

**BOR ATIKLARININ ÇÖP DEPONİ
TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
GEOTEKNİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Eren BAYRAKCI

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim - 2015

Bu tez çalışması TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu) (Proje No: 113Y122) ve AÜBAP (Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı) (Proje No: 1301F037) tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Eren Bayrakcı'nın “Bor Atıklarının Çöp Deponi Tabakalarında Kullanılabilirliğinin Geoteknik Açısından Değerlendirilmesi” başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 20.10.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<u>Adı Soyadı</u>	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. Yücel GÜNEY	
Üye :	Prof. Dr. Müfide BANAR	
Üye :	Yard. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/10/2015 tarih ve 20/33 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BOR ATIKLARININ ÇÖP DEPONİ TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN GEOTEKNİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Eren BAYRAKCI

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yücel GÜNEY

2015, 101 Sayfa

Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nden elde edilen atık kil, toprak ve yeraltı suları için potansiyel risk olmakla birlikte oldukça büyük çevre problemlerine neden olmaktadır. Dolayısıyla bu kilin yeniden değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, atık kilin ve atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışım hallerinin düzenli depolama tesislerinde (DDT) geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Laboratuvarda atık kilin ve karışım hallerinin geoteknik özellikleri belirlenmiş ve Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe göre geçirimsiz tabaka olarak kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmıştır.

Atık kilin su muhtevası belirlendikten sonra, deneylerin yapılabilirliği için kurutulup öğütülmüştür. Atık kilin fiziksel (özgül ağırlık değeri, Atterberg kıvam limitleri ve dane çapı dağılımı) ve mekanik özellikleri (standart proktor testi, serbest basınç dayanımı, şişme yüzdesi değeri ve permeabilite katsayısı) belirlenmiştir. Atığın geoteknik özellikleri tanımlandıktan sonra, atık lastik ve bentonit ile karıştırılarak karışımların DDT’ler için geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Farklı oranlarda karıştırılan atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarının, plastisite indeksi, optimum su muhtevası, serbest basınç (kg/cm^2), şişme yüzdesi (%) ve hidrolik iletkenlik $k(\text{m/sn})$ değerleri belirlenerek, en uygun numune belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak, belirlenen en uygun numune ile yapılan sızıntı suyu çalışmalarıyla deneysel çalışmalar sonlandırılmıştır. Çalışmalar sonucunda, atık kilin I., II. ve III. sınıf DDT’lerde geçirimsiz kil tabakası olarak kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık kil, Bor, Düzenli Depolama

ABSTRACT

Master of Science Thesis
THE GEOTECHNICAL ASPECTS EVALUATION
OF USABILITY IN LANDFILL LAYERS
OF BORON WASTES

Eren BAYRAKCI
Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Engineering Program

Supervisor: Prof. Dr. Yücel GÜNEY
2015, 101 pages

Waste clay which is obtained from Eskişehir Kırka Boron Works, causes sizable environmental problems, as well as being the potential risk for soil and groundwater. Therefore, it is important to re-evaluate of this clay. In this study, waste clay and waste clay/bentonite and waste clay/waste tire mixtures were aimed to investigate the availability of the impermeable layer of landfill. The geotechnical properties of waste clay and waste clay's mixture forms was determined in laboratory and according to Regulation of Sanitary Landfills were investigated availability in impermeable layer.

After determining the water content of the waste clay, for the feasibility of experiments waste clay is ground after drying. The physical properties (specific gravity value, Atterberg consistency limits and grain size distribution) and the mechanical properties (standard proctor test, unconfined compressive strength, swelling percentage and permeability coefficient) of the waste clay was defined. After the geotechnical properties of the waste clay is defined, the availability of the occurring mixtures mixing with bentonite and waste tire was investigated as impermeable layer in landfills. The plasticity index, optimum water content, unconfined compressive strength and hydraulic conductivity coefficient of waste clay/bentonite and waste clay/waste tire mixtures which mixed in different proportions was determined, and tried to determine the most suitable sample. Finally, the experimental studies was terminated with made leachate works with determined most suitable samples. As a result of studies, the availability of waste clay as impermeable layer has been proven in I., II. and III. class landfills.

Keywords: Waste clay, Boron, Sanitary landfill

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisini ve deneyimini esirgemeyen, yardımları ile çalışmalarımı yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Yücel GÜNEY'e, maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim, bilgi ve deneyimleriyle bana çok şey katan sevgili hocam Doç. Dr. Müfide BANAR'a, her türlü desteklerini benden esirgemeyen Doç. Dr. Aysun ÖZKAN ve Yrd. Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA'ya,

Desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli arkadaşım Derya ULUTAŞ'a ve deneylerin hazırlanmasında yardımcı olan Nazım ERDURAN'a,

Tez çalışmamı destekleyen TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Proje No: 113Y122) ve AÜBAP'a (Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı, Proje No: 1301F037),

Tez çalışmam için gerekli olan malzemelerin tedarikini sağlayan Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü ve Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'ne atık kil için, sızıntı suları için ise KÜKAB (Kütahya Katı Atık Birliği) ve İZAYDAŞ'a (İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş.),

Tez çalışmam boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan, karşılıksız ve koşulsuz her zaman yanımda olan ve benim için her türlü fedakârlıktan kaçınmayan babam M. Emin BAYRAKCI, annem Mehtap BAYRAKCI ve kardeşlerim A.Cenk BAYRAKCI ve Elif BAYRAKCI'ya,

Zorlandığım günlerin en önemli moral kaynağı, güzel günlerimin sebebi olan, bana tarifi olmayan bir mutluluk ve huzur tattıran, sevgisi, desteği ve anlayışıyla her zaman yanımda hissettiğim eşim Tuğçe BAYRAKCI'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Eren BAYRAKCI

Ekim 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Bilgileri	2
2. KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİ ve GEÇİRİMSİZ TABAKA SİSTEMİ	9
2.1. Düzenli Depolama Tesislerinin Gereklilikleri.....	13
2.2. Geçirimsiz Tabaka	16
2.2.1. Tabaka sistemi.....	17
2.2.2. Sızıntı toplama ve uzaklaştırma sistemi	18
2.2.3. Gaz toplama ve kontrol sistemi	19
2.2.4. Üst örtü sistemi.....	19
2.3. Sıkıştırılmış Kil Tabakaları	20
2.3.1. Sıkıştırılmış kil tabakalarının tasarımı	24
2.3.1.1. Düşük permeabilite	25
2.3.1.2. Yeterli serbest basınç mukavemeti	27
3. MATERYAL ve METOD	30
3.1. Atık Kilin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	32
3.1.1. Atık kilin fiziksel (indeks) özelliklerinin belirlenmesi	32
3.1.1.1. Su muhtevası	32
3.1.1.2. Özgül ağırlık	32
3.1.1.3. Dane çapı dağılımı	33

3.1.1.4. Atterberg kıvam limitleri	34
3.1.2. Atık kilin mekanik özelliklerinin belirlenmesi.....	35
3.1.2.1. Kompaksiyon deneyi	35
3.1.2.2. Serbest basınç deneyi	36
3.1.2.3. Permeabilite deneyi.....	37
3.1.2.4. Şişme yüzdesi deneyi	38
3.2. Atık Kilin DDT’lerde Geçirimsiz Tabaka Olarak Kullanımı ile İlgili	
Deneysel Çalışmalar	40
3.2.1. Geçirimsiz tabaka sisteminde kullanılan malzemeler	40
3.2.1.1. Atık kil	40
3.2.1.2. Bentonit.....	44
3.2.1.3. Atık lastik.....	45
3.2.2. En uygun geçirimsiz tabaka karışımının oluşturulması ve	
özelliklerinin belirlenmesi.....	46
3.2.3. Bulgular ve değerlendirme	47
3.2.3.1. Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları	48
3.2.3.2. Kompaksiyon deney sonuçları	50
3.2.3.3. Serbest basınç deney sonuçları	55
3.2.3.4. Permeabilite deney sonuçları	58
3.2.3.5. Şişme yüzdesi deney sonuçları	61
3.3. Sızıntı Suyu Çalışmaları	64
3.3.1. Sızıntı suyunun başlangıç karakterizasyonunun belirlenmesi.....	65
3.3.1.1. Bulgular ve değerlendirme.....	68
3.3.2. Sızıntı suyunun çıkış karakterizasyonunun belirlenmesi	69
3.3.2.1. Bulgular ve değerlendirme.....	69
3.3.3. En uygun karışımdan sızıntı suyu geçişi sonrası yapısal durumun	
belirlenmesi	74
3.4. Maliyet Hesaplaması	76
4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	77

KAYNAKLAR	81
EKLER	87
EK A: Likit Limit Deney Sonuçları	87
EK B: Serbest Basınç Deney Sonuçları	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Bertaraf yöntemine göre belediye atık miktarı, 2012	12
2.2. (a) Çöp deponi alanı ünite temeli ve sızıntı toplama sistemi (b) katı atığın çöp deponi alanına yerleştirilmesi (c) son örtü tabakası ile kapatılmış çöp deponi alanı.....	15
2.3. Değişik tabaka kombinasyonları	18
2.4. Sıkıştırılmış kil tabakasındaki bentonit oranının permeabiliteye etkisi	21
2.5. Kuru birim hacim ağırlık-kalıp su muhtevası ilişkisi.....	22
2.6. Su muhtevasına karşılık permeabilite ile sıkıştırılma enerjisinin permeabilite üzerindeki etkisi	23
2.7. Sabit permeabilite ve kayma mukavemeti (kPa) düzey çizgileri	24
2.8. Kalıp su muhtevasına karşılık permeabilite	26
2.9. Permeabilite hususları esas alınarak ayarlanmış kabul edilebilir bölge	26
2.10. Serbest basınç mukavemetine karşılık kalıp su muhtevası	29
2.11. Serbest basınç mukavemeti hususlarını esas alan kabul edilebilir bölge	29
3.1. İş akış şeması.....	31
3.2. Zemin faz diyagramı	33
3.3. Motorlu likit limit deney cihazı.....	35
3.4. Bilgisayar kontrollü tam otomatik dinamik ve statik üç eksenli deney seti cihazı (Serbest basınç deneyi)	37
3.5. Permeabilite deney seti.....	38
3.6. Bilgisayar kontrollü tam otomatik dinamik ve statik üç eksenli deney seti cihazı (Şişme yüzdesi deneyi)	39
3.7. Eti Holding Eti Bor A.Ş. Eskişehir-Kırka İşletmesi'nde açığa çıkan bor türevi atıkları ve atık barajı	40
3.8. Atık kilin granülometri eğrisi	43
3.9. Atık kil/bentonit karışımlarının hazırlanması.....	46
3.10. Bentonit yüzdesi-plastisite indeksi ilişkisi	49
3.11. Lastik yüzdesi-plastisite indeksi ilişkisi	49

3.12. Atık kil kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	50
3.13. 2B/98CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	51
3.14. 4B/96CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	51
3.15. 6B/94CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	52
3.16. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı kompaksiyon grafiği	52
3.17. 5TW/95CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	53
3.18. 15TW/85CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	53
3.19. 25TW/75CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi	54
3.20. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı kompaksiyon grafiği	54
3.21. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı serbest basınç dayanım grafiği	56
3.22. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı serbest basınç dayanım grafiği	57
3.23. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı permeabilite katsayı grafiği	59
3.24. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı permeabilite katsayı grafiği	60
3.25. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı şişme yüzdesi grafiği	62
3.26. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı şişme yüzdesi grafiği	63
3.27. Sızıntı suyu deney düzeneği	64
3.28. ICP-MS/MS cihazı	66
3.29. Bor elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	70
3.30. Kalsiyum elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	70
3.31. Magnezyum elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	71
3.32. Sodyum elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	71
3.33. Krom elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	72
3.34. Civa elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	72
3.35. Nikel elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	73
3.36. Kurşun elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu	73
3.37. Atık kil numunesinin 5000X yakınlaştırmalı a) saf su geçirilmiş SEM görüntüsü b) model çözelti geçirilmiş SEM görüntüsü c) kentsel katı atık DDT	

sızıntı suyu geçirilmiş SEM görüntüsü d) tehlikeli atık DDT sızıntı suyu geçirilmiş SEM görüntüsü	75
4.1. Atık kilin ve karışımların serbest basınç dayanımlarının değerlendirilmesi ...	78
4.2. Atık kilin ve karışımların permeabilite katsayılarının değerlendirilmesi.....	79
4.3. Atık kilin ve karışımların şişme yüzdelerinin değerlendirilmesi	80
A.1. Atık kil likit limit grafiği	87
A.2. 2B/98CW karışımı likit limit grafiği	87
A.3. 4B/96CW karışımı likit limit grafiği	88
A.4. 6B/94CW karışımı likit limit grafiği	88
A.5. 5TW/95CW karışımı likit limit grafiği.....	89
A.6. 15TW/85CW karışımı likit limit grafiği.....	89
A.7. 25TW/75CW karışımı likit limit grafiği.....	90
B.1. Atık kil serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	92
B.2. 2B/98CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	93
B.3. 4B/96CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	95
B.4. 6B/94CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	96
B.5. 5TW/95CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	98
B.6. 15TW/85CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	99
B.7. 25TW/75CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Belediyeler tarafından ya da belediyeler adına işletilen atık bertaraf ve geri kazanım tesisleri, 1994-2010	11
2.2. Belediye atık göstergeleri, 1994-2012.....	12
3.1. Kompaksiyon türü ve enerjileri	36
3.2. Atık kil elek analizi sonuçları.....	42
3.3. Atık kil hidrometre deney sonuçları	43
3.4. Bentonitin özellikleri	45
3.5. Karışımların oranları ve kodları	47
3.6. Atık kilin ve karışımların Atterberg kıvam limitleri	48
3.7. Atık kilin serbest basınç dayanım değerleri	55
3.8. Atık kil/bentonit karışımlarının serbest basınç dayanımları.....	56
3.9. Atık kil/atık lastik karışımlarının serbest basınç dayanımları	57
3.10. Atık kilin permeabilite katsayıları	58
3.11. Atık kil/bentonit karışımlarının permeabilite katsayıları	59
3.12. Atık kil/atık lastik karışımlarının permeabilite katsayıları.....	60
3.13. Atık kilin şişme yüzdesi değerleri	61
3.14. Atık kil/bentonit karışımlarının şişme yüzdeleri	62
3.15. Atık kil/atık lastik karışımlarının şişme yüzdeleri	63
3.16. Sızıntı suyu numunelerinin başlangıç karakterizasyonu	68
3.17. Atık kilin ICP-MS analizi sonuçları.....	69

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

DDT	: Düzenli Depolama Tesisleri
B	: Bentonit
Z	: Zeolit
BES	: Bentonit kum karışımı
NaCl	: Sodyum Klorür
CaCl ₂	: Kalsiyum Klorür
Pb	: Kurşun
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
kHQB	: Yüksek kaliteli bentonitin permeabilitesi
kLQB	: Düşük kaliteli bentonitin permeabilitesi
MSW	: Municipal Solid Waste (Kentsel Katı Atık)
EPA	: ABD Çevre Koruma Kurumu
ADDDY	: Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
k	: Permeabilite katsayısı
W _T	: Zeminin toplam ağırlığı
W _S	: Zeminin katı ağırlığı
W _W	: Zemin boşluklarındaki su ağırlığı
V _T	: Zeminin toplam hacmi
V _S	: Zeminin katı hacmi
V _W	: Zemin boşluklarındaki su hacmi
V _V	: Zemin boşluk hacmi
V _A	: Zemin boşluklarındaki hava hacmi
G _s	: Özgül ağırlık
ASTM	: American Society of Testing Materials
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
PI	: Plastisite İndeksi
σ (kg/cm ²)	: Serbest Basınç Mukavemet

1. GİRİŞ

Türkiye’de bor üretimi, Eti Maden İşletmeleri'ne ait Eskişehir-Kırka Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek işletmelerinde sağlanmaktadır. Bor türevleri tesislerinde; boraks dekahidrat, susuz boraks ve boraks pentahidrat, Bandırma Bor Türevleri Tesisi’nde boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, sodyum perborat ve borik asit üretimi yapılmaktadır. Bu tesislerde yapılan konsantre bor üretimi killi malzemenin uzaklaştırması esasına dayandığı için, uzaklaştırılan bu killi malzemeler atık oluşumuna sebep olmaktadır (Güyagüler, 2001; Aytekin, 1995; Erkal & Girgin 1992).

Türkiye, 1,8 milyon ton rezerv ile dünyada ilk sırada yer alırken, bu rakam dünya bor rezervlerinin %72’sini ifade etmektedir (Bor Sektör Raporu, 2014). Madencilik faaliyetlerinin bir sonucu olan atıkların miktarlarının giderek artması, depolama yeri sorunları ile hava, toprak ve su kirliliği gibi çevre sorunlarına neden olmaktadır (Karadeniz, 1996). Bu durum, atık kilden yeni ürünler elde edilmesi ve atık kilden faydalanılabilecek alanların araştırılması fikrini ortaya çıkarmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, bu atık killerin yapı malzemesi (Kavas, 1997), çimento (Kula, 2000), tuğla, kiremit (Tunç, 2003), emaye (Sevim, 1998) ve seramik (Fındık, 1998) yapımı gibi alanlarda kullanımı araştırılmıştır.

Bu çalışmada ise, Türkiye'nin en büyük bor rezervine sahip olan Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nden elde edilen atık kilin Düzenli Depolama Tesislerindeki (DDT) geçirimsiz tabaka için kullanılabilirliği araştırılmıştır. Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nde, 1 milyon ton boraks penta hidrat üretimi sonucunda, 900.000 ton/yıl gibi oldukça büyük miktarlarda bor türevleri atığı meydana gelmektedir. Bu durum, atık kilin DDT’lerde geçirimsiz tabaka olarak kullanımını ekonomik açıdan önemli kılmaktadır.

DDT’lerin amacı, yeraltı ve yüzeysel suları korumak, yanmaların ve patlamaların önüne geçebilmek, oluşabilecek kötü koku sorununu ortadan kaldırmaktır. Burada en önemli kısım, yeraltı sularının kirlenmesini

önleyebilmektir. Bu bakımdan DDT’lerde geçirimsiz tabakaların oluşturulması büyük önem taşımaktadır (Akpınar, 2005).

1.1. Literatür Bilgileri

DDT’lerde kullanılan geçirimsiz kil tabakaları ve bu tabakalarda kullanılabilecek alternatif malzemelerle ilgili günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Edil ve Berthouex (1990), çöp deponi tabakaları için kullanılan birçok sıkıştırılmış kil malzemesi bariyerlerin, oluşan sızıntı, kentsel ve endüstriyel atık sularına karşı performanslarını araştırmışlardır. Uçucu kül, kum ve bentonit kullanarak yaptıkları karışımların permeabilite katsayılarını belirlemişler ve çöp deponi alanları için gerekli olan performansı elde etmişlerdir. Böylece düşük permeabilite bariyer elde etmek için çeşitli öneriler sunmuşlardır.

Daniel ve Benson (1990), sıkıştırılmış numunelerin permeabilitelerinin $1,0 \times 10^{-7}$ cm/s veya daha düşük değerde olması halinde, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralıklarını sağlamak için, modifiye, standart ve indirgenmiş proktor kompaksiyon deneylerini yaparak bir prosedür belirlemişlerdir. Bu prosedür ile kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkilerini belirlemişlerdir. Bunun devamında, numunelerin permeabilitelerini tespit etmiş, permeabilite katsayısı ile kalıp su muhtevası ilişkilerinin kurulmasını sağlamışlardır. Permeabilitesi $\leq 1,0 \times 10^{-7}$ cm/s olan numuneler ile kabul edilebilir bir bölgenin oluşturulmasının gerekliliğini ortaya koymuşlardır.

Daniel ve Wu (1993) tarafından, bir çöp deponi alanı için kullanılacak olan sıkıştırılmış kil tabakasının mukavemeti 200 kPa olarak hesaplanmıştır. Daniel ve Benson (1990)’da olduğu gibi kompaksiyon deneyleri ile numuneler sıkıştırılmış ve serbest basınç mukavemeti ≥ 200 kPa olan numuneler ile kabul edilebilir bir bölgenin oluşturulmasının gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca Daniel ve Wu (1993), batı Teksas’da bulunan killi zemin üzerinde araştırmalar yapmış ve bu zemin için kurumayı önleme amacıyla hacimsel şekil değiştirmenin kabul edilebilir

limit değerinin %4'ü aşmaması gerektiğini bulmuşlardır. Permeabilite ve serbest basınç mukavemeti için önerilen adımları gerçekleştirdikten sonra hacimsel şekil değiştirme ile kalıp su muhtevası arasındaki ilişkileri belirlemişlerdir. Hacimsel şekil değiştirmesi $\leq$ %4 olan numuneler ile kabul edilebilir bir bölgenin oluşturulmasının gerekliliğini ortaya koymuşlardır.

Smith ve Fey (1996), çöp deponi alanlarındaki su geçirmezliğinin sağlanması için kimyasal işleme konusunu araştırmışlardır. Çalışmadaki amaç, maliyeti fazla olan kil tabakaları ve geomembranlar yerine, kimyasal işleme ile arazide düşük permeabilite katsayısı sağlayacak uygun maliyetli bir metot geliştirmektir. Zeminin kimyasal davranışının, kil minerallerindeki topaklaşma ve dağılmasına bağlı olduğunu söylemiş ve birçok zemin için yaptıkları deneylerde dağılma ve topaklaşmayı kimyasal işleme ile başarmışlardır.

Gleason ve ark. (1997), yaptıkları çalışmada kalsiyum bentonit ile sodyum bentonitin geçirimsiz kil tabakası olarak kullanımını permeabilite açısından araştırmış, NaCl ve CaCl₂ içeren geçiş sıvılarındaki davranışlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda, kalsiyum bentonit ve sodyum bentonitin permeabilitelerinin kum-bentonit karışımlarına, jeosentetik kil tabakasını temsil eden ince bir bentonit tabakasına ve dikey kesme duvarını temsil eden bentonit-çimento karışımlarına etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, kille karıştırılmış kum ve jeosentetik kil tabakaları için kalsiyum bentonit ve sodyum bentonitin permeabiliteleri arasında çok farklılık gözlenmezken, bentonit-çimento karışımı için kalsiyum bentonitin performansı sodyum bentonite göre daha düşük kalmıştır.

Kayabalı (1997) çalışmasında, Balıkesir-Gördes'in doğal zeolitleri ile ticari öğütölmüş bentonitlerden oluşan yeni bir malzemenin çöp deponi alanlarında geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Farklı oranlarda oluşturulan bentonit ve zeolit karışımlarının optimum su muhtevasında sıkıştırılmış mukavemet parametrelerini ve permeabilite katsayılarını belirlemiştir. Yapılan deneyler sonucunda; karışımların düşük permeabilitesi ve yüksek katyon değişim kapasitesine göre, 0,05 – 0,10 B/Z aralığındaki karışımların ideal karışım olduğunu belirlemiştir.

Al-Tabbaa ve Aravinthan (1998) tarafından yapılan çalışmada, aşırı sıkıştırılmış doğal bir kil (Keuper Marl), 1-4 ve 4-8 mm parçacık boyutlarındaki parçalanmış lastik ile ağırlıkça %6 - %15 oranlarında karıştırılmış ve kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti, gerilme-gerinme davranışı, permeabilitesi, sızıntı özelliği, serbest şişme ve şişme basıncı değerleri açısından DDT'lerde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneyler neticesinde kuru birim hacim ağırlığının lastik miktarı azaldıkça düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca karışımın serbest basınç dayanımının, sadece kilin serbest basınç dayanımından %40 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Permeabiliteleri açısından ise kile göre kil-lastik karışımlarının değerinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Sheu ve ark. (1998), Tayvan'ın güneydoğusunda bulunan çamurtaşı malzemesinin fiziksel özelliklerini ve permeabilite katsayısını araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, malzemenin çöp deponi alanı tabakalarının zemin özellikleri için istenen koşulları tam olarak sağladığını belirtmişlerdir.

Palmer ve ark. (2000), DDT'ler için F ve C sınıfı uçucu küller kullanarak yapılan tabakalar üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda, artık organik karbon içeren F sınıfı uçucu külü, çeşitli malzemeler (kum, C sınıfı uçucu kül ve taban külü) ile de karıştırarak F sınıfı uçucu külün permeabilitesini laboratuvar ve arazi deneylerini kullanarak belirlemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, F ve C sınıfı uçucu külün büyük agrega ile birlikte karışımlarının, kompaksiyonun optimum su muhtevasının ıslak tarafında sağlandığını belirlemişlerdir.

Prashanth ve ark. (2001), çöp deponi alanları için puzolanik uçucu külün bir hidrolik bariyer olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Malzemelerin hidrolik bariyerler olarak kullanımını değerlendirmek için gerekli olan rötre, kompaksiyon, permeabilite, konsolidasyon ve mukavemet gibi geoteknik özellikleri uçucu küller için belirlemişlerdir. Sonuç olarak, uçucu küllerin rötrelerinin düşük olduğunu ve bu yüzden çatılmanın olmadığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda uçucu küllerin mukavemet özelliklerini iyi yönde geliştirdiklerini belirtmişlerdir.

Tay ve ark. (2001), bentonit-kum (BES) karışımlarının çöp deponi tabakalarında kuruma ve büzülme çatlaklarını araştırmışlardır. Havada kurutmayla BES’de görülen kuruma ve büzülme çatlakları hakkında veri toplamışlardır. %10 ve %20 bentonit içeren karışımların kuru birim hacim ağırlığı yönünden, %8’den %32’ye kadar olan aralıktaki su muhtevası değerlerinde sıkıştırılmasını incelemişlerdir. Tüm karışımların hava kuruması karşısında hacimsel büzülmeye uğradığını ve %20 bentonit içeren karışımların, %10 bentonit içeren karışımlara oranla büzülmesinin daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Çatlamanın ise, sadece BES’in %4 civarında hacimsel büzülmeye uğradığı zaman olduğunu belirlemişlerdir.

Kugler ve ark. (2002), kentsel katı atık deponi alanlarının kil esaslı sızdırmazlık tabakalarında organik kirleticilerin tutulmasını belirlemek istemişlerdir. Bu amaçla, Bohemian Massif’in Avusturya bölümünde yer alan kentsel atık depolama alanının 10 yıllık sızdırmazlık tabakasını, geokimyasal ve mineralojik metotlarla incelemişlerdir. Zeminin sızdırmazlık tabakasının, özellikle ağır metallerle karşı tutma kapasitesini ölçmeyi amaçlamışlardır. Analizler sonunda, Pb, Cu ve Zn gibi ağır metallerin sızdırmazlığının en çok üst bölümlerde yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Cho ve ark. (2002) tarafından yapılan çalışmada, farklı yoğunluklardaki kum-bentonit karışımlarının permeabiliteleri ve bentonitin permeabilite üzerindeki etkisi araştırılmıştır. $1,4 \text{ mg/m}^3$, $1,5 \text{ mg/m}^3$, $1,6 \text{ mg/m}^3$ ve $1,8 \text{ mg/m}^3$ kuru yoğunluktaki bentonit-kum karışımlarının bentonit ilavesi ile permeabilite katsayılarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Tuncan ve ark. (2003), doğal zeolitlerin bir çöp deponi alanı tabakası olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Farklı oranlarda bentonit ve zeolitleri (B/Z) optimum su muhtevalarında karıştırarak incelemişlerdir. Düşük permeabilite ve yüksek katyon değişim kapasitesine göre değerlendirmeye alındığında B/Z oranı için 0,10 değerinin ideal çöp deponi alanı tabaka malzemesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir.

Kaya ve Durukan (2004), bentonit ve zeolitten oluşan karışımların kil tabakası olarak kullanılabilirliği konusunda çalışmışlardır. Sodyum ve Kalsiyum bentonit ile doğal zeolitin adsorpsiyon özellikleri, sodyum bentonit ve doğal zeolitin katyon değişim kapasitesi, hacimsel büzülme, kompaksiyon karakteristikleri ve karışımların permeabilitelerini araştırmışlardır. Doğal zeolitin kurşun (Pb) adsorpsiyon kapasitesinin Sodyum bentonitin adsorpsiyon kapasitesinin neredeyse üçte biri olduğunu belirlemişlerdir. Kumun sıfır adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu düşünüldüğünde, zeolitin sahip olduğu yüksek katyon değişim kapasitesiyle bentonit ve zeolitin birlikte, çöp deponi alanı koşullarında önemli kazançlar sağlayacağını belirtmişlerdir. Hacimsel büzülme ve kompaksiyon sonuçlarıyla da bentonit ve zeolit karışımlarının optimum su muhtevasının, üst limit olan %4 büzülme yaratan su muhtevasından daha az olduğunu belirlemişlerdir. %10 ve %20 bentonitli bentonit ve zeolit karışımlarının permeabilite katsayılarının, permeabilite gerekliliği olan 1×10^{-9} m/s'den düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Kalkan ve Akbulut (2004), hidrolik bariyer olarak kullanılan sıkıştırılmış kil tabakalarının permeabilitelerine, şişme basıncına ve serbest basınç dayanımlarına uçucu külün etkilerini belirlemek için çalışmalar yapmıştır. Deney sonuçları, uçucu kül kullanımının, permeabilite katsayılarını düşürdüğü, şişme basınçlarını arttırdığı ve yüksek serbest basınç mukavemeti sağladığını göstermiştir.

Ebina ve ark. (2004), kil-kum numunelerini sıkıştırılarak permeabilitelerini belirlemiş ve permeabilitelerin kil özellikleri ile ilişkisini incelemişler ve 16 kil numunesinin permeabilitelerini belirlemişlerdir. Kil numunesi olarak, saflaştırılmış montmorillonit, sentetik hektorit, standart kil örneği ve katyon değişimli bentonit olmak üzere 8 adet bentonit kullanmışlardır. Mineral muhtevasının ve killerin bentonit muhtevasının permeabiliteyi etkilediğini belirlemişlerdir. Killerin karakteristik indeks özellikleri (metilen mavisi adsorpsiyonu, kimyasal konsantrasyon gibi) ile permeabilite katsayısı arasında bir ilişki kurmuşlardır.

Lee ve Shackelford (2005) tarafından yapılan çalışmada, yüksek ve düşük kaliteli bentonit içeren iki geosentetik kil şilte için su ve CaCl_2 çözeltileri kullanılarak permeabilite deneyleri yapılmıştır. Su ile yapılan deneylerde yüksek

kaliteli bentonitin permeabilitesi (kHQB) düşük kaliteli bentonitin permeabilitesine (kLQB) göre üç kat daha düşük olarak belirlenmiş, CaCl_2 çözeltileri ile yapılan deneylerde ise yüksek kaliteli bentonitin permeabilitesi, düşük kaliteli bentonitin permeabilitesinden daima yüksek bulunmuştur.

Mateo (2008) tarafından yapılan çalışmada, Ottawa bölgesinde iki farklı bölgeden elde edilen iki yerel toprak türünün permeabiliteleri açısından sıkıştırılmış tabakalar olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. İlk aşamada toprakların Atterberg limitleri ve özgül ağırlıkları belirlenirken, ikinci aşamada tek kompozit tabaka içerisindeki su hareketini modellemeye yarayan çeşitli yazılım paketleri uygulanmıştır.

Güney ve ark. (2008), kentsel katı atık depolama sahalarında kullanılan sıkıştırılmış kil yerine sepiyolit kullanıldığını araştırmışlardır. Sepiyolit yüksek permeabiliteye ve büzülme kapasitesine sahip olmasıyla birlikte, sızdırmazlık tabakası olarak kullanılmadan önce kaolinle karıştırılması gerekliliği belirlenmiştir.

Chalermyanont ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada, killi toprakların, yüksek emme kapasiteleri ve düşük permeabilitelerinden dolayı genelde depolama alanlarında tabaka olarak kullanıldıklarından bahsedilmiştir. Ayrıca montmorillonit içeren bentonitin, ağır metalleri yüksek oranda tutma kapasitesine sahip olmasına da yer verilmiştir. Kum, geçirimsizliği yüksek bir madde olmasına rağmen bentonit ile karıştırıldığında hidrolik iletkenliği düşmektedir. Depolama alanlarında bulunan sızıntılardaki ağır metaller, kum-bentonit karışımına nüfuz ettikten sonra permeabilite artmakta, bu da kum-bentonit karışımlarının, depolama alanlarında kullanımı için soru işaretleri yaratmaktadır. Bentonit-kum karışımının hidrolik iletkenliği saf su ile yapılan çalışmada 4×10^{-9} cm/sn olarak belirlenmiş fakat bu değer ağır metal çözeltileri için artmıştır.

Akcanca (2009) tarafından yapılan doktora tezinde, atık depolama alanlarının geçirimsiz tabakalarında, kum-bentonit-kireç karışımının kullanılabilirliği araştırılmıştır. % 20, 30, 40 ve 50 oranlarında bentonit içeren kum-bentonit karışımlarına % 0, 1, 2 ve 3 oranlarında kireç ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin geoteknik özelliklerinden sonra, permeabilite katsayısı

ve şişme basıncı değerleri de belirlenmiştir. Çok düşük kireç oranı ile kireçsiz duruma göre geçirimsiliği daha düşük bir tabakanın oluşturulabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kireç ilavesinin şişme basıncında düşmeye neden olduğu da belirlenmiştir.

Horpibulsuk ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada, Bangkok kilinin kendine has fiziksel, sıkıştırılabilirlik ve geçirimsilik özellikleri üzerine gözenek suyunun etkisi incelenmiştir. Şişme özelliği olmayan kaolin ve yüksek şişme özelliği olan bentonit ile karşılaştırılan Bangkok kilinin düşük şişme kapasiteli bir kil olduğu belirlenmiştir.

2. KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİ ve GEÇİRİMSİZ TABAKA SİSTEMİ

Dünyada ve ülkemizde gerçekleşen hızlı nüfus artışı, teknolojik gelişmelerdeki artış ve yaşam koşullarının iyileşmesiyle beraber evsel ve endüstriyel katı atıkların çeşit ve miktarları da giderek artmaktadır. Atıklar, zararsız bileşenlerine ayrılabilirken, bazıları ise çok tehlikeli bileşenler içerebilmekte ve ayrılmamaktadır. Genel olarak sanayileşmiş ülkelerdeki toplam atıkların %15-25'i tehlikeli olarak tanımlanan atıklar sınıfına girmektedir. Bu sınıfa giren atıklar, insan sağlığını açık ve doğrudan tehdit etmektedir (Yıldız, 1998).

Katı atık, tüketiciler için bir değer taşımayan ve çevrenin korunması için düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken, evsel, ticari ve endüstriyel aktiviteler sonucu oluşan maddelere denilmektedir. Atıklar katı, sıvı, gaz halinde bulunabilir ve evsel, endüstriyel, tehlikeli ve tıbbi atıklar olarak gruplandırılabilirler.

Evsel atıklar, ticari malların evlerde ve benzer yerlerde tüketilmesiyle oluşan atıklardır. Yiyecek artıkları, kâğıt ve plastik ambalajlar, plastik, lastik, tekstil ürünleri, ahşap talaşı ve yongaları, küller, bahçesel artıkları içerebilen heterojen karışımlar halinde bulunurlar.

Endüstriyel atıklar, sanayi faaliyetleri sonucu ortaya çıkan, kimya, kauçuk, gıda, ahşap, petrol, plastik, reçine, kâğıt, kereste, ilaç gibi sanayi atıklarını içeren atıklardır (Daniel, 1993a).

Tehlikeli atıklar ise parlayabilen, patlayabilen, okside olabilen ve bulaşıcı hastalıklara neden olabilen atıklardır.

Tıbbi atıklar, sağlık birimlerinde, sağlık eğitimi verilen kuruluşlarda, tıbbi araştırma yapılan yerlerde ve özellikle hastanelerde oluşmaktadır.

Ülkemizde Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) yapmış olduğu sistematik bir çalışma sonucunda atıkların durumu hakkında nispeten güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 2.1’de, Türkiye’deki belediyeler tarafından ya da belediyeler adına işletilen atık bertaraf ve geri kazanım tesislerin 1994 – 2010 yılları arasındaki sayısı, kapasitesi ve gelen atık miktarı gibi sayısal verileri verilmektedir.

Çizelge 2.2’de Türkiye’deki belediyelerde toplanan atık miktarı, kişi başı ortalama atık miktarı, kişi başı yaz mevsimi ortalama atık miktarı ve kişi başı kış mevsimi ortalama atık miktarı hakkında sayısal veriler verilmektedir.

Şekil 2.1’de ise, Türkiye’nin 2012 yılındaki bertaraf yöntemlerine göre belediye atık miktarları verilmektedir.

Ayrıca Türkiye İstatistik Kurumu’nun yapmış olduğu değerlendirmelere göre 2012 yılında Türkiye’de kişi başına düşen ortalama atık miktarı yazın 1,14 kg/gün ve kışın 1,09 kg/gün olarak hesaplanabilmektedir.

Bu verilere göre, Türkiye’de atıkların tamamına yakınının düzenli depolama ve belediye çöplüklerinde bertaraf edildiği görülmektedir. Ayrıca, tesislerin yıllara göre dağılımına bakıldığında düzenli depolama tesislerinin sayısında ve kapasitesinde ciddi bir artışın olduğu söylenebilir.

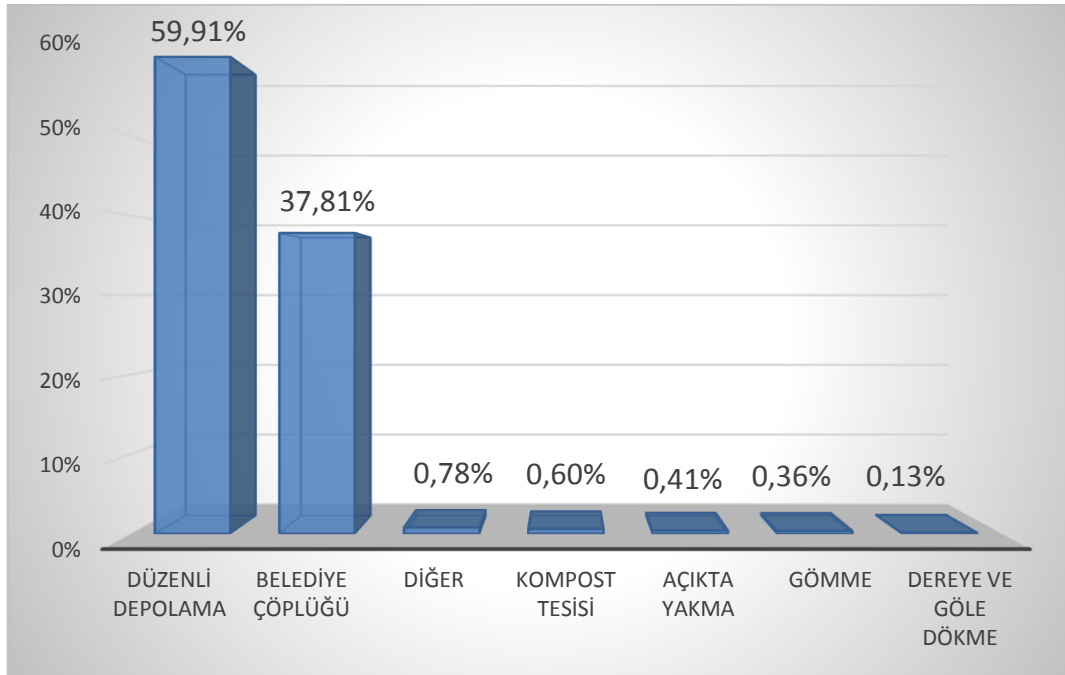
Genel olarak, düzenli depolama tesislerinin, yakma tesislerinin ve kompost tesislerinin 1994’den beri var olduğu bilinse de, aktif olarak kullanımlarının her üç tip tesis için de 2006’dan sonra başladığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Belediyeler tarafından ya da belediyeler adına işletilen atık bertaraf ve geri kazanım tesisleri, 1994-2010 (TÜİK, 2014)

	Düzenli depolama tesisi				Kompost tesisi				Yakma tesisi			
	Sayısı	Kapasitesi (bin ton)	Gelen atık miktarı (bin ton)	Bertaraf edilen atık miktarı (bin ton)	Sayısı	Kapasitesi (bin ton/yıl)	Gelen atık miktarı (bin ton)	Üretilen kompost miktarı (bin ton)	Sayısı	Kapasitesi (bin ton/yıl)	Gelen atık miktarı (bin ton)	Yakılan tıbbi atık miktarı (bin ton)
1994	2	76.750	...	...	2	245	...	...	-	-	-	-
1995	6	202.527	...	...	2	245	...	...	1	9	...	...
1996	6	202.527	...	...	2	245	...	...	1	9	...	...
1997	8	216.690	...	...	2	245	...	...	2	44	...	...
1998	8	216.690	...	...	2	245	...	...	2	44	...	...
2001	12	261.282	...	...	3	299	...	...	3	44	...	...
2002	12	277.195	...	...	4	664	...	...	3	44	...	...
2003	15	278.015	...	...	5	667	...	...	3	44	...	...
2004	16	278.060	...	...	5	667	...	...	3	44	...	...
2006	22	376.974	9.951	9.942	4	605	268	29	3	44	28	6
2008	37	390.478	11.657	10.037	4	551	276	47	2	44	36	8
2010	52	423.142	14.377	14.309	5	556	216	38	2	44	40	6
(...) Bilgi elde edilememiştir. (-) Bilgi yoktur.												

Çizelge 2.2. Belediye atık göstergeleri, 1994-2012 (TÜİK, 2014)

	Toplanan atık miktarı (bin ton/yıl)	Kişi başı ortalama atık miktarı (kg/kişi-gün)	Kişi başı yaz mevsimi ortalama atık miktarı (kg/kişi-gün)	Kişi başı kış mevsimi ortalama atık miktarı (kg/kişi-gün)
1994	17.757	1,10	1,04	1,15
1995	20.910	1,27	1,19	1,31
1996	22.483	1,37	1,29	1,42
1997	24.180	1,46	1,41	1,50
1998	24.945	1,51	1,46	1,54
2001	25.134	1,35	1,32	1,36
2002	25.373	1,34	1,32	1,34
2003	26.118	1,38	1,37	1,38
2004	25.014	1,31	1,30	1,29
2006	25.280	1,21	1,21	1,19
2008	24.361	1,15	1,16	1,13
2010	25.277	1,14	1,15	1,10
2012	25.845	1,12	1,14	1,09



Şekil 2.1. Bertaraf yöntemine göre belediye atık miktarı, 2012 (TÜİK, 2014)

2.1. Düzenli Depolama Tesislerinin Gereklilikleri

Katı atık sorunu özellikle büyük şehirlerde hızla büyümektedir. Bu sorunu ortadan kaldıracı olmak için katı atıkların düzenli bir şekilde toplanması ve zararsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bunu yaparken birçok farklı daldaki mühendisin ekip çalışması içinde olması gerekmektedir. Geoteknik mühendisinden beklenen konuyla ilgili kısımlara pratik ve ekonomik çözümler getirmesidir.

Düzenli depolama tesisleri, atıkları bertaraf etmenin kontrollü sağlanabildiği yerlerdir. Bu nedenle çöp deponi alanlarını gelişigüzel çöp yığınları olarak düşünmemek gerekir. Gelişigüzel açık bir alanda bulunan çöp yığınlarında rastlanan duman, martı ve böcek gibi problemler iyi tasarlanmış düzenli depolama tesislerinde görülmemektedir. Çöp deponi alanları, profesyonel planlanmış, iyi tasarlanmış ve yapım denetimleri gerçekleştirilmiş bir yapıya sahiptir. Bu yapının temel amacı, atık sızıntılarının çevreye kaçışını engellemektir. Temel olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Üst astar ve alt astar denilen bu iki bileşen sırasıyla bariyer ve drenaj katmanlarından oluşmaktadır. Çöp deponi alanlarının en önemli gerekliliği, amacına hizmet ederken doğaya zarar vermemesi ve çevreyi kirletmemesidir. Bu gerekliliği sağlamak dikkatli yerleşim ve düzgün tasarımıyla mümkün olmaktadır. Çöp deponi alanları bazen maliyeti yüksek olmasına rağmen, iyi bir yerleşim ile tasarım ve yapım, işletme ve bakım maliyetleri azaltılabileceği gibi, halk sağlığı için gelecekteki tehditleri en aza indirir (Qian ve ark., 2001).

Kentsel katı atık çöp deponi alanları genellikle aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır (Güney ve Koparal, 2007).

- Taban ve yan duvar tabakaları sistemleri
- Sızıntı toplama ve bertaraf edilmesi sistemi
- Gaz toplama ve kontrol sistemi
- Örtü kaplama sistemi
- Sel suları yönetimi sistemi
- Yeraltı suyu görüntüleme sistemi
- Gaz görüntüleme sistemi

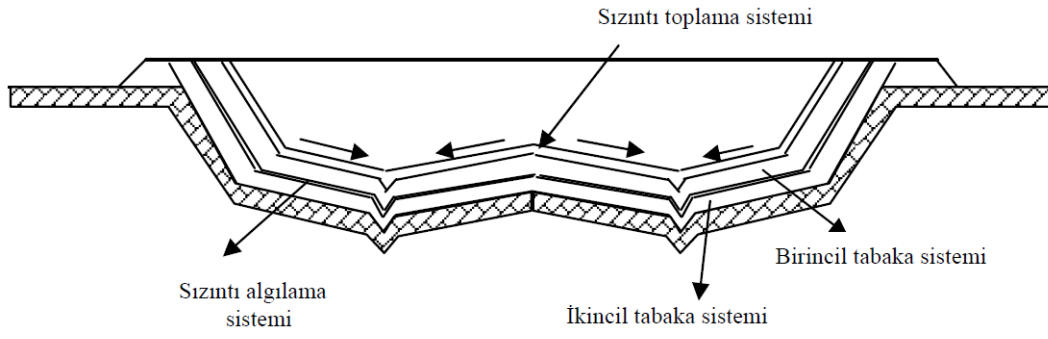
Bir çöp deponi alanı tasarımı ve yapımı aşağıdaki faaliyetlerin yapılmasını gerektirir (Güney ve Koparal, 2007);

- Çöp deponi alanının yerleşim planı
- Alt temel derecelemesi
- Hücre planı ve dolumu
- Geçici örtü seçimi
- Nihai örtü derecelemesi
- Nihai örtü seçimi

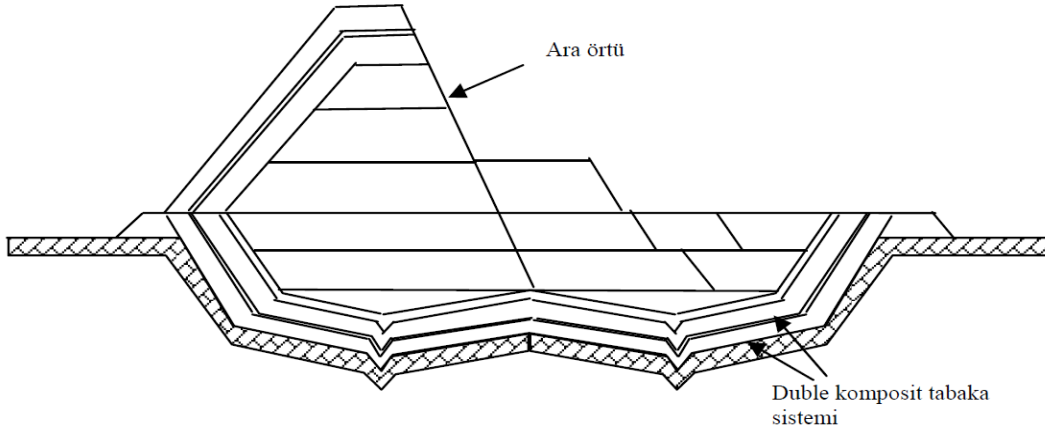
Bir katı atık çöp deponi alanının gelişimi ve tamamlanışı Şekil 2.2’de şematik diyagram olarak gösterilmiştir.

Çöp deponi alanlarının tasarımında, çöp deponi alanlarının yapım şekli ve çeşitli çöp deponi elemanları etkin rol oynamaktadır. Çöp deponi alanlarının en önemli ve yaygın tipleri geometrik yapılandırma açısından, aşağıdaki hususları içermektedir (Güney ve Koparal, 2007).

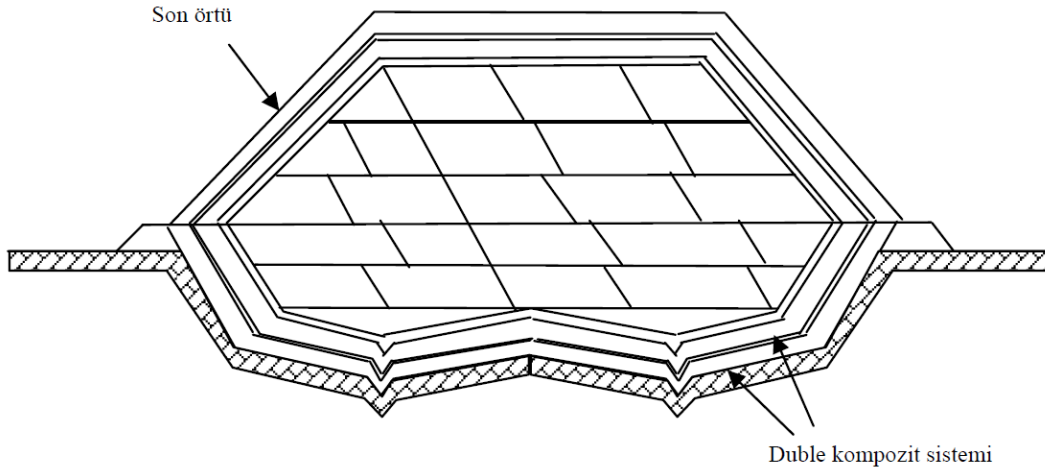
- **Alan Dolgusu:** Bu tip çöp deponi alanları genellikle, yer altı suyunun yüksek olduğu ya da bölgenin kazı için elverişsiz olduğu alanlarda kullanılmaktadır. Eğer mümkünse, hiç kazı yapılmamaktadır.
- **Hendek dolgusu:** Genellikle atığın az olduğu alanlarda kullanılır.
- **Yukarı ve aşağı yer dolgusu:** Kazı derinliğinin, doğal kil tabakası ve yer altı suyu seviyesinin derinliklerine göre değiştiği bu çöp deponi alanı, alan dolgusu ve hendek dolgusunun bir kombinasyonudur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.2. (a) Çöp deponi alanı ünite temeli ve sızıntı toplama sistemi (b) katı atığın çöp deponi alanına yerleştirilmesi (c) son örtü tabakası ile kapatılmış çöp deponi alanı (Qian ve ark., 2001)

2.2. Geçirimsiz Tabaka

Düzenli depolama tesislerinin tabanlarında ve yan yüzeylerinde sızıntı suyunun yer altı suyuna karışmasını engelleyecek, genellikle kilden veya eşdeğeri olan malzemelerden oluşturulmuş geçirimsiz bir tabakanın bulunması gerekmektedir. 26.03.2010 tarihinde yayınlanan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe (ADDY) göre bu tabaka, fiziksel, kimyasal, hidrolik ve mekanik özellikleri ile düzenli depolama alanlarında, toprak ve yeraltı suları için oluşabilecek potansiyel riskleri önleyebilecek kalitede olmalıdır (ADDDY, 2010).

Geçirimsiz tabakanın toprak ve yeraltı suyu için oluşabilecek potansiyel riskleri ortadan kaldırabilmesi için, ADDDY’ de verilen düzenli depolama tesisi sınıflarına göre depo tabanının asgari, aşağıda belirtilen geçirgenlik ve kalınlık özelliklerine sahip olması gerekmektedir:

- a) I. sınıf düzenli depolama tesisi: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 5 m veya eşdeğeri,
- b) II. sınıf düzenli depolama tesisi: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri,
- c) III. sınıf düzenli depolama tesisi: $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri.

Geçirimsiz tabaka, verilen bu permeabilite katsayısı koşullarını doğal olarak sağlayamaz ise, bu tabaka yapay olarak geomembranlar kullanılarak güçlendirilmektedir. Bu malzemenin toplam kalınlığı da 0,5 m’den az olmamalıdır (ADDDY, 2010).

I. sınıf ve II. sınıf düzenli depolama tesislerinde oluşturulacak olan jeolojik geçirimsizlik tabakası, yapay geçirimsizlik malzemesi kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu yapay geçirimsizlik tabakasının korunması için ise koruyucu örtü malzemesi kullanılmaktadır (ADDDY, 2010).

I. sınıf ve II. sınıf düzenli depolama tesislerinde yapay geçirimsizlik kaplaması üzerine bir drenaj tabakası uygulanmaktadır. Bu tabaka asgari 0,5 metre kalınlığa ve en az $k \geq 1,0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip olmalıdır. Drenaj tabakasının

içinde drenaj boruları, ana toplayıcılar ve bacalar bulunmaktadır. Bu drenaj sistemi sızıntı suyu toplama havuzunda son bulmaktadır (ADDDY, 2010).

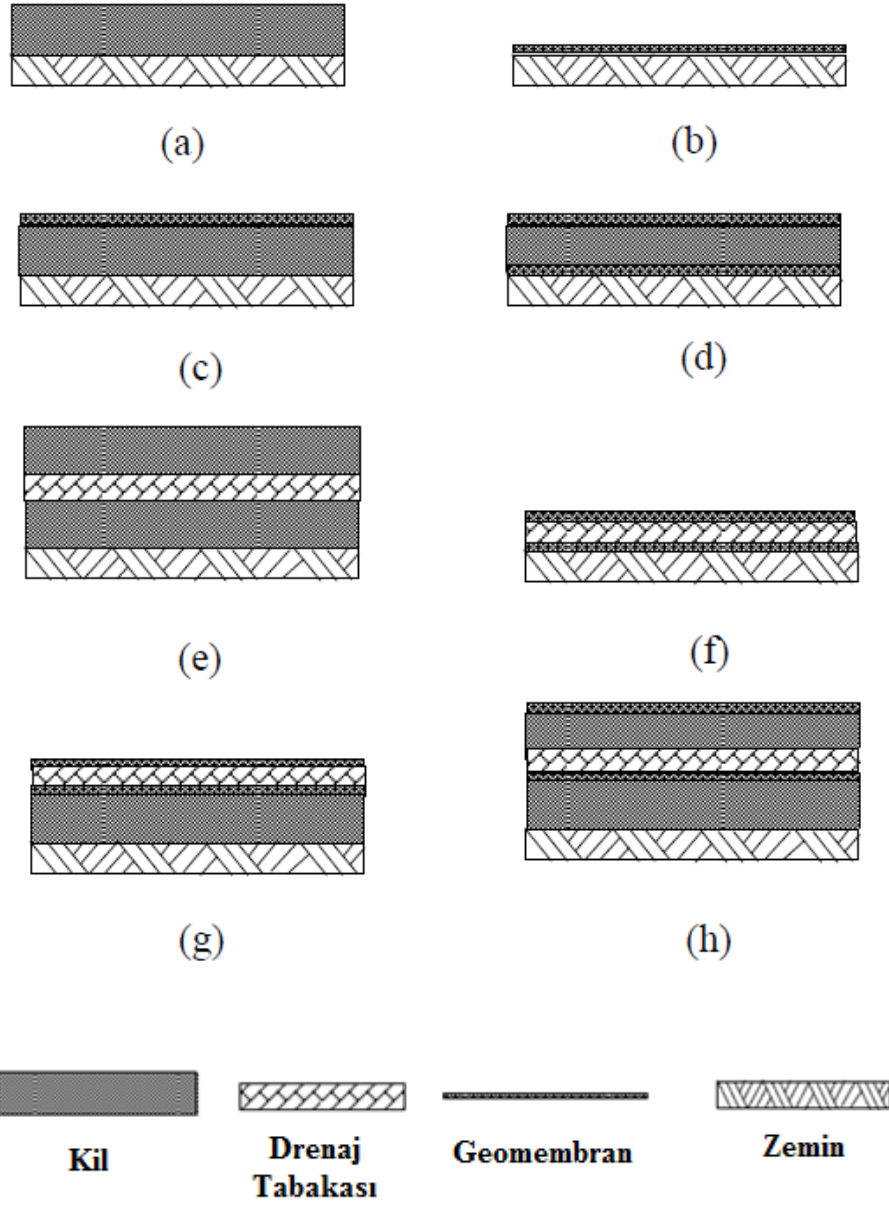
Atık depo tesisinin tabanının boyuna eğimi % 3'den az olmamalıdır (ADDDY, 2010).

Atığı çevreden ayıran, oluşan sızıntıların kaçışını engelleyen, gaz üretimini sağlayan ve yağmursuyu filtrelemesini yapan geçirimsiz tabaka istemi, tehlikeli atık ya da kentsel katı atık çöp deponi alanlarının tasarımında en önemli husustur. Bu sistem, temel olarak tabaka sistemi, sızıntı toplama ve uzaklaştırma sistemi, gaz toplama ve kontrolü sistemi ve örtü kaplama sisteminden oluşmaktadır (Güney ve Koparal, 2007).

2.2.1. Tabaka sistemi

Tabaka sistemi, bir çöp deponi alanının tabanı ve yan duvarları üzerine yerleştirilen, sızıntı çözünenlerinin dağılım ve permeabiliteleri karşısında bir bariyer görevi gören sistemdir. Tabaka sistemlerinin yapımındaki asıl amaç, atığın izole edilmesini sağlayarak zemin ve yeraltı suyunun kirlenmesini önlemektir.

Bir tabaka sisteminde, sıkıştırılmış kil tabakası, geomembran, geosentetik kil tabakası ya da bunların kombinasyonundan oluşan birçok bariyer ve drenaj tabakaları bulunmaktadır. Bu kombinasyonlar Şekil 2.3'de görülmektedir. Geçmiş yıllarda tabakalar, bir sentetik polimerik membran ya da kil tabakasından oluşan tek tabaka halinde bulunmaktaydı. Yapılan çalışmalar neticesinde, drenaj tabakalarının kil ve sentetik geomembranların arasına yerleştirildiği, kompozit tabakaların oluşturulduğu yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar; Şekil 2.3a'da tek kil, Şekil 2.3b'de tek geomembran, Şekil 2.3c'de kil ve geomembranın birlikte olduğu, Şekil 2.3d'de double geomembranın olduğu, Şekil 2.3e'de double kil tabakasının ve drenaj tabakasının bulunduğu, Şekil 2.3f'de double geomembran ve drenaj tabakasının bulunduğu, Şekil 2.3g'de double geomembran, kil ve drenaj tabakasının bulunduğu, Şekil 2.3h'de iki tabaka geomembran ve drenaj tabakası, iki kil tabakası ve double geomembran tabakası olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Değişik tabaka kombinasyonları (Güney ve Koparal, 2007)

2.2.2. Sızıntı toplama ve uzaklaştırma sistemi

Sızıntı suyu, çöp deponi alanlarının en önemli sorunlarından birisini oluşturmakta ve miktarı atıkların kompozisyonu, atıkların miktarı, türü ve yağış durumlarına göre değişkenlik göstermektedir.

Sızıntı, taşıyıcı bir sıvıdan ve çözünmemiş maddelerden oluşan, atığın kendisinden ve filtreleme dışında kalan ve atığa geçen sıvıdan kaynaklanan, çöp deponi alanında katı atığın hareketli bileşenidir. Bir sızıntı toplama ve uzaklaştırma sisteminin amacı, tabaka üzerindeki sızıntının başlangıcını engellemek, sızıntıyı bertaraf etmek ve sızıntıyı işlenmek üzere sıhhi kanalizasyon tabakası ya da sızıntı depolama tankı yardımıyla bir atık su işleyişine aktarmaktır (Güney ve Koparal, 2007).

2.2.3. Gaz toplama ve kontrol sistemi

Çöp deponi alanında havasız kalan organik maddelerin mikrobiyolojik olarak ayrışması ile çevreye metan gazı ağırlıklı olmak üzere karbondioksit, hidrojen sülfür, amonyak ve azot bileşikleri yayılmaktadır. Bu bileşikler patlamalara ve zehirlenmelere sebep olabilmektedir (Akpınar, 2005).

Çöp deponi alanında, katı atığın organik bileşenlerine ayrışması sırasında oluşan gazın toplanması amacıyla gaz toplama ve kontrol sistemi kullanılmaktadır. Çöp deponi alanında toplanan gaz enerji üretmek ya da kontrol altında yakmak amacıyla kullanılabilir (Güney ve Koparal, 2007).

2.2.4. Üst örtü sistemi

Üst örtü sistemi, bariyer, drenaj ve alt tabakaları, çevreden gelen etmenlere, hasara ve donma etkilerine karşı koruyan bir zemin tabakasından oluşmaktadır. Bu üst örtü tabakasının temel görevi, çöp deponi alanının kapatılmasından sonra oluşan sızıntı üretimini azaltmaktır. Başka bir deyişle, çöp deponi alanının içine doğru gerçekleşen sızıntıları en aza indirmek (Güney ve Koparal, 2007).

Atıkların depolama işlemi sona erdikten sonra depolama alanında üst örtü uygulamasına başlamadan önce, alan kazı toprağı örtüsü ile tesviye edilmektedir. Atıkların veya yapının oluşabilecek kayma veya çökme risklerine karşı, üst örtü sistemine başlanmadan önce depolanan atık kütlelerinin yeterince oturup oturmadığı

tespit edilmelidir. Bu işlemlerden sonra uygulanacak olan üst örtü sistemi asgari aşağıda verilen şartları sağlayacak şekilde teşkil edilmelidir: (ADDDY, 2010).

a) Yalnızca gaz oluşumu beklenen II. sınıf düzenli depolama tesislerinde; gazların neden olabileceği potansiyel risklerin önüne geçmek amacıyla gaz drenaj katmanı inşa edilmelidir.

b) Yapay geçirimsizlik kaplamasının I. sınıf düzenli depolama tesislerinde uygulanması mecburidir.

c) Mineral geçirimsizlik tabakası en az 25 cm kalınlığında olmalı ve iki tabaka halinde uygulanmalıdır. Drenaj tabakasının kalınlığının en az 50 cm olması ve en az $k \geq 1,0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir.

ç) Üst örtü toprağının daha sonradan bitkilerin yetiştirilmesini sağlayabilecek şekilde en az 50 cm kalınlığında olması gerekmektedir. Üst örtü toprağının kalınlığı yetiştirilecek bitki türüne bağlı olarak değişebilmektedir.

III. sınıf düzenli depolama tesisleri için bu hükümler uygulanmamaktadır. Bu tip düzenli depolama tesisleri için sahalarda atık depolama işlemi tamamen bittikten sonra sahanın üstünün kapatılması ve yeşillendirilmesi zorunludur (ADDDY, 2010).

2.3. Sıkıştırılmış Kil Tabakaları

Sıkıştırılmış kil zeminler, çöp deponi alanlarında çok geniş şekilde kullanılmaktadır. Bu kil tabakalarının ve örtülerinin belirli bir maksimum permeabilite değerine sahip olması gerekliliği birçok kurum tarafından zorunlu kılınmaktadır. Genel olarak evsel katı atık, tehlikeli atık ve endüstriyel atık içeren kil tabakalarının permeabilite katsayısı maksimum $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn olmalıdır.

Sıkıştırılmış kil tabakaları, öncelikli olarak doğal malzemelerden yapılsalar da bentonit ya da sentetik polimer gibi işlenmiş malzemeler içermektedirler (Daniel, 1993c). Sıkıştırılmış kil tabakalarında kullanılacak olan malzemelerin maksimum $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn permeabilite katsayısı sınırını sağlaması için gerekli minimum şartlar:

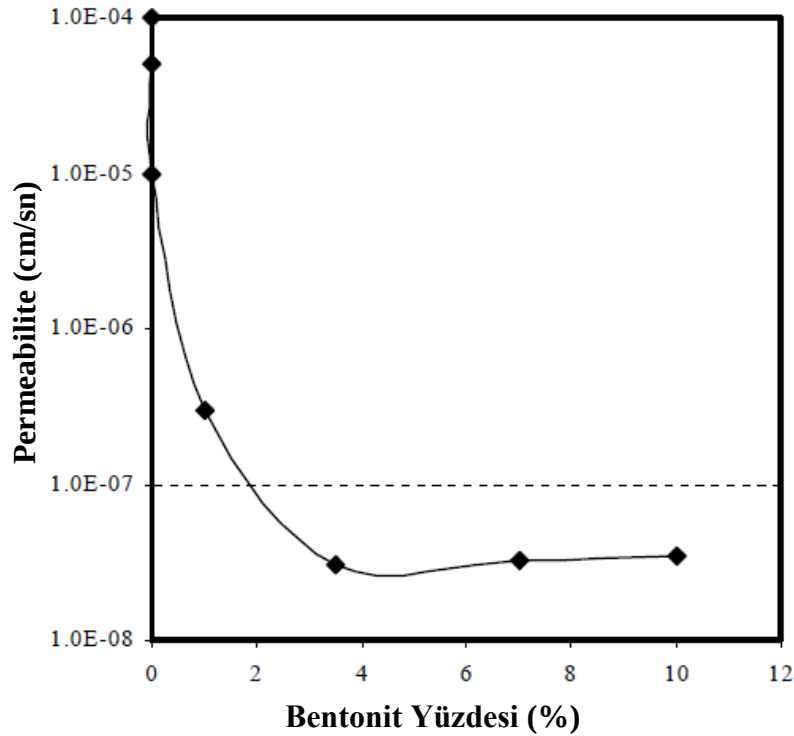
İnce dane oranı : $\geq$ % 20-30

Plastisite indisi : $\geq$ % 7-10

Çakıl oranı : $\leq$ % 30

En büyük dane boyutu: 25-50 mm olarak önerilmektedir (Daniel, 1993c).

İnce dane oranı, 200 nolu elekten geçen kuru malzeme ağırlığının toplam malzeme ağırlığına oranını, çakıl oranı ise 4 nolu elekten geçemeyen kuru malzeme ağırlığının toplam malzeme ağırlığına oranını ifade etmektedir. Malzemenin permeabilite katsayısı koşulunu sağlayamaması durumunda bentonit gibi katkı malzemeleri kullanılabilir (Şekil 2.4). Bu sayede istenilen permeabilite katsayı değerinin sağlanması kolaylaşabilmektedir (Daniel, 1993c).



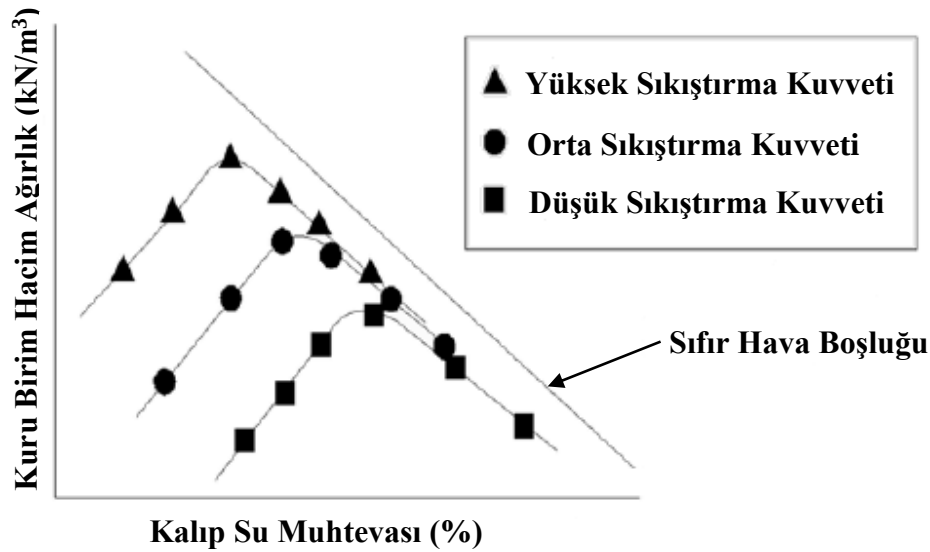
Şekil 2.4. Sıkıştırılmış kil tabakasındaki bentonit oranının permeabiliteye etkisi (Daniel, 1993c)

Sıkıştırılmış kil tabakalarında, su muhtevası, kompaksiyon metodu ve uygulanan enerji miktarı önemli etkenler olarak ortaya çıkmaktadır. Çok kuru halde

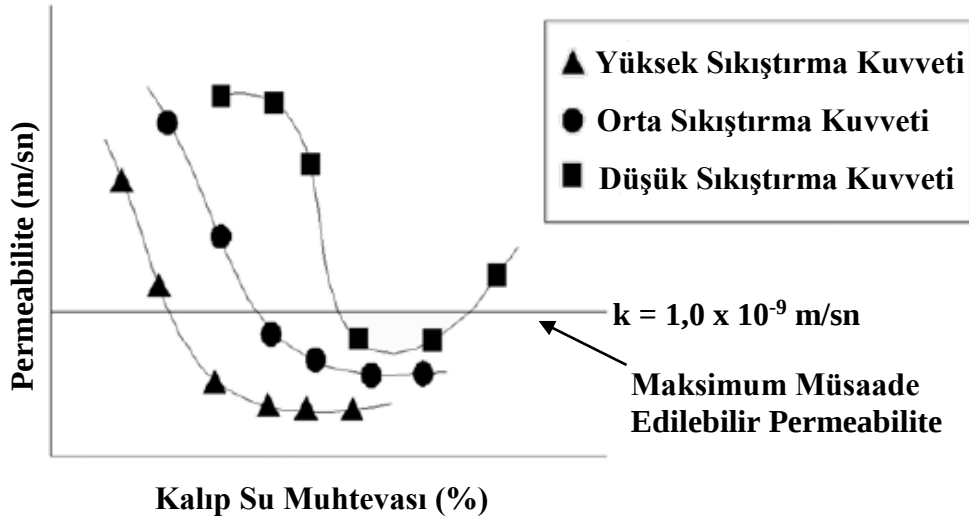
zemin numunelerine uygulanan kompaksiyon, istenilen permeabilite katsayı değerinin elde edilmesi açısından oldukça zor olabilmektedir (Daniel, 1993c).

Yapılan çalışmalar sonucunda, kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su muhtevası değerinin, ıslak konumda kompaksiyon uygulandığında daha düşük permeabilite katsayı değerine neden olduğu belirlenmiştir (Mitchell ve ark., 1965).

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sıkıştırma enerjisi artırılarak, zeminin permeabilitesinin azaltıldığı durum gösterilmektedir. Ancak ıslak konumda yapılan deneylerde de uygun mukavemet ve stabiliteyi sağlamak her zaman mümkün olmayabilmektedir (Daniel, 1993c).

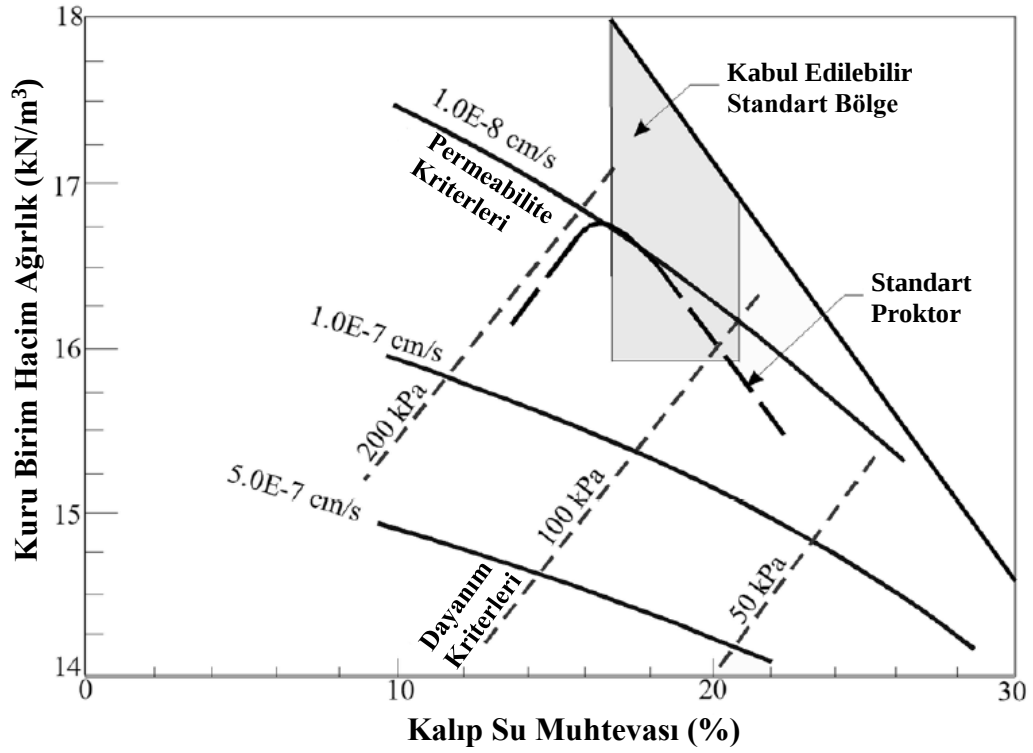


Şekil 2.5. Kuru birim hacim ağırlık-kalıp su muhtevası ilişkisi (Daniel ve Benson, 1990)



Şekil 2.6. Su muhtevasına karşılık permeabilite ile sıkıştırılma enerjisinin permeabilite üzerindeki etkisi (Daniel ve Benson, 1990)

Şekil 2.7' de ise bir kil zemin numunesi için, permeabilite ve kayma mukavemetinin ilişkisi gösterilmiştir. Kabul edilebilir standart bölge olarak gösterilen alanda tüm su muhtevası-kuru birim hacim ağırlığı noktaları ($w-\gamma_d$), permeabilite katsayısı maksimum $1,0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ değerine sahip olan deney numunelerine karşılık gelmektedir (Boutwell ve Hedges, 1989).



Şekil 2.7. Sabit permeabilite ve kayma mukavemeti (kPa) düzey çizgileri (Boutwell ve Hedges, 1989)

Katı atık depolama alanlarının tasarımı için sadece permeabilite katsayısı ve kayma mukavemeti parametreleri yeterli değildir. Kimyasal atığa karşı direnç, geomembranların üstüne gelen tabakayla arasındaki sürtünme ve oturma sırasındaki çatlaksız deformasyonu sağlama kabiliyeti gibi parametreler de göz önüne alınmalıdır.

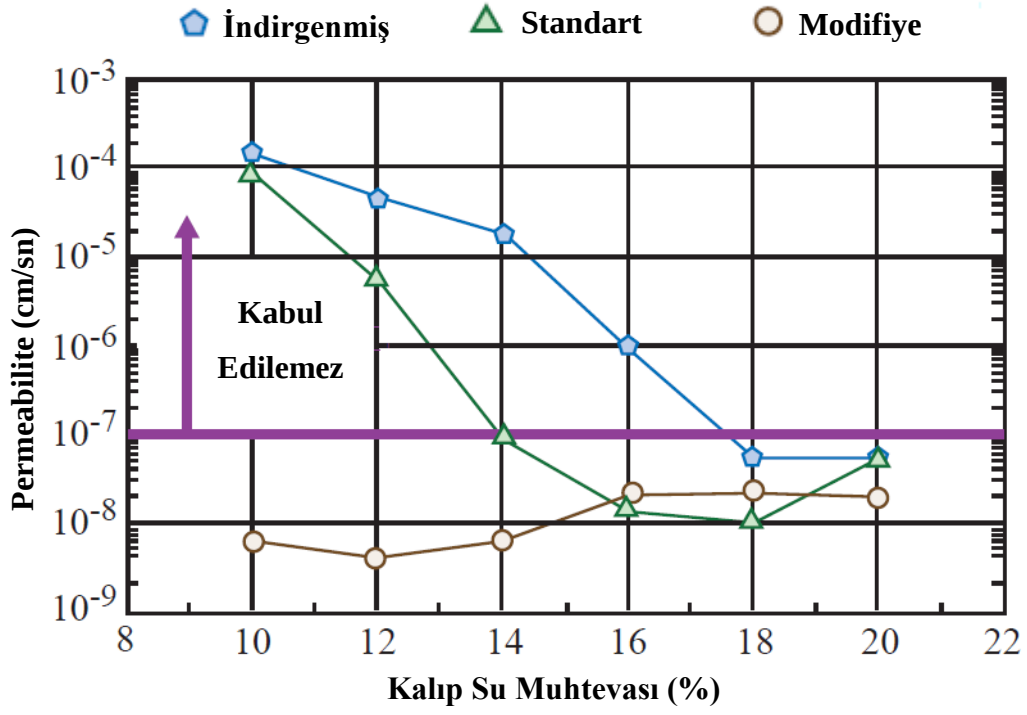
2.3.1. Sıkıştırılmış kil tabakalarının tasarımı

Sıkıştırılmış bir kil tabakasının tasarımının iyi sonuç vermesi için, düşük permeabiliteye ve stabilite potansiyeline yani yeterli kayma mukavemetine sahip olması gerekmektedir.

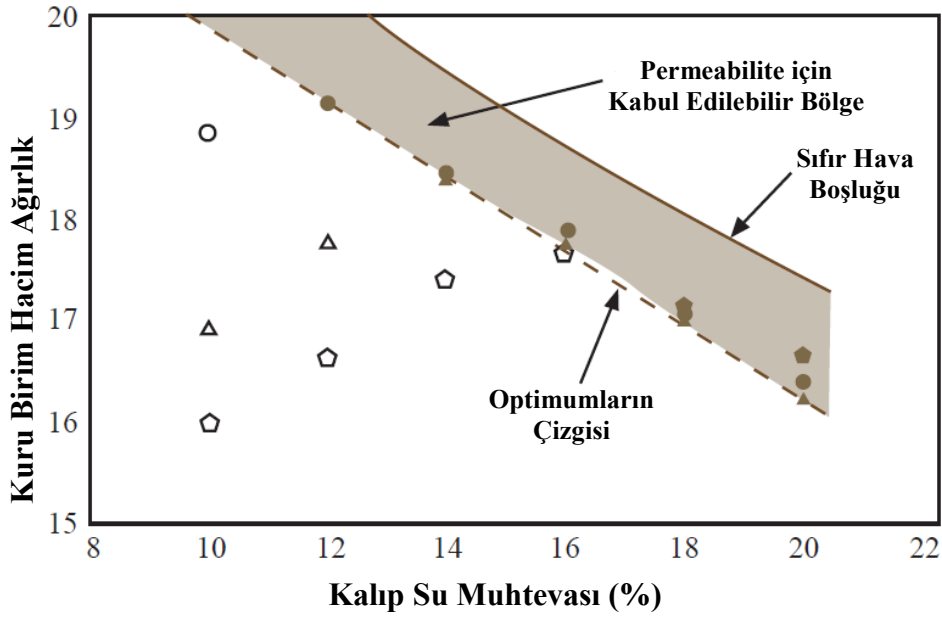
2.3.1.1. Düşük permeabilite

Sıkıştırılmış kil tabakalarının permeabilite katsayılarının maksimum $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn değerinde olduğundaki su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralıklarını sağlamak için, aşağıdaki prosedür izlenmektedir (Daniel ve Benson, 1990).

- İlk olarak deney numuneleri standart, indirgenmiş ve modifiye proktor kompaksiyon deneyleri ile laboratuvar ortamında sıkıştırılır ve her enerji için yaklaşık 5 - 6 farklı numuneye bu işlem uygulanarak bu eğriler oluşturulur.
- Sıkıştırılmış olan numuneler için permeabilite deneyi yapılmalıdır. Doygunluk derecesi, geri basınç ve efektif basıncın, dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Deney sonucunda bulunan permeabilite katsayı değerleri Şekil 2.8 'de gösterildiği şekilde kalıp su muhtevasının bir fonksiyonu olarak çizilmelidir.
- Deneyler sonucunda belirlenmiş olan permeabilite katsayılarının gereksinimlerini karşılayan sıkıştırılmış örnekleri göstermek için kullanılan farklı semboller ile (Şekil 2.9) kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevası noktaları yeniden çizilmelidir. Şekil 2.9'da içi dolu semboller, permeabilitesi maksimum kabul edilebilir değere eşit veya ondan küçük olan numuneleri yani permeabilite gereksinimlerini karşılayan sıkıştırılmış kil numunelerini temsil etmektedirler.



Şekil 2.8. Kalıp su muhtevasına karşılık permeabilite (Daniel ve Wu, 1993)



Şekil 2.9. Permeabilite hususları esas alınarak ayarlanmış kabul edilebilir bölge (Daniel ve Wu, 1993)

Bu izlenmesi gereken prosedürün önemini göstermek adına 85 tam-ölçekli sıkıştırılmış kil tabakasından oluşan arazi permeabilitesi esaslı bir veri tabanı oluşturulmuştur (Benson ve ark., 1999). Tabakalar için ayrı ayrı geniş ölçekli arazi permeabilite deneyleri uygulanmış ve tabakaların düşük permeabilite değerini elde etmek amacıyla yapılmış olmasına karşın, veri tabanı, kil tabakalarının %26'sının $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn değerinden büyük olduğunu göstermiştir. Bu durum, veri tabanının dörtte bir hata oranına sahip olduğunu göstermektedir. $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn değerinden büyük permeabilite katsayı değerlerinin elde edilmesinin sebebi olarak, optimumlar çizgisinin kuru konumunda kompaksiyonun başarılmış olması görülmektedir.

Optimumlar çizgisinin üzerine düşen ve üst tarafında kalan noktaları temsil eden sıkıştırılmış hiçbir tabakanın, $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn değerinden daha büyük bir değere sahip olmadığı görülmektedir. Kompaksiyon veri noktalarının, optimumlar çizgisi üzerine düştüğü veya üst tarafında yer aldığı zaman, $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn değerinden daha küçük olması yüksek olasılıktadır (Benson ve ark., 1999). Bu bilgiler ışığında, permeabilite gereksinimlerini karşılayan kabul edilebilir bölge Şekil 2.9'da gösterildiği gibi ayarlanmalıdır.

Uygulanan bu prosedür ile, üç farklı kompaksiyon tipinde 5-6 kil numunesinin ya da araştırılan zemin için toplamda 15 - 18 arasında numunenin permeabilite ve kompaksiyon deneylerinin yapılması gerekmektedir.

2.3.1.2. Yeterli serbest basınç mukavemeti

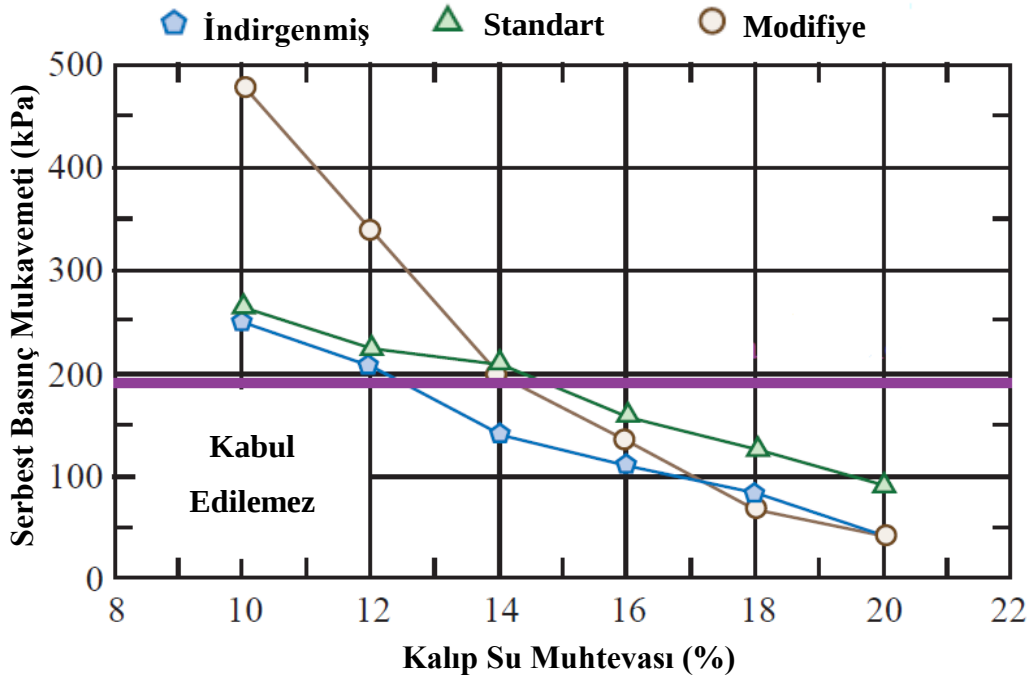
Günümüzde modern çöp deponi alanlarının yüksekliği yeterli çöp deponi alanı hacmini sağlamak amacıyla oldukça yüksek inşa edilmekte, hatta bazı çöp deponi alanlarının yüksekliği 60 m'yi aşabilmektedir. Bu tip çöp deponi alanlarının zemin tabakaları, toprağın oluşturabileceği yüksek basınç ve kayma gerilmelerine karşı yeterli mukavemette olması gerekmektedir (Güney ve Koparal, 2007).

Çöp deponi alanlarının maksimum taşıma kapasitesini destekleyen bir kil tabakası için istenen mukavemet 200 kPa olarak kabul edilmektedir (Daniel ve Wu, 1993).

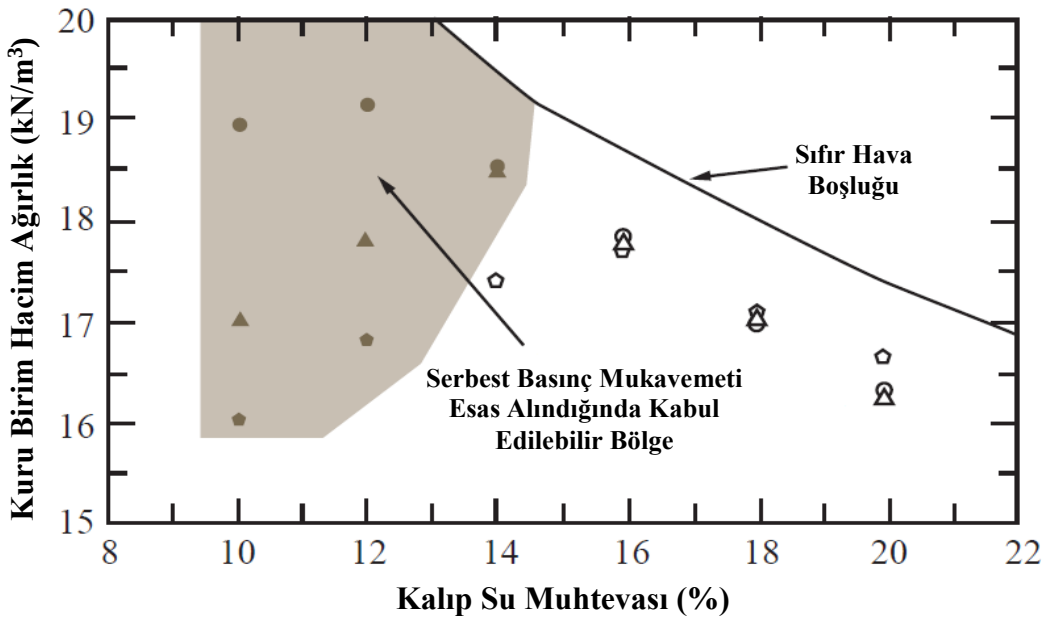
Sıkıştırılmış kil tabakalarının sahip olması beklenen kayma mukavemetinin, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralığını sağlamak adına aşağıdaki prosedür izlenmektedir.

- Sıkıştırılmış kil tabakalarının kayma mukavemetlerini belirlemek için, kil numuneleri üzerinde serbest basınç mukavemeti veya konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneylerini yapmak gerekmektedir. Deneylerle belirlenen kayma mukavemetleri, Şekil 2.10 'da gösterildiği şekilde kalıp su muhtevasının bir fonksiyonu olarak çizilmelidir.
- Sıkıştırılmış kil tabakaları için belirtilmiş olan kayma mukavemeti gereksinimlerini sağlayan numuneleri gösteren farklı semboller ile kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası ilişkisinin Şekil 2.11'de gösterildiği şekilde yeniden çizilmesi gerekmektedir. Şekil 2.11'deki içi boş semboller, kayma mukavemeti için kabul edilebilir olan minimum 200 kPa sınırını sağlamayan numuneleri temsil etmektedir. İçi dolu olan semboller ise 200 kPa'a eşit veya daha büyük olan, sıkıştırılmış kil tabakaları için belirtilmiş olan kayma mukavemeti gereksinimlerini sağlayan numuneleri temsil etmektedirler.

Uygulanan bu prosedür ile, üç farklı kompaksiyon tipinde 5-6 kil numunesinin ya da araştırılan zemin için toplamda 15 - 18 arasında numunenin kompaksiyon ve kayma mukavemeti deneylerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.10. Serbest basınç mukavemetine karşılık kalıp su muhtevası (Daniel ve Wu, 1993)

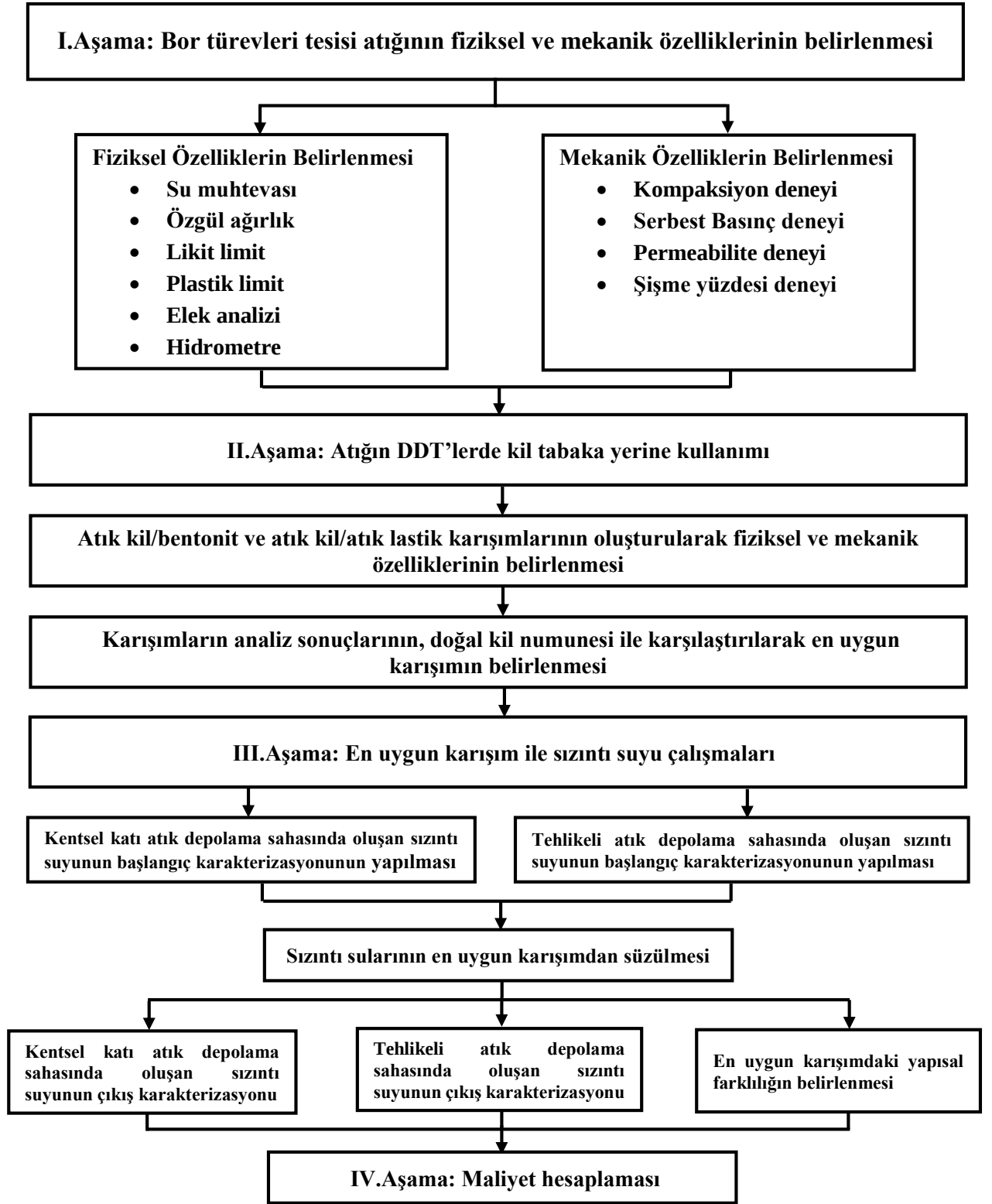


Şekil 2.11. Serbest basınç mukavemeti hususlarını esas alan kabul edilebilir bölge (Daniel ve Wu, 1993)

3. MATERYAL ve METOD

Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'nden doğal halde temin edilen atığın doğal su muhtevasını belirlemek için, deneyler başlamadan önce ilk olarak su muhtevası deneyi yapılmıştır. Daha sonra atık kil için belirlenmesi planlanan fiziksel özellikler için, özgül ağırlık, Atterberg kıvam limitleri, elek analizi ve hidrometre deneyleri; mekanik özellikler için ise kompaksiyon, serbest basınç, permeabilite ve şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır. Daha sonra atığın, bentonit ve atık lastik ile ayrı ayrı belirli oranlarda karıştırılarak karışım halleri oluşturulmuş ve bu karışım hallerinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Atığın tüm karışım halleri ile saf hali göz önüne alınmış ve DDT'ler için uygun olan malzeme belirlenerek, mevcut bir kentsel katı atık, bir de tehlikeli atık düzenli depolama tesislerinden alınan sızıntı sularıyla sızıntı suyu çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmadaki amaç en uygun malzemenin, depolama tesislerinde oluşan sızıntı sularından nasıl etkilendiğini belirlemektir. Bu çalışma neticesinde sızıntı suyunun başlangıç ve çıkış karakterizasyonları belirlenmiş ve belirlenen en uygun malzemede oluşabilecek yapısal bozulmaları belirlemek için SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması süresince izlenen iş akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İş akış şeması

3.1. Atık Kilin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Geçirimsiz kil tabakasında kullanılacak olan malzemenin belirlenmesi için deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerin bir kısmı laboratuvar ortamında yapılmakta ve malzemenin indeks ve mekanik özelliklerini tanımlamaya yöneliktir.

3.1.1. Atık kilin fiziksel (indeks) özelliklerinin belirlenmesi

Atık kilin indeks özelliklerinden su muhtevası, özgül ağırlık değeri, Atterberg limitleri ve dane çapı dağılımı belirlenmiştir.

3.1.1.1. Su muhtevası

Bir zeminin su muhtevası, o zeminin içerdiği su kütlesinin kuru dane kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Doğal halde elde edilen numune, 105 °C etüvde 24 saat bekletildikten sonra gerekli ölçümler yapılarak su kütlesi ve kuru dane kütlesi belirlenmektedir. Su muhtevası, su miktarının kuru dane ağırlığına oranına oranı olarak, yüzde (%) cinsinden ifade edilmektedir (Akpınar, 2005).

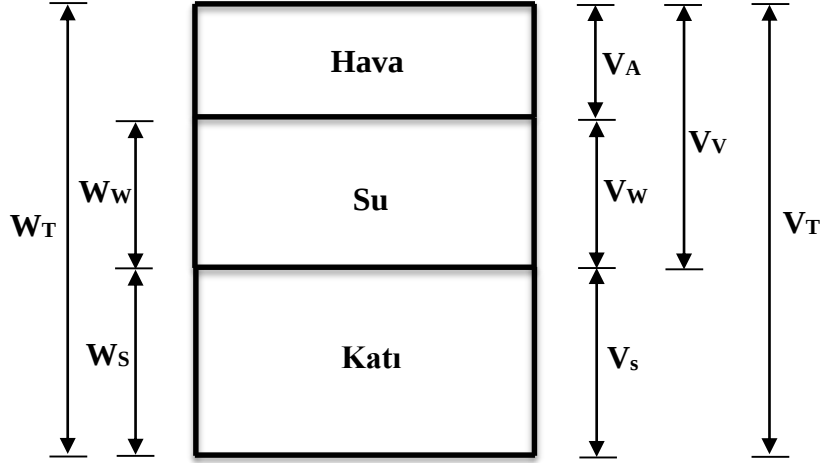
Su muhtevası deneyi, ASTM D2216-10’da belirtilen “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass” standardına göre yapılmıştır. Bu deney için Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü’nde bulunan etüv kullanılmıştır.

3.1.1.2. Özgül ağırlık

Şekil 3.2’de bir zeminin faz diyagramı gösterilmektedir ve “Katı” olarak gösterilen bölüm, danelerin net toplam kütle hacmini tanımlamaktadır. 20 °C sıcaklıkta zeminlerin 1 cm³ hacimlerine karşılık gelen net kütlesine dane birim hacim ağırlığı denilmektedir (Akpınar, 2005).

Özgöl ağırlık (G_s), boyutsuz olup dane birim hacim ağırlığının, suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Özgöl ağırlık deneyi, ASTM D854-10’da belirtilen "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer" standardına göre yapılmıştır.



Şekil 3.2. Zemin faz diyagramı (Das, 1990)

3.1.1.3. Dane çapı dağılımı

Bir zemin numunesinin dane çapı dağılımı, elek analizi ve hidrometre deneylerinin yapılması ile belirlenebilmektedir. Elek analizi ile ince kum ve daha iri boyuttaki zeminlerin (0,075 mm’den daha büyük daneler) dane çapı dağılımının belirlenmesi sağlanırken, hidrometre deneyi ile ince daneli zeminlerin (0,075 mm’den daha küçük daneler) dane çapı dağılımının belirlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca elek analizi sonucu ile zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da belirlenebilmektedir. Hidrometre deneyi, farklı boyutlardaki danelerin farklı düşüş hızlarına sahip olması mantığına dayanmaktadır. Daha iri daneli olan zemin daneleri daha hızlı düşüş yaşayacak ve bunun sonucunda da danelerin düşüş hızına bağlı olarak dane çapı dağılımı belirlenebilmektedir.

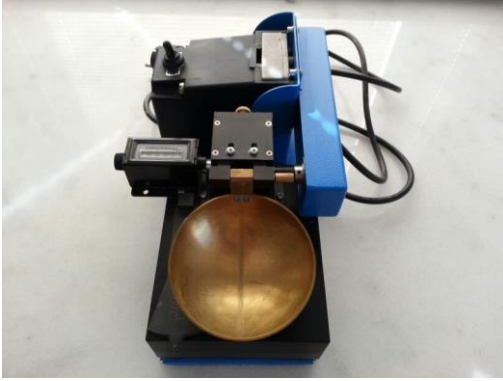
Dane apı dağılının belirlenebilmesi amacıyla yapılan elek analizi için ASTM D421-85 (2007)'de belirtilen "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants" metodu ve hidrometre analizi için ASTM D422-63 (2007)'de belirtilen "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil" metoduna göre yapılmıştır.

3.1.1.4. Atterberg kıvam limitleri

Killer suyla temas ettikleri zaman toz görünümünden çamura dönüşmektedirler. Su oranı arttırıldığı takdirde ise sıvı görünümüne kadar ulaşabilmektedirler. Kilin bu özellik değişimlerine kıvam denilmekte ve bu kıvamların su muhtevalarını belirlemek amacı ile Atterberg deneyleri yapılmaktadır. Atterberg kıvam limitleri ince daneli zeminlerin plastiklik ve likitlik kıvamlarının su muhtevası değerlerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır ve ince daneli zeminlerin sınıflandırılmasında, şişme ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Geçim, 2004).

Likit limit deneyi ile akıcı durumdaki zeminin plastik duruma dönüştüğü andaki su muhtevası belirlenmektedir ve bu deney yaygın olarak kullanılan, "Casagrande" ve "düşen koni penetrasyon" yöntemleri ile uygulanmaktadır (MEGEP, 2006). Bu çalışmada, likit limit değerleri "Casagrande" yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve deney için Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü'nde bulunan UTEST marka sert plastik tabanlı motorlu likit limit deney cihazı kullanılmıştır (şekil 3.3). Atterberg kıvam limitleri deneyleri, ASTM D4318-10'da belirtilen "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils" metoduna göre yapılmıştır.

Plastik limit, bir zemin numunesinin plastik halden, gevşek-katı hale geçtiği andaki zeminin kıvamı olarak tanımlanmaktadır. Plastik limit değeri, ıslak zeminin yoğrulması sırasında yüzeyinde çatlakların belirlediği andaki su muhtevasının belirlenmesi ile bulunmaktadır (MEGEP, 2006).



Şekil 3.3. Motorlu likit limit deney cihazı

3.1.2. Atık kilin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Atık kilin mekanik özellikleri içi kompaksiyon, serbest basınç, şişme yüzdesi ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

3.1.2.1. Kompaksiyon deneyi

İstenilen geçirimsizlik özelliklerinin sağlanabilmesi için zeminlerin uygun şekilde sıkıştırılması çok önemlidir. Bir zeminin, tabaka tabaka serilerek, silindirle üstünden geçme, vibrasyon (titreşim) ve tokmakla darbe uygulama gibi metotlar kullanılarak boşluk oranının azaltılarak sıkıştırılması işlemine “kompaksiyon” denilmektedir. Yol, havaalanı, toprak baraj, toprak dolgu inşaatlarında belli bir su muhtevası değerinde bu uygulama kullanılmaktadır. Kompaksiyon sonucunda, zeminin taşıma gücünün artması, geçirimliliğinin azaltılması, zeminin su alarak hacim değişikliklerine uğramasının azalması, sabit hareketli yükler altında zeminin yapacağı oturmaların azalması gibi neticeler beklenmektedir (MEGEP, 2006).

Laboratuvarda zeminlerin sıkışma özellikleri kompaksiyon deneyi ile belirlenebilmektedir. Bu deney, zeminlerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Laboratuvarda zeminin sıkışma özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan kompaksiyon deneyinin standart ve modifiye proktor yöntemleri bulunmaktadır.

Uygulanan enerji, uygulanan yük ve yüksekliği ile düşüş sayıları Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Laboratuvarda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri arazide referans niteliği taşımaktadır. Çünkü laboratuvar deneylerinin arazi şartlarını % 100 temsil etmesi imkânsızdır. Daha doğru sonuç veren arazi deneyleri ile kompaksiyon eğrileri oluşturulabilmektedir (İncesu, 2012).

Çizelge 3.1. Kompaksiyon türü ve enerjileri (Daniel ve Koerner, 2007)

Kompaksiyon Türü	Tabaka Sayısı	Ağırlık	Düşüş Yüksekliği	Kompaksiyon Enerjisi
Standart	3	24,5 N	305 mm	594 kN-m/m ³
Modifiye	5	44,5 N	457 mm	2693 kN-m/m ³

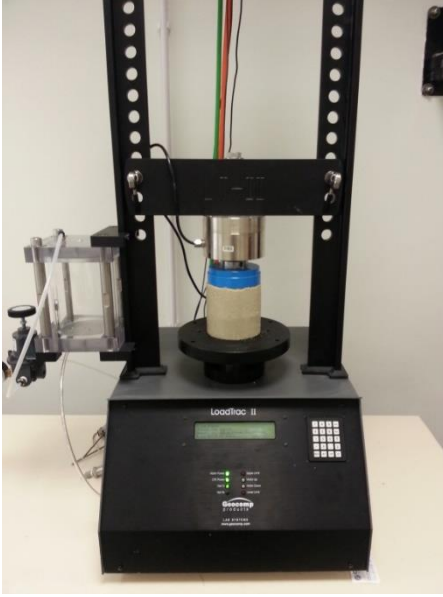
Bu çalışmada standart proktor kompaksiyon metodu kullanılmaktadır ve farklı su muhtevaları ile hazırlanan zemin numuneleri, 944 cm³ hacmindeki bir kalıp içerisinde 3 tabaka halinde yerleştirilip, her tabakaya 25 vuruş olacak şekilde 594 kN-m/m³ enerji ile sıkıştırılmaktadır. Standart kompaksiyon deneyi, ASTM D698-12’de belirtilen "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))" metoduna göre yapılmıştır.

3.1.2.2. Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyi ile kohezyonlu zeminlerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmektedir. Bu deney yapılırken, silindirik bir zemin numunesi kullanılmakta ve sadece eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır. Eksenel yük artışlarına maruz kalan zemin numunesinde boyda kısalma, yanal şişme ve kayma oluşmaktadır. Zemin numunesinin kırıldığı anda oluşan bu eksenel gerilmelerin en büyük değeri zeminin serbest basınç mukavemetini vermektedir.

Deney uygulanırken numunenin drenajı kontrol edilemediği için, zeminin drenajsız kayma mukavemeti belirlenmektedir.

Serbest basınç deneyleri, standart proktor (ASTM D698-12) metoduna göre optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde uygulanmıştır. Numunelerin serbest basınç deneyleri ASTM D2166/D2166M-13’de belirtilen "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil" metoduna göre yapılmıştır. Deneyler Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü’nde bulunan GEOCOMP-UTEST marka Bilgisayar Kontrollü Tam Otomatik Dinamik ve Statik Üç Eksenli Deney Seti Cihazı’nda yapılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Bilgisayar kontrollü tam otomatik dinamik ve statik üç eksenli deney seti cihazı (Serbest basınç deneyi)

3.1.2.3. Permeabilite deneyi

Permeabilite (hidrolik iletkenlik), zeminlerin suyu iletebilme kapasitesi veya zeminlerin geçirgenliği olarak tanımlanmaktadır. Permeabilite deneyinin mantığı, suyun zemin daneleri arasındaki hareketine dayanmaktadır ve permeabilite katsayısı

ile boyutlandırılmaktadır. Permeabilite katsayısı, kirliliğin fiziksel olarak izole edilme kapasitesini göstermektedir (Akpınar, 2005). Permeabilite deneyi, düşen seviyeli ve sabit seviyeli olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir (Das, 1990).

Permeabilite deneyleri, standart proktor (ASTM D698-12) metoduna göre optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde düşen seviyeli olarak uygulanmıştır. Numunelerin permeabilite deneyleri, ASTM D5856-95’de belirtilen “Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid Wall, Compaction-Mold Permeameter” metoduna göre yapılmıştır. Deneyler, Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü’nde bulunan permeabilite deney setinde yapılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Permeabilite deney seti

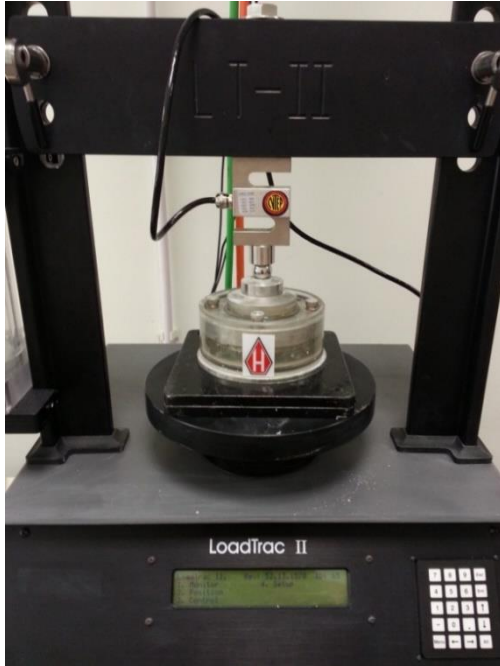
3.1.2.4. Şişme yüzdesi deneyi

Şişme yüzdesi deneyi, bir zemin numunesinin üzerine uygulanan belirli bir sürşarj yükü altında suya doygun hale gelinceye kadar yapmış olduğu hacimsel artışın, ilk hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır. Kısaca, zemin numunesinde

oluşabilecek hacimsel artış yüzdesi olarak ifade edilmektedir (Uzer ve Olgun, 2006).

Şişme potansiyeli deneyi, standart proktor (ASTM D698-12) metoduna göre optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde uygulanmıştır. Numuneler standart proktor kompaksiyon moldunun tabanından konsolidasyon ringine hapsedilerek elde edilmiştir. Standardı sağlamak adına bütün numuneler mold tabanından alınmıştır.

Numunelerin şişme yüzdesi deneyleri, ASTM D4546-14’de belirtilen “Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils” metoduna göre ve standart gereği numuneler üzerine 1kPa sürşarj yükü uygulanarak yapılmıştır. Deneyler Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü’nde bulunan GEOCOMP-UTEST marka Bilgisayar Kontrollü Tam Otomatik Dinamik ve Statik Üç Eksenli Deney Seti Cihazı’nda yapılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Bilgisayar kontrollü tam otomatik dinamik ve statik üç eksenli deney seti cihazı (Şişme yüzdesi deneyi)

3.2. Atık Kilin DDT’lerde Geçirimsiz Tabaka Olarak Kullanımı ile İlgili Deneysel Çalışmalar

Atık kilin DDT’lerde geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi için farklı malzemeler ile karışımlar oluşturulmuş ve atığın saf hali ile karışım hallerinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

3.2.1. Geçirimsiz tabaka sisteminde kullanılan malzemeler

Atık kilin geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğinin test edilmesi açısından yapılan analizler haricinde, atık kil daha önceden ön görülen bentonit ve atık lastik ile belli oranlarda ayrı ayrı karıştırılarak yeni malzemeler elde edilmiş ve bu yeni malzemelerin analizleri de yapılmıştır.

3.2.1.1. Atık kil

Kullanılan atık kil, bor konsantresi üretimi yapılan, Eti Holding Eti Bor A.Ş.'ye ait olan Eskişehir-Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nden temin edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Eti Holding Eti Bor A.Ş. Eskişehir-Kırka İşletmesi’nde açığa çıkan bor türevi atıkları ve atık barajı

Eti Holding Eti Bor A.Ş., Eskişehir-Kırka dışında Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek işletmelerinde de bor konsantresi üretimi gerçekleştirmektedir. Bu tesislerde bor üretimi, yıkama işlemi sonunda dağıtma ve sınıflandırma sonucunda temelinde killi malzemenin uzaklaştırması işlemiyle gerçekleştirilmektedir (Güyağüler 2001, Aytekin 1995, Erkal ve Girgin 1992). Dolayısıyla, bor konsantresi üretimi sırasında oldukça fazla atık kil oluşmaktadır.

Türkiye, dünyadaki bor rezervlerinin %72'sine sahip olarak, 1,8 milyon ton rezerv ile dünyada birinci konumda yer almaktadır. (Bor Sektör Raporu, 2014). Bu rezervlerde bor türevleri üretimi, Eti Bor A.Ş. ait Kırka Bor Türevleri tesisinde Boraks Dekahidrat, Boraks Pentahidrat, Susuz Boraks, Bandırma Bor Türevleri Tesisinde Boraks Pentahidrat, Boraks Dekahidrat, Borik asit ve Sodyum Perborat şeklinde yapılmaktadır (Güyağüler 2001, Aytekin 1995, Erkal ve Girgin 1992).

Atık kilin de elde edildiği, Türkiye'nin en büyük bor rezervine sahip olan Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'nde 1 milyon ton boraks penta hidrat üretimi sonucunda, 900.000 ton/yıl gibi oldukça büyük miktarlarda bor türevleri atığı meydana gelmektedir.

Elde edilen atık kilin fiziksel (indeks) özellikleri, malzemenin tanınması açısından büyük önem taşımaktadır. Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'nden elde edilen atık kilin doğal su muhtevası belirlendikten sonra 105°C'de kurutulup homojen deney numuneleri elde etmek için öğütülmüş, daha sonra geoteknik özellikleri belirlenmiştir.

Atık kilin su muhtevası: Atık kilin doğal su muhtevası, numunenin 105°C'de kurutularak gerekli ölçümlerin yapılması sonucunda %39,2 olarak belirlenmiştir.

Atık kilin özgül ağırlık değeri: 105°C'de kurutulup öğütülmüş olan atık kilin dane özgül ağırlığı yapılan deneyler sonucunda 2,77 olarak belirlenmiştir.

Atık kilin dane çapı dağılımı: Atık kilin dane çapı dağılımını belirlemek için elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır.

Yapılan elek analizi sonuçları Çizelge 3.2’de, hidrometre deneyi sonuçları ise Çizelge 3.3’de gösterilmektedir.

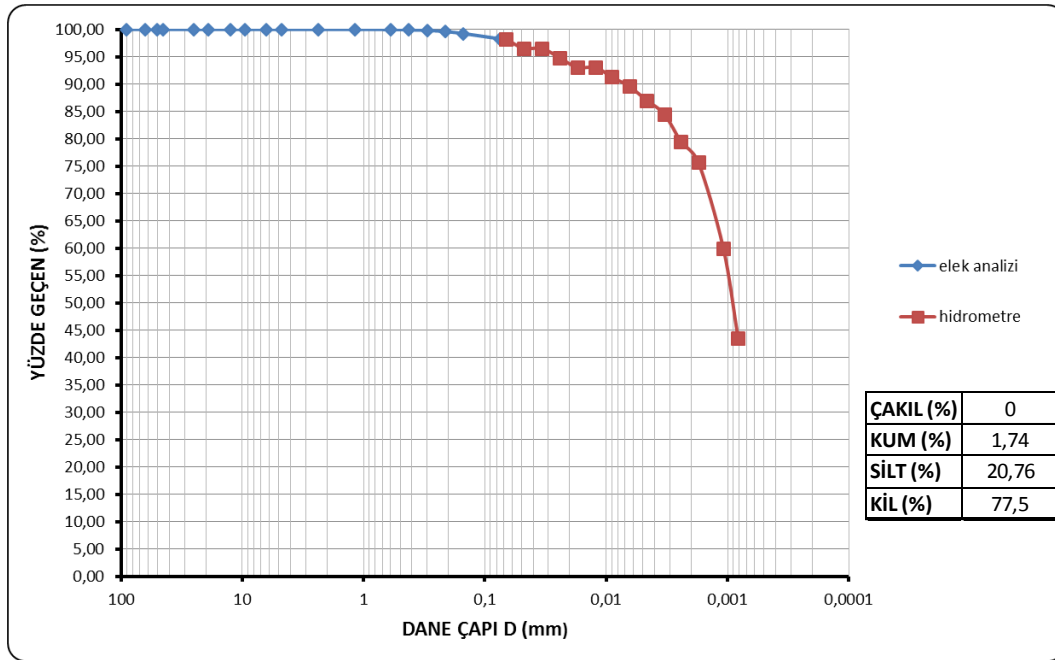
Çizelge 3.2. Atık kil elek analizi sonuçları

ELEK NO	DELİK ÇAPI (mm)	ELEK ÜSTÜ KALAN (gr)	ELEK ÜSTÜ KALAN (%)	TOPLAM KALAN (%)	TOPLAM GEÇEN (%)
3½*"	90	0	0,00	0,00	100,00
2½*"	63	0	0,00	0,00	100,00
2*"	50	0	0,00	0,00	100,00
1¾*"	45	0	0,00	0,00	100,00
1*"	25	0	0,00	0,00	100,00
¾*"	19	0	0,00	0,00	100,00
½*"	12,5	0	0,00	0,00	100,00
⅜*"	9,5	0	0,00	0,00	100,00
¼*"	6,3	0	0,00	0,00	100,00
4*"	4,75	0	0,00	0,00	100,00
8*"	2,36	0	0,00	0,00	100,00
16*"	1,18	0,04	0,01	0,01	99,99
30*"	0,6	0,24	0,03	0,04	99,96
40*"	0,425	0,28	0,04	0,07	99,93
50*"	0,3	0,79	0,11	0,18	99,82
70*"	0,212	1,63	0,22	0,40	99,60
100*"	0,15	2,88	0,38	0,78	99,22
200*"	0,075	7,18	0,96	1,74	98,26

Yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda, atık kilin granülometri eğrisi çizilerek dane çapı dağılımı belirlenmiştir (Şekil 3.8). Kurutulup öğütülen atık kilin, %1,74’ünün kum, %20,76’sının silt ve %77,5’inin kil olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Atık kil hidrometre deney sonuçları

GEÇEN SÜRE (DK)	ISI (C°)	GERÇEK OKUMA Ra	DÜZELTİLMİŞ OKUMA Rc	% GEÇEN	MENİSKÜS DÜZELTMESİ	TABLODAN ALINAN L DEĞERİ	L/t	TABLODAN ALINAN K DEĞERİ	D (mm)
0,25	24	54	56,5	110,2880	0	7,1	28,4000	0,01257	0,0669876
0,50	24	53	55,5	108,336	0	7,3	14,6000	0,01257	0,0480299
1,00	24	53	55,5	108,336	0	7,3	7,3000	0,01257	0,03396227
2	24	52	54,5	106,384	0	7,4	3,7000	0,01257	0,02417888
4	24	51	53,5	104,432	0	7,6	1,9000	0,01257	0,01732655
8	24	51	53,5	104,432	0	7,6	0,9500	0,01257	0,01225172
15	24	50	52,5	102,48	0	7,8	0,5200	0,01257	0,00906436
30	24	49	51,5	100,528	0	7,9	0,2633	0,01257	0,00645042
60	24	47,5	50	97,6	0	8,1	0,1350	0,01257	0,00461851
120	24	46,1	48,6	94,8672	0	8,4	0,0700	0,01257	0,00332571
240	24	43,2	45,7	89,2064	0	8,9	0,0371	0,01257	0,00242061
480	24	41	43,5	84,912	0	9,2	0,0192	0,01257	0,00174024
1440	24	32	34,5	67,344	0	10,7	0,0074	0,01257	0,00108354
2880	24	22,5	25	48,8	0	12,2	0,0042	0,01257	0,00081812



Şekil 3.8. Atık kilin granülometri eğrisi

Elek analizi, hidrometre deneyi ve Atterberg kıvam limitleri değerlerine bakılarak atık, CH (yüksek plastisiteli kil) olarak tanımlanmıştır.

3.2.1.2. Bentonit

Kullanılacak olan katkı maddelerinden biri olan bentonit, Karakaya Bentonit Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir.

Bentonit, alüminyum ve magnezyumca zengin volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışması ve bozunmasıyla oluşmuş, başta montmorillonit olmak üzere çok küçük kristal yapıdaki kil minerallerinden oluşan, gözenekli ve yumuşak bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Doğal halde bulunan bentonit, yüksek su muhtevasına sahip, kaygan dokulu, yumuşak bir kaya görüntüsüne sahip ve suda kendiliğinden dağılan bir yapıya sahiptir. Dane boyutunun çok küçük olması ve yüzey alanının fazla olmasından dolayı su ile birleştiğinde hacmi 10 - 30 kat arasında artış gösterebilmektedir. 200 °C sıcaklığa kadar şişme özelliğini koruyabilmektedir. 600 °C'nin üstünde ise şişme özelliğini tamamen kaybedebilmektedir. Yanal şişme basıncı 4,48 kg/cm², düşey permeabilitesi 4,09x10⁻¹² m/sn'dir (Taşpolat ve ark., 2006; Hekimoğlu, 1996).

Bentonitin sahip olduğu yapısal özellikler, onun birçok endüstriyel kullanım alanında yer almasını sağlamaktadır. İlaç, boya, gıda ve birçok inşaat alanında kullanılabilir. Geçirimsizlik özelliğine sahip olması sebebiyle, düzenli depolama sahalarında geçirimsizlik ve örtü tabakalarında sıkıştırılmış zeminlerin iyileştirilmesinde, jeosentetik kil tabakalarında, dolgu tabakalarında toprak ve çimento ile karıştırılarak dikey sızdırmazlık perdesi olarak kullanılabilir. Bentonitler genellikle sodyum veya kalsiyum bentonit olarak üzere iki grupta incelenmektedirler. Sodyum bentonit, kalsiyum bentonite oranla daha yüksek şişme potansiyeli ve daha düşük permeabilite katsayı değerine sahip olmasından dolayı daha fazla tercih edilmektedir (Gleason ve ark., 1997).

Bu çalışmada kullanılan bentonitin belirli özellikleri Çizelge 3.4' de gösterilmektedir. Likit limit değeri Casagrande yöntemi ile belirlenmiş, TS 1500'e (İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması) göre CH olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 3.4. Bentonitin özellikleri

Özellik	Değer
Likit Limit (%)	93
Plastik Limit (%)	45
#200 elek altı (%)	93
Özgül Ağırlık	2,61
Sınıfı	CH

3.2.1.3. Atık lastik

Kullanılacak olan katkı maddelerinden biri olan atık lastikler, çok miktarda bulunması ve zor ayrışması sebebiyle önemli çevresel sorunlara sebep olabilmektedirler. Ülkemizde bir yılda yaklaşık 24 milyon adet lastik üretilmektedir. Bu lastiklerin yaklaşık 8,5 milyonu da atık haline gelmektedir ki bu da yaklaşık 200.000 tona denk gelmektedir. Bu atıkların depolandıkları alanlar çevreyi tehdit etmektedirler. Bu alanlarda meydana gelen şiddetli ve söndürülmesi zor yangınlar, atmosfere tonlarca zehirli bileşik yayılmasına sebep olmaktadır. Siyah bir bulut görüntüsünü andıran, atmosfere yayılan bu bileşikler içerisinde, karbon siyahı, yarı uçucu organikler ve uçucu organikler, yağlar, kükürt oksitler, çok halkalı hidrokarbonlar, azot oksitler, karbon oksitleri, uçucu partiküller, nitrosaminler ve As, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe vb. gibi metaller bulunabilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda, atık lastiklerin hem çevresel hem de ekonomik açıdan değerlendirilmeleri gerekliliğinden yola çıkılarak atık lastiklerin piroliziyle elde edilen katı ürünlerin ticari açıdan değerlendirilebilirliği üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Banar ve ark., 2011; Akyıldız, 2011).

Kullanılacak olan katkı maddelerinden atık lastik için belirli bir standardı sağlamak adına eleme işlemi yapılmış ve sadece elek numarası 16 olan 1.18 mm çaplı elekten geçen malzemeler kullanılmıştır. Daha büyük çapta atık lastikler çalışmalara dâhil edilmemiştir.

3.2.2. En uygun geçirimsiz tabaka karışımının oluşturulması ve özelliklerinin belirlenmesi

Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nden elde edilen atık kil ile bentonit ve atık lastik ayrı ayrı kullanılarak karışımlar oluşturulmuştur.

Oluşturulacak olan karışımların homojenliğinin sağlanması, deney sonuçlarının doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle, atık kil ile bentonit içeren karışımlar oluşturulurken, bentonit kilinin yapısına bağlı olarak homojenliğin sağlanması açısından izlenmesi gereken sıra önemlidir (Kayabalı, 1997). Atık kil/bentonit karışımlarında, önce kuru kil ile suyun homojen hale gelene kadar karıştırılması gerekmektedir. Daha sonra bentonit ilave edilerek tekrar homojenlik sağlanana kadar karıştırılması gerekmektedir (Şekil 3.9). Atık kil/atık lastik karışımları oluşturulurken, homojenliği sağlamak adına böyle bir sıralamaya gerek duyulmamaktadır.



Şekil 3.9. Atık kil/bentonit karışımlarının hazırlanması

Bu çalışmada altı farklı atık kil/bentonit, atık kil/atık lastik karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımların oranları ve karışımların kodları Çizelge 3.5’de verilmiştir. Kodlama sisteminde B: Bentonit, CW: Atık Kil ve TW: Atık Lastik için kullanılmıştır:

Çizelge 3.5. Karışımların oranları ve kodları

Karışımların Oranları	Karışımların Kodları
%2 Bentonit - %98 Atık Kil	2B/98CW
%4 Bentonit - %96 Atık Kil	4B/96CW
%6 Bentonit - %94 Atık Kil	6B/94CW
%5 Atık Lastik - %95 Atık Kil	5TW/95CW
%15 Atık Lastik - %85 Atık Kil	15TW/85CW
%25 Atık Lastik - %75 Atık Kil	25TW/75CW

3.2.3. Bulgular ve değerlendirme

Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nden temin edilen atığın saf halinin bütün fiziksel özellikleri belirlendikten sonra, atık kil ve atık kil/bentonit ile atık kil/atık lastik karışımlarının geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Atığın saf ve karışım hallerinin DDT’lerde geçirimsiz kil tabakası yerine kullanımı için 4 koşul göz önüne alınmıştır:

- DDT geçirimsiz tabakalarında kullanılacak olan malzemeler için plastisite indisi (PI) < 50 olması koşulu (Daniel ve Wu, 1993),
- DDT’lerdeki kil tabaka için minimum taşıma kapasitesinin 2kg/cm² olması koşulu (Daniel ve Wu, 1993),
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik gereğince tehlikeli atık ve belediye atıkları için izin verilen maksimum permeabilite değerinin 1,0x10⁻⁹ m/sn olması koşulu (ADDDY, 2010),
- %10’dan düşük şişme yüzdesine sahip olan zeminler, düşük şişme dereceli olarak sınıflandırıldığından, şişme yüzdesinin %10’dan büyük olması koşulu (Gromko, 1974).

Atık kilin ve karışımlarının bu koşullar için analizleri tamamlandıktan sonra, tüm sonuçlar karşılaştırılarak en uygun malzemenin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Atık kilin saf hali, atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarının kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası ilişkileri, plastisite indeksleri, serbest basınç dayanımları, permeabilite katsayıları ve şişme yüzdeleri belirlenmiştir.

3.2.3.1. Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları

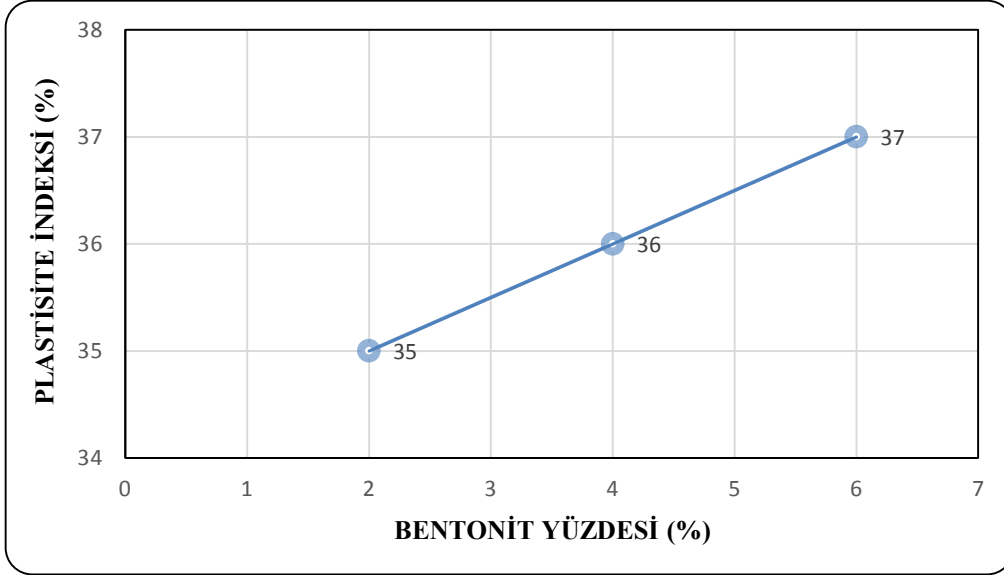
Atterberg kıvam limitleri için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Yapılan likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda atık kilin likit limit değeri %58 (Şekil A.1), plastik limit değeri %30 ve plastisite indeksi (PI) % 28 olarak belirlenmiştir (Çizelge 3.6). Bu değerler neticesinde atık kil, DDT'lerde kullanılacak olan malzemeler için $PI < 50$ olması (Daniel ve Wu, 1993) koşulunu sağlamaktadır.

Atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımları oluşturulduktan sonra, karışımların likit limit (Şekil A.2, A.3, A.4, A.5, A.6 ve A.7) ve plastik limit deneyleri yapılarak plastisite indeksleri belirlenmiştir (Çizelge 3.6).

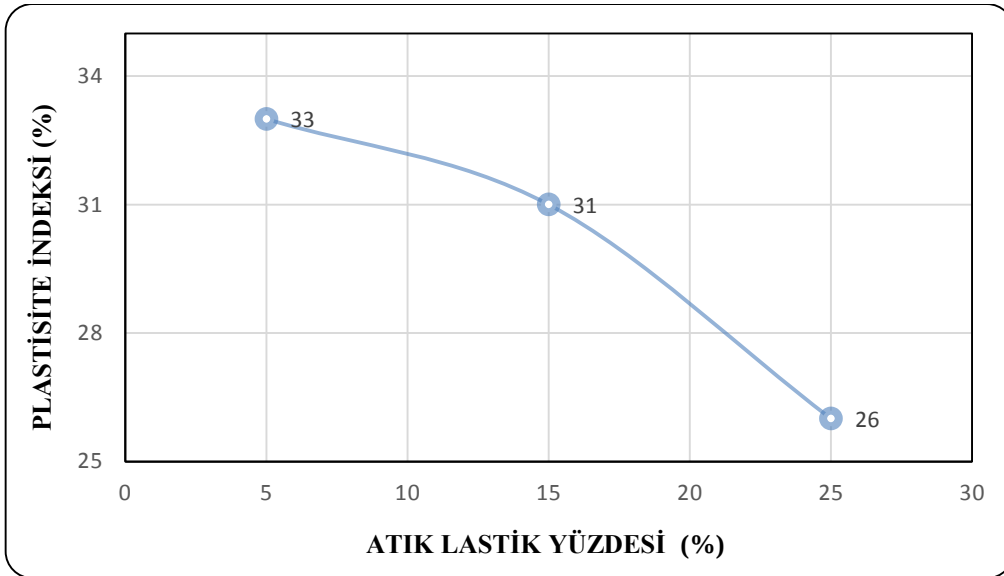
Çizelge 3.6. Atık kilin ve karışımların Atterberg kıvam limitleri

	Deneyler		
	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndeksi (%)
Atık Kil	58	30	28
(2B/98CW)	66	31	35
(4B/96CW)	68	32	36
(6B/94CW)	70	33	37
(5TW/95CW)	62	29	33
(15TW/85CW)	59	28	31
(25TW/75CW)	53	27	26

Atık kil/bentonit karışımların bentonit yüzdesine bağlı plastisite indeksi (PI) değişimleri Şekil 3.10’da, atık kil/atık lastik karışımlarının atık lastik yüzdesine bağlı plastisite indeksi (PI) değişimleri Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Bentonit yüzdesi-plastisite indeksi ilişkisi

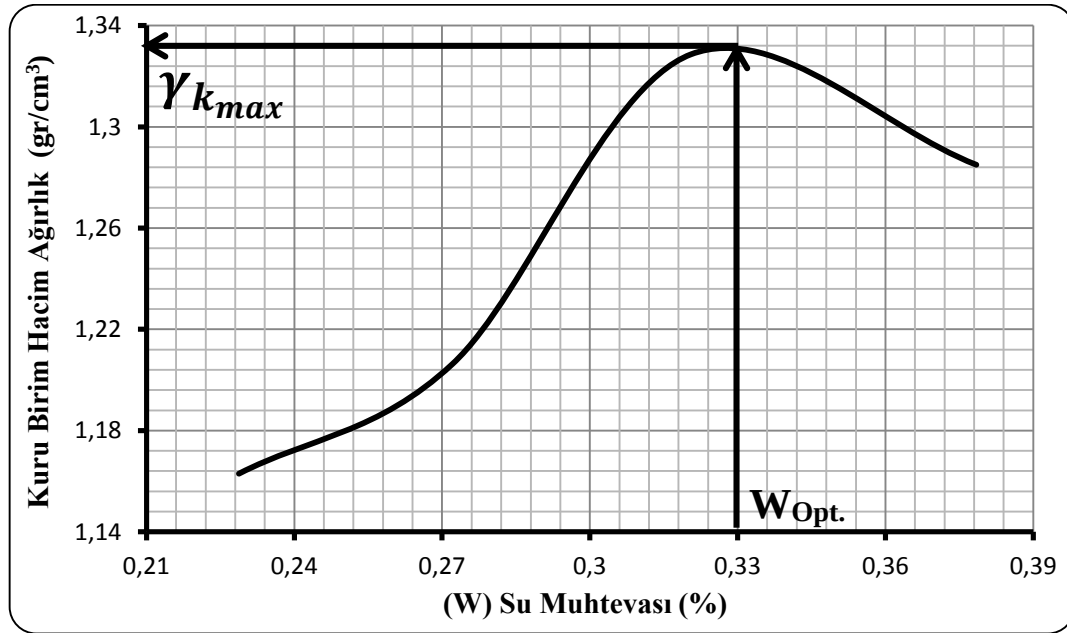


Şekil 3.11. Lastik yüzdesi-plastisite indeksi ilişkisi

Deneyler sonucu belirlenen atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarının plastisite indeks değerlerinin, DDT'lerde kullanılacak olan malzemeler için $PI < 50$ olması (Daniel ve Wu, 1993) koşulunu sağladığı görülmektedir.

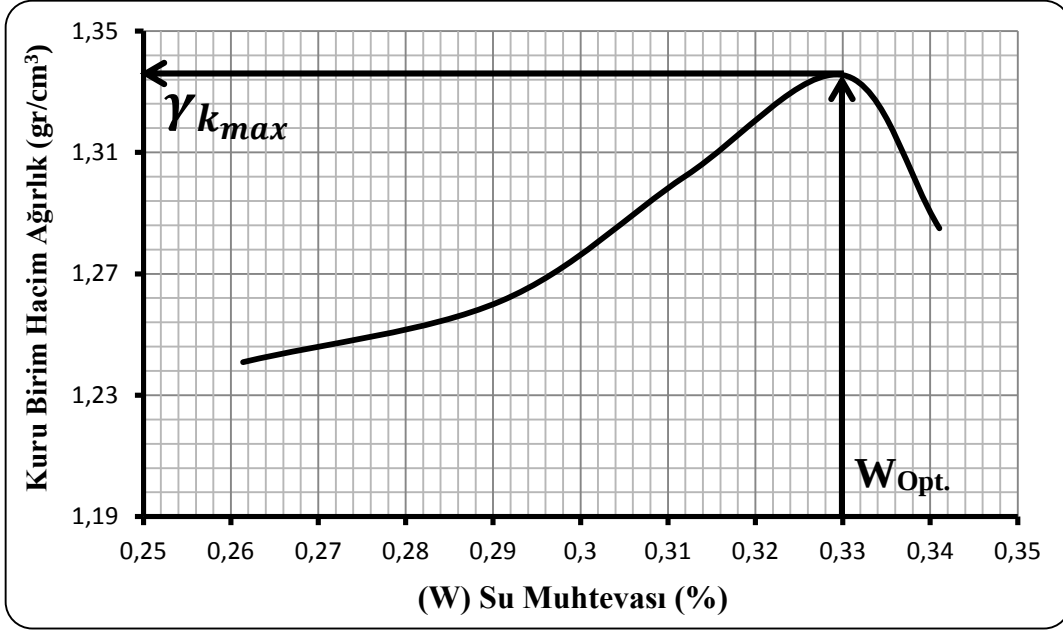
3.2.3.2. Kompaksiyon deney sonuçları

Çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakalarının arazide istenilen kompaksiyon enerjisini elde edebilmek için, laboratuvarında standart proktor kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Atık kil, atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarının kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisi belirlenmiştir. Yapılan deney sonucunda atık kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası (%33) belirlenmiştir (Şekil 3.12).

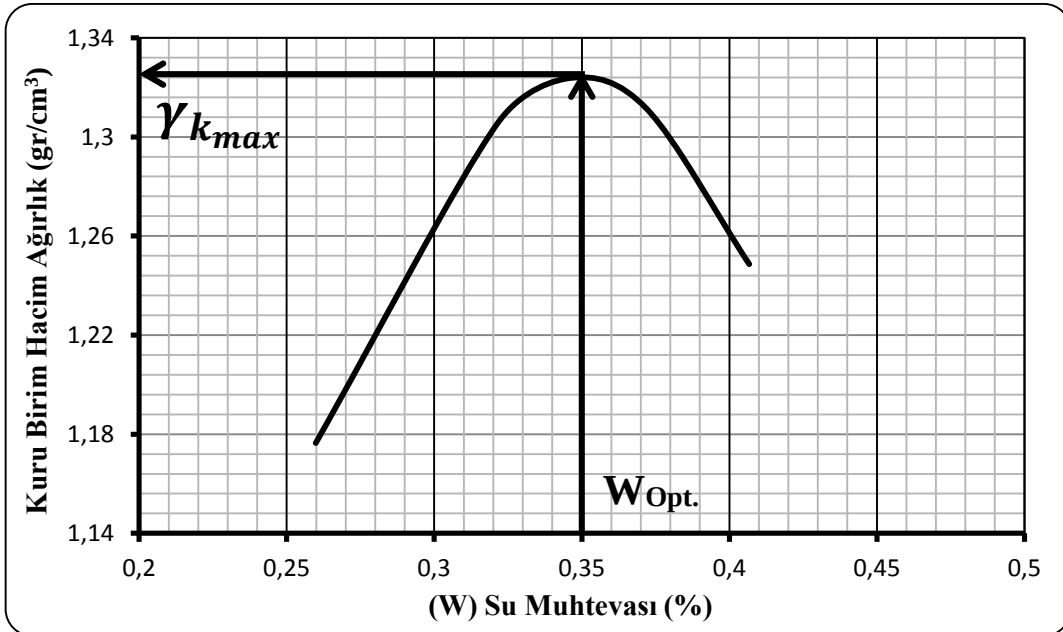


Şekil 3.12. Atık kil kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi

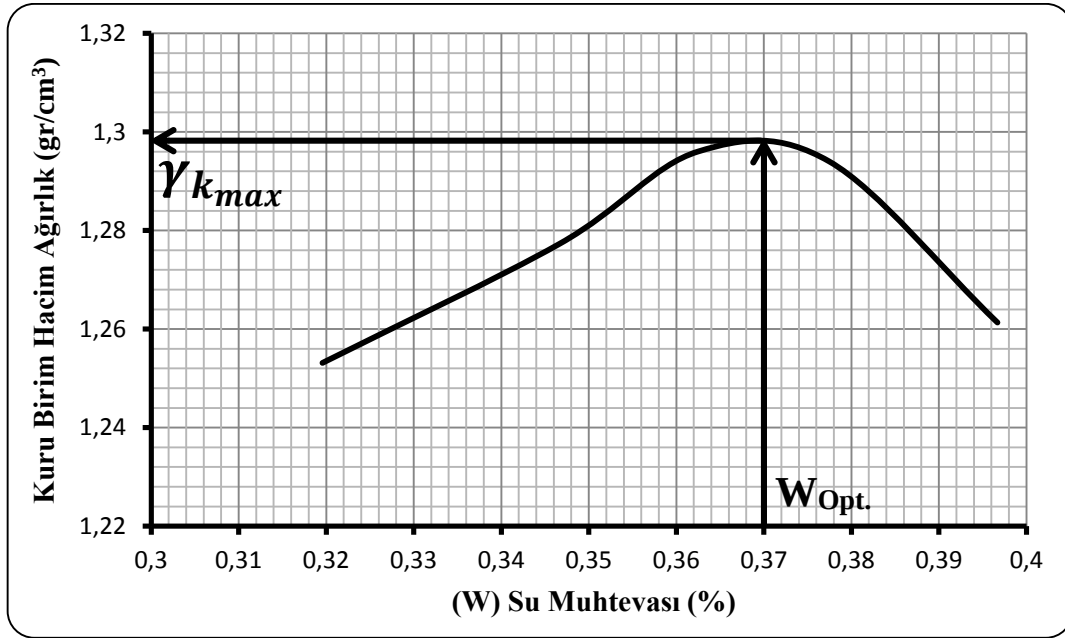
Oluşturulan atık kil/bentonit karışımlarının optimum su muhtevası değerleri, 2B/98CW için %33, 4B/96CW için %35 ve 6B/94CW için %37 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15).



Şekil 3.13. 2B/98CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi

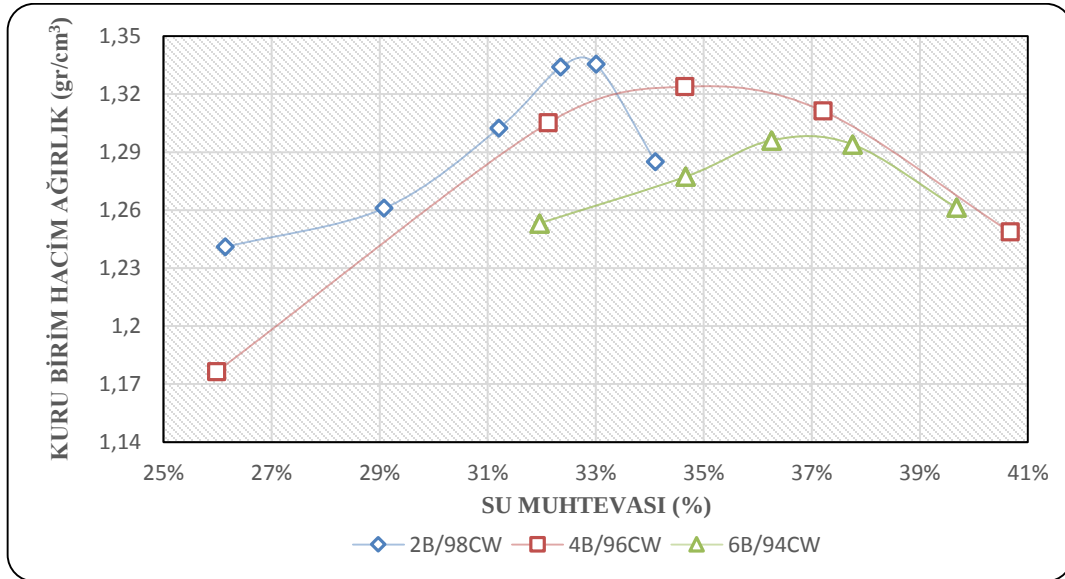


Şekil 3.14. 4B/96CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi



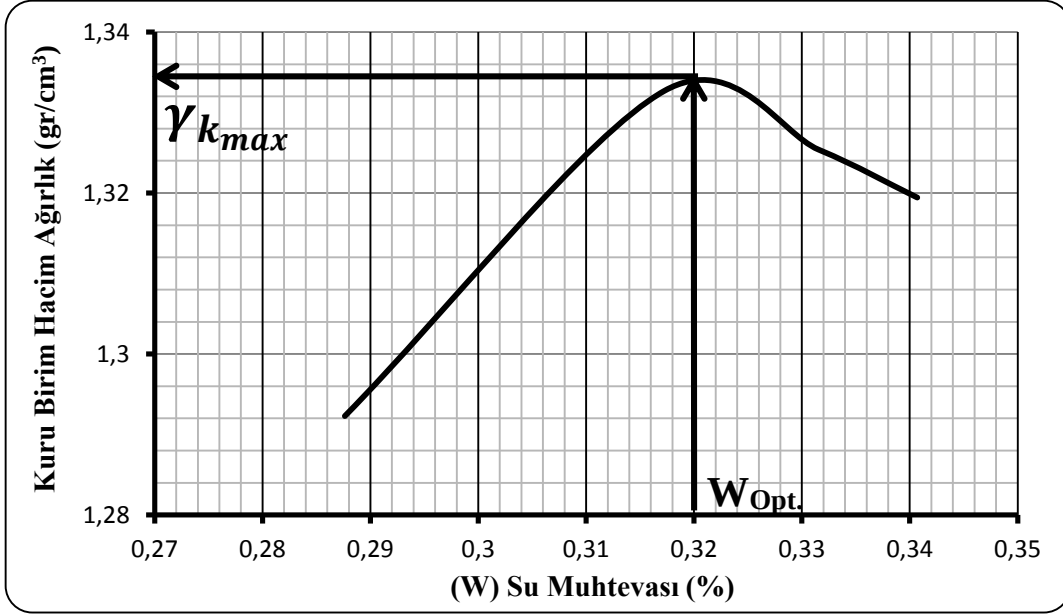
Şekil 3.15. 6B/94CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi

Atık kil/bentonit karışımların bentonit yüzdesine bağlı optimum su muhtevalarının değişimi Şekil 3.16’da gösterilmektedir.

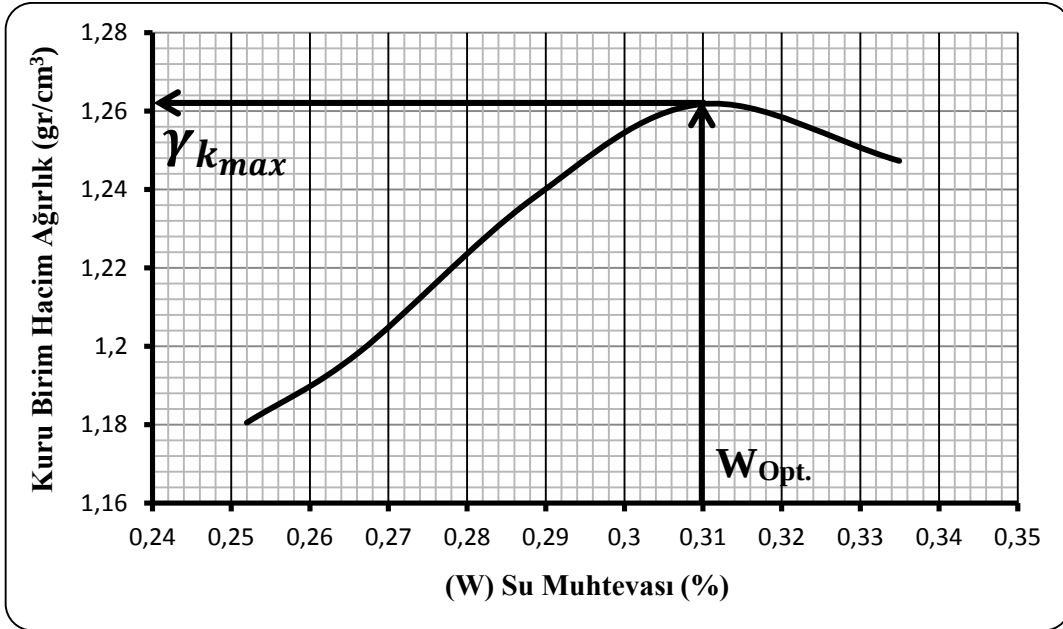


Şekil 3.16. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı kompaksiyon grafiği

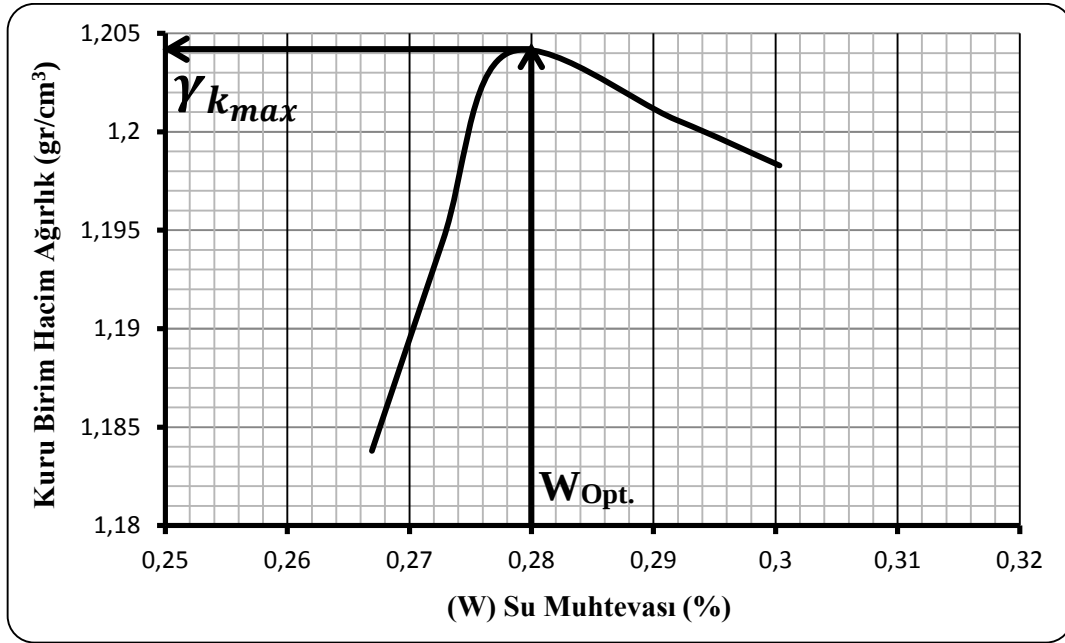
Atık kil/atık lastik karışımlarının optimum su muhtevası değerleri, 5TW/95CW için %32, 15TW/85CW için %31 ve 25TW/75CW için %29 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19).



Şekil 3.17. 5TW/95CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi

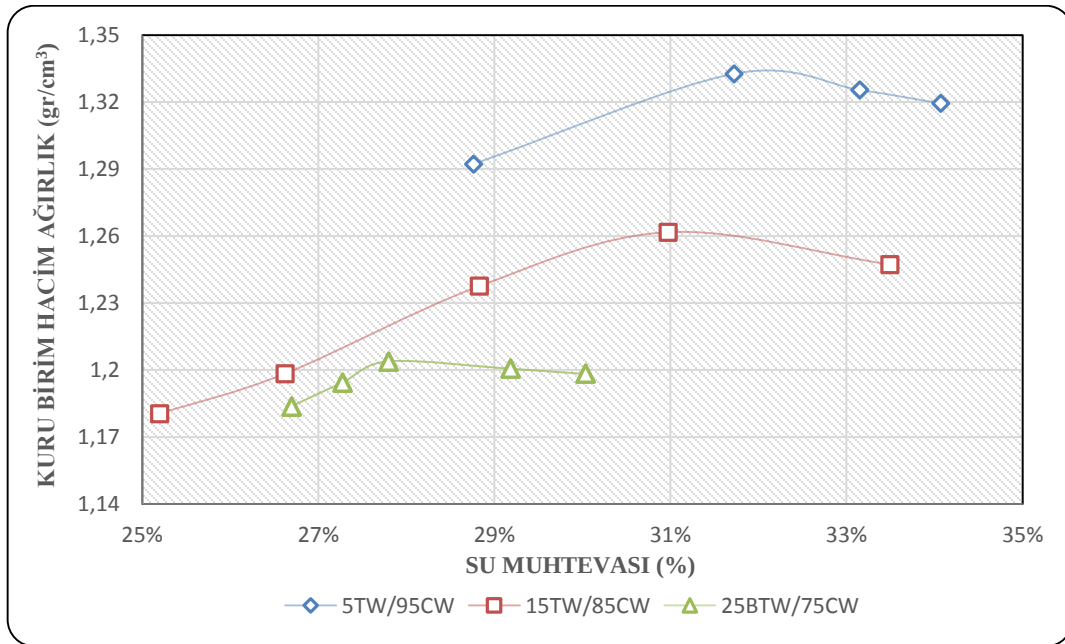


Şekil 3.18. 15TW/85CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi



Şekil 3.19. 25TW/75CW karışımı kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi

Atık kil/atık lastik karışımlarının atık lastik yüzdesine bağlı optimum su muhtevalarının değişimi Şekil 3.20’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı kompaksiyon grafiği

3.2.3.3. Serbest basınç deney sonuçları

Standart proktor kompaksiyon deneyi ile optimum su muhtevası belirlenen atık kilin, optimum su muhtevasında (%33) sıkıştırılan numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra serbest basınç mukavemetinin su muhtevası değerlerine bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemek için, optimum su muhtevasını 3 azaltarak kuru konumda (%30), 3 arttırarak ıslak konumda (%36) atık kil sıkıştırılarak serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir (Çizelge 3.7).

Optimum konumda serbest basınç mukavemeti maksimum değere ulaşmıştır. Serbest basınç mukavemeti-deformasyon ilişkileri Şekil B.1a, B.1b ve B.1c' de gösterilmektedir.

Atık kilin kuru konumda ve optimum konumda DDT'lerde kullanılacak kil tabakası için minimum taşıma kapasitesinin 2 kg/cm^2 olması (Daniel ve Wu, 1993) koşulun sağladığı, ıslak konumda bu koşulu sağlamadığı görülmektedir.

Çizelge 3.7. Atık kilin serbest basınç dayanım değerleri

Su Muhtevaları	30% (Kuru)	33% (Opt.)	36% (Islak)
Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm^2)	2	2.16	0.75

Atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarının belirlenen optimum su muhtevalarında, kuru konumlarında ve ıslak konumlarında standart proktor kompaksiyon deneyi ile sıkıştırılarak numuneleri hazırlanmış ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

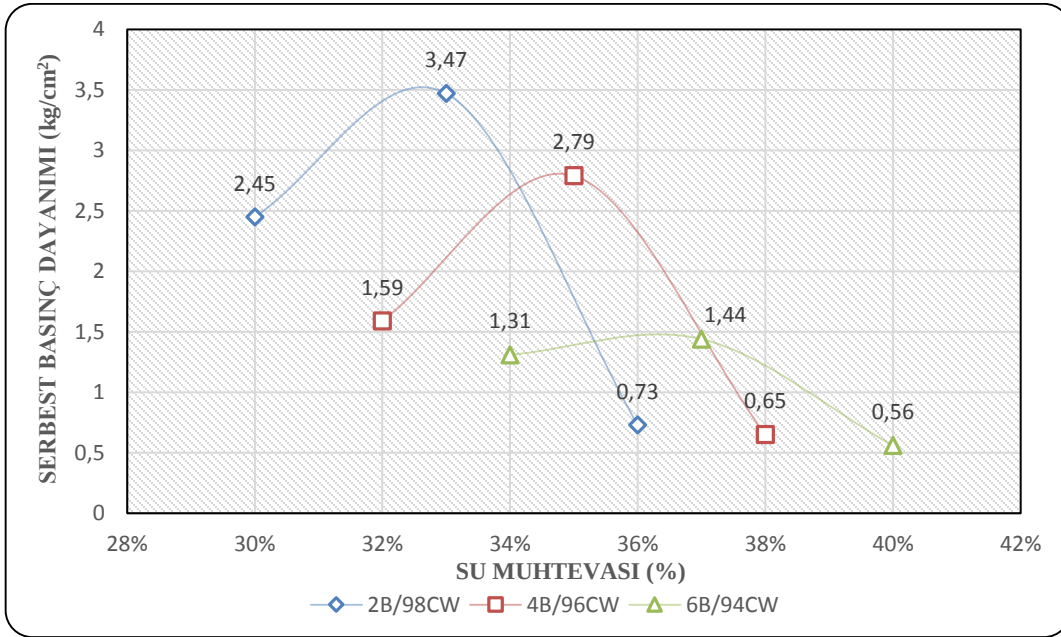
Atık kil/bentonit karışımlarının optimum su muhtevası değerinde serbest basınç dayanımlarının maksimum değere ulaştığı ve 2B/98CW karışımının optimum ve kuru konumda, 4B/96CW karışımının optimum konumda DDT'lerdeki kil tabaka için minimum taşıma kapasitesinin 2 kg/cm^2 olması koşulunu sağladığı

belirlenmiştir. Atık kil/bentonit karışımlarının ıslak konumlarında ve 6B/94CW karışımının hiçbir konumda bu koşulu sağlayamadığı görülmektedir (Çizelge 3.8). Serbest basınç mukavemeti-deformasyon ilişkileri Şekil B.2, B.3 ve B.4’ de gösterilmektedir.

Karışımların serbest basınç dayanımlarının su muhtevası ve bentonit yüzdelere bağlı değişimi Şekil 3.21’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. Atık kil/bentonit karışımlarının serbest basınç dayanımları

Karışım Tipi	(2B/98CW)			(4B/96CW)			(6B/94CW)		
Su Muhtevaları	30% (Kuru)	33% (Opt.)	36% (Islak)	32% (Kuru)	35% (Opt.)	38% (Islak)	34% (Kuru)	37% (Opt.)	40% (Islak)
Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm ²)	2.45	3.47	0.73	1.59	2.79	0.65	1.31	1.44	0.56



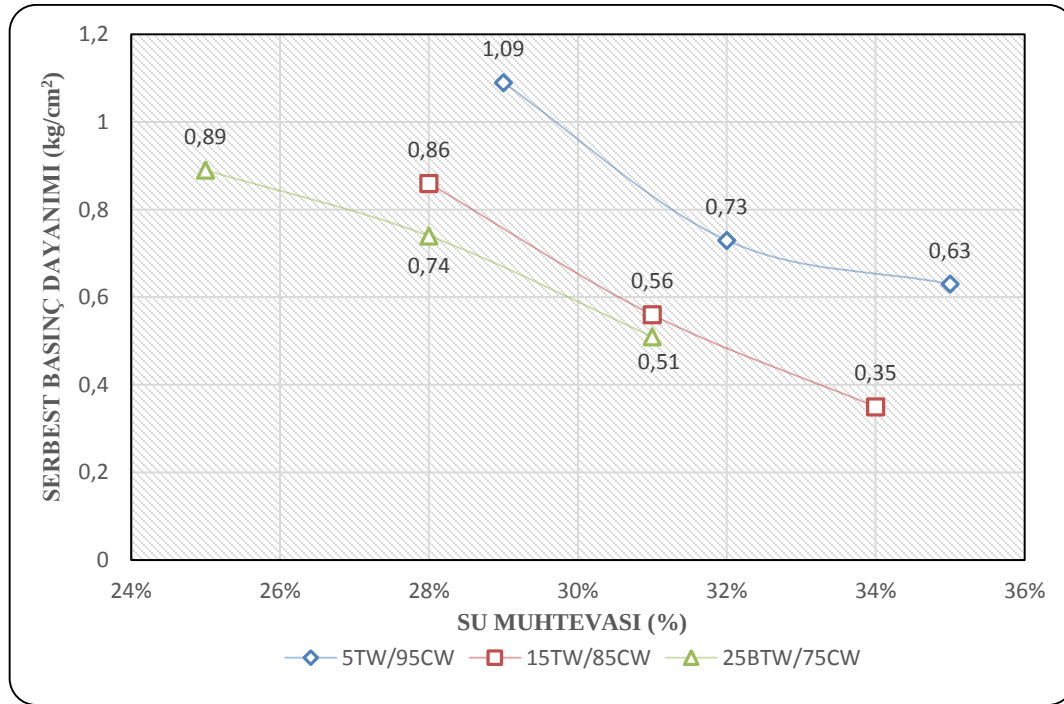
Şekil 3.21. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı serbest basınç dayanım grafiği

Atık kil/atık lastik karışımlarının kuru konumdaki su muhtevası değerinde serbest basınç dayanımlarının maksimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Atık kil/atık lastik karışımlarının kuru, optimum ve su ıslak konumdaki su muhtevasına sahip numunelerinin tamamının DDT’lerdeki kil tabaka için minimum taşıma kapasitesinin 2 kg/cm² olması koşulunu sağlamadığı belirlenmiştir (Çizelge 3.9). Serbest basınç mukavemeti-deformasyon ilişkileri Şekil B.5, B.6 ve B.7’ de gösterilmektedir.

Karışımların serbest basınç dayanımlarının su muhtevası ve atık kil yüzdelerine bağlı değişimi Şekil 3.22’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.9. Atık kil/atık lastik karışımlarının serbest basınç dayanımları

Karışım Tipi	(5TW/95CW)			(15TW/85CW)			(25TW/75CW)		
Su Muhtevaları	% 29 (Kuru)	%32 (Opt.)	%35 (Islak)	%28 (Kuru)	%31 (Opt.)	%34 (Islak)	%25 (Kuru)	%28 (Opt.)	%31 (Islak)
Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm ²)	1,09	0,73	0,63	0,86	0,56	0,35	0,89	0,74	0,51



Şekil 3.22. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı serbest basınç dayanım grafiği

3.2.3.4. Permeabilite deney sonuçları

Standart proktor deneyi ile optimum, kuru ve ıslak konumda sıkıştırılarak hazırlanan atık kil, atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarının numunelerine permeabilite deneyi uygulanmış ve permeabilite katsayıları belirlenmiştir.

Atık kilin permeabilite katsayılarının su muhtevalarına bağlı sonuçları Çizelge 3.10’da gösterilmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, değerler arasındaki farkların ihmal edilecek düzeyde olduğu görülmektedir ve bütün değerler Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY, 2010) gereğince tehlikeli atık ve belediye atıkları için izin verilen maksimum permeabilite değerinin $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn olması koşuluna göre her konumda (kuru-optimum-ıslak) I., II. ve III. sınıf düzenli depolama sahalarında kullanım için uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.10. Atık kilin permeabilite katsayıları

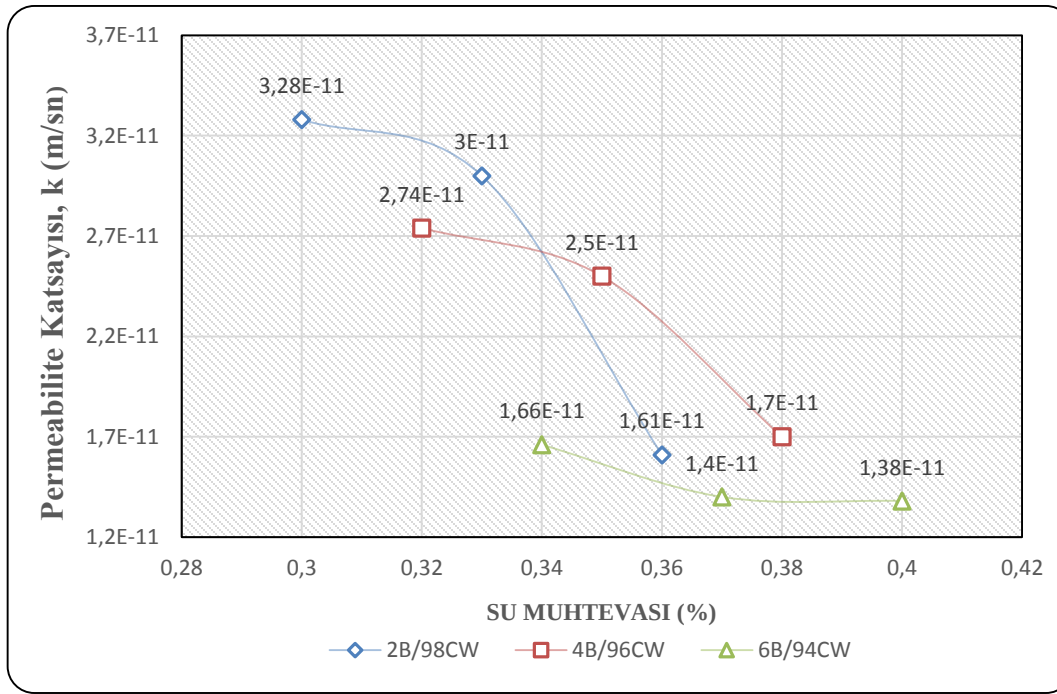
Su Muhtevaları	30% (Kuru)	33% (Opt.)	36% (Islak)
Permeabilite Katsayısı k (m/sn)	4.5E-11	3.5E-11	1.5E-11

Atık kil/bentonit karışımı numunelerinin permeabilite katsayıları Çizelge 3.11’de gösterilmektedir. Verilen k değerlerinin, karışım tiplerinin tamamının kuru, optimum ve ıslak konumdaki su muhtevası değerlerine sahip tüm numunelerinin Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY, 2010) gereğince tehlikeli atık ve belediye atıkları için izin verilen maksimum permeabilite değerinin $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn olması koşulunu sağladığı, I., II. ve III. sınıf için düzenli depolama sahalarında kullanımı için uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.11. Atık kil/bentonit karışımlarının permeabilite katsayıları

Karışım Tipleri	(2B/98CW)			(4B/96CW)			(6B/94CW)		
Su Muhtevası	30% (Kuru)	33% (Opt.)	36% (Islak)	32% (Kuru)	35% (Opt.)	38% (Islak)	34% (Kuru)	37% (Opt.)	40% (Islak)
Hidrolik İletkenlik $k(m/sn)$	3.28E-11	3.00E-11	1.61E-11	2.74E-11	2.50E-11	1.70E-11	1.66E-11	1.40E-11	1.38E-11

Atık kil/bentonit karışımlarının permeabilite katsayılarının bentonit yüzdesi ve su muhtevasına bağlı karşılaştırmalı grafiği Şekil 3.23’de gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı permeabilite katsayı grafiği

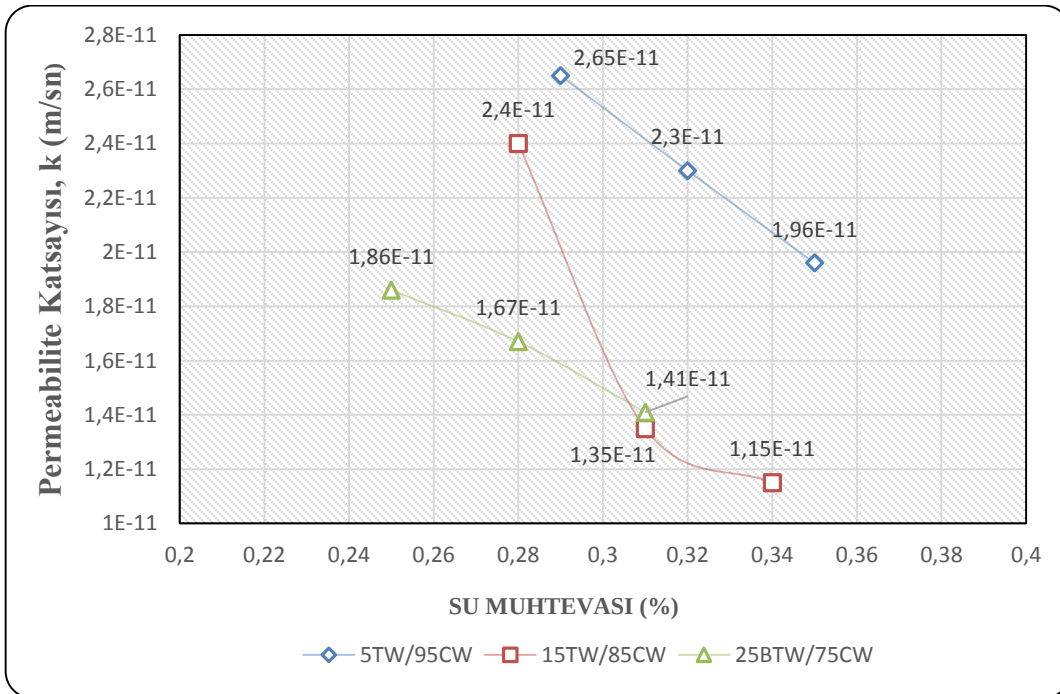
Atık kil/atık lastik karışımı numunelerinin permeabilite katsayıları Çizelge 3.12’de gösterilmektedir. Çizelge 3.12’de verilen k değerlerinin, karışım tiplerinin tamamının kuru, optimum ve ıslak konumdaki su muhtevası değerlerine sahip tüm numunelerinin Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY, 2010) gereğince tehlikeli atık ve belediye atıkları için izin verilen maksimum permeabilite

değerinin $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn olması koşulunu sağladığı, I., II. ve III. sınıf için düzenli depolama sahalarında kullanımı için uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.12. Atık kil/atık lastik karışımlarının permeabilite katsayıları

Karışım Tipleri	(5TW/95CW)			(15TW/85CW)			(25TW/75CW)		
Su Muhtevası	% 29 (Kuru)	%32 (Opt.)	%35 (Islak)	%28 (Kuru)	%31 (Opt.)	%34 (Islak)	%25 (Kuru)	%28 (Opt.)	%31 (Islak)
Hidrolik İletkenlik k(m/sn)	2,65E-11	2,3E-11	1,96E-11	2,4E-11	1,35E-11	1,15E-11	1,86E-11	1,67E-11	1,41E-11

Atık kil/atık lastik karışımlarının permeabilite katsayılarının atık lastik yüzdesi ve su muhtevasına bağlı karşılaştırmalı grafiği Şekil 3.24’de gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı permeabilite katsayısı grafiği

3.2.3.5. Şişme yüzdesi deney sonuçları

Şişme yüzdesi deneyi için, atık kil, atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımları optimum, kuru ve ıslak konumdaki su muhtevası değerleriyle standart proktor kompaksiyon deneyi yapılarak sıkıştırılmıştır. Daha sonra şişme yüzdesi için deney numuneleri konsolidasyon ringlerine kompaksiyon mold tabanından hapsedilerek alınmış ve şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır.

Atık kilin yapılan şişme yüzdesi deneylerinin su muhtevasına bağlı sonuçları Çizelge 3.13’de gösterilmektedir.

Deney sonuçları incelendiğinde, Gromko (1974) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre atık kilin ıslak konumda düşük dereceli şişme potansiyeline sahip olduğu ve DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.13. Atık kilin şişme yüzdesi değerleri

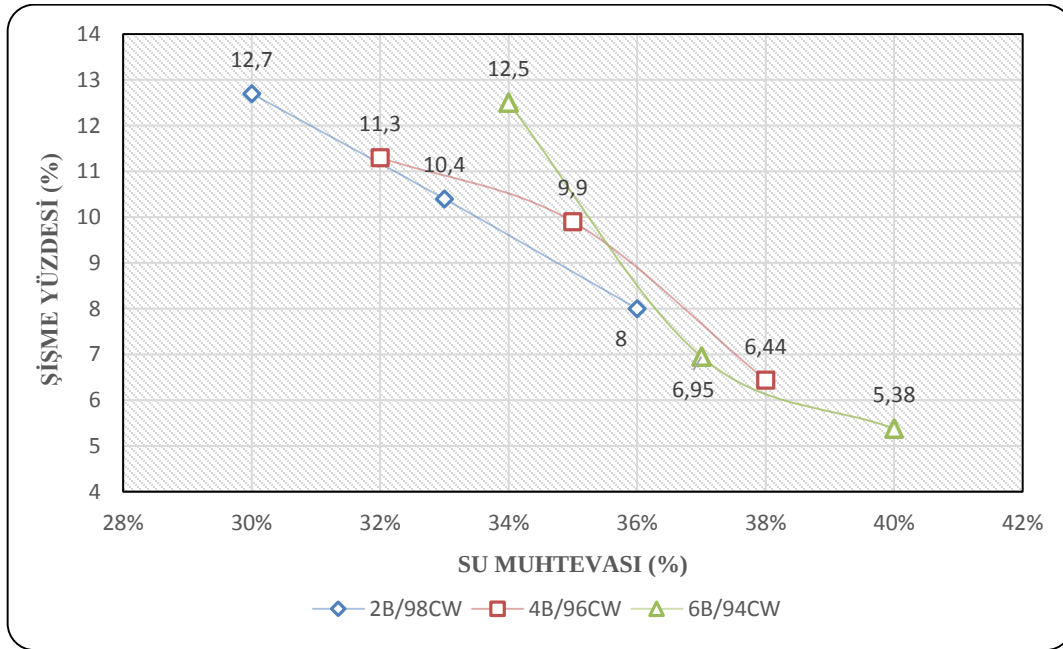
Su Muhtevaları	30% (Kuru)	33% (Opt.)	36% (Islak)
Şişme Yüzdesi (%)	10.8	10.4	7.8

Atık kil/bentonit karışımı numunelerinin şişme yüzdesi değerleri Çizelge 3.14’de gösterilmektedir. Deney sonuçları Gromko (1974) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre incelendiğinde, 2B/98CW karışımının ıslak konumdaki su muhtevasına sahip numunelerin şişme potansiyeli açısından düşük dereceli şişme potansiyeline sahip olduğu, 4B/96CW ve 6B/94CW karışımlarının optimum ve ıslak konumdaki su muhtevasına sahip numunelerinin düşük dereceli şişme potansiyeline sahip olduğu ve bunların DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.14. Atık kil/bentonit karışımlarının şişme yüzdeleri

Karışım Tipleri	(2B/98CW)			(4B/96CW)			(6B/94CW)		
Su Muhtevaları	30% (Kuru)	33% (Opt.)	36% (Islak)	32% (Kuru)	35% (Opt.)	38% (Islak)	34% (Kuru)	37% (Opt.)	40% (Islak)
Şişme Yüzdesi (%)	12.7	10.4	8	11.3	9.9	6.44	12.5	6.95	5.38

Atık kil/bentonit karışımların şişme yüzdelerinin bentonit yüzdesi ve su muhtevasına bağlı karşılaştırmalı grafiği Şekil 3.25’de gösterilmektedir.



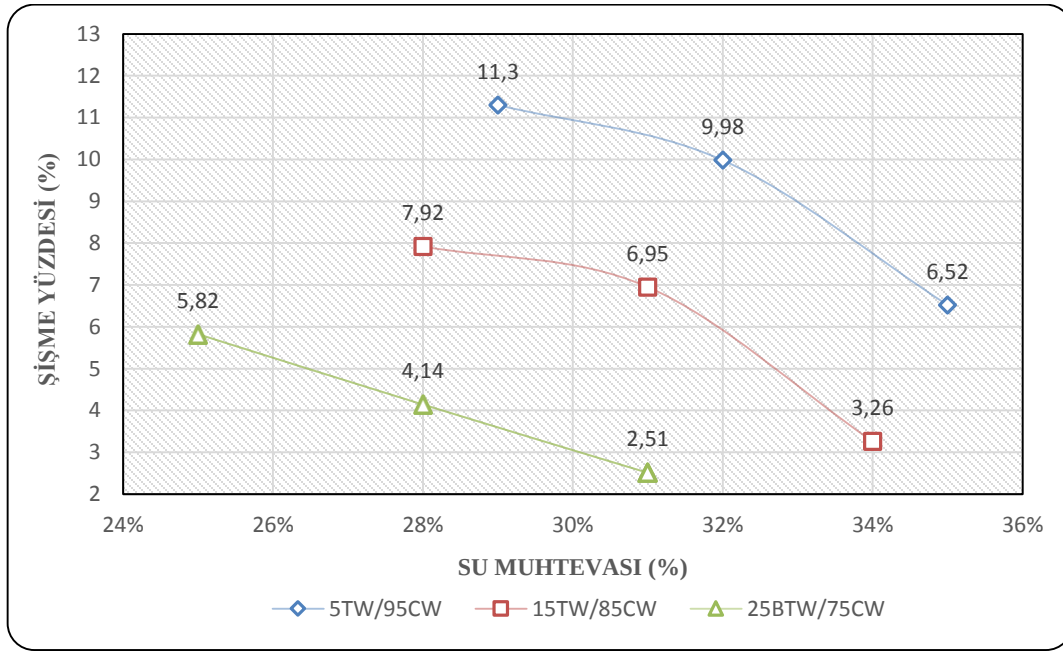
Şekil 3.25. Atık kil/bentonit karışımlarının karşılaştırmalı şişme yüzdesi grafiği

Atık kil/atık lastik karışımı numunelerinin şişme yüzdesi değerleri Çizelge 3.15’de gösterilmektedir. Karışımların şişme yüzdesi değerleri Gromko (1974) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre incelendiğinde, 5TW/95CW karışımının kuru konumdaki su muhtevasına sahip numunesi dışında tüm karışımların şişme potansiyeli açısından düşük dereceli şişme potansiyeline sahip olduğu ve bunların DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.15. Atık kil/atık lastik karışımlarının şişme yüzdeleri

Karışım Tipleri	(5TW/95CW)			(15TW/85CW)			(25TW/75CW)		
Su Muhtevaları	% 29 (Kuru)	%32 (Opt.)	%35 (Islak)	%28 (Kuru)	%31 (Opt.)	%34 (Islak)	%25 (Kuru)	%28 (Opt.)	%31 (Islak)
Şişme Yüzdesi (%)	11,3	9,98	6,52	7,92	6,95	3,26	5,82	4,14	2,51

Atık kil/atık lastik karışımlarının şişme yüzdelerinin atık lastik yüzdesi ve su muhtevasına bağlı karşılaştırmalı grafiği Şekil 3.26’da gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Atık kil/atık lastik karışımlarının karşılaştırmalı şişme yüzdesi grafiği

Atığın saf halinin ve bentonit ve atık lastik kullanılarak oluşturulan karışım hallerinin, yapılan fiziksel ve mekanik deneyleri sonucunda DDT’lerde geçirimsiz tabaka malzemesi olarak kullanımı için atığın saf halinin optimum su muhtevası değerine sahip olan numunesi olduğuna karar verilmiştir.

3.3. Sızıntı Suyu Çalışmaları

Sızıntı suyu çalışmaları için Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Düzenli Depolama Tesisi'nden kentsel katı atık DDT sızıntı suyu numuneleri, İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) Tehlikeli Atık Depolama Tesisi'nden ise tehlikeli atık DDT sızıntı suyu numuneleri temin edilmiştir. Sızıntı suyu çalışmaları, yapılan fiziksel ve mekanik deneyler sonucunda en uygun malzeme olarak belirlenen atığın saf halinin optimum su muhtevasına sahip olan malzemesi ile yapılmıştır.

Sızıntı suyu çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi için, 113Y122 no'lu TÜBİTAK projesi ekibi bir deney düzeneği tasarlamış ve Anadolu Üniversitesi Atölyeler Müdürlüğünce bu deney düzeneği üretilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Sızıntı suyu deney düzeneği

Şekil 3.27’de görüldüğü üzere, deney düzeneği, içerisinde 1 bar basınç altında sızıntı suyunun depolandığı, üzeri kapalı pleksiglas bir hazne, kompaksiyon ile boşluk kalmayacak şekilde kil doldurulmuş 3 adet mold ve bu moldların çıkışında kilden geçen sızıntı suyunu toplamak üzere bağlanmış 3 adet plastik şişeden oluşmaktadır. Şekil 3.27’de gösterilen deney düzeneğinden, kentsel katı atık DDT sızıntı suyu (KÜKAB) ve tehlikeli atık DDT sızıntı suyu (İZAYDAŞ) analizlerini aynı anda yapabilmek adına iki adet kurulmuş ve ayda bir kez olmak üzere çıkış karakterizasyonlarının belirlenmesi için sızıntı suyu numuneleri alınmıştır. Bu deneyler sonucunda, numunelere SEM analizi yapılarak atık kildeki yapısal değişimin incelenmesi ile sızıntı suyu çalışmaları son bulmuştur.

Öte yandan, Pb, Cr, Ni ve Hg gibi metallerin nitrat tuzlarından $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ hazırlanan model sızıntı suyu da diğer hazneye doldurulmuş ve üçüncü bir deney seti oluşturulmuştur. Model sızıntı suyunda kullanılan derişimler sırasıyla 10 ppm’lik Pb, 10 ppm’lik Cr, 10 ppm’lik Ni ve 1 ppm’lik Hg’dir. Bu derişimler, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (TAKY, 2005) Ek-11A’da belirtilen Atıkların Düzenli Depolama Tesislerine Depolanabilme Kriterleri tablosunun “tehlikesiz atık olarak muamele görececek atıklar” bölümünün maksimum değerleri baz alınarak belirlenmiştir. Pb, Cr, ve Ni için bu tabloda belirtilen maksimum değer 10 katı; Hg için maksimum değer 50 katı, hazırlanacak çözelti derişimi olarak seçilmiştir.

3.3.1. Sızıntı suyunun başlangıç karakterizasyonunun belirlenmesi

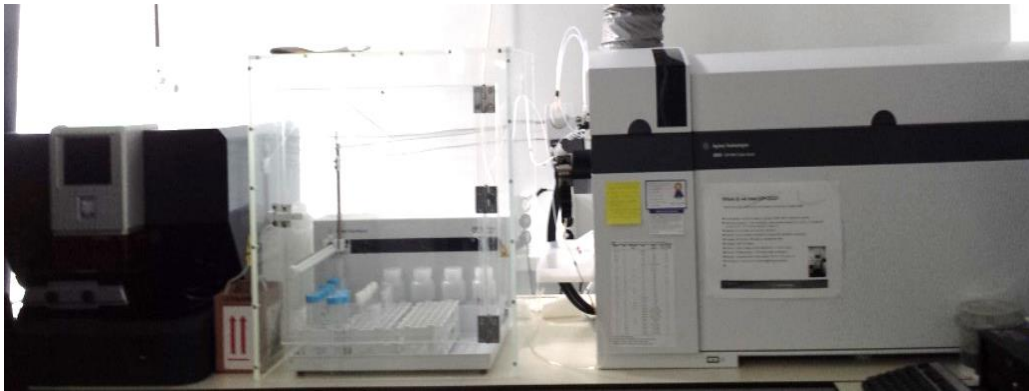
Bu çalışmada, Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Düzenli Depolama Tesisi’nden elde edilen kentsel katı atık DDT sızıntı suyu numuneleri ve İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) Tehlikeli Atık Depolama Tesisi’nden elde edilen tehlikeli atık DDT sızıntı suyu numunelerinde, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik’te belirtilen parametreler olan pH, elektriksel iletkenlik, ICP-MS ile As (Arsenik), Ba (Baryum), Cd (Kadmiyum), Cu (Bakır), Hg (Civa), Mo (Molibden), Ni (Nikel), Pb(Kurşun), Sb (Antimon), Se

(Selenyum), Zn (Çinko), Cr toplam (Toplam krom), bulanıklık, askıda katı madde (AKM), toplam çözünen katı (TÇK), klorür, florür ve sülfat tayinleri yapılmıştır.

pH Tayini: Bu analiz, 50 mL'lik bir numunenin **TS 3263 ISO 10523** standardına göre kalibre edilmiş bir pH ölçer ile pH değeri ölçülerek yapılmıştır. Analiz, 3 kez tekrarlanarak ortalama bir değer kaydedilmiştir.

Elektriksel İletkenlik Tayini: Bu analiz, 50 mL'lik bir numunenin **SM 2510-B** standardına göre kalibre edilmiş bir iletkenlik ölçer ile iletkenlik değeri ölçülerek yapılmıştır. Bu ölçüm 3 tekrarlı yapılarak ortalama bir değer kaydedilmiştir.

ICP-MS ile Metal Analizi: Bu analiz, **EPA 200.8** standardına uygun olarak Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler ve Süreçler Laboratuvarı'nda bulunan ICP-MS/MS (Agilent 8800) cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.28). Analiz, 150 mL'lik numune mavi filtre kâğıdı ile 3 kez süzülme işlemi tamamlandıktan sonra cihaza beslenerek yapılmış ve numune içerisindeki arsenik (As), baryum (Ba), kadmiyum (Cd), bakır (Cu), cıva (Hg), molibden (Mo), nikel (Ni), kurşun (Pb), antimon (Sb), selenyum (Se) ve çinko (Zn) miktarları belirlenmiştir.



Şekil 3.28. ICP-MS/MS cihazı

Toplam krom tayini için ise, 100 mL numuneye 2 mL HNO₃ ve 1 mL HCl eklenmiş ve hacim 20 mL'e düşene dek kaynatmadan ısıtılmıştır. Daha sonra 20 mL hacmindeki kalan sıvı süzülerek, 50 mL'lik balon jojeye dökülmüş ve saf su ile tamamlanarak ICP-MS cihazına beslenmiştir.

Bulanıklık Tayini: Bu analiz için, **SM 2130-B** standardına uygun olarak, numune türbidimetre örnek şişesine doldurulmuş ve şişenin dışında parmak izi kalmayacak şekilde silinmiştir. Şişenin türbidimetreye yerleştirilerek ölçüm alınması işlemiyle de tamamlanmıştır. Bu süreç 3 kez tekrarlanarak yapılmış ve ortalama değer kaydedilmiştir.

Askıda Katı Madde Tayini: **TS 7094 EN 872** standardına göre bu analizde, 50 mL'lik bir numune, sabit tartıma getirilen filtre kağıdının ağırlığı kaydedildikten sonra bu filtre kağıdından süzölmüş ve filtre kağıdı tekrar etüvde kurutulup tartılmasıyla belirlenen son ve ilk ağırlık arasındaki fark kullanılarak askıda katı madde miktarı hesaplanmıştır.

Toplam Çözünen Katı Tayini: **TS 4111:1984** standardına uygun olarak bu analizde, 50 mL süzölmüş sızıntı suyu numunesi sabit tartıma getirilen behere dökölmüş ve sızıntı suyu numunesi etüvde tamamen buharlaşana dek bekletilerek tartılmıştır. Tartımlar sonucunda, son ve ilk ağırlık arasındaki fark kullanılarak toplam çözöünen katı madde miktarı hesaplanmıştır.

Klorür Tayini: **SM 4500-Cl--C** standardına uygun olarak bu analiz, standardizasyonu yapılmış güçlü civa nitrat titrantı kullanılarak sızıntı suyu numunesin titre edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Florür Tayini: **SM 4500-F-D** standardına uygun olarak bu analizde, hazırlanan belirli derişim aralığında standart florür çözeltilerinin absorbans değerleri yardımıyla standart eğri hazırlanmıştır. Daha sonra sızıntı suyu numunesinin absorbansı ölçölerek ve daha önceden oluşturulan standart eğri kullanılarak, numunedeki florür miktarına ulaşılmıştır.

Sölfat Tayini: **SM 4500-SO-24-E** standardına uygun olarak bu analizde, hazırlanan belirli derişim aralığında standart sölfat çözeltilerinin absorbans değerleri yardımıyla standart eğri hazırlanmıştır. Daha sonra sızıntı suyu numunesinin

absorbansı ölçülerek ve daha önceden hazırlanan standart eğri kullanılarak, numunedeki sülfat miktarı belirlenmiştir.

3.3.1.1. Bulgular ve değerlendirme

Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Düzenli Depolama Tesisi'nden elde edilen kentsel katı atık DDT sızıntı suyu numuneleri ve İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) Tehlikeli Atık Depolama Tesisi'nden elde edilen tehlikeli atık DDT sızıntı suyu numunelerinin başlangıç karakterizasyonları yapılmıştır. Başlangıç karakterizasyonlarının sonuçları Çizelge 3.16'da sunulmuştur.

Çizelge 3.16. Sızıntı suyu numunelerinin başlangıç karakterizasyonu

Analiz Adı	KÜKAB	İZAYDAŞ
pH	8,36	6,87
Elektriksel İletkenlik (mS)	25,77	9,52
Bulanıklık (NTU)	158	6,29
Askıda Katı Madde (mg/L)	169	111
Toplam Çözünen Katı (mg/L)	10.803	8.150
Klorür (Cl) (mg/L)	3.193	2.573
Florür (F) (mg/L)	2,43	1,38
Sülfat (SO ₄ -2) (mg/L)	1.353	64,737
Arsenik (As) (mg/L)	1,285	0,038
Baryum (Ba) (mg/L)	0,634	1,554
Kadmiyum (Cd) (mg/L)	<0,001	0,002
Toplam Krom (Cr) (mg/L)	0,358	<0,001
Bakır (Cu) (mg/L)	0,432	0,157
Civa (Hg) (mg/L)	0,446	0,063
Molibden (Mo) (mg/L)	0,276	0,943
Nikel (Ni) (mg/L)	0,876	0,237
Kurşun (Pb) (mg/L)	0,066	0,017
Antimon (Sb) (mg/L)	0,150	0,043
Selenyum (Se) (mg/L)	<0,001	<0,001
Çinko (Zn) (mg/L)	0,081	2,025

Atık kilin **ICP-MS analizi** sonuçlarına göre belirlenen atıkta en fazla bulunan elementlerin sırasıyla magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), bor (B), sodyum (Na), potasyum (K) ve alüminyum (Al) olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.17).

Çizelge 3.17. Atık kilin ICP-MS analizi sonuçları

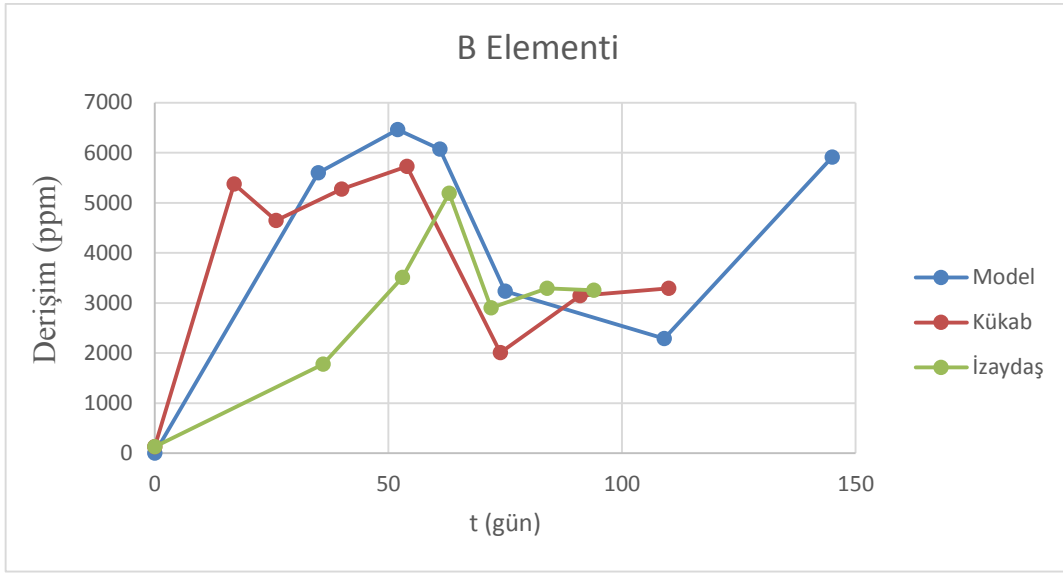
Element	Sonuç (g/kg)	Element	Sonuç (g/kg)
Mg	68,41	Li	0,93
Ca	51,98	Zn	0,52
B	35,49	Ni	0,18
Na	18,43	Ba	0,08
K	9,37	Mn	0,07
Al	6,63	Cu	0,02
Sr	5,72	As	0,02
Fe	2,11	Cr	0,01

3.3.2. Sızıntı suyunun çıkış karakterizasyonunun belirlenmesi

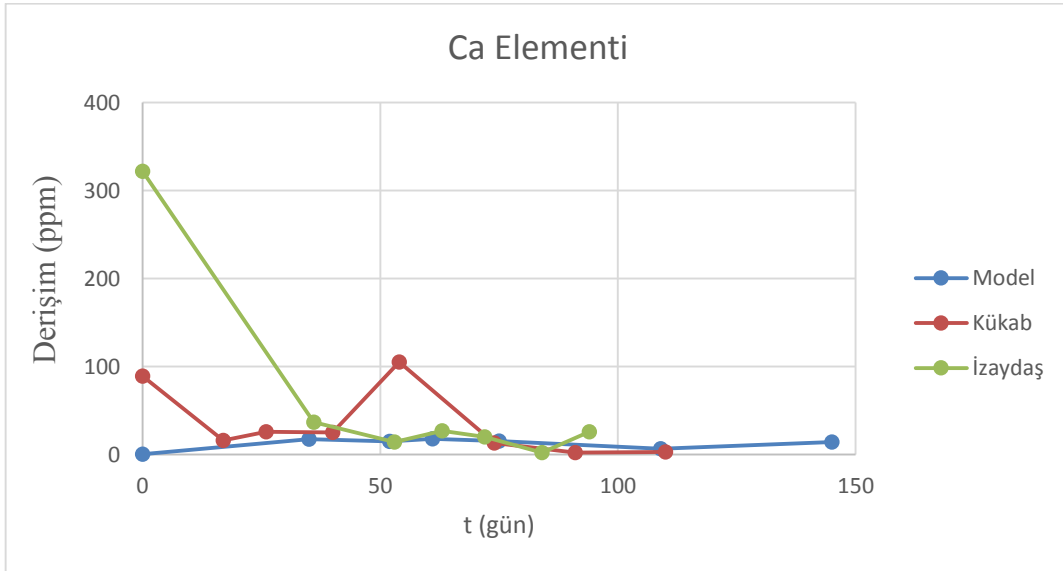
Sızıntı suyunun çıkış karakterizasyonunun belirlenebilmesi için, Şekil 3.27’de gösterilen deney düzeneğinden 3 adet kurulmuştur. Optimum su muhtevası ile sıkıştırılmış atık kil numunelerinden, Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Düzenli Depolama Tesisi’nden elde edilen kentsel katı atık DDT sızıntı suyu, İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) Tehlikeli Atık Depolama Tesisi’nden elde edilen tehlikeli atık DDT sızıntı suyu ve Pb, Cr, Ni ve Hg gibi metallerin nitrat tuzlarından ($Pb(NO_3)_2$, $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ve $Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$) hazırlanan model sızıntı suyu geçirilmiştir. Şekilde de gösterilen 3 adet plastik şişeden atık kilden geçen sızıntı suyu toplanmış ve analizleri yapılmıştır.

3.3.2.1. Bulgular ve değerlendirme

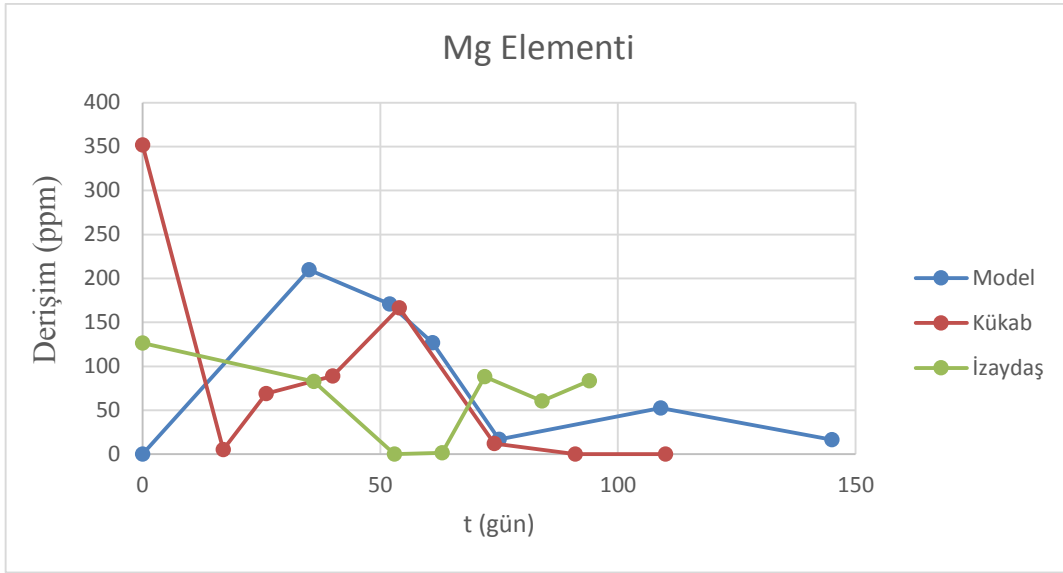
Analizler sonucunda belirlenen elementlerin zamana bağlı derişim değerleri Şekil 3.29 - 3.36’da gösterilmektedir.



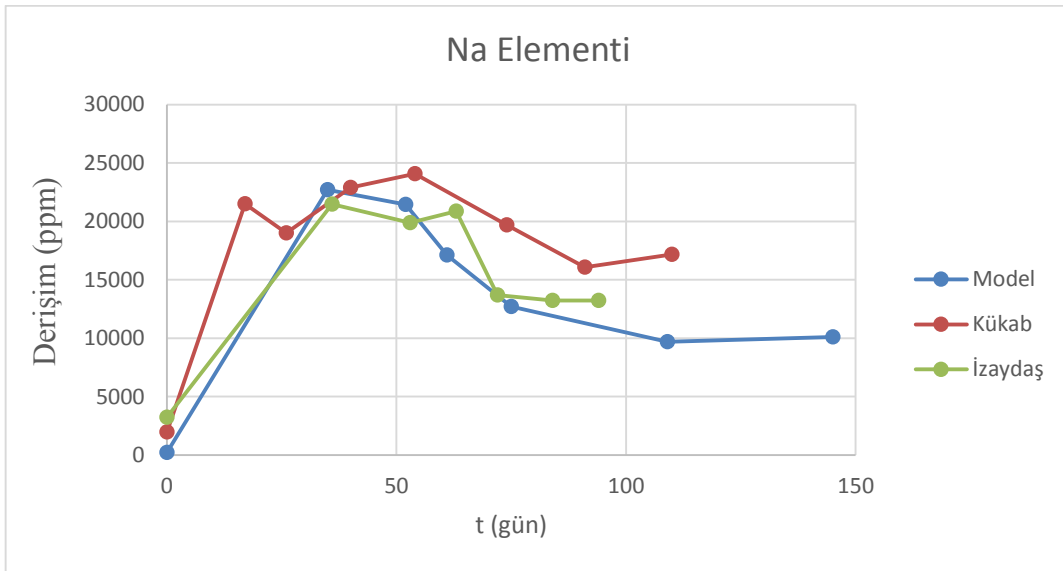
Şekil 3.29. Bor elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



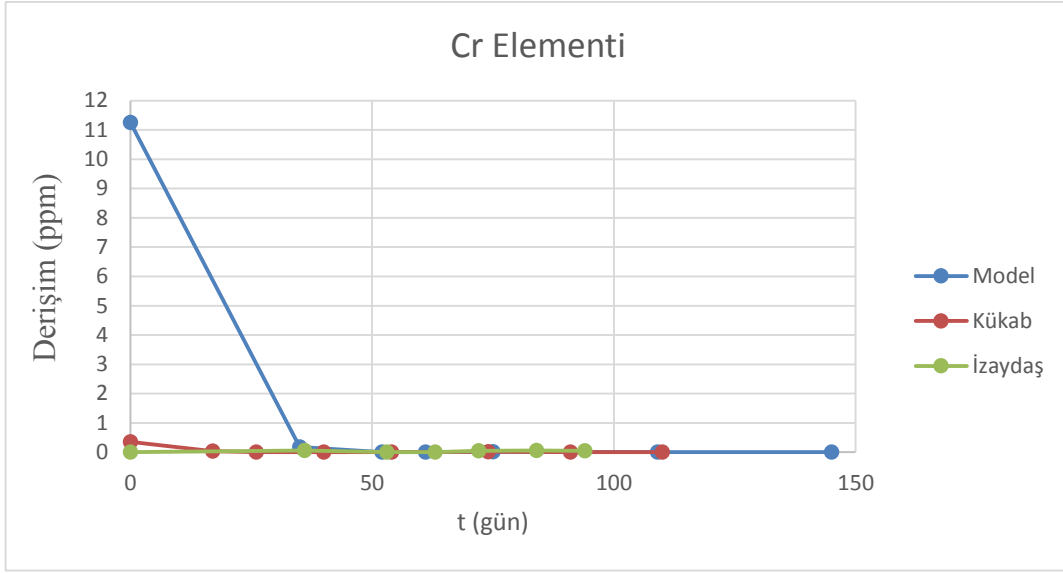
Şekil 3.30. Kalsiyum elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



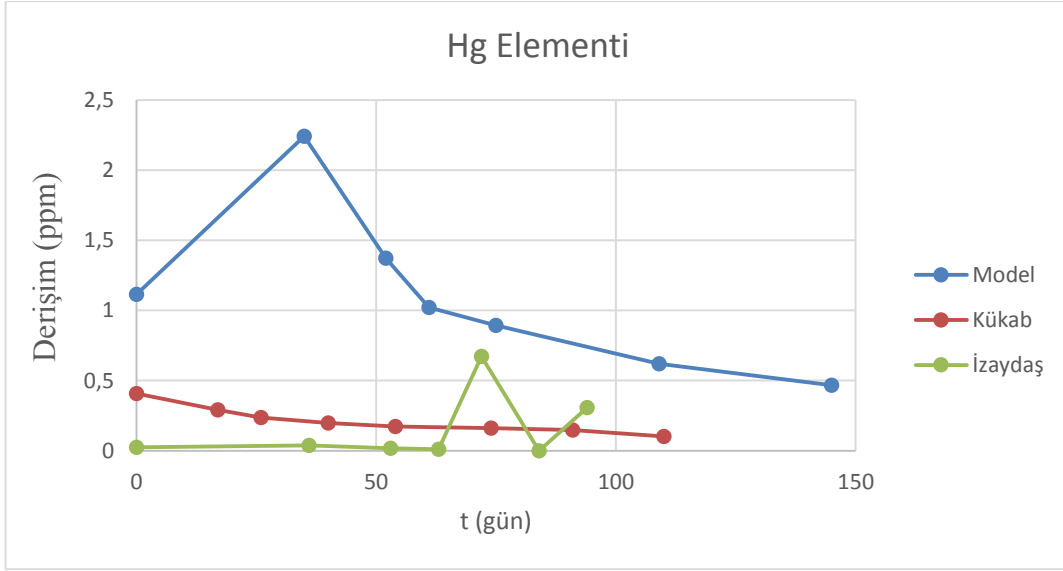
Şekil 3.31. Magnezyum elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



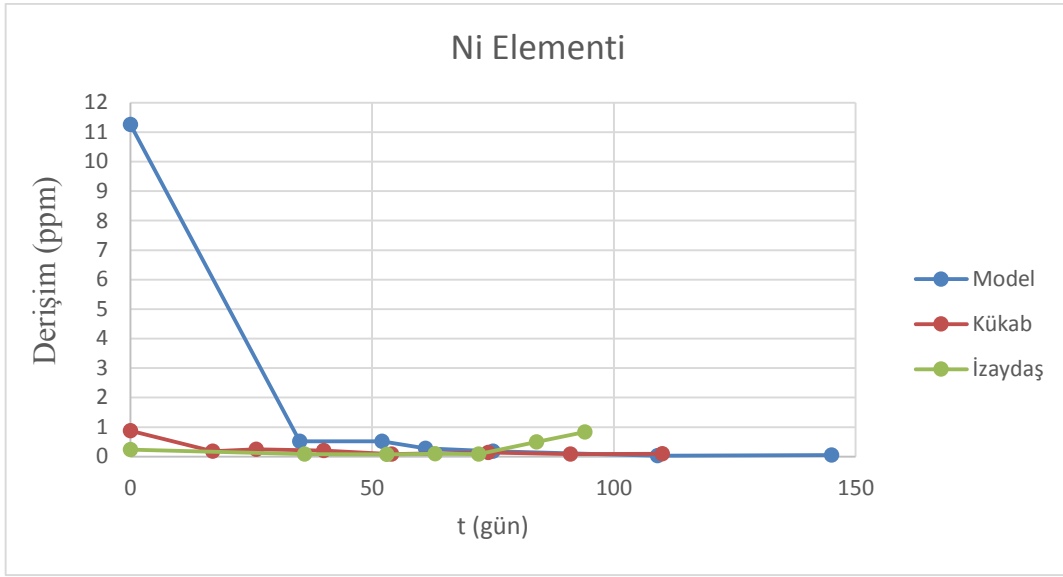
Şekil 3.32. Sodyum elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



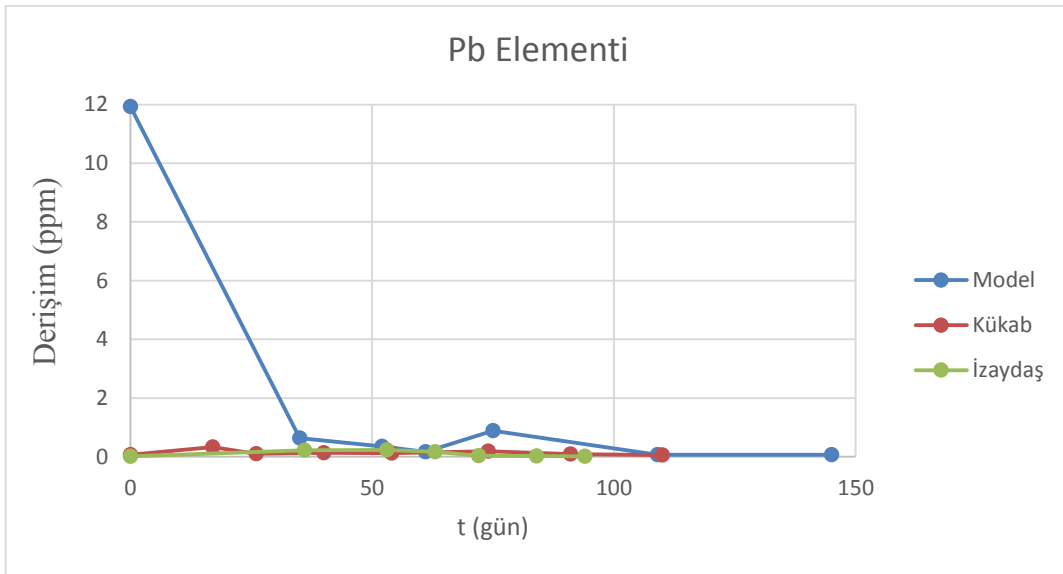
Şekil 3.33. Krom elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



Şekil 3.34. Civa elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



Şekil 3.35. Nikel elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu



Şekil 3.36. Kurşun elementi sızıntı suyu çıkış karakterizasyonu

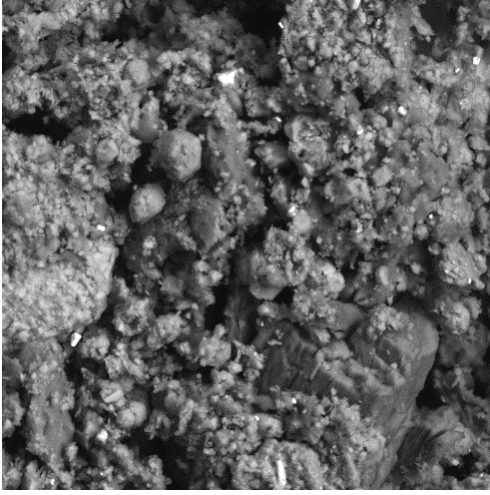
Sızıntı suyu çıkış karakterizasyonları için yukarıda verilen elementlerin zamana bağlı derişim grafikleri oluşturulduktan sonra elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiş ve yorumlanmıştır:

Model, Kükab ve İzaydaş sızıntı sularından alınan son çıkış suyu numunelerinde başlangıç seviyesine oranla **Bor** konsantrasyonunun arttığı görülmüştür. Bu artışın sebebi, atık kilin Bor türevi bir malzeme olması ve Bor elementinin atık kilden suya geçiş yapmasıdır. **Sodyum** konsantrasyonlarında, Bor'da olduğu gibi her üç sızıntı suyu için de (Model, Kükab ve İzaydaş) başlangıç değerlerine göre artma olduğu, yani atık kilden suya geçiş olduğu gözlemlenmiştir. **Magnezyum ve Kalsiyum** konsantrasyonlarında, başlangıç değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında, Kükab ve İzaydaş sızıntı suları için azalma, model sızıntı suyu için ise artma gözükmeaktadır.

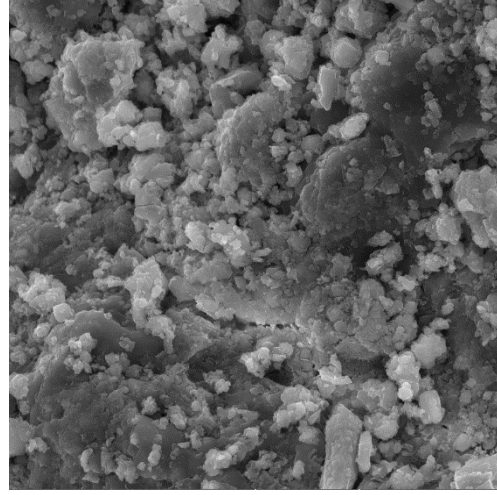
Bor ve Sodyum konsantrasyonlarının aksine, **Kurşun** konsantrasyonlarında, başlangıç değerlerine göre azalma görülmüştür. Bu durum atık kilin kurşun elementini tutma özelliğine sahip olmasının ve çıkış sularına geçmesine izin vermemesinin sebep olduğu belirlenmiştir. **Nikel, Krom ve Civa** konsantrasyonlarında, başlangıç değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında, model ve Kükab sızıntı suları için azalma, İzaydaş sızıntı suyu için ise artma gözükmeaktadır.

3.3.3. En uygun karışımdan sızıntı suyu geçişi sonrası yapısal durumun belirlenmesi

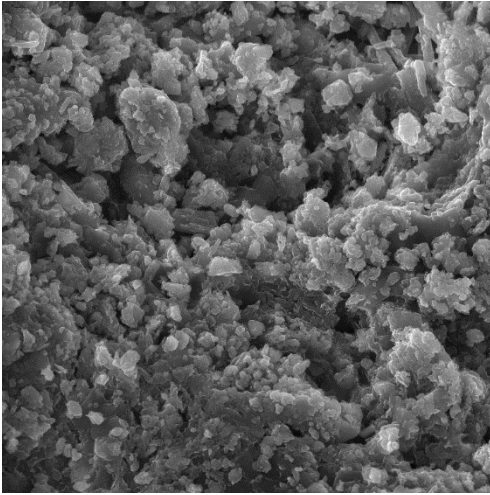
SEM analizi, atık kilin işlem görmemiş kuru hali ile saf su, metal çözelti, kentsel katı atık DDT ve tehlikeli atık DDT sızıntı sularına maruz bırakıldıktan sonra 105°C'de kurutulan örneklerine uygulanmıştır. Saf su, model çözelti, kentsel katı atık DDT sızıntı suyu ve tehlikeli atık DDT sızıntı suyu geçirilmiş atık kilin SEM görüntüleri Şekil 3.37 (a-d)'de verilmiştir. Bu görüntülere göre saf su geçirilmiş atık kilde dairesel tanecikler bulunurken diğer durumlarda atık kilin plakalaştığı görülmüştür.



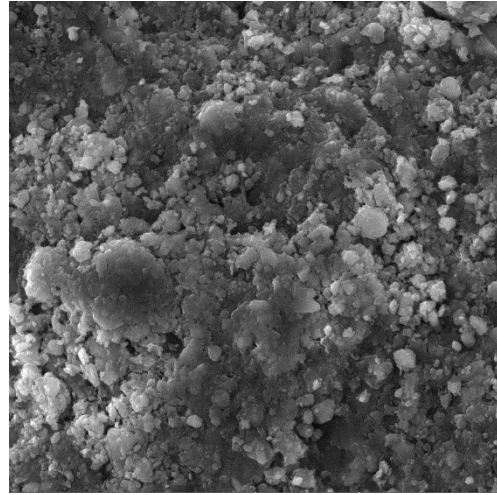
a)



b)



c)



d)

Şekil 3.37. Atık kil numunesinin 5000X yakınlaştırmalı a) saf su geçirilmiş SEM görüntüsü b) model çözelti geçirilmiş SEM görüntüsü c) kentsel katı atık DDT sızıntı suyu geçirilmiş SEM görüntüsü d) tehlikeli atık DDT sızıntı suyu geçirilmiş SEM görüntüsü

3.4. Maliyet Hesaplaması

Bu çalışmada kullanılan kilin atık olarak değerlendirilmek istenmesinden dolayı, atık kilin DDT'lerde kullanım için temin edilmesinde herhangi bir maliyet söz konusu değildir. Ancak atık kil doğal haliyle DDT'lerde kullanılamayacağından dolayı, bu çalışmada da yapıldığı gibi kurutma, eleme ve öğütme işlemlerinden geçmesi gerekmektedir ve dolayısıyla bu işlemler atık kilin maliyetini oluşturacaktır. Özel firmalarla yapılan görüşmeler sonucunda, kurutma, eleme ve öğütme işlemleri için ortalama 0,9 TL/kg gibi bir fiyat belirlenmiştir.

Türk müteahhitlerinin satın almak istemesi durumunda sırasıyla Eskişehir kili, sepiyolit ve zeolit killlerinin hammadde birim fiyatları için 0,083 TL/kg, 0,17 TL/kg ve 0,25 TL/kg ödemesi gerekmektedir (Güney ve ark, 2013). Maliyet olarak karşılaştırma yapılmak istenilirse, bor türevi atık kilin hammadde maliyetinin olmayışı, sadece kurutma, eleme ve öğütme işlemlerinin maliyeti oluşturması ve bu işlemler için doğacak maliyetlerin diğer hammadde fiyatları verilen killer için de geçerli olması, bor türevi atığını daha cazip kılmaktadır.

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

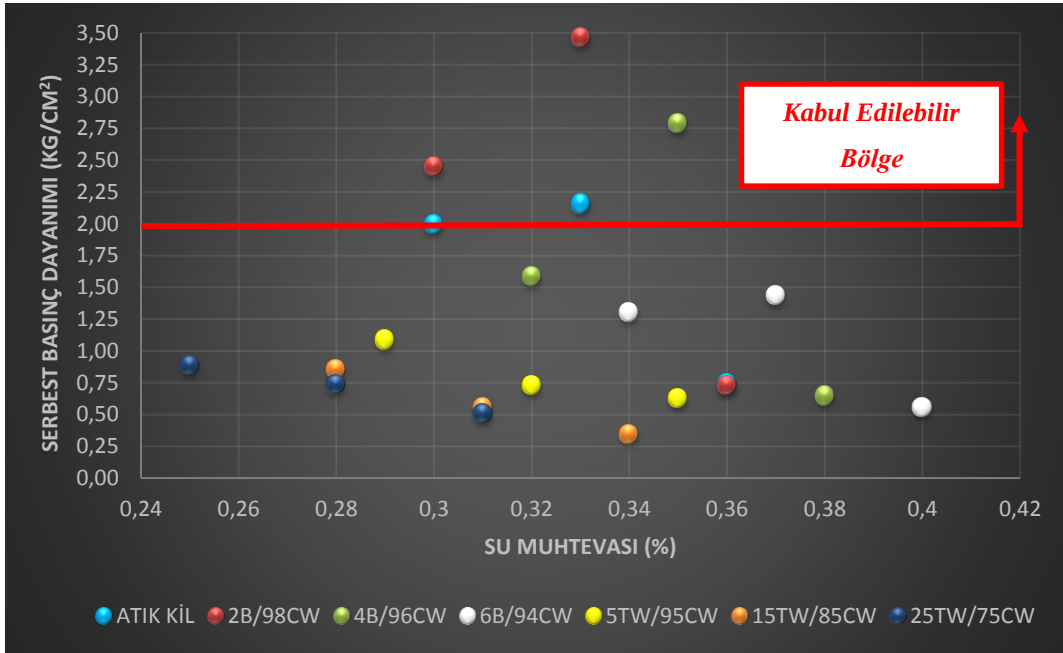
Bu çalışmada, Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'nden elde edilen bor türevi tesisi atık kilin ve atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışım hallerinin çöp deponi tabakalarında kullanılabilirliği geoteknik açıdan incelenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile atık kilin ve karışım hallerinin fiziksel ve mekanik olarak geoteknik özellikleri belirlenmiş ve ADDDY'DE verilen kriterlere göre geçirimsizlik tabakası olarak kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmıştır.

Atık kil, atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışım hallerinin deney sonuçları incelendiğinde, bentonit yüzdesi arttıkça numunelerin plastisite indekslerinde artış, atık lastik yüzdesi arttıkça deney numunelerinin plastisite indekslerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Serbest basınç dayanımları, atık/bentonit karışımlarında ve atığın saf halinde, optimum konumda maksimum değere ulaşırken, atık kil/atık lastik karışımlarında kuru konumda maksimum değere ulaşmıştır. Hidrolik iletkenlik k sabiti ve şişme yüzdesi değerleri, atığın saf halinde, atık/bentonit ve atık kil/atık lastik karışımlarında su muhtevasına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Şişme yüzdeleri ve hidrolik iletkenlik k sabiti, kuru konumda her zaman maksimum değeri verirken, su muhtevası azaldıkça numunelerin şişme yüzdelerinde ve hidrolik iletkenlik k sabitlerinde azalma gözlemlenmiştir.

DDT'lerde geçirimsiz kil tabakası olarak kullanılacak olan malzemeler için gereken koşullara göre deney sonuçları incelendiğinde;

- DDT'lerde kullanılacak olan malzemeler için $PI < 50$ olması (Daniel ve Wu, 1993) koşuluna bağlı olarak deney sonuçları incelendiğinde, atığın hem saf hem de bütün atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışım hallerinin DDT'lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygunluğu belirlenmiştir.
- DDT'lerde kullanılacak kil tabakası için minimum taşıma kapasitesinin 2 kg/cm^2 olması (Daniel ve Wu, 1993) koşuluna bağlı olarak deney sonuçları incelendiğinde, atık kil/bentonit karışımlarından 6B/94CW'nin DDT'lerde

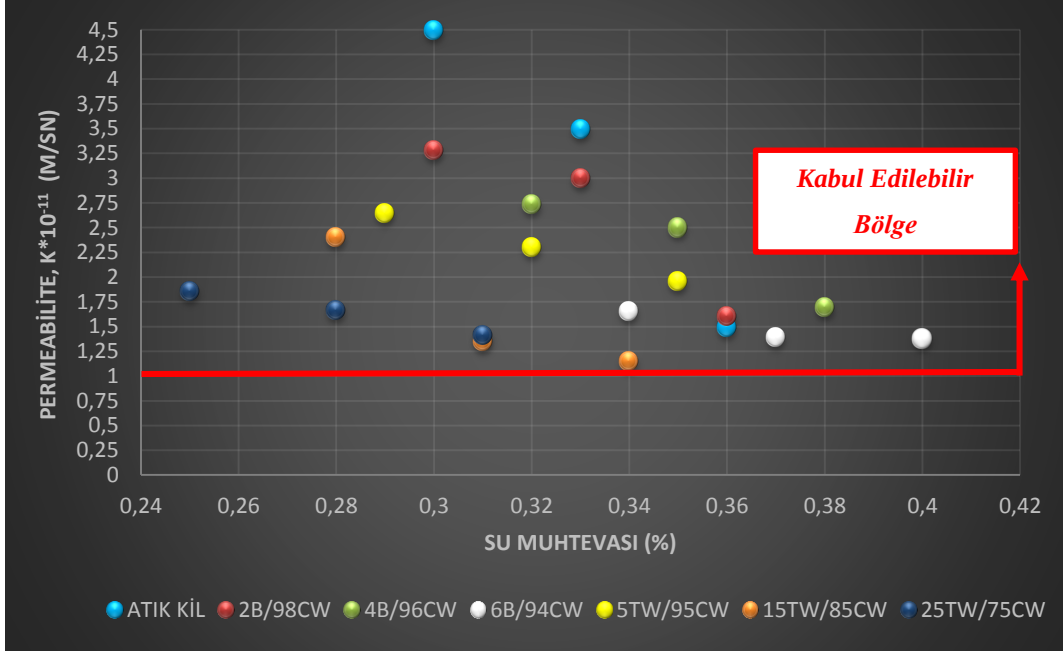
kil tabaka yerine kullanım için uygun olmadığı belirlenmiştir. 4B/96CW için ıslak ve kuru konumdaki su muhtevasına sahip numunelerin bu koşulu sağlamadığı, ancak optimum konumdaki su muhtevası değerine sahip numunelerin sağladığı gözlemlenmiştir. Atığın saf halinin ve 2B/98CW'nin kuru ve optimum konumdaki numunelerinin bu koşulu sağladığı, ıslak konumdaki numunelerinin sağlamadığı gözükmemektedir. Atık kil/atık lastik karışımlarından ise hiç bir numunenin DDT'lerde kil tabaka yerine kullanım için uygun olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Atık kilin ve karışımların serbest basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

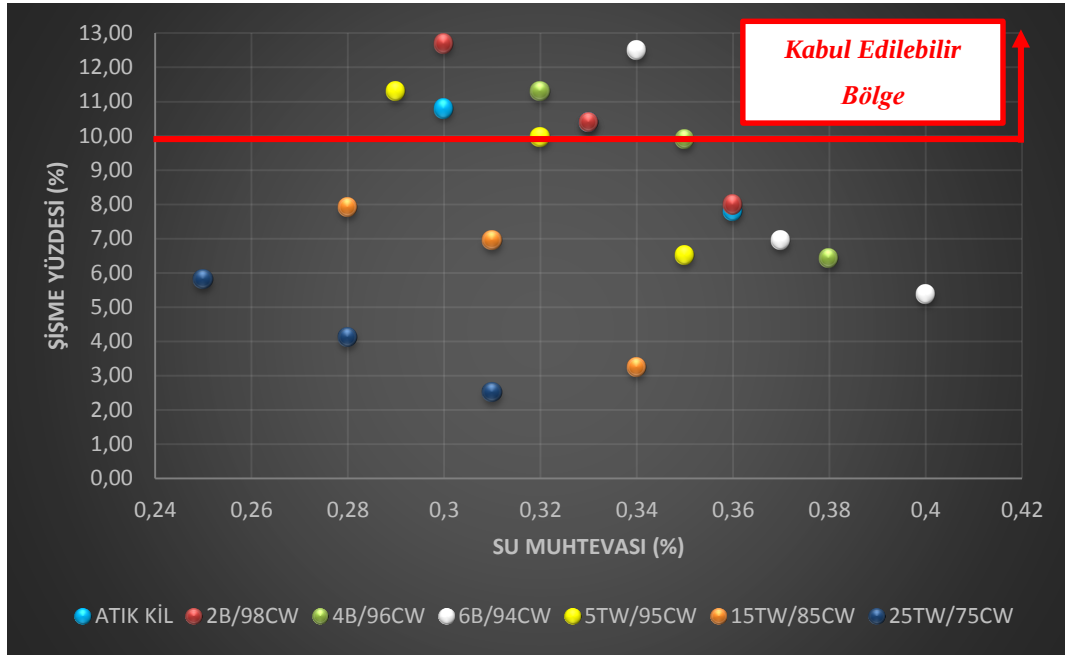
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY, 2010) gereğince tehlikeli atık ve belediye atıkları için izin verilen maksimum permeabilite değerinin $1,0 \times 10^{-9}$ m/sn olması koşuluna bağlı olarak deney sonuçları incelendiğinde, atığın hem saf halinin hem de belirlenen tüm atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışım hallerinin her konumda (kuru-

optimum-ıslak) I., II. ve III. sınıf düzenli depolama sahalarında kullanım için uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2. Atık kilin ve karışımların permeabilite katsayılarının değerlendirilmesi

- Gromko (1974) tarafından yapılan şişme yüzdesine bağlı sınıflandırmaya göre deney sonuçları incelendiğinde ise, atığın saf halinin ve atık kil/bentonit karışımlarından 2B/98CW karışımının kuru ve optimum konumdaki su muhtevasına sahip numunelerin şişme potansiyeli açısından DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olduğu belirlenmiştir. 4B/96CW ve 6B/94CW karışımlarının ise sadece kuru konumdaki su muhtevasına sahip numunelerinin DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olduğu belirlenmiştir. Atık kil/atık lastik karışımlarından ise yalnızca 5TW/95CW karışımının kuru konumdaki su muhtevasına sahip numunelerin şişme potansiyeli açısından DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Atık kilin ve karışımların şişme yüzdelerinin değerlendirilmesi

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, atığın saf halinin ve atık kil/bentonit karışımlarından 2B/98CW karışımının kuru ve optimum konumdaki su muhtevasına sahip numunelerinin DDT’lerde kil tabaka yerine kullanım için uygun olduğunu ve atık lastik ile oluşturulan hiçbir karışımın, tüm yönleriyle DDT’lerde kil tabaka yerine kullanımı için uygun olmadığını göstermektedir. Bu çalışma, atık kilin I., II. ve III. sınıf DDT’lerde geçirimsiz kil tabakası olarak kullanılabileceğini ve Kırka Bor İşletmesi’nden çıkan 400.000 ton/yıl gibi oldukça büyük miktarlardaki bor türevleri atığı için çok önemli bir geri kazanım alternatifi olabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- ADDDY, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara, 2010.
- Akcanca, F., *Katı Atık Depoları İçin Geçirimsiz Şilte Oluşturulmasında Kum-Bentonit-Kireç Karışımının Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
- Akpınar, K., 2005, *Sepiyolit ve Zeolit Karışımların Tehlikeli Atık Deponi Alanı Dizaynında Kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2005.
- Akyıldız, V., *Lastikten Türetilmiş Yakıt Pirolizi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2011.
- Al-Tabbaa, A., Aravinthan, T., “Natural Clay - Shredded Tire Mixtures As A Fill Barrier Materials”, *Waste Management*, **18**, 1, 9-16, 1998.
- Anonim, *2014 Bor Sektör Raporu*, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Eskişehir, 2014.
- Anonim, *Belediye Atık İstatistikleri, 2012*, T.C. Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı, Ankara, 2014.
- Aytekin, V., *Maden Mühendisliğine Giriş*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınlan No: 167, İzmir, Türkiye, 1995.
- Banar, M., Özkan, A., Onay, Ö., Çokaygil, Z., Akyıldız, V., Tübitak Projesi, Atık Lastikten Türetilmiş Yakıtların Pirolizi ve Katı Ürünün Karbon Siyahı Olarak Değerlendirilmesi, Proje No: 108Y267, 2011.
- Benson R.H., Daniel D. E., and Boutwell G. P., Field Performance of Compacted Clay Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, No.5, 907-12, 1999.

- Boutwell, G. P. ve Hedges, C., “Evaluation of Waste-Retention Liners by Multivariate Statistics”, *Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janerio, Brazil, 2, 815-18, 1989.
- Chalermyanont, T., Arrykul, S., Charoenthaisong, N., *Transport of Heavy Metals and Chemical Compatibility of Hydraulic Conductivity of a Compacted Sand-Bentonite Mixture*, Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, Thailand, 2008.
- Cho, W., J., Lee, J., O., Kang, C., H., *Hydraulic Conductivity of Compacted Soil-Bentonite Mixture for a Liner Material in Landfill Facilities*, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea, 2002.
- Çevre ve Orman Bakanlığı (2005), Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Ankara.
- Daniel. D. E. ve Benson, C. H., “Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **116**, 12, 1811-30, 1990.
- Daniel, D.E. ve Koerner, R. M., *Waste Containment Facilities, Second Edition Guidance for Construction Quality Assurance + Construction Quality Control of Liner + Cover Systems*, ASCE Press., 2007.
- Daniel, D. E. ve Wu, Y.-K., Compacted Clay Liners and Covers for Arid Sites, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **119**, 2, 223-37, 1993.
- Daniel, D. E., “Introduction”, *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, Edited by Daniel, D. E. Chapman & Hall, London, 3-14, 1993a.
- Daniel, D. E., “Clay Liners”, *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, Edited by Daniel, D. E. Chapman & Hall, London, 137-163, 1993c
- Das, B.M., *Principles of geotechnical engineering*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, A.B.D.. 1990.

- Ebina, T., Minja, R., J., A., Nagase, T., Onodera, Y., Chatterjee, A., “Correlation of Hydraulic Conductivity of Clay–Sand Compacted Specimens with Clay Properties”, *Applied Clay Science*, **26**, 1-4, 3-12, 2004.
- Edil, T. B. and Berthouex, P. M., “Earthen Barriers Technology for Waste Containment”, *Waste Management*, **10**, 2, 147-153, 1990.
- Erkal, F., Girgin, İ., “Etibank Emet kolemanit işletmesi kaba atıklarının konsantre üretimi amacıyla değerlendirilmesi”, 4.Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu (Ed: Özbayoglu), C.2 Antalya, 599-608, 1992.
- Fındık, N., *Etibank Kırka Boraks İşletmesi Atıklarının Sır Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1998.
- Geçim, D., *Atık Kalıp Kumunun Yol Alt Yapısında Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. A.B.D., 2004.
- Gleason, M., H., Daniel, D., E., Eykholt, G., R., “Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **123**, 438-45, 1997.
- Gromko, G.J., “Review of Expansive Soil,” *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **100**, No.GT6, 542-549, 1974.
- Güney, Y., Koparal, A., S., Tübitak Projesi, Sepiyolit ve Zeolitin Çöp Deponi Tabakalarında Kullanımının Araştırılması, Proje No: 104I082, 2007.
- Güney, Y., Koparal, A., S., Aydılek, A., H., “Sepiolite as an Alternative Liner Material in Municipal Solid Waste Landfills”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **134**, 8, 1166-80, 2008.
- Güney, Y., Çetin, B., Aydılek, A., H., Tanyu, B., F., Koparal, S., “Utilization of Sepiolite Materials As a Bottom Liner Material in Solid Waste Landfills”, *Waste Management*, **34**, 1, 112-124, 2013.

- Güyağüler. T., “Türkiye bor potansiyeli”, 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (Ed: Köse, Arslan&Tannverdi), TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İzmir, 18-27, 2001.
- Hekimoğlu, S., *Kil Zeminlerin Şişme Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 1996.
- Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A., Jun Du, Y., “Compressibility and Permeability of Bangkok Clay Compared with Kaoline and Bentonite”, *Applied Clay Science*, **52**, 150-9, 2011.
- İncesu A. N., *Düzenli Depolama Tesislerinde Kullanılmak Üzere Kum-Bentonit Karışımlarının Kireç ve Yüksek Fırın Cürufu Katkısı ile İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- Kalkan, E., Akbulut, S., “The Positive Effects of Silica Fume on The Permeability, Swelling Pressure and Compressive Strength of Natural Clay Liners”, *Engineering Geology*, **73**, 1-2, 145-156, 2004.
- Karadeniz, M., *Cevher Zenginleştirme Testi Artıkları-Çevreye Etkileri-Önlemleri*, MTA MAT Daire Başkanlığı, Ankara, 332 s, 1996.
- Kavas, *Seydişehir Kırmızı Çamuru ve Kırka Bor Atıkları Kullanılarak Kaliteli Yapı Malzemesi Üretim İmkânlarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 1997.
- Kaya, A. ve Durukan, S., “Utilization of bentonite- embedded zeolite as clay liner”, *Applied Clay Science*, **25**, 1-2, April, 83-91, 2004.
- Kayabalı, K., “Engineering Aspects of a Novel Landfill Liner Material: Bentonite-Amended Natural Zeolite”, *Engineering Geology*, **46**, 2, 23 , 105-114, 1997.
- Kugler, H., Ottner, F., Froeschl, H., Adamcova, R., Schwaighofer, B., “Retention of İnorganic Pollutants in Clayey Base Sealings of Municipal Landfills”, *Applied Clay Science*, **21**, 1-2, 45-58, 2002.

- Kula, İ., *Bor Endüstrisi Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2000.
- Lee, J., M., Shackelford, C., D., “Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **131**(1), 64-77, 2005.
- Mateo, A., J., *Evaluation of the Performance of Soil Liners Using the Mechanics of Saturated and Unsaturated Soil*, Civil Engineering, University of Ottawa, Canada, 2008.
- Meslekî Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), “Zemin Deneyleri 1,2,3,4,5 ”, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2006.
- Mitchell, J. K., Hopper. D. R., ve Campanella, R. G., *Permeability of Compacted Clay*, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, **91**, 4, 41-65, 1965.
- Palmer, B., G., Edil, T., B., Benson, C.,H., “Liners for Waste Containment Constructed with Class F and C Fly Ashes”, *Journal of Hazardous Materials*, **76**, 2-3, 193-216, 2000.
- Prashanth, J., P., Sivapullaiah, P., V., Sridharan, A., “Pozzolanic Fly Ash As A Hydraulic Barrier In Land Fills”, *Engineering Geology*, **60**, 1-4, 245 – 52, 2001.
- Qian, X., Koerner, R.M., Gray, D.H., *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*, Prentice Hall, New Jersey, ABD, 2001.
- Sevim, T., *Etibank Kırka Boraks İşletmesi Atıklarının Emaye Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1998.

- Sheu, C., Lin, T.-T., Chang, J.-E. ve Cheng, C.-H., “The feasibility of mudstone material as a natural landfill liner,” *Journal of Hazardous Materials*, **58**, 1-3, February, 237-47, 1998.
- Smith, D. C. ve Fey, M. V., “Chemical manipulation of soil for sealing landfills”, *Applied Geochemistry*, **11**, 1-2, 325-9, 1996.
- Taşpolat, L., T., Zorluer, İ., Koyuncu, H., “Atık Mermer Tozunun Geçirimsiz Kil Tabakalarda Donma-Çözölmeye Etkisi”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **2**, 11-16, 2006.
- Tay, Y., Y., Stewart, D., I., Cousens, T., W., “Shrinkage and Desiccation Cracking in Bentonite–Sand Landfill Liners”, *Engineering Geology*, **60**, 1-4, 263-74, 2001.
- Tuncan, A., Tuncan, M., Koyuncu, H., Güney, Y., “Use of Natural Zeolites as a Landfill Liner”, *Waste Management & Research*, **21**, 1, 54-61, 2003.
- Tunç, Z., *Bor Endüstrisi Atıklarının Tuğla ve Kiremit Endüstrisinde Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2003.
- Uzer, A.U. ve Olgun M., “Şişen Zeminler Üzerinde İki Farklı Şişme Deney Yöntemi Sonuçlarının Değerlendirilmesi,” *Journal of Technical*, **5**, Sayı:3, 2006.
- Yıldız, M., *Katı Atık Depolarında Taban Malzemesinin Hidrolik ve Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 1998.

EKLER

EK A: Likit Limit Deney Sonuçları



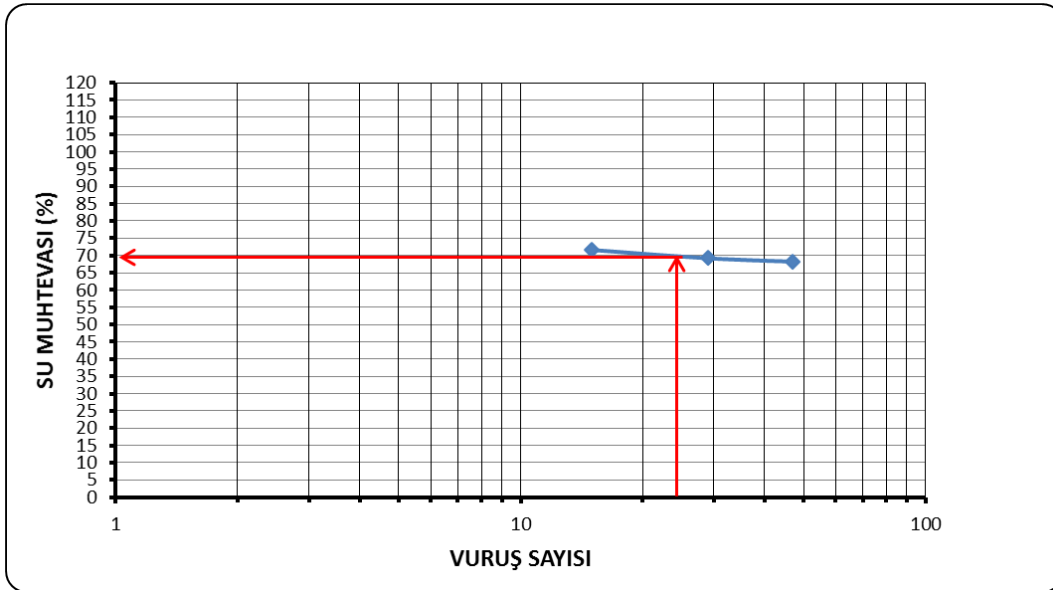
Şekil A.1. Atık kil likit limit grafiği



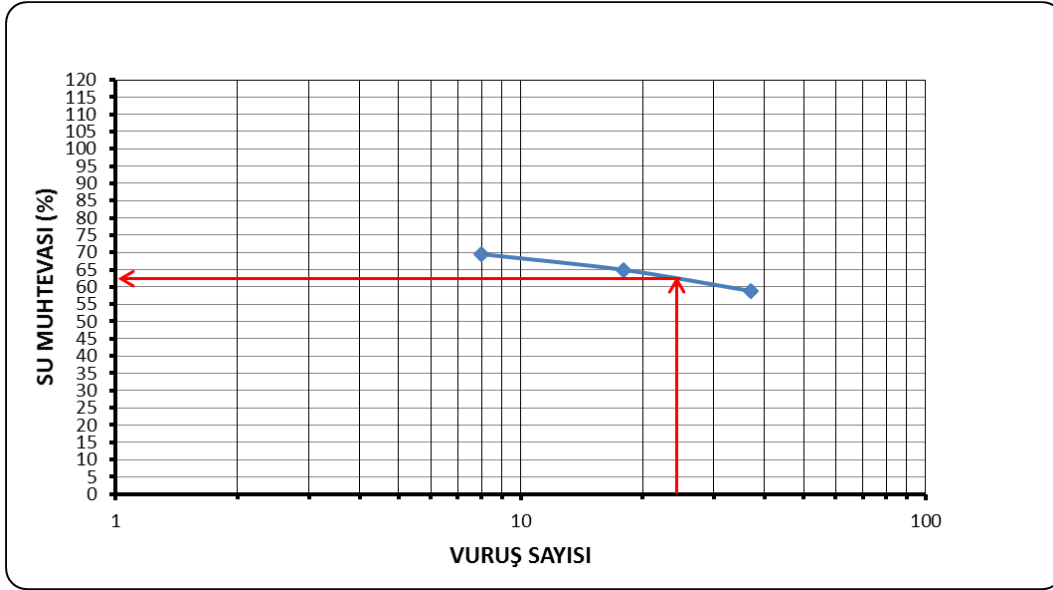
Şekil A.2. 2B/98CW karışımı likit limit grafiği



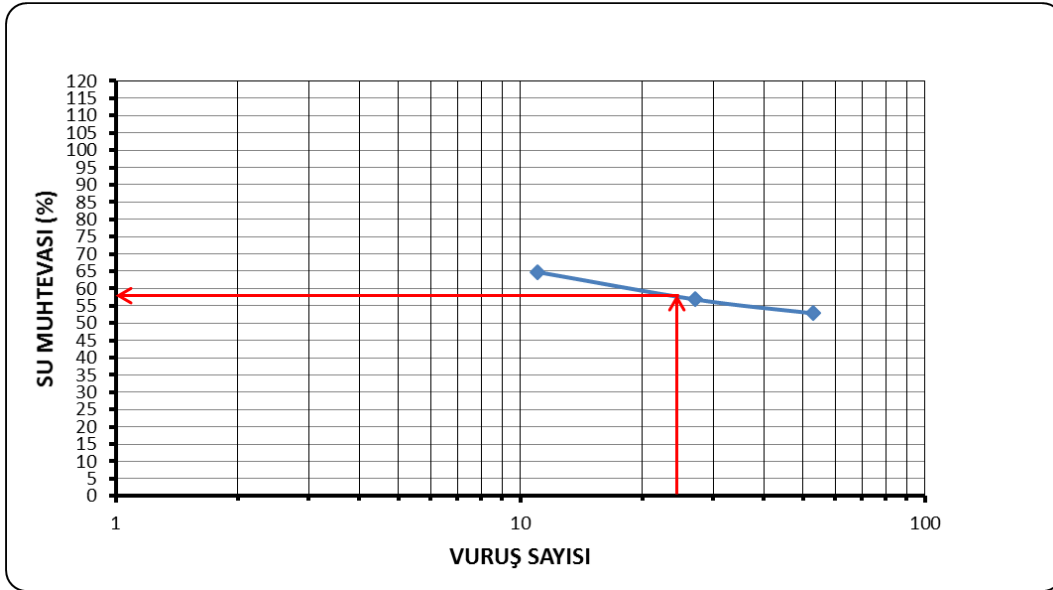
Şekil A.3. 4B/96CW karışımı likit limit grafiği



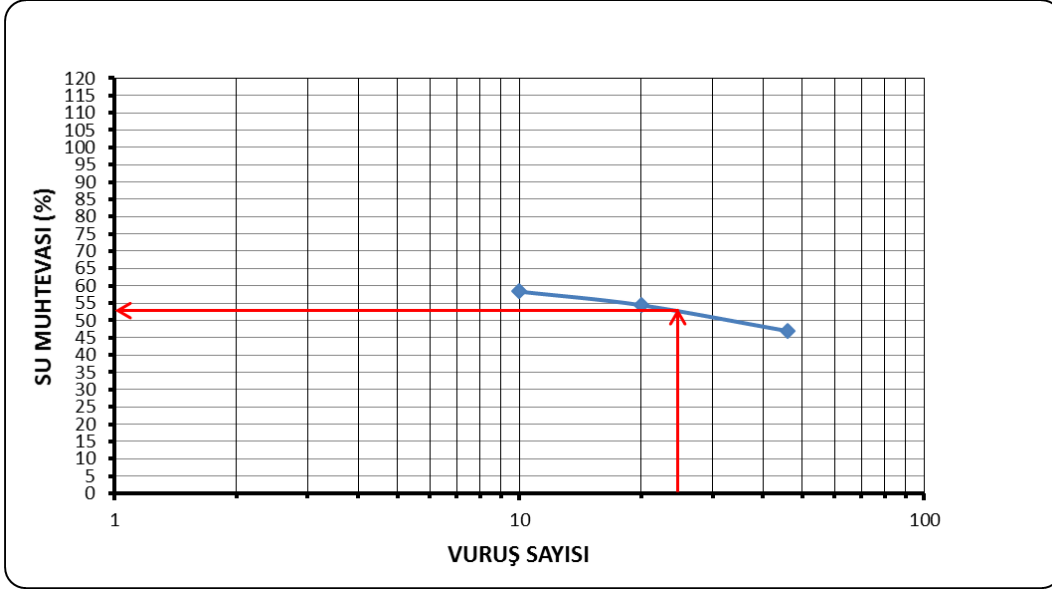
Şekil A.4. 6B/94CW karışımı likit limit grafiği



Şekil A.5. 5TW/95CW karışımı likit limit grafiği

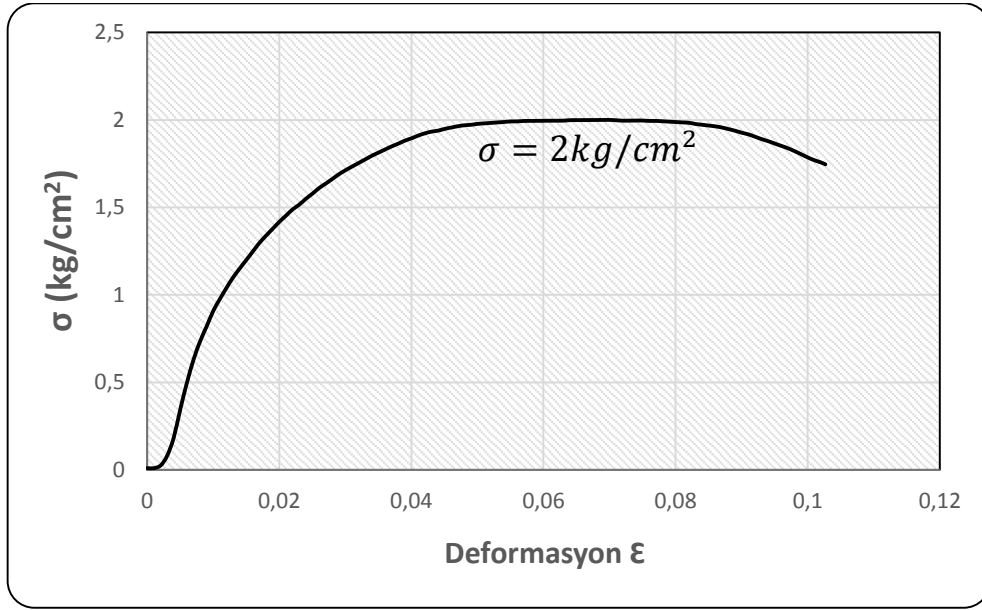


Şekil A.6. 15TW/85CW karışımı likit limit grafiği

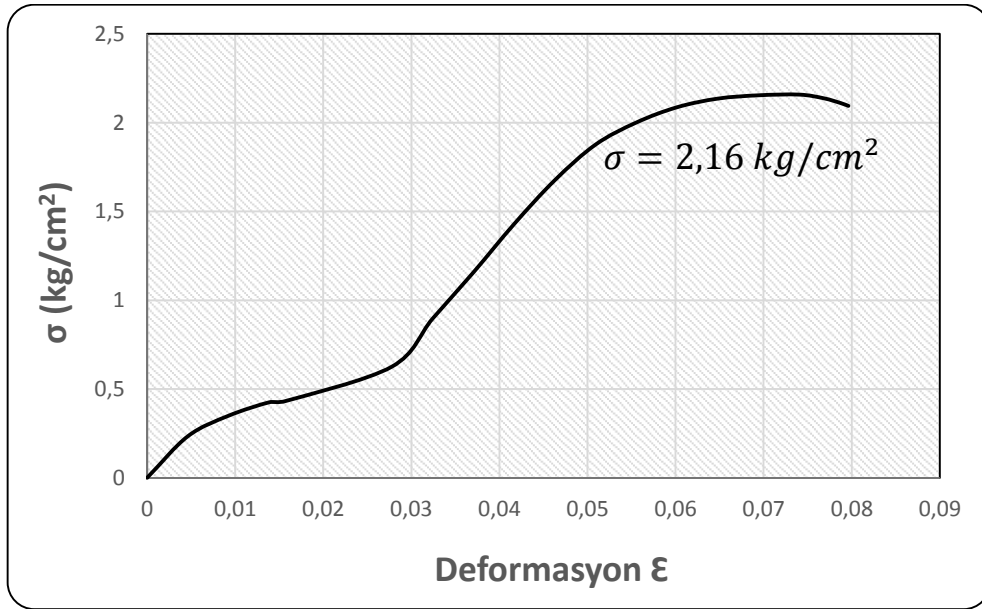


Şekil A.7. 25TW/75CW karışımı likit limit grafiği

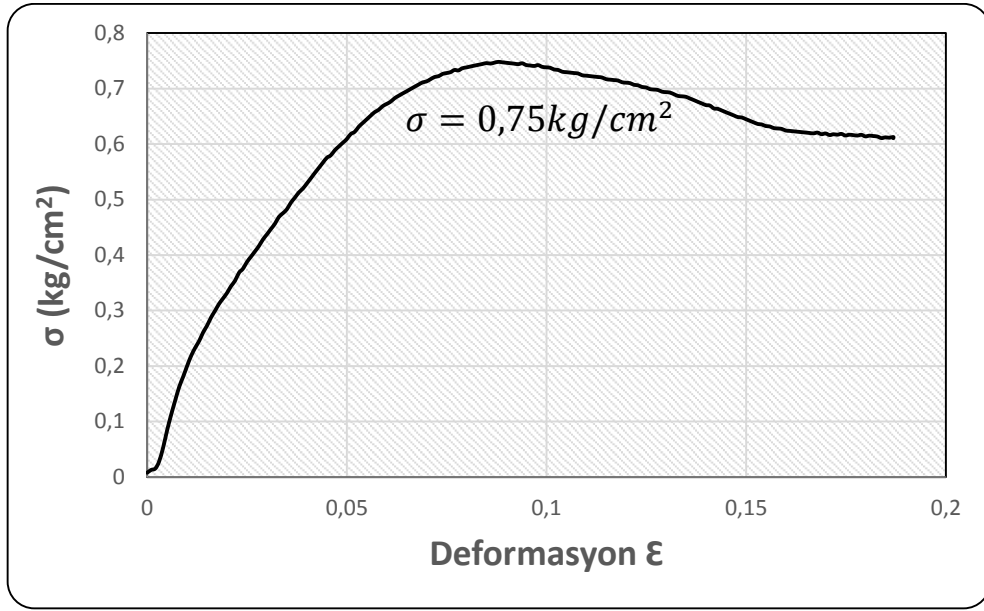
EK B: Serbest Basınç Deney Sonuçları



a)

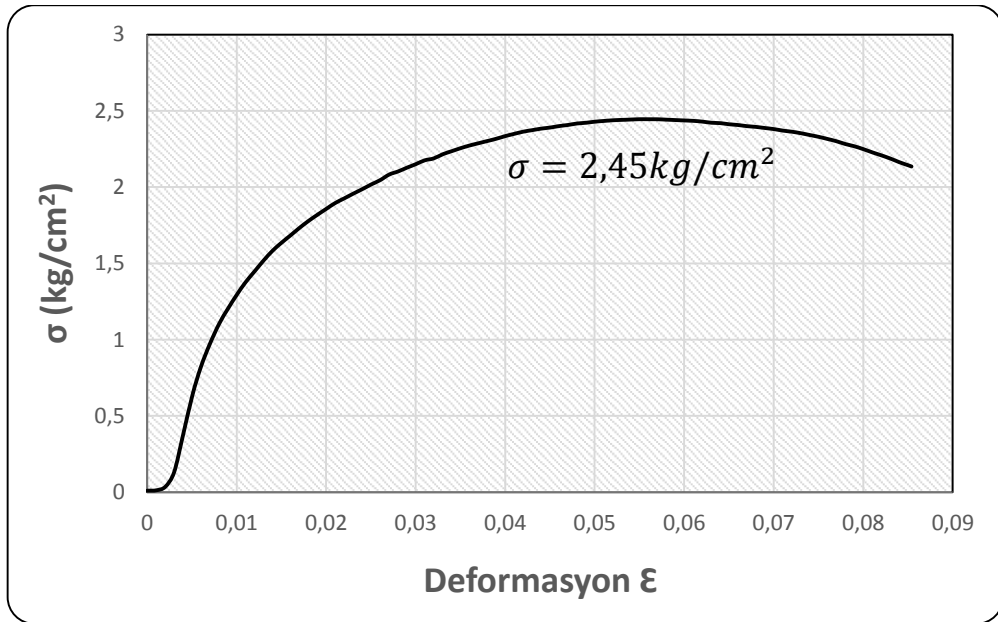


b)

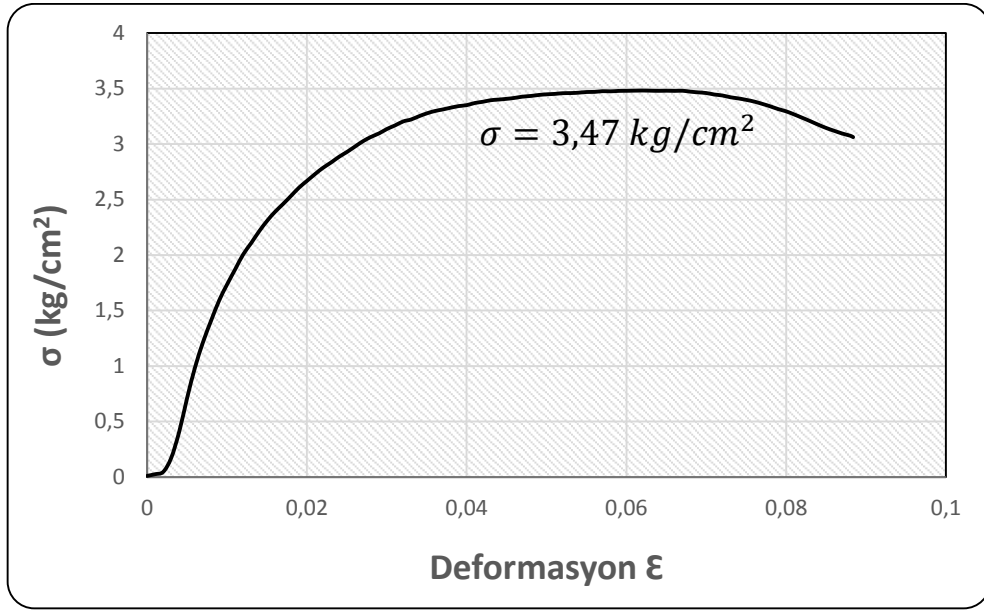


c)

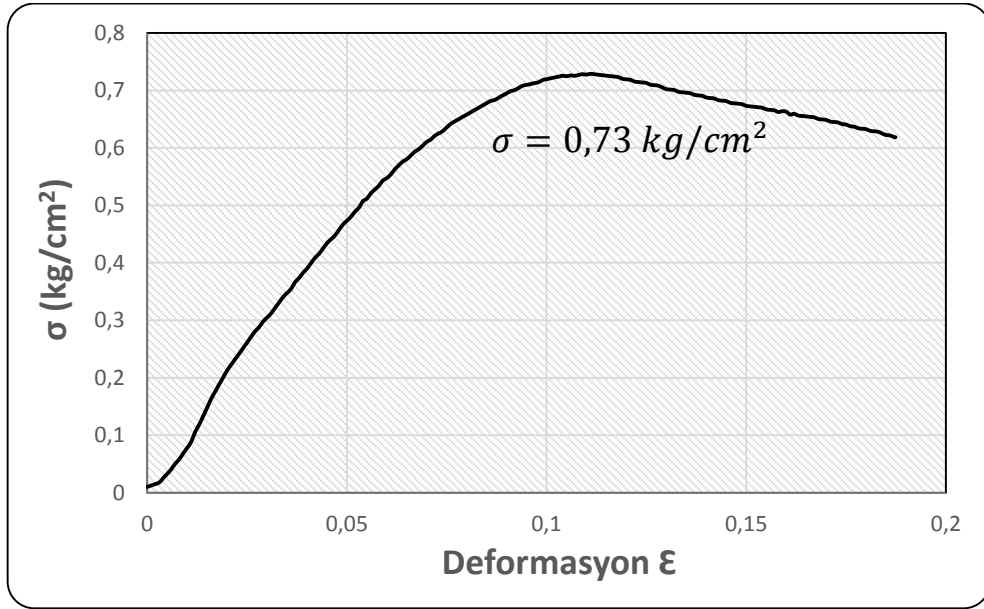
Şekil B.1. Atık kil serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum



a)

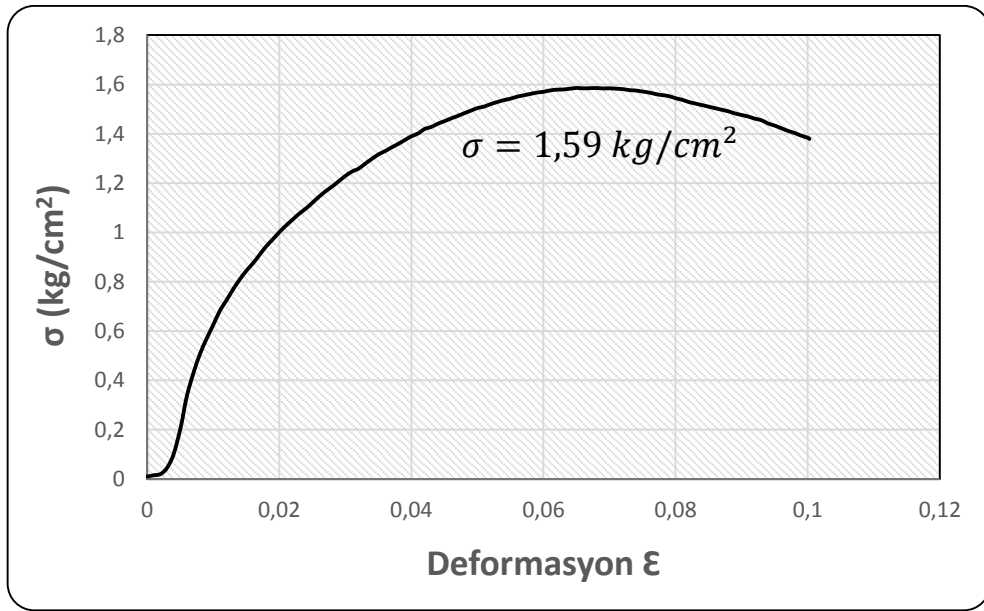


b)

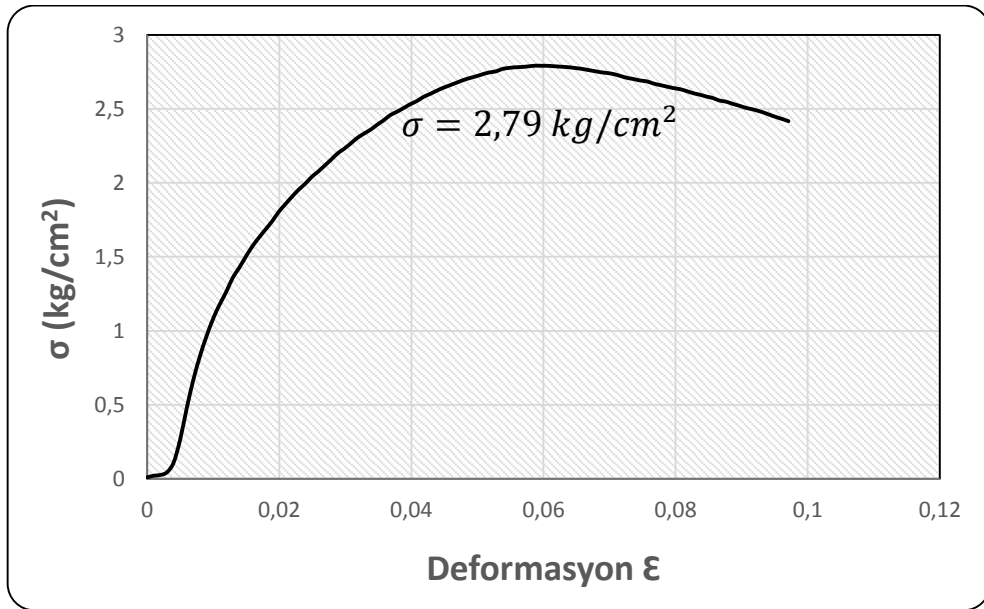


c)

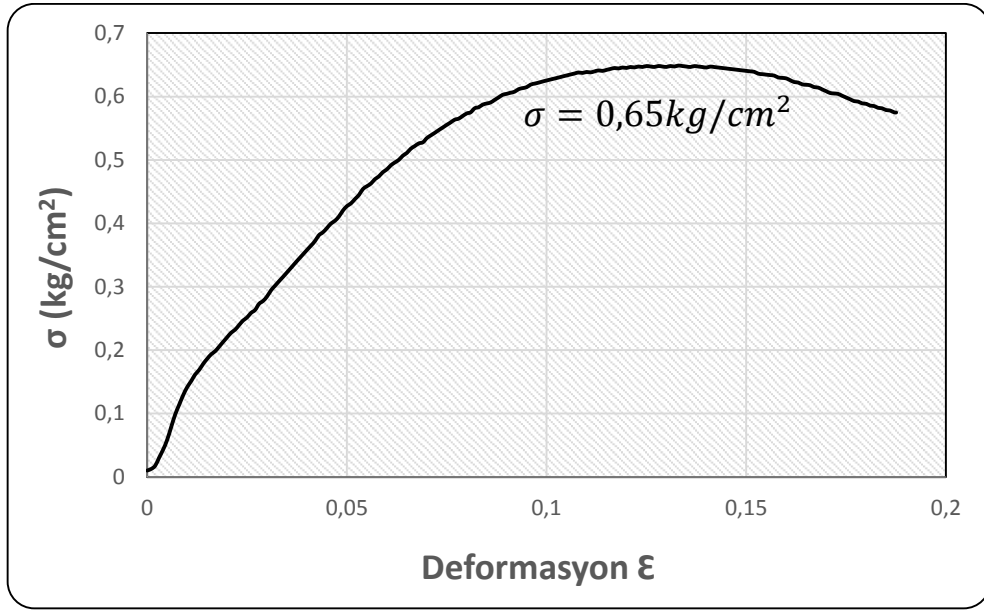
Şekil B.2. 2B/98CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum



a)

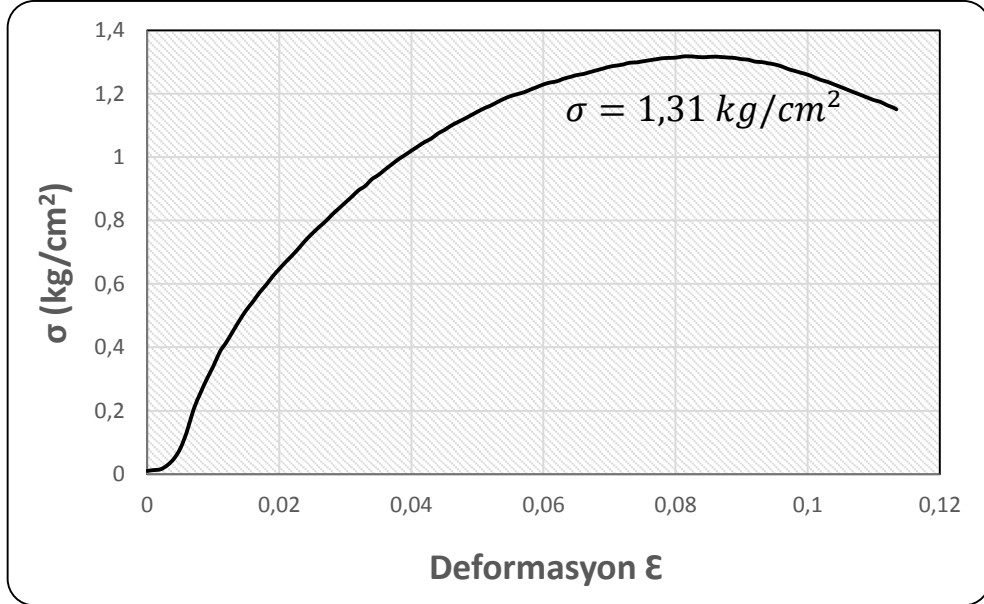


b)

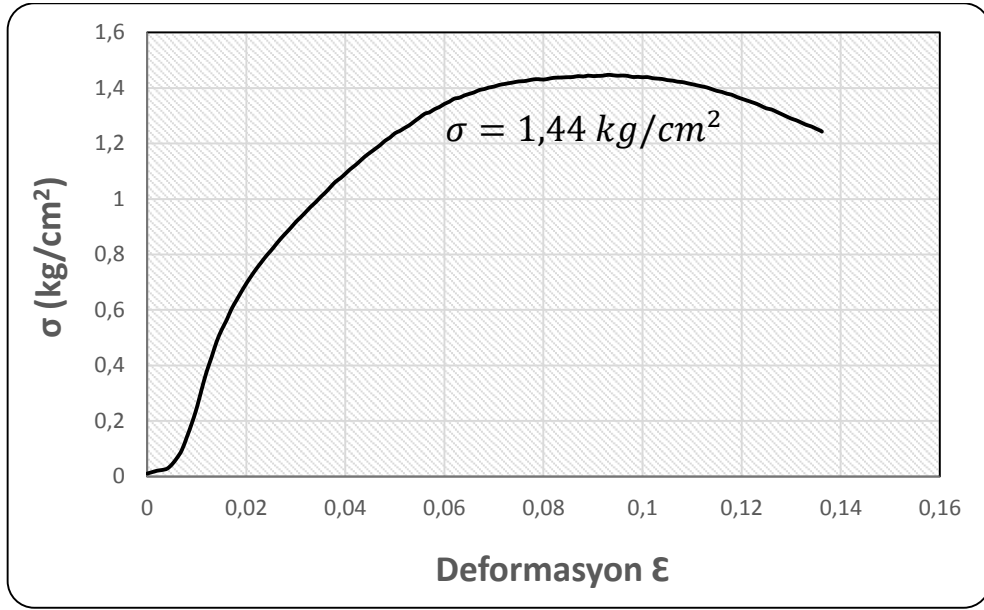


c)

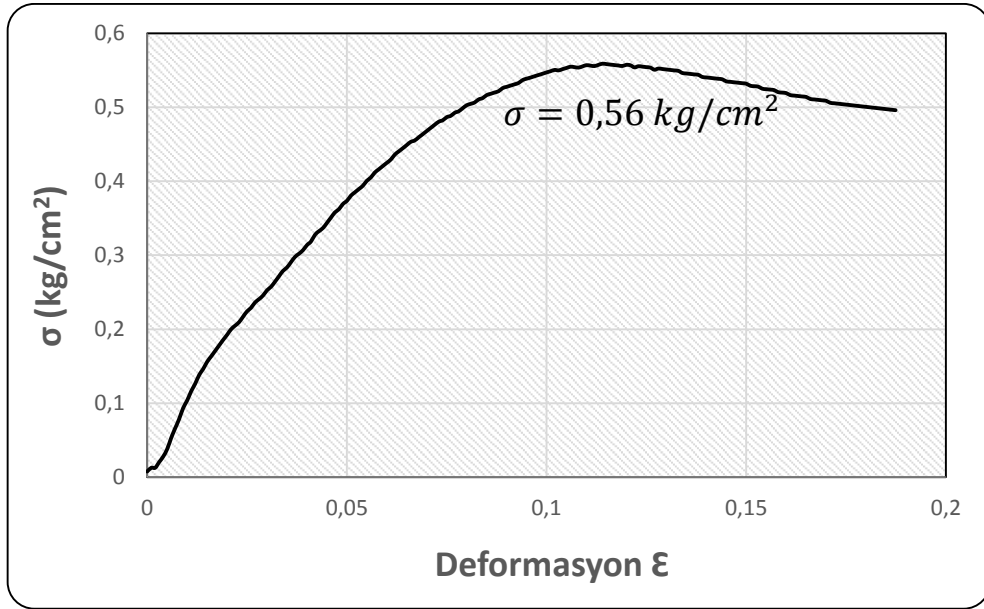
Şekil B.3. 4B/96CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum



a)

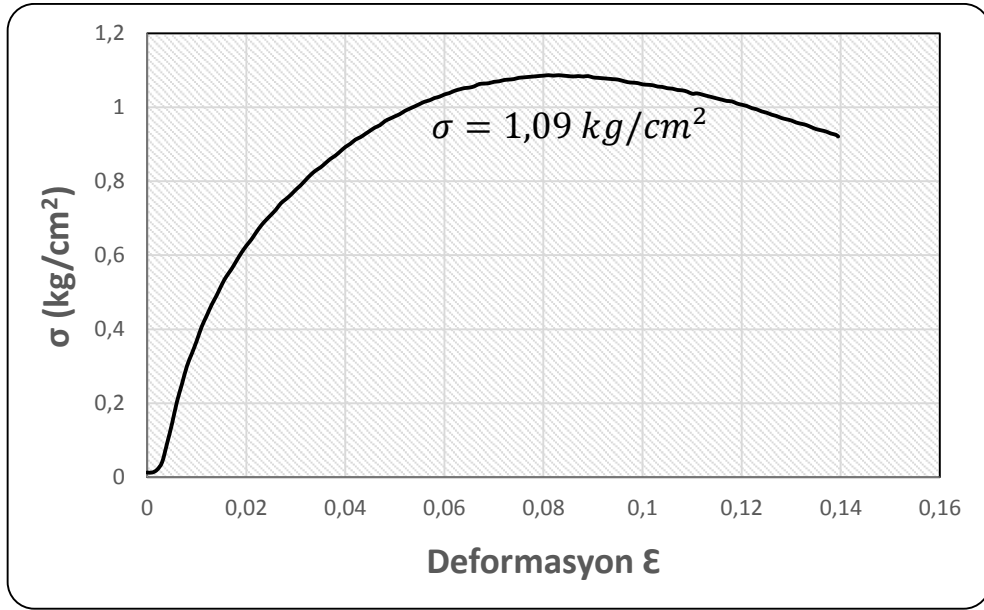


b)

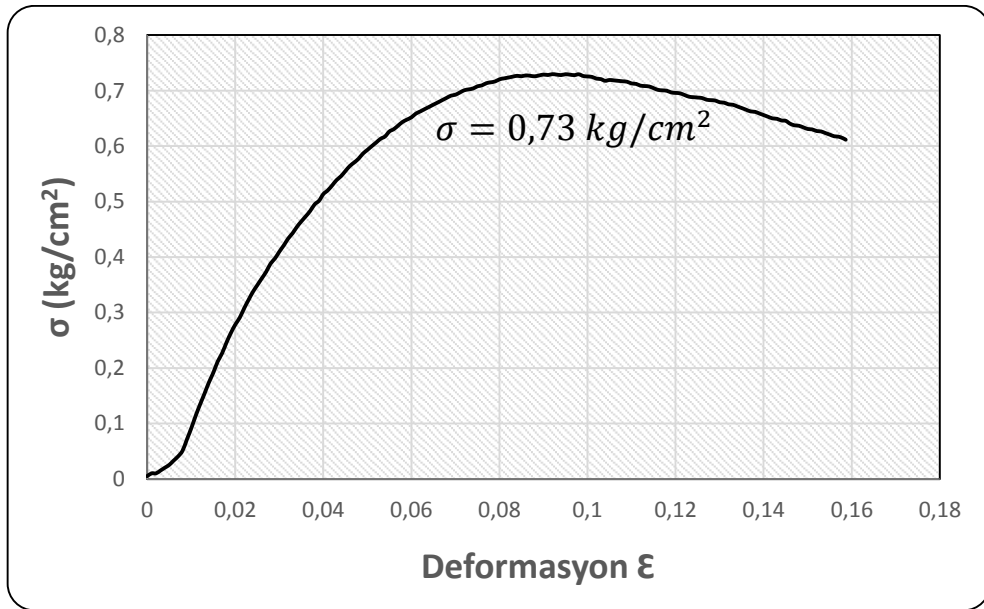


c)

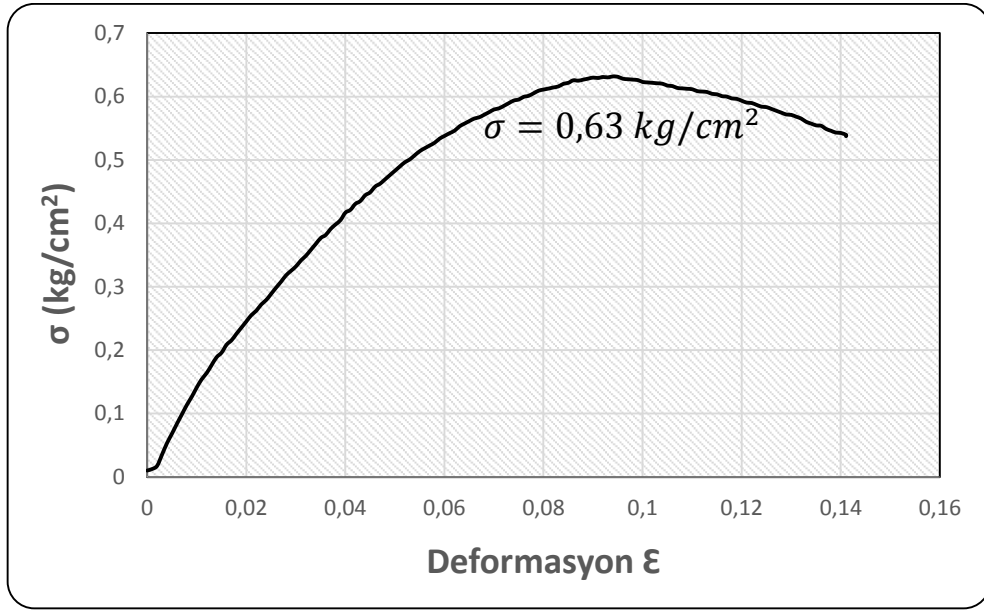
Şekil B.4. 6B/94CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum



a)

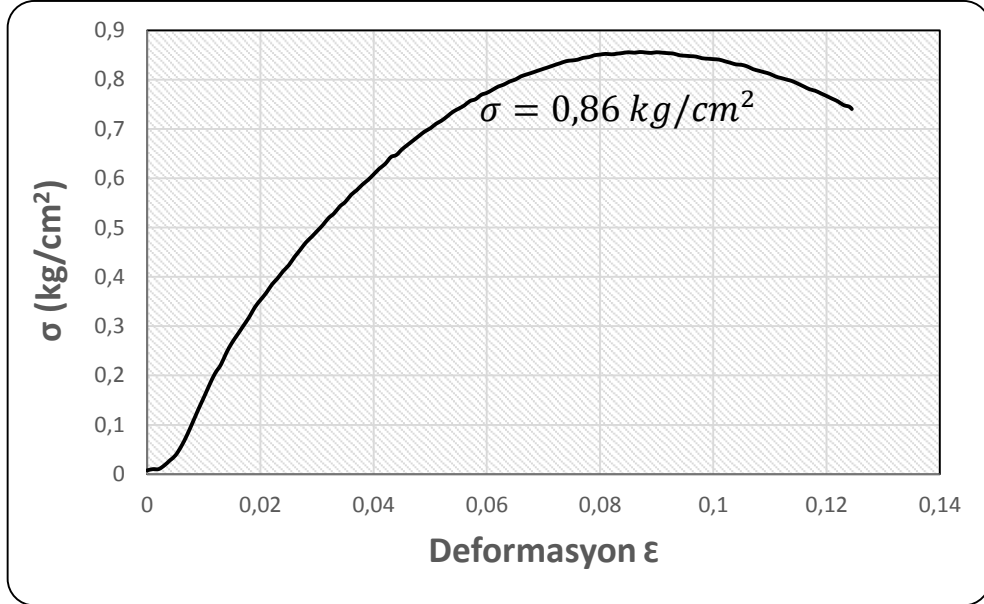


b)

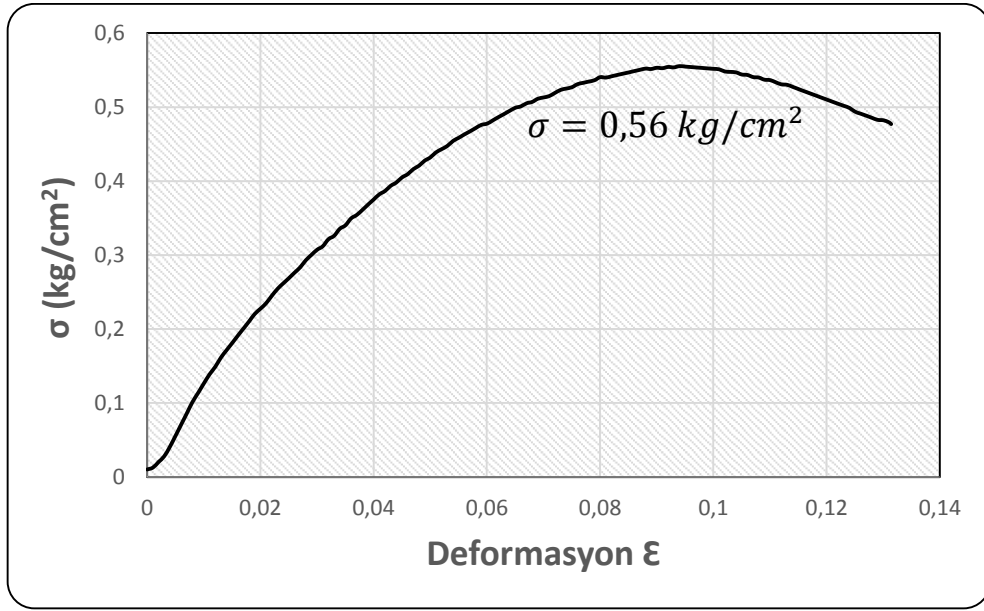


c)

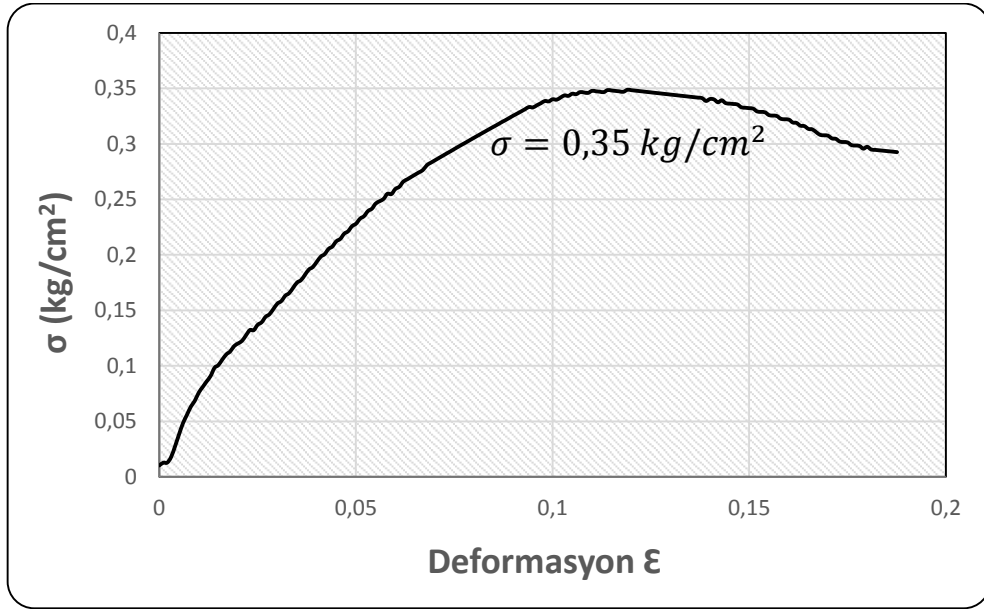
Şekil B.5. 5TW/95CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum



a)

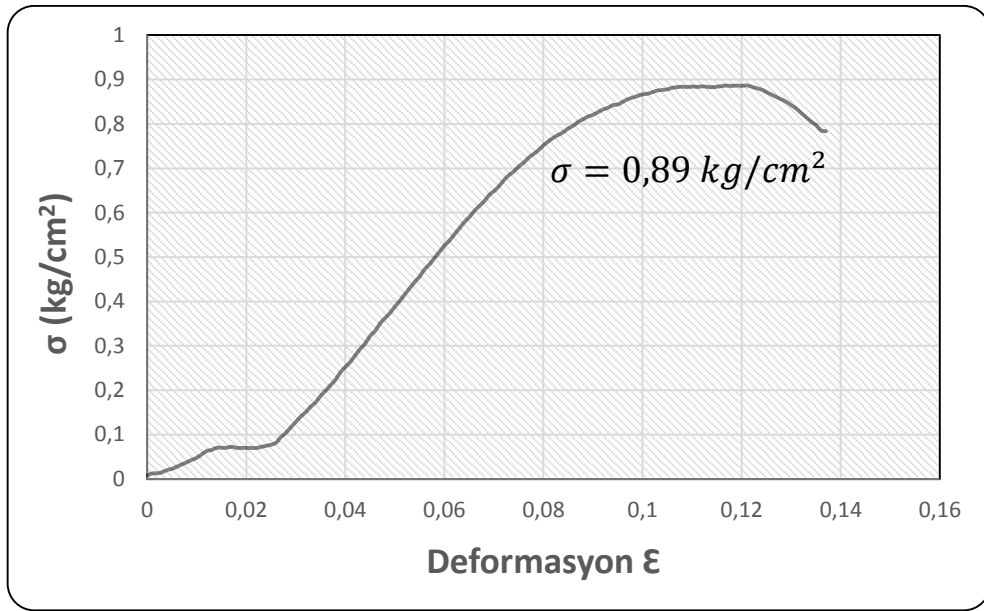


b)

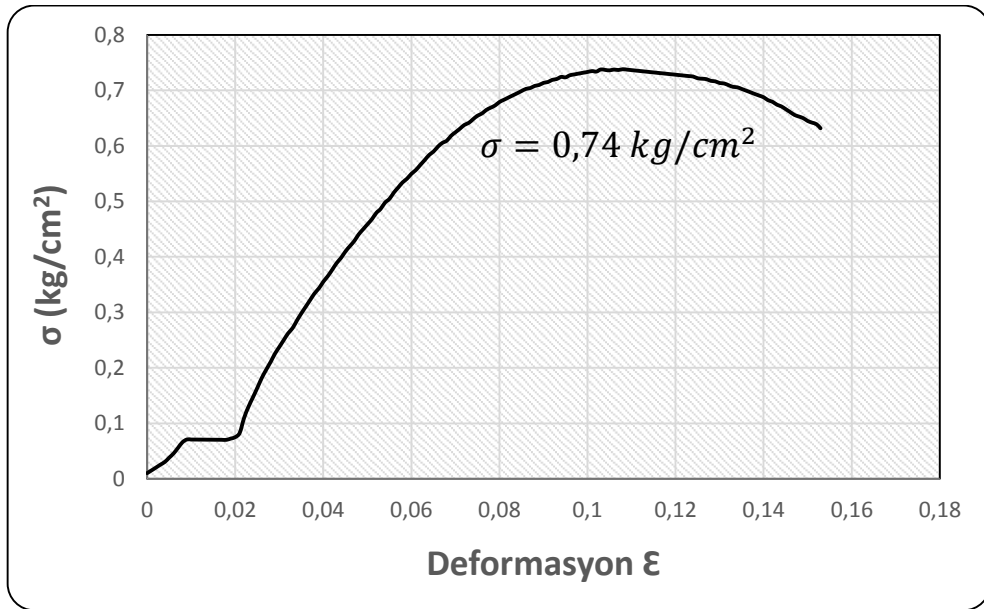


c)

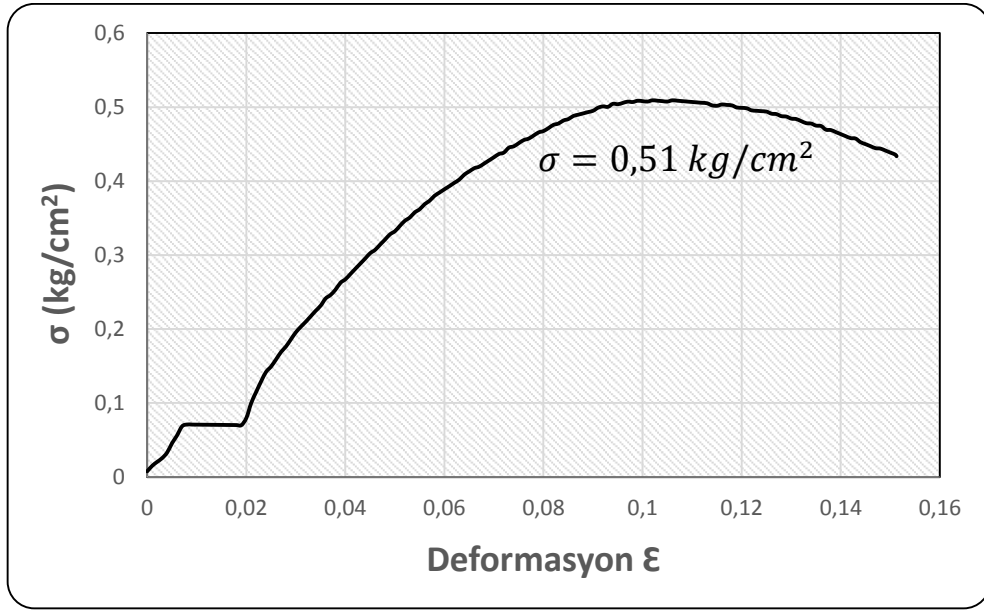
Şekil B.6. 15TW/85CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum



a)



b)



c)

Şekil B.7. 25TW/75CW karışımlarının serbest basınç dayanımları a) Kuru konum b) Optimum konum c) Islak konum