



**MODİFİYE EDİLMİŞ UÇUCU KÜLDEN
ELDE EDİLEN SIKIŞTIRILMIŞ ŞİLTelerin
KATI ATIK DEPOLAMA ALANLARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mutlu ŞİMŞEK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK**

2017

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MODİFİYE EDİLMİŞ UÇUCU KÜLDEN ELDE EDİLEN
SIKIŞTIRILMIŞ ŞİLTELERİN KATI ATIK DEPOLAMA
ALANLARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mutlu ŞİMŞEK

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**MODİFİYE EDİLMİŞ UÇUCU KÜLDEN ELDE EDİLEN SIKIŞTIRILMIŞ
ŞİLTELERİN KATI ATIK DEPOLAMA ALANLARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK danışmanlığında, Mutlu ŞİMŞEK tarafından hazırlanan bu çalışma 21/09/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI

İmza:

Üye: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAİMOĞLU

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 05.10.2017 tarih ve 39.30 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MODİFİYE EDİLMİŞ UÇUCU KÜLDEN ELDE EDİLEN SIKIŞTIRILMIŞ ŞİLTELERİN KATI ATIK DEPOLAMA ALANLARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mutlu ŞİMŞEK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK

Katı atık depoları, atıkların korunması, çevre kirliliğinin en aza indirilmesi, özellikle su ve toprak kirliliğinin önlenmesi için önemli mühendislik yapılarıdır. Tasarım mühendisi açısından amaç, uygun ve verimli bir atık depolamayı optimum maliyetle gerçekleştirmek olurken, çevre için ise, tesisin kirliliğe sebep olmamasıdır. Katı atıklardan kaynaklanan sızıntı suları ve sıvı atıkların yeraltına sızmalarını önlemek ise en çok depo alanlarının tabanının geçirimsiz tabakalardan oluşması ile mümkündür. Düşük geçirimsizlik özelliklerinden dolayı, katı atık depolama alanlarda kullanılan ana malzemeler geosentetik kil şilte ve sıkıştırılmış kil şiltelerdir. Bu çalışmada, yüzey aktif madde ile modifiye edilen C sınıfı uçucu külün geçirimsiz şilte olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Konuyla ilgili literatürde yayınlanmış çalışmalar incelenip değerlendirildikten sonra, laboratuvarında kıvam limitleri, kompaksiyon, hidrolik iletkenlik deneyi yapılmıştır. Ayrıca modifiye edilmiş uçucu küllerin ve kullanılan uçucu külün SEM kullanılarak görüntüleri alınmıştır. Çalışma, katkısız C sınıfı uçucu kül, C sınıfı uçucu küllerin farklı yüzey aktif maddelerin (SLES, LABSA) farklı konsantrasyonlarında (%10,%15,%20) modifiye edilerek hazırlanan uçucu küller ve bentonit üzerinde yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, katkısız uçucu kül ve modifiye edilmiş uçucu küllerin hidrolik iletkenlik değerlerinin Türk Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği ve Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) sınır değerlerinden daha büyük olduğu için katı atık depolama sahalarında sıkıştırılmış şilte olarak kullanılmasının uygun olmadığı belirtilmiştir. Ancak, yapılan çalışmada modifiye edilmiş uçucu küllerin geosentetik şilte üretiminde kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca bentonit üzerinde yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinde Türk Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği ve Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) sınır değerlerinden daha düşük geçirimsizlik değerlerini verdiği görülmüştür. Burada sunulan çalışmada, numune hazırlama, deney koşullarının belirlenmesi, deneyin yürütülmesi ve sonuçlandırılması ile ilgili detaylı bilgi sunulmaktadır.

2017, 110 sayfa

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, yüzey aktif madde, bentonit, sıkıştırılmış şilte, geosentetik şilte, hidrolik iletkenlik, SEM analizi

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF USABILITY OF COMPACTED LINERS OBTAINED BY MODIFIED FLY ASH IN SOLID WASTE LANDFILL

Mutlu ŞİMŞEK

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Geotechnical Science

Supervisor: Assoc. Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK

Solid waste landfills are important engineering structures for protection of wastes, decrease of environmental pollution, and especially prevention of soil and water pollution. In this context, the purpose of the engineer who designed the plant is to carry out adequate and healthy waste storage at an affordable cost, while for the environment the aim is not to cause pollution to the plant. The leachate and groundwater to prevent the liquid waste from solid waste, most of the bottom of the storage area is possible by being comprised of a liner material. Due to their low permeability properties, the main materials used in solid waste storage areas are geosynthetic clay liner and compacted clay liner. Fly ash, which is a thermal power plant waste, is used in the construction of impermeable liners to evaluate the waste and produce desired impermeable liners. In this study, it was investigated the usability of C class fly ash impervious liner modified with surfactant. After the studies published in the related literature have been examined and evaluated, consistency limits, composition and hydraulic conductivity tests have been carried out in the laboratory. Also modified fly ash and used fly ash were imaged using SEM. The study was carried out on fly ash and bentonite prepared by modifying different concentrations (10%, 15%, 20%) of the C class fly ash, C fly ash with different surface active materials (SLES, LABSA). As a result of the tests conducted, it has been pointed out that it is not suitable to use as a compressed liner in solid waste disposal sites because the hydraulic conductivity values of the fly ash and modified fly ash are higher than the Turkish Solid Waste Control Regulation and US Environmental Protection Agency (USEPA) limit values. However, it has been shown that the modified fly ash can be used in the production of geosynthetic liner. Furthermore, in the hydraulic conductivity tests on bentonite, the permeability coefficient was found to be less than the Turkish Solid Waste Control Regulation and US Environmental Protection Agency (USEPA) limit values. The study presented here provides detailed information on sample preparation, determination of test conditions, execution and finalization of experiments. The study presented here provides detailed information on sample preparation, determination of test conditions, execution and finalization of experiments.

2017, 110 pages

Keywords: Fly ash, surfactant, bentonite, compacted liners, geosynthetic liners, hydraulic conductivity, SEM analysis

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Geoteknik alanındaki bu çalışmam sürecinde değerli bilgilerini, fikirlerini, tecrübesini paylaşan, herhangi bir mühendislik problemine karşı üretilmesi gereken çözümler için farklı bakış açıları kazandıran, yönlendiren ve yeni ufuklar açan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK'e, Sayın Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU hocama ve Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI hocama ilgi ve zahmetlerinden dolayı teşekkür ederim. Her zaman ve her konuda beni yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme ve dostlarıma şükranlarımı sunarım.

Mutlu ŞİMŞEK

Eylül, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Kaynak Özetleri.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER	10
2.1. Katı Atık Depolama Alanları	10
2.1.1. Katı atıkların sınıflandırılması.....	10
2.1.2. Düzenli depolama tesisleri	11
2.1.3. Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması	12
2.1.4. Katı atıkların düzenli depolanma aşamaları	12
2.1.4.a. Atık depoları için yer tespit edilmesi.....	13
2.1.4.b. Geçirimsiz malzeme serilmesi.....	15
2.1.4.c. Düzenli depolama tesislerinde toprak ve suların korunması için sızıntı suyu toplama ve uzaklaştırma sistemleri.....	16
2.1.4.d. Düzenli depolama tesislerinde depo gazı kontrolü.....	17
2.1.4.e. Depo sahasının kapatılması ve sosyal saha haline getirilmesi	18
2.1.5. Düzenli depolama tesislerinin avantajları ve dezavantajları	19
2.2. Katı Atık Depolarında Kullanılan Şilteler	20
2.2.1. Doğal şilteler	22
2.2.2. Geosentetik kil şilteler (GCL)	26
2.2.3. Sentetik Şilteler	33
2.2.4. Geokompozitler	38
2.3. Uçucu Küller	40
2.3.1. Uçucu külün fiziksel özellikleri	41

2.3.2. Uçucu külün sınıflandırılması	41
2.3.3. Uçucu külün kullanım alanları	42
2.4. Yüzey Aktif Maddeler.....	43
2.4.1. Yüzey aktif madde çeşitleri	45
2.4.2. Çözeltilerin yüzey gerilimi	45
2.4.3. Adezyon ve kohezyon	47
2.5. Bentonit	48
3. MATERYAL ve YÖNTEM	50
3.1. Materyal.....	50
3.1.1. Afşin – Elbistan Termik Santralı C sınıfı uçucu küller	50
3.1.2. Kullanılan yüzey aktif maddeler	51
3.2. Yöntem	52
3.2.1. Yüzey aktif maddeler ile modifiye edilmiş uçucu kül (MUK) numunelerin elde edilmesi	52
3.2.2. Kompaksiyon deneyleri.....	58
3.2.3. Modifiye edilmiş uçucu külden (MUK) sıkıştırılmış şilte elde edilmesi ve hidrolik iletkenlik deneylerine hazırlanması.....	59
3.2.4. İçerisinde modifiye edilmiş uçucu külün (MUK) bulunduğu geosentetik şiltelerin laboratuvarında simüle edilerek hidrolik iletkenlik deneylerine hazırlanması	65
3.2.5. Kıvam limitleri deneyleri	66
3.2.6. Hidrolik iletkenlik deneyleri	68
3.2.7. SEM görüntüleme.....	72
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	74
4.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları	74
4.2. Kompaksiyon Deney Sonuçları.....	82
4.3. Hidrolik İletkenlik Deney Sonuçları	86
4.4. Malzeme Miktarının Etkisi.....	88
4.6. SEM Görüntüleme Sonuçları	89
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	97
EKLER.....	101

EK 1.	101
EK 2.....	105
ÖZGEÇMİŞ	111



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Numunenin Kesit Alanı
a	Şeffaf Boru Kesit Alanı
h_1	t_1 Zamanındaki Su Yüksekliği
h_2	t_2 Zamanındaki Su Yüksekliği
I_p	Plastisite İndisi
i	Hidrolik Eğim
k	Hidrolik İletkenlik
L	Suyun Zemin İçinde Aktığı Zemin Boyu
ML	Düşük Plastisiteli Silt
w_L	Likit Limit
w_{opt}	Optimum Su Muhtevası
w_P	Plastik Limit
γ_k	Kuru Birim Hacim Ağırlığı
$\gamma_{k_{min}}$	Minimum Kuru Birim Ağırlığı
Δh	Hidrolik Yük Farkı

Kısaltmalar

CCL	Sıkıştırılmış Kil Şilte
DAYTAM	Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
GCL	Geosentetik Kil Şilte
GM	Geomembran
GT	Geotekstil
LABSA	Lineer Alkil Benzen Sülfonik Asit
MSW	Belediye Katı Atık
MUK	Modifiye Edilmiş Uçucu Kül

SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLES	Sodium Lauryl Ether Sulphate
UK	Uçucu Kül
USEPA	Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atıkların sınıflandırılması.....	10
Şekil 2.2. Mersin büyükşehir belediyesi katı atık düzenli depolama alanı	11
Şekil 2.3. Katı atık yönetimi aşamaları	12
Şekil 2.4. Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması	12
Şekil 2.5. Düzenli Depolama Tesisinin Kesiti	13
Şekil 2.6. Düzenli depolama sahasının hazırlanması	15
Şekil 2.7. Geomembran serilmesi	16
Şekil 2.8. Drenaj tabakasının oluşturulması	17
Şekil 2.9. Gaz depolama tankları	17
Şekil 2.10. Yüzey geçirimsizliği tip kesiti	19
Şekil 2.11. Düzenli depolama tesisinin sosyal saha haline getirilmesi.....	19
Şekil 2.12. Şiltelerin sınıflandırılması	22
Şekil 2.13. Katı atık depo alanında uygulanan sıkıştırılmış kil şilte.....	25
Şekil 2.14. Geosentetik kil şilte	27
Şekil 2.15. Geosentetik kil şiltelerin genel yapısı.....	28
Şekil 2.16. Geosentetik kil şiltenin katı atık depolarında uygulaması	29
Şekil 2.17. Geosentetik kil şiltenin serilmesi.....	31
Şekil 2.18. Geomembran serilmesi ve kaynak işlemi	34
Şekil 2.19. Geotekstil.....	35
Şekil 2.20. Düzenli depolama lotları geotekstil serilmesi.....	35
Şekil 2.21. Değişik geonet çeşitleri.....	36
Şekil 2.22. Geonet saha uygulaması	37
Şekil 2.23. Geogrid uygulaması.....	38
Şekil 2.24. Muhtelif geokompozit örnekleri	39
Şekil 2.25. Çeşitli renkteki uçucu küller.....	40
Şekil 2.26. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli	43
Şekil 2.27. Uçucu külün yol stabilizasyonunda kullanılması	43
Şekil 2.28. Sembolik olarak bir yüzey aktif madde	44
Şekil 2.29. Sulu bir çözeltide yüzey aktif madde davranışı	44

Şekil 2.30. Yüzey aktif madde çeşitleri	45
Şekil 2.31. Yüzey gerilimi	46
Şekil 2.32. Doğadan yüzey gerilimine örnekler.....	46
Şekil 2.33. Adezyon ve kohezyon kavramları ve örnekleri.....	47
Şekil 2.34. Dünya rezervinin yüzde 20'si Türkiye'de bulunan bir çeşit kil olan bentonit madeni	48
Şekil 3.1. Kullanılan uçucu kül numunesi	50
Şekil 3.2. Modifiye edilmiş uçucu külün elde edilmesi.....	53
Şekil 3.3. İçerisine sıcaklığı ayarlanmış 3 lt su ilave edilen karıştırma kabının ısıtıcı üzerinde mekanik karıştırıcıda 1500 devir/dakikada karıştırılması.....	54
Şekil 3.4. Suyun içerisine uçucu külün ilave edilmesi ve sıcaklığın kontrol edilmesi ...	55
Şekil 3.5. Karışıma 24 gr NaOH eklenmesi.....	56
Şekil 3.6. %15 LABSA ile malzeme üretimi için tartılan 180 gr LABSA ve %20 SLES ile malzeme üretimi için tartılan 240 gr SLES	56
Şekil 3.7. Üretilen malzemenin filtre edilmesi	57
Şekil 3.8. Malzemenin filtre edildikten sonra karıştırılarak 50°C etüve konulması	58
Şekil 3.9. Kuruyan malzemenin elenmesi.....	58
Şekil 3.10. Hidrolik iletkenlik kalıplarında çakıllar ve kırma taşlarla belirli bir yükseklik oluşturulması	61
Şekil 3.11. Hidrolik iletkenlik deney kalıplarında belirli bir yükseklik oluşturulduktan sonra yukarıda kalan mesafenin kumpas ile ölçülmesi	61
Şekil 3.12. Üretilen sıkıştırılmış şilte türüne göre malzemenin karıştırılması	62
Şekil 3.13. Malzemenin geçirimsizlik kalıbına yerleştirilmesi	63
Şekil 3.14. Yerleştirilen malzemenin etrafına şeffaf silikon çekilmesi ve filtre kâğıdı, poroz taşı, tekrar filtre kâğıdı konularak kalıp kapağının kapatılması	63
Şekil 3.15. Hidrolik iletkenlik deney sonunda kalıptan çıkarılan sıkıştırılmış şilte görüntüsü.....	64
Şekil 3.16. 40 no'lu elekten (0,425 mm) numunenin elenmesi ve numunenin su ile homojen olarak karıştırılması.....	66
Şekil 3.17. Hazırlanan numunenin metal deney kaba sıkıca ve içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirilmesi	66

Şekil 3.18. Koniye serbest bırakan düğmeye 5 ± 1 saniye süreyle basılarak koninin zemin içerisine batmasına izin verilmesi ve süre sonunda son mikrometre okumasının (koninin batma miktarı, mm) yapılması	67
Şekil 3.19. Modifiye edilen uçucu kül numunelerinin, yuvarlanarak çapları yaklaşık 3 mm olan zemin çubukları haline getirilememesi	68
Şekil 3.20. Optimum su muhtevasında hazırlanan numunenin kompaksiyon kalıbına yerleştirilmesi	70
Şekil 3.21. Deneylerimizde kullanılan hidrolik iletkenlik deney düzeneği	70
Şekil 3.22. Şeffaf boru üst sınır noktasına kadar su ile doldurulması.....	71
Şekil 3.23. Numunenin havasının alınması.....	71
Şekil 3.24. Deney okumalarının kararlı akım sağlandıktan sonra farklı aralıklarda yapılması	72
Şekil 3.25. Taramalı Elektron Mikroskobunun yapısı	73
Şekil 4.1. Uçucu külün batma miktarı- su muhtevası ilişkisi	75
Şekil 4.2. UK + %10 LABSA için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi.....	76
Şekil 4.3. UK + %15 LABSA için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi.....	77
Şekil 4.4. UK + %20 LABSA için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi.....	78
Şekil 4.5. UK + %20 SLES için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi	79
Şekil 4.6. Likit limitin LABSA yüzdesine bağlı olarak değişimi	80
Şekil 4.7. Bentonit için batma miktarı-su muhtevası ilişkisi	81
Şekil 4.8. Uçucu külün standart kompaksiyon eğrisi.....	83
Şekil 4.9. %10 LABSA ile modifiye edilen uçucu külün standart kompaksiyon eğrisi	83
Şekil 4.10. %15 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi	84
Şekil 4.11. %20 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait kompaksiyon eğrisi	84
Şekil 4.12. %20 SLES ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi	85
Şekil 4.13. Bentonit kiline ait standart kompaksiyon eğrisi	86
Şekil 4.14. Modifiye edilmiş uçucu külün hidrolik iletkenlik değerlerinin malzeme dağılımına bağlı olarak değişimi	88
Şekil 4.15. Katkısız uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü	90

Şekil 4.16. SLES ve LABSA ile modifiye edilen uçucu kül numunelerinin SEM görüntüleri	90
Şekil 4.17. Katkısız uçucu kül numunesinin daha ayrıntılı SEM görüntüsü	91
Şekil 4.18. %10 LABSA ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü.....	92
Şekil 4.19. %15 LABSA ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü.....	92
Şekil 4.20. %20 LABSA ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü.....	93
Şekil 4.21. %20 SLES ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü.....	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Geosentetik ve sıkıştırılmış kil şilteler arasındaki farklar	32
Çizelge 2.2. Uçucu ve taban küllerinin fiziksel özellikleri	41
Çizelge 2.3. Uçucu külün sınıflandırılması.....	41
Çizelge 3.1. UK'lerin kimyasal kompozisyonları.....	50
Çizelge 3.2. UK'lerin mineralojik yapısı	51
Çizelge 3.3. SLES ve LABSA' nın formülü ve yüzey aktif madde tipleri.....	52
Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan yüzey aktif madde miktarları.....	53
Çizelge 3.5. Malzeme miktarı ve malzeme türüne göre kullanılan su miktarları	59
Çizelge 3.6. Sıkıştırılmış şilte üretiminde, 10 mm kalınlık ve 10,2 cm çap için gerekli olan malzeme miktarları	60
Çizelge 3.7. Hidrolik iletkenlik deneyi için hazırlanan sıkıştırılmış şilte numuneleri....	64
Çizelge 3.8. Hidrolik iletkenlik deneyi için hazırlanan geosentetik şilte numuneler	65
Çizelge 4.1. Uçucu kül için düşen koni penetrasyon deney sonuçları.....	74
Çizelge 4.2. UK + %10 LABSA için düşen koni penetrasyon deney sonuçları.....	75
Çizelge 4.3. UK + %15 LABSA için düşen koni penetrasyon deney sonuçları.....	76
Çizelge 4.4. UK + %20 LABSA için düşen koni penetrasyon deney sonuçları.....	77
Çizelge 4.5. UK +%20 SLES için düşen koni penetrasyon deney sonuçları.....	78
Çizelge 4.6. UK ve MUK' ların likit limit deney sonuçları.....	79
Çizelge 4.7. Bentonit için düşen koni penetrasyon deney sonuçları.....	81
Çizelge 4.8. Kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri	82
Çizelge 4.9. Sıkıştırılmış şilte için hidrolik iletkenlik deney sonuçları	87

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Endüstri ve sanayinin artmasıyla birlikte çevreye bırakılan atıklar artmakta ve bu atıkların bertarafı/depolanması büyük bir sorun oluşturmaktadır. Günümüzde atıklardan kurtulmanın en fazla tercih edilen yöntemlerinden biri de, doğal alanlara atık depoları oluşturmaktır. Atık depolama alanlarında karşılaşılan en büyük ve tehlikeli problemlerin başında ise; atıkların, kendi aralarındaki etkileşiminden dolayı oluşan, tehlikeli, zehirli maddeler ve ağır metallerden oluşan sızıntı suları gelmektedir. Bu sızıntılar doğal zemine sızmakta ve yer altı suyuna karışmaktadır. Bu durum, insan ve diğer canlıların sağlığını çok büyük risk altına almaktadır.

Katı atık depolama alanlarında sızıntı sularının yeraltına sızmasının engellenmesi için, geçirimsizliği 10^{-6} cm/sn'den (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği sınır değeri) ve 10^{-7} cm/sn'den (USEPA sınır değeri) daha düşük olan geosentetik kil şilteler (GCL) veya sıkıştırılmış kil şilteler (CCL) kullanılmaktadır. Atık depolama alanı temel bileşenlerinden olan geçirimsiz tabakanın inşasında sıkıştırılmış killerin kullanılması oldukça yaygın bir uygulamadır. Atık depo sahalarında sıkıştırılmış kil şilteler 60 cm ile 100 cm kalınlığında ve hidrolik iletkenliği 10^{-6} cm/sn ile 10^{-7} cm/sn'den daha düşük olan malzemelerden oluşturulmalıdır (Anonymous 2005).

Sıkıştırılmış kil şilteler genellikle 60 cm ile 100 cm kalınlığında olduğu göz önüne alınırsa, büyük miktarda kilin nakliyesi, serilmesi ve sıkıştırılması gerekmektedir. Bu, oldukça zahmetli ve pahalı bir işlemdir. Ayrıca tüm alan boyunca homojen bir sıkıştırma sağlamak zordur ve yapım sonrası aşamada çevresel etkilerden dolayı sıkıştırılmış killerde görülen çatlakların hidrolik iletkenliğini artırıcı etkisi bulunur. Bu nedenle son yıllarda bu uygulama yerini sıkıştırılmış killere göre, hidrolik iletkenlik değerleri daha düşük, uygulaması pratik, işçilik maliyetleri daha az olan geosentetik kil şiltelere bırakmıştır. Fakat bu malzemeler Türkiye 'de daha sonra kullanılmaya

başlandığından, Türkiye’de atık depolama alanları genellikle sıkıştırılmış killer ile inşa edilmiştir. GCL’lerin ülkemizde de başarı ile üretilmeye başlanmasıyla, bu malzemenin kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır. GCL’ler geçirimsizliğin gerekli olduğu hallerde kullanıldığından bu malzemelerin hidrolik iletkenliklerinin laboratuvarı belirlenmesi çok önemlidir. Bu gibi kompozit yapıdaki malzemelerin deneyleri yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Özellikle numunenin hazırlanmasında ve geçirimsizlik hücresine yerleştirilmesinde deneyi yapan kişinin etkisi büyüktür. Bu nedenle hidrolik iletkenlik deneylerinde birbirinden çok farklı sonuçların elde edilmesi mümkündür (Ören vd 2015).

1990’lı yıllardan itibaren birçok araştırmacı sıkıştırılmış/geosentetik kil şilteler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Son 10 yılda, GCL ‘ler düşük maliyete oranla çok düşük hidrolik iletkenliğe ($k_w < 10^{-10}$ m/s) sahip olmaları nedeniyle, katı atık depolama tesislerinin alt kaplamalarında ya da örtü sistemlerinde CCL’ye bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Çevresel uygulamalar dışında, GCL’ler ulaşım tesislerinde ve geoteknik uygulamalarda yol kazalarındaki kimyasalların sızıntısını ve kaza eseri taşmalardan dolayı yüzey altı zemin tabakalarının kirlenmesini azaltma gibi çevresel koruma bariyeri olarak da kullanılır (Bouazza 2001).

Ayrıca, yapılan çalışmaların büyük kısmı şilte sistemlerinde kullanılan bentonit killerinin sızıntı suyunu temsilen kimyasal çözeltilerden etkilenmesi üzerine yoğunlaşmıştır (Gleason *et al.* 1997; Weimin *et al.* 2014).

Yüksek lisans çalışmamızda, endüstriyel bir atık olan uçucu külün yüzey aktif maddeler ile modifiye edilerek katı atık depolama alanı için geçirimsiz şilte üretilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile aynı zamanda endüstriyel bir atık olan uçucu külün değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma konusuyla ilgili literatürde yayınlanmış çalışmalar incelenerek değerlendirilmiş, Afşin-Elbistan Termik Santralinden alınan C sınıfı uçucu küller, farklı yüzey aktif maddelerin (SLES (Sodium Lauryl Ether Sulphate), LABSA (Lineer Alkil Benzen Sülfonik Asit)) farklı konsantrasyonlarında (%10, %15, %20) hazırlanmış numuneler, katkısız uçucu kül ve bentonit üzerinde

laboratuvarda kıvam limitleri, kompaksiyon ve hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan numunelerin Taramalı Elektron Mikroskopu ile oluşan yapılar görüntülenmiştir.

1.2. Kaynak Özetleri

Literatürde uçucu küllerin ve killerin modifiye edilerek farklı uygulamalarda ve katı atık depolarındaki geçirimsiz şilte sistemlerinde kullanımını araştıran, ayrıca katı atık depo alanlarında kullanılan CCL (Sıkıştırılmış Kil Şilte) ve GCL (Geosentetik Kil Şilte) ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Yüksek lisans çalışmamızın konusuna paralel olarak yapılan araştırmaların literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

Chu *et al.* (1993) tarafından yapılan çalışmada, kile toplam %15-20 oranlarında uçucu kül ve cüruf ilave ederek hidrolik iletkenlik deneylerinde 10^{-8} cm/s değerlerini elde etmişlerdir. Ayrıca yaptıkları çalışmada, kil içerisine %20 oranında uçucu kül katılması ile $1,8 \cdot 10^{-7}$ cm/s hidrolik iletkenlik değerini elde etmişlerdir.

Maher *et al.* (1993) tarafından yapılan bu çalışmada, arıtma çamuru ile uçucu kül karışımlarının hidrolik iletkenliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bazı karışımların 10^{-7} cm/s hidrolik iletkenlik değerini verdiği bulunmuştur.

Petrov *et al.* (1997) çalışmalarında, GCL (iğneleme tekniği ile birleştirilmiş) üzerinde şişme ve hidrolik iletkenlik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Statik yanal gerilmelerdeki ve iğne delme işlemindeki artış hem GCL' nin şişmesini azaltmış hem de daha düşük GCL hacim boşluk oranları dolayısıyla da daha düşük hidrolik iletkenlik değerleri vermiştir. Ayrıca hacim boşluk oranı ve hidrolik iletkenlik arasında iyi tanımlanmış doğrusal –logaritma ilişkisi bulunmuştur.

Brian *et al.* (2000) çalışmalarında, iki farklı F sınıfı uçucu küle farklı yüzdelerde C sınıfı uçucu kül, kum, taban külü ve bentonit ekleyerek laboratuvar ve arazi deneyleri

yapmışlardır. Kumun çeşitli miktarları ve %20-%30 C sınıfı uçucu külün eklenmesi ile hidrolik iletkenliğin azaltıldığı belirtilmiştir.

Bouazza (2001) tarafından yapılan çalışmada geosentetik kil şilteler araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada, geotekstil destekli GCL'lerin hidrolik performansının, malzeme içindeki bentonit dağılımına (kütle/alan) bağlı olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca GCL'lerin, düşük hidrolik iletkenliklerini korurken, bozulmaya ve tehlikeye dayanabileceğini belirtmiştir. Son 10 yılda GCL'ye olan rağbetin arttığını ve örtü sistemlerinde CCL'nin yerini aldığını, suya karşı çok düşük hidrolik iletkenliğe sahip olduğunu ve uzun süre hidrolik bütünlüğünü koruduğunu ifade etmiştir. Ek olarak da, GCL'nin hizmet ömrünün, hidrolik bütünlükle ilgili olduğu kadar uzun süre kimyasal uyumluluk problemleri, delme, bölgesel (sınırlı) bentonit kaybı, bentonit incilmesi, borulanma olayı ve iyon değişimi ile de ilgili olduğunu belirtmiştir. GCL'lerin kullanımının, önemli düşey oturmaların öngörülmesi ve gerilmenin daha düşük olduğu ve esnekliğin yüksek seviyede olması gereken depolama alanlarının kapatılması için uygun ve tavsiye edilebilir olduğunu söylemiştir.

Çokça *et al.* (2004) çalışmalarında, düşük hidrolik iletkenliğe sahip bir şilte malzemesi olarak uçucu kül, lastik (kauçuk) ve bentonitin kullanılmasının uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. C sınıfı uçucu küle (%90), bentonit (%7) ve lastik atığı(%3) karıştırarak yaptıkları hidrolik iletkenlik deneylerinde 10^{-11} - 10^{-12} cm/s aralığında hidrolik iletkenlik değerleri elde etmişler ve lastik atığı yüzdesinin artmasıyla ve bentonit yüzdesinin azalmasıyla hidrolik iletkenliğin arttığını ifade etmişlerdir.

Qian *et al.* (2005) çalışmalarında, taneler üzerinde anyonik iyon tutucu yüzey aktif maddenin yüzey iyileştirmesi ile MS_w (Belediye Katı Atıkları) uçucu külünün iyileştirilmesi ve yeniden kullanılması üzerindeki bir çalışmayı açıklamışlardır. İki tür yüzey aktif madde (ED3A ve MAP) kullanılmışlardır. Daha yüksek aktif oranı ve daha düşük viskozitede daha iyi iyileştirmenin olacağı belirtmişlerdir.

Banerjee *et al.* (2005) çalışmalarında, deniz suyunu kirleten ayrıışmış petrol (WOCS) ve ham petrol sızıntılarını uzaklaştırmak için, yüzey aktif madde ile modifiye edilmiş bir termik santral atığı olan uçucu külün kullanılma potansiyelini araştırmışlardır. Bir atık malzemesi olan uçucu külün iyileştirildikten sonra elde edilen katyonik bir yüzey aktif madde ile modifiye edilen uçucu külün (HDTMA –FA) dökülen petrol için emici bir malzeme olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Madalena *et al.* (2006) bu makalede, Geomembran (GM) kusurları nedeniyle GCL’ler içeren kompozit şiltelerden geçen akış hızı üzerinde yapılan deneyleri anlatmışlardır. GCL’lerin ön hidrasyonunun etkisi ya önceden hidratlanmamış numuneler ya da ön hidrasyonu olmuş numuneler (%100 su muhtevası uygulanarak) üzerinde akış hızını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, bir dairesel delik ile bir GM, bir GCL ve bir GCL ve CCL’den oluşan kompozit şilteler üç ölçekte yapılan deneylerde taklit edilmiş ve akış hızı ölçülmüştür. Bu deneylerle, GCL ‘lerin ön hidrasyonunun etkisini, yanal gerilme artışını, GM kusurları nedeniyle kompozit şiltelerden geçen akış hızı üzerindeki düşüşünü incelenmiş, ayrıca farklı ölçekteki deneylerle kıyaslanmış ve böylece küçük ölçekli deneylerden elde edilen sonuçların arazi koşullarına ekstrapolasyonunun fizibilitesi kontrol edilmiştir. Sonuç olarak, akış hızının, GM’nin üzerindeki hidrolik düşünün artışıyla arttığı, GM ve GCL arasındaki arayüzün geçirgenliğinin eşit olmadığı ve dolayısıyla GM’deki kusurlardan dolayı kompozit şiltelerden geçen akış hızını tahmin etmek için mevcut analitik çözümlerin bazı sınırlamaları ortaya koyduğu belirtilmiştir.

Güney *et al.* (2008) bu çalışmalarında, bir şilte malzemesi olarak Sepiyolit’in fizibilitesini araştırmışlardır. Biri sepiyolit mineralince zengin, diğeri kaolinit mineralince zengin olan iki kile ve onların değişik oranlarda karışımları üzerinde geomekanik, hidrolik ve çevresel deneyler yapmışlardır. Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan kil karışımlarının katı atık depolarında bir şilte malzemesi olarak kullanılabilen, potansiyellerinin düzeltilebildiği, iyi geomekanik, hidrolik ve metal emme özelliklerini sağladığını göstermiştir.

Naik *et al.* (2009) çalışmalarında, uçucu kül bulamacının akış özellikleri üzerinde, katyonik bir yüzey aktif maddenin rolünü değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, su bazlı kalmaları için uçucu kül parçalarına yardımcı olan yüzey aktif maddelerin eğiliminin olumlu olabileceğini göstermiştir. Bulamaç süspansiyonuna yüzey aktif maddenin eklenmesinin, uçucu kül parçalarını daha iyi ıslatmaya yardım eden sıvının yüzey gerilimini çok düşürdüğü yüzey gerilim ölçümlerinde gözlemlenmiştir.

Akbulut *et al.* (2010) tarafından yapılan çalışmada, doğal bir kil, katyonik bir yüzey aktif madde (CTAB) ile modifiye edilerek bir organokil geliştirilmiş ve organokilin geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçlarından, organokillerin dane birim hacim ağırlıklarının doğal kile nazaran azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, organokil numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve konsolidasyonsuz drenajsız kohezyonları azalmıştır.

Stepniewski *et al.* (2011) çalışmalarında, zemin hidrolik iletkenliğinin tane boyutu dağılımı, özgül yüzey alana, boşluk oranı, şişme ve iyon değişim kapasitesine bağlı olduğunu deneysel olarak ispatlamışlardır. Shan and Lai'nin (2002) yılında yapmış olduğu çalışmadan bahsedilmiştir. Shan and Lai, iki farklı (Bentomat ST ve Claymax 200R) GCL'nin hidrolik iletkenliğini test etmişlerdir. Deney yapılan GCL 'ler yaklaşık 6 mm kalınlığında, ikisi de bentonit içerikli, $3,6 \text{ kg/m}^2$ miktarında bentonit içermektedirler. Farklı geçirimsizlik sıvıları ile (musluk suyu, damıtık su, katı atık deposu çöp suyu) yapılan deneyde, geçirimsizlik değerinin yaklaşık 10^{-11} cm/s bulunduğu belirtilmiştir. Ayrıca Palmer *et al.* (2000) katı atık depolarında kullanmak için farklı malzemelerle elde edilen şilteler ve geçirimsizlik değerlerine değinmiştir. Örneğin; C sınıfı uçucu kül'e %28 kum ve taban külü eklenerek %18 su muhtevası ile sıkıştırmış ve $k = 3,1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ değeri elde etmiştir. Bouazza (2002), farklı Sodyum- Bentonit ya da Kalsiyum- Bentonit bir ya da daha fazla geosentetik tabakalarla bağlamış (GCL) ve $k = 2 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ değerleri bulunmuştur bir GCL numunesinin hidrolik iletkenlik değeri belirlemiştir. Lorenzetti *et al.* (2005), Claymax (iki polipropilen geotekstil arasına bentonit tabakası yerleştirilmiş) ve GCL, HDTMA bentonit ya da üst geotekstil yerine püskürtülen BTEA bentonit ile modifiye edilmiş üç numune için sırasıyla, $k = 6,8$

$\times 10^{-11}$ m/s, $k = 1,2 \times 10^{-10}$ m/s (%30 BTEA Bentonit), $k = 3,4 \times 10^{-11}$ m/s (%30 HDTMA Bentonit) değerlerini bulmuştur.

Zabielska-Adamska (2011), sadece uçucu kül üzerinde farklı enerjilerde yaptığı çalışmada, enerji miktarının artması ile hidrolik iletkenliğin azalacağını ifade etmiştir ancak en düşük değerler bile 1×10^{-7} cm/s ‘den daha büyük elde edilmiştir.

Sivapullaiah *et al.* (2010), iki farklı uçucu küle kireç ve alçı taşı ekleyerek hidrolik iletkenliklerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda kirecin tek başına hidrolik iletkenliği artırdığı ancak alçı taşıyla birlikte 10^{-7} cm/s seviyelerinde değerler aldığını tespit etmişlerdir.

Akbulut *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada, yüzey aktif madde ile hazırlanan killerin (SMC) temas açlarına ve kıvam limitlerine yüzey aktif maddenin etkisi araştırılmıştır. Yedi yüzey aktif madde kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, SMC kıvam limitlerinin doğal kile kıyasla önemli derecede değiştiği belirtilmiştir. Zemin sınıfını gösteren plastisite indisi ve likit limit (PI-LL) değerleri, anyonik, katyonik ve dipolar iyon yüzey aktif madde yüzdesi arttığı zaman A hattına yaklaştığını gözlemlemişlerdir. Ancak, katyonik SMC, USCS sınıflandırmasına göre zemin sınıfını CH’dan MH’a dönüştürmüştür. Katyonik ve anyonik yüzey aktif maddeler ile iyileştirilmiş kil doğal kilden, sırasıyla daha yüksek ve daha düşük temas açıları vermiştir. Bu sonuç, anyonik yüzey aktif maddelerin zayıf ıslatma açısı ile numuneye hidrofobik (suyu iten) bir yapı kazandırdığını gösterir. Geçirimsiz şilte üretiminde malzeme üretimi için bu önemli bir bilgidir.

Akbulut *et al.* (2012) çalışmalarında, yüzey aktif maddeler ile iyileştirilmiş killerin konsolidasyon özelliklerinin araştırılması çalışmalarında, Erzurum - Oltu ilçesinden getirilen doğal smektit kilin ,%5 %10 %15 %20 oranlarında dört farklı yüzey aktif maddeler (LABSA, SLES, CTAC, QEFA) ile modifiye edilerek organokil geliştirmeyi ve bu organokillerin konsolidasyon özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. Kile ait bazı geoteknik özelliklerin belirlenmesi için dane birim hacim ağırlığı, kıvam limitleri,

zemin sınıfını belirlemek için elek analizi ve ıslak analiz deneyleri yapılmış ve numunelerin SEM görüntüleri elde edilmiştir. SEM görüntüleri de deneysel çalışmaları destekler şekilde organokillerde boşluk miktarının arttığını göstermişlerdir. Bu sebeple, organokillerin kullanıldığı uygulamalarda oturma miktarının azalabileceği sonucuna varılmışlardır.

Fatholahzadeh (2013) çalışmasında, belirli konsantrasyonlarda (%0,5 %1 %2) dört farklı biyopolimer (arabik gam, guar gam, keçiyoynuzu gam, zantan gam) kullanarak F1 (Çayırhan Termik Santrali Uçucu Külü) ve F2 (Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külü) tipi uçucu küllerini iyileştirmiş ve geçirimsiz şilte olarak kullanılabilirliği araştırmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde, kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve hidrolik iletkenlik deneyleri yapmıştır. Bunlara ek olarak yüksek plastisiteli bir kil uçucu küllere %10 oranında ilave edilerek bu deneyler bu numune üzerinde de yapmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, tüm biyopolimer çeşitleri, F1 ve F2 tipi uçucu küllerinin likit limit değerlerini artırdığını belirtmiştir. Likit limit değerlerinin artması, şişmenin arttığını ve bunun sonucunda geçirimsizliğin azaldığını göstermiştir. En düşük hidrolik iletkenlik değeri, $k \leq 1,61 \times 10^{-6}$ cm/sn %1 zantan gam ile hazırlanmış F2 uçucu külden elde etmiştir. Ayrıca kil katkılı numunelerin hidrolik iletkenliklerini kil katkısı olmayan numunelere (zantan gam katkılı hariç) kıyasla daha düşük değerler verdiği belirtilmiştir.

Gerolymas and Yasar (2014) çalışmalarında, GM (Geomembran) ve CCL'nin (Sıkıştırılmış Kil Şilte) katı atık depolarındaki sızıntı performanslarını araştırmışlardır. Şilte sistemi için dört ülkenin minimum tasarım şartları kıyaslanmış ve değişken analizler şilte sisteminin sızıntı davranışını etkileyen ana parametreyi araştırmak için yapılmıştır. Çin, Amerika, Almanya ve Japonyadaki minimum tasarım şilte sistemleri arasında Japonya şartnamelerine göre tasarlanan şilte sistemi en kötü davranışa sahip iken, Almanya şartnamelerine göre minimum tasarlanan şilte sistemi sızıntıya karşı en iyi davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Şilte sisteminin sızıntı davranışını kontrol etmenin yolunun, CCL kalınlığının artmasının yanı sıra hidrolik iletkenlik, GM kusurları ve hidrolik yüksekliğinin düşürülmesiyle olabileceğini ifade etmişlerdir.

Van Der Merwe *et al.* (2014) çalışmalarında, SLS yüzey aktif maddesi ile iyileştirilen Güney Afrika kömür uçucu külünün yüzey özelliklerinin ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlamışlardır. İncelenen modifiye edilmiş uçucu külün kimyasal bileşimi kapsamlı olarak değişmemesine rağmen, fiziksel özelliklerinde önemli değişiklikler gözlemlemişlerdir. SLS ile modifiye edilmiş uçucu külün yüzeyinde topaklanma oluşumu SEM ve TEM ile doğrulamışlardır. Islanabilirlik deneyleri, iyileştirilen uçucu kül örneğinin yüzey özelliklerinde bir değişiklikten sonra, hidrofilik uçucu kül yüzeyinin hidrofobik hale geldiği belirtmişlerdir.

Visa *et al.* (2014) çalışmalarında, geliştirilmiş atık su iyileştirilmesinde ağır metal ve boyaların uzaklaştırılması için uçucu külün hidrotermal şekilde modifiye edilmesini araştırmışlardır. Sonuç olarak, uçucu kül ile modifiye edilmiş yeni geliştirilen nano etkinen madde bileşimin, boya ve ağır metallerin eş zamanlı uzaklaştırılması için etkili ve düşük maliyetli bir emici madde olarak kullanabildiğini ifade etmişlerdir.

Ören vd (2015), geosentetik kil şiltelerin hidrolik iletkenlik deneylerinin nasıl yapılacağını ve sonuçların nasıl değerlendirileceği konusunu çalışmışlardır. Bu çalışma kapsamında dört farklı GCL (1 ithal ve 3 yerli) damıtık ve deiyonize su ve çeşme suyu ile süzdürülerek hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur. En düşük hidrolik iletkenlik değerine, kil içeriği az (%25), likit limit değeri yüksek (1163), plastisite indeksi yüksek, en yüksek özgül yüzey alana (m^2/g) sahip, fazla miktarda suyu bünyesine hapsedebilen, süngerimsi bir yapıya sahip, yerli bir ürün olan GCL-4 sahip olmuştur. ($7,1 \times 10^{-10}$ cm/s (damıtık su) ve 1×10^{-9} cm/s (çeşme suyu)). Deneylerde ölçülen k değerinin, GCL tipinden kısmen bağımsız olduğu ve birbirine çok yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada, GCL 'lerin hidrolik iletkenlik değerleri üzerinde, bentonitin fiziksel özelliklerinden ziyade kimyasal ve minerolojik özelliklerinin etkisi olduğu belirtilmiştir. GCL 'lerin k değerlerinin bentonitlerin özgül yüzey alanları ile gayet uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Likit limitin (veya plastisite indisi) ise tek başına hidrolik iletkenlik değerleri üzerinde etkisinin oldukça sınırlı olduğu sonucu çıkarılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Katı Atık Depolama Alanları

Dünya nüfusunun artması ve gelişen teknolojik ilerlemeler küresel kirlilik problemine sebep olmaktadır. Atıkların yol açtığı çevre kirliliğini kontrol altına almak amacıyla atıkların, uygun depolama sahalarında muhafaza edilmesi gerekmektedir. Katı atıklar ya açık alanlara rastgele yığılarak ya da düzenli depolama tesisleri ile bertaraf edilmektedir.

2.1.1. Katı atıkların sınıflandırılması

Katı atık, akıcı olabilecek kadar sıvı içermeyen, insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi gereken ve işe yaramayan maddelere denir (Anonim 2011a). Atıklar kaynaklarına göre Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dört şekilde sınıflandırılabilir.

Evsel Atık	İnşaat Atıkları	Tehlikeli Atık	Tıbbi Atık
• Ev Atığı • Ticari Atık • İdari Atık • Pazar Atığı • İri Atık • Geri Kazanılabılır Atık	• İnşaat ve Yıkıntı Atıkları • Hafriyat Toprağı • Cadde Süprüntüleri • Kül ve Cürüf • Arıtma Çamuru	• Tehlikeli Evsel Atık • Küçük Orta Ölçekli İşletme Atığı • Tehlikeli Sanayi Atığı • Tehlikeli Olmayan Sanayi Atığı	• Bulaşıcı Atık • Patolojik Atık • Diğer Tehlikeli Atıklar • Evsel Atık • Geri Kazanılabılır Atık

Şekil 2.1. Atıkların sınıflandırılması

2.1.2. Düzenli depolama tesisleri

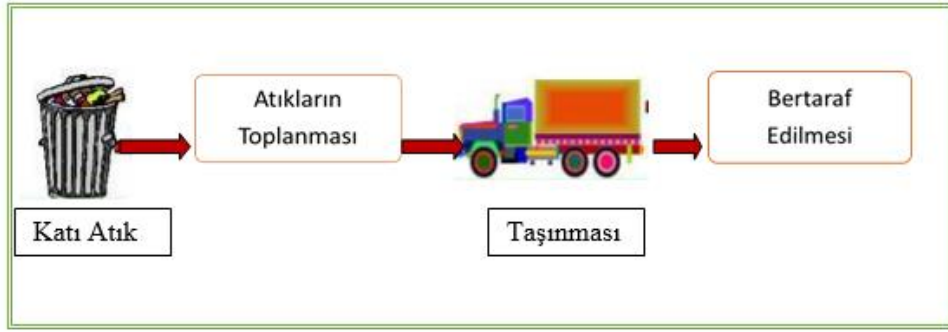
Düzenli depolama, katı atıkların sızdırmazlığı sağlanmış büyük alanlara dökülmesi, sıkıştırılması ve üzerinin örtülerek doğal biyolojik reaktör hâline getirilmesi olarak tanımlanabilir (Anonim 2011b). Şekil 2.2’de Mersin büyükşehir belediyesi katı atık düzenli depolama alanı görülmektedir.



Şekil 2.2. Mersin büyükşehir belediyesi katı atık düzenli depolama alanı (Anonim 2017a)

Katı atık yönetimi,

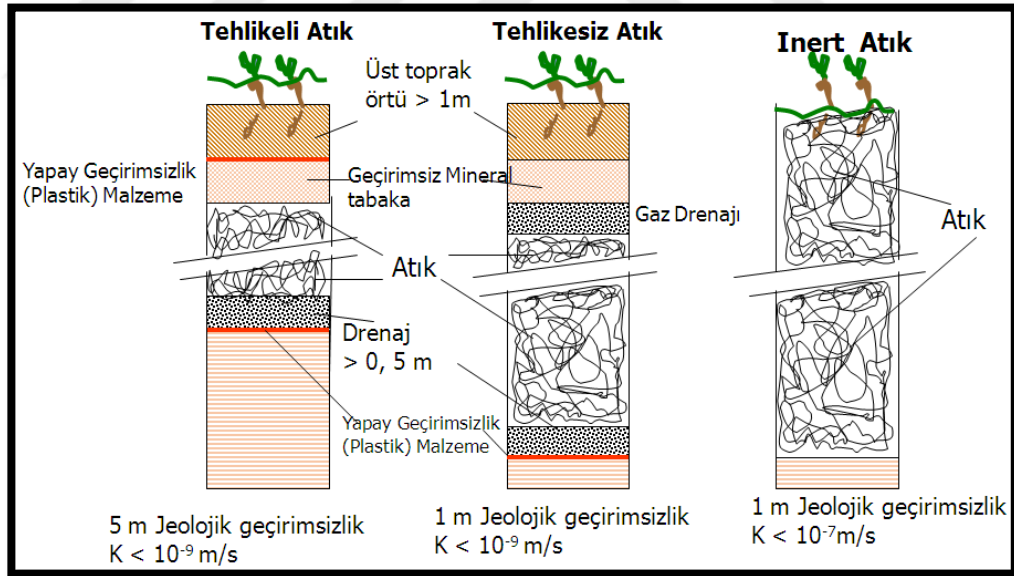
- Önleme ve kaynağında azaltmayı,
- Toplam, nakliye ve özelliğine göre ayrıştırmayı,
- Geri dönüşümü, kompostlamayı,
- Enerji gayesiyle kullanımı,
- Düzenli depolama şeklinde bertarafı,
- Bertaraf işlemleri sonrası kontrolü içerir. Şekil 2.3’de katı atık yönetimi aşamaları gösterilmiştir (Anonim 2011a).



Şekil 2.3. Katı atık yönetimi aşamaları

2.1.3. Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması

Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması (I.Sınıf, II.Sınıf, III.Sınıf) ve atıkların sınıflarına göre taban sisteminin geçirimsizlik özellikleri Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması (Anonim 2017b)

2.1.4. Katı atıkların düzenli depolanma aşamaları

Katı atıkların düzenli depolanma aşamaları altı başlık altında incelenir.

1. Atık depoları için yer tespit edilmesi
2. Tasarım öncesi yapılacak çalışmalar
3. Geçirimsiz malzeme serilmesi
4. Depolama tesislerinde su ile toprağın muhafaza edilmesi için sızıntı suyu yönetimi ve su kontrolü
5. Düzenli depolama tesislerinde depo gazı yönetimi
6. Depo sahasının kapatılması ve sosyal saha haline getirilmesi

Şekil 2.5’de düzenli depolama tesisinin kesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Düzenli Depolama Tesisinin Kesiti (Anonim 2017c)

2.1.4.a. Atık depoları için yer tespit edilmesi

Katı atık depolama tesisinin kurulmasında yer seçimine dikkat etmek elzem bir konudur. Yönetmeliklere uygun bir şekilde tasarlanmalı ve optimum çözümün elde

edilebildiği sahalarda yapılmalıdır. Yer tespiti için önemli olan durumlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Yerleşim merkezi ve ulaşım durumu,
- Meteoroloji ile ilgili olan durum,
- Yeryüzü engebelerini ve aşınma ile ilgili gelişimleri inceleme durumu,
- Yer bilimi ve yer altı sularının araştırılmasını inceleyen yer bilimi ile ilgili durum,
- Geoteknik inceleme (Yılmaz 2007).

Uygun depolama alanı:

- Depolanacak atık kaynağına uzak olmamalıdır.
- Ulaşım imkânı uygun olmalıdır.
- Düşük eğimli alana ve taşkın yatağına tesis edilmemelidir.
- Depolama alanı sağlam malzeme ile temellendirilmelidir.
- Hidrolojik özellikleri iyi olmalıdır (Daniel and Wu 1993).

Düzenli depolama sahalarının oluşturulması için seçilmesi gereken uygun alanlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Tuzlu, kurak, düşük verimli, çorak ve susuz alanlar
- Çok az ürün veren topraklar
- Su içermeyen, terkedilmiş; maden, taş, kum, çakıl ve kil ocakları
- Yamaçlar
- Büyük ulaşım yollarının bağlantı yerleri arasında kalan ve kullanılamayan boş alanlar
- Akarsuların taşkın sahaları dışındaki yerler
- Konutlara en az 1 km, hava alanlarına en az 3 km mesafede bulunan yerler
- Yer altı suyunu kirlenme açısından tehdit etmeyen yerlerdir (Anonim 2016a).

Düzenli depolama sahasının hazırlanmasına ait fotoğraflar Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Düzenli depolama sahasının hazırlanması (Anonim 2011a)

2.1.4.b. Geçirimsiz malzeme serilmesi

Katı atıklardan kaynaklanan sızıntı suları ve sıvı atıkların yeraltına sızmalarını önlemek, en çok depo alanlarının tabanının geçirimsiz tabakalardan oluşması ile mümkündür. Böylece sızıntı suyu miktarının artması engellenmiş olur (Anonim 2016a). Katı atıklardan oluşan sızıntı sularının yeraltı sularına sızmasını ve toprakla temasını önlemek için tabanın geçirimsizliği geomembran ile sağlanmaktadır. Şekil 2.7’de geçirimsiz örtü olarak geomembran serilme aşaması gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Geomembran serilmesi (Anonim 2016a)

Katı atıkların depolarında, geçirimsizliğin sağlanması için kullanılan geomembranın delinmemesi ve zarar görmemesi için geotekstil ile yüzey kaplanmaktadır (Anonim 2016b).

2.1.4.c. Düzenli depolama tesislerinde toprak ve suların korunması için sızıntı suyu toplama ve uzaklaştırma sistemleri

Katı atık depolama tesisinin verimli çalışabilmesi için birçok konuyu önemsemek gerekir. Bu tesisin verimli çalışması, atık deposu içinde oluşabilecek sızıntı suyunun toplanmasına ve uygun şekilde dağıtacak ya da uzaklaştıracak sistemin bulunmasına ve çalışmasına bağlıdır (Akbulut 2002). Ayrıca kapatma sonrasında bu korumanın sağlanması için üst örtü yapılır. I. ve II. sınıf düzenli depolama tesisleri için sahanın özellikleri ve hava şartları dikkate alınarak; depolama sahasına yağıştan kaynaklanan yüzeysel suların girmesini önlemek ve çöp suyu toplama sistemine yağış suyu girmesini en az seviyeye düşürmek gerekir (Anonim 2014a). Şekil 2.8’de drenaj tabakasının oluşturulması gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Drenaj tabakasının oluşturulması (Anonim 2016b)

2.1.4.d. Düzenli depolama tesislerinde depo gazı kontrolü

Bu sistemler, depo gazının atmosfere atılması ve atık içerisinde hareketini kontrol etmek amacıyla tasarlanır. Oluşan gaz zarar veren bileşimlerin tehlikesini en aza düşürmek için kontrol edilerek yakılır veya enerji üretimi gayesiyle kullanılır (Anonim 2016a). Şekil 2.9’da gaz depolama tankları görülmektedir.



Şekil 2.9. Gaz depolama tankları (Anonim 2017d)

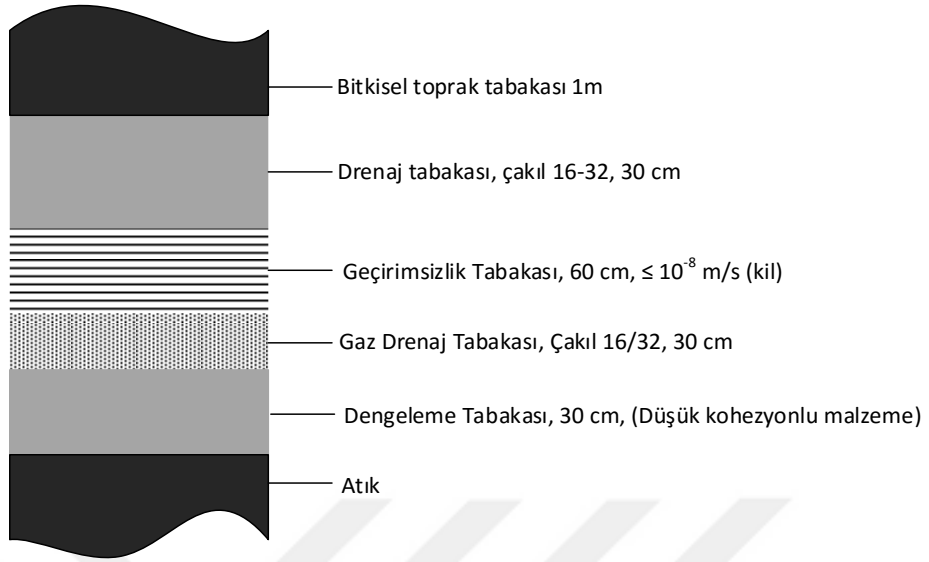
2.1.4.e. Depo sahasının kapatılması ve sosyal saha haline getirilmesi

Depolama işleminin tamamlanmasından sonra, çöp dökümüne kapatılacak sahaları, atmosfer, yağış ve yüzey sularından ayırmak amacıyla tekniğine uygun olarak kapatmak gerekir. Bu yüzden öncelikli olarak depolama sahası üst yüzeyine şekil verilerek geçirimsiz hale getirilir (Anonim 2016c).

Aşağıda verilen sıra takip edilerek depolama alanı kapatılır:

- Sıkıştırılmış ve düzeltilmiş atığın üzerine 50 cm kalınlığında homojen bir toprak dengeleme tabakası yerleştirilir.
- Bu tabaka üzerine 60 cm ve permeabilitesi 1×10^{-8} m/sn olan sıkıştırılmış mineral (kil) geçirimsizlik tabakası serilir. Ayrıca kil tabakası ile beraber ya da sadece 2 mm kalınlığında HDPE folye de kullanılır.
- Geçirimsiz tabakanın üzerine 30 cm kalınlığında ve permeabilitesi 1×10^{-3} m/sn olan genellikle kireç oranı düşük çakıl kullanılarak drenaj tabakası oluşturulur. Bu tabaka ile, yağış ve sulama suları çöp gövdesine ulaşmadan tahliye edilir.
- Daha sonra ise tabakanın üzerine, ekilecek ve dikilecek bitkilerin kök derinliğine göre en az 1 metre kalınlığında tarım toprağı serilir. Depo kütesine düşen yağmurun kısa sürede sahayı terk etmesi için bu tabakanın eğiminin %3'den büyük olması gerekir.
- Saha proje ömrünü tamamladıktan sonra son örtü olarak adlandırılan geçirimsiz tabaka yapılarak kapatılır. Deponun görünüşü doğal çevre şartlarına uygun, üzerinde bitkilerin yetişebileceği ve kamuoyunun kullanabileceği sosyal alan haline getirilerek tasarlanmalıdır. Düzenli depolama yöntemi yeterli ve uygun araziler bulunduğu müddetçe en ekonomik ve tercih edilen yöntemdir (Keleş 2015). Depolama alanlarının yanına veya üzerine asla bina ya da tesis kurulamaz (Anonim 2016c).

Şekil 2.10'da yüzey geçirimsizliği tip kesiti görülmektedir. Şekil 2.11'de düzenli depolama tesisinin sosyal saha haline getirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Yüzey geçirimsizliği tip kesiti



Şekil 2.11. Düzenli depolama tesisinin sosyal saha haline getirilmesi (Anonim 2016a).

2.1.5. Düzenli depolama tesislerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajları:

- Katı atıklar rüzgârla etrafa yayılıp çevreye kötü koku yaymazlar.

- Hastalık taşıyıcı ve zararlı canlıların çoğalma ve barınma ortamı olmaz.
 - Sızıntı suları ve depo gazları (metan, karbondioksit) kontrol altına alınır.
 - Diğer katı atık imha teknolojilerinin aksine, mutlak sonuç veren bir uzaklaştırma yöntemidir.
 - Uygun arazi bulunması halinde en ekonomik ve uygulaması kolay bir seçenektir.
 - Ön yatırımı nispeten en az olan yöntemdir.
 - Son imha yöntemidir. Her türlü çöp için uygulanabilir.
 - Esnek bir yöntemdir. Katı atık miktarına göre kapasite kolaylıkla arttırılabilir.
- Kullanılıp kapatılan araziden insanların boş zamanlarında, eğlence ve spor amacı ile gönüllü olarak katıldıkları faaliyetler yapmak amacıyla istifade edilebilir (Anonim 2011a).

Dezavantajları:

- Kalabalık yörelerde, ekonomik taşıma mesafesi içinde uygun yer bulmak güçtür.
- Yerleşim yerlerine yakın depo alanları için, halkın muhalefeti ile karşılaşılabilir.
- Tamamlanmış depo alanlarında göçük ve yerel çökmeler olabileceğinden devamlı bakımı gereklidir.
- Sıvı ve gaz sızıntıları kontrol edilmezse tehlikeli durumlar oluşabilir (Anonim 2011a).

2.2. Katı Atık Depolarında Kullanılan Şilteler

Çevre kirliliğine neden olan kentsel atıkların sıhhi depolarında ıslah edilerek depolanması özellikle gelişmekte olan ülkelerde önemli bir sorundur. Katı atık depolarına zemin ve su kirliliğinin önlenmesi veya minimize edilmesi geliştirilmiş taban ve örtü şilte sistemlerinin kullanılması ile mümkündür. Depolarda kullanılacak farklı tip ve şekilde tasarlanan şilte sistemlerinin depolanan atık tipi ve çevre şartlarına bağlı olarak kullanılması, şilte sistemlerinin geçirgenliği, özellikle doğal şilte sistemlerinin kalınlığı önemlidir (Sağlam vd 1999).

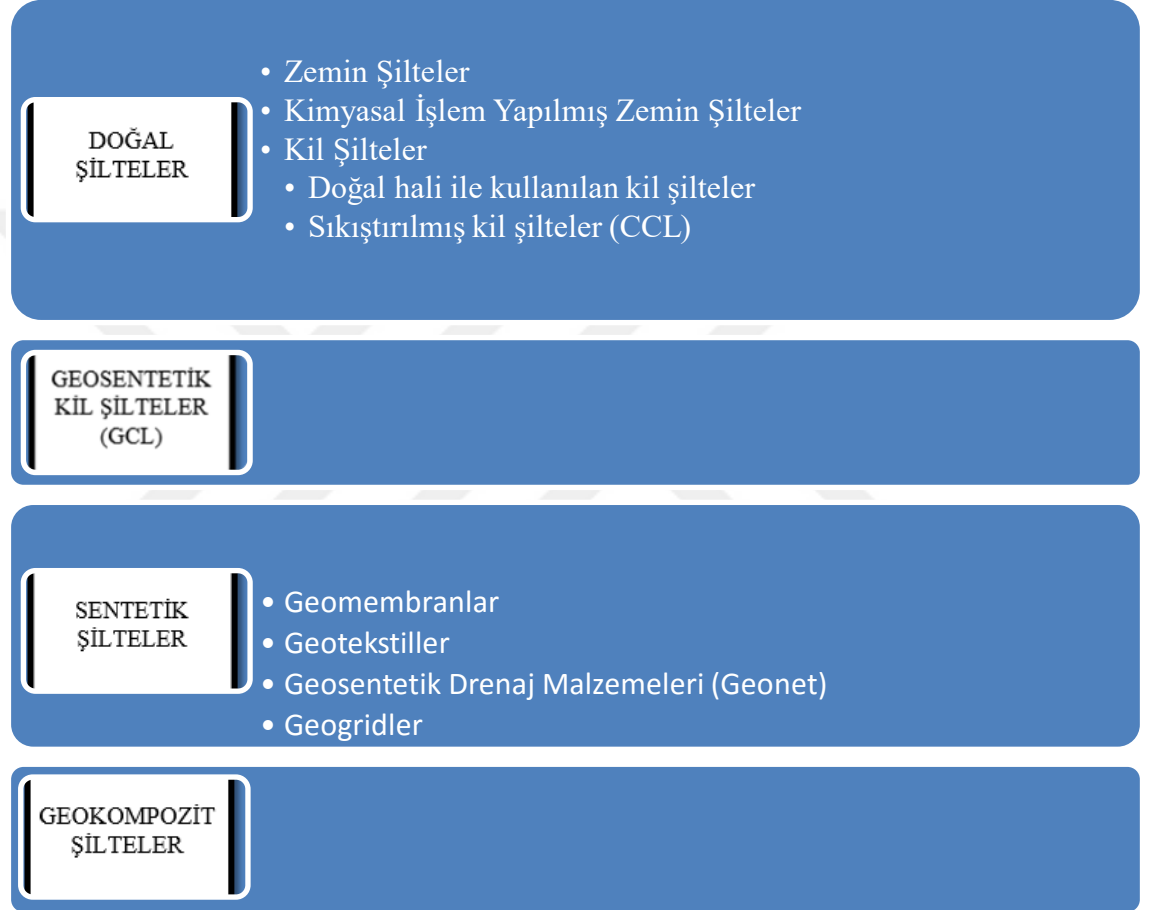
Depolama sahasının geçirimsiz zemin tabakası, yer altı sularının kirlenmesini engellediği ve tüm sızıntı sularının toplanıp arıtma tesisine gönderilmesine izin verdiği için, düzenli depolama teknolojisinde çok önemli bir yeri vardır. Geçirimsiz zemin tabakası, alandaki durumların uygun olması halinde, doğal jeolojik engelden yararlanılarak tasarlanabilir. Doğal zemin uygun değilse uygun malzemeler dışarıdan alınarak geçirimsiz zemin tabakası oluşturulmalıdır. Geçirimsiz zemin tabakasının özellikleri, mevcut yönetmeliklere ve teknik standartlara uygun olmalıdır (Erdal 2006).

Atık depolarında kullanılan farklı şilte sistemleri ve bunların tasarlanması geoteknik açıdan önemlidir. Şilte sistemleri doğal, sentetik ve geokompozit malzemelerden oluşmaktadır. Bu şiltelerin büyük bir kısmı özellikle doğal şilteler şantiyede üretilirken geokompozit şilteler fabrikada imal edilmektedir. Bu farklı şilte sistemlerinin yapımı başlıca zeminin geoteknik, hidrolojik, topoğrafik ve depremselliği yanında atık tip ve özelliklerine göre değerlendirilmelidir. Bu nedenle bir atık depolama ünitesinde kullanılacak şilte tasarımına karar vermeden önce depo sahasının yukarıda sıralanan geoteknik özelliklerinin belirlenmesi deponun yapımı ve daha sonraki dönemlerde kullanımı açısından önemlidir. Depo alanı olarak kullanılacak yerlerde katı atık türlerinin de önemi vardır (Sağlamer vd 1999).

Seçilen şilte sistemlerinin tipi, bölge jeolojisinin genişliğine, depo bölgesinin çevresel şartlarına ve atık tipine bağlı olacaktır. Örneğin, zemin suyunun düşük olduğu bölgelerde, az sıkıştırılmış kil şilteler yeterli olabilir. Sızıntı ve gaz hareketini kontrol etmek için gerekli bölgelerde zemin koruma tabakası ve uygun bir drenaja sahip bir geomembran ve bir kil şiltesinden oluşan karma bir şilte sistemine ihtiyaç duyulabilir. Bu nedenle şilte sistemlerinin seçiminde depo zemininin geoteknik özellikleri yanında atık tipide göz önünde tutularak ihtiyaca göre depolarda tek veya çift tabakalı şilteler, doğal veya kompozit malzemelerden oluşan şilteler yapılabilir (Sağlamer vd 1999).

Katı atıklardan kaynaklanan sızıntı suları ve sıvı atıkların yeraltına sızmalarını önlemek için depo alanlarının tabanının geçirimsiz tabakalardan oluşturulur.

Katı atık depolarına zemin ve su kirliliğinin önlenmesi veya minimize edilmesi, geliştirilmiş taban ve örtü şilte sistemlerinin kullanılmasıyla mümkündür. Katı atık depolarında farklı tip ve tasarımlara sahip şiltelerin sınıflandırılması Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Şiltelerin sınıflandırılması

2.2.1. Doğal şilteler

Doğal şilteler, sentetik şiltelerin kullanılmadığı veya ihtiyaç görülmediği yerlerde genelde geçirimsiz kil tabakalarının sıkıştırılmasından veya mevcut zeminin iyileştirilmesinden elde edilen şilte sistemlerini içermektedir (Sağlamer vd 1999).

Zemin şilteler: Uygun şartlar altında doğal bir şekilde oluşmuş olan ince daneli zeminler şilte kullanımında uygun zeminlerdir. Burada anahtar parametre zeminin permeabilitesidir. Zeminin permeabilitesi malzemenin içeriği ile değişir. $10^{-5} - 10^{-7}$ cm/sn değerleri arasında olmalıdır. Arazide ince daneli zeminde şilteler için iki ayrı durum gözlenebilir. Birincisi önerilen atık deposunun altındaki zemin koruyucusu bir engel tabakası oluşturacak şekilde permeabiliteye sahip olmasıdır. İkincisi arazi üzerindeki veya yanındaki zemin eğer uygun geoteknik özelliklere sahip değilse, zemin uygunca kaldırılarak karıştırılır ve homojen hale getirilir, önceden hazırlanmış bölgeye taşınır ve yerleştirilerek sıkıştırılır. Çalışma sırasında yapı işlerine olumsuz etki etmemesi için zemin genelde optimum su muhtevsından hafif nemli tutulur (Sağlam vd 1999).

Kimyasal işlem yapılmış zemin şilteler: Zeminlerde kimyasalların eklenmesi zeminlerin özelliklerini önemli bir şekilde değiştirebilir. Genelde düşük maliyetli kimyasallar kullanıldığında kimyasal işlem sadece etkinlik maliyetine mal olur. Kromlu selüloz, sodyum tuzu(kalsiyum killerini oldukça geçirimsiz yapan çok sayıda endüstriden elde edilen tuzlar) ve polifosfatların farklı tiplerini içeren kimyasallar bu gruptandır. Zeminler aynı zamanda püskürtmeyle de kimyasal işleme tabi tutulabilirler, polivinil alkol gibi kimyasallar ve asfalt emülsiyon kullanılabilir. Bu malzemeler zemin boşluklarına sızarlar veya zemin yüzeyinde sert bir kabuk oluşturarak zeminin permeabilitesini düşürürler. Pratik yapı problemlerinde zeminlerin kimyasal işleme tabi tutulması genellikle zor uygulamalardır. Özellikle üniform bir iş yapmak zordur ve yüksek geçirgenliğe sahip kötü işlenmiş bölgelerin garantisi yoktur. Ayrıca kimyasal işlemlerin sürekli değişen tiplerinin nasıl bir kalitede olduğu belgelenememektedir (Sağlam vd 1999).

Kil şilteler: Kil minerali 0,002 mm'den daha küçük dane çapına sahiptir. Ayrıca kristal bir yapıda olup doğal bir malzemedir. Bu özellikleri ile optimum su muhtevsında sıkıştırılan killer, çok küçük geçirimsizlik değerlerine sahip olabilmektir. Şiltenin 'kil' olarak isimlendirilmesinin önemli nedeni, şiltelerden beklenen geçirimsizlik işlevini düşük geçirimsizlik özellikleri sebebi ile kilin üstlenmesidir (Akbulut 2002).

Atıkların depolanması sebebiyle oluşan sızıntı suyunu denetleyebilmek için depolama alanının taban geçirimsizliği geoteknik açıdan çok önemli bir etkindir. Killi topraklar kolay bulunduğu için geçirimsizlik tabakası uygulanmasını çok kullanılır hale getirmektedir. Killi toprakların geçirgenliğini etkileyen parametreler, sıkıştırma yöntemi, sıkıştırma enerjisi, kilin nem içeriği, kilin topak büyüklüğü ve toprak katmanları arasındaki bağın derecesidir. Killi toprakların çatlaklarını kendi kendilerine kapatma özelliği ve taban örtüsünün tüm kalınlığı boyunca delinmesinin zor oluşu kil taban örtüsünün avantajı olarak sıralanabilir. Geçirimsizlik tabakası 30 cm kalınlığında iki kademe şeklinde sıkıştırılmalıdır. Serilen kil tabakasından sonra gelen tabaka ile birleştirilmelidir. Ezici ve çığneyiciler kullanılarak sızıntı suyu yolları oluşumu engellenir. Taban zemini vibratörlü silindirler yardımı ile sıkıştırma yapılarak, olası oturmalar minimize edilmelidir (Anonim 2017e).

Kil şilteleri,

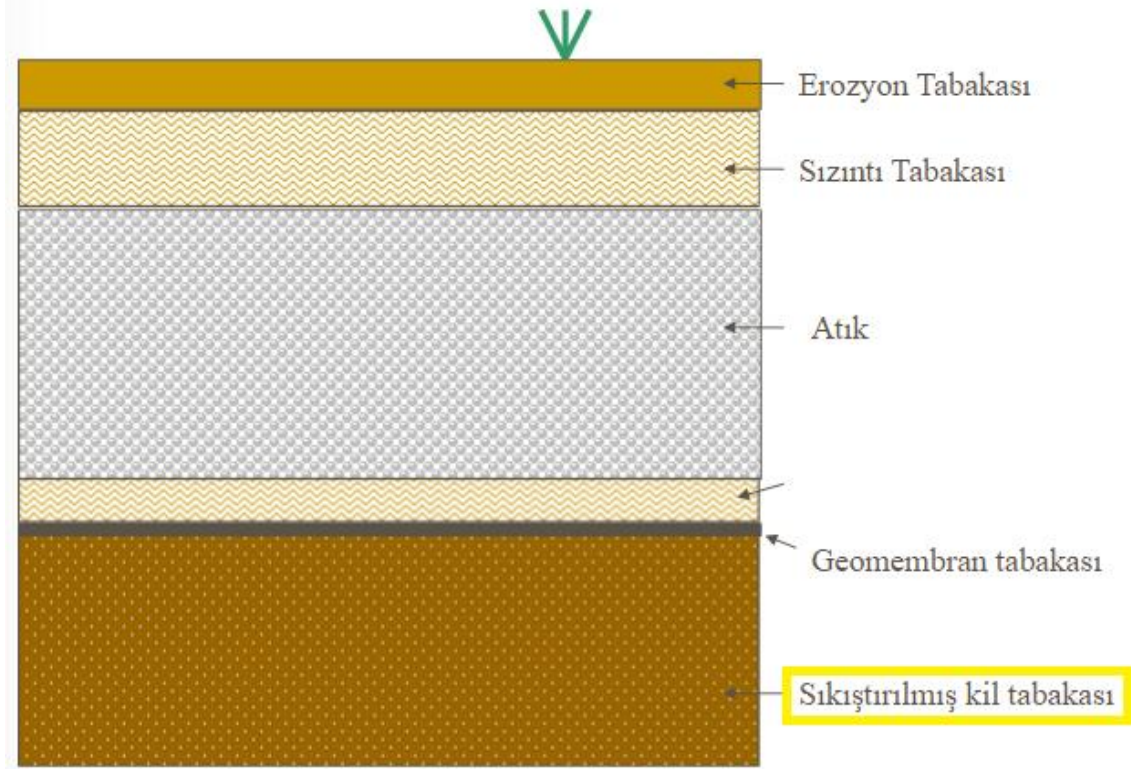
- Doğal hali ile kullanılan kil şilteler
- Sıkıştırılmış kil şilteler

olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür (Akbulut 2002).

Doğal hali ile kullanılan kil şilteler: Doğal kil şilteler, kil bakımından zengin olup, doğal yapıları ile düşük geçirimli malzemelerden oluşmaktadır. Atıklar, doğal şiltenin içine veya üzerine yerleştirilmektedir. Bu şilteler normalde önemli miktarda kil mineraline ve 1×10^{-6} cm/sn – 1×10^{-7} cm/s'ye eşit ya da küçük geçirimliliğe sahip olmaktadır. Günümüzde, tasarlanmış şilteleri kapsayan kısımlar olarak kullanılmaktadır. Eski uygulamalarda atık depolama tesisinde yalnızca doğal şilteler bulunmaktaydı. Doğal şiltelerin sürekli ortamlar olmamaları, kırıklık düzlemleri, girişimler, çatlaklar ve boşluklar içermeleri sebebiyle, geçirimliliklerini homojen tutamamaları, oldukça kritik durumlar meydana getirmektedir. Doğal şiltenin uniformluğunun ve homojenliğinin sürekliliği, yerel ve bölgesel yeraltı suyu hidrolojisi koşullarını içeren bir seri araştırma yapıldıktan sonra değerlendirilmelidir. Doğal

şiltelerin düzenli ve sürekli jeolojik yapıları olduğunu ve geçirimsizliğinin bütün doğrultularda uniformluk gösterdiğini kanıtlamak çok pahalı olmakta ve farklı zorlukları içermektedir. Bu yüzden doğal şiltelerin, katı atık depolama tesislerinden ve diğer atık yığınlarından kaynaklanacak kirliliğin yayılmasını önlemek amacıyla tek başlarına kullanılmaları önerilmemektedir (Esener 2005).

Sıkıştırılmış kil şilteler (CCL): Sıkıştırılmış kil şilteler genelde doğal kil malzemelerden yapılır. Sıkıştırılan kilin geçirgenliği kil mineraline, boşluk yapısına, sıkıştırma anındaki su muhtevasına ve kompaksiyon metoduna bağlı olarak değişmektedir. Bu şilteler, bentonit ya da sentetik polimer gibi işlenmiş prefabrike birimler içermelerine rağmen, birincil olarak doğal malzemeden oluşturulmaktadırlar. Kil şilteler ince tabaka parçaları şeklinde yapılmaktadırlar. Yamaç şevleri, şeve paralel ya da yatay tabakalardan meydana gelmektedirler (Esener 2005). Şekil 2.13’de katı atık depo alanında uygulanan sıkıştırılmış kil şilte gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Katı atık depo alanında uygulanan sıkıştırılmış kil şilte (Anonim 2017f)

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı, evsel katı atık depolama alanlarında sıkıştırılmış kil şiltelerin 1×10^{-7} cm/sn' ye eşit veya düşük geçirimsizlik değerinde ve en az 0,6 m kalınlığında olmasını belirtmiştir (Yılmaz 2007).

Ülkemizde Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde, kullanılan geçirimsiz malzemenin en az 0,6 m kalınlığında, 1.10^{-6} cm/sn'den düşük veya geçirimsizlik değerine sahip olması gerektiği belirtilmiştir (Anonim 2016d).

Sıkıştırma ile 10^{-9} m/sn hidrolik iletkenlik elde etmek için genellikle tavsiye edilen zemin özellikleri;

- İnce malzeme yüzdesi (< 0.075 mm): $\geq \% 30$
- Plastisite indisi: 20-30 arasında olmalıdır (ASTM D 4318).
- Çakıl yüzdesi (5- 50 mm): $\leq \% 20$ olmalıdır (Stepniewski 2011).

İnce malzeme yüzdesi ile $75 \mu\text{m}$ açıklıklı 200 nolu elekten geçen kuru malzeme ağırlığının toplam malzeme ağırlığına oranını belirtmektedir. Çakıl yüzdesi ile $4,76$ mm açıklıklı 4 nolu elekten geçen kuru malzeme ağırlığının toplam malzeme ağırlığına oranı ifade edilmektedir (Yılmaz 2007).

2.2.2. Geosentetik kil şilteler (GCL)

GCL'ler, bir geosentetik tabakaya ya da tabakalara bağlanmış kalsiyum ya da sodyum bentonitin ince bir tabakasından oluşturulur. Geosentetikler, ya geotekstillere ya da geomembranlardır. Geotekstil esaslı GCL'ler, her iki taraftaki geotekstillere içerilen bentonit ile bir yapıştırıcı, iğneleme tekniği ya da dikiş ile bağlanır. Bir iğneleme tekniği işlemi, tüm yapıyı birbirine yapıştırmasına, bentonit ve alt geotekstil aracılığıyla uzanan üst geotekstilden oluşan bazı liflere sebep olur (Bouazza 2001). Bu malzemeler sızdırmazlık için kullanıldığından alt ve üst geotekstil arasına sodyumca zengin bentonit serilme şeklinde yapılır. Na-bentonit, şişme kapasitesi ve yüksek su tutma nedeniyle

GCL'nin düşük geçirirliiliğe sahip olmasını sağlar. Bu nedenle bentonitin mineral yapısının ve fiziko-kimyasal özelliklerinin GCL'nin hidrolik iletkenlik davranışı üzerinde önemli etkisi mevcuttur. Son yıllarda ise Na-bentonit, polimer katkılarla birlikte işlenerek kimyasal etkilere daha dayanıklı GCL'ler üretilmiş olur (Ören vd 2015). Şekil 2.14'de bir geosentetik kil şilte gösterilmiştir.



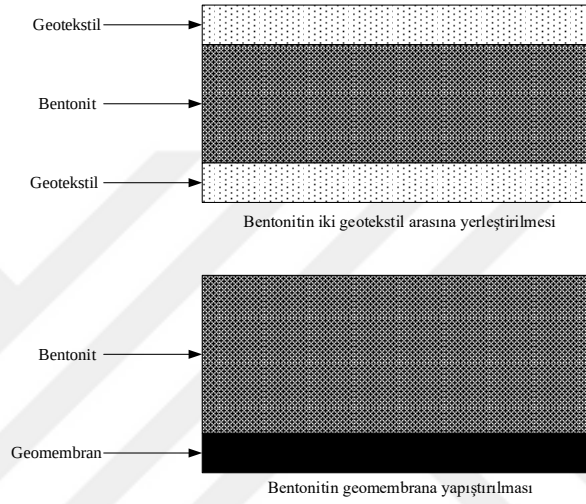
Şekil 2.14. Geosentetik kil şilte (Anonim 2017g)

GCL'ler arasındaki temel farklar, GCL'de kullanılan bentonitin şekli (ör: toz-granüler, sodyum-kalsiyum vs.) ve bentonitin minerolojisi, geotekstil türü (ör: dokunmuş-dokunmamış geotekstil) ya da geomembran eklenmesi ve birleştirme yöntemleridir. GCL'nin başlıca avantajları, kalınlığı, zemin ya da atığın altındaki farklı oturmalara karşı daha iyi esneklik göstermesi, kolay kurulum ve düşük maliyettir (Bouazza 2001).

GCL'lerin hidrolik iletkenlik performansları, çoğu durumda bentonitin hidrolik iletkenliğine bağlıdır. Tek istisna yapım esnasında dikilen bir geomembran içeren GCL'lerdir. Genelde, geotekstil destekli GCL'lerin farklı türlerinin uygulanan yanal gerilmeye bağlı olarak suya karşı laboratuvar hidrolik iletkenlikleri yaklaşık 2×10^{-12} m/s ve 2×10^{-10} m/s arasında değişir. GCL hidrolik iletkenliğindeki azalmayı daha yüksek yanal gerilmelerden kaynaklanan daha düşük boşluk hacmi oranlarına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Daha da önemlisi onlar belirgin bir geçirgen için hidrolik iletkenlik (k)

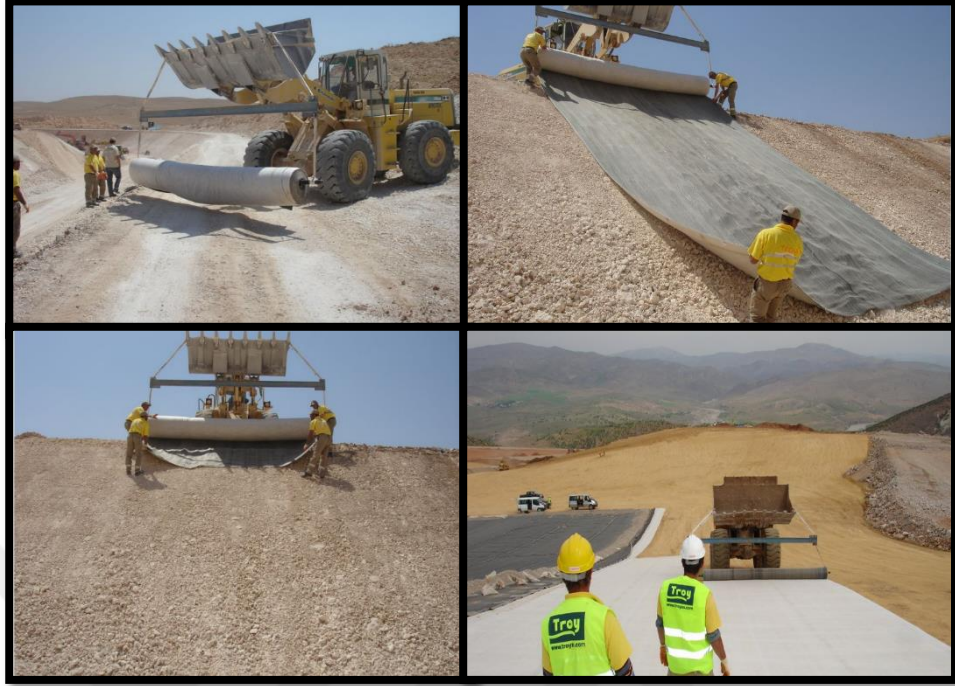
ve boşluk hacmi oranı arasında güçlü bir ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir (Bouazza 2001).

Geosentetik kil şiltelerin üretimi, genelde iki farklı yapıda olabilmektedir. Bu yapılar Şekil 2.15’de gösterilmektedir (Anonymous 2001).



Şekil 2.15. Geosentetik kil şiltelerin genel yapısı

GCI’ler özel metotlarla fabrikalarda tasarlanmaktadır. Depolama alanlarının örtü ve şilte bölümlerinde hidrolik engel tabakası ve ayırma için kullanılmaya başlanmıştır. GCL’ nin yapısı, tek geomembranın bir yüzüne veya iki geotekstil arasına sıkıştırılarak yapılmış kilden (özellikle bentonit) oluşmaktadır (Esener 2005). Şekil 2.16’da geosentetik kil şiltenin katı atık depolarında uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.16. Geosentetik kil şiltenin katı atık depolarında uygulaması (Anonim 2017h)

GCL'lerin avantajları:

- Hızlı kurulum, daha az vasıflı işçi ve düşük maliyet,
- Düzgün bir şekilde kurulduysa suya karşı çok düşük hidrolik iletkenlik,
- Büyük ve farklı oturmalarla karşı dayanıklı,
- Kendini iyileştiren (onaran) mükemmel özellikler,
- Bölgesel zemin uygunluğuna bağlı değil,
- Onarımı kolay,
- Donma – çözülme çevrimlerinin etkilerine karşı dirençli,
- Daha düşük kalınlıktan dolayı daha fazla hava boşluğu olması,
- Arazi hidrolik iletkenlik deneylerinin yapılması gerekli değil,
- Etkili bir gaz bariyeri olması,
- Sıkıştırılabilir alt tabaka üzerindeki jeolojik yükünü azaltmasıdır (Bouazza 2001).

GCL'lerin dezavantajları:

- Hidratlanmış bentonitin düşük kayma mukavemeti (donatısız(desteksiz) GCL'ler için),
- GCL'ler kurulum esnasında veya sonrasında delinebilmesi,
- Yerleştirme sırasında olası bentonit kaybı,
- Düşük nemli bentonitin gazı geçirebilmesi,
- Diğer malzemelerle olan ara yüzlerde potansiyel mukavemet problemleri olması,
- Daha düşük sızıntı suyu azaltma kapasitesi,
- Olası kesme kuvveti kaybı,
- Uygulanan bir normal gerilme altında bentonit kalınlığında bir azalma olması nedeniyle muhtemel uzun süreli yüksek akış,
- Mevcut su kaynakları ile önhidrasyon olmuyorsa, atık ile uyum problemleri nedeniyle muhtemel hidrolik iletkenlik artışı,
- Sıkıştırılmış kil şiltelerine kıyasla atığın daha yüksek yayılım akışı,
- İyon değişimine yatkın olması (sodyum bentonitli GCL'ler için) şeklinde sıralanabilir (Bouazza 2001).

GCL'ler daha çok geçirimsizliğin gerekli olduğu gölet tabanlarında, maden işletmelerinin atık havuzlarında, kanal yataklarında ve birçok alanda kullanılır. Fakat en yaygın kullanım alanı, kirliliği önleyici bariyer görevi görmesi açısından, atık depolama alanlarıdır (Ören vd 2015).

GCL'ler fabrikalarda, 25-60 m uzunluğunda, yaklaşık 4-5 m genişliğinde ince paneller şeklinde üretilmektedir. Bu panellerin metrekaresinde yaklaşık 50 N bentonit kullanılmaktadır. Fabrikada rulo şeklinde sarılan GCL panellerinin, uygulama alanına getirilmesi ve yerine serilmesi ile yapım işlemi tamamlanır (Şekil 2.23). GCL panellerinin birbirine yapışma özelliği bulunmaktadır. Dolayısıyla serilme işlemi hiçbir mekanik bağlantıya ihtiyaç duyulmadan, sadece uç kısımlarda bindirme ile uygulanabilmektedir. Suyun bu aralıklardan sızmaya çalışması halinde bentonit şişerek, üst üste gelen kısımların kapanmasını sağlamaktadır. Bu şişme mekanizmasının sağlıklı

şekilde çalışabilmesi için de, malzemenin önceden ıslanmaması gerekmektedir. Bu yüzden, malzemenin nakliyesi ve istifli sırasında yağıştan korunması ve yerine serildikten sonra da üzerinin hemen kapatılması gerekmektedir (Yılmaz 2007).



Şekil 2.17. Geosentetik kil şiltenin serilmesi (Anonim 2017h)

Sıkıştırılmış kil şiltelere alternatif olarak kullanılırlar. Geosentetik kil şilteler diğer sıkıştırılmış kil şiltelere göre daha esnek oluncaya kadar kendini tutabilir ve yerleştirmesi kolaydır. Düşük geçirimli killerin hazır bulunmadığı yerlerde yapı maliyeti tasarrufu açısından tercih edilmelidir (Akbulut 2002). Aynı zamanda, bunlar yeterli kalite-kontrolünde fabrikada imal edildiği için, arazi yapı kalite-kontrolü maliyetleri sıkıştırılmış kil şiltelerden daha azdır. Kompozit bir malzeme olan GCL, bentonit, geotekstil ve diğer malzemelerin özelliklerine sahiptir. Çizelge 2.1’de geosentetik kil şilteler ve sıkıştırılmış kil şilteler arasındaki farklar gösterilmiştir (Sağlam vd 1999).

Çizelge 2.1. Geosentetik ve sıkıştırılmış kil şilteler arasındaki farklar (Anonymous 1993)

Özellik	Geosentetik Kil Şilteler	Sıkıştırılmış Kil Şilteler
Malzemeler	Bentonit, yapışkanlar, geotekstiller veya geomembranlar	Doğal zeminler ve bentonit
Yapım	Üretilir veya araziye yerleştirilir	Arazide yapılır
Kalınlık	Yaklaşık 10 mm	Yaklaşık 0,5-1 m
Permeabilite	$10^{-10} - 10^{-8}$ cm/sn	$10^{-10} - 10^{-8}$ cm/sn
Yapılma hızı ve kolaylığı	Hızlı, kolay yerleştirilir	Yavaş, yapılması zor
Yapım esnasında su muhtevası	Yeterli derecede kuru, yapım esnasında kurumaz ve Konsolidasyon suyu üretmez	Az miktarda doygun, kuruyabilir ve konsolidasyon suyu üretebilir
Maliyet	Düşük	Yüksek
Deneyim düzeyi	Yenilikler nedeniyle sınırlı	Onlarca yıldır kullanılıyor

GCL, kendini sarmalayan geotekstiller sayesinde hapsolan bentonitin su ile teması sonucunda geçirimsiz bir jel oluşur. Bu süreçte doğal bentonit kuru ağırlığının yaklaşık 16-18 katı kadar genişler ve geçirimsiz bir katman oluşturur. Ortamdan su çekildiğinde ise eski haline geri döner. Bu döngü sürekli tekrarlanır ve malzemenin su yalıtımı özelliklerini etkilemez. Sıkıştırılmış kil tabakası uygulaması ile karşılaştırıldığında büyük maliyet avantajı sağlar. Aynı geçirimsizliğe sahip kil katmanı ile karşılaştırıldığında, 100 -150 kat daha az hacim ile geçirimsizlik işlevini daha iyi yerine getirir (Anonim 2017).

GCL ve CCL'nin nitel bir karşılaştırması yapılmıştır. Çoğu ayırıcı özellik için bir GCL'nin performansı, CCL'ye eşdeğer veya bu CCL performansının üstünde olmalıdır. Yapım konularından, delme direncinde CCL daha iyi özellik gösterirken, yapım hızında yer ve ürüne bağlı olarak GCL daha iyi özellik gösterir. Fiziksel ve mekaniksel konulardan, taşıma kapasitesinde, şev stabilitesinde, erozyonda yer ve ürüne bağlı olarak CCL daha iyi özelliği, toplam oturmada GCL ve CCL aynı özelliği gösterirken, donma – çözünme ve farklı oturmada ise GCL daha iyi özellik göstermektedir (Bouazza 2001).

2.2.3. Sentetik Şilteler

Katı atık depolama alanlarında birçok geosentetik farklı amaçlar için kullanılır. Bu geosentetikler aşağıda sıralanmaktadır:

- a) Geomembranlar
- b) Geotekstiller
- c) Geosentetik Drenaj Malzemeleri (Geonet)
- d) Geogridler (Sağlamer vd 1999)

Farklı zemin ve geoteknik problemlerin çözümünde olduğu gibi katı atık depolarında da geosentetik malzemeler şilte yapımında kullanılmaktadır (Sağlamer vd 1999).

Şilte yapımında kullanılan sentetik malzemeler ve özellikleri genel olarak aşağıda sıralanmıştır:

Geomembranlar: Geomembranlar sıvı ve buhar yalıtımında kullanılan oldukça düşük permeabiliteye sahip fleksibil, polimer levhalardır. Taban/temel şilteleri atık içerisinde oluşan sızıntı suyundan temel zemininin ve zemin suyunun kirlenmemesi için ya da sızıntı suyunun zararlarını azaltmak için atık malzemenin altına konulur. Eğer bir atık deposu üzerinde bina veya başka yapılar yapılacaksa, atık gazı buharlaşmasını önlemek için geomembranlar bina temelini altına konulabilir. Atık depolarının temel ve kaplama sistemlerinde, en çok kullanılan geomembran tipleri polietilen (PE) geomembranlardır. Temel kaplama sistemlerinde yüksek –yoğunluklu polietilen (HDPE) geomembranlarda kullanılmaktadır. Bu malzeme bir dereceye kadar rijit olmasının yanında, genelde iyi fiziksel özelliklere sahiptir ve yerleştirme sırasında geomembranların üzerinde oluşacak büyük gerilmelere dayanabilir. Atık içinde oluşabilecek büyük oturmalar sebebiyle, kaplama sistemlerinde daha fleksibil bir geomembran (HDPE) kullanılabilir. Pek çok benzer özelliklere sahip olan çok düşük yoğunluktaki polietilen (VLDPE) geomembranda genelde bu uygulamalar için uygundur. Atık depolarında geomembranlar tipik olarak düşük geçirimli zeminlere ilave

olarak veya bunların yüzeyinde taban/temel veya kaplama şiltesi şeklinde kullanılır (Sağlamer vd 1999), (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Geomembran serilmesi ve kaynak işlemi (Anonim 2016b)

Katı atıklardan oluşan sızıntı sularının yeraltı sularına sızmasını önlemek ve toprakla temasını önlemek için lot tabanının geçirimsizliği geomembran ile sağlanmaktadır.

Geomembranların hidrolik, çevre, taşıma ve geoteknik alanında kullanımları şu şekilde sıralanabilir:

- Su depoları, yeraltı depolama tankları, su kanalları, çeşitli atık su kanalları, katı atık sahaları için kaplama malzemesi,
- Tünellerin içinde, kaya dolgu barajlarda, kâgir barajlarda geçirimsizliği sağlamak için,
- Dolgulardan gelen kokunun önlenmesinde ,
- Dona hassas zeminlerin kontrolünde,
- Yer üstündeki depolarda sızdırmazlığı sağlanmak amacıyla kullanılır (Bağcı 2007).

Geotekstiller: ASTM, geotekstili “bir inşaat projesi, yapı ya da sistemin parçası olarak zemin, toprak, kaya ya da diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile birlikte kullanılan geçirimli bir tekstil ürünü olarak isimlendirilir. Şekil 2.19’da bir geotekstil örneği görülmektedir. İki çeşit geotekstil anatomisi vardır. Bunlar, örgüsüz geotekstiller ve örgülü geotekstillerdir. Geotekstillerin çok fazla özel kullanım alanı bulunmaktadır.

Filtrasyon, güçlendirme, drenaj, koruma, yalıtım, ayırma geotekstillerin kullanım alanlarında yer almaktadır (Bağcı 2007).



Şekil 2.19. Geotekstil (Anonim 2017i)

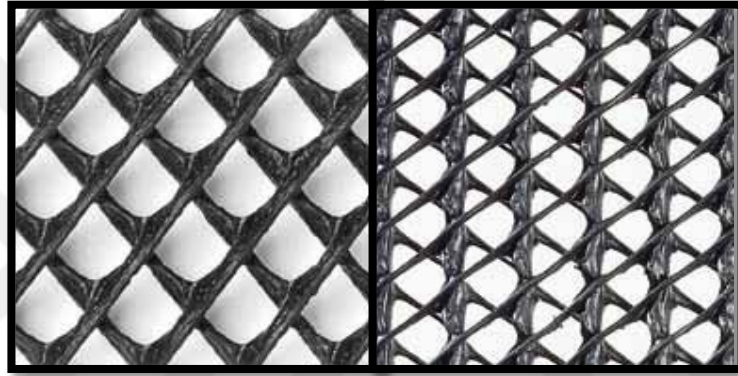
Uzama özelliğinden dolayı geotekstil, yüksek bölgesel yüklere dirençlidir. Gözenek yapıları suyun geçişine müsaade ederken kum ya da silt gibi ince taneli malzemeleri tutabilir. Geotekstillerin özel yapısı filtrenin tıkanmasına engel olmaktadır. Atıklar tarafından meydana gelebilecek zararları önlemek ve filtreleme yapmak amacıyla kullanılır. Şekil 2.20’de geotekstil serilmesi gösterilmektedir (Anonim 2017e).



Şekil 2.20. Düzenli depolama lotları geotekstil serilmesi (Anonim 2017j)

Katı atıkların depolanacağı lotlarda geçirimsizliğin sağlanması için kullanılan geomembranın delinmemesi ve zarar görmemesi için geotekstil ile lot yüzeyi kaplanmaktadır (Anonim 2016b).

Geonet (Geosentetik Drenaj Malzemeleri) : Grid malzemelere benzeyen geonetler, geogridlerin alt kısmına uygulanabilmektedir. Buradaki kullanım alanı ayırma gayesi olmamakla beraber, bu özelliği de sağlamaktadır (Bağcı 2007). (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Değişik geonet çeşitleri (Bağcı 2007)

Geogridlerin donatı olarak kullanıldığı hallerde, geonetler düzlemsel drenajı sağlamak için uygulanmaktadır. Bu durumda, geonetler, donatı amacıyla kullanılmamalarına rağmen bu onların zayıf ve sağlam olmayan malzemeler oldukları anlamını vermemektedir. Belirli bir dayanıma sahip olmalarına rağmen, genellikle drenaj için kullanılmaktadırlar (Şekil 2.22). Dikkat edilmesi gereken husus, geonetlerin, geotekstil, geomembran ya da başka bir malzemenin alt veya üst yüzünde kullanılarak, zeminin boşluklara grip, malzemenin drenaj özelliğini kaybetmesini engellemekte olduklarıdır. Bu yüzden, kompozit malzemelerin oluşturulmasında kullanılmaktadırlar (Bağcı 2007).



Şekil 2.22. Geonet saha uygulaması (Anonim 2017k)

Geogrid: Geogridler, atık düzenleme sistemlerinde, sarp/tepe atık şevleri üzerindeki son kaplama zeminleri ya da zayıf zemin yüzeyi üzerindeki tabaka sistemlerini desteklemek amacıyla kullanılabilir (Şekil 2.23). Fazlaca sıkışabilen atık, bir kaplama sistemi için zayıf bir alt tabaka oluşturur. Alttaki atık malzemeler çürürken/ayrışırken aynı zamanda kaplama sistemi altında boşluklarda oluşturulabilirler. Bir geogrid, kaplama sistemi ve boşluklar üzerinde köprü oluşturmak için destek olarak kullanılırlar (Akbulut 2002).



Şekil 2.23. Geogrid uygulaması (Anonim 2017 l)

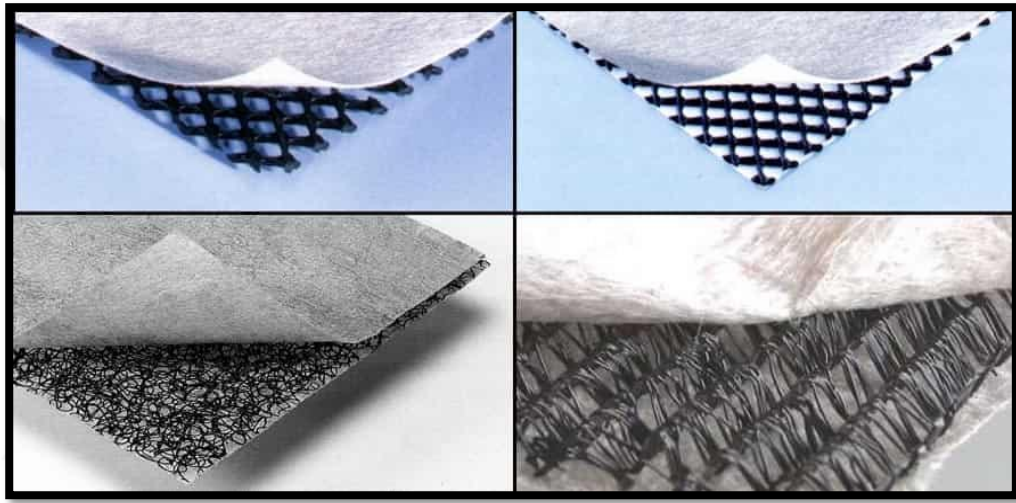
Geogridlerin en önemli özelliği, delik olarak isimlendirilen, zeminin içinden geçmesine müsaade edecek kadar genişlikte, boylamasına ve enlemesine olan şeritler arasındaki açıklıklardır. Geogridlerin şeritlerinin dayanımları ile birlikte bağlanma dayanımları da önemlidir. Geogridler, zemini deliklerinden geçmesine izin verdiklerinden dolayı yükün uygulandığı boyuna şeritleri dik kesen enine şeritlerde bir pasif dayanım meydana gelir. Ayrıca, geogridin zemine bağlanması da bu şeritler sayesinde olur (Bağcı 2007).

2.2.4. Geokompozitler

İnşaat sektöründeki gelişmelerin olması, kullanılan geosentetiklerin de çeşitlenmesine ve değişik çözüm önerileri getirmesine neden olmuştur. Geokompozitler de bu ihtiyaçların karşılanması için kullanılmaktadır. Farklı malzemelerin değişik özellikleri kullanılarak sorunlara en uygun çözüm yolları bulunmaktadır. Geokompozitler genellikle geosentetik malzemelerin farklı birleşimlerinden oluşmaktadır. Ancak bazı durumlarda, sentetik olmayan malzemeler, geosentetiklerle kullanılarak uygun çözümler ve düşük maliyetler sağlamaktadır. Geokompozitlerin fazla sayıda uygulama alanı bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmı drenaj, ayırma, filtrasyon ve güçlendirme olarak sıralanabilir (Bağcı 2007) (Şekil 2.24).

Geokompozitler aşağıdaki şekillerde olabilir:

1. **tip: Geotekstil + Geomembran:** tek veya çift taraflı geomembranlı
 2. **tip: Geomembran + Geogrid:** Geomembran ve Geogridin birleştirilmesi sonucu
 3. **tip: Geotekstil + Geogrid:** Geogridin tek veya çift taraflı geotekstille kaplanmış hali
- (Anonim 2017m)



Şekil 2.24. Muhtelif geokompozit örnekleri (Anonim 2017n)

Geokompozitlerin işlevlerini; basıncın dağıtılması, yeraltı yapılarında yapılan yalıtımın korunması, suyun kolektörlere taşınması, kolektör ya da drenaj borularının ince toprak ya da dolgu parçacıklarıyla tıkanmasının önlenmesi, fazla suyun zeminden uzaklaştırılması, su muhtevası yüksek zayıf zeminlerin iyileştirilmesi olarak sıralanabilir. Geokompozitlerin kullanımının yaygınlaşması, granüler dolguların üretilmesi sırasında fosil yakıtların kullanılması ve sonradan ortaya çıkan sera gazı emisyonunu azaltmaktadır. Bilinenin aksine, petrol yan ürünü olan geokompozitlerin imalatı sırasındaki sera gazı emisyonu, geleneksel yöntemlerle oluşan emisyonlardan fazla değildir ve sürdürülebilir gelişme stratejisi ile tam uyumludur. Geokompozitlerin kullanılması ile granüler dolgu temini için taş ve ariyet ocaklarının kazılarak, çevrenin değiştirilmesi, bozulması ve kirlenmesi önlenmiş olmaktadır. Gelecek nesillere bırakılacak çevrenin korunması ve sera gazları emisyonunun azaltılması için küresel farkındalık yaratılmasında geokompozitlerin etkisi günden güne artmaktadır. Şöyle ki;

eşdeğer hidrolik performans için gerekli geleneksel granüler drenaj tabakası yerine geokompozitlerin kullanılması, karbondioksit emisyonunu %87 oranında azaltmaktadır (Anonim 2017n).

2.3. Uçucu Küller

Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektrofiltreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül (UK) adı verilmektedir (Aruntaş 2006).

Günümüzde kömür en önemli enerji kaynaklarından biridir. Ülkemizde enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan büyük kapasiteli kömür yakan termik santrallerde, düşük kalorili, kül oranı yüksek linyitler kullanılmaktadır. Kömürün yanması sonucunda uçucu kül, cüruf ve baca gazı gibi atıklar oluşur. Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Bu ise önemli derecede ekonomik ve çevresel problemler meydana getirmektedir (Güler vd 2005). Şekil 2.25'de uçucu kül gösterilmektedir.



Şekil 2.25. Çeşitli renkteki uçucu küller (Öksüz 2006)

2.3.1. Uçucu külün fiziksel özellikleri

Uçucu kül ve taban külünün bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Uçucu ve taban küllerinin fiziksel özellikleri (Volkan 2006)

Fiziksel Özellik	Uçucu kül	Taban Külü
Partikül Çapı (μm)	20 - 80	500 – 7 000
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	1,59 – 3,1	2,17 -2,78
Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)	2000 – 10 600	4 000
Geçirgenlik Katsayısı	5,10 – 9 / 1,10 - 6	2,5 – 9,4
Uniformluk Katsayısı	2 – 9,8	8,2 – 8,8

2.3.2. Uçucu külün sınıflandırılması

Uçucu külleri içindeki kimyasal karışımlarına göre Çizelge 2.3’de olduğu gibi 4 farklı şekilde sınıflandırabiliriz:

Çizelge 2.3. Uçucu külün sınıflandırılması (Aruntaş 2006)

CaO (kireç) içeriği açısından	CaO oranı %10’dan fazla ise bu tür uçucu küle yüksek kireçli ve kalsiyumlu uçucu kül	CaO oranı %10’dan az ise düşük kireçli ve kalsiyumlu uçucu kül (ASTM C 618 1991).	
Yapısında ki kireç ve SO_3 miktarı açısından	Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) (S+A+F) toplamı % 70’in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı uçucu kül	Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik uçucu kül	Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50’in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO_3 ve CaO ihtiva eden sülfü kalsik uçucu kül

Çizelge 2.3. (devam)

ASTM C 618'e göre	Bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu kül	Genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu kül (ASTM C618 2000).	
ENV 197-1'e göre;	Çimentolarda kullanılacak olan uçucu kül	Silisli ve kalkerli uçucu kül	

2.3.3. Uçucu külün kullanım alanları

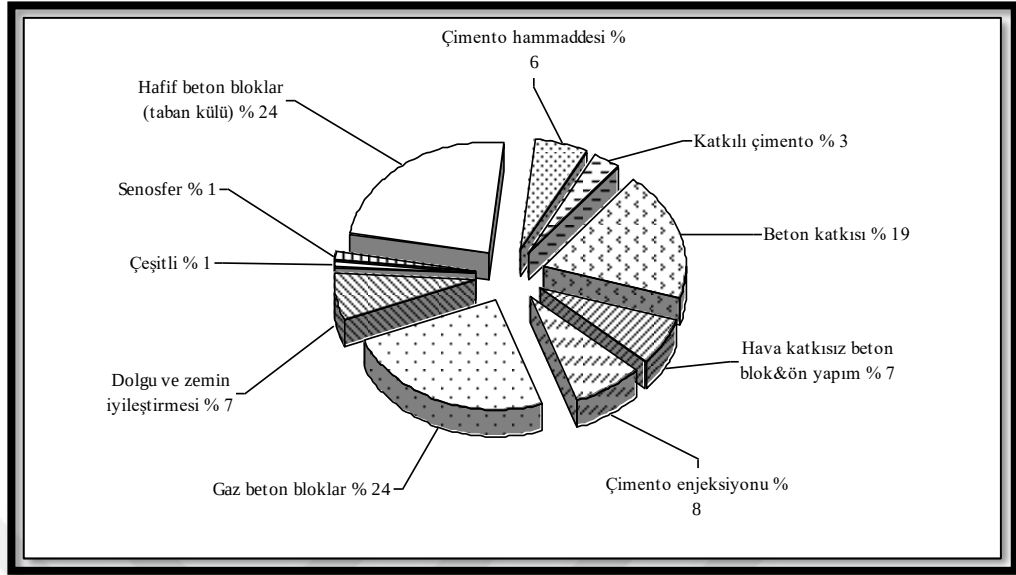
İnşaat sektöründe uçucu kül;

- Çimento, Tuğla, Gaz beton, Beton, Kerpiç (Killi toprak + saman), Baraj, Yol yapımında,
- Yalıtım malzemesi üretmek için,
- Geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır (Aruntaş 2006).

Geoteknik uygulamalarda uçucu kül,

- Dolgu, Bent yapımında,
- Zemin stabilizasyonunun sağlanmasında,
- Sızdırmazlık sağlamak için atık depolama alanlarında,
- Çöp atık alanları üzerinde yapılan beton kaplama veya döşemelerdeki farklı oturma hasarlarının onarımında kullanılmak için uygun bir malzemedir (Aruntaş 2006).

Şekil 2.26'da uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyelinin grafiği gösterilmiştir. Şekil 2.27'de ise uçucu külün yol stabilizasyonundaki uygulaması gösterilmiştir.



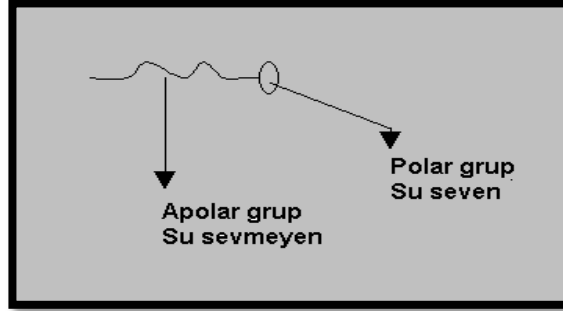
Şekil 2.26. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli (Anonim 2017o)



Şekil 2.27. Uçucu külün yol stabilizasyonunda kullanılması (Öksüz 2006)

2.4. Yüzey Aktif Maddeler

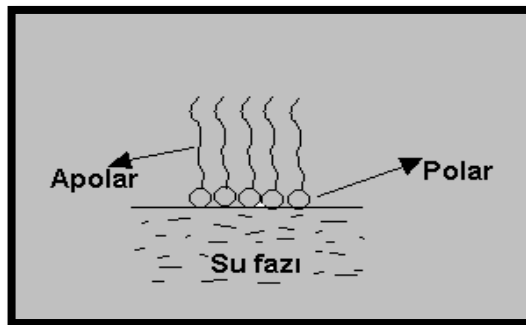
Yüzey aktif maddeler hidrofilik (su-sever) baş ve hidrofobik (yağ-sever) kuyruk kısımlarından oluşan amfoterik özellik gösteren amfilik bileşiklerdir. Molekülün su sever kısmı küresel formlar, yağ sever kısmı ise çubuk formlar oluşturur (Şekil 2.28) (Gül 2012).



Şekil 2.28. Sembolik olarak bir yüzey aktif madde (Anonim 2017ö)

Yüzey aktif maddeler bir sıvının yüzey gerilimini düşüren maddelerdir. Hidrofilik bir baş ve hidrofobik bir kuyruktan oluşan yüzey aktif madde molekülleri, hava ile suyun birleştiği yerde yoğunlaşır. Suyun içinde iken bu moleküllerin hidrofobik kısımları hava kabarcığı tarafından çekilir ve hava kabarcığının etrafını sararlar. Suyun dışında ise bunun tersi olur. Saf suyun yüzey gerilimi yüksek olduğu için su içerisindeki bir hava kabarcığı yüzeye gelince hemen patlar. Yüzey aktif maddeler ise yüzey gerilimini düşürdüklerinden dolayı oluşan hava kabarcıkları yüzeye çıktığında uzun bir süre patlamadan kalırlar (Anonim 2017p).

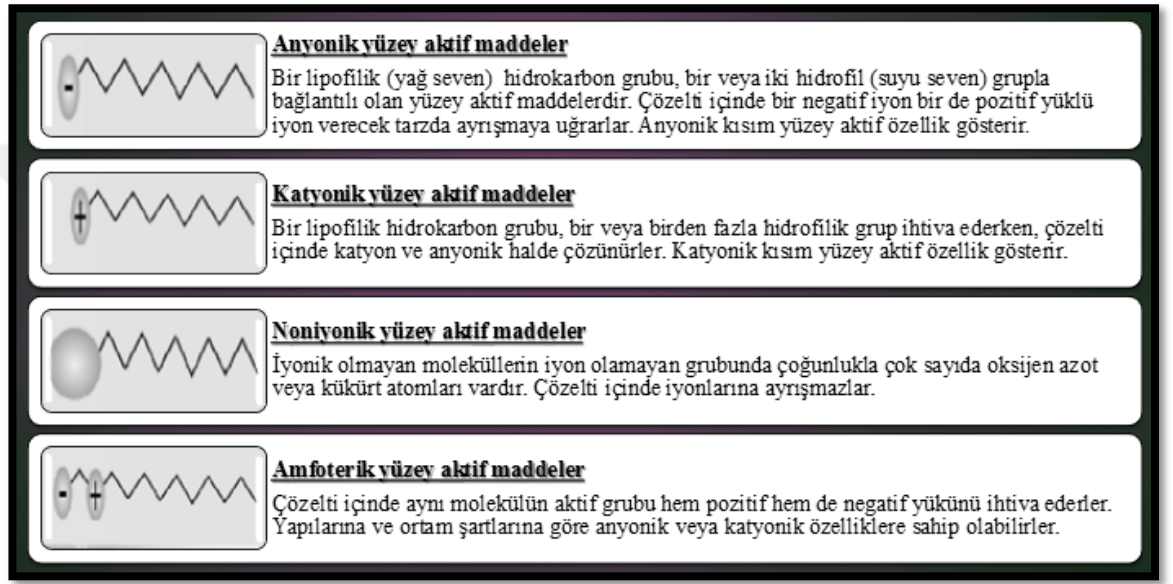
Yüzey aktif bir madde, sulu bir çözeltiye konulduğunda Şekil 2.29’da gösterildiği gibi polar kısmı suda apolar kısmı dışarıda (havada) olacak şekilde yüzeye yerleşir (Anonim 2017r).



Şekil 2.29. Sulu bir çözeltide yüzey aktif madde davranışı (Anonim 2017r)

2.4.1. Yüzey aktif madde çeşitleri

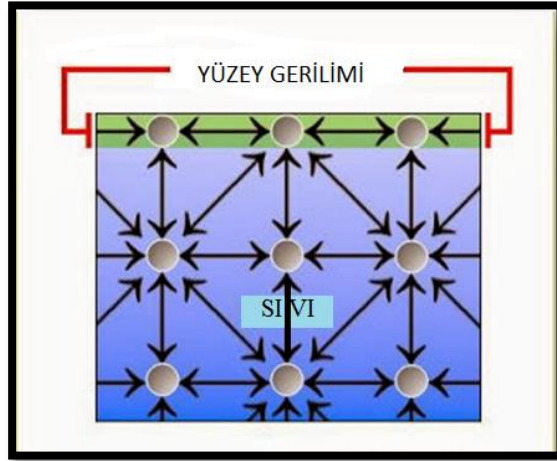
Yüzey aktif maddeler aşağıda açıklandığı şekilde, anyonik, katyonik, noniyonik ve amfoterik olmak üzere dört gruba ayrılır (Kurt 2009). Şekil 2.30'da yüzey aktif madde çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Yüzey aktif madde çeşitleri

2.4.2. Çözeltilerin yüzey gerilimi

Çözünen tanecikler, içteki çözücü moleküllerinin yüzeydeki çözücü moleküllerini içe doğru çekmesini belirli ölçüde engellediğinden dolayı çözeltilerin yüzey gerilimi saf çözücüye nazaran genelde düşük olur. Çözücünün yüzey gerilimini azaltan maddeler yüzey aktif, değiştirmeyenler ise yüzey inaktif şeklinde isimlendirilirler (Şekil 2.31) (Anonim 2017p).



Şekil 2.31. Yüzey gerilimi (Anonim 2017s)

Yüzey gerilimi, sıvı üzerindeki kohezyon kuvvetinin etkisi ile sıvı yüzeyinin zar gibi davranmasıdır. Sıvı yüzeyinde ince zar gibi bir tabaka vardır. Bu tabaka delinmez ise üzerinde cisim durabilir. Örneğin Şekil 2.32’de gösterilen su üzerinde yürüyen böcekler, su üzerinde yüzen yapraklar veya bir atacı su üzerine zarı delmeden bırakırsak su üzerinde kalır (Anonim 2014b).



Şekil 2.32. Doğadan yüzey gerilimine örnekler (Anonim 2017ş)

Yüzey gerilimine etki eden parametreler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- 1) **Sıvının cinsi:** Sıvı maddelerin eşit sıcaklıkta yüzey gerilimleri birbirinden farklıdır. Örneğin cıvanın yüzey gerilimi 0,44 N/m, suyun yüzey gerilimi 0,073 N/m dir.
- 2) **Sıcaklık:** Sıcaklık ve yüzey gerilimi ters orantılıdır. Sıcaklık arttıkça yüzey gerilimi azalır.
- 3) **Sabun ve Deterjanlar:** Sabun ve deterjanlar yüzey gerilimini azaltır.
- 4) **Yoğunluk:** Kullanılan sıvının yoğunluğu arttıkça yüzey gerilimi artar. Örneğin suya tuz karıştırırsak yüzey gerilimi artar (Anonim 2014b).

2.4.3. Adezyon ve kohezyon

Adezyon ve kohezyon kavramları Şekil 2.33’de görüldüğü gibi açıklanmaktadır.



Şekil 2.33. Adezyon ve kohezyon kavramları ve örnekleri

2.5. Bentonit

Bentonit, montmorillonit ailesinin bir parçası ve %500 ya da daha yüksek likit limit değerine sahip bir kil mineralidir. Alüminyum ve magnezyum içeriği zengin volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışmasıyla veya bozulması sonucunda oluşurlar (Çimen vd 2014). Şekil 2.34' de bentonit gösterilmektedir.

Bentonitler su ile temasa geçtiklerinde az veya çok şişerler. Bentonitler şişme yeteneklerine göre fazla, orta ve az şişen bentonitler olmak üzere üçe ayrıldığı gibi içerdikleri değişebilir sodyum kalsiyum iyonlarına göre üç grupta sınıflandırılabilir. Bu bentonitlerin oluşumları bakımından jeolojik özellikleri farklılık göstermektedir. Bunlar içerisinde ticari olarak önemi bulunan sodyum bentonittir. Ancak sodyum bentonitin tabiatta rezervi az bulunmaktadır. Bu nedenle fazla şişme özelliği göstermeyen kalsiyum ve sodyum-kalsiyum bentonitler çeşitli kimyasal yöntemlerle sodyum bentonite dönüştürülmektedir (Çimen vd 2014).



Şekil 2.34. Dünya rezervinin yüzde 20'si Türkiye'de bulunan bir çeşit kil olan bentonit madeni

Bentonitler kimyasal özelliklerine göre üç gruba ayrılır;

i. Sodyum bentonit: Bu tip bentonit su ile temas halinde 5-10 kata kadar şişebilir.

Ağırlıklı olarak sondaj sanayi, döküm sanayi ve inşaat sanayisinde kullanılır.

ii. Kalsiyum bentonit: Bu tip bentonit su ile teması halinde 2-3 katı kadar şişebilir.

Kedi kumu ile gıda sektöründe berraklaştırma amaçlı kullanılır.

iii. Sodyum - kalsiyum (ara tip) bentonit: Kimyasal aktifleştirmeler sonucu sodyum bentonit olarak kullanılmaktadır (Ghabaee 2015).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Afşin – Elbistan Termik Santralı C sınıfı uçucu küller

Bu çalışmada, Kahramanmaraş ilinin Afşin ve Elbistan ilçelerinin sınırları içinde 120 km²'lik bir alanda elde edilen linyit kömürünün yakılması sonucu oluşan uçucu kül kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kullanılan uçucu kül numunesi

Türkiye’de elde edilen Afşin-Elbistan UK’lerin kimyasal kompozisyonları, TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. UK’lerin kimyasal kompozisyonları (Aruntaş 2006)

Bileşim, %	Afşin-Elbistan	TS 639 Sınırları	ASTM C 618 Sınırları	
			F	C
SiO ₂	27.4	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	-	-	-
S+A+F	45.7	>70	>70	>50
CaO	47.0	-	-	-
MgO	2.5	<5	<5	<5
Na ₂ O	(N+K) 0.3	-	<1.5	<1.5
K ₂ O	-	-	-	-
SO ₃	6.2	<5	<5	<5

Türkiye’de elde edilen Afşin-Elbistan UK’lerin mineralojik kompozisyonları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. UK’lerin mineralojik yapısı (Aruntaş 2006)

Mineral, %	Afşin –Elbistan
Mullit	1.0
Kuvartz	4.5
Manyetit	0.8
Hematit	4.0
Anhidrit	12.2
Serbest CaO	18.6
Plajiyoklaz	~28
Camsı ve Amorf Faz	~30

3.1.2. Kullanılan yüzey aktif maddeler

Çalışmada, anyonik yüzey aktif madde olan SLES (Sodyum Loril Eter Sülfat) ve LABSA (Linear Alkyl Benzene Sulphonic Acid) kullanılmıştır. Ön deneylerde LABSA’ nın %10, %15, %20 miktarları ve SLES’in %20 miktarı ile optimum sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle deneysel çalışmamız, bu belirlenen oranlardaki yüzey aktif madde miktarları kullanılarak yapılmıştır. Anyonik yüzey aktif maddeler, bir lipofilik (yağ seven) hidrokarbon grubu, bir veya iki hidrofil (suyu seven) grupla bağlantılı olan yüzey aktif maddelerdir. Çözelti içinde bir negatif iyon bir de pozitif yüklü iyon verecek tarzda ayrışmaya uğrarlar. Anyonik kısım yüzey aktif özellik gösterir. SLES ve LABSA olarak adlandırılan yüzey aktif maddelerin formülü ve yüzey aktif madde tipleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. SLES ve LABSA' nın formülü ve yüzey aktif madde tipleri (Akbulut vd 2012)

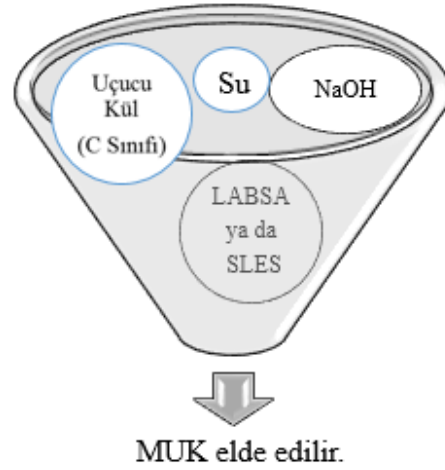
Yüzey Aktif Madde	Kısaltma	Formülü	YAM Tipi
Linear Alkyl Benzene Sulphonic Acid	LABSA	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{11} \text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$	Anyonik
Sodyum Loril Eter Sülfat	SLES	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OSO}_3\text{Na}$	Anyonik

3.2. Yöntem

Bu kısımda, yüzey aktif madde ile modifiye edilen C sınıfı uçucu külün geçirimsiz şilte olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve çalışma kapsamında yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Konuyla ilgili literatürde yayınlanmış çalışmalar ayrı ayrı incelenip değerlendirildikten sonra, laboratuvarında kıvam limitleri deneyi, kompaksiyon deneyi, hidrolik iletkenlik deneyi yapılmıştır. Deneyler, Afşin-Elbistan Termik Santrallerinden alınan C sınıfı uçucu küllerin farklı yüzey aktif maddelerin (SLES ve LABSA) farklı konsantrasyonlarında (%10,%15,%20) modifiye edilerek hazırlanan numuneler, katkısız uçucu kül ve bentonit üzerinde yapılmıştır. Bentonit, katkısız uçucu kül ve modifiye edilmiş uçucu küllerin standart proktor deneyleri ASTM D698'e göre yapılmıştır. Kompaksiyon deneyleri ile optimum su içerikleri (w_{opt}) belirlenmiştir. ASTM D5856'ya göre laboratuvarında düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi yapılarak hidrolik iletkenlikleri bulunmuştur. SEM analizi ile modifiye edilmiş uçucu küllerin ve katkısız uçucu külün yapısı görüntülenmiştir.

3.2.1. Yüzey aktif maddeler ile modifiye edilmiş uçucu kül (MUK) numunelerin elde edilmesi

C sınıfı uçucu kül, yüzey aktif maddeler (SLES ya da LABSA), su, NaOH ile modifiye edilmiş uçucu külün hazırlanması (MUK) şematik olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Modifiye edilmiş uçucu külün elde edilmesi

Modifiye edilmiş uçucu küllerin hazırlanmasında Çizelge 3.4’de gösterilen konsantrasyonlar kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan yüzey aktif madde miktarları

SLES	LABSA	3 litre su ve 1200 gr uçucu kül için yüzey aktif madde miktarları (gr)
-	%10	120 gr
-	%15	180 gr
-	%20	240 gr
%20		240 gr

Malzeme üretim aşamaları:

1) Malzeme üretirken öncelikle sıcaklığı 50°C-70°C arasında olan 3 litre saf su karıştırma kabına eklenmiştir (sıcaklık malzeme üretme işlemi tamamlanıncaya kadar sürekli kontrol edilmiştir). İçerisine su ilave edilen karıştırma kabı, ısıtıcı üzerine konularak suyun içerisine 1500 devir/dakikada olan mekanik karıştırıcı yerleştirilmiştir. (Mekanik karıştırıcı malzeme üretimi boyunca sürekli çalıştırılmıştır) (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. İçerisine sıcaklığı ayarlanmış 3 lt su ilave edilen karıştırma kabının ısıtıcı üzerinde mekanik karıştırıcıda 1500 devir/dakikada karıştırılması

2) Daha sonra 3 litre saf su için 1200 gr uçucu kül yavaş yavaş suya eklenmiştir (Şekil 3.4).



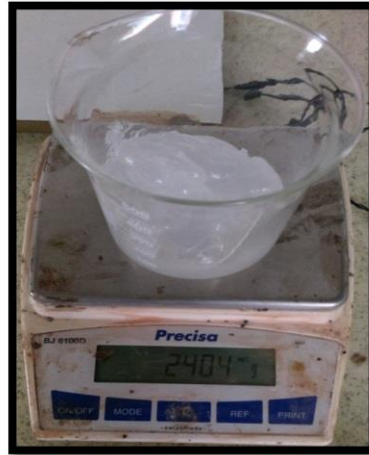
Şekil 3.4. Suyun içerisine uçucu külün ilave edilmesi ve sıcaklığın kontrol edilmesi

3) Uçucu kül ilave edildikten ortalama 10 dakika (absorpsiyon gerçekleşinceye kadar) sonra karışıma 24 gr NaOH eklenmiş (Şekil 3.5) ve ortalama 1,5 saat mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.



Şekil 3.5. Karışıma 24 gr NaOH eklenmesi

4) Ortalama 1,5 saat sonra üretilecek olan malzemeye göre yüzey aktif madde miktarı tartılarak karışım kabına ilave edilmiş (Şekil 3.6) ve 2 saat karıştırılmıştır.



Şekil 3.6. %15 LABSA ile malzeme üretimi için tartılan 180 gr LABSA ve %20 SLES ile malzeme üretimi için tartılan 240 gr SLES

5) 2 saat sonra karışım, filtre kâğıdına dökülerek 2 gün süre ile filtre işlemi gerçekleştirilmiştir (Filtre kâğıdının alt kısmına elek konularak üretilen malzeme filtre edilmiştir) (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Üretilen malzemenin filtre edilmesi

6) Malzeme filtre edildikten sonra homojen oluncaya kadar karıştırılmıştır ve 50°C etüvde 2 gün kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Malzemenin filtre edildikten sonra karıştırılarak 50°C etüve konulması

7) Daha sonra etüvde iki gün kuruyan malzeme 1 mm çaplı elekten geçirilmiştir (Şekil 3.9) (Elekten geçmeyen kısımlar ezilerek elekten geçirilmiş ve böylece tüm karışım elenmiştir).



Şekil 3.9. Kuruyan malzemenin elenmesi

3.2.2. Kompaksiyon deneyleri

Numunelere ait kompaksiyon parametreleri (optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri) ASTM D 698'e göre yapılan standart proktor deneyleri ile belirlenmiştir. Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği

laboratuvarında yürütülmüştür. Üretilen malzemeye su ilave edilerek yoğrulmuş, 11,7 cm yüksekliğinde ve 10,2 cm çapında metal silindir kompaksiyon kalıbı içerisine her tabakaya 25'er vuruş yapılmak suretiyle, standart proktor deneyinde üç tabaka halinde 30,5 cm'den serbestçe düşen 2,5 kg kütledeki bir tokmakla sıkıştırma yapılmıştır. Bu işlem numunelere su ilave edilerek farklı su içeriklerinde tekrarlanmıştır. Deney sonucunda yatay ekseninde su muhtevaları, düşey ekseninde kuru birim hacim ağırlıkları yer almak suretiyle çizilen kompaksiyon eğrilerinden numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir.

Hesaplanan su içeriği ve malzeme miktarlarına göre sıkıştırılmış şilte üretilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Malzeme miktarı ve malzeme türüne göre kullanılan su miktarları

Sıkıştırılmış Şilte Üretiminde Kullanılacak Malzeme Miktarları Malzeme Türleri ve w_{opt} Değerleri	50 N/m ² (98,13 gr)	65 N/m ² (127,58 gr)	80 N/m ² (157 gr)
%10 LABSA ($w_{opt} = \%21$)	≈22 ml	≈28 ml	≈34 ml
%15 LABSA ($w_{opt} = \%19$)	≈20 ml	≈26 ml	≈31 ml
%20 LABSA ($w_{opt} = \%17$)	≈18 ml	≈23 ml	≈28 ml
%20 SLES ($w_{opt} = \%24$)	≈25 ml	≈32 ml	≈39 ml
Katkısız Uçucu Kül (UK) ($w_{opt} = \%35$)	≈36 ml	≈46 ml	≈56,5 ml
Bentonit ($w_{opt} = \%37$)	≈38ml	≈49ml	≈ 59,5ml

3.2.3. Modifiye edilmiş uçucu külden (MUK) sıkıştırılmış şilte elde edilmesi ve hidrolik iletkenlik deneylerine hazırlanması

Çalışma, Afşin-Elbistan Termik Santrallerinden alınan C sınıfı uçucu küllerin farklı yüzey aktif maddelerin (SLES ve LABSA) farklı konsantrasyonlarında (%10,%15,%20)

Modifiye edilerek hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Üretilen MUK'lar 50°C etüvde 2 gün kurutulmuştur.

Deneysel çalışmamızda örnek olması için Geomas Geokompozit firmasından aldığımız GCL 'de ($GCL_{\text{örnek}}$) m^2 'de 6,5 kg bentonit kullanılmıştır. Deneylerimizde sıkıştırılmış şilte üretiminde, 6,5 kg, 6,5 kg'dan daha düşük ve daha yüksek olmak üzere toplam üç farklı miktarda malzeme kullanılmıştır. Ayrıca örnek olarak alınan GCL'de 4 mm bentonit kalınlığı kullanılmıştır. Ancak laboratuvar koşullarında bunu uygulamak çok zor olduğu için deneylerimizde malzeme kalınlığı 10 mm kullanılmıştır. Sıkıştırılmış şilte üretiminde, 10 mm kalınlık ve 10,2 cm çap için gerekli olan malzeme miktarları hesaplanarak malzeme yerleştirilmiştir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. Sıkıştırılmış şilte üretiminde, 10 mm kalınlık ve 10,2 cm çap için gerekli olan malzeme miktarları

50 N/m ² ↓	65 N/m ² ↓	80 N/m ² ↓
(98,13 gr)	(127,58 gr)	(157 gr)

Hidrolik iletkenlik deneyleri sıkıştırılmış şilte üretiminde 18, laboratuvarda simüle edilen 3 tip geosentetik şilte üretiminde 36 ve 1 tane örnek GCL olmak üzere toplam 55 farklı numune üzerinde yapılmıştır. Sıkıştırılmış şilte oluşturulurken kullanılacak malzeme miktarları ve su içeriği hesaplandıktan sonra numuneler hidrolik iletkenlik kalıplarına yerleştirilmiştir. sıkıştırılmış şilteler hidrolik iletkenlik kalıplarına yerleştirilirken filtre kâğıdı, poroz taşı ve şeffaf silikon kullanılmıştır. Öncelikle üretilen sıkıştırılmış şilte numuneleri 10 mm kalınlığında olacağından hidrolik iletkenlik kalıplarında en altta çakıllar ve çakılların üzerinde de kırma taşlarla belirli bir yükseklik oluşturulmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Hidrolik iletkenlik kalıplarında çakıllar ve kırma taşlarla belirli bir yükseklik oluşturulması

Hidrolik iletkenlik deney kalıplarında belirli bir yükseklik oluşturulduktan sonra yukarıda kalan mesafe (uygulamada yaklaşık 2,5 ile 3,5 cm bırakılmıştır) kumpas ile ölçülmüştür (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Hidrolik iletkenlik deney kalıplarında belirli bir yükseklik oluşturulduktan sonra yukarıda kalan mesafenin kumpas ile ölçülmesi

Üretilecek olan malzeme türüne göre gerekli malzeme miktarı, her bir tür için belirlenen su miktarına göre bir kaptaki karıştırılmıştır (Şekil 3.12). Belirlenen yükseklik oluşturulduktan sonra kalıbın içerisine daire şeklinde kesilen filtre kâğıdı, onun üzerine de poroz taşı konulmuştur. Daha sonra tekrar filtre kâğıdı konularak üzerine karıştırılan malzeme yerleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Üretilecek olan sıkıştırılmış şilte türüne göre malzemenin karıştırılması

Sıkıştırılmış şilte için hazırlanan malzeme geçirimsizlik kalıbına Şekil 3.13’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir (Örnek olarak çalışmamızda kullandığımız GCL, fabrika da sıkıştırılmadan üretilmiştir.).



Şekil 3.13. Malzemenin geçirimlilik kalıbına yerleştirilmesi

Yerleştirilen malzemenin etrafına şeffaf silikon çekilerek filtre kâğıdı, poroz taşı ve tekrar filtre kâğıdı konularak kalıp kapağı kapatılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Yerleştirilen malzemenin etrafına şeffaf silikon çekilmesi ve filtre kâğıdı, poroz taşı, tekrar filtre kâğıdı konularak kalıp kapağının kapatılması

Hidrolik iletkenlik deneyi sonunda kalıptan çıkarılan sıkıştırılmış şilte görüntüsü Şekil 3.15’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Hidrolik iletkenlik deney sonunda kalıptan çıkarılan sıkıştırılmış şilte görüntüsü

Hidrolik iletkenlik deneyi için hazırlanan numuneler Çizelge 3.7’ de gösterilmiştir. Her bir deney 3 kez tekrar edilmiştir.

Çizelge 3.7. Hidrolik iletkenlik deneyi için hazırlanan sıkıştırılmış şilte numuneleri

Sıkıştırılmış Şilteler			
Malzeme Türleri	Malzeme Dağılımı		
	50 N/m ² (98,13 gr)	65 N/m ² (127,58 gr)	80 N/m ² (157 gr)
%10 LABSA	+	+	+
%15 LABSA	+	+	+
%20 LABSA	+	+	+
%20 SLES	+	+	+
Katkısız Uçucu Kül (UK)	+	+	+
Bentonit	+	+	+

3.2.4. İçerisinde modifiye edilmiş uçucu külün (MUK) bulunduğu geosentetik şiltelerin laboratuvarda simüle edilerek hidrolik iletkenlik deneylerine hazırlanması

Deneysel çalışmamız ile laboratuvarda üç tip geosentetik şilte simüle edilmiştir (Çizelge 3.8). Bunlar;

- 1) Üretilen malzeme (MUK) + Geomembran
- 2) Geotekstil + Üretilen malzeme (MUK)+ Geomembran
- 3) Geotekstil + Üretilen malzeme(MUK) + Geotekstil

Çizelge 3.8. Hidrolik iletkenlik deneyi için hazırlanan geosentetik şilte numuneler

Yüzey Aktif Madde Oranları	Malzeme Dağılımı			Geosentetik Şilte Türleri		
	50 N/m ² (98,13 gr)	65 N/m ² (127,58 gr)	80 N/m ² (157 gr)	MUK + Geomembran	Geotekstil + MUK + Geomembran	Geotekstil + MUK + Geotekstil
	%10 LABSA	+	+			
	%15 LABSA	+	+			
	%20 LABSA	+	+			
%20 SLES	+	+				
4	3			3	= 36	

Geosentetik şilte elde etmek için numunelerin geçirimsizlik deneylerine hazırlanması EK 1’de anlatılmıştır.

3.2.5. Kıvam limitleri deneyleri

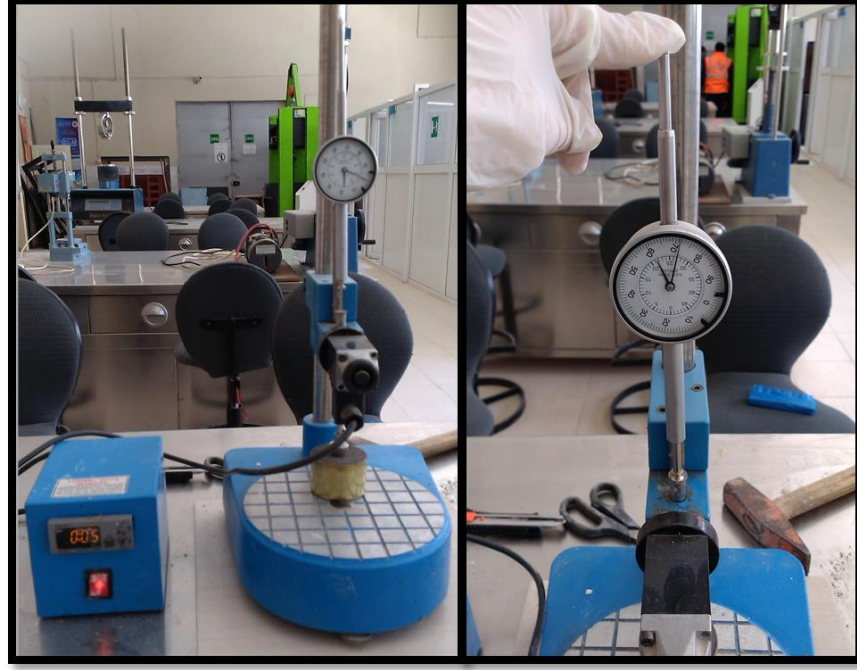
Kıvam limiti deneylerinden likit limit BS 1377, Part 2, 1990'a göre yapılmıştır. Numunelere ait likit limit, düşen koni yöntemi ile belirlenmiştir. Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği laboratuvarında yürütülmüştür. 40 no'lu elekten (0,425 mm) elenen numuneye su ilave edilerek yoğrulmuş numune (Şekil 3.16), penetrasyon kalıbına yerleştirilerek (Şekil 3.17) yüzeyi düzeltilmiştir. 80 gram ağırlığındaki konik uç 5 saniye süreyle serbestçe düşürülerek batma miktarı tespit edilmiştir (Şekil 3.19). Bu işlem su muhtevası artırılmak suretiyle farklı su içeriklerinde tekrarlanmıştır. Deney sonunda her bir batma için elde edilen su muhtevası değerleri bulunmuş, 20 mm'lik batmaya karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.16. 40 no'lu elekten (0,425 mm) numunenin elenmesi ve numunenin su ile homojen olarak karıştırılması



Şekil 3.17. Hazırlanan numunenin metal deney kaba sıkıca ve içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirilmesi



Şekil 3.18. Koniye serbest bırakan düğmeye 5 ± 1 saniye süreyle basılarak koninin zemin içerisine batmasına izin verilmesi ve süre sonunda son mikrometre okumasının (koninin batma miktarı, mm) yapılması

Su muhtevaları bulunması ile batma miktarı ve su muhtevaları değerleri ile grafik çizilerek likit limit değeri hesaplanmıştır.

Plastik limiti belirlemek için TS 1900 ve ASTM D 4318 esas alınmıştır. Hazırlanmış zemin numunesi 40 no'lu elekten (0,425 mm) elenerek bir miktar su karıştırılarak yoğrulmuş, yoğrulan zemin numunesinden bir miktar alınmış, cam bir yüzey üzerinde 3 mm çapında üzerinde kopmaların meydana geldiği çubuk elde edilinceye kadar elle yuvarlatılmıştır. Elde edilen çubuğun su muhtevası değeri belirlenmiş, plastik limit değeri olarak alınmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Modifiye edilen uçucu kül numunelerinin, yuvarlanarak çapları yaklaşık 3 mm olan zemin çubukları haline getirilememesi

3.2.6. Hidrolik iletkenlik deneyleri

Bu çalışmada hidrolik iletkenliğinin tespiti için, laboratuvarında ASTM D 5856'ya göre kompaksiyon kalıplı permeametrelerde düşen seviyeli hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği laboratuvarında yürütülmüştür.

Bu deney düzeneğinde zemin numunesi üzerindeki hidrolik yükün zamanla değişimi ölçülerek ve Darcy yasasından yararlanılarak geçirimsizlik katsayısı hesaplanmaktadır.

Eğer $t=t_1$ zamanındaki su yüksekliği h_1 ve $t=t_2$ zamanındaki su yüksekliği h_2 ise, permeabilite katsayısı:

$$k = \frac{a.L}{A.(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.1)$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte;

- k : Hidrolik iletkenlik katsayısı (cm/sn),
- a : Şeffaf borunun iç alanı (cm²),
- L : Numunenin yüksekliği (cm),
- A : Numunenin kesit alanı (cm²),
- h_1 : t_1 zamanındaki su yüksekliği (cm),
- h_2 : t_2 zamanındaki su yüksekliği (cm)

dır.

Zeminlerin hidrolik iletkenliğinin, tane boyutu dağılımına, özgül yüzey alana, boşluk oranına ve şişmeye bağlı olduğu deneysel olarak ispatlanmıştır (Stepniewski *et al.* 2011).

Bu çalışmada yapılan hidrolik iletkenlik deneyleri; numunelerin hazırlanması, numunelerin deney düzeneğine yerleştirilmesi ve deney okumalarının yapılması aşamalarından oluşmaktadır. Hidrolik iletkenlik deneyinde, numuneler kompaksiyon deneyinden bulunan optimum su muhtevalarında hazırlanmıştır. Deneyler farklı yüzey aktif madde konsantrasyonlarında hazırlanan numunelerde olmak üzere toplam 55 farklı numune üzerinde yapılmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numune, yüksekliği 117 mm, çapı 102 mm olan kompaksiyon kalıbında yapılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Optimum su muhtevasında hazırlanan numunenin kompaksiyon kalıbına yerleştirilmesi

Hazırlanan numuneler Şekil 3.21’da görülen hidrolik iletkenlik deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Düzeneğin alt plakası su giriş ve çıkışına izin veren özellikte, üst plakası ise su girişine ve hava tahliyesine uygun özelliktedir. Son olarak da üst plakaya ortalama 140-150 cm uzunluğunda ve 0,65 cm çaplı şeffaf boru bağlanarak düzeneğin tamamlanmıştır.



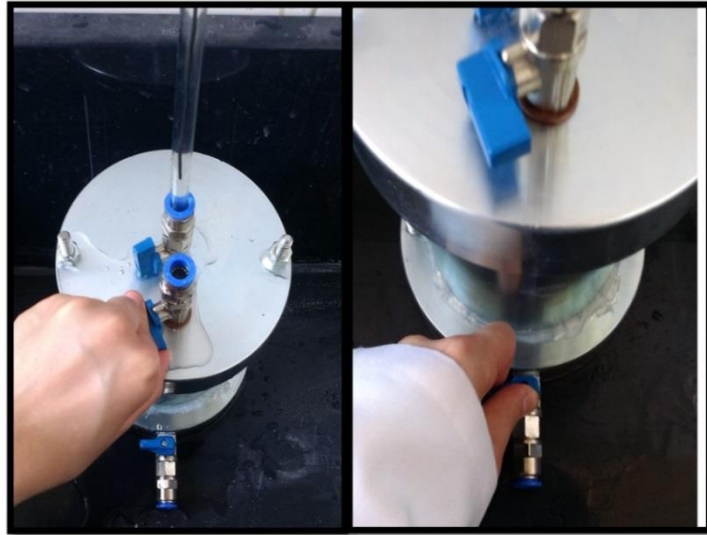
Şekil 3.21. Deneylerimizde kullanılan hidrolik iletkenlik deney düzeneği

Düzenek kurulduktan sonra şeffaf boru üst sınır noktasına kadar su ile doldurulmuştur (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Şeffaf boru üst sınır noktasına kadar su ile doldurulması

Sıvı geçişi başlatılarak, numune ile üst plaka arasında kalan boşluğun sıvı ile dolması sağlanmıştır. Numunenin havası alındıktan sonra şeffaf boru tekrar üst sınır noktasına kadar doldurulmuştur (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Numunenin havasının alınması

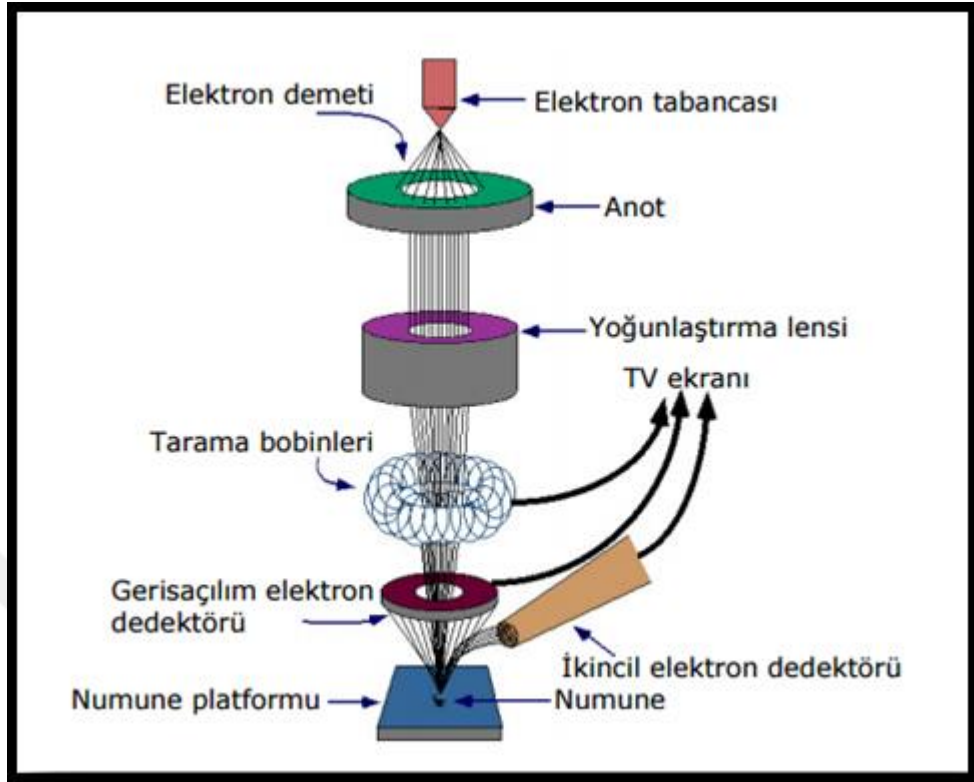
Deney okumaları kararlı akım sağlandıktan sonra farklı aralıklarda yapılmıştır (Şekil 3.24). Deney okumalarından elde edilen değerler kullanılarak numunelerin hidrolik iletkenlik değerleri 3.1 numaralı eşitlikten hesaplanmıştır.



Şekil 3.24. Deney okumalarının kararlı akım sağlandıktan sonra farklı aralıklarda yapılması

3.2.7. SEM görüntüleme

Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Elektron Microscope-SEM) yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle inceltiren elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme imkânı sunar. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışımlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Taramalı Elektron Mikroskobunun yapısı

Laboratuvarda yapılan hidrolik deneylerinde bulunan sonuçların yüzey aktif maddelerin etkisi altındaki uçucu kül tanecikleri arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerle ilişkisi bulunmaktadır. Bu fiziko-kimyasal kuvvetlerin etkisiyle uçucu küllerde yapı ve davranış değişiklikleri meydana gelmektedir. Bu yapı ve davranış değişikliklerini belirlemek için modifiye edilmiş ve katkısız uçucu kül numunelerinin SEM analizi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

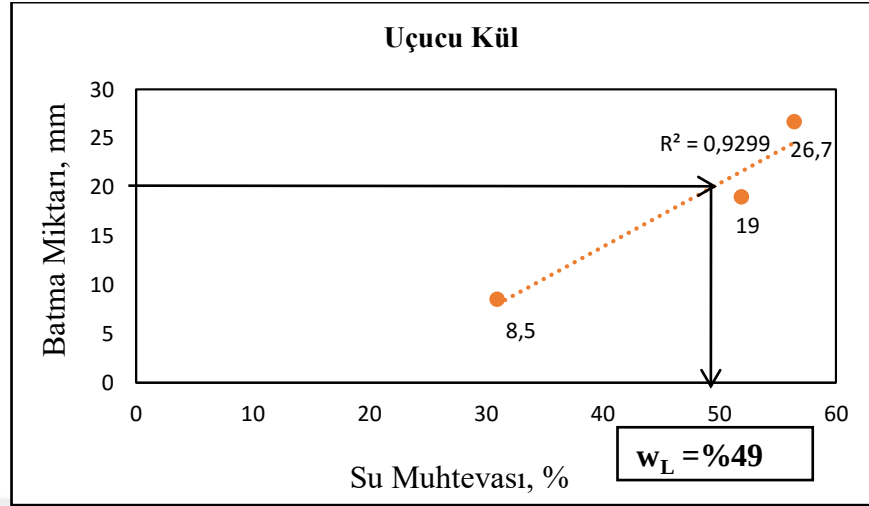
Bu bölümde, Afşin-Elbistan Termik Santrallerinden alınan C sınıfı uçucu küllerin farklı yüzey aktif maddelerin (SLES ve LABSA) farklı konsantrasyonlarında (%10, %15, %20) modifiye edilerek hazırlanan numuneler, katkısız uçucu kül ve bentonit üzerinde yapılan deney sonuçları ve hazırlanan numuneler ile üretilen sıkıştırılmış şilte üzerinde yapılan deney sonuçları incelenmiştir. Kıvam limitleri deneyleri, kompaksiyon deneyleri, hidrolik iletkenlik deneyleri, SEM analizi, sıkıştırılmış şilte üretiminde malzeme miktarının etkisi olmak üzere beş başlık altında anlatılmıştır.

4.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmamızda, katkısız uçucu kül, belirlenen oranlarda yüzey aktif maddelerle modifiye edilmiş uçucu küllerin ve bentonitin kıvam limitleri belirlenmiştir. Yüzey aktif madde türü ve miktarının kıvam limitleri üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de uçucu külün likit limit deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Uçucu kül için düşen koni penetrasyon deney sonuçları

Deney: Uçucu Kül	1	2	3
Kap Ağırlığı, gr	35,16	34,75	36,34
Kap +Islak Numune, gr	48,36	59,31	64,99
Kap +Kuru Numune, gr	45,24	50,45	55,2
Islak Numune Ağırlığı, gr	13,2	24,56	28,65
Kuru Numune Ağırlığı, gr	10,08	15,7	18,86
Su Miktarı, gr	3,12	8,86	9,79
Su Muhtevası, %	31	56,4	51,9
Batma Miktarı, mm	8,5	26,7	16,5

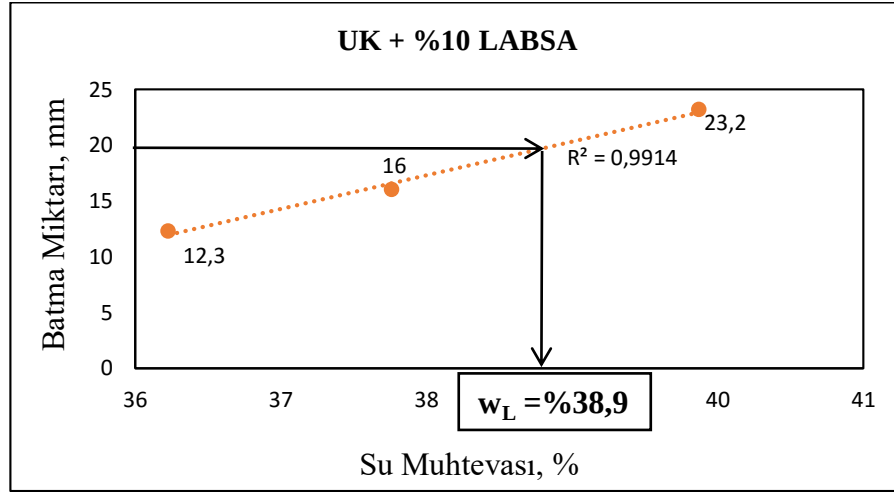


Şekil 4.1. Uçucu külün batma miktarı- su muhtevası ilişkisi

%10 LABSA için Likit limit deney sonuçları Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. UK + %10 LABSA için düşen koni penetrasyon deney sonuçları

Deney: UK + %10 LABSA	1	2	3
Kap Ağırlığı, gr	52,94	49,12	48,59
Kap +Islak Numune, gr	56,55	55,03	52,94
Kap +Kuru Numune, gr	55,59	53,41	51,7
Islak Numune Ağırlığı, gr	3,61	5,91	4,35
Kuru Numune Ağırlığı, gr	2,65	4,29	3,11
Su Miktarı, gr	0,96	1,62	1,24
Su Muhtevası, %	36,2	37,8	39,9
Batma Miktarı, mm	12,3	16	23,2

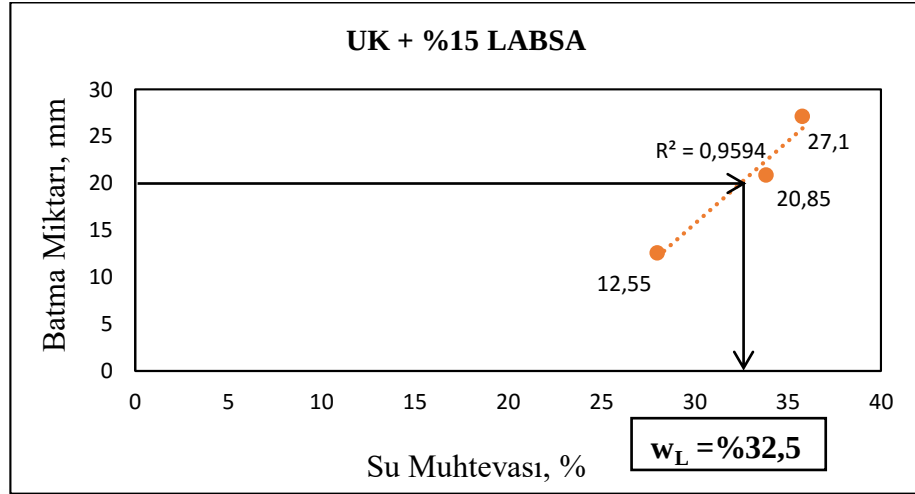


Şekil 4.2. UK + %10 LABSA için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi

UK + %15 LABSA için Likit limit deney sonuçları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. UK + %15 LABSA için düşen koni penetrasyon deney sonuçları

Deney: UK + %15 LABSA	1	2	3
Kap Ağırlığı, gr	49,46	50,32	33,5
Kap +Islak Numune, gr	55,4	55,42	38,13
Kap +Kuru Numune, gr	54,1	54,13	36,91
Islak Numune Ağırlığı, gr	5,94	5,1	4,63
Kuru Numune Ağırlığı, gr	4,64	3,81	3,41
Su Miktarı, gr	1,3	1,29	1,22
Su Muhtevası, %	28,0	33,9	35,8
Batma Miktarı, mm	12,55	20,85	27,1

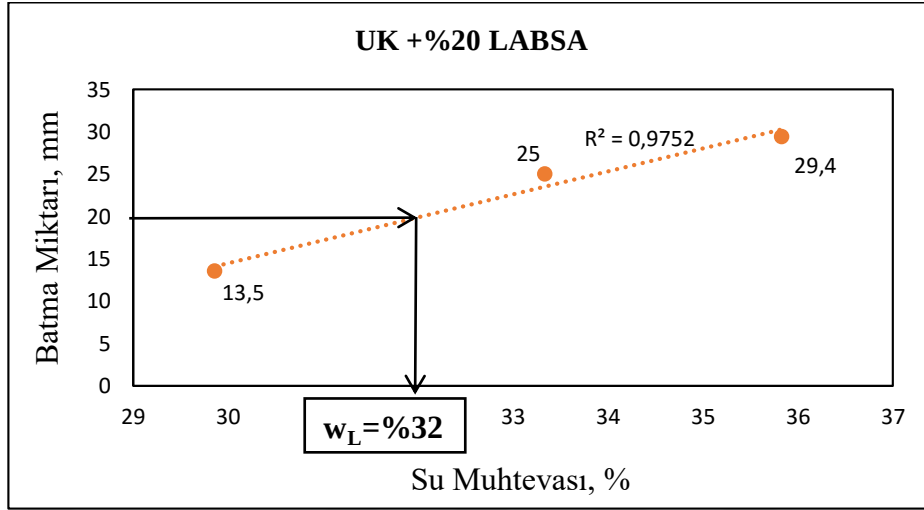


Şekil 4.3. UK + %15 LABSA için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi

UK + %20 LABSA için Likit limit deney sonuçları Çizelge 4.4 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. UK + %20 LABSA için düşen koni penetrasyon deney sonuçları

Deney: UK + %20 LABSA	1	2	3
Kap Ağırlığı, gr	36,45	34,73	31,48
Kap +Islak Numune, gr	42,06	40,17	36,56
Kap +Kuru Numune, gr	40,77	38,81	35,22
Islak Numune Ağırlığı, gr	5,61	5,44	5,08
Kuru Numune Ağırlığı, gr	4,32	4,08	3,74
Su Miktarı, gr	1,29	1,36	1,34
Su Muhtevası, %	29,9	33,3	35,8
Batma Miktarı, mm	13,5	25	29,4

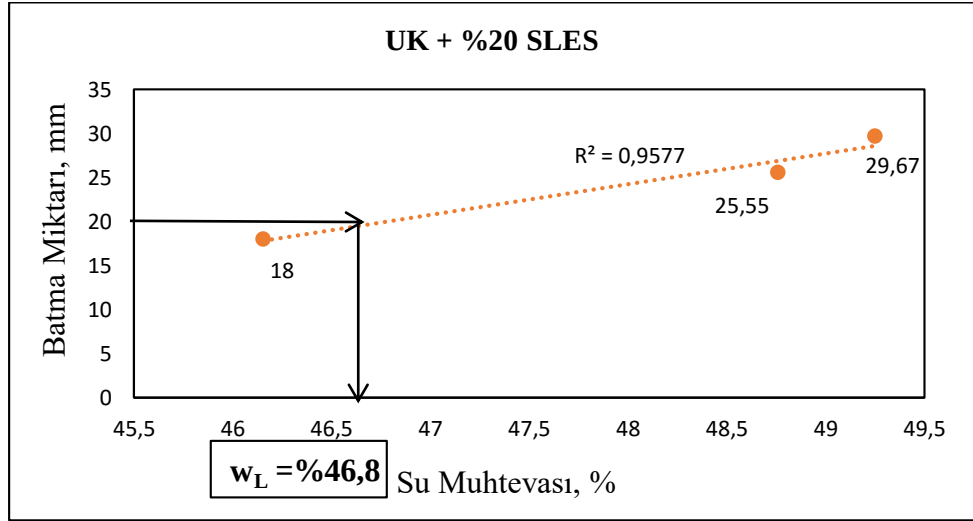


Şekil 4.4. UK + %20 LABSA için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi

UK + %20 SLES için Likit limit deney sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. UK +%20 SLES için düşen koni penetrasyon deney sonuçları

Deney: UK + %20 SLES	1	2	3
Kap Ağırlığı, gr	51,79	51,81	49,13
Kap +Islak Numune, gr	56,16	56,6	54,1
Kap +Kuru Numune, gr	54,78	55,03	52,46
Islak Numune Ağırlığı, gr	4,37	4,79	4,97
Kuru Numune Ağırlığı, gr	2,99	3,22	3,33
Su Miktarı, gr	1,38	1,57	1,64
Su Muhtevası, %	46,2	48,8	49,3
Batma Miktarı, mm	18	25,55	29,67

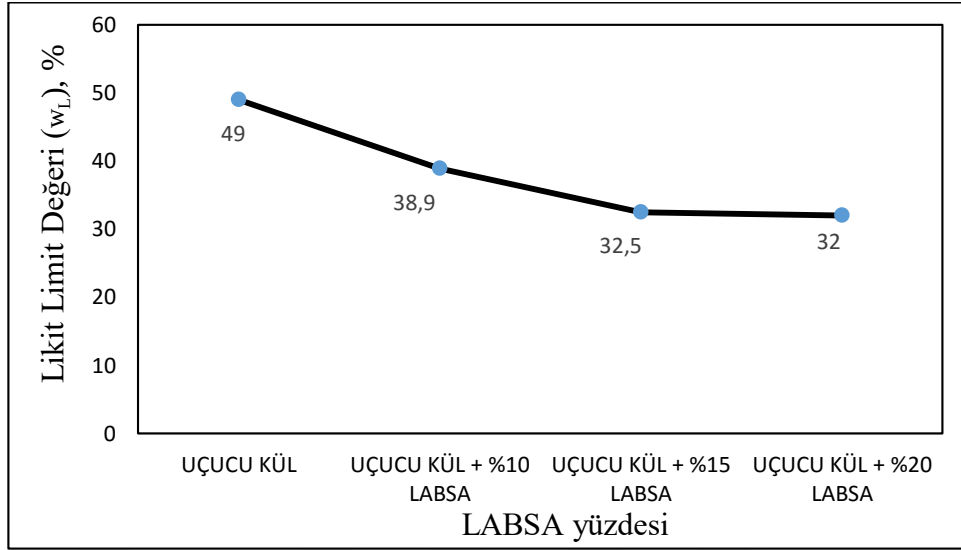


Şekil 4.5. UK + %20 SLES için batma miktarı- su muhtevası ilişkisi

Katkısız uçucu kül ve modifiye edilmiş uçucu küllerin likit limit deney sonuçları Çizelge 4.6’da ve likit limitin LABSA yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. UK ve MUK’ ların likit limit deney sonuçları

Malzeme Türü	Likit Limit Değeri (w_L), %
UÇUCU KÜL	49,0
UÇUCU KÜL + %10 LABSA	38,9
UÇUCU KÜL + %15 LABSA	32,5
UÇUCU KÜL + %20 LABSA	32,0
UÇUCU KÜL + %20 SLES	46,8



Şekil 4.6. Likit limitin LABSA yüzdesine bağlı olarak değişimi

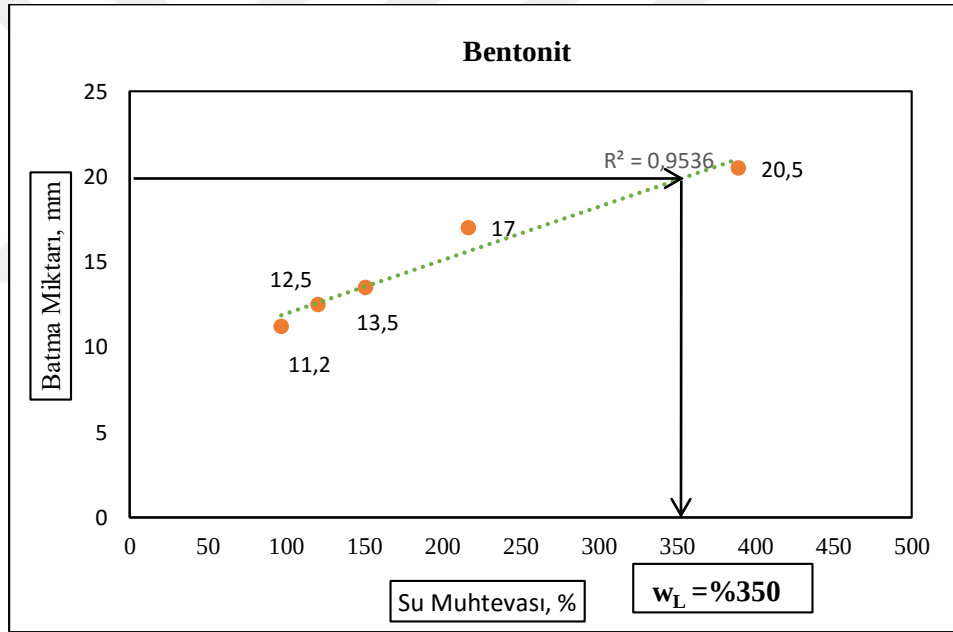
SLES ile modifiye edilen uçucu külün Likit limit değeri ise %46,8 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, yüzey aktif maddelerin eklenmesi ile malzemelerin Likit limit değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir. SLES ile daha az bir düşüş olmuştur. Sonuç olarak, LABSA, SLES'e göre Likit limit değerlerinde daha fazla düşüşe sebep olmuştur.

Yaptığımız plastik limit deneyinde kullanılan numune, yuvarlanarak çapları yaklaşık 3 mm olan zemin çubukları haline getirilememiştir. Böyle zeminlere “Plastik Olmayan ” (NP –Non Plastic) zemin adı verilir.

Bentonit için likit limit deney sonuçları Çizelge 4.7 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Bentonit için düşen koni penetrasyon deney sonuçları

Deney: Bentonit	1	2	3	4	5
Kap Ağırlığı, gr	51,03	54,98	49,48	53,89	55,2
Kap +Islak Numune, gr	56,6	60,07	56,27	61,61	60,2
Kap +Kuru Numune, gr	53,86	57,29	52,19	56,33	56,3
Islak Numune Ağırlığı, gr	5,57	5,09	6,79	7,72	5
Kuru Numune Ağırlığı, gr	2,83	2,31	2,71	2,44	1,1
Su Miktarı, gr	2,74	2,78	4,08	5,28	3,9
Su Muhtevası, %	96,82	120,35	150,55	216,3934	389
Batma Miktarı, mm	11,2	12,5	13,5	17	20,5

**Şekil 4.7.** Bentonit için batma miktarı-su muhtevası ilişkisi

Bentonitler su ile temasa geçtiklerinde az veya çok şişerler. Bentonitler şişme yeteneklerine göre fazla, orta ve az şişen bentonitler olmak üzere üçe ayrılırlar (Çimen vd 2014).

Bentonitin likit limit değerinin %350, plastik limitinin %55 ve plastisite indisinin %295 olarak bulunması, bentonitin yüksek şişme özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Şişen killerin tanımlanmasında; genellikle tane boyu dağılımı, kil içeriği ve plastiklik gibi zemin özellikleri kullanılır. Plastiklik indisi ile kıvam limitleri ve doğal su içeriğine bağlı olarak belirtilen likitlik indisi; iki önemli kriter olarak göz önüne alınır. Özellikle plastiklik indisi, şişen killerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılmaktadır (Demir vd 2010).

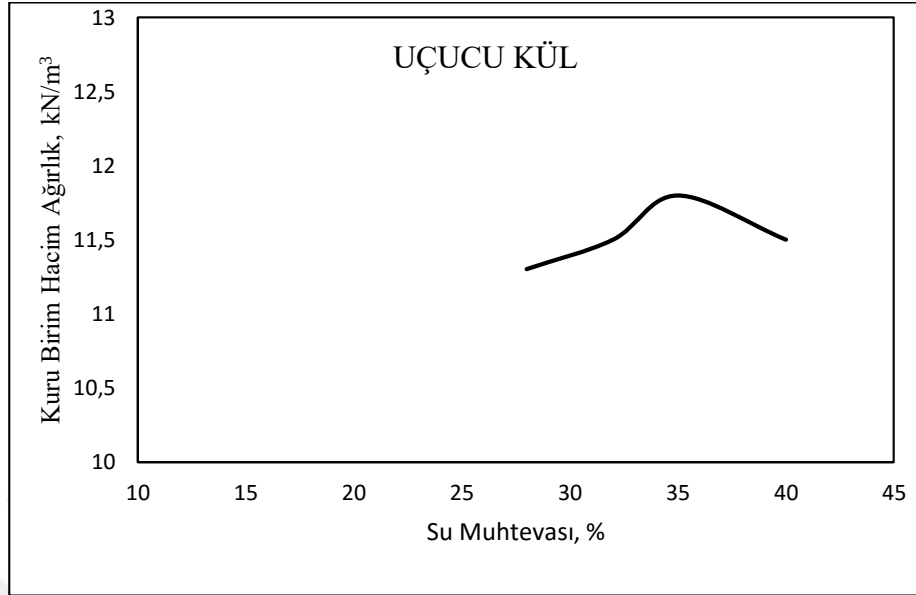
4.2. Kompaksiyon Deney Sonuçları

Bu bölümdeki deneysel çalışmamızda, katkısız uçucu külün, belirlenen oranlarda yüzey aktif maddelerle modifiye edilmiş uçucu küllerin ve bentonitin standart Proktor deneyi (ASTM D 698) yapılarak, optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Böylece, yüzey aktif madde türünün ve miktarının kompaksiyon üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Çizelge 4.8’de Kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevaları (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri

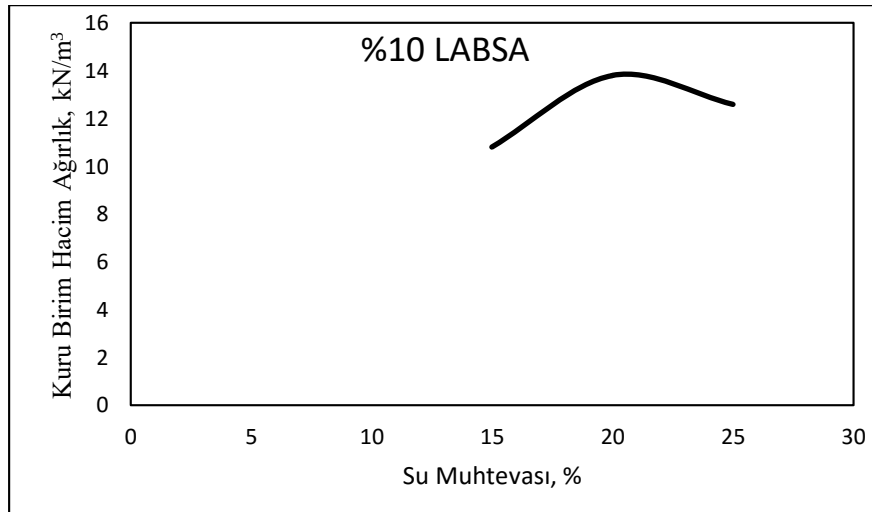
	Su Muhtevası, %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, kN/m^3
Uçucu Kül	35	11,8
%10 LABSA	21	13,8
%15 LABSA	19	14,5
%20 LABSA	17	15,1
%20 SLES	24	13,2
Bentonit	37	12

Afşin-Elbistan’dan temin edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi Şekil 4.8’de verilmektedir. Katkısız uçucu kül numunesine ait kompaksiyon deneyi sonucunda optimum su muhtevası %35, maksimum kuru birim hacim ağırlık $11,8 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir.



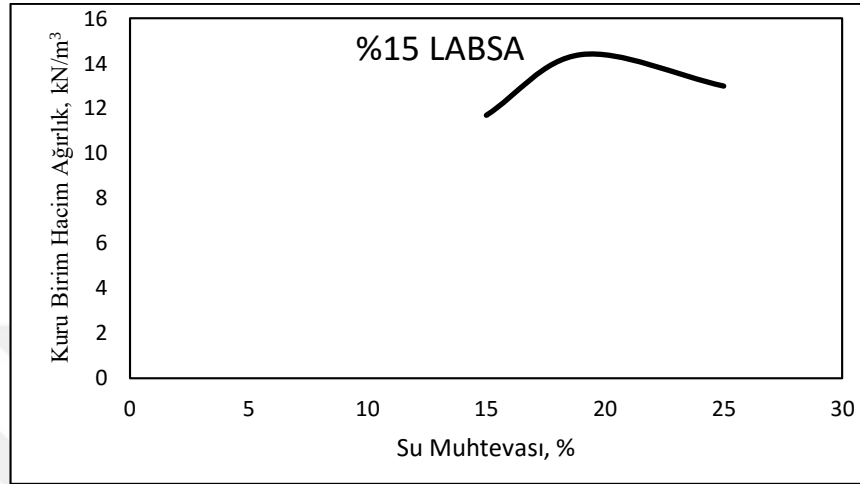
Şekil 4.8. Uçucu külün standart kompaksiyon eğrisi

Çalışma kapsamında uçucu küle, belirlenen oranlarda yüzey aktif maddelerin ilavesi ile hazırlanmış Modifiye edilmiş uçucu küllerin standart kompaksiyon eğrileri çizilmiştir. Şekil 4.9’da %10 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi verilmiştir.



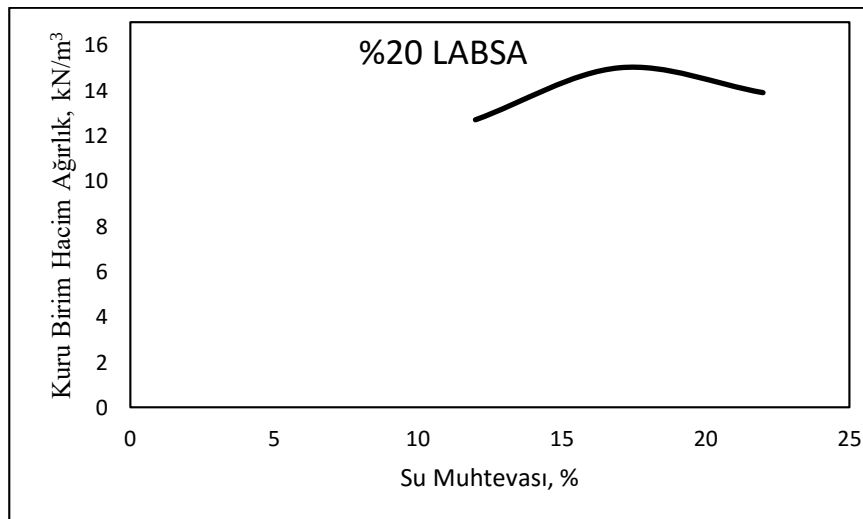
Şekil 4.9. %10 LABSA ile modifiye edilen uçucu külün standart kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.10'da %15 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 4.10. %15 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi

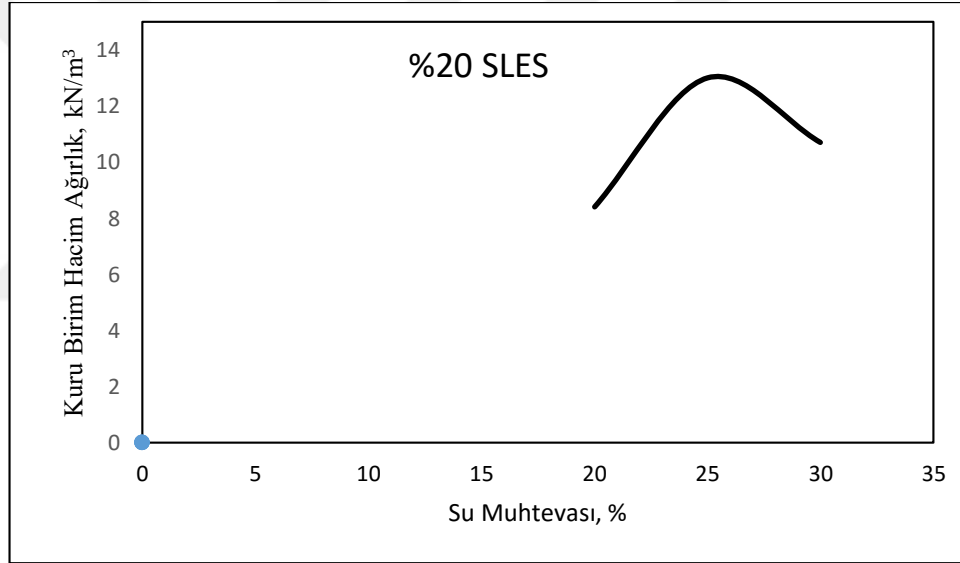
Şekil 4.11'de %20 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi gösterilmektedir. Kullanılan LABSA yüzey aktif madde oranları arttıkça optimum su muhtevası değerinde azalma görülmüştür. Katkı yüzdesi arttıkça optimum su muhtevasında meydana gelen azalma malzemeye kazandırılan hidrofof özelliğin bir sonucudur.



Şekil 4.11. %20 LABSA ile modifiye edilen uçucu küle ait kompaksiyon eğrisi

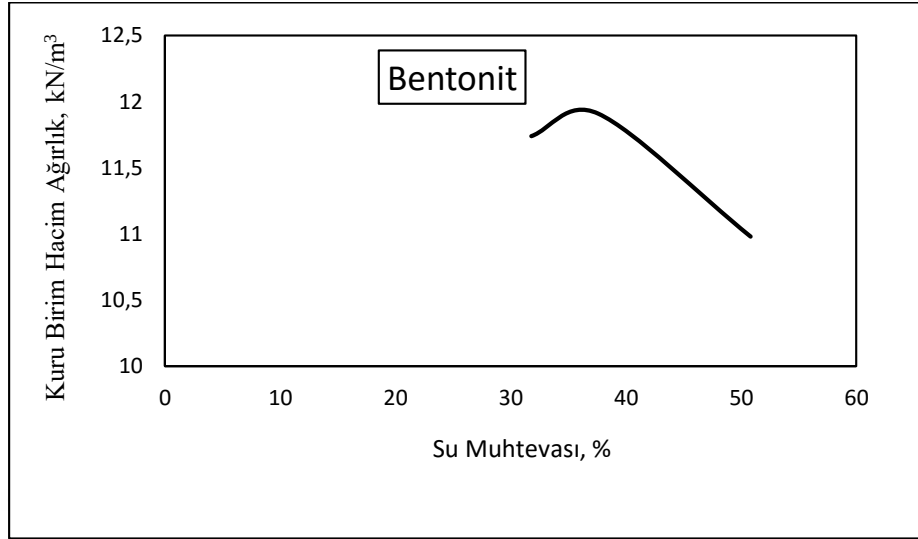
Şekil 4.12’de %20 SLES ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi gösterilmektedir. SLES yüzey aktif madde katkısı ile LABSA yüzey aktif maddenin gösterdiği etkinin benzeri görülmektedir. Uçucu küle ilave edilen % 20 SLES katkısı optimum su muhtevasında azalmaya yol açmıştır. Deneysel çalışma kapsamındaki bu durum, katkılı malzemelerin daha az su kullanılarak sıkıştırılabileceğini göstermektedir.

LABSA yüzey aktif maddeleri ile modifiye edilen numunelerde katkı yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artış olduğu görülmektedir. Katkısız uçucu kül numuneleri ile kıyaslayınca SLES katkısı ile de aynı durum gözlenmiştir.



Şekil 4.12. %20 SLES ile modifiye edilen uçucu küle ait standart kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.13’de bentonit kiline ait standart kompaksiyon eğrisi gösterilmektedir. Kompaksiyon deneyi sonucunda optimum su muhtevası %37, maksimum kuru birim hacim ağırlık 12 kN/m³ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Bentonit kiline ait standart kompaksiyon eğrisi

Sıkıştırılmış şilte ve geosentetik şilte üretiminde, hidrolik geçirimsizlik kalıplarına, numuneler, optimum su içeriğinde yerleştirilmiştir.

4.3. Hidrolik İletkenlik Deney Sonuçları

Uçucu külün modifiye edilerek sıkıştırılmış şilte ve geosentetik şilte üretiminde kullanımının uygunluğu, laboratuvarında yapılan hidrolik iletkenlik deneyleri ile araştırılmıştır. Çizelge 4.9’da hidrolik iletkenlik deney sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.9. Sıkıştırılmış şilte için hidrolik iletkenlik deney sonuçları

		Sıkıştırılmış Şilteler		
Yüzey Aktif Madde Yüzdesi	Malzeme Dağılımı	Bentonit	UK	MUK
-----	50 N/m ²	1,13x10 ⁻⁸	7,73x10 ⁻³	—
	65 N/m ²	8,57x10 ⁻⁹	6,92x10 ⁻³	—
	80 N/m ²	7,05x10 ⁻⁹	5,48x10 ⁻³	—
%10 LABSA	50 N/m ²	—	—	3,29x10 ⁻⁴
	65 N/m ²	—	—	2,94x10 ⁻⁴
	80 N/m ²	—	—	2,60x10 ⁻⁴
%15 LABSA	50 N/m ²	—	—	8,45x10 ⁻⁴
	65 N/m ²	—	—	6,54x10 ⁻⁴
	80 N/m ²	—	—	5,57x10 ⁻⁴
%20 LABSA	50 N/m ²	—	—	9,55x10 ⁻⁴
	65 N/m ²	—	—	5,14x10 ⁻⁴
	80 N/m ²	—	—	3,56x10 ⁻⁴
%20 SLES	50 N/m ²	—	—	1,06x10 ⁻³
	65 N/m ²	—	—	6,67x10 ⁻⁴
	80 N/m ²	—	—	5,60x10 ⁻⁴

Modifiye edilen uçucu kül numunelerinin hidrolik iletkenlik değeri, katkısız uçucu kül numunelerinin hidrolik iletkenlik değerinden daha düşük bulunmuştur. Malzeme dağılımı arttıkça hidrolik iletkenlik değerleri azalmıştır. En düşük hidrolik iletkenlik değerleri %10 LABSA ile Modifiye edilen uçucu küllerden elde edilmiştir.

Geosentetik şilte için yapılan hidrolik iletkenlik deney sonuçları EK 2’de verilmiştir.

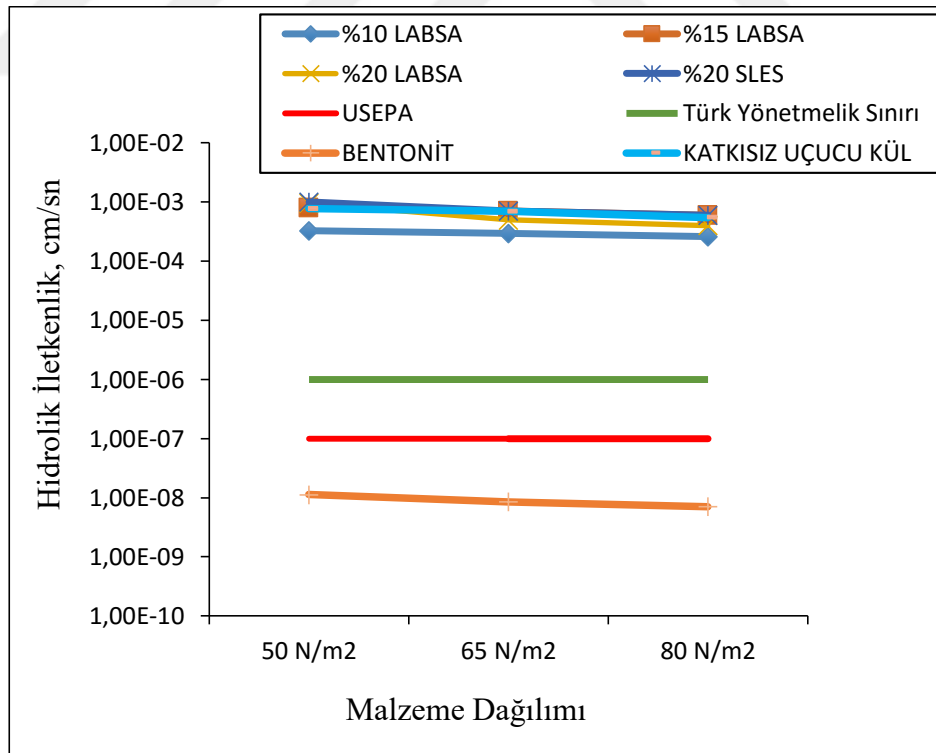
Örnek GCL üzerine yapılan geçirimsizlik deneyi sonucunda ise k değeri 9,52x10⁻⁹ ile 5,04x10⁻⁹ cm/sn aralığında bulunmuştur.

Geosentetik kil şiltelerde, kil içeriği arttıkça hidrolik iletkenlik değerinde azalma beklenmektedir(Ören vd 2015). Ayrıca Çokça vd hidrolik iletkenliğin hem sıkıştırılmış hem de iyileştirilmiş numuneler için kauçuk yüzdesi arttıkça ve bentonit yüzdesi azaldıkça arttığını ifade etmektedirler. Bu durum, sıkıştırılmış şiltelerde yapmış olduğumuz deneylerle doğrulanmıştır. Laboratuvar koşullarında elde edilen geosentetik

şilte örneklerinin bazılarında bu durum geçerli değildir (EK-2). Ören vd de her GCL için bu durumun geçerli olmadığını belirtmektedirler. Bu yüzden katkılar söz konusu olduğunda katkı çeşidine ve miktarına bağlı olarak kil içeriğinin hidrolik iletkenlik üzerinde etkisi görülmeyebilir. Likit limitin (veya Plastisite indisinin) tek başına hidrolik iletkenlik üzerinde etkisi oldukça sınırlıdır (Ören vd 2015). Dolayısıyla hidrolik iletkenliklerin birbirine çok yakın olması bu sonucu doğrular.

4.4. Malzeme Miktarının Etkisi

Modifiye edilmiş uçucu külün sıkıştırılmış şilte olarak kullanımının hidrolik iletkenlik deneyleri ile araştırılmasında, %20, %15, %10 LABSA ve %20 SLES için metrekareye düşen gram (malzeme dağılımı) arttıkça hidrolik iletkenlik değerlerinde (k) azalma gözlemlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Modifiye edilmiş uçucu külün hidrolik iletkenlik değerlerinin malzeme dağılımına bağlı olarak değişimi

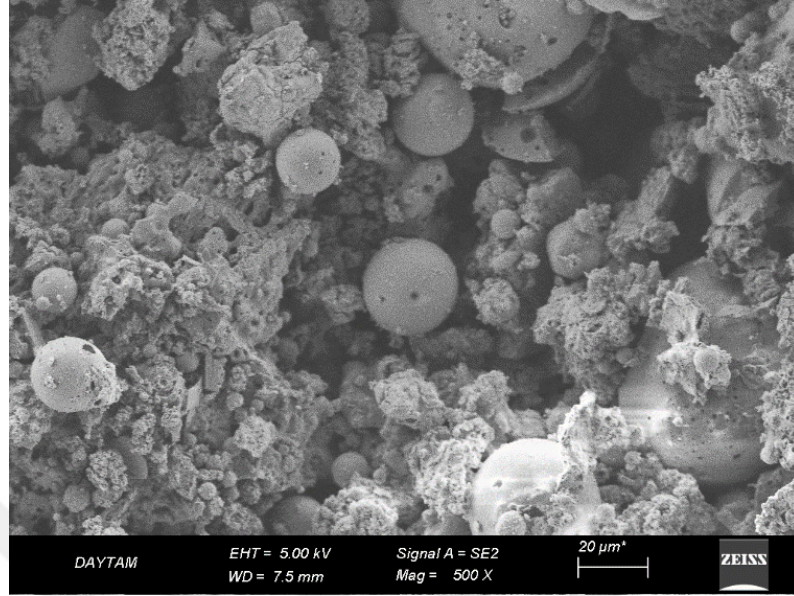
%10 LABSA kullanılarak Modifiye edilmiş uçucu kül numunelerinde, malzeme dağılımı 50 N/m^2 'den 80 N/m^2 'ye çıkarıldığında hidrolik iletkenlik değerinde %20 azalma olmuştur. Bu azalma miktarı %15 LABSA'da %34 ve %20 LABSA'da %63 olarak bulunmuştur. %20 SLES kullanılarak Modifiye edilmiş uçucu kül numunelerinde ise, malzeme dağılımı 50 N/m^2 'den 80 N/m^2 'ye çıkarıldığında hidrolik iletkenlik değerinde %47 azalma meydana gelmiştir. LABSA yüzdesi arttıkça malzeme dağılımının hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi artmıştır.

Çalışma konusuna paralel olarak yapılan bazı araştırmalarda, yapılan hidrolik geçirimsizlik deneylerindeki sonuçların literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

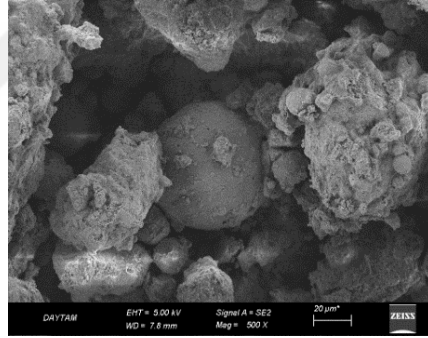
Lorenzetti *et al.* (2005), iki farklı geosentetik kil şilte üzerinde (Bentomat ST ve Claymax 200R (iki polipropilen geotekstil) hidrolik iletkenlik deneyi yapmışlardır. Yaklaşık 6 mm kalınlığında, içerdikleri bentonit miktarları $3,6 \text{ kg/m}^2$ olan GCL'ler ile $1 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ hidrolik iletkenlik değerleri bulmuşlardır. Palmer *et al.* (2000), C sınıfı uçucu kül, kum ve taban külünün %18 su muhtevası ile sıkıştırılarak $3,1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ hidrolik iletkenlik değerlerini elde etmişlerdir. Bouazza (2002), sodyum-bentonit ya da kalsiyum- bentonit bir ya da daha fazla geosentetik tabakalarla bağlanmış ve $2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ - $2 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ hidrolik iletkenlik değerlerini elde etmiştir. Bouazza, geotekstil destekli GCL'lerin hidrolik performansı, ayrıca, malzeme içindeki bentonit dağılımına (kütle/alan) bağlı olduğunu ifade etmişlerdir (Stepniewski *et al.* 2011).

4.6. SEM Görüntüleme Sonuçları

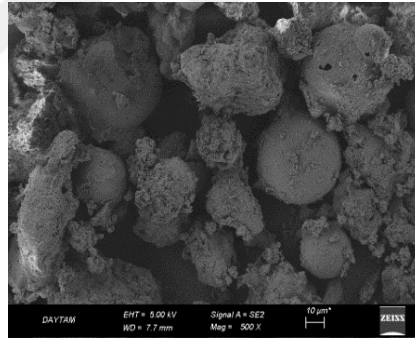
Bu kısımda, uçucu kül numunesi ve modifiye edilen uçucu kül numunelerinin, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (DAYTAM) yapılan SEM analiz sonuçları incelenmiştir. Numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'de görülmektedir.



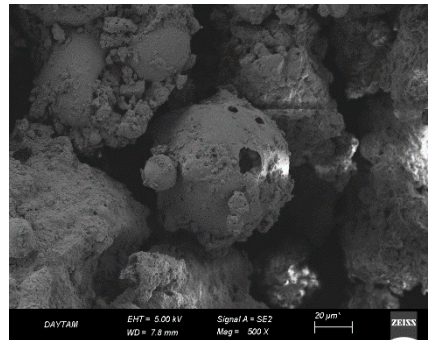
Şekil 4.15. Katkısız uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü



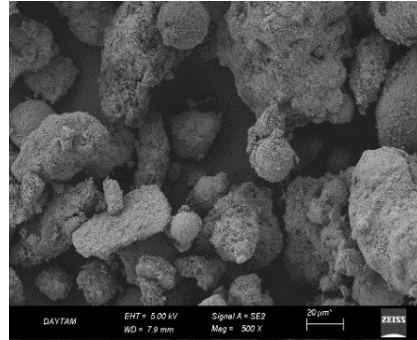
%10 LABSA



%15 LABSA



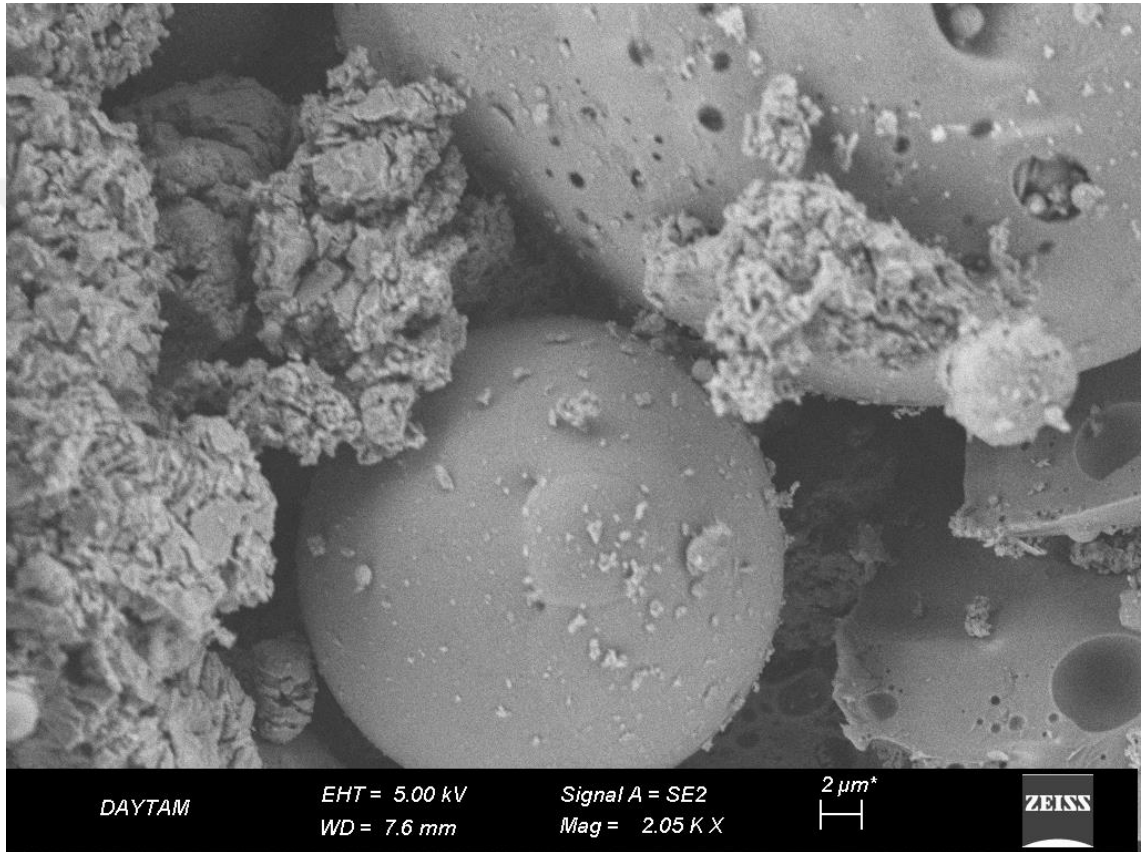
%20 LABSA



%20 SLES

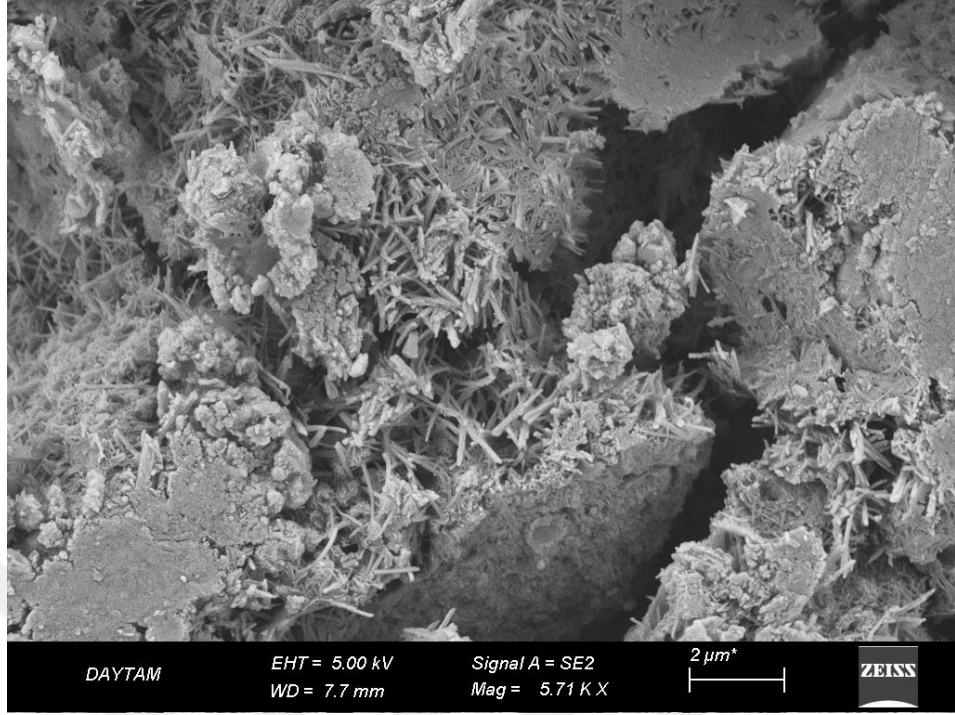
Şekil 4.16. SLES ve LABSA ile modifiye edilen uçucu kül numunelerinin SEM görüntüleri

SLES ve LABSA ile modifiye edilmiş olan uçucu külün, yüzeyinde topaklanma oluşumu SEM analizi ile gözlemlenmiştir. Küçük boyuttaki partiküllerin dış yüzeylerinin birbirlerine yapışması sonucu daha büyük çapta partikül veya tanecikler elde edilmesi olarak adlandırılan aglomerasyon (boyut büyütme) oluşmuştur.

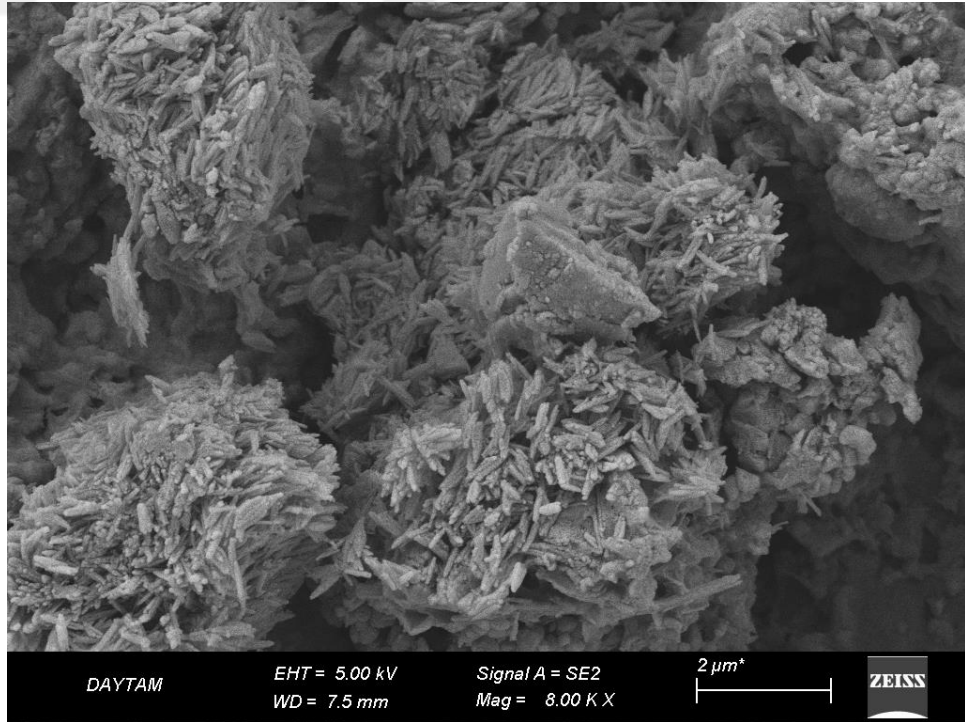


Şekil 4.17. Katkısız uçucu kül numunesinin daha ayrıntılı SEM görüntüsü

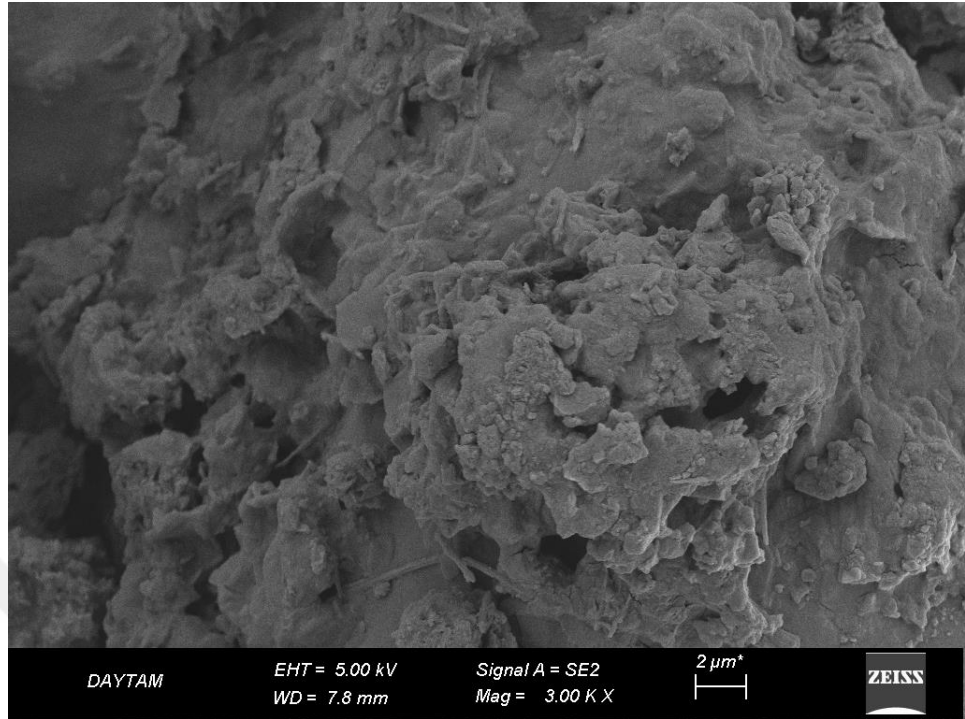
SEM analizi ile uçucu kül numunesinin tanelerinin Şekil 4.17’de görüldüğü gibi yuvarlak olduğu gözlemlenmiştir. Tanelerin yuvarlak olması yapısındaki boşluk oranının fazla olduğunu göstermektedir.



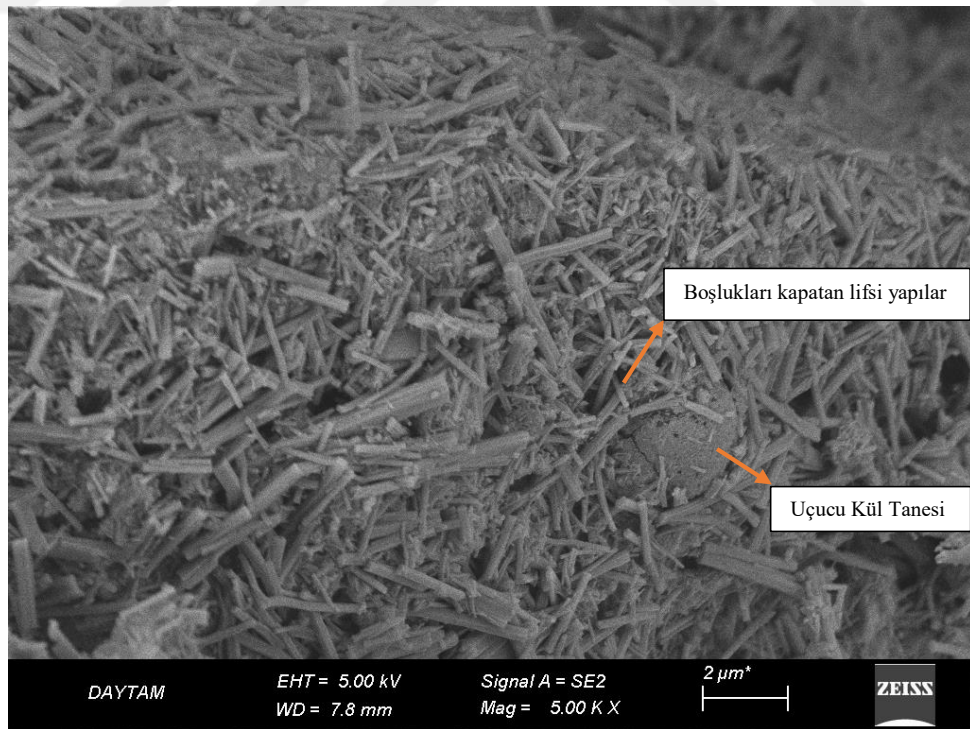
Şekil 4.18. %10 LABSA ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü



Şekil 4.19. %15 LABSA ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü



Şekil 4.20. %20 LABSA ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü



Şekil 4.21. %20 SLES ile modifiye edilmiş uçucu kül numunesinin SEM görüntüsü

Modifiye edilmiş uçucu kül numunelerinde ise Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’da görüldüğü gibi lif gibi uzanan yapılar görülmüştür. Bu yapıların, uçucu kül taneleri arasındaki boşlukları bir köprü görevi görerek kapattığı gözlemlenmiştir. Bu durumda modifiye edilmiş uçucu küllerin yapısındaki boşluklar, tanelerin bu şekli alması ile azalmıştır. Uçucu küllerin modifiye edilmesiyle boşluklar azalmış ve buna bağlı hidrolik iletkenlik azalmıştır.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yüzey aktif madde ile modifiye edilen uçucu külün geçirimsiz şilte olarak kullanılabilirliği laboratuvarında bir seri deney yapılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Modifiye edilmiş uçucu küllerin likit limitleri, uçucu küle göre azalmıştır. Bentonit kilinin ise likit limit değerinin %350, plastik limitinin %55 ve plastisite indisinin %295 olarak bulunması, bentonitin yüksek şişme özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.
- Kullanılan SLES ve LABSA yüzey aktif madde katkısı ile optimum su muhtevası değerinde azalma görülmüştür. LABSA ile modifiye edilen numunelerde katkı yüzdesi arttıkça optimum su muhtevasında meydana gelen azalma, malzemeye kazandırılan hidrofob özelliğin bir sonucudur. Deneysel çalışma kapsamındaki bu durum, katkılı malzemelerin daha az su kullanılarak sıkıştırılabileceğini göstermektedir. LABSA yüzey aktif maddeleri ile modifiye edilen numunelerde katkı yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artış olduğu görülmektedir. Katkısız uçucu kül numuneleri ile kıyaslayınca SLES katkılı numunelerde de aynı durum gözlenmiştir.
- Modifiye edilmiş uçucu külden elde edilen sıkıştırılmış şiltelerde hidrolik geçirimsizlik değerleri 1×10^{-6} cm/sn'den daha büyük olup Türk Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne uygun olmadığı için geçirimsiz şilte özelliği elde edilememiştir. Bentonit üzerinde yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinde, geçirimsizlik katsayısı 1×10^{-8} cm/sn'den daha küçük bulunmuştur. Bentonitin hidrolik iletkenliği hem Türk Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne hem de USEPA Yönetmeliği'ne uygun olduğu için yıllardır katı atık depolama sahalarında geçirimsiz şilte olarak kullanılmaktadır.
- SEM analizi ile SLES ve LABSA ile modifiye edilmiş olan uçucu küllerin yapılarında, lif gibi uzanan yapılar görülmüştür. Bu yapıların, uçucu kül taneleri arasındaki boşlukları bir köprü görevi görerek kapattığı gözlemlenmiştir. Bu durumda modifiye edilmiş uçucu küllerin yapısındaki boşluklar, tanelerin bu şekli alması ile

azalmıştır. Boşlukların azalması malzemenin geçirirmliliğinin azaldığını doğrulamıştır. Uçucu kül örneğinin yüzey özelliklerindeki bir değişiklikten sonra hidrofobik (su sevmeyen) bir yapı haline gelip gelmediğini belirlemek için ıslanabilirlik (temas açısı) deneyinin yapılması önerilebilir.



KAYNAKLAR

- Akbulut, S., 2002. Katı atık depo alanlarının geoteknik tasarımı. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (2), 223-230.
- Akbulut, S., Arasan, S., Kurt, Z.N., 2012. Surfactant Modified Clays Consistency Limits and Contact Angle. Earth Sciences Research Journal, 16 (2), 13-19.
- Akbulut, S., Arasan, S., Kurt, Z.N., Pekdemir, Y., 2012. Yüzey aktif maddeler ile iyileştirilmiş killerin konsolidasyon özellikleri. Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi Programı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Akbulut, S., Arasan, S., Kurt, Z.N., Pekdemir, Y., 2013. Geotechnical properties of some organoclays. Indian Academy of Sciences, 38 (2), 317-329.
- Akbulut, S., Sağlamer, A., 1999. Modern katı atık depolarında kullanılan şilte sistemleri. 2.Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Anonim, 2011a. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Çevre Sağlığı Evsel Ve Kentsel Atıklar, Ankara.
- Anonim, 2011b. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Aile ve Tüketici Hizmetleri Katı Atıklar, Ankara.
- Anonim, 2014a). Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu. <https://www.csb.gov.tr/db/destek/editordosya> (15.08.2017)
- Anonim, 2014b. <https://www.fizikbilimi.gen.tr/yuzey-gerilimi-ve-kilcallik> (06.07.2014)
- Anonim, 2016d. “Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği ”, Resmi Gazete: 14.03.1991 ve 20834 (en son 05.04.2005 tarih ve 25777 sayılı Resmi Gazete’de değişiklik yapılmıştır.)
- Anonim, 2017a. <http://www.panoramio.com/photo/54237095> (15.08.2017)
- Anonim, 2017c. <http://slideplayer.biz.tr/slide/1888708/> (20.04.2017)
- Anonim, 2017g. <http://www.jeosanplastik.com/bentonit.htm>(25.01.2017)
- Anonim, 2017i. <http://www.sernak.com/urun-geotekstil-kece-37>(28.01.2017)
- Anonim, 2017l. <http://ymngrup.com/urunler/geogrid> (22.08.2017)
- Anonim, 2017m. <http://www.cevkainsaat.com/urun/geokompozit/>(28.01.2017)
- Anonim, 2017n. <https://www.teknomaccaferri.com.tr/drenaj->(28.01.2017)
- Anonim, 2017o. Şenol, A., 2013. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması, <http://insaat.cumhuriyet.edu.tr/cevre-geoteknigi-1-ogr-sunumlari/9-sunum-endustriyel-atiklarin-insaat-sektorunde-kullanilabilirliginin-arastirilmesi> (29.01.2017)
- Anonim, 2017ö. <http://w3.balikesir.edu.tr/~sedacan/eski/yuzey.html> (04.02.2017)
- Anonim, 2017r. <http://slideplayer.biz.tr/yuzey-aktif-maddeler> (04.02.2017)
- Anonim, 2017s. (http://www.ramehart.com/surface_tension.htm (07.02.2017))
- Anonim, 2016a. <http://docplayer.biz.tr/5259827-Kati-atiklarin-duzenli-depolanmasi-enes-keles-mart-2015>. (21.06.2016)
- Anonim, 2016b. Afyonkarahisar İli Çevre Hizmetleri Birliği, Birliğin Kuruluşu Ve Ön Hazırlıklar. (04.06.2016)

- Anonim, 2016c. Yeniçerioğlu, M., 1996. Küçük ve orta ölçekli belediyelerde katı atık bertaraf sahaları. Çevre Bakanlığı, <https://tr.scribd.com/document/32970514/Kat%C4%B1-at%C4%B1k-sinop> (04.06.2016)
- Anonim, 2017b. <http://docplayer.biz.tr/2716293-2014-2015-guz-yariyili-yrdradil-koc.html> (20.01.2017)
- Anonim, 2017d. <https://piyasaanketi.com/kati-ve-sivi-atiklardan-gaz-ve-enerji-uretimi>. (24.05.2017)
- Anonim, 2017e. <https://atikyonetimi.ibb.gov.tr/hizmetlerimiz/duzenli-depolama-alanlari> (28.01.2017)
- Anonim, 2017f. Ateş, A., 2016. Katı atıkların düzenli depolama ile kontrolü. Çevre Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi <http://slideplayer.biz.tr> (23.01.2017)
- Anonim, 2017h. <http://www.troyas.com/tr/CalismaAlanlarimiz/Geosentetikler/GCL/Foto-Galeri.html> (25.01.2017)
- Anonim, 2017ı. <http://www.istanbulteknik.info.tr/cozum/18/--geoseal-gcl-kil-esasli-geomembran.aspx> (24.01.2017)
- Anonim, 2017j. <http://www.goksin.com.tr/fethiye-kati-atik-duzenli-depolama-tesisi> (22.08.2017)
- Anonim, 2017k. <https://turkish.alibaba.com/product-detail/geonet-turf-cell-used-in-construction> (22.08.2017)
- Anonim, 2017p. Morgil, İ., 2017. http://www.kimyaegitimi.org/sites/default/files/mufredat/yuzey_aktif_maddeler.pdf (04.02.2017)
- Anonim, 2017ş. <https://glnryrdmc.wordpress.com/2011/04/29/yuzey-gerilimi/> (07.02.2017)
- Anonymous, 1993. “Report of Workshop Geosynthetic Clay Liners” Solid Waste and Emergency Response (5306W). EPA600/R-93/171, United States Environmental Protection Agency (USEPA), Austin Texas.
- Anonymous, 2005. “Solid Waste Disposal Facility Criteria” Solid Waste and Emergency Response (5305W). EPA530-K-05-015, United States Environmental Protection Agency (USEPA), Washington, DC.
- Anonymous, 2001. “Geosynthetic Clay Liners Used in Municipal Solid Waste Landfills” Solid Waste and Emergency Response (5306W). EPA530-F-97-002, United States Environmental Protection Agency (USEPA), Washington, DC.
- Arasan, S. ve İkiz, H., 2015. Polimer, kimyasal ve katkıları ile modifiye edilmiş uçucu küllerin katı atık depolama alanı şiltesi olarak kullanılabilirliği. 6.Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1), 193-203.
- ASTM D 4318-00, 2000. Standart Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 5856-95, 1995. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 698-00, 2000. Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM West Conshohocken, PA.

- Bağcı, F., 2007. Geosentetiklerle Projelendirme Ve Zemin-Geosentetik Arayüzey Sürtünme Açılarının Değişik Geosentetik ve Zemin Türleri İçin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Bornova-İzmir.
- Banerjee, S.S., Joshi, M.V., Jayaram, R.V., 2005. Treatment of oil spills using organo-fly ash. *Desalination* 195, 32-39.
- Bouazza, A., 2001. Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 3-17.
- Brian, G.P., Tuncer B.E., Craig, H.B., 2000. Liners For Waste Containment Constructed with Class F and C Fly Ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 76 (2-3), 193-216.
- Chu, Shi-Chih., and Kao, Hsiang-Sheng., 1993. A Study of Engineering Properties of A Clay Modified By Fly Ash and Slag. *Fly Ash For Soil Improvement Asce Geotechnical Special Publication*, 36, 89-99.
- Çimen, Ö. ve Dereli, B., 2014. Bentonitin mühendislik özelliklerine mikronize kolemanitin etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 4 (2), 12-17.
- Çokça, E., and Yılmaz, Z., 2004. Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material. *Waste Management*, 24 (2), 153-164.
- Daniel, D. E. and Wu, Y. K., 1993. Compacted clay liners and covers for sites. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (2), 223-237.
- Demir, S. ve Kılıç, M., 2010. Şişen zeminlerin tanımlanması ve zemin iyileştirme yöntemleri. *GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 95-104.
- Erdal, Ü., 2006. Katı Atık Düzenli Depolama Alanlarının Seçiminde Jeolojik Faktörlerin Maliyetlere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Esener, A.B., 2005. Toprak Dolgu Yapıların Projelendirilmesinde Geoteknik Çalışmalar. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Fatholahzadeh, M., 2013. Biyopolimerlerle İyileştirilmiş F Sınıfı Uçucu Küllerin Geçirimsiz Şilte Olarak Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Gerolymos, N. and Yasar, E., 2014. Leakage performance of the GM + CCL liner system for the MSW landfill, *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, 1-9.
- Ghabaee, Selda., 2015. Kireç İle Stabilize Edilmiş Bentonitin Kür Süresinin Mukavemet Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gleason, M.H., Daniel, D.E., Eykholt, G.R., (1997) "Calcium And Sodium Bentonite For Hydraulic Containment Applications", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 123 (5), 438-445.
- Gül, Ü.D., 2012. Mikrobiyel Yüzey aktif maddeler ve çevresel uygulamalarda kullanımı. *Mikrobiyoloji Dergisi*, 10 (2), 45-55.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., 2005. Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, , Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Güney, Y., Koparal, S. and Aydılek, A.H., 2008. Sepiolite as an alternative liner material in municipal solid waste landfills. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*. 134, 1166-1180.

- Kurt, Z.N., 2009. Yüzey Aktif Madde İle Muamele Edilmiş Kilin Mukavemet Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Madalena, B., Nathalie, T.F., Maubeugec, K.V., 2006. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (3), 139-155.
- Maher, M.H., Butziger, J.M., Dısalvo, D.L., Oweis, I.S., 1993. Lime Sludge Amended Fly Ash For Utilization As An Engineering Material, Fly Ash For Soil Improvement, *Geotechnical Special Publication*, 36, 73-88.
- Naik, H.K., Mishra, M.K., Rao Karanam, U.M., Deb, D., 2009. Evaluation of the role of a cationic surfactant on the flow characteristics of fly ash slurry. *Journal of Hazardous Materials*, 169, 1134–1140.
- Öksüz, K., 2006. Tezi Afsin Elbistan Termik Santrali uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Ören, A.H. ve Demirkıran, H., 2015. Geosentetik kil örtülerin hidrolik iletkenliklerinin laboratuvarında belirlenmesi üzerine bir çalışma. *İMO Teknik Dergi*, 7191-7213, Yazı 440.
- Petrov, R.J., Rowe, R.K. (Member ASCE), Quigley, R.M., 1997. Selected Factors Influencing GCL Hydraulic Conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (8).
- Qian, G., Zhang, H., Zhang, X., Chui, P.C., 2005. Modification of MSW fly ash by anionic chelating surfactant. *Journal of Hazardous Materials*, 251–258.
- Sivapullaiah, P.V. and Baig Ali Arif, M., 2011. Role of gypsum in the strength development of fly ashes with lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2).
- Stępniewski, W., Widomski M.K., and Horn, R., 2011. Hydraulic conductivity and landfill construction. *Developments in hydraulic conductivity research*, 250-270.
- Van Der Merwe, E.M., Mathebula, C.L., Prinsloo, L.C., 2014. Characterization of the surface and physical properties of South African coal fly ash modified by sodium lauryl sulphate (SLS) for applications in PVC composites. *Powder Technology*, 266, 70–78.
- Visa, M., Chelaru, A.M., 2014. Hydrothermally modified fly ash for heavy metals and dyes removal in advanced wastewater treatment. *Applied Surface Science*, 303, 14–22.
- Volkan, S., 2006. Afşin - Elbistan Termik Santrali uçucu küllerinden yanmamış karbonun geri kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi Adana.
- Weimin, M. Y., Zhang, F., Chen, B., Chen, Y. G., Wang, Q ., & Cui, Y.J. 2014. “Effects Of Salt Solutions On The Hydro-Mechanical Behavior Of Compacted Gmz01 Bentonite”, *Environmental Earth Sciences* , 72 (7), 2621-2630.
- Yılmaz, G., 2007. Katı Atık Depolarında Oluşan Çöp Sızıntı Sularının Kil Şiltelerin Geçirirliğine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Zabielska-Adamska, K., 2011. Fly ash as a barrier material. *Geo-Frontiers*, 947-956.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Olur’da doğdu. İlkokulu ve ortaokulu Kültür Kurumu İlköğretim okulunda, liseyi Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi’nde okudu. Lisans eğitimine 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı. Üniversiteden 2014 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

