış numunelere 200 kN'luk bir yüke kadar yatay kuvvet uygulanmıştır. Numunelerin  $\phi$  kayma açıları %10 deformasyona kadar artma gözlemlenmiştir. %5 deformasyonda kayma açısı  $19^\circ$  iken, %10 deformasyonda  $38^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak gerilme deformasyon diyagramının en yüksek değere ulaşamamasına dikkat çekilmiştir.

Evsel Katı Atıkların mekanik özellikleri; sentetik fiberlerle güçlendirilmiş evsel katı atıklar ve fiberlerle güçlendirilmemiş evsel katı atıklar olmak üzere yapıda incelenir.

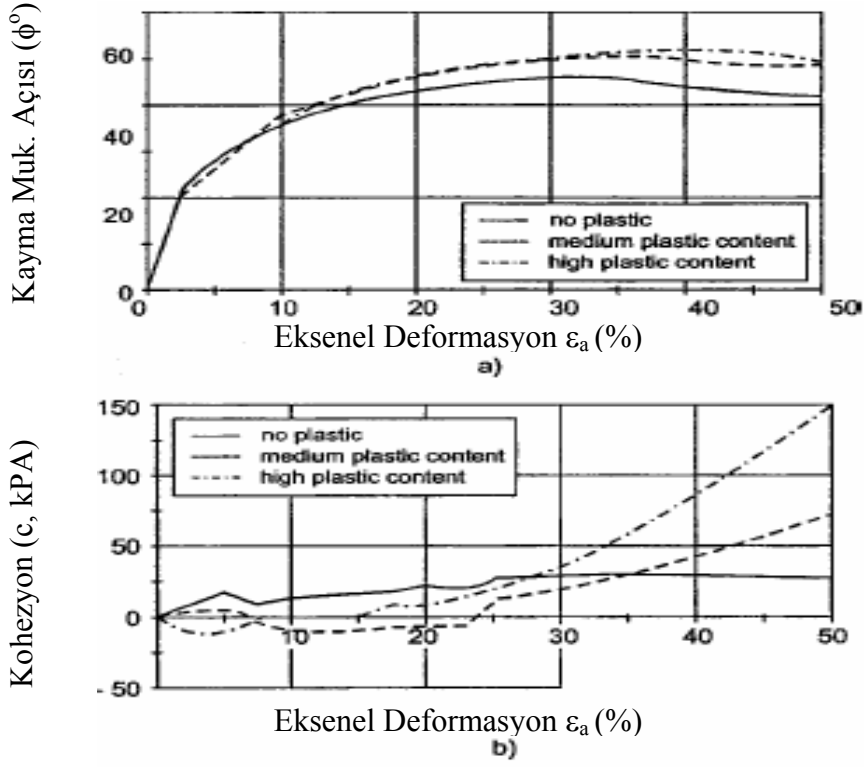




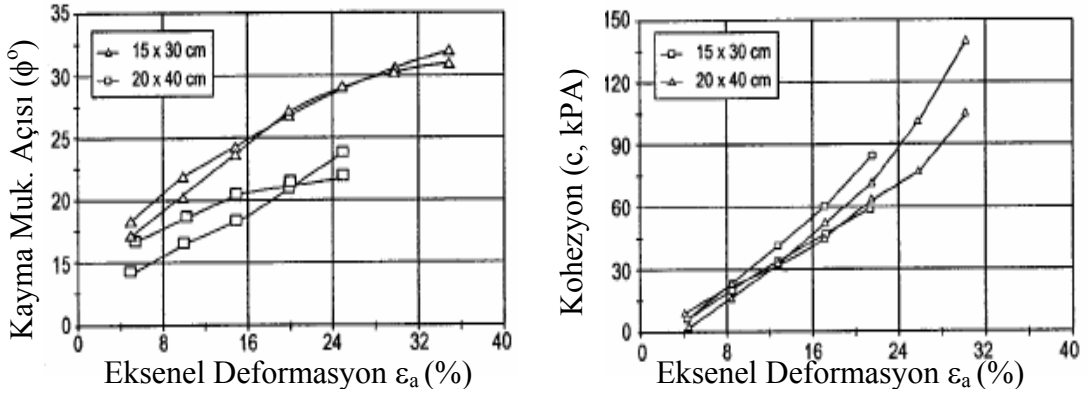
**Şekil 3.4:** Konsolide olmuş ve drenaja izin verilen katı atıklarda üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Machado ve diğ., 2002)

Birim hacim ağırlığı  $10 \text{ kN/m}^3$  olan katı atıklarda yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonuçlar Şekil 3.4'te verilmiştir. Buna göre gerilmeler artarken deformasyonların da arttığı görülmektedir. Gerilme-deformasyon eğrisinde herhangi bir kırılma görülmemektedir.

Kockel ve Jessberger (1995) üç eksenli basınç deneylerinde sürtünme açısının yüksek deformasyon değerlerinde mobilize olduğunu, fiberli yapı sayesinde oluşturulan kohezyonunsa %10 veya daha fazla deformasyon değerleri için mobilize olduğunu görmüşlerdir (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5:** Deformasyona bağlı olarak katı atıklardaki kayma gerilmesi parametreleri (Kockel ve Jessberger, 1995)



**Şekil 3.6:** Deformasyona bağlı olarak katı atıklardaki kayma gerilmesi parametreleri (Kockel ve Jessberger, 1995)

Machado ve diğerleri (2002), yaptıkları üç eksenli basınç deneylerinde Kockel ve Jessberger'i doğrulayan verilere ulaşmışlardır (Şekil 3.6).

### 3.3.3 Küçük Boyutlu Mukavemet Deneyleri

Tan (2001) evsel katı atıkların laboratuarda modellenmesi adı altında yaptığı kesme kutusu ve ödometre deneylerinde birim hacim ağırlığı 6 ~ 7 kN/m<sup>3</sup> arası olan plastik malzemeler kullanmıştır.

Kullanılan plastik malzemenin boyutları;

- Kübik plastik malzeme dane çapı; 2.8 ~ 3.2 mm arası
- Silindirik plastik malzeme 2 mm çapında ve 3.5 mm yüksekliğinde
- Yuvarlak yassı malzeme 2 mm kalınlığında ve 3.5 ~ 5 mm çapında.

Ödometre deneylerinde farklı gerilmeler altında elastisite modülü;

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.4)$$

İfadesiyle hesaplanır.

Ödometre deneyleri sonucunda katı atık modellenmesinde kullanılan plastik malzemenin elastisite modülü farklı gerilmeler altında 3000 ~ 25000 kN/m arasında bulunmuştur (Tablo 3.7)

**Tablo 3.7:** Katı atık modellenmesinde kullanılan plastik malzemenin elastisite modülü (Tan, 2001)

Gerilme (kPa)	Kübik (E <sub>s</sub> )	Silindir (E <sub>s</sub> )	Yassı (E <sub>s</sub> )
0 ~ 25	8000	6000	3000
25 ~ 50	5000	17000	5000
50 ~ 100	7000	11000	6000
100 ~ 200	12000	14000	9000
200 ~ 400	15500	25000	13000

Standart kesme kutusu aletlerinde 100 mm x 100 mm boyutlarında, 100~300 kN/m<sup>2</sup> arası normal gerilmelerde kayma mukavemeti açısı için 30 ~ 47° ve kohezyon için sıfır değerlerine ulaşılmıştır.

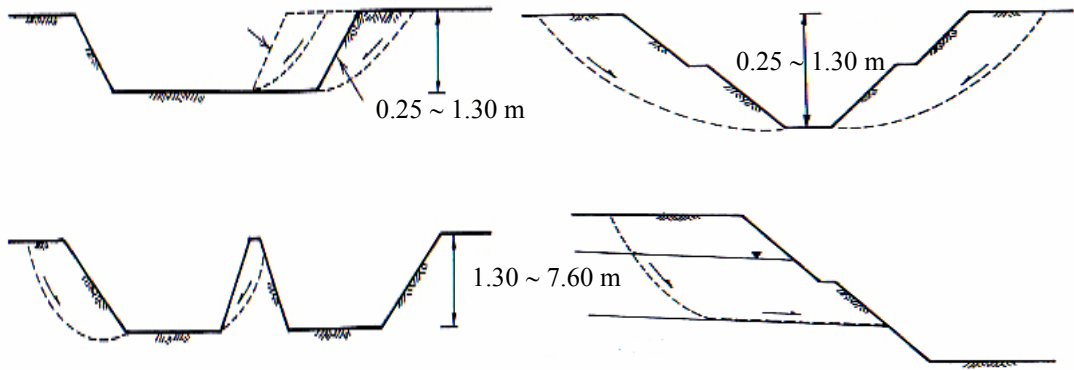
#### 4. KATI ATIK SAHALARINDA STABİLİTE

Katı atık sahasındaki stabilite; katı atık sahasının altındaki zemin tabakalarının özelliklerine, katı atığın mukavemet parametreleri ve ağırlığına, katı atığın istifleme eğimine, katı atık çöp suyunun iyi drene edilip edilmemesine, kaplama tabakalarının cinsine ve kaplama tabakalarının erozyona karşı direncine bağlıdır.

Katı atık sahasındaki stabilite problemleri şunlardır;

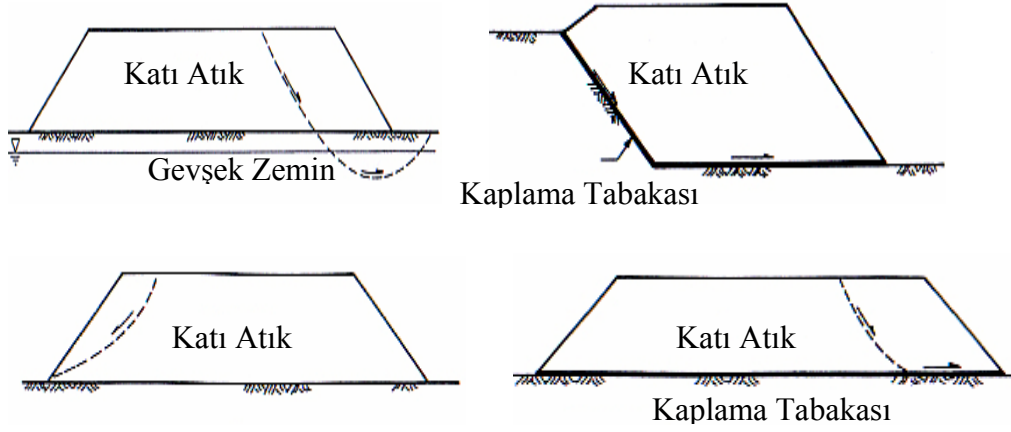
- Kazılan alanın stabilitesi
- İstiflenmiş katı atıkların kendi içindeki stabilitesi
- Kaplama tabakalarının stabilitesi

Kazılan alanın göçmesi genellikle yanal ötelenme veya dönel göçme şeklinde olur (şekil 4.1).



**Şekil 4.1:** Kazı esnasındaki potansiyel kayma düzlemleri

Katı atığın kendi içindeki stabilite problemleri ; çöp suyu toplama sistemi boyunca kayma, yan duvarlar ve taban boyunca dönel göçme, katı atık, kaplamalar ve temel boyunca dönel göçme, katı atığın kendi yapısı içerisinde dönel göçme, alt kaplama üzerinde yanal ötelenerek göçme şeklinde ortaya çıkabilir (şekil 4.2).



**Şekil 4.2:** Katı atık sahasındaki kayma düzlemleri

#### 4.1 Stabilite Analizi ve Hesap Yöntemleri

Stabilite hesap yöntemleri; kayma düzleminin şeklinin dairesel veya kama kabulüne, kaç boyutta analiz istendiğine ve statik veya dinamik yükler altında hesaba göre üçe ayrılır;

- Limit Denge Metodu
- Sonlu Elemanlar Metodu
- Sismik Analiz

##### 4.1.1 Limit Denge Metodu

Şevin kaymaya karşı güvenlik katsayısı FS ;

$$FS = \frac{\sum M_r, (F_r)}{\sum M_d, (F_d)} \quad (4.1)$$

ifadesiyle hesaplanır. Bu ifadede pay kısmındaki  $M_r$  veya  $F_r$  harekete karşı koyan momentler veya kuvvetlerdir.  $M_d$  veya  $F_d$  hareketi tetikleyici momentler veya kuvvetlerdir.

Limit denge metotları; sonsuz eğim metodu, kama metodu ve dilim metodudur. Sonsuz eğim metodu; kayan kütlemin hareketi tek yönde ve şev eğimine paralel olduğunda kullanılır. Hareketi başlatıcı kuvvetler kayan kütlemin ağırlığından

kaynaklanan kuvvetlerdir. Harekete karşı koyan kuvvetler ise yüzeyler arası sürtünme kuvvetleridir. Kama metodu; kayan kütlelerin geometrisi basit ve iki kamaya ayrılabilir şekilde ise kullanılır. Sonsuz eğim metodundan daha güvenlidir. Dilim metodu; şev stabilitesi için en çok kullanılan metottur. Dairesel veya kama şeklindeki kayma yüzeyleri için kullanılır. Basitleştirilmiş Bishop Metodu, basitleştirilmiş Janbu ve üç boyutlu stabilite analizi metodu olmak üzere üçe ayrılır.

#### **4.1.2 Sonlu Elemanlar Metodu**

Kütlelerin eşit parçacıklara ayrıldığı ve bütün parçacıkların birbiriyle ilişkili olduğu ilkesine dayanan bir metottur. Bu metotta her bir parçacık bir yanındakine belli kuvvetler uygular ve onu harekete zorlar.

#### **4.1.3 Sismik Analiz**

Statik analizlerde, şev hareketine neden olan temel kuvvet yerçekimi kuvvetidir. Deprem sırasında ise düşey ve yatay ivmeler şevde içsel kuvvetler oluşturur. Sismik şev stabilitesi hesaplarında yatay deprem ivmesi, düşey deprem ivmesine göre daha kritik durumlar oluşturduğu için hesaplar yatay deprem ivmesine göre yapılır. Genellikler yerçekimi kuvvetleri, düşey deprem ivmesini sönmürlü.

Amerikan Federal Düzenleme Enstitüsü (The Code of Federal Regulations) 1991 yılından itibaren deprem riski taşıyan bölgelerdeki katı atık alanlarının depreme dayanıklılıkları için katı atıklarda ve yanal hareketlerine bazı sınırlamalar getirmiştir. Bu sismik alanlar Amerika kıtasının yaklaşık yarı alanını kapsadığı için ayrı bir önem kazanmıştır. Katı atık döküm alanları için duyulan endişeler; dinamik yükler nedeniyle katı atığın kendi içindeki hareketleri, temeldeki kaplama tabakasına ve katı atığın üzerindeki kaplama tabakasına verilecek zararlardır. Bu problemlerden dolayı üst kaplama tabakasında yarıklar ve çatlaklar oluşabilir, katı atığın dış çevreyle olan tecridi de kalkmış olur. Katı atık suyu drenajı ve gaz toplama sistemleri de zarar görmüş olabilir.

Amerikan Federal Düzenleme Enstitüsü (1991) yanal hareketi olan katı atık alanlarının deprem riski taşıyan bölgelerde oluşturulmaması, eğer oluşturulacaksa alt ve üst kaplama tabakalarının, çöp suyu drenaj ve gaz toplama sistemlerinin ve yüzeysel su toplama sistemlerinin en büyük yatay deprem ivmesine (MHA) göre projelendirilmesini istemiştir. Bu sismik alanları ise Amerika Çevre Koruma Kurumu

(U.S. Environmental Protection Agency EPA) %10 veya daha yüksek bir ihtimalle en büyük yatay deprem ivmesinin 0.1g'yi 250 yıllık periyot içerisinde geçen alanlar olarak tarif etmiştir. EPA'nın teknik şartnamesine göre şev stabilitesi güvenlik katsayısı 1.2 ila 1.7 arasında seçilmelidir (Tablo 4.1).

**Tablo 4.1:** Şev stabilitesi için  $F_s$  güvenlik katsayıları (USEPA, 1992)

	Mukavemet Parametlerindeki Belirsizlikler	
	Az	Çok
Şev Kaymasındaki Tehlikelerin Boyutları		
İnsan hayatı veya çevresel tehlikelerin yaşanmaması	1.25 (1.20)	1.50 (1.30)
İnsan hayatının tehlikeye girmesi veya çevresel tehlikelerin yaşanması	1.50 (1.30)	$\geq 2.0$ (1.70)

Parantez dışındaki değerler statik hesaplar için, parantez içindeki değerler deprem yükleri altında hesaplamalar içindir.

Bir şevde eğer depremin oluşturduğu ivme, hesaplanan şevin akma ivmesini geçiyorsa bir düzlem boyunca şev hareketi oluşur.

Seed ve Bonaparte (1992) yaptıkları araştırmalarda en büyük sismik yer değiştirmenin 0.15 ila 0.30 m arası olduğu taktirde, iyi dizayn edilmiş katı atık sahalarında kabul edilebilir değerler olduğunu söylenmişlerdir.

Tek doğrultudaki dalga yayılımı gösteriyor ki katı atık sahalarındaki atıkların sismik stabilitesi katı atığın dinamik özelliklerine ve yüksekliğine bağlıdır.

Katı atıklarda tek doğrultudaki dalga yayılım hızı; alt tabakalardaki zemin türleri, katı atık sahasının yüksekliği, katı atığın birim hacim ağırlığı, katı atığın kayma modülü ve sönümlenme karakteristikleri, yer hareketlerinin karakteristikleri ile doğrudan ilişkilidir.

Sharm'ın (1990) Kaliforniya'daki Richmond Katı Atık Sahasında aşağı kuyu yöntemiyle yaptığı çalışmalarda  $V_s$  kayma dalgası hızı 200 m/s olarak bulmuştur.

Anderson(1992) sismik yansıma deneylerinde bulduğu sonuçlara göre  $V_s$  kayma dalgası hızı 244 m/s olarak bulmuştur.

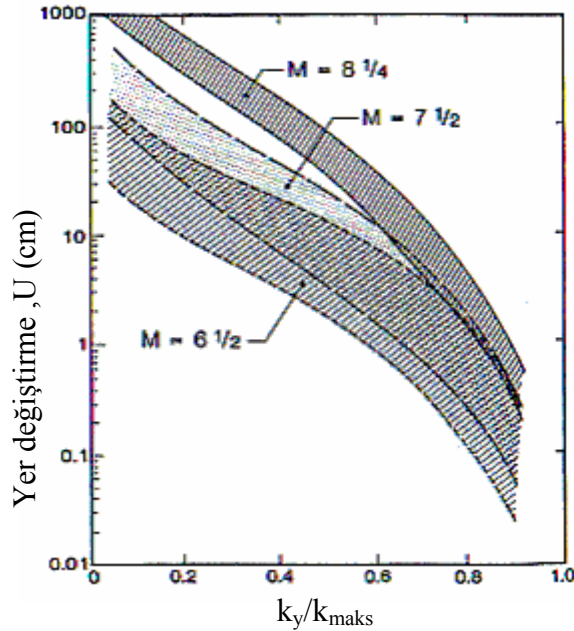


Singh ve Murphy (1990) Kaliforniya Katı Atık Sahası'nda aşağı kuyu ve çapraz kuyu yöntemleriyle  $V_s$  kayma dalgası hızı 30 ~ 275 m/s olarak bulmuşlardır.

Kavazanjian (1993) Kaliforniya'daki 10 farklı katı atık sahasındaki yaptığı deneylerde kayma dalgası hızının; katı atığın depolanma yaşı ve derinliğine bağlı olarak arttığını görmüştür. Yüzeyle ve yeni depolanmış az sıkıştırılmış katı atıkta  $V_s$  kayma dalgası hızı 80 m/s, iyi sıkıştırılmış ve uzun zaman önce depolanmış katı atıkta 160 m/s olarak hesaplamıştır. 20 m derinlikteki yeni depolanmış katı atıkta  $V_s$  kayma dalgası hızı 150 m/s iken aynı derinlikte uzun zaman önce depolanmış olan katı atıkta ise 300 m/s olarak gözlemlemiştir. 30 m derinlikte ise kayma dalgası hızının 340 m/s olduğunu görmüştür.

Bu araştırmalara göre çöpte kayma  $V_s$  dalgası hızının derinliğe bağlı olarak 50 ~ 350 m/s arasında değerler aldığı söylemek mümkündür.

Güvenlik katsayısının 1 olması durumu için hesaplanan  $k_y$  akma ivmesi, deprem nedeniyle oluşacak  $k_{max}$  en büyük yatay ivmeye (ivme zaman geçmişinden bulunur) oranı bilinirse Şekil 4.3'ten deprem nedeniyle oluşabilecek yer değiştirmeler hesaplanabilir.



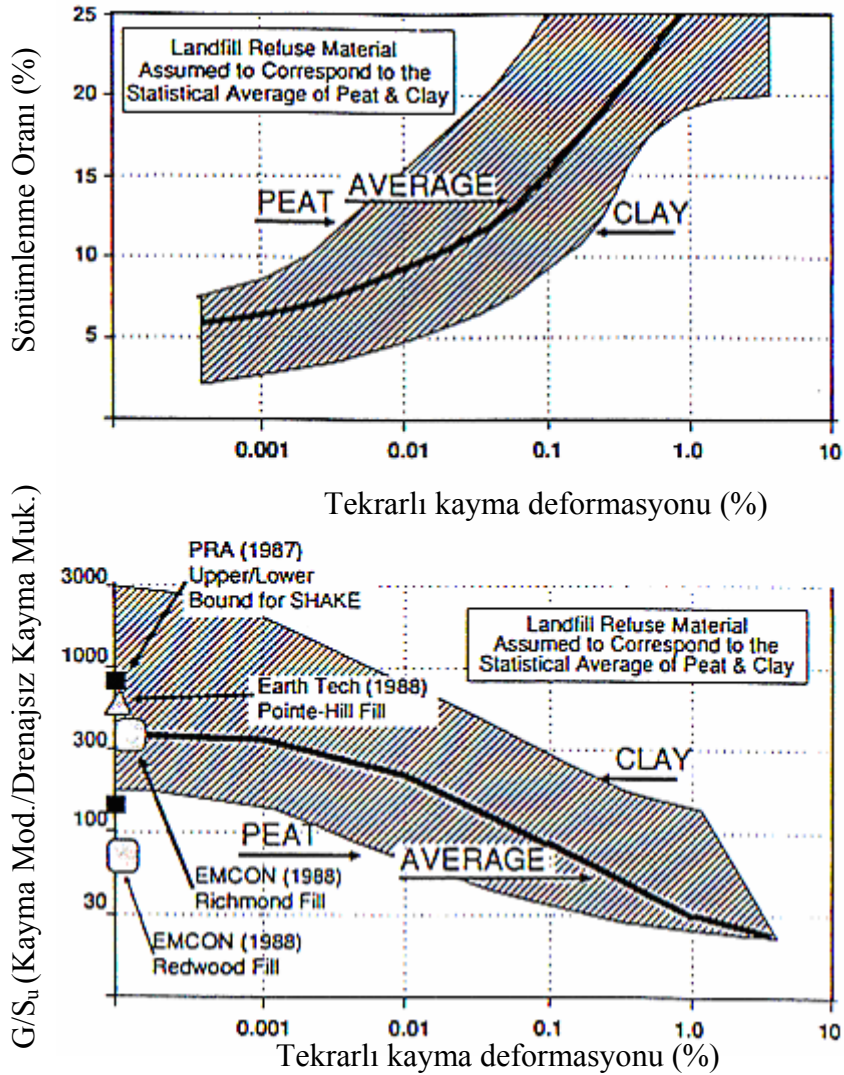
Şekil 4.3: Yer değiştirme  $k_y/k_{maks}$  diyagramları (Makdisi ve Seed, 1977)

Newmark (1965) sismik hareketler sonucu oluşan şev hareketi için yer değiştirmeler için 4.2 ifadesini önermişlerdir;

$$U = \frac{v^2}{2gN} \frac{A}{N} \left(1 - \frac{N}{A}\right) \quad (4.2)$$

Burada U yer değiştirme, v yer hızı, A zemin ivmesi, N ise güvenlik katsayısı 1 durumunu sağlamak için gereken ivmedir.

Katı atığın kayma modülü ve sönümlenme karakteristikleri düşük birim hacim ağırlığı ve çok sıkışabilme özelliği yüzünden turba zemininkine yakındır. Singh ve Murphy (1990) katı atıkların bu özelliğini görerek; sönümlenme ve kayma modülü ile tekrarlı kayma deformasyonu arasında Şekil 4.4'teki eğriyi önermişlerdir.



Şekil 4.4: Sönümlenme ve kayma modülü-tekrarlı kayma deformasyonu diyagramı (Singh ve Murphy, 1990)

Seed ve Martin (1966) yatay eşdeğer deprem ivmesini blok şeklindeki kama için;

$$HEA = \frac{\tau_h(t)}{\rho z} \quad (4.3)$$

olarak ifade etmişlerdir. Burada; HEA yatay eşdeğer deprem ivmesi,  $\tau_h(t)$ ; z derinliğindeki yatay kayma gerilmesi,  $\rho$ ; z derinliği üzerindeki malzemenin birim hacim ağırlığı, z ise derinliktir.

Katı atık sahalarındaki kayma yüzeyi genelde geosentetik veya geotekstil (en küçük kayma direncine sahip tabakalar) kaplama tabakalarında olur.

Yerba Buena Adasında, El Centro Depremi'nde,  $M_w$  deprem şiddeti 6.9 için, MHA en büyük yatay ivme 0.067g ve  $T_p$  periyot 0.64 s kaydedilmiştir.

Taft Katı Atık Sahası'nda, Kern Şehri Depremi'nde ise,  $M_w$  deprem şiddeti 7.4 için, MHA en büyük yatay ivme 0.178g ve  $T_p$  periyot 0.33 s olarak gözlemlenmiştir.

Katı atık dolgusunun  $T_s$  temel periyodu;

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \quad (4.4)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada;  $T_s$  katı atık dolgusunun temel periyodu, H katı atık dolgusunun yüksekliği,  $V_s$  katı atıktaki kayma dalgası hızıdır. Örnek olarak  $H = 30 \sim 90$  m ve  $V_s = 150 \sim 300$  m/s için  $T_s = 0.5 \sim 2.0$  s arası değişmektedir.

Katı atıklarda en büyük yatay eşdeğer ivme katı atığın yüksekliği boyunca artar ve en üst kısmına doğru en büyük değerini alır. Katı atık alanlarındaki potansiyel kayma düzlemi, en alt kısımdaki temel-kaplama yüzeyidir ve katı atığın dinamik özellikleri bu konuda önem kazanmaktadır.

## 5. YÖNTEM

Bu bölümde evsel atıkların laboratuvarında modellenmesi, kayma mukavemeti parametreleri ve gerilme - deformasyon özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler verilmektedir. Numuneler; granül plastik malzeme ve bunların çeşitli oranlarda kağıt ve keçe kırıntılılarıyla karıştırılması ile hazırlanmıştır.

### 5.1 Kullanılan Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kullanılan plastik malzeme 4 farklı geometrik şekildedir. Plastik numuneler şekillerine göre;

- Beyaz renkli kübik granüler plastik numune (BK)
- Sarı renkli mercimek granüler plastik numune (SM)
- Lacivert renkli silindirik granüler plastik numune (LS)
- Kahve renkli yuvarlak granüler plastik numune (KY)

şeklinde sınıflandırılabilirler. Deneylerde plastik numunelere ek olarak, kağıt ve keçe de kullanılmıştır. Plastik numuneler ortalama 2 ~ 6 mm boyutlarındadır. BK boyutları 3 mm civarında ve küp şeklinde, LS çapı 4 ~ 5 mm yüksekliği ise 5 ~ 7 mm olan silindir şeklinde, KY çapı 4 ~ 6 mm olan küre şeklinde, SM ise kalınlığı 1.5 mm, çapı ise 4 ~ 6 mm olan mercimek şeklindedir. Kağıt numuneler 4 x 4 mm kare veya 3 x 8 mm dikdörtgen kesitindedir. Keçe numuneler ise 5 x 5 mm boyutlarında kare kesitlidir (Şekil 5.1, Şekil 5.2).



a)



b)



c)

**Şekil 5.1:** Granüler plastik numuneler; a) beyaz küp (BK), b) sarı mercimek (SM),  
c) lacivert silindir (LS)





a)



b)



c)

Şekil 5.2: Numuneler; a) kahverengi yuvarlak (KY), b) kağıt, c) keçe

Kullanılan plastik malzemeler kimyasal özelliklerine göre;

- Akrlonitril-Bütadien Sitrin (ABS); beyaz renkli kübik numune (BK)
- Yüksek yoğunluklu Polietilen (HDPE); sarı renkli mercimek numune (SM)
- Polipropilen (Moblen) (PP); lacivert renkli silindirik numune (LS) ve kahve renkli yuvarlak numune (KY)

şeklinde gruplandırılabilir. Malzemelerin önemli fiziksel özellikleri Tablo 5.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre yoğunluğu en yüksek olan plastik ABS, en düşük olan ise PP’dir. Ayrıca erime sıcaklıkları da 100 °C civarı olduğundan malzemelerin +105 °C’ye ısıtılmış etüvde saklanması problem yaratabilir.

**Tablo 5.1:** Plastik malzemelerin önemli fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik	ABS	HDPE	PP
Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	10.5	9.5	9.0
Su Emmesi (%)	0.27	0.01	0.01
Kopma Uzaması (%)	20	100	200
Çekme Mukavemeti (kN/m <sup>2</sup> )	29647	31371	31026
Basınç Mukavemeti (kN/m <sup>2</sup> )	62053	19995	44816
Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )	2068427	827371	1310004
Kullanım Sıcaklığı (°C)	-40~90	-118~120	-26~130
Erime Sıcaklığı (°C)	105	130	170
Genleşme Katsayısı	5.3x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-5</sup>

<http://www.plasticsusa.com/polylist.html>

## 5.2 Elek Analizi

Zeminleri mühendislik özellikleri; heterojen yapıları nedeniyle çok büyük farklılıklar gösterebilir. Özellikleri değişen zeminler için geçerli davranış modelleri ve genel malzeme katsayıları tanımlayabilmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle zeminleri önce basit özelliklerine göre sınıflara ayırmak, ondan sonra da

mühendislik parametrelerini saptamaya çalışmak daha kolay olmaktadır. Bu nedenle daneler dane boyutu ve dane çapı dağılımına göre çakıl, kum, silt ve kil olarak sınıflandırılırlar.

Danelerin sınıflandırılmasında standart elekler üst üste konur, en büyük açıklıklı elekten en küçük açıklıklı eleğe doğru sıralanır. Vibrasyon aletinde, elek üzerine 500 g temsili numune yerleştirilir ve 10-15 dakika boyunca titreşim uygulanır. Elek üstü malzemeler tartılır ve elekten geçen malzeme yüzdesine göre granülometri eğrisi çizilir. 200 no'lu elekteki malzeme suya tutulur ve altına geçen malzemede hidrometre analizi yapılır. Bu çalışmada kullanılan elekler ve açıklıkları Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.2:** Kullanılan elekler

Elek No	Elek Açıklığı (mm)
3/8"	9.5
4	4.75
10	2.00

Elek analizi sonucunda plastik malzemeler ve kağıt malzemelerin hepsi 3/8" nolu eleğin altına geçmiş ve 10 nolu eleğin ise üstünde kalmıştır.

### 5.3 Piknometre Deneyi

Piknometre deneyinde dane birim hacim ağırlığı ( $\gamma_s$ ) hesaplanır. Aşağıdaki ifadeye göre birim hacim ağırlık;

$$\gamma_s = \frac{W_1}{W_1 + W_2 - W_3} \quad (5.1)$$

şeklinde hesaplanır.



Burada;

$W_1$	Kuru zemin ağırlığı
$W_2$	Su+piknometre ağırlığı
$W_3$	Su+piknometre+zemin ağırlığı

şeklindedir.

Deneydeki temel prensip ise bir sıvı içerisinde batan bir cisim hacmi kadar hacimde sıvı taşırır. Taşan sıvı eğer su ise, hacmi ağırlığına eşit olmaktadır. Yapılan deneylerde kullanılacak plastik numunelerden sadece BK suda batmıştır, diğer numuneler batmadığı için piknometre deneylerinde 96° saf alkol (etil alkol) kullanılmıştır. Saf alkolün yoğunluğu dereceli bürette 100 cc, 80 cc ve 90 cc hacmindeki ağırlıklar tartılarak  $0.79 \text{ g/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Bu yüzden su için verilen 5.1 ifadesi, alkol için 5.2 ifadesi şeklini almıştır.

$$\gamma_s = \frac{W_1}{(W_1 + W_2 - W_3) / 0.79} \quad (5.2)$$

Alkolde sadece KY'nin bir kısmı batmakta bir kısmı batmamaktadır. Bu yüzden yoğunluğu alkolünkine eşit alınmıştır. Ayrıca daneler arası hava kalmaması için malzeme piknometreye boşaltıldıktan sonra vakum 10 - 15 dakika civarında vakum uygulanmıştır.

#### 5.4 Rölatif Sıklık Deneyi

Rölatif sıklık deneyinde; deney aleti olarak 50 mm çapında, 100 mm yüksekliğinde pirinç silindir kullanılır. Deneyin amacı maksimum ve minimum boşluk oranlarını ( $e_{\text{maks}}$  ve  $e_{\text{min}}$ ) yakalayarak; maksimum ve minimum birim hacim ağırlıklarının,  $\gamma_{\text{maks}}$  ve  $\gamma_{\text{min}}$ , hesaplanmasıdır. Maksimum boşluk oranı için ASTM D 4253'teki A Metoduna göre 4 nolu elekten elenmiş malzeme kürek ve huni yardımıyla pirinç silindire boşaltılır. Huniden malzemenin düşüş yüksekliği 1-2 cm civarında ayarlanır ve pirinç silindire herhangi bir darbe vermeden yukarıya doğru çekilir. Sonra

titreşime neden olmadan yavaşça pirinç kabın üstü bir cetvel yardımıyla tesviye edilir. Numune kabı boşken ve numuneyle doluyken tartılır ( $W_n$ ). Bulunan numune ağırlıkları 5.3 ifadesine göre silindirin hacmine ( $V_s$ ) oranlanır.

$$\gamma_k = \frac{W_n}{V_s} \quad (5.3)$$

Minimum boşluk oranı için ise numune pirinç silindire 5 tabaka şeklinde yerleştirilir. Her tabakada yanlardan lastik tokmak yardımıyla 15-25 darbe verilerek malzeme sıkıştırılır.

Rölatif sıklık,  $D_r$  5.4 ifadesine göre;

$$D_r = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \quad (5.4)$$

şeklinde hesaplanır. Boşluk oranları ise;

$$e_{maks, min} = \frac{V_s \gamma_n}{W_n} - 1 \quad (5.5)$$

şeklinde hesaplanır.  $V_s$  pirinç silindirin hacmi,  $\gamma_n$  numune birim hacim ağırlığı,  $W_n$  pirinç silindirin içerisindeki numunenin ağırlığıdır.

Kağıt numunede ise maksimum boşluk oranı plastik numunedeki gibi bulunmuştur. Minimum boşluk oranı için ise silindir içindeki kağıt numuneyle beraber numune kesme aletine konulmuş ve üzerindeki pistonla yük verilip sıkıştırılmıştır. Daha sonra da ağırlığı ölçülmüştür.

## 5.5 Kesme Kutusu Deneyi

Kesme kutusu deneyinde zemin numunesi 60 mm x 60 mm veya 100 mm x 100 mm'lik kare kesitli iki parçadan oluşan rijit bir kutu içine numune yerleştirilmektedir. Uygulanan kesme kuvveti altında kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlemde hareket etmekte ve böylece numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır. Deney

sonucunda; kayma gerilmesi - yatay yer değiştirme diyagramı, dūřey yer değiştirme - yatay yer değiştirme diyagramı ve kayma gerilmesi - normal gerilme diyagramları elde edilir. Deney sırasında ulaşılan en bŸyŸk kayma gerilmesi, gŸçme gerilmesi olarak kabul edilir. Ayrıca hesaplarda değişen kesme dŸzlemi alanı da gŸz ŸnŸnde bulundurulur.

Deney, 100 kN/m<sup>2</sup>, 200 kN/m<sup>2</sup>, 300 kN/m<sup>2</sup> normal gerilmeler oluşturacak dŸřey yŸk kullanılarak tekrarlanır. BŸylece Mohr dairesine gŸre oluşan Coulomb kırılma zarfından kayma mukavemeti parametreleri kohezyon ve kayma mukavemeti açısı hesaplanabilir. Kesme kutusu deneyi dŸřey yŸk asıldıktan sonra oturmanın tamamlanması beklenerek arazideki zeminin, başlangıç gerilme durumu modellenmiş olur. Ayrıca bu deneyde yŸkleme hızı zeminin permeabilitesine gŸre ayarlanabildiği için drenajlı ve drenajsız koşullar da gŸz ŸnŸnde bulundurulabilir. Deney numunesi hazırlanırken arazi boşluk oranına sahip olacak Şekilde hazırlamaya dikkat etmek gerekir. Kesme sırasında oluşan boşluksuyu basıncı artışlarının ŸlŸlememesi, gŸçmeye ulaşmadan Ÿnceki gerilme seviyelerinde asal doğrultuların belirsiz olması ve kırılma dŸzlemi boyunca gerilme dağılımının Ÿniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı Ÿzelliklerindedir.

Tablo 6.2'deki oturma modŸlŸ ( $\delta$ );

$$\delta \text{ (kN/m)} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta H} \quad (5.6)$$

Deformasyon modŸlŸ (E)

$$E \text{ (kN/m}^2\text{)} = \Delta\sigma \frac{H}{\Delta H} \quad (5.7)$$

ifadeleriyle hesaplanmıştır.

Burada;

$\Delta\sigma$

Gerilme değişimi

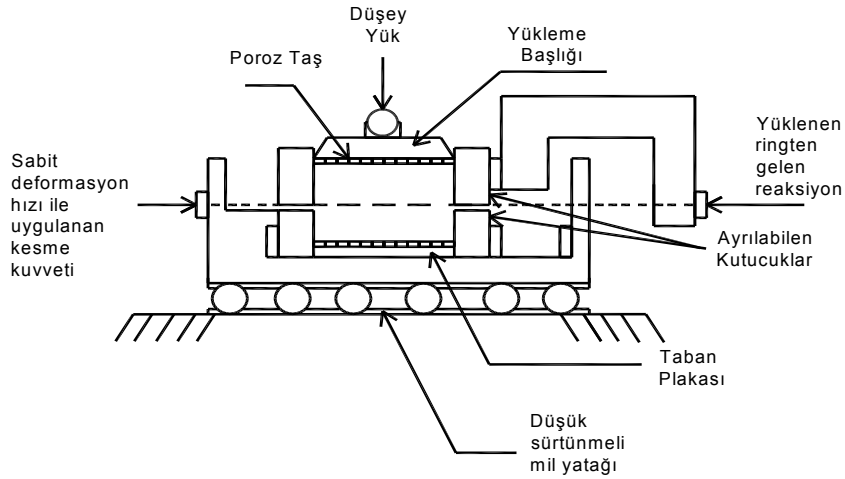
$\Delta H$

Numunenin oturma miktarı

H

Numunenin başlangıç yüksekliği

DeneYlerde kullanılan kesme kutusu aleti; 100 mm x 100 mm x 45 mm boyutlarında, İngiliz yapımı, Farnell Testing Machines markalı ve seri numarası 116388/306'dır (şekil 5.3). DeneY hızı olarak ise normal kesme kutusu deneYi için 0.12 mm/dak, sabit yer değiştirme hızı ile uygulanmaktadır. Kuvvet halkasının ring faktörü ise 0.135 kg/div'dir.



**şekil 5.3:** Kesme kutusu deneY aleti

DeneY hızı 0.0005 ila 5 mm/dak aralığında maksimum yer değiştirme 10 mm'ye kadar okumalar yapılabilir. 10 mm'lik deformasyona ulaşabilmek için bu deformasyon hızı aralığında deneY 2 dak ile 14 gün arasında sürebilir. DeneYlerde 0.5 ~ 2 mm/dak deformasyon hızı kullanılması deneYden doğru sonuçlar elde edebilmek açısından önemlidir.

## 6. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde deneylerden elde edilen parametreler, grafikler, tablolar ve şekiller üzerinde durulacaktır.

### 6.1 Piknometre ve Rölatif Sıklık Deneyleri

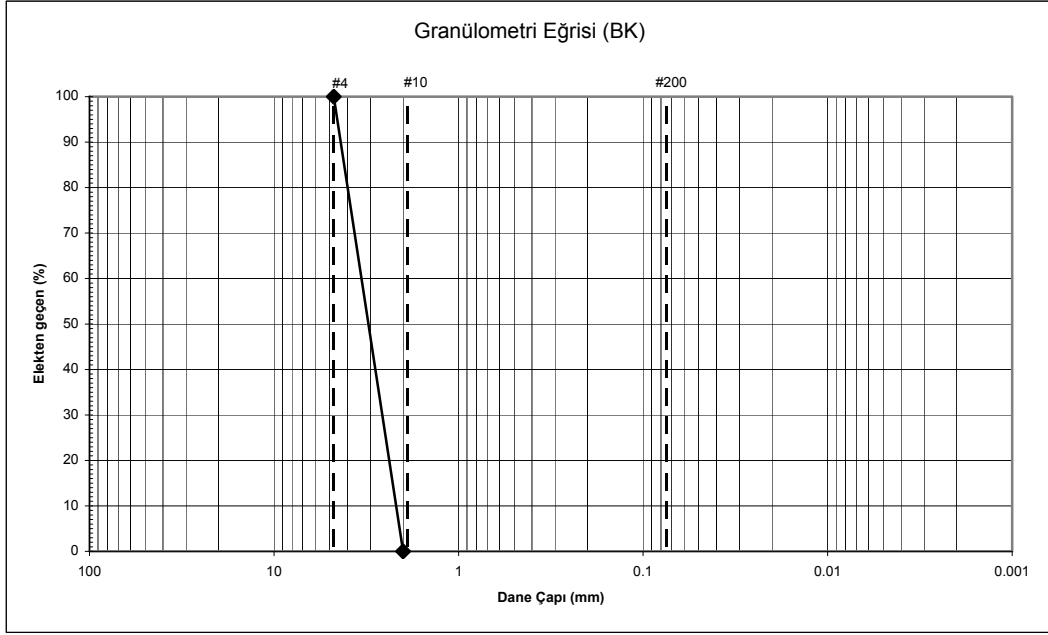
Piknometre deneylerinde malzemenin dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s$ , rölatif sıklık deneylerinde ise maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax,min}$  ile maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max,min}$  açıklanacaktır. Bu değerler Tablo 6.1’de verilmiştir.

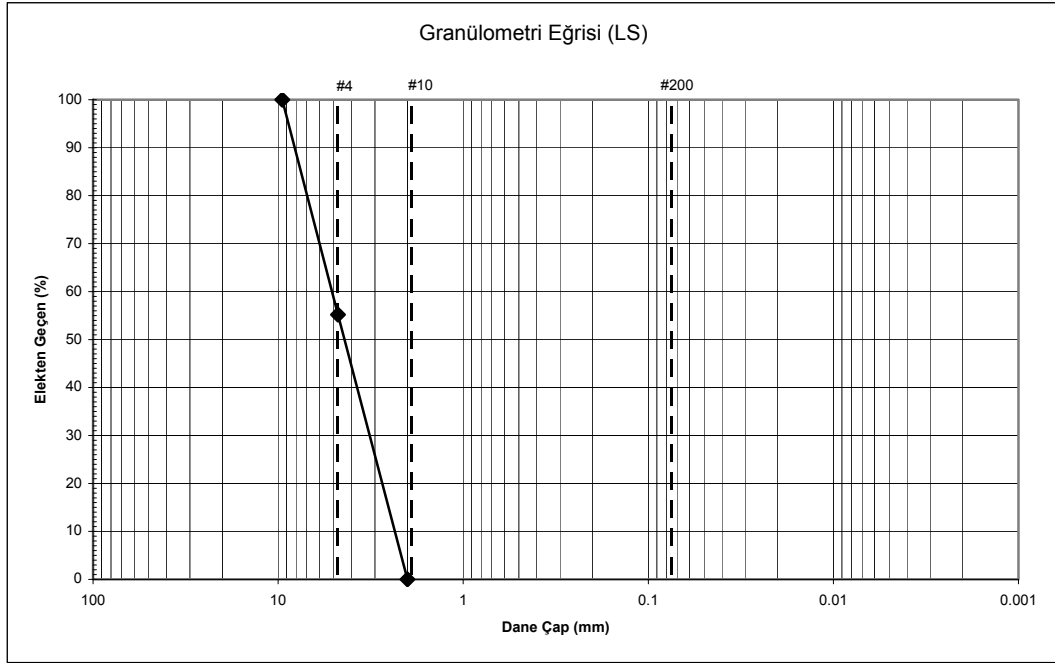
**Tablo 6.1:** Numunelere ait endeks özellikleri

Numune Tipi	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{kmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_{maks}$	$e_{min}$
BK	10.7	7.1	6.2	0.72	0.51
SM	9.2	6.3	5.9	0.57	0.46
LS	8.8	5.9	5.3	0.65	0.48
KY	7.9	5.5	5.1	0.56	0.43
Kağıt	12.8	4.0	2.2	4.8	2.2
Alkol	7.9	-	-	-	-

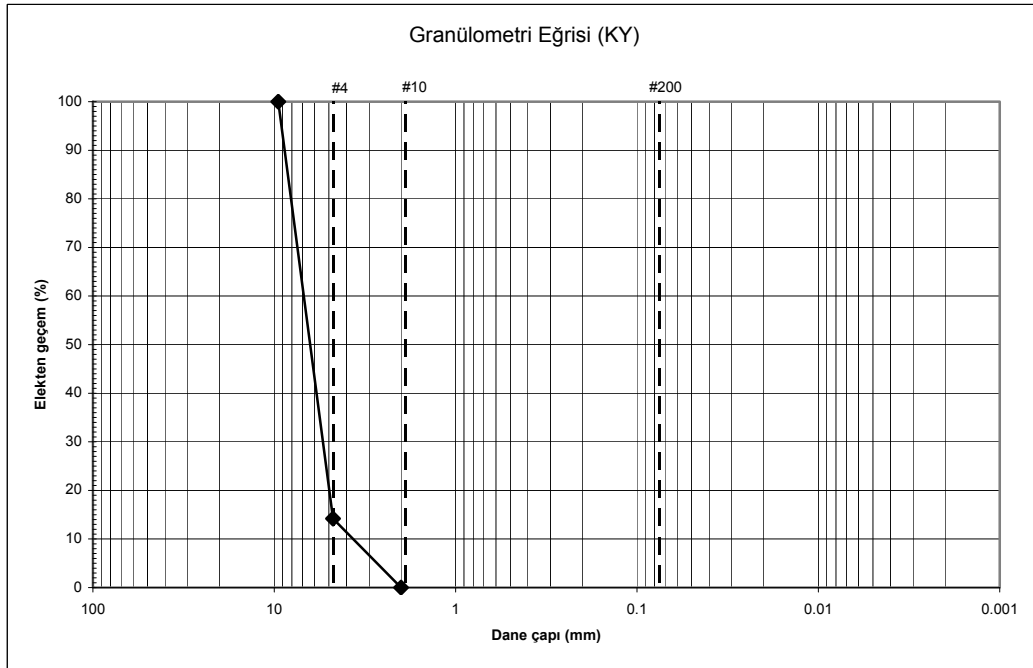
### 6.2 Elek Analizi Deneyleri

Elek analizleri sonucunda elde edilen granülometri eğrileri Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5’te de görüldüğü gibi dane çapı 2 ~ 10 mm arasında değişmektedir.

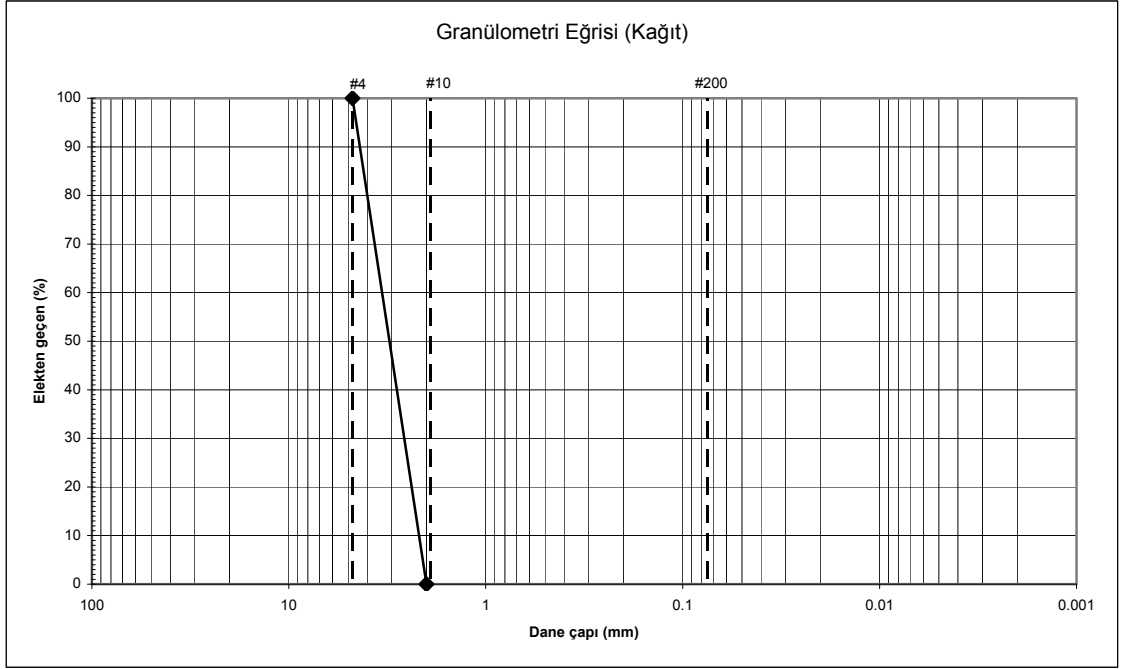




**Şekil 6.3:** Lacivert Silindir (LS) granülometri eğrisi



**Şekil 6.4:** Kahverengi Yuvarlak (KY) granülometri eğrisi



Şekil 6.5: Kağıt numune granulometri eğrisi

### 6.3 Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Deneyleerde kullanılan plastik numuneler dane şekli ve kimyasal yapılarına göre 4 çeşittir;

- Beyaz renkli kübik numune (BK) Akrilonitril-Bütadien Sitrin (ABS);
- Sarı renkli mercimek numune (SM) Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE);
- Lacivert renkli silindirik numune (LS) Polipropilen (Moblen) (PP);
- Kahve renkli yuvarlak numune (KY) Polipropilen (Moblen) (PP).

Bu numuneler plastik granüler malzeme oldukları için kesme kutusu deneylerinde kohezyonsuz zemin davranışı gözlenmiştir. Kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) ise sarı mercimekte  $33^\circ$ , kahve yuvarlakta  $34^\circ$ , lacivert silindirde  $37^\circ$ , beyaz küpte  $50^\circ$  olarak bulunmuştur (Tablo 6.2). Bu sıralama en köşesiz malzeme olan sarı mercimekten en köşeli malzeme olan beyaz kübe doğru artış göstermektedir. Bu da granüler malzemede dane şeklinin kayma mukavemetine olan etkisini göstermektedir.



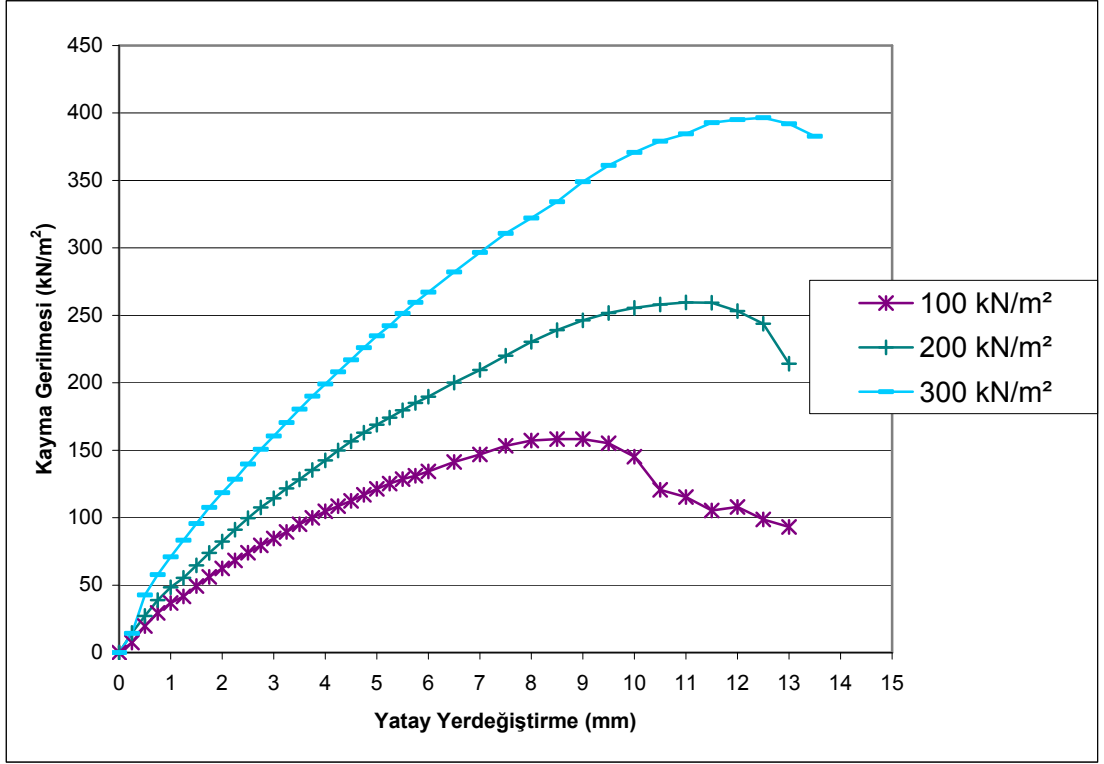
Deneyin başlarında düşey yer değiştirmeye baktığımızda oturma yönünde küçük artışlar gözlemlenirken bir süre sonra düşey yer değiştirmede kabarma yönünde daha yüksek artış gözlenmiştir. Bunun nedeni kesme kutusunun hareketiyle birlikte numunelerin boşluklara doğru ilerlemeleri ve boşluklar tamamen dolduktan sonra danelerin birbiri üzerine çıkarak yaptıkları yer değiştirmelerdir. Bu yer değiştirmelerin miktarı danelerin boyutlarıyla ve köşelilikleriyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Küçükten büyüğe doğru sıralarsak sarı mercimek, kahve yuvarlak, lacivert silindir ve beyaz küp şeklindedir. Ayrıca bazı deneylerde 11 mm'lik deformasyonlardan sonra rijit kutular birbirinden uzaklaştığı için kesme kutusunun dışına doğru numune dökülmektedir. Bu da deney sonuna doğru düşey yer değiştirme grafiklerinde ani düşüslere neden olmaktadır. Şekil 6.25 KY 100 kN/m<sup>2</sup> yüklemesindeki düşey yer değiştirmedeki ani değişim, bunun sonucudur.

Bütün numuneler kırılma özelliği göstermektedir. Yüklemelere baktığımızda ise bu özellik yüksek yüklerde daha belirgin hale gelmektedir. Yani kırılma yüküne ulaşıldıktan sonraki düşüşler, yüksek düşey yükler altında düşük düşey yüklere göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca malzemenin köşeli yapısı da arttıkça bu düşüşler artmaktadır.

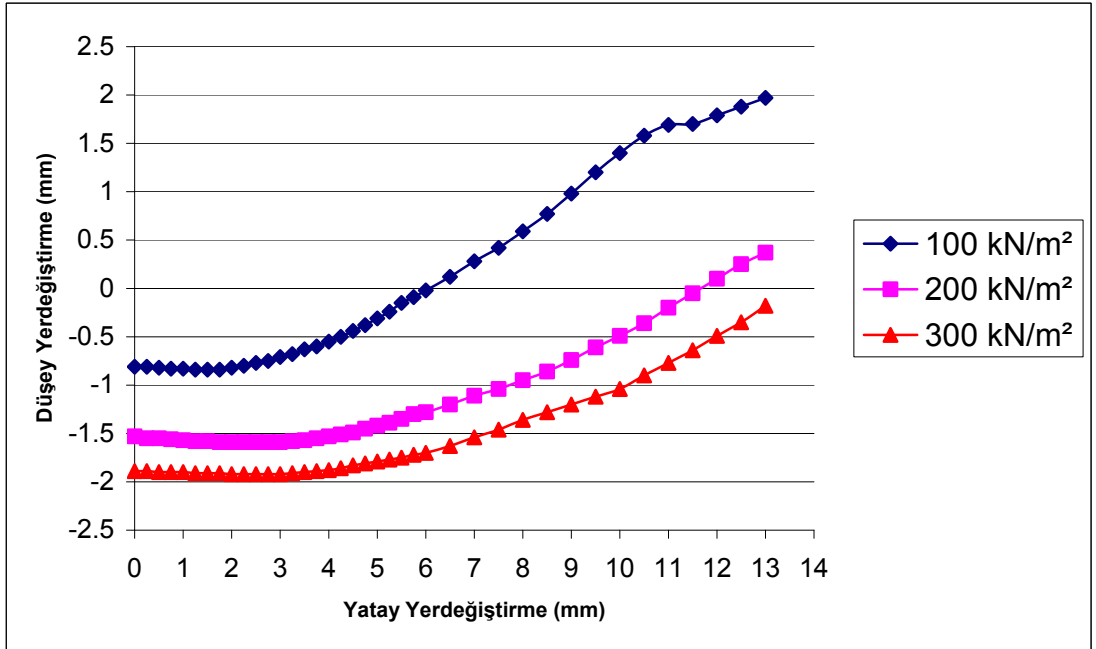
Plastik malzemelere hacimsel olarak kağıt ve keçe kırıntıları eklenerek yapılan karışımlarda ise kayma mukavemeti açısından ( $\phi$ ) 5° - 6° civarında azalmalar gözlenmiştir (Tablo 6.2). Kayma gerilmesi – yatay deformasyon diyagramlarına baktığımızda ise kırılmanın belirginliği azalmaktadır, yani kırılma sonrası kayma gerilmesindeki düşüş netliğini kaybetmektedir. Düşey yer değiştirmelere baktığımızda ise (Tablo 6.3) artan kağıt ve keçe oranlarıyla beraber deneye başlamadan önceki oturmalar da artmaktadır. Ayrıca artan kağıt ve keçe oranları ile beraber oturma modülü ( $\delta$ ) ve deformasyon modülü (E) genel anlamda düşüş göstermektedir. Plastik numunelere %10 kağıt eklenmesi durumunda kayma mukavemeti açısından ( $\phi$ ) değişim, %20 kağıt eklenmesi ve %10 kağıt %10 keçe eklenmesi durumlarına göre daha fazla olmaktadır. Sadece %20 kağıt eklenmesi durumu ile %10 kağıt %10 keçe eklenmesi durumlarında aynı kayma mukavemeti açalarına ulaşmıştır.

Kesme kutusu numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen kayma gerilmesi- yatay yer deęiřtirme, dūřey yer deęiřtirme – yatay yer deęiřtirme grafikleri Őekil 6.6'dan Őekil 6.33'e kadar gōsterilmiřtir. Coulomb kayma zarfına gōre belirlenen kayma mukavemeti parametreleri ise Őekil 6.34'ten Őekil 6.47'e kadar verilmiřtir.

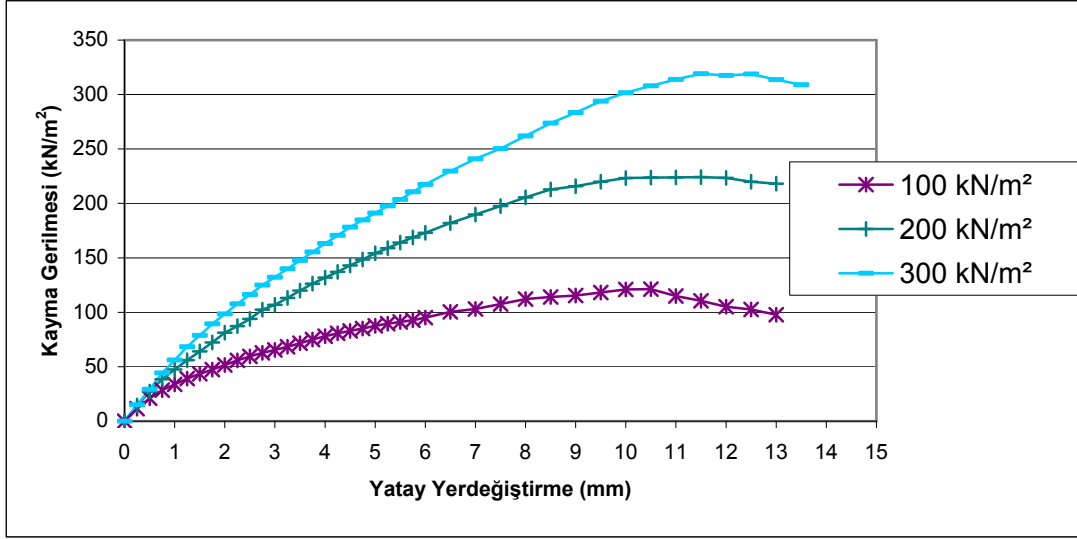
Kesme kutusu deneyleri toplu sonuçları ise Tablo 6.2' de, kesme kutusu deneyleri oturma ve deformasyon modūlleri ise Tablo 6.3'te verilmiřtir.



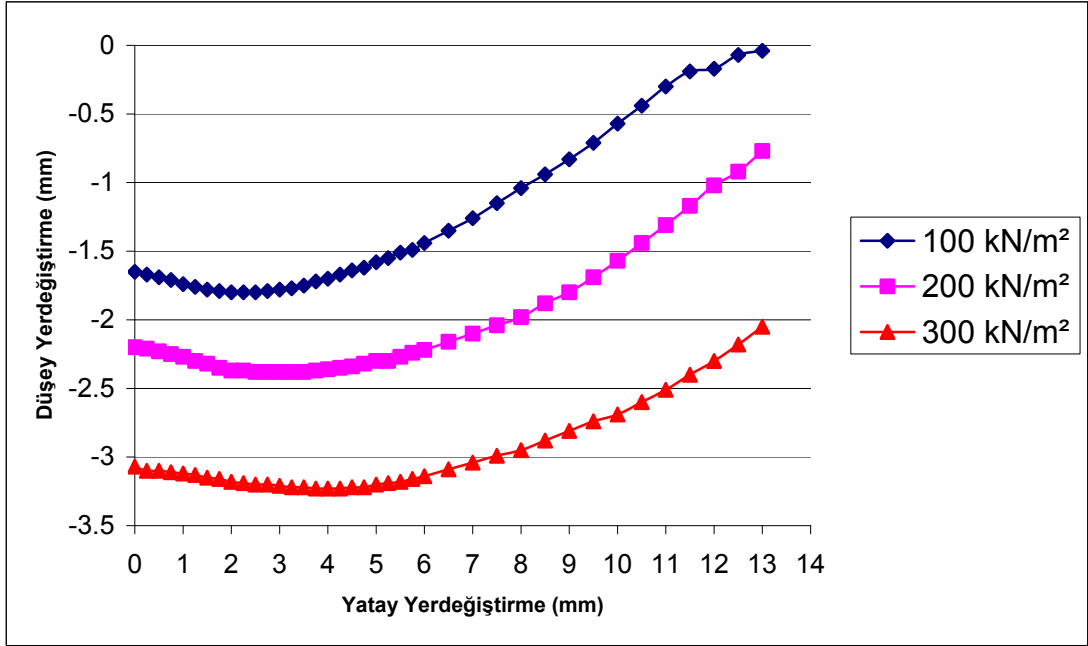
Şekil 6.6: BK'ya ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



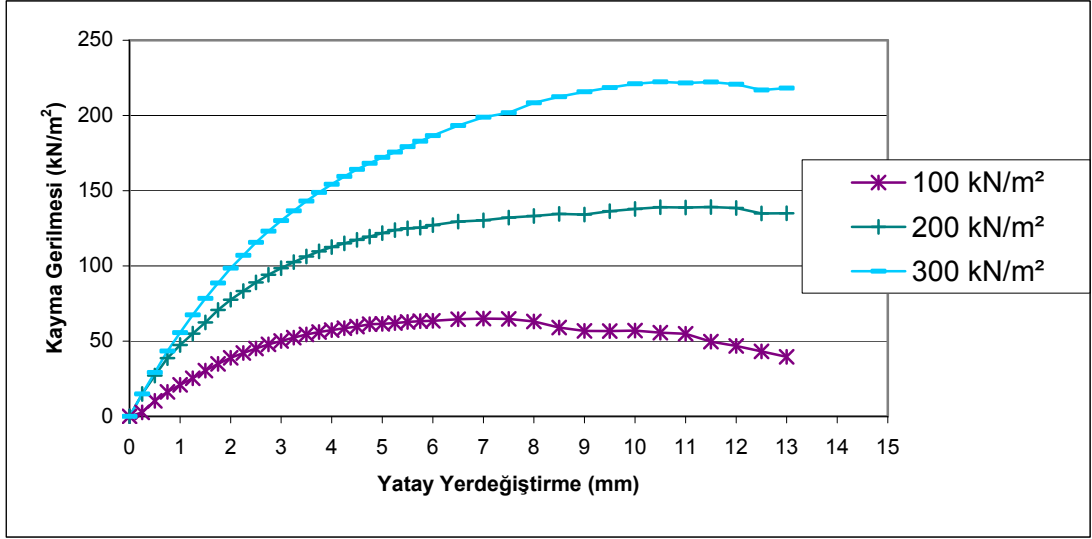
Şekil 6.7: BK'ya ait dūřey yer deęiřtirme-yatay yer deęiřtirme grafięi (dūřey yer deęiřtirmede negatif deęerler oturmaz)



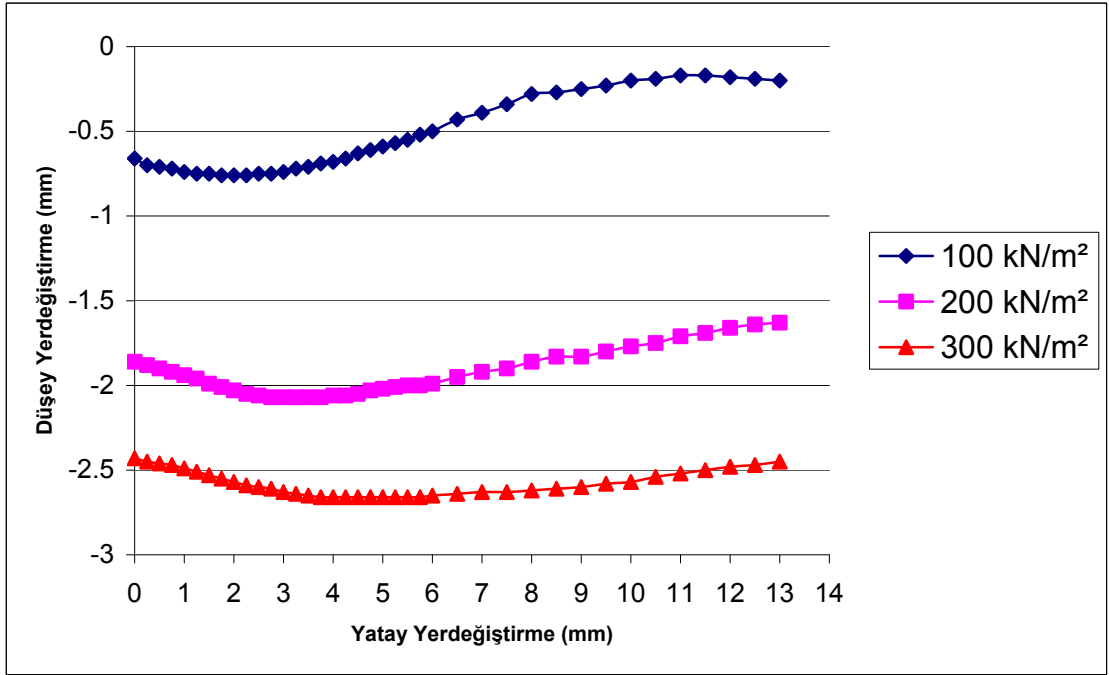
Şekil 6.8: %80 BK + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



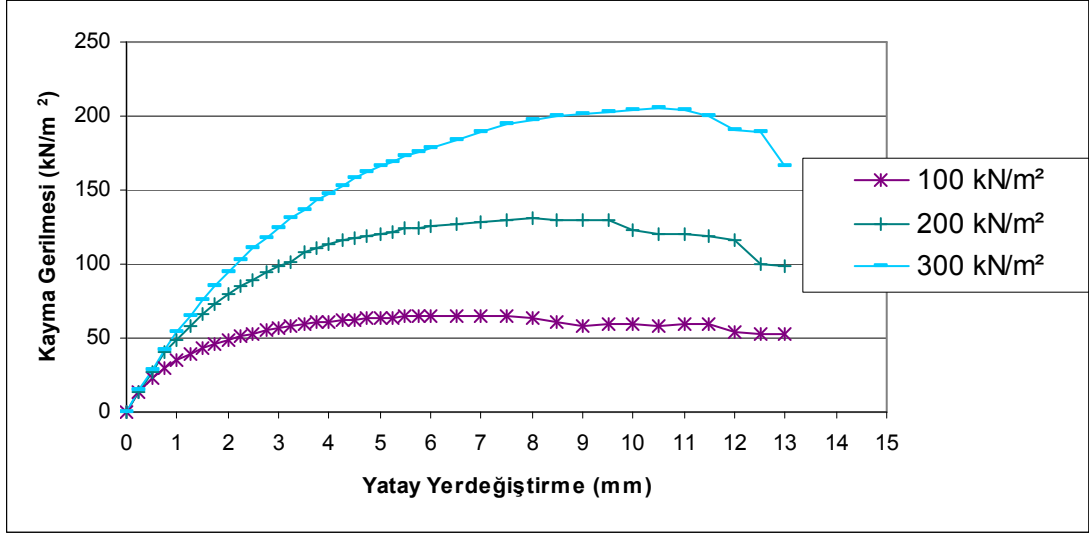
Şekil 6.9: %80 BK + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



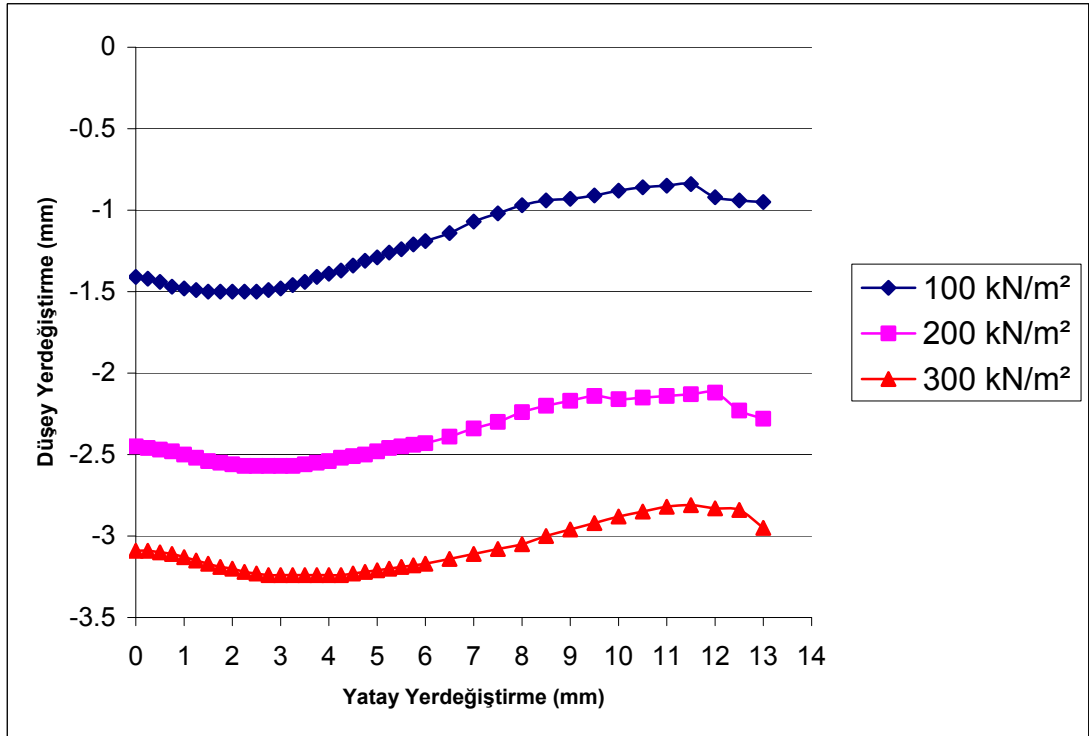
Şekil 6.10: SM'ye ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



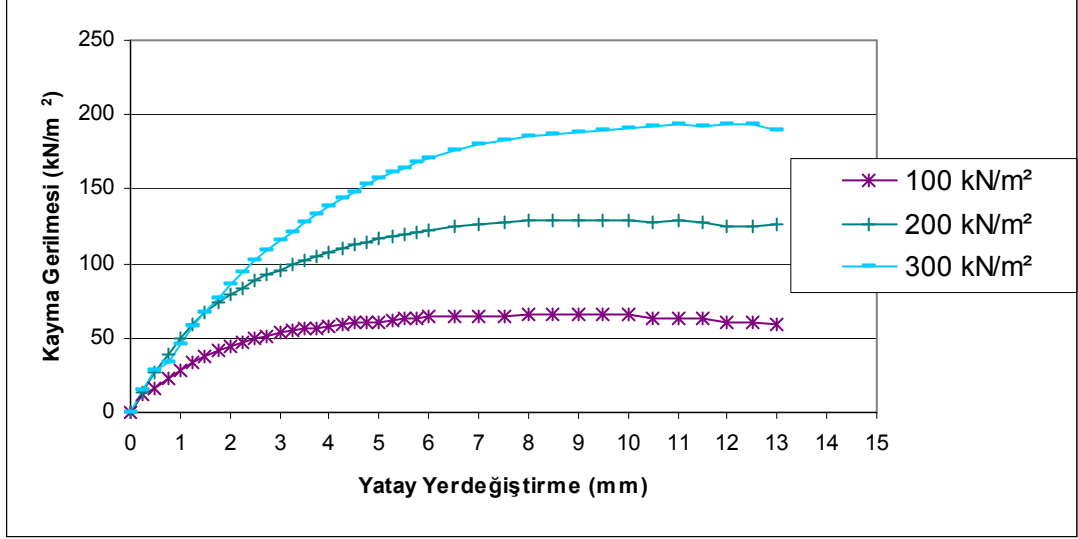
Şekil 6.11: SM'ye ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadr)



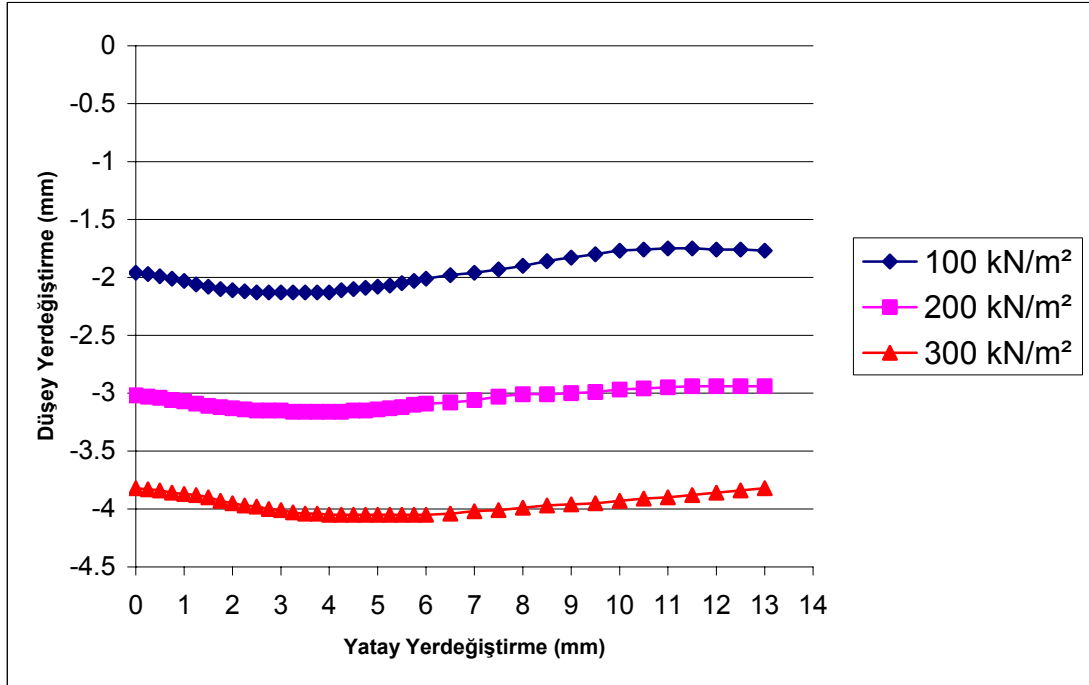
Şekil 6.12: %90 SM + %10 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



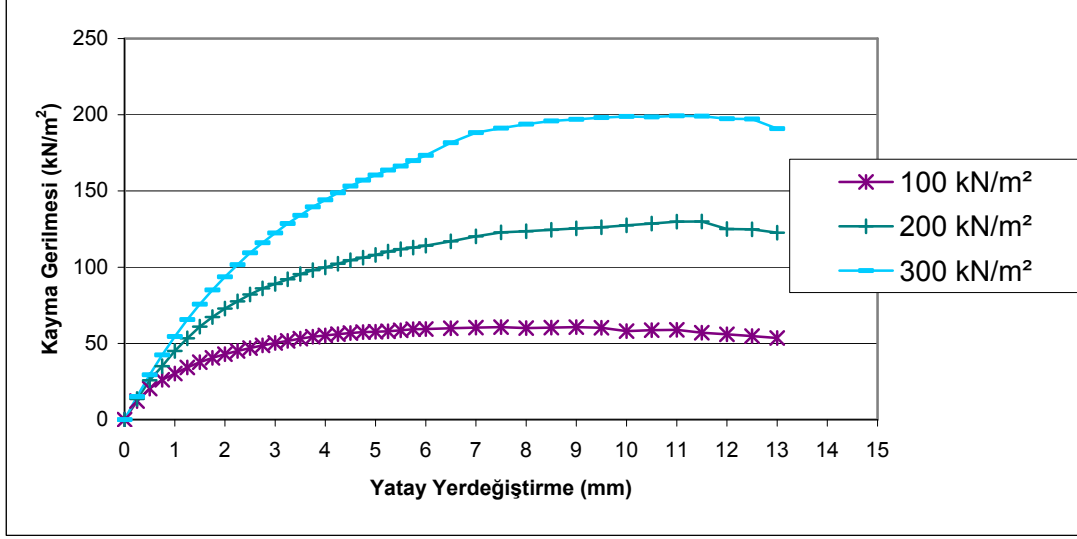
Şekil 6.13: %90 SM + %10 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



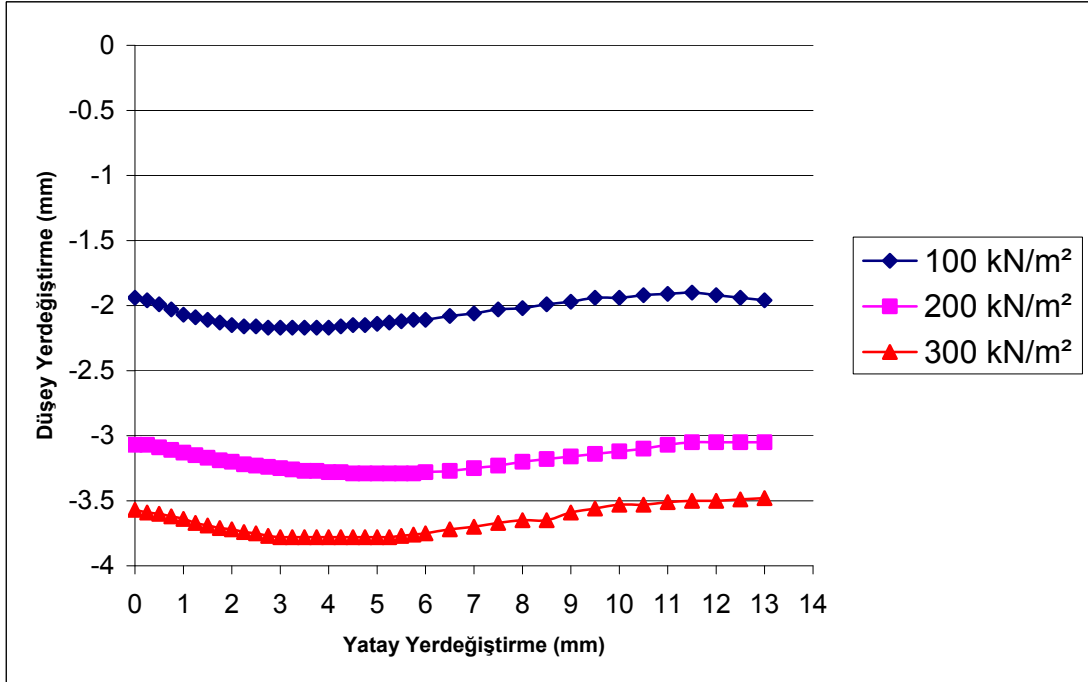
Şekil 6.14: %80 SM + %20 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



Şekil 6.15: %80 SM + %20 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadr)

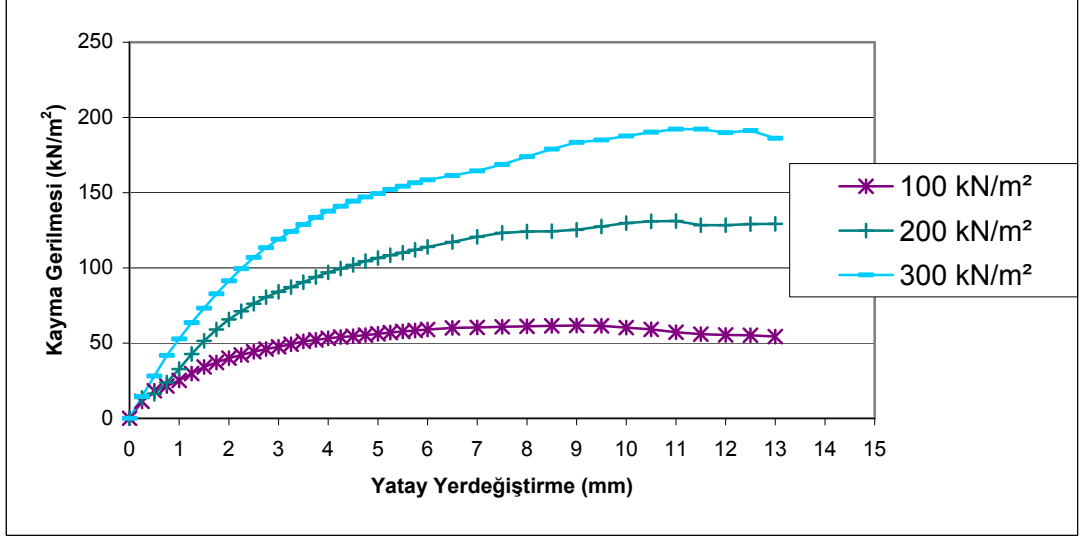


Şekil 6.16: %80 SM + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği

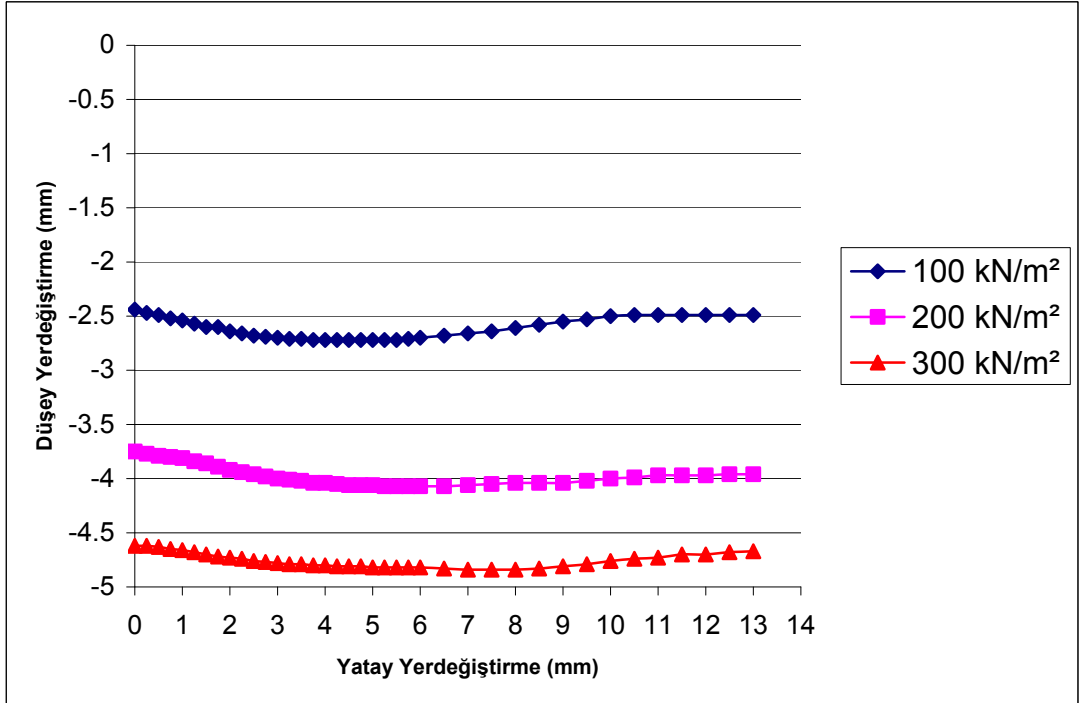


Şekil 6.17: %80 SM + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmaz)

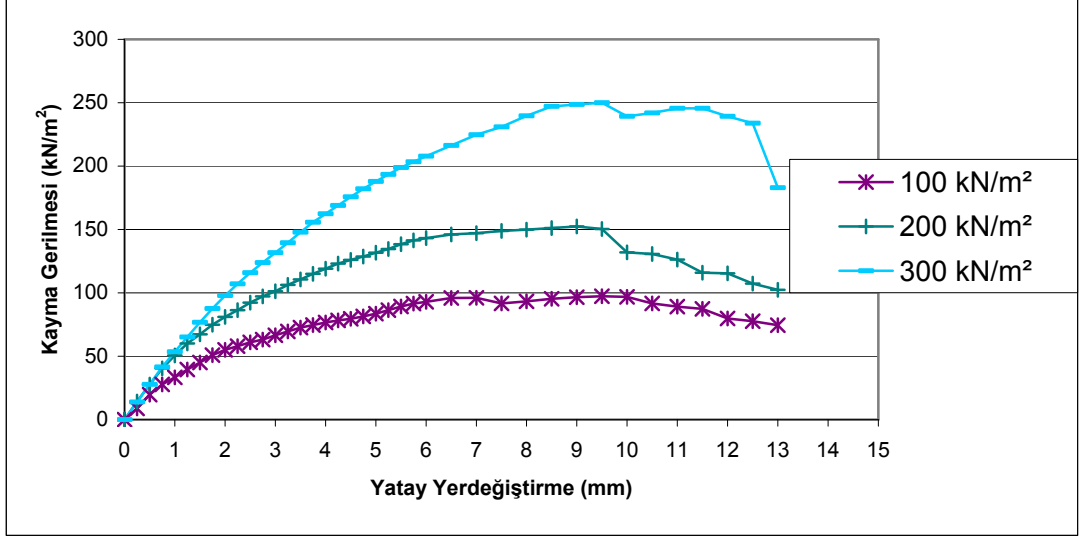




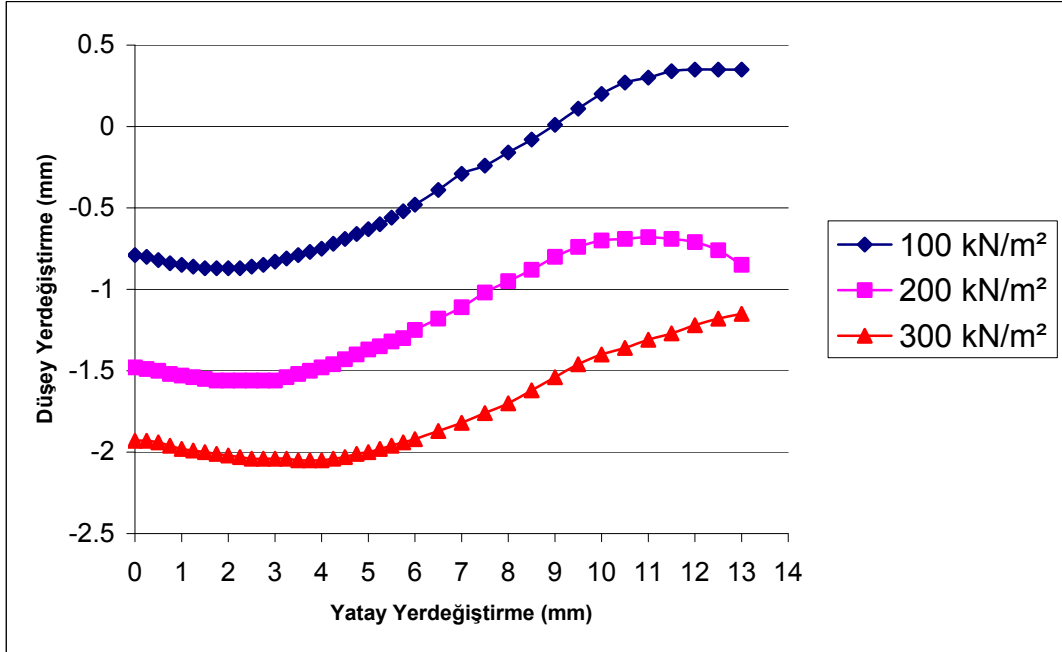
Şekil 6.18: %70 SM + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



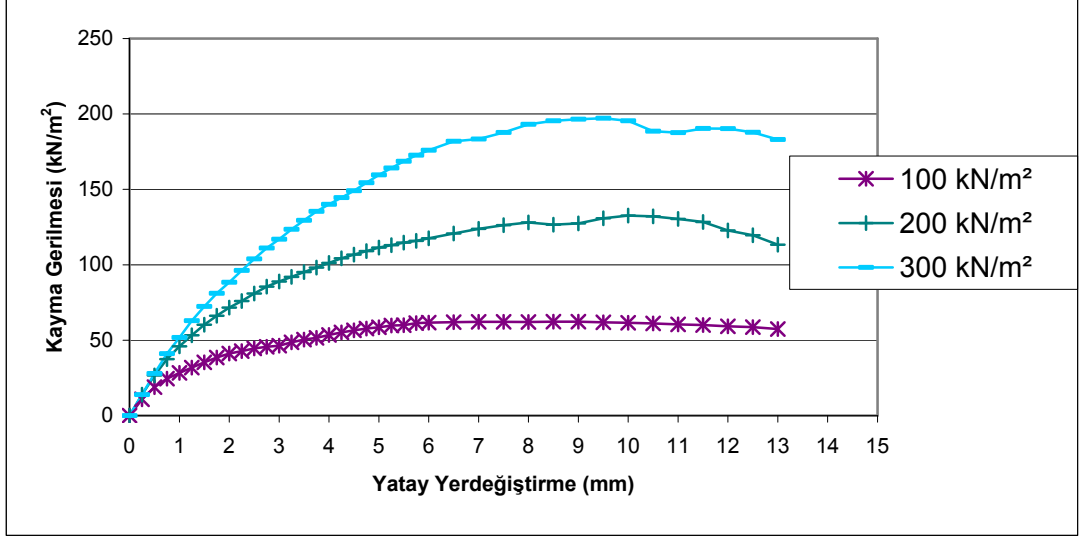
Şekil 6.19: %70 SM + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



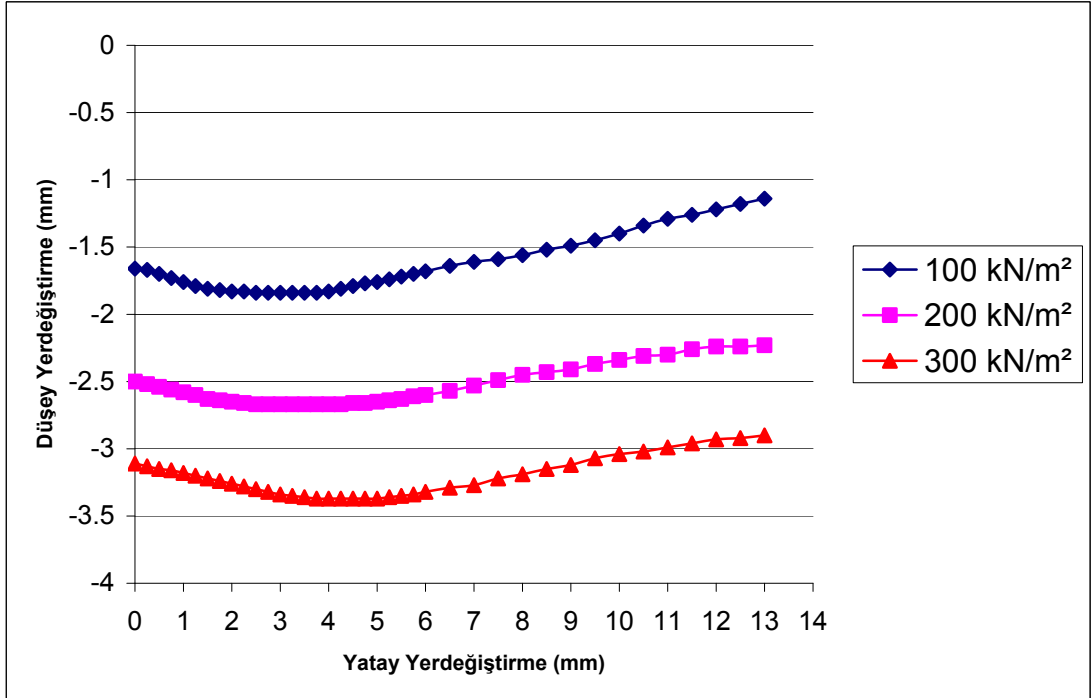
Şekil 6.20: LS'ye ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



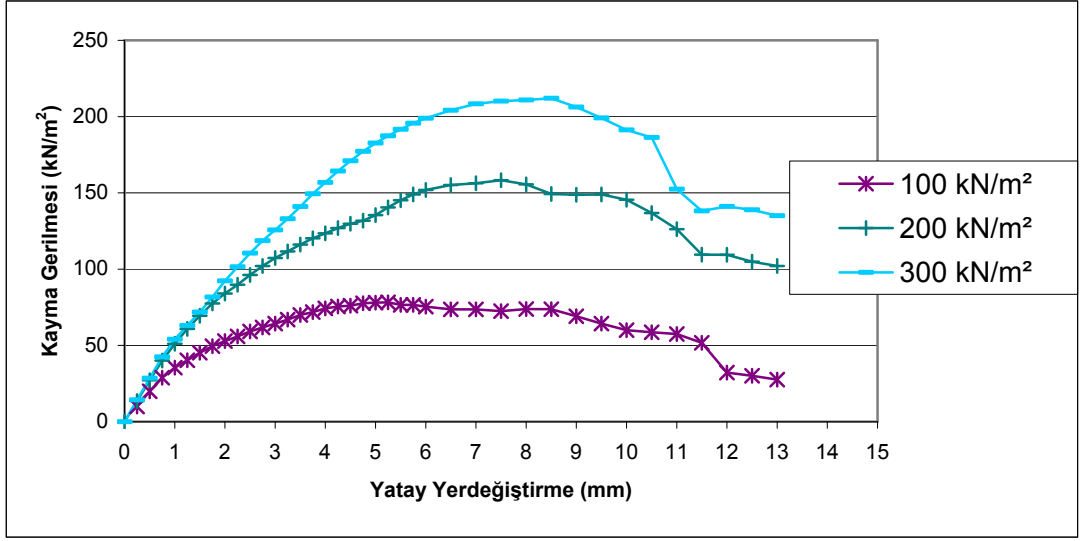
Şekil 6.21: LS'ye ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



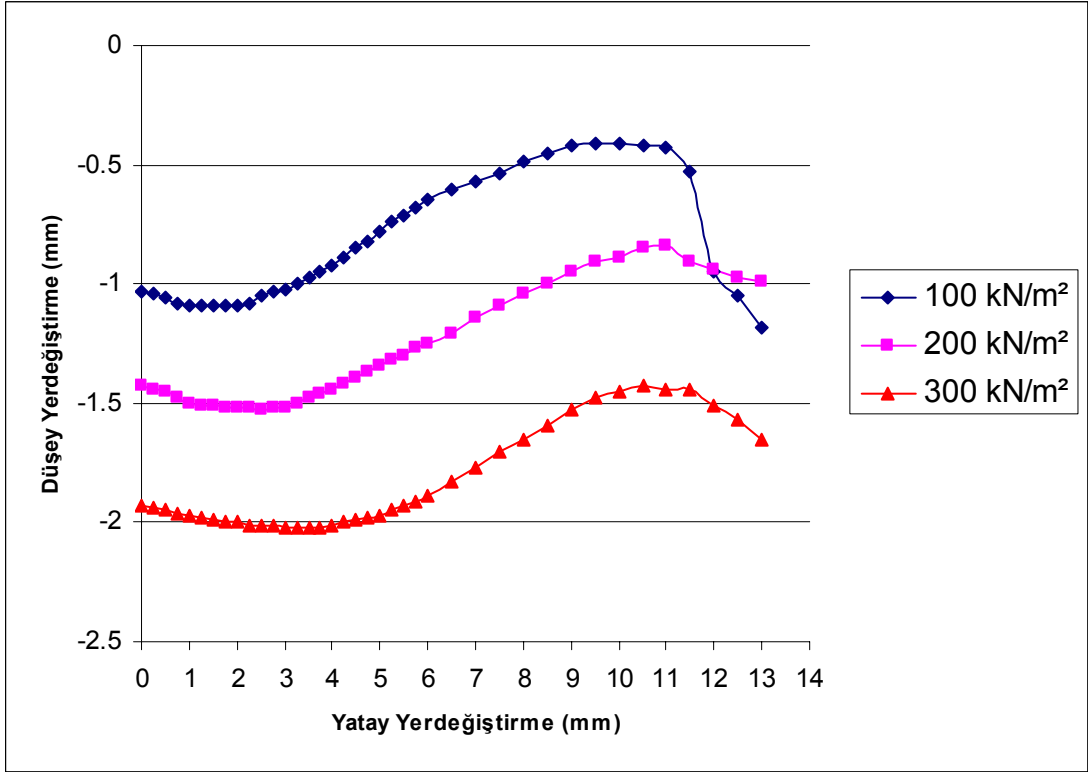
Şekil 6.22: %80 LS + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



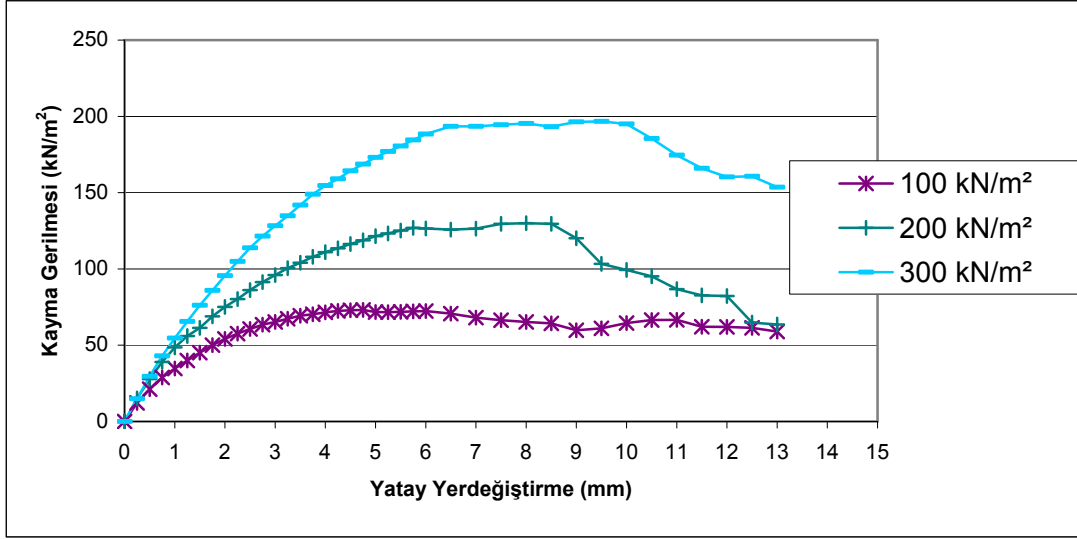
Şekil 6.23: %80 LS + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düsey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düsey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



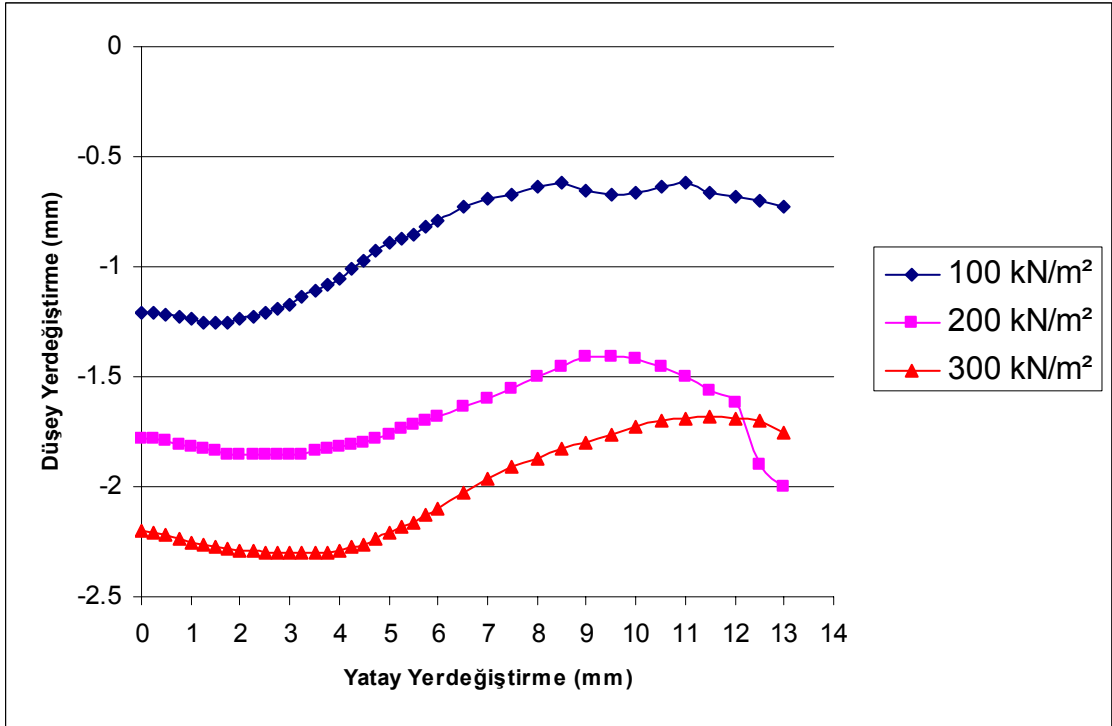
Şekil 6.24: KY'ye ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



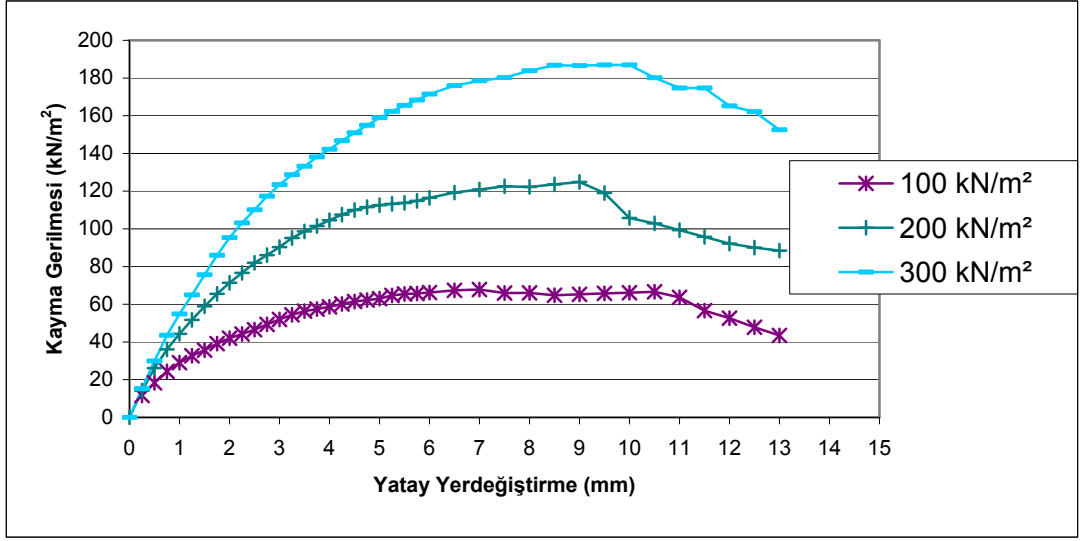
Şekil 6.25: KY'ye ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



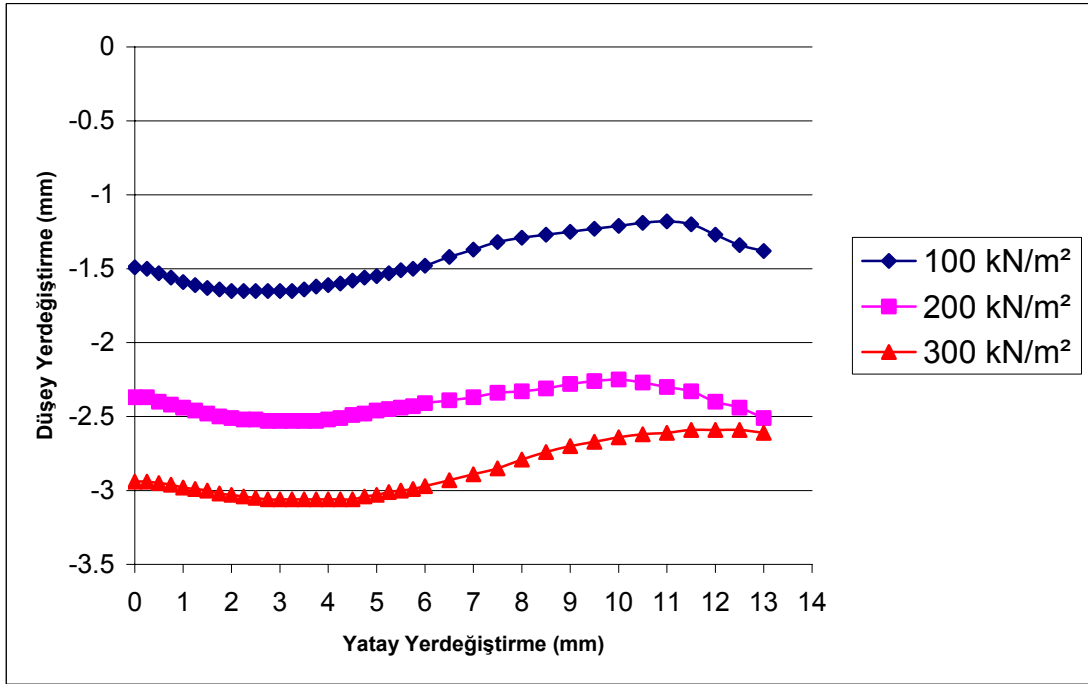
Şekil 6.26: %90 KY + %10 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



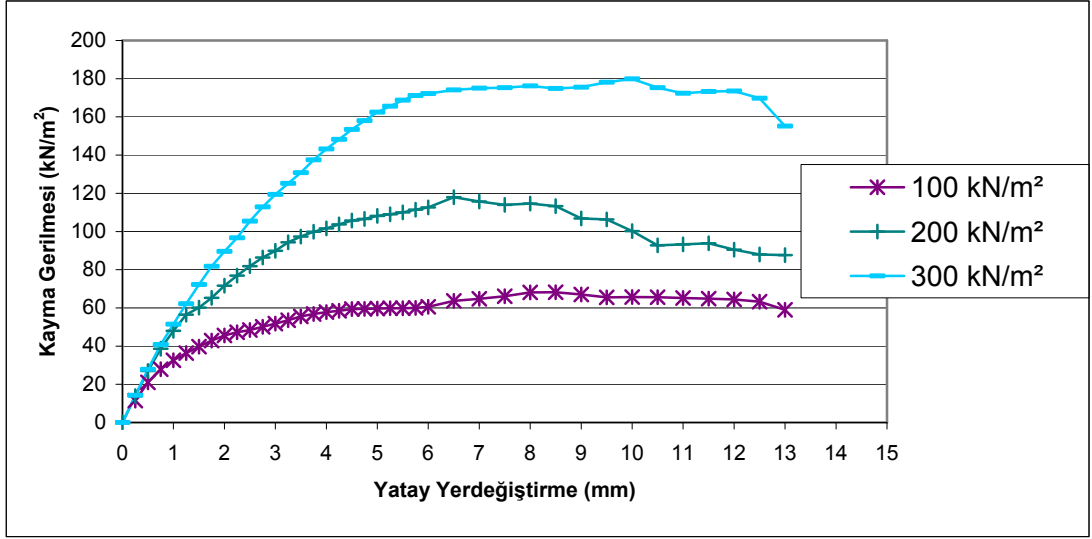
Şekil 6.27: %90 KY + %10 kağıt karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



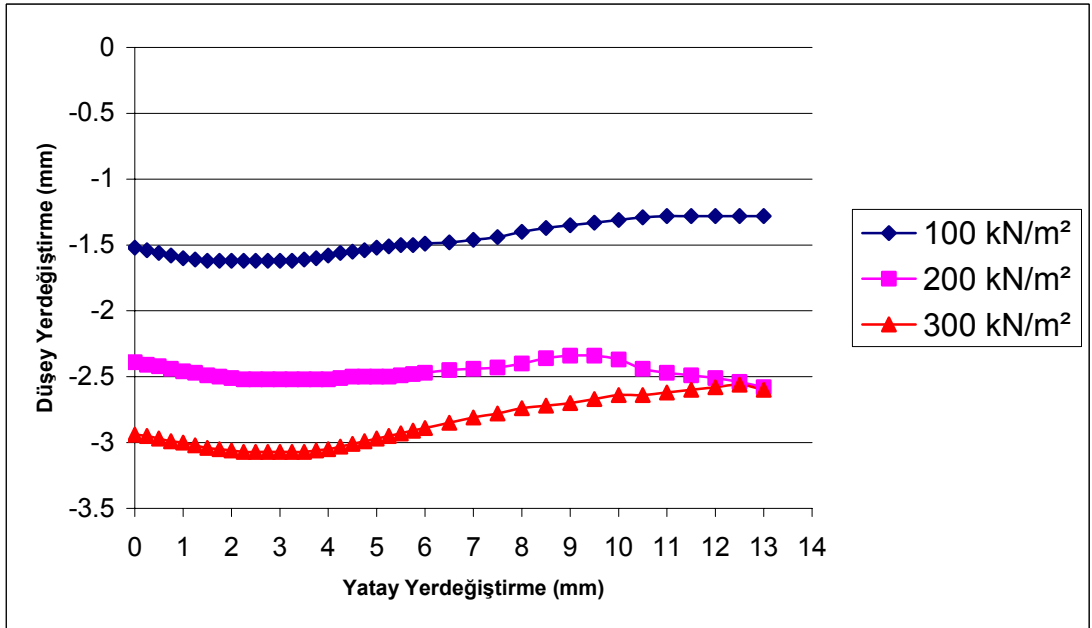
Şekil 6.28: %80 KY + %20 kağıt karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



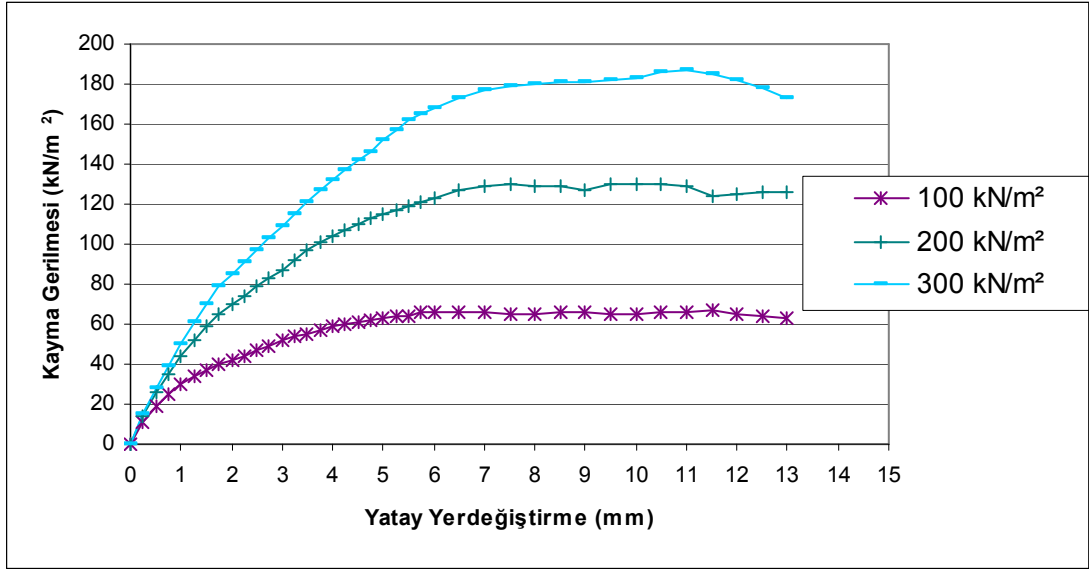
Şekil 6.29: %80 KY + %20 kağıt karışımına ait düsey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düsey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)



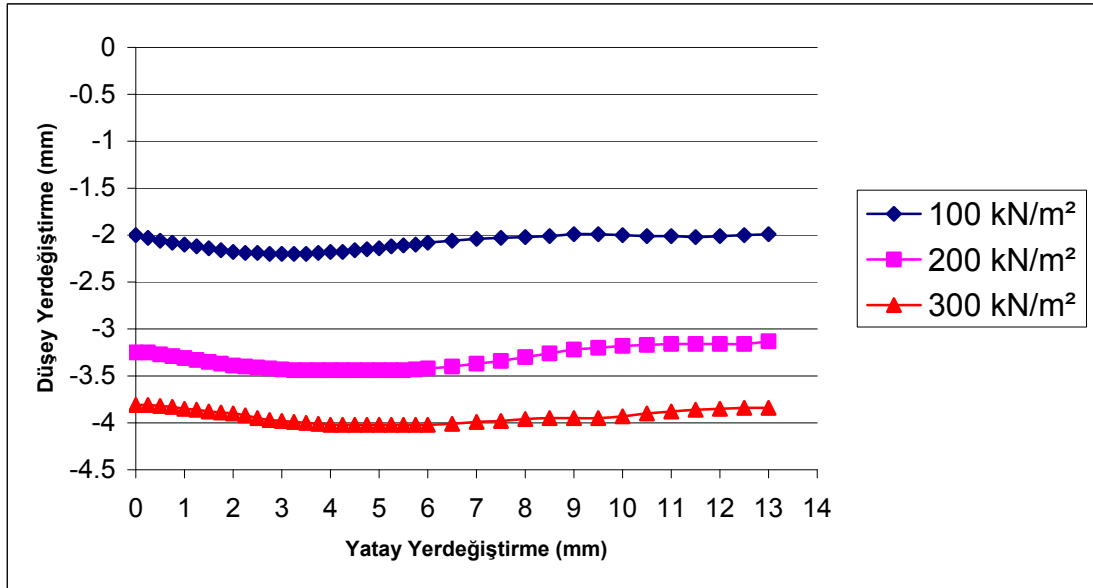
Şekil 6.30: %80 KY + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği



Şekil 6.31: %80 KY + %10 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)

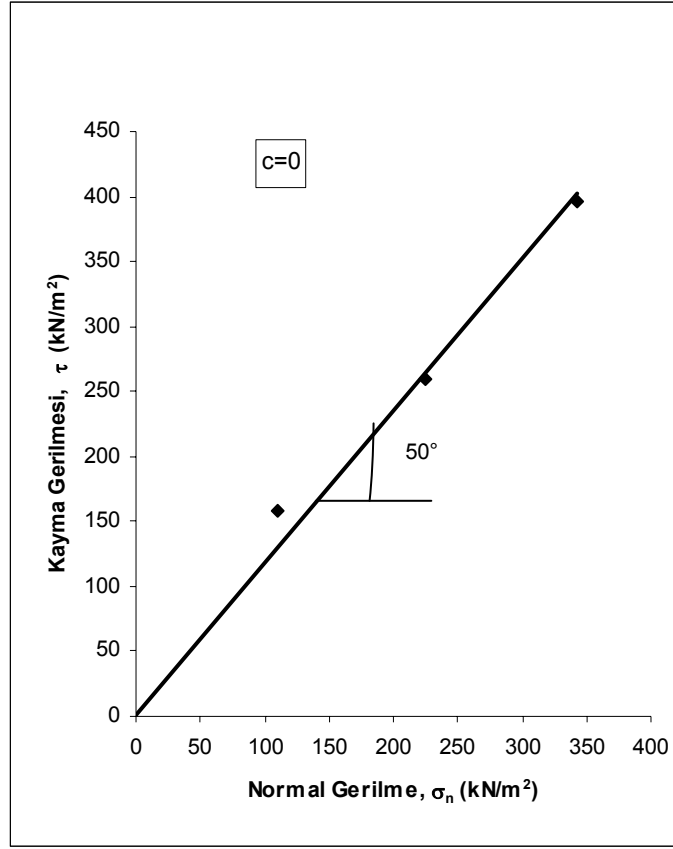


Şekil 6.32: %70 KY + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme grafiği

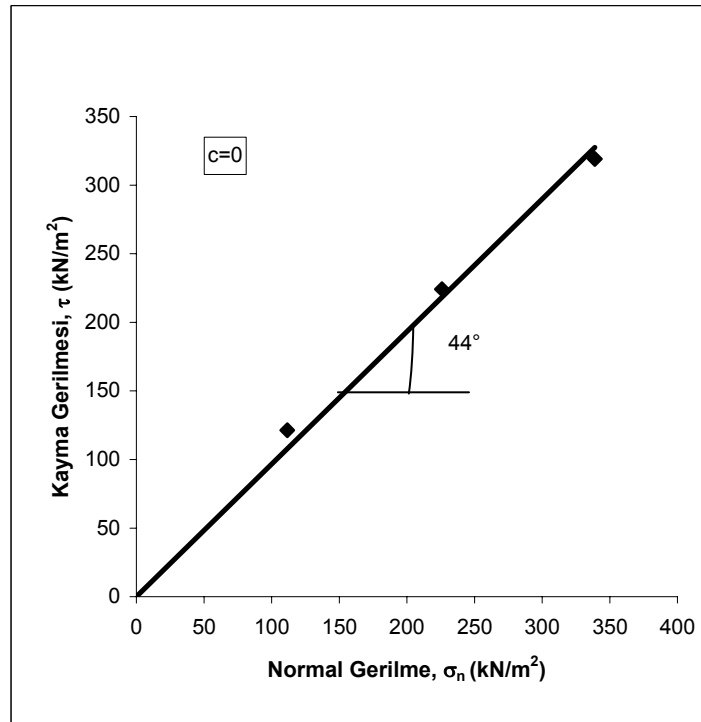


Şekil 6.33: %70 KY + %20 kağıt + %10 keçe karışımına ait düşey yer değiştirme-yatay yer değiştirme grafiği (düşey yer değiştirmede negatif değerler oturmadır)

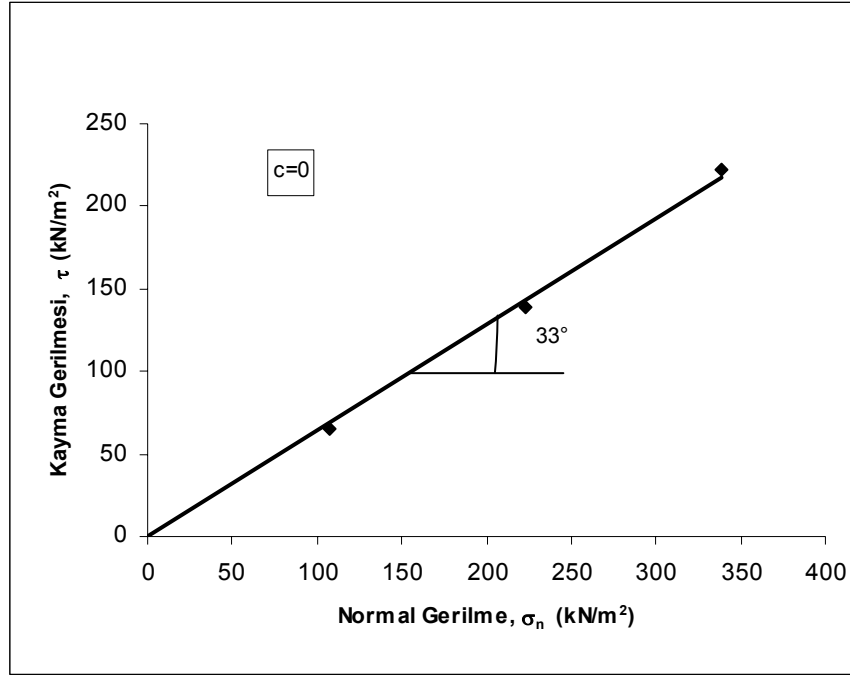




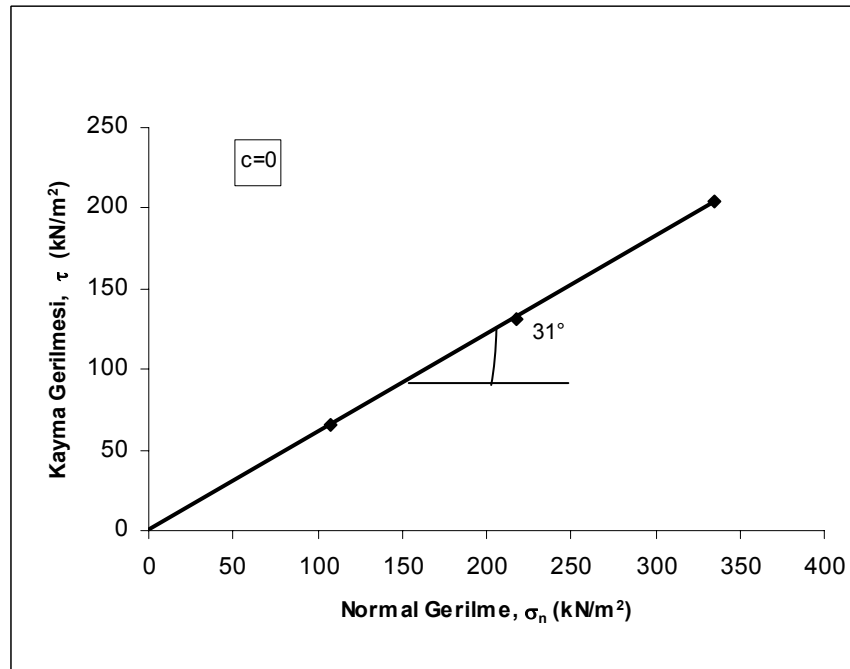
Şekil 6.34: BK Kırılma Zarfı



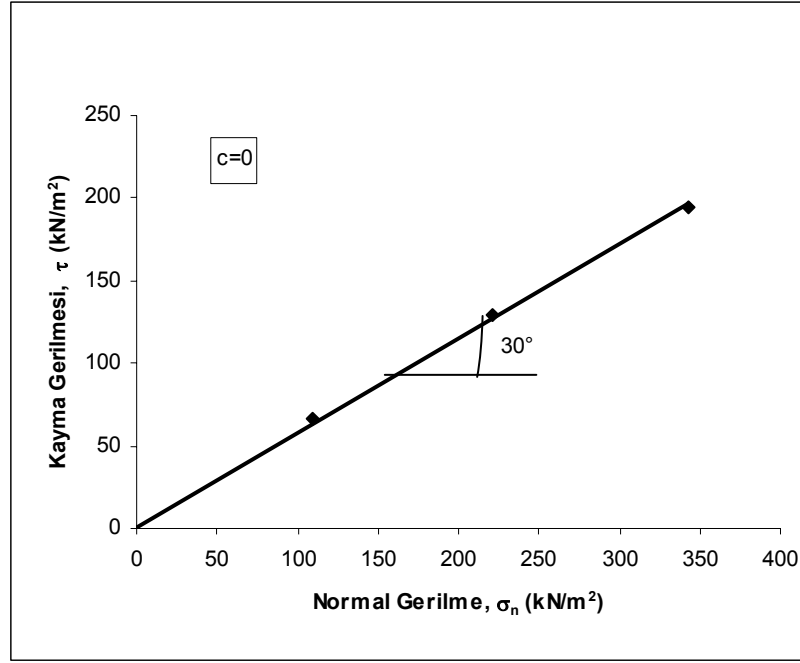
Şekil 6.35: %80 BK + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı



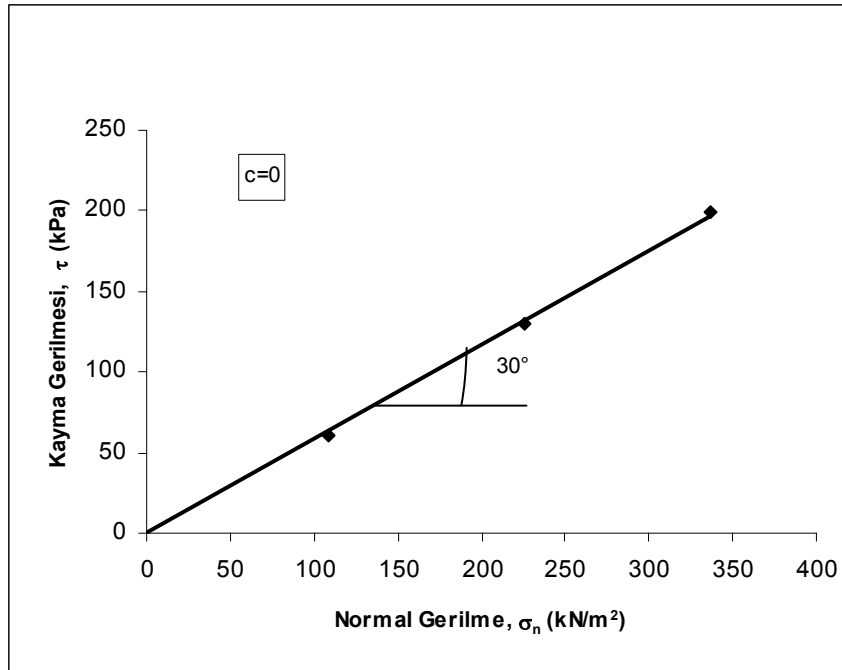
Şekil 6.36: SM Kırılma Zarfı



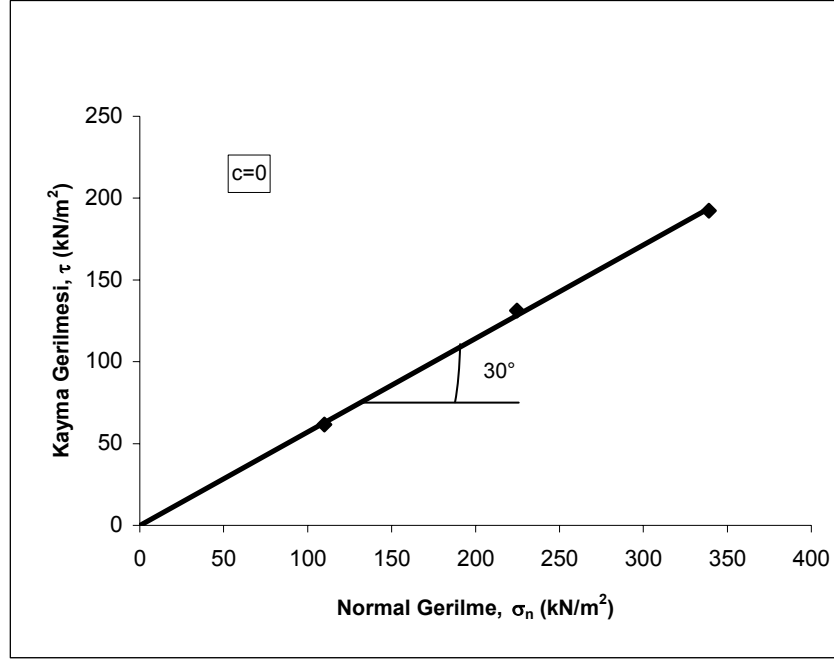
Şekil 6.37: %90 SM + %10 kağıt karışım Kırılma Zarfı



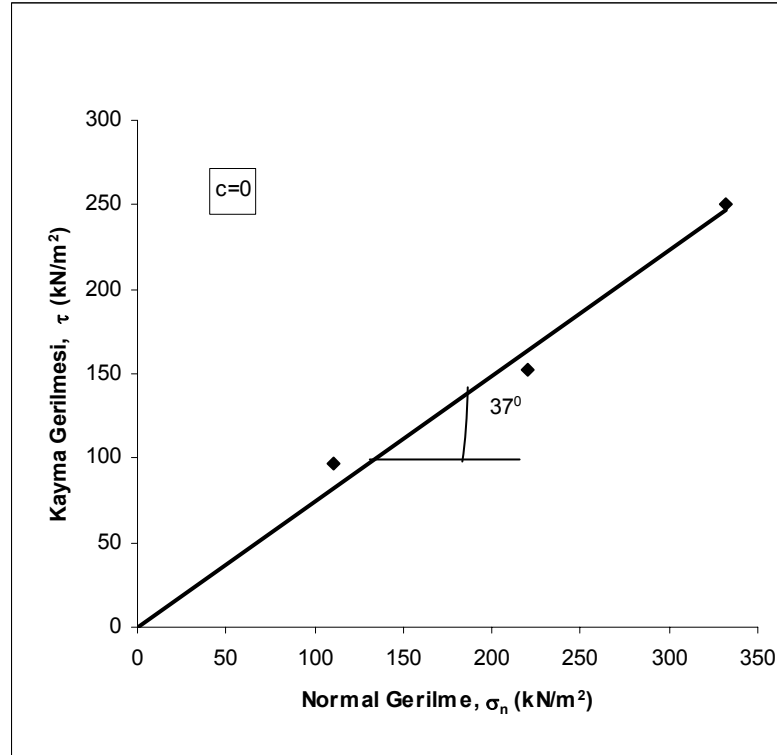
Şekil 6.38: %80 SM + %20 kağıt karışım Kırılma Zarfı



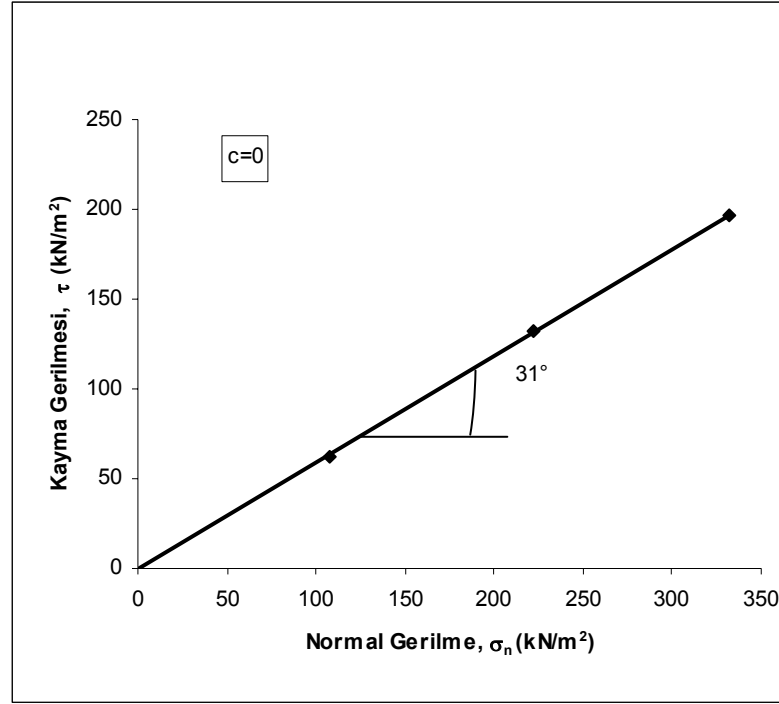
Şekil 6.39: %80 SM + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı



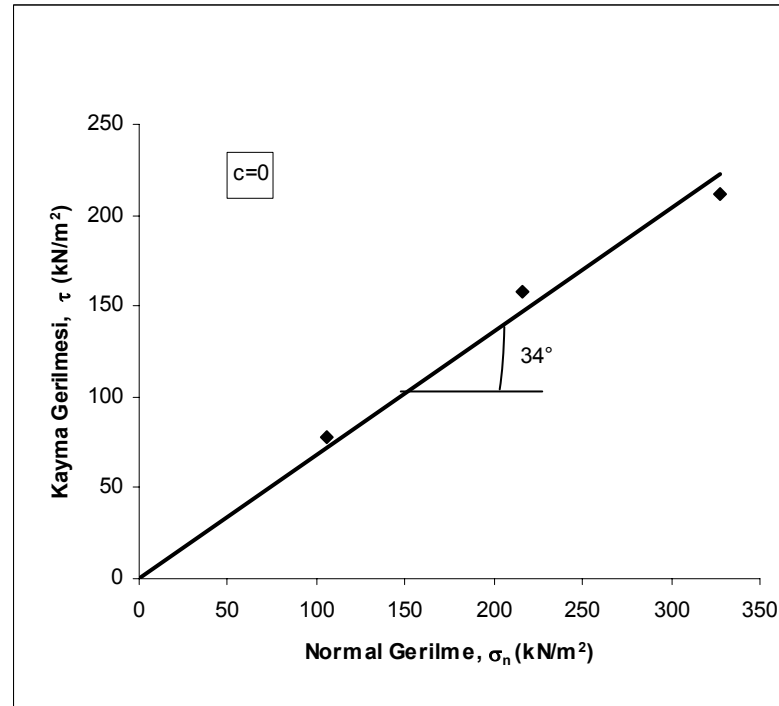
Şekil 6.40: %70 SM + %20 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı



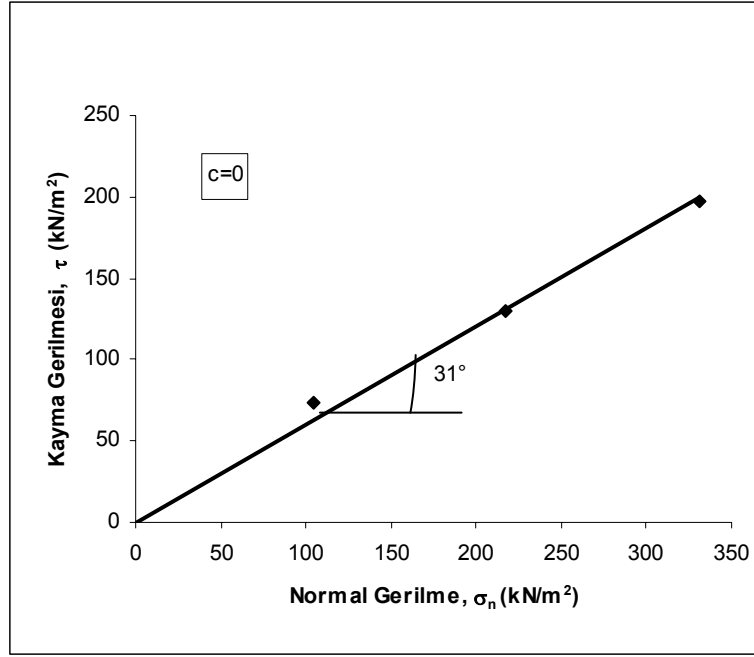
Şekil 6.41: LS Kırılma Zarfı



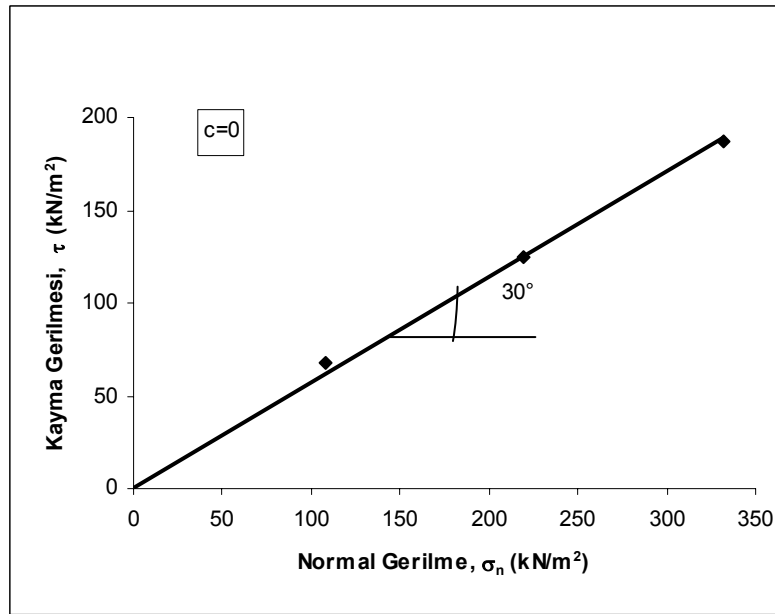
Şekil 6.42: %80 LS + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfı



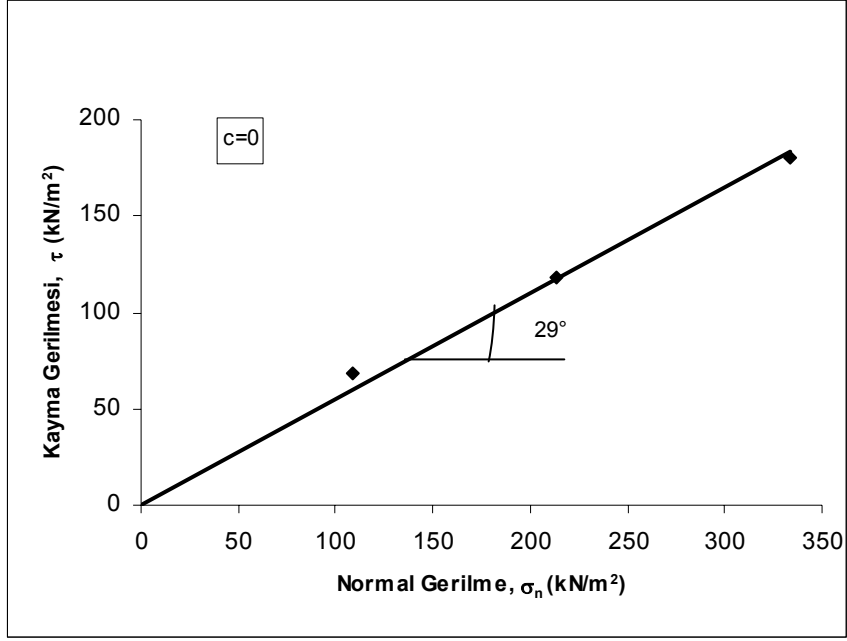
Şekil 6.43: KY Kırılma Zarfı



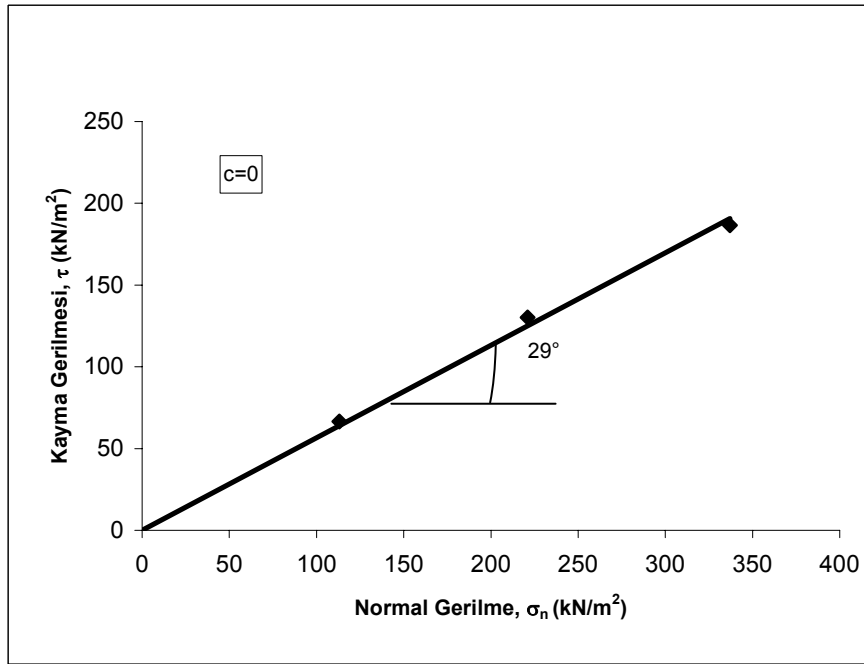
Şekil 6.44: %90 KY + %10 kağıt karışım Kırılma Zarfı



Şekil 6.45: %80 KY + %20 kağıt karışım Kırılma Zarfı



Şekil 6.46: %80 KY + %10 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfi



Şekil 6.47: %70 KY + %20 kağıt + %10 keçe karışım Kırılma Zarfi

**Tablo 6.2:** Kesme kutusu deneyleri toplu sonuçları

Numune Tipi	$\gamma_k$ (t/m <sup>3</sup> )	$\tau_{maks}$ (kN/m <sup>2</sup> )			c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
		$\sigma_n$ (kN/m <sup>2</sup> )				
		100	200	300		
BK	0.66	158	296	397	0	50
%80 BK %10 Kağıt %10 Keçe	0.59	121	224	319	0	44
SM	0.61	65	139	222	0	33
%90 SM %10 Kağıt	0.61	65	130	205	0	31
%80 SM %20 Kağıt	0.59	66	130	194	0	30
%80 SM %10 Kağıt %10 Keçe	0.57	61	130	199	0	30
%70 SM %20 Kağıt %10 Keçe	0.56	62	131	192	0	30
LS	0.56	97	152	250	0	37
%80 LS %10 Kağıt %10 Keçe	0.51	62	133	197	0	31
KY	0.53	78	158	212	0	34
%90 KY %10 Kağıt	0.53	73	130	197	0	31
%80 KY %20 Kağıt	0.52	68	125	187	0	30
%80 KY %10 Kağıt %10 Keçe	0.52	68	118	180	0	29
%70 KY %20 Kağıt %10 Keçe	0.52	67	134	187	0	29



**Tablo 6.3:** Kesme kutusu deneyleri oturma ve deformasyon modülü tablosu

Malzeme	BK	%80 BK %10Kğt %10 Keçe	SM	%90 SM %10Kğt	%80 SM %20Kğt	%80 SM %10Kğt %10Keçe	%70SM %20Kğt %10Keçe	LS	%80 LS %10Kğt %10Keçe	KY	%90KY %10Kğt	%80KY %20Kğt	%80KY %10Kğt %10Keçe	%70KY %20Kğt %10Keçe
$\phi$ (°)	50	44	33	31	30	30	30	37	31	34	31	30	29	29
Oturma (mm)	1.9	3.1	2.4	3.1	3.8	3.6	4.6	1.9	3.1	1.9	2.2	2.9	2.9	3.8
Oturma Modülü ( $\delta$ ) (kN/m)	185000	141000	113000	119000	108000	123000	92000	175000	138000	222000	202000	138000	141000	110000
Deformasyon Modülü (E) (kN/m <sup>2</sup> )	130	100	80	85	80	90	65	125	100	160	145	100	100	80

## 7. SONUÇLAR

Günümüzde artan nüfus, şehirleşme ve endüstrielleşmeyle birlikte çevrenin temiz tutulmasını, bu anlamda oluşan katı atıkların insan sağlığını bozmayacak şekilde uzaklaştırılması ve depolanması önem kazanmıştır. Bu amaç için, çevre mühendisleri ve geoteknik mühendisleri ortak çalışmalar yürütmektedirler. Çevre mühendisleri katı atık yönetiminin insan sağlığı açısından nasıl planlanması gerektiği, geoteknik mühendisleri ise oluşturulan katı atık depo alanlarının stabilite tahkikleri ile ilgilenmektedirler. Bu çalışmada katı atıkların kayma mukavemeti parametreleri ve oturma davranışları; kesme kutusu deneyleri ile laboratuvar şartlarında oluşturulan plastik granüler malzeme ve bu granüler malzemeye kağıt ve keçe kırıntısı eklenmesiyle oluşturulan karışımlarla modellenmiştir.

Plastik granüler malzemeler dane biçimlerine 4 grupta toplanabilir;

- Beyaz renkli kübik numune (BK) Akrilonitril-Bütadien Sitrin (ABS);
- Sarı renkli mercimek numune (SM) Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE);
- Lacivert renkli silindirik numune (LS) Polipropilen (Moblen) (PP);
- Kahve renkli yuvarlak numune (KY) Polipropilen (Moblen) (PP).

Kullanılan kağıt kırıntıları kırtasiyelerdeki ciltleme işlemi sonucunda ortaya çıkan kağıt atıklardan, keçe kırıntıları ise makasla belli boyutlarda kesilerek elde edilmiştir. Plastik granüler malzemeler ortalama 2 ~ 6 mm boyutlarındadır. Beyaz renkli kübik granüler plastik numune (BK) boyutları 3 mm civarında ve küp şeklinde, lacivert renkli silindirik granüler plastik numune (LS) çapı 4 ~ 5 mm yüksekliği ise 5 ~ 7 mm olan silindir şeklinde, kahverengi yuvarlak granüler plastik numune (KY) çapı 4 ~ 6 mm olan küre şeklinde, sarı renkli mercimek granüler plastik numune (SM) ise kalınlığı 1.5 mm, çapı ise 4 ~ 6 mm olan mercimek şeklindedir. Kağıt kırıntıları 4 x 4 mm kare veya 3 x 8 mm dikdörtgen kesitindedir. Keçe kırıntıları ise 5 x 5 mm boyutlarında kare kesitlidir.

Piknometre deneylerinde malzemenin dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s$ , rölatif sıklık deneylerinde ise maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax,min}$  ile maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max,min}$  bulunmuştur. Bu iki deneyin sonuçları göre;

- Beyaz renkli kübik granüler plastik numune (BK)

Dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s=10.7 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax}=7.1$  ve  $\gamma_{kmin}=6.2 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max}=0.72$  ve  $e_{min}=0.51$

- Sarı renkli mercimek granüler plastik numune (SM)

Dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s=9.2 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax}=6.3$  ve  $\gamma_{kmin}=5.9 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max}=0.57$  ve  $e_{min}=0.46$

- Lacivert renkli silindirik granüler plastik numune (LS)

Dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s=8.8 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax}=5.9$  ve  $\gamma_{kmin}=5.3 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max}=0.65$  ve  $e_{min}=0.48$

- Kahverengi yuvarlak granüler plastik numune (KY)

Dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s=7.9 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax}=5.5$  ve  $\gamma_{kmin}=5.1 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max}=0.56$  ve  $e_{min}=0.43$

- Kağıt kırıntısı

Dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s=12.8 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum dane birim hacim ağırlıkları  $\gamma_{kmax}=4.0$  ve  $\gamma_{kmin}=2.2 \text{ kN/m}^3$ , maksimum ve minimum boşluk oranları  $e_{max}=4.8$  ve  $e_{min}=2.2$

- Saf Alkol

Yoğunluğu oda şartlarında  $7.9 \text{ kN/m}^3$

değerleri bulunmuştur.

- Bu değerlerden anlaşılacağı gibi beyaz renkli kübik granüler plastik numune (BK) suda batmakta diğer granüler plastik malzemeler ise suda yüzmektedir. Saf alkolde ise kahverengi yuvarlak granüler plastik malzeme (KY) hariç diğer granüler plastik malzemeler batmaktadır.
- En büyük, maksimum boşluk oranı değeri 0.72 en köşeli malzeme olan beyaz renkli kübik granüler plastik numuneye (BK) aittir. En küçük, minimum boşluk oranı değeri 0.43 ise en köşesiz malzeme olan kahverengi yuvarlak granüler plastik numuneye (KY) aittir.
- Kağıt kırıntısının ise minimum ve maksimum boşluk oranlarının çok farklı olmasından yola çıkarak düşey yük altında sıkışabilirliğinin çok yüksek olduğu, bu yüzden de kesme kutusu deneylerinde kullanılan karışımlarda oturumları arttıracığı söylenebilir.

Elek analizi deneyleri sonucunda ise;

- Beyaz renkli kübik granüler plastik numune (BK) dane boyutu 2~4.75 mm
- Sarı renkli mercimek granüler plastik numune (SM) dane boyutu 2~10 mm
- Lacivert renkli silindirik granüler plastik numune (LS) dane boyutu 2~10 mm
- Kahverengi yuvarlak granüler plastik numune (KY) dane boyutu 2~10 mm
- Kağıt kırıntısının dane boyutu 2~ 4.75 mm

değerlerine ulaşıldı.

Kesme kutusu deneyleri sonucunda ise;

- Numuneler plastik granüler malzeme oldukları için kesme kutusu deneylerinde kohezyonsuz zemin davranışı gözlenmiştir.
- Kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) ise sarı mercimekte  $33^\circ$ , kahverengi yuvarlakta  $34^\circ$ , lacivert silindirde  $37^\circ$ , beyaz küpte  $50^\circ$  olarak bulunmuştur. Bu sıralama en köşesiz malzeme olan sarı mercimekten en köşeli malzeme olan beyaz

kübe doğru artış göstermektedir. Bu da granüler malzemede dane şeklinin kayma mukavemetine olan etkisini göstermektedir.

- Deneyin başlangıcında düşey yer değiştirmede oturma yönünde küçük artışlar gözlenirken, bir süre sonra kabarma yönünde daha yüksek artışlar gözlenmiştir. Bunun nedeni kesme kutusunun hareketiyle birlikte numunelerin boşluklara doğru ilerlemeleri ve boşluklar tamamen dolduktan sonra danelerin birbiri üzerine çıkarak yaptıkları yer değiştirmelerdir. Bu yer değiştirmelerin miktarı danelerin boyutlarıyla ve köşelilikleriyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Küçükten büyüğe doğru sıralarsak sarı mercimek, kahve yuvarlak, lacivert silindir ve beyaz küp şeklindedir.
- Bazı deneylerde 11 mm'lik deformasyonlardan sonra rijit kutular birbirinden uzaklaştığı için kesme kutusunun dışına doğru numune dökülmüştür. Bu da deney sonuna doğru düşey yer değiştirme grafiklerinde ani düşüşlere neden olmuştur.
- Bütün numuneler yumuşama göstermektedir. Yüklemelere baktığımızda ise bu özellik yüksek yüklerde daha belirgin hale gelmektedir. Yani kırılma yüküne ulaşıldıktan sonraki düşüşler, yüksek düşey yükler altında düşük düşey yüklere göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca malzemenin köşeli yapısı da arttıkça bu düşüşler artmaktadır.
- Plastik malzemelere hacimsel olarak kağıt ve keçe kırpıntıları eklenerek yapılan karışımlarda kayma mukavemeti ( $\phi$ ) açısında  $5^{\circ}$  -  $6^{\circ}$  civarında azalmalar gözlenmiştir.
- Plastik malzemelere hacimsel olarak kağıt ve keçe kırpıntıları eklenerek yapılan karışımlarda kayma gerilmesi – yatay deformasyon değişimine bakıldığında kırılmanın belirginliği azalmaktadır, yani kırılma sonrası kayma gerilmesindeki düşüş netliğini kaybetmektedir.
- Düşey yer değiştirmelere bakıldığında ise; kağıt ve keçe oranlarını attığımızda deneye başlamadan önceki oturmaların da arttığı görülmüştür.

- Artan kağıt ve keçe oranları ile beraber oturma modülü ( $\delta$ ) ve deformasyon modülü (E) genel olarak düşüş göstermektedir.
- Plastik numunelere %10 kağıt eklenmesi durumunda kayma mukavemeti açısındaki ( $\phi$ ) azalma yönündeki değişim, %20 kağıt eklenmesi ve %10 kağıt %10 keçe eklenmesi durumlarına göre daha fazla olmaktadır. Sadece %20 kağıt eklenmesi durumu ile %10 kağıt %10 keçe eklenmesi durumlarında aynı kayma mukavemeti açılarına ulaşılmıştır.

Kesme kutusu deneylerinde genel olarak  $29^\circ$  ila  $50^\circ$  arası kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir, bu da katı atıklar üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçları ile örtüşmektedir. Tabii ki bu değerler katı atığın ayrışması, üzerindeki yük, katı atığın kompozisyonu gibi temel etkenlere de bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu yüzden deneylerde özellikle  $29^\circ$  ila  $37^\circ$  arasındaki değerler bulunabilecek karışımlar elde edilmiştir.

Böylece kesme kutusu deneyleri için granüler plastik, granüler plastik danelere kağıt ve keçe kırpıntısı eklenmesiyle oluşturulan karışımlarının katı atığın karakteristik kayma mukavemeti özelliklerini sağladığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- ASTM-D4253**, 2006 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, *American Society for Testing Materials*, West Conshohocken, USA.
- Bardet, J.P.**, 1997. Experimental Soil Mechanics, Prentice Hall, New Jersey.
- Bowles, J.E.**, 1986. Engineering Properties of Soils and Their Measurement, McGraw-Hill Inc., Singapore..
- Bray, J.D., Augello, A.J., Leonards G.A., Repetto, P.C. ve Byrne, R.J.**, 1995 Seismic Stability Procedures for Solid Waste Landfills, *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* , February, **121**, 139-151
- Daniel, D.E.**, 1994. Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall, London, New York..
- Dixon, N, Whittle, R.W., Jones, D.R.V. ve Ng'ambi, S.** 2006. Pressuremeter test in Municipal Solid Waste : Measurement of Shear Stiffness, *Geotechnique*, October, **56**,211-222.
- Gabr, M.A., Hossain, M.S. ve Barlaz, M.A.**, 2007 Shear Strength Parameters of MSW with Leachate Recirculation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, April, **133**, 478-484.
- Gören, S.**, 2006. Sanitary Landfill, Forart Matbaası., İstanbul.
- Kreith, F.**, 1994. Handbook of Solid Waste Management, *Solid Waste Stream Characteristics*, pp. 3.1-3.36, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Landva, A.O., Clark, J.I.**, 1990 Geotechnics of Wastefills-Theory and Practice, *ASTM STP 1070*, Eds. Landva., A, Knowles, G., Philadelphia.

- Machado, S.L., Carvalho, M.F. ve Vilar, O.M.**, 2002 Constitutive Model For Municipal Solid Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, November, **128**, 940-951.
- Marques, A.C.M., Filz, G.M. ve Vilar, O.M.**, 2003 Composite Compressibility Model For Municipal Solid Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, April, **129**, 372-378.
- McBean, E.A., Rovers, F.A. ve Farquhar, G.J.**, 1995 Solid Waste Landfill Engineering and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Oweis, I.S.**, 2006. Estimate of Landfill Settlements Due to Mechanical and Decompositional Process, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* , May, **132**, 644-650.
- Oweis, I.S. ve Khera, R.P.**, 1990 Geotechnology of Waste Management, Butterworths, London.
- Özaydın, K.**, 2005 Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi Ltd Şti, İstanbul.
- Özdemir, A.**, 1998 Evsel Katı Atıkların Geoteknik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Qian, X., Koerner, R.M., Gray, D.H.**, 2002 Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction, Prentice Hall, New Jersey.
- Qian, X., Koerner, R.M. ve Gary, D.H.**, 2003 Transitional Failure Analysis of Landfills, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* , June, **129**, 506-519.
- Sharma, H. D., Lewis S.P.**, 1994. Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfill: Desing and Evaluation, , John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Tan, O.**, 2001. Shear Strength of Municipal Solid Waste Laboratory Model Material, Jubilee Papers in honour of Professor Ergün Toğrol, pp. 111-114, İTÜ Pres Matbaası, İstanbul.



- Tan, O.**, 1995. On the Stability Analysis of Sanitary Landfill Slopes, *Proceedings II, 70 years of Soil Mechanics International Symposium*, Turkish National Committee for Soil Mechanics and Foundation Engineering, İstanbul, 92-98.
- TS-11708/T1**, 2006 Katı Atıkların Terim ve Sınıflandırılması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-12201**, 1997 Çöplük İçin Yer Seçim Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Van Impe, W.F. ve Bouzza, A.**, 1998. Large Shear Tests On Compacted Bales of Municipal Solid Wastes, *Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, **38**, 199-200.
- Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian, E., Matasovic, N.**, 2005 Framework For The Estimation of MSW Unit Weight Profile, *The 10th International Waste Management and Landfil Syposium, Proceedings Sardinia*, Cagliari, Italy, October 3-7.
- Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian, E.**, 2006 Unit Weight of Municipal Solid Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, October, **132**, 1250-1261.

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Karabük'ün Safranbolu ilçesinde doğdu. İlköğrenimini 1992 yılında Safranbolu Zati Ağar İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Karabük Anadolu Lisesi'nden 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılı ÖSS'de İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Üniversite öğrenimini 2004 yılında tamamladı. 2006 yılında İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans çalışmasına başladı. 2007 yılından itibaren inşaat mühendisliği konusundaki çalışmalarını Forum İstanbul Projesinde yüklenici firma MT İnşaat'ta kalite kontrol mühendisi olarak sürdürmektedir.