

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HALIÇ DİP TARAMA ÇAMURU VE MADEN ATIĞININ GEOTEKSTİL TÜP
İLE SUSUZLAŞTIRILMASI VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ümit KARADOĞAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

OCAK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HALIÇ DİP TARAMA ÇAMURU VE MADEN ATIĞININ GEOTEKSTİL TÜP
İLE SUSUZLAŞTIRILMASI VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Ümit KARADOĞAN
(501132302)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMÜR

OCAK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501132302 numaralı Doktora Öğrencisi Ümit KARADOĞAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HALIÇ DİP TARAMA ÇAMURU VE MADEN ATIGININ GEOTEKSTİL TÜP İLE SUSUZLAŞTIRILMASI VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail KOYUNCU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **06.12.2020**
Savunma Tarihi : **11.01.2021**





Eşime,



ÖNSÖZ

Ülkemizde çeşitli yerlerde yüksek su içeriğine sahip tonlarca atık malzeme her gün oluşmaktadır. Bu atık malzemelerin ekonomik bir yöntemle susuzlaştırılması ve yeniden kullanımı ekonomik ve çevresel risk bakımından önemli kazanımlar sağlayacaktır. Geotekstil ve poliakrilamid kullanılarak yapılan susuzlaştırma yöntemi son yıllarda araştırmacılar tarafından önemli bir inceleme alanı olarak görünmektedir. Bu çalışmada iki farklı oluşumla meydana gelen yüksek su içeriğine sahip Haliç tarama çamuru ve maden atığının bahsi geçen yöntemle susuzlaştırılma performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için ilk olarak hızlı susuzlaştırma deneyi için kullanılan deney aleti modifiye edilmiş olup daha hassas ölçüm alması sağlanmıştır. 3 boyutlu susuzlaştırma deneylerinin yapılabilmesi için deney düzenekleri kurulmuştur. Bu çalışmanın diğer bir amacı da İTÜ Geoteknik Laboratuvarı atık çamur susuzlaştırma çalışmaları için bir alt yapının kurulmasıdır.

Doktora tez çalışmasının her aşamasında desteğini bir an olsun esirgemeyen, bilgi ve deneyimleriyle her zaman yanımda olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Berrak Teymür'a, laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen Dr. Gökhan Çevikbilen'e, MEMTEK Laboratuvarında yaptığım çalışmalarda desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. İsmail Koyuncu'ya, MEMTEK Laboratuvarında yapılan deneylerde yardımını esirgemeyen Araş. Gör. Sevde Korkut'a, 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı çerçevesinde yapılan burs desteği için TÜBİTAK'a, her zaman yanımda olan kıymetli dostlarıma ve en önemlisi bu günlere gelmemde maddi ve manevi en büyük paya sahip candan öte aileme sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2020

Ümit Karadoğan
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Tezin Kapsamı	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1 Geotekstiller	7
2.1.1 Geotekstillerin malzeme yapısı	8
2.1.2 Geotekstillerin sınıflandırılması	9
2.1.2.1 Örgülü geotekstiller	9
2.1.2.2 Örgüsüz geotekstiller	10
2.1.3 Geotekstillerin genel kullanım amaçları	11
2.1.3.1 Ayırma	11
2.1.3.2 Güçlendirme	11
2.1.3.3 Drenaj	12
2.1.3.4 Filtrasyon	12
2.2 Geotekstil Tüpler	13
2.2.1 Geotekstil tüplerle susuzlaştırma aşamaları	15
2.3 Polimerik Flokülantlar (Polielektrolitler)	18
2.3.1 Katyonik flokülantlar	20
2.3.2 Anyonik flokülantlar	20
2.3.3 İyonik olmayan flokülantlar	21
2.4 Flokülasyon	21
2.4.1 Polimer adsorpsiyonu	22
2.4.1.1 Elektrostatik etkileşim	23
2.4.1.2 Hidrojen bağı	23
2.4.1.3 Hidrofobik etkileşim	23
2.4.1.4 İyonik bağ	23
2.4.2 Köprüleme mekanizması	23
2.4.3 Yük nötralizasyon mekanizması	24
2.5 Geotekstil Tüp ile Susuzlaştırma	26
3. MALZEME VE YÖNTEM	35
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	35
3.1.1 Haliç dip tarama malzemesi ve geoteknik özelliği	35

3.1.1.1 Haliç dip tarama çalışması ve temini	40
3.1.1.2 Haliç dip tarama malzemesinin geoteknik özellikleri	41
3.1.2 Maden atığı ve geoteknik özelliği	43
3.1.2.1 Maden atığının geoteknik özellikleri.....	45
3.1.3 Geotekstil	47
3.1.4 Poliakrilamidler	48
3.2 Deneyisel Çalışmada Kullanılan Yöntemler	49
3.2.1 Zeta Potansiyeli	49
3.2.2 Jar deneyi.....	50
3.2.3 Dane boyutu ölçümü	52
3.2.4 Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT).....	53
3.2.5 Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT)	55
3.2.6 Morfolojik analizler.....	56
3.2.7 Kimyasal analizler.....	57
4. DENEY SONUÇLARI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	59
4.1 Haliç Dip Tarama Çamuru	59
4.1.1 Zeta potansiyeli ölçümü	59
4.1.2 Jar deneyi (Flokülasyon)	60
4.1.3 Dane boyutu ölçümleri	62
4.1.4 Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT).....	63
4.1.4 Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT)	66
4.1.5 Mühendislik parametrelerinin belirlenmesi	68
4.1.5.1 Konsolidasyon deneyi	68
4.1.5.2 Üç eksenli basınç deneyi (konsolidasyonsuz- drenajsız, (UU)	72
4.1.6 Morfolojik analiz.....	74
4.1.7 Kimyasal analizler.....	76
4.1.7.1 Fourier-dönüşümlü infrared spektroskopi (FTIR).....	76
4.1.7.2 Sızıntı suyu analizi	79
4.1.7 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	79
4.2 Maden Atığı.....	85
4.2.1 Zeta potansiyeli ölçümü	85
4.2.2 Jar deneyi (Flokülasyon)	85
4.2.3 Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT).....	88
4.2.4 Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT)	90
4.2.5 Mühendislik parametrelerinin belirlenmesi	95
4.2.5.1 Katkısız GDT sonrası oluşan filtre kekinin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi.....	95
4.2.5.2 Katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi.....	99
4.2.6 Morfolojik analiz.....	101
4.2.7 Kimyasal analizler.....	103
4.2.7.1 Fourier-dönüşümlü infrared spektroskopi (FTIR).....	103
4.2.7.2 Sızıntı suyunun analizi	105
4.2.8 Sonuçların değerlendirilmesi	106
5. SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ	125

KISALTMALAR

AOS	: Görünen açıklık boyutu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CD	: Yük yoğunluğu
EDL	: Elektrikli çift katman
EPA	: Environmental Protection Agency
FHT	: Düşen seviyeli test
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spektrophotometre
GDT	: Geotekstil susuzlaştırma deneyi
HBT	: Asılı torba deneyi
MH	: Yüksek plastisiteli silt
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
PA	: Poliamid
PAM	: Poliakrilamid
PE	: Polietilen
PET	: Polyester
PFT	: Basınç filtrasyon deneyi
pH	: Hidrojen Potansiyeli
PP	: Polipropilen
PPM	: Milyon başına parça
PVC	: Polivinil klorid
RDT	: Hızlı susuzlaştırma deneyi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SM	: Siltli kum
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
UU	: Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli basınç deneyi
UV	: Ultraviyole
WHO	: World Health Organization



SEMBOLLER

ϵ	: Birim şekil değıştirme
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
$\gamma_{k,max}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
A_n	: Anyonik poliakrilamid
C_n	: Katyonik poliakrilamid
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
G_s	: Dane özgül ağırlığı
H	: Isı miktarı
k	: Permeabilite katsayısı
O_{50}	: Geotekstilin %50'ye karşılık gelen gözenek açıklığı
O_{95}	: Geotekstilin %95'e karşılık gelen gözenek açıklığı
q	: Faz yükü
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
t	: Zaman
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
W_t	: Atom ağırlığı
Δl	: Yatay yerdeğıştirme
$\Delta \sigma$	: Deviatör gerilmesi
ρ	: Yoğunluk
σ	: Normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Polimer çeşidine göre geotekstil özellikleri.	8
Çizelge 2.2 : Araştırmacılar tarafından yapılan susuzlaştırma çalışmalarında filtre seçimi ile ilgili sonuçlar.	30
Çizelge 2.3 : Geotekstil tüp kullanımı ile susuzlaştırmanın diğer yöntemlere göre maliyet karşılaştırması.	32
Çizelge 2.4 : Geotekstil tüp kullanımı ile susuzlaştırmanın diğer yöntemlere göre katı madde ve çalışma alanı yönünden kıyaslanması.	32
Çizelge 2.5 : Geotekstil tüp kullanımı ile susuzlaştırmanın diğer yöntemlere göre çalışma alanı yönünden kıyaslanması.	33
Çizelge 3.1 : Haliç dip tarama çamurunun endeks özellikleri.	42
Çizelge 3.2 : Haliç dip tarama çamuruna ait elementel analiz sonucu.	43
Çizelge 3.3 : Maden atığına ait endeks özellikleri.	46
Çizelge 3.4 : Maden atığının elementel analiz sonucu.	47
Çizelge 3.5 : Geotekstil malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri.	48
Çizelge 3.6 : Poliakrilamidlerin özellikleri.	48
Çizelge 4.1 : Haliç dip tarama çamurunda pH'a bağlı zeta potansiyeli ölçümü.	59
Çizelge 4.2 : Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT) sonrası zeta potansiyeli değerleri. .	65
Çizelge 4.3 : Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonuçları.	66
Çizelge 4.4 : Haliç dip tarama çamurunun elementel analiz sonucu.	74
Çizelge 4.5 : Susuzlaştırma işlemi sonucunda sızan suyun analiz sonuçları.	79
Çizelge 4.6 : Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonuçları.	91
Çizelge 4.7 : Maden atığının elementel analiz sonucu.	102
Çizelge 4.8 : Filtre sızıntı suyunun su kalitesi parametreleri ve standartlar.	106



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : a) Örgülü monofilament, b) Örgülü multifilament, c) Şerit tip örgülü. ...	10
Şekil 2.2 : a) Örgüsüz geotekstil – Isıl birleşim, b) Örgüsüz geotekstil – Mekanik birleşim, c) Örgüsüz geotekstil – Kimyasal birleşim.....	10
Şekil 2.3 : Geotekstilin ayırma amacıyla kullanımı.	11
Şekil 2.4 : Geotekstilin drenaj amacıyla kullanımı.....	12
Şekil 2.5 : Geotekstilin filtrasyon amacıyla kullanımı.	13
Şekil 2.6 : Geotekstil tüpler.	14
Şekil 2.7 : Geotekstil tüplerin dolum aşaması.	16
Şekil 2.8 : Susuzlaştırma aşaması.....	17
Şekil 2.9 : Konsolidasyon sonrası katı malzeme.	17
Şekil 2.10 : Partikül yüzeyine polimerin absorbe olmasıyla oluşan polimer zinciri.	22
Şekil 2.11 : Köprüleme Mekanizması.	24
Şekil 2.12 : Yük nötralizasyonu.....	25
Şekil 2.13 : Çift polimer flokülasyonu.	25
Şekil 2.14 : Susuzlaştırmada kullanılan deney düzenekleri a) FHT, b)FHT/PFT, c) HBT, d) GDT.....	29
Şekil 2.15 : GDT Deneyleri sırasında torba dışına sızan suyun görünümü.	31
Şekil 3.1 : Haliç'in görünümü.	36
Şekil 3.2 : Tarama sürecinde (1997-99) boru hattı güzergahı ve pompa istasyon yerleri.	37
Şekil 3.3 : Haliç tarama ve çamur uzaklaştırma ile ilgili teknik bilgiler.	39
Şekil 3.4 : Haliç'te yapılan taramanın gerçekleştiği yerin uydu görüntüsü.....	40
Şekil 3.5 : Haliç dip taramasının gerçekleştiği alanda çekilen fotoğraflar.	40
Şekil 3.6 : Haliç dip tarama çamuruna ait granülometri eğrisi.	42
Şekil 3.7 : Haliç dip tarama çamuruna ait 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü. ...	43
Şekil 3.8 : Maden atığının temin edildiği yerin uydu görüntüsü.	44
Şekil 3.9 : Maden sahasında atık malzemelerin biriktirilmesi ile oluşan suni göl. ...	45
Şekil 3.10 : Maden atığına ait granülometri eğrisi.	46
Şekil 3.11 : Maden atığına ait 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.	47
Şekil 3.12 : Sıvı içinde bulunan parçacığın şematik gösterimi.....	50
Şekil 3.13 : Jar deneyinin yapıldığı deney aleti (Velp JLT6 marka Jar deneyi cihazı).....	51
Şekil 3.14 : a) Bulanıklık cihazı (HACH 2100P Turbidimetre) b) çökeltme boyunun cetvel yardımı ile ölçümü.	52
Şekil 3.15 : Dane boyutu dağılımı ölçüm cihazı.....	52
Şekil 3.16 : Hızlı Susuzlaştırma Deney (RDT) düzeneği.	54
Şekil 3.17 : Hızlı susuzlaştırma deney (RDT) düzeneğinin şematik gösterimi.	55
Şekil 3.18 : Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) düzeneği.....	56
Şekil 3.19 : a) FEI Quanta FEG 200 SEM-EDS cihazı ve b) numunelerin hazırlanışı.....	57
Şekil 3.20 : Perkin Elmer - Spectrum 100 FTIR-ATR cihazı.	58

Şekil 3.21 : IC, Dionex ICS-3000 cihazı.	58
Şekil 4.1 : 13 farklı poliakrilamid kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.	60
Şekil 4.2 : Flokülasyon deneyi a) öncesi ve b) sonrası görünümü.	61
Şekil 4.3 : A4 poliakrilamidiyle kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.	61
Şekil 4.4 : Haliç dip tarama çamurunun dane boyutu dağılımı.	62
Şekil 4.5 : Haliç dip tarama çamurunun A4 poliakrimidinin farklı dozajlar kullanılarak yapılan partikül boyutu dağılımı.	63
Şekil 4.6 : Haliç dip tarama çamurunun A4 poliakrilamid kullanılarak yapılan RDT sonucu.	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 4.7 : RDT sonrası oluşan a) filtre keki ve b) sızıntı suyu görüntüleri.	64
Şekil 4.8 : Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT) sonucunda oluşan filtre kekin su muhtevası ve sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı yüzdesi.	65
Şekil 4.9 : GDT sonucu a) katkısız ve b) katkılı.	67
Şekil 4.10 : Haliç tarama çamurunun ham hali üzerinde yapılan konsolidasyon deneyi sıkışma yüzdesi - normal gerilme.	69
Şekil 4.11 : Haliç dip tarama çamurunun konsolidasyon katsayısı (cv).	69
Şekil 4.12 : Haliç dip tarama çamurunun farklı gerilmelerde hesaplanan permeabilite katsayısı.	70
Şekil 4.13 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin konsolidasyon deneyi sıkışma yüzdesi - normal gerilme grafığı.	71
Şekil 4.14 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin farklı basınçlarda hesaplanan konsolidasyon katsayısı.	71
Şekil 4.15 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin farklı gerilmeler altında hesaplanan permeabilite katsayısı.	72
Şekil 4.16 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası a) geotekstil tüp içerisinde çıkarılan örselenmemiş numune ve b) üç eksenli basınç deneyi cihazı.	73
Şekil 4.17 : Üç eksenli basınç deneyine ait deviatör gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri.	73
Şekil 4.18 : Haliç dip tarama çamurunun a, b, c) poliakrilamid katkısız ve d, e, f) poliakrilamid katkılı SEM görüntüleri.	75
Şekil 4.19 : Haliç dip tarama çamurunun a) A4 ve b) C1 poliakrilamidleri ile yapılan flokülasyonunun supernatant fazın FTIR spektrumu.	77
Şekil 4.20 : Haliç dip tarama çamurunun a) A4 ve b) C1 poliakrilamidleri ile flokülasyonun çamur fazına ait FTIR spektrumu.	78
Şekil 4.21 : Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırılmasının şematik gösterimi. ...	82
Şekil 4.22 : Geotekstil tüp ile susuzlaştırmada hacimce dane çapı dağılımının değişimi.	83
Şekil 4.23 : Sedde imalatında Haliç dip tarama çamuru dolgulu geoekstil tüp kullanımı.	85
Şekil 4.24 : 13 farklı poliakrilamid kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.	86
Şekil 4.25 : Flokülasyon deneyi a) öncesi ve b) sonrası görünümü.	86
Şekil 4.26 : A5 poliakrilamidiyle kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.	87
Şekil 4.27 : Maden atığının A5 poliakrilamid kullanılarak yapılan RDT sonucu.	88

Şekil 4.28 : RDT sonucunda oluşan filtre kekin su muhtevası - sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı yüzdesi.	89
Şekil 4.29 : RDT sonrası oluşan a) filtre keki ve b) sızıntı suyu görüntüleri.	89
Şekil 4.30 : GDT sonucu a) katkısız b) katkılı görüntüleri.....	91
Şekil 4.31 : Maden atığı katkısız GDT sonrasında sızan katı malzemenin dane boyutu dağılımı.	92
Şekil 4.32 : Maden atığının sızan katı kısmının A5 poliakrilamid kullanılarak yapılan RDT sonucu.	94
Şekil 4.33 : RDT sonucunda oluşan filtre kekin su muhtevası -sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı yüzdesi.	94
Şekil 4.34 : RDT sonunda oluşan a) filtre kek ve b) sızıntı suyu görüntüleri.	95
Şekil 4.35 : Standart proktor deneyinin kuru birim hacim ağırlığı- su muhtevası grafığı.	96
Şekil 4.36 : Yaş CBR deneyinin yük – batma miktarı grafığı.	96
Şekil 4.37 : Kayma gerilmesi ve yatay yer değiştirme grafığı.	97
Şekil 4.38 : Kayma gerilmesi ve normal gerilme grafığı.	98
Şekil 4.39 : Kayma gerilmesi ve yatay yer değiştirme grafığı.	98
Şekil 4.40 : Kayma gerilmesi ve normal gerilme grafığı.	99
Şekil 4.41 : Kayma gerilmesi - yatay yer değiştirme grafığı.	100
Şekil 4.42 : Kayma gerilmesi - normal gerilme grafığı.	100
Şekil 4.43 : Maden atığının a, b, c) poliakrilamid katkısız ve d, e, f) poliakrilamid katkılı SEM görüntüleri.	101
Şekil 4.44 : Maden atığının A5 ve C1 poliakrilamidleri ile yapılan flokülasyonunun supernatant fazın FTIR spektrumu.	103
Şekil 4.45 : Maden atığının a) A5 ve b) C1 poliakrilamidleri ile flokülasyonun çamur fazına ait FTIR spektrumu..	104
Şekil 4.46 : Susuzlaştırma alternatifleri a) Tek geotekstil tüplü seçenek b) Çift geotekstil tüplü seçenek.	108



HALİÇ DİP TARAMA ÇAMURU VE MADEN ATIĞININ GEOTEKSTİL TÜP İLE SUSUZLAŞTIRILMASI VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Sanayi ve kentleşmenin artmasıyla beraber birçok sektörde yüksek su muhtevasına sahip tarama çamurları ve endüstriyel atıklar oluşmaktadır. Bu atık malzemelerin su içeriğinin azaltılarak bertaraf edilmesi ve/veya yeniden kullanılması hem ekonomik hem de çevre sağlığı açısından büyük kazanımlar sağlamaktadır. Ülkemizde ve dünyada giderek artan miktarlarda oluşan bu yüksek su içeriğindeki atık malzemelerin susuzlaştırılması birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Araştırmalar özellikle geotekstil ve poliakrilamid kullanılarak yapılan susuzlaştırma yöntemi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu yöntemde, geotekstil katı ve sıvının ayrılması için filtre görevi görürken poliakrilamid küçük daneleri bir araya getirerek oluşan floklarının daha hızlı çökmesini sağlamaktadır. Literatürde bu yöntem çoğunlukla uçucu küller olmak üzere aynı zamanda tarama çamurları, mandıra lagünleri ve endüstriyel atıklar için kullanılmıştır. Ülkemizde son yıllarda deniz ve nehirlerin kirliliğinin azaltılması için tarama yapılarak çamur çıkarılmaktadır. Tarama sonucu ortaya çıkan atık malzemeler bertaraf için önceden belirlenen alanlara depolanmaktadır. Aynı zamanda çoğu kez denizlerden çıkarılan tarama malzemeleri tarama alanından uzağa fakat yine denize boşaltılmaktadır. Bu şekilde yapılan bertaraf sonucunda deniz ekosistemi telafisi zor bir zarar görmektedir. Dolayısıyla bu malzemelerin su içeriklerinin azaltılması ve yeniden kullanım alanlarının belirlenmesi ülke ekonomisi ve çevre riskleri açısından büyük önem arz etmektedir. Literatüre bakıldığında poliakrilamid katkılı yapılan geotekstil tüp ile susuzlaştırma çalışmalarında tüp içerisine doldurulan çamurun çok kısa bir süre içerisinde hacminde %80'lere varan azalmalar olmuştur. Dahası geotekstilden sızan suyun tekrar kullanımının veya herhangi bir arıtma yapılmadan doğal ortama doğrudan deşarjının mümkün olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, İstanbul ilinde bulunan ve doğal liman olan Haliç'ten alınan dip tarama çamuru ve İstanbul Kemerburgaz'da bulunan agrega madeninden alınan maden atığının geotekstil ve poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırılması ve yeniden kullanılması incelenmiştir. Bu kapsamda 11 anyonik ve 2 katyonik olmak üzere toplam 13 farklı moleküler ağırlığa sahip poliakrilamid ve susuzlaştırma uygulamalarında kullanılan bir geotekstil kullanılmıştır. Her atık malzemenin flokülasyonu için malzemeye özgü bir poliakrilamid bulunmaktadır. Bu yüzden Haliç tarama çamuru ve maden atığı için uygun poliakrilamid ve optimum dozajın belirlenmesi için Jar deneyi yapılmıştır. İlk olarak iki atık malzemenin de İTÜ Geoteknik Laboratuvarlarında endeks özellikleri bulunmuştur. Burada elek, hidrometre analizi, Atterberg kıvam limitleri deneyi ve piknometre deneyi yapılmıştır. Daha sonra, zeta potansiyel

ölçümleri İTÜ MEM-TEK laboratuvarında yapılmıştır. Malzemenin zeta potansiyeli topaklaşma (flokülasyon) işleminin verimini belirleyen bir parametredir. Değer sıfıra ne kadar yakın olursa flokülant yani poliakrilamid verimi o kadar yüksek olmaktadır. Zeta potansiyeli karışımların pH değerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu yüzden takip edilmesi ve malzemenin farklı pH değerlerindeki yük dağılımı davranışının ölçülmesi gerekmektedir. Çalışmada kullanılan malzemelerde yapılan ölçüm sonucunda malzemelerin doğal pH değerleri ile flokülasyona uygun oldukları tespit edilmiştir. 13 farklı poliakrilamid aynı dozajda kullanılarak Jar deneyi yapılmıştır. Jar deneyi sonunda numunelerin çökelme hızı ve bulanıklık değerleri kaydedilmiştir. Bu noktada en yüksek çökelme hızı ile en düşük bulanıklık sonucunu veren poliakrilamid seçilmiştir. Seçilen poliakrilamidin optimum dozajının belirlenmesi için ise farklı dozajlarda Jar deneyi tekrarlanmıştır. Yapılan deney sonunda en iyi sonuçları veren poliakrilamid dozajı optimum dozaj olmaktadır. Deney sonunda görülmüştür ki, optimum dozajın üstünde poliakrilamid eklenerek yapılan Jar deneyi sonunda oluşan sıvı kısmın bulanıklık değerinde artış meydana gelmiştir. Poliakrilamid eklendiğinde küçük daneler bir araya gelerek daha büyük fiziksel yapı olan flokları oluşturmaktadır. Flok oluşumunun değişimini görmek için partikül boyut dağılımı analizleri yapılmıştır.

Her iki atık malzeme için yapılan ölçümlerle görülmüştür ki, poliakrilamid eklendiğinde başlangıçtan optimum dozaja kadar partikül boyutları büyümekte ve topak yapı oluşmaktayken optimum dozajın üstüne çıkıldığında flokülasyon verimi azalmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda yapılan dozlamadan sonra sıvı kısmın bulanıklık değerinin artması da bu sonucu destekler niteliktedir. Seçilen poliakrilamid ve geotekstil malzemenin birlikte çalışma uygunluğunun araştırılması için laboratuvar ölçekinde Hızlı Susuzlaştırma Testi (Rapid Dewatering Test, RDT) yapılmıştır. Hali hazırda kullanılan deney seti tez çalışması için mahsus modifiye edilmiştir. Modifiye deney seti bilgisayar yardımıyla düzenli veri alabilecek hale getirilmiş ve böylelikle anlık geotekstilden sızan su miktarı kaydedilmiştir. Aynı zamanda geotekstil malzeme üzerinde oluşan filtre kekinin su muhtevası da ölçülmüştür. Bu veriler ışığında poliakrilamid katkısı yapılarak geotekstil ile susuzlaştırma işleminin performansı incelenmiş ve optimum dozaj belirlenmiştir. Daha sonra üç boyutlu susuzlaştırma deneyi olan yastık tipi geotekstil bohça kullanılarak %10 katı oranında hazırlanan karışımlarda poliakrilamid katkılı ve katkısız olarak hazırlanan karışımlarla Geotekstil Tüp Susuzlaştırma Testi (Geotextile tube Dewatering Test, GDT) yapılmıştır. Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) olarak adlandırılan bu deney, saha uygulamalarında kullanılan sistemin düşük hacimli bir modelidir. Poliakrilamid katkılı ve katkısız GDT sonrası oluşan sıvı faz ve filtre kekin bünyesindeki poliakrilamid kalıntısı olup olmadığını analiz etmek amacıyla Fourier-Dönüşüm İnfrared Spektrumu (FTIR) taranmıştır. Daha sonra susuzlaştırma işlemi sonunda geotekstil tüpten sızan sızıntı suyunun çevresel etkisinin incelenmesi için sızıntı suyunun su kalitesi parametreleri analiz edilmiştir. Bunun için, iyon analizlerinde ise Dionex ICS-3000 İyon Kromatografi cihazı, ağır metal ve diğer elementel analizde Perkin Elmer ICP-OES cihazı kullanılmıştır. Analizler doğrultusunda, çıkan suyun kalitesi hem ulusal hem de uluslararası içme suyu standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Böylece doğal ortama deşarj edilecek suyun yeraltı suyuna sızma riski taşınması halinde ortaya çıkacak sonuç değerlendirilmiştir. Katkılı ve katkısız yapılan GDT sonunda tüp içerisinde oluşan filtre kekin Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) farklı büyüklüklerde görüntüsü alınmış ve detaylı elementel analizleri yapılmıştır.

GDT sonrası geotekstil t p içerisinde oluşan filtre kekin mühendislik parametrelerini tespit edebilmek için Haliç dip tarama çamurunda üç eksenli bası  deneyi (UU) yapılmı ken, maden atı ının granüler olmasından dolayı kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Haliç dip tarama çamuru için farklı bası  yüklemeleri altında konsolidasyonu ve permeabilite katsayısının araştırılması için permeabilite ölçümünün de yapılabileceği konsolidasyon aleti kullanılmıştır. Maden atı ında yapılan GDT deneyinde iki tüplü farklı bir seçenek  alı ılmı  ve bu kısımda poliakrilamid kullanılmadan ilk dolumun yapılması ve daha sonra ikinci dolumda poliakrilamid eklenmesinin daha etkili ve ekonomik olduğu anlaşılmıştır. Bu sayede ilk dolumda t p içerisinde poliakrilamidin olmadığı ham malzeme elde edilmiştir. Bu malzemenin karayolunda dolgu malzemesi uygunluğunun araştırılması için Standart Proktor deneyi ve ya  CBR deneyi yapılmıştır.

Yapılan  alı mada, Haliç dip tarama çamuru ve maden atı ı için geotekstil t p ve poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırma işleminin ekonomik ve etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Her iki malzeme içinde yapılan filtre deneylerinde elde edilen sonuçların hem Jar deneyi hem de geotekstil t p susuzlaştırma deneyi sonuçlarıyla ile benzerlik gösterdiği anlaşılmıştır. Haliç dip tarama çamurunun poliakrilamid kullanılmadan yapılan susuzlaştırma işleminde katı oranı %12 iken uygun poliakrilamid kullanılmasıyla katı oranı %54'e yükselmiştir. Filtrasyon verimliliğinin ise %49'dan %90.5'e kadar yükseldiği görülmüştür. Yapılan mühendislik deneyleri ile susuzlaştırma işlemi sonrası oluşan filtre kekinin mühendislik parametreleri belirlenmiştir. T p dışına sızan suyun kimyasal analizi yapılmış ve sızıntı suyu içerisindeki ağır metallerin miktarlarında azalma olduğu bulunmuştur. Böylelikle sızıntı suyunun deniz suyu kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. Haliç dip tarama çamurunun geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılabileceği anlaşılmıştır. Aynı şekilde maden atı ı için yapılan deneylerde 1.tip susuzlaştırma işlemi yerine 2. tip susuzlaştırma işleminin yapılmasının daha ekonomik ve verimli olduğu anlaşılmıştır. 1.tip geotekstil t p dolumuna göre geotekstil t p miktarında yaklaşık %40 oranında tasarruf sağlanırken poliakrilamid kullanımında ise %93 oranında tasarruf sağlanmıştır. 2. tip susuzlaştırma deneyinde poliakrilamid kullanılmadan yapılan susuzlaştırma deneyinde oluşan ham malzeme üzerinde mühendislik parametrelerini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları Karayolları Teknik  artnamesi ile karşılaştırıldığında malzemenin karayollarında dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır. Poliakrilamid katkısız ve katkılı yapılan geotekstil susuzlaştırma deneyleri sonucunda oluşan filtre keklerinin kayma mukavemet a ıların değerleri sırasıyla 34  ve 36  olarak bulunmu tur.



DEWATERING OF GOLDEN HORN DREDGED SLUDGE AND MINING WASTE USING GEOTEXTILE TUBES AND EVALUATION OF THESE IN TERMS OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

SUMMARY

Waste materials with high water content are formed in many sectors with the increase of industrialization and urbanization. The disposal and/or reuse of these waste materials by reducing the water content provides great benefits in terms of both financial benefits and environmental health. The dewatering of these high water content waste materials increasing in our country and the world has attracted the attention of many researchers. The researches especially focus on the dewatering method using geotextiles and polyacrylamide. In this method, geotextile acts as a filter for separating solid and liquid, while polyacrylamide brings small grains together and allows them to precipitate faster. In the literature, this method has been used mostly for fly ash, but also for dredged sludges, dairy lagoons and industrial waste. In our country, sludge is removed by dredging to reduce sea and river pollution in recent years. The waste materials generated as a result of dredging are stored in predetermined areas for disposal. Simultaneously, dredged materials extracted from the seas are often disposed away from the dredged area, but still into the sea. As a result of this type of disposal, the marine ecosystem is damaged in a way which is difficult to reverse. Therefore, reducing the water content of these materials and determining the reuse areas are of great importance in terms of the country's economy and environmental risks. Reviewing the literature, the volume of the sludge filled into the tube has decreased up to 80% in a very short time in dewatering studies with geotextile tube made with polyacrylamide additives. Moreover, it seems possible that the water leaking from the geotextile can be reused or directly disposed into the natural environment without any purification.

In this study, the dewatering and reuse of the dredged sludge of Golden Horn, a natural harbor located in Istanbul, and mine waste taken from the aggregate mine in Kemerburgaz, Istanbul, by using geotextiles and polyacrylamide were investigated. As geotextiles have a large number of uses in different fields, their physical and mechanical properties differ depending on their purpose and use. While the hydraulic permittivity is important for geotextiles fabricated in tube form for dewatering applications, tensile strength is also an important attribute and must be adequate, especially when the tube is full or is subjected to additional loading. Within this framework, 11 anionic and 2 cationic polyacrylamide with different molecular weights and a geotextile used in dewatering applications were used. There is a material specific polyacrylamide for the flocculation of each waste material. Thus, the Jar test was

performed to determine the appropriate polyacrylamide and optimum dosage for Golden Horn dredged sludge and mine waste. Firstly, the index properties of both waste materials were determined in the İTÜ Geotechnical Laboratories. Sieve, hydrometer analysis, Atterberg consistency limit test and pycnometer test were performed. Then, the zeta potential measurements were made at the İTÜ MEM-TEK Laboratory. The zeta potential of the material is a parameter that determines the efficiency of the flocculation process. The closer the value is to zero, the higher the flocculant, in other words, polyacrylamide yield is higher. The zeta potential may vary according to the pH value. Therefore, it is necessary to monitor and measure the load distribution behavior of the material at different pH values. As a result of the measurements made on the materials used in this research, it was determined that the materials are suitable for flocculation with their natural pH values. The Jar test, enabling simultaneous analyses in 6 separate beakers, was used during flocculation tests, in which the rotational speed and duration of mixing could be adjusted, was performed by using 13 different polyacrylamides at the same dose. At the end of the Jar test, the precipitation rate and turbidity values of the samples were recorded. At this point, the polyacrylamide that gave the highest precipitation rate and the lowest turbidity result was chosen. The Jar test was repeated at different dosages to determine the optimum dosage of the selected polyacrylamide. As a result, it was observed that the turbidity value increased when the optimum dosage was exceeded. When polyacrylamide is added, small grains come together to form flocs, which are larger physical structures. Particle size distribution analyses were carried out to see the change in floc formation.

It is understood from the measurements made for each waste material that when polyacrylamide is added, the particle sizes grow from the beginning until the optimum dosage is reached grow during the formation of flocs, flocculation efficiency decreases when the optimum dosage is exceeded. The increase in the turbidity value in the upper phase after dosing at high concentrations also supports this result. The Rapid Dewatering Test (RDT) was performed at laboratory scale to investigate the compatibility of the selected polyacrylamide and geotextile materials. The tests were conducted on unconditioned and conditioned 500 ml suspensions of mine tailings with 10% solid content. Conditioning with the most effective PAM was studied at dosages of 10, 20, 30, 40 and 50ppm. The experiment set currently used has been modified for this research. The modified experiment set was made to receive regular data with the help of a computer and so the amount of water leaking from the geotextile was instantaneously recorded. Also, the water content of the press cake formed on the geotextile was measured. In the light of these data, the performance of the dewatering process with geotextile was examined by adding polyacrylamide and the optimum dosage was determined. Geotextile tubes perform dewatering by acting as a filter for the material they are filled with. The Geotextile Dewatering Test (GDT) is a model of the system used in field applications. In this study the 3-dimensional dewatering behavior of polymer-free and conditioned suspensions containing 10% solid mineral waste was modeled by GDT. Pillow-shaped geotextile bags (53 cm x 53 cm) were filled with polymer-free suspensions and with suspensions conditioned by the most efficient PAM used at the optimum dosage. The geotextile pillow bag, which is closed with stitches on all four sides, has a capacity of approximately 28,000 cm³, added through an opening left on one side, and allows its filling material to dewater. The GDT setup, consisting of a geotextile pillow connected to a filling pipe on the pedestal and placed in a large container for leachate. After the filling process, the volume of effluent accumulating inside the container was measured at regular time intervals.

Fourier-Transform Infrared Spectrum (FTIR) was used to analyze the supernatant phase and the presence of polyacrylamide residue in the press cake after GDT with and without additives. Furthermore, the water quality parameters of the leachate were analyzed. For determine these, Dionex ICS-3000 Ion Chromatography device was used for ion determination and the Perkin Elmer ICP-OES device was used for heavy metal and other elemental analyses. In line with the analyses, the effluent quality has been compared with both national and international drinking water standards. Thus, the result will be used to assess the case, when the water to be disposed into the natural environment has the risk of leaking into groundwater was evaluated. The press cake formed in the tube at the end of GDT, which was made with and without additives, was imaged in different sizes by Scanning Electron Microscope (SEM) and its detailed elemental analyses was performed.

In order to determine the engineering parameters of the press cake formed in the geotextile tube after GDT, a triaxial stress test (UU) was performed on the Golden Horn deep dredged sludge, while a direct shear test was carried out due to the granular nature of the mine waste. For the investigation of the consolidation and permeability coefficient of the Golden Horn deep dredged sludge under different pressure loads, a consolidation instrument that can also measure the permeability was used. In the GDT experiment conducted on the mine waste, a different option with two tubes was studied and it was found that it was more effective and economical to make the first filling without using polyacrylamide in this part and then adding polyacrylamide in the second filling. In this way, the raw material without polyacrylamide was obtained in the tube in the first filling. The Standard Proctor test, and wet CBR test were carried out to investigate the suitability of this material as fill material for highways.

In this research, it has been shown that dewatering process can be applied successfully by using geotextile and polyacrylamide for the Golden Horn dredged sludge and mine waste. Flocculation experiments showed that anionic polyacrylamides were more effective than cationic polyacrylamides for both materials. In the experiments made with Golden Horn dredged material with the application of 30ppm dosage of AA4 polyacrylamide, the turbidity value decreased to 121 NTU (99.7% yield). At dosages above the optimum dosage, turbidity value is increased. It was observed that the 10% solid rate at the beginning of the experiment increased up to 54% times the rate with the dewatering of the Golden Horn dredged material. It was determined that the quality of water leaking out of the tube improved compared to the initial situation and met the sea water criteria. Likewise, in the experiments made for mine waste, it was understood that dewatering by filling double geotextile tubes was more economical and effective. Two scenarios were evaluated for dewatering mine tailings in aggregate quarries using geotextile tubes. The first scenario involves dewatering the mine tailings after PAM-conditioning in a geotextile tube, which reduces turbidity. The second scenario involves the use of two geotextile tubes, and accelerates the dewatering process and optimizes the efficiency of the geotextile in use. Similar levels of ISC and turbidity were maintained for the discharged effluent. Moreover, the second option offered a 93% decrease in chemical PAM dependency and 40% more efficient use of geotextile tubes in terms of the dry weight of filled waste material. Consequently, the second option is proposed to provide economic and environmental benefits. The final leachate generated by the use of geotextile tubes in dewatering applications for mine tailings after PAM-conditioning was found to meet national and international standards for potable water. In this regard, discharging the waste water to the surrounding area will not cause environmental issues, and recycling it for use in mining activities will be an

appropriate economic action. Additionally, it was found appropriate to use the raw material obtained in the first filling without adding polyacrylamide, as fill material for highways. The shear strength angles of the filter cakes formed as a result of the geotextile dewatering tests with and without polyacrylamide were found as 34° and 36°, respectively.



1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan kentleşme ve endüstriyel faaliyetler birçok çevre problemini de beraberinde getirmiştir. En önemli problemlerden biri de yüksek su içeriğine sahip atık çamurlarının sebep olduğu kirliliklerdir. Atık çamurlar, deniz ve derelerin kirlenmesine çözüm olması bakımından dip taraması yapıldığında, maden faaliyetlerinde ve uçucu kül üreten tesislerde yüksek hacimlerde meydana gelmektedir. Denizlerde yapılan tarama faaliyeti sonunda elde edilen yüksek su muhtevasına sahip tarama çamurunun denizlere kontrolsüz bir şekilde boşaltılması en çok rastlanan durumdur. Bu durumun deniz ekosistemi üzerinde zararlı etkileri olduğu raporlanmıştır (Sheehan ve Harrington, 2012). Ülkemizde de son yıllarda deniz ve derelerin temizlenmesi için dip çamurları taranmakta, elde edilen yüksek su muhtevasına sahip malzemeler önceden belirlenmiş alanlara depolanmakta veya tekrar denize boşaltılmaktadır (Cevikbilen ve diğ, 2020). Depolama ise yüksek maliyete sahip, büyük alanlar gerektiren ve düzenli depolama alanlarında uzun dönem takip edilmesi gereken bir süreçtir. Bunun için örnek olarak neredeyse dünyanın her yerinde ve hemen her sektörde yan ürün olarak ortaya çıkan ve miktarı milyonlarca tonu bulan uçucu küllerin bertarafı verilebilir (Agostini ve diğ, 2007; Yazıcı, 2008). Sahalarda yapılan atık malzemelerden oluşturulan suni göl şeklindeki depolama alanlarında ise toksik kimyasalların ya da ağır metallerin yeraltı suyuna sızma riski bulunmaktadır. Bu ve buna benzer çevresel kaygılardan dolayı birçok kuruluş tarama çamurlarının depolanması ve zararsız hale getirilmesi konusuna dikkat çekmiştir (ASTM, 1994;; IOC – UNEP – IMO, 2000).

Tarama çamurlarının ve atık çamurların çıkarıldıktan sonra taşınması, depolanması ve faydalı alanlarda kullanılması için susuzlaştırılmaları büyük önem taşımaktadır (Moo-Young ve diğ, 2002; Liao ve Bhatia, 2005; Lawson, 2008). Susuzlaştırmanın kısa süre içinde etkin olarak ve içeriğindeki çevreye zararlı kimyasal maddelerin en aza indirgenerek uygulanmasıyla ülke ekonomisine ve çevre sağlığına olumlu katkı sağlayacaktır. Teknolojik gelişmelerin ve sanayileşmenin bir sonucu olarak meydana gelen kentleşme ve hızlı nüfus artışı birçok alanda endüstriyel süreçlerden

kaynaklanan yüksek su içeriğine sahip atık malzemelerin oluşmasına sebep olmuştur. Bu endüstriyel atıklar, yüksek maliyetli, büyük alanlara ihtiyaç duyan ve uzun dönem takip edilmesi gereken düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmektedir. Dünyanın neredeyse her yerinde yan ürün olarak ortaya çıkan ve miktarı milyonlarca tonu bulan uçucu küllerin bertaraf sorunu buna örnek olarak verilebilir (Yazıcı 2008; Agostini et al. 2016). Madenlerde meydana gelen atık çamurların susuzlaştırılması için uygulanabilir etkin yöntemlerin bulunması da firmalara büyük ekonomik ve işlevsel katkılar sunacaktır. Üstelik bu atık malzemelerin farklı alanlarda geri kazanılmasına dair çalışmalar da mevcuttur. Sediment, atık cam, silisli kum, atık yakma tesisi uçucu külleri, atık seramik tozu, metal çamuru, arıtma çamuru külü ve maden atıkları gibi atık malzemelerin yapay hafif agrega olarak başarılı bir şekilde geri kazanıldığı literatürde çok yerde belirtilmektedir (Chang ve diğ, 2007; Huang ve diğ, 2007; Tang ve diğ, 2011; Chang ve diğ, 2016; Scheinherrová ve diğ, 2016; Başar ve diğ, 2018; Güzel ve diğ, 2019).

Son yıllarda çevre geotekniği konuları arasına giren susuzlaştırma çalışmaları birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Geosentetik ve poliakrilamid kullanılarak, yüksek su içeriğine sahip atık malzemeleri susuzlaştırmak, araştırmacılar tarafından etkili ve ekonomik bir seçenek olarak görülmektedir (Chu ve diğ, 2011; Khachan ve diğ, 2012; Driscoll ve diğ, 2016; Cetin ve diğ, 2017; Khanchan ve Bhatia, 2017; Ratnayesuraj ve Bhatia, 2018; Müller ve Vidal, 2019; Ardila ve diğ, 2020).

Geotekstil tüpler, geotekstil ruloların bir araya getirilip dikilmesi ile oluşturulan tüp şeklindeki elemanlardır ve nispeten büyük miktardaki suya doygun malzemeyi tutmaya uygun dayanıma sahiptir. Geotekstil tüpler gözenekli bir yapıdadır ve suya doygun bir malzeme veya sulu çamurla dolduruldukları zaman içerisinde katı kısım tutulur ve su, tüpü oluşturan geotekstilin gözeneklerinden dışarı süzülür (Silva ve diğ, 2019). Geotekstil tüplerin birçok kullanım alanı bulunmaktadır ve teknik özelliklerindeki gelişmelere bağlı olarak bu alanlar gün geçtikçe genişlemektedir.

Susuzlaştırma çalışmalarında geotekstil uygulama sahalarının artırılması ve proses özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Bu kimyasal bileşenlerin başında gelen suda çözünen poliakrilamidler; film, kaplama, tutkal, boya, arıtma gibi endüstriyel açıdan önemli alanlarda, sanayide ve teknolojiye yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Suda çözünen poliakrilamidler iyonik ve iyonik olmayan (noniyonik) olarak iki ana sınıfa ayrılır (Çelikkan, 2003). Geotekstil tüp ile

susuzlaştırma uygulamalarında, iyonik poliakrilamidlerden sentetik katyonik ya da anyonik akrilamid türevi katkıları sıvı düzenleyici olarak kullanılmaktadır. Bu düzenleyiciler yük nötralizasyonu ve parçacık köprüleme sayesinde ince sedimentleri birbirine bağlayarak topraklar haline getirir.

Poliakrilamidler, geotekstil kullanılarak susuzlaştırma çalışmalarında önemli bir verim artışı sağlamasına rağmen bazı araştırmacılar tarafından çevre ve halk sağlığı açısından zararlı bulunmaktadır (Glover ve diğ., 2004; McLaughlin ve Bartholomew, 2007; Semsar ve diğ., 2007). Bu durum göz önünde bulundurulduğunda uygun poliakrilamid seçimi ve optimum dozaj belirlemenin elzem olduğu anlaşılmaktadır. Fakat yapılan çalışmalara bakıldığında deneylerde kullanılan poliakrilamid sayısı sınırlı tutulmuş hem de uygun polimer seçiminden sonra optimum dozajın belirlenmesinde de eksikler olduğu görülmüştür. Optimum dozaj belirlemenin çevre ve maliyet açısından faydaları olacaktır. Aşırı dozajda kimyasal katkı kullanıldığında sızıntı suyunun içerisinde serbest halde polimer kalacaktır. Bu da deşarj edilen ortamda flokülasyonun devam etmesine sebep olacaktır. Aynı zamanda çıkış suyu kalitesinin de deşarj edilecek ortamın kalite kriterlerini sağlıyor olması gerekmektedir. Etkili bir susuzlaştırma uygulaması için bu iki kriter hayati önem taşımaktadır. Yine bu iki durum için daha kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

Literatüre bakıldığında; maden atıklarının susuzlaştırılması için elektro-kinetik (Johns, 2004), elektro-ozmotik akış (Lockhart ve Stickland, 1984) ve geosentetikler kullanılarak (Fourie ve diğ., 2007) yapılan birkaç çalışma mevcuttur. Dolayısıyla maden atığının susuzlaştırılması konusunda yapılan çalışmaların az olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada İstanbul il sınırları içinde bulunan Haliç dip tarama çamuru ve Kemerburgaz'da bulunan agrega madeninden alınan maden atığının geosentetik tüp ve poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırılması işleminin etkinliği incelenmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Tez çalışmasında, çevre geotekniği konuları arasında yer alan 'Atık Malzemelerin Poliakrilamid Kullanılarak Geotekstil Tüp Yardımıyla Susuzlaştırılması' konusu ele alınmıştır. İstanbul il sınırları içerisinde bulunan Haliç dip tarama çamurunun ve maden atığının geotekstil tüp ve poliakrilamid yardımıyla en etkili şekilde

susuzlaştırılma performansının araştırılması ve susuzlaştırılan atık malzemelerin geoteknik bakımdan tekrar kullanımın değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Geotekstil malzemeler son yıllarda dünyada geoteknik mühendisliği uygulamalarında teknik olarak avantajlı ve ekonomik çözümler sağladıklarından çokça tercih edilmektedir. Bununla birlikte geotekstillerin tarama çamurları ve endüstriyel atık olan maden atıklarının susuzlaştırılması amacıyla kullanımı ülkemizde son derecede sınırlı olup neredeyse yapılmamaktadır. Bu çalışmada, geotekstil ailesinden olan geotekstil tüpler ile İstanbul ilindeki Haliç dip tarama çamuru ve İstanbul Kemerburgaz'da bulunan bir madenden alınan maden atığı gibi yüksek su muhtevası, yüksek sıkışabilirlik ve düşük mukavemet özellikli atık malzemelerin anyonik ve katyonik poliakrilamidler kullanılarak etkin bir şekilde, hızlı ve çevreye duyarlı olarak susuzlaştırılmasına dair yenilikçi çözümlerin bulunması amaçlanmıştır.

Yapılan literatür taraması sırasında Türkiye'de zeminlerde polimer kullanımın getirdiği yenilikçi yaklaşımların çok sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Dünya literatüründe önemli yer tutan polimerlerin geoteknik alanında Türkiye'de yeterli ilgiyi görmemesi bu konuyu araştırmacılar açısından cazip kılmaktadır. Buna ek olarak, Türk inşaat sektörünün dünya sıralamasında ikinci sırada yer almasından dolayı (Blacksmith Institute, 2011), bu tür çalışmaların çevre kirliliği ve maliyet yönetimi açısından ciddi kazanımlar sağlayacağı beklenmektedir. Bu kapsamda ülkemizde kullanılan anyonik ve katyonik poliakrilamidler ile çalışılacak olup söz konusu atık malzemeler için en yüksek çökeltme hızını ve en düşük bulanıklık değerini sağlayacak uygun nitelikteki katkı maddelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Beraberinde, sızıntı suyu hacmi içeriğindeki katı madde miktarı ve sızıntı suyu kalitesindeki değişimler incelenecektir.

Tüm bunlara ek olarak susuzlaştırılacak atık malzemelerin su muhtevası, zemin endeks özellikleri ve mukavemet parametrelerindeki değişimler incelenerek katkı maddelerinin farklı tip ve oranlarının oluşturacağı iyileştirmelerin karşılaştırılması hedeflenmektedir. Böylece ülkemizde de atık malzemelere dünyada olduğu gibi karayolu, hava alanı, liman gibi inşaatlarda toprakarme yapılar için dolgu malzemesi olarak alternatif bir kullanım alanının bulunması hedeflenmektedir. Tez çıktılarının malzeme temini yapılan ilgili kurumlara çevre kirliliği ve ülke ekonomisi açısından büyük bir kazanç sağlayabilecek ve saha uygulamaları için de öncülük edecektir.

Bu çalışmanın diğ er bir amacı da İT  Geoteknik Laboratuvarında atık çamurunun susuzlaştırılması çalışmaları için bir alt yapının kurulmasıdır.

1.2 Tezin Kapsamı

Tarama  amurunun geotekstil ve poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırılması dünyada büyük bir uygulama alanı bulmaktadır. Toksik açıdan sızıntı suyunun denize verilmesinde problem oluşturmayacağı tarama faaliyetlerinde, kıyı ve liman toprak işleri sırasında geotekstil t p kullanımı gerek büyük bir tesis kurulumu gerektirmemesi gerek uygun polimer kullanıldığında susuzlaştırma işleminin oldukça hızlanması ile fizibilite açısından oldukça avantaj sağlamaktadır.

Ülkemizde ve dünyada endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan ve atık barajlarına pompalanan malzemeler bir süre sonra memba kısmını doldurmakta ve ek depolama sahası ihtiya ı göstermektedir. Problemin barajın mevcut sedde y ksekliliğinin artırılması ile giderilmeye çalışılması mühendislik hizmetlerinin yenilenmesini ve yeni dolgu malzemesi tedarikini gerektirmektedir. Bu bakımdan atık barajlarında depolanan malzemenin geotekstil tüpler içerisinde susuzlaştırılarak sedde yükseltme işleri sırasında dolgu içerisinde kullanılabilmesi yeni dolgu malzemesine olan ihtiya ı, tedarik sürecini ve maliyetlerini düşürecektir. Azalan su muhtevası ile artan kayma dayanımı ve azalan sıkışabilirlik sayesinde taşıma gücü ve konsolidasyon problemlerinin de azaltılmış olacağı bilinmektedir. Geotekstil t p dolgulu sedde yapısındaki şev dayanımının kontrollü bir dolguya göre farklılık göstereceğı açıktır. Ayrıca, geçirimsizlik gerektiren sedde yapısı için geotekstil t p dolgulu sedde yapısındaki hidrolik yük kırılım özellikleri büyük önem arz etmektedir. Diğ er bir konu susuzlaştırma sırasında ortaya çıkan sızıntı suyunun kalitesinin belirlenmesidir. Susuzlaştırma sonrası oluşan sızıntı suyu ulusal ve uluslararası su kalite kriterleri ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca farklı koşullarda susuzlaştırılan malzemelerin geotekstil içerisindeki kayma mukavemeti konsolidasyon ve geçirgenlik davranışları test edilmelidir.

Tez  alışması kapsamında İstanbul ve çevresinde bulunan Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının susuzlaştırılmasında poliakrilamid yardımıyla geotekstil t p kullanımının uygun bir yöntem olarak teşkil edilebileceğı öngörülmektedir. Bu yöntemle atık malzemelerin hızlı ve etkili bir şekilde susuzlaştırılması ile malzeme hacminde %65 civarında azalmalar sayesinde İstanbul gibi depolama alanı sıkıntısı

çekilen yerlerde yüksek faydalar sağlaması hedeflenmektedir. Kısa süre içerisinde etkin olarak ve içeriğindeki çevreye zararlı kimyasal maddelerin en aza indirgenerek susuzlaştırılabilmesi ülke ekonomileri ve çevre sağlığı açısından büyük katkı sağlayacaktır.

Dünya geneline göre ülkemizde geotekstil ve polimer kullanımı çok sınırlıdır. Bu çalışma ile geotekstil kullanımına ülkemizde de bir uygulama alanı daha açılmış olacağı düşünülmektedir. Bu konunun incelenmesi ve çözüm geliştirilmesi ülkemizde halen yeterince ilgi görmemiş bir çözüm yöntemi ile ilgili olmasından ötürü de önemlidir. Ülkemiz koşullarında bu konunun çalışılması ile elde edilecek sonuç ve kazanımların ilgili kurum ve kuruluşlardaki yetkililerin konuya dikkatini çekeceği ve bunun sonraki akademik çalışmalara önemli bir kaynak teşkil edeceği düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, literatür araştırılmasına yer verilmiştir. İlk olarak çalışmada kullanılan ve geoteknik mühendisliğinde önemli bir yere sahip geotekstiller genel olarak anlatılmıştır. Daha sonra da susuzlaştırma işleminde kullanılan geotekstil tüpler genel hakkında bilgi verilmiş ve susuzlaştırılma aşamaları anlatılmıştır. Susuzlaştırılma işleminin bir diğer önemli değişkeni olan poliakrilamidlerin genel yapısı, türleri ve flokülasyon kavramı anlatılmıştır. Son olarak da literatürde yer alan geotekstil tüplerin poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırılması konusunda yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, bu çalışmada incelenen Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının endeks özellikleri ve malzemelerin alındıkları mevkiiler genel özellikleri ile verilmiştir. Aynı zaman da tez çalışmasında kullanılan geotekstil malzeme ve 13 farklı poliakrilamid anlatılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler ve bu deneylere ait metotlar ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu bölümde ilk olarak Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırılması ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları ve sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir. Daha sonra maden atığının susuzlaştırılması ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları ve sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir.

Sonuç bölümde, Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının geotekstil tüp ile susuzlaştırılması için yapılan deney sonuçlarının değerlendirilmeleri verilmiştir. Aynı zamanda yapılan mühendislik deneyleri sonucunda elde edilen parametreler geoteknik mühendisliği kapsamında değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması bölümünde, birinci kısımda tez çalışması kapsamında kullanılacak olan yöntemin ana malzemelerden biri olan geotekstillerin tanımı yapılmıştır. İkinci bölümde susuzlaştırma işlemine uygun bir geotekstilin uygun şekilde dikilmesiyle tüp haline getirilen geotekstillerin tanımı ve çalışma prensipleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde susuzlaştırma işleminin diğer önemli malzemesi olan poliakrilamidler tanıtılmış ve poliakrilamidlerin çeşitleri özetlenmiştir. Dördüncü bölümde poliakrilamidlerin susuzlaştırma işlemindeki çalışma mekanizması özetlenmiştir. Son olarak, beşinci bölümde ise geotekstil tüp ile susuzlaştırma hakkında literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2.1 Geotekstiller

Geotekstil malzeme, ASTM (American Society of Testing Materials) tarafından, zemin, kaya veya geoteknik mühendisliği ile ilgili herhangi bir malzeme ile birlikte kullanılan polimerik malzeme olarak tanımlanmaktadır. Geosentetik kelimesi, bu malzemenin daha çok geoteknik mühendislerinin ilgi alanına girmesinden ve genellikle zemin ile ilgili işlerde kullanılmasından dolayı ve büyük oranda insan yapımı yani sentetik bir malzeme olmasından kaynaklı “geo” ve “sentetik” kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır (Koerner, 2016). Geotekstiller ise tekstil ürünü geosentetikler olarak tanımlanabilir. Geotekstil, esnek tabakalar şeklindeki geçirimli, polimerik tekstil ürünleridir (Cantré ve Saatho, 2011).

Günümüzde geniş kullanım alanlarına sahip olan geotekstiller, ilk olarak erozyon kontrolü ve zemin filtreleme uygulamalarında kullanılmıştır. Bu nedenle, başlangıçta ve günümüzde de geotekstiller için dokuma filtreler teriminin kullanımı da görülmektedir. Geotekstillerin, günümüzdeki uygulamalara benzer biçimde kullanımının yaklaşık 70 yıllık bir geçmişi vardır ve son yıllarda kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır.

İlk geotekstil kullanımı, Florida’da sahil erozyon kontrolü uygulamasında görülmüştür. Geçmişten günümüze, geotekstillerin üretim şekilleri ve yapımında kullanılan hammaddeler değişiklik gösterirken, kullanım alanları da oldukça genişlemiştir. Geotekstiller, demiryollarında, kaplamasız yolların güçlendirilmesinde, istinat duvarlarında, toprak dolgu barajlarda, şev ve kıyı korunmasında, su içindeki

yapılarda, spor sahalarında, dren ve hendeklerde, katı atık depolama sahalarında ve asfalt takviye uygulamalarında kullanılmıştır (Turan, 2016). Bu uygulamalarda geotekstil kullanımı ile geotekstillerin ayırma, güçlendirme, drenaj ve filtrasyon özelliklerinden yararlanılmıştır.

2.1.1 Geotekstillerin malzeme yapısı

Geotekstiller, sentetik polimerlerden elde edilirler ve plastik dokuma olduklarından dolayı plastiğin üretim ve işleme özelliklerine sahiptirler. Geotekstillerin hammaddesi olan termoplastikler, monomerlerden oluşur ve monomerlerin kimyasal işlemler altında birleştirilip, uzun moleküler zincirler oluşturması sonucu polimerler meydana gelir. Farklı kimyasal katkı maddeleri ile farklı polimerler elde edilir ve bunlardan birkaçı; polipropilen (PP), polietilen (PE), polyester (PET), poliamid (nylon), polivinil klorid (PVC) ve etenekopolimer bitümdür (Özener, 2001).

Geotekstillerin üretiminde çeşitli polimerik hammaddeler kullanılabilmektedir. Genel tüketim miktarlarına göre kullanılan hammaddeler şöyle sıralanmaktadır:

- Polipropilen (PP) (yaklaşık %65)
- Polyester (PET) (yaklaşık %32)
- Poliamid (PA) (yaklaşık %2)
- Polietilen (PE) (yaklaşık %1)

Polipropilen ucuz olduğu için geotekstil yapımında en çok tercih edilen hammadde olup, polyester ise onu takip etmektedir.

Farklı polimer çeşitlerinin hammadde olarak kullanılması bazı avantaj ve dezavantajlar sağlamaktadır. Polimerlerin geotekstillere sağladığı bu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.1’de özet olarak gösterilmiştir. Geotekstillerin özellikleri yalnızca üretildikleri hammaddeye değil, üretim metoduna da bağlıdır.

Çizelge 2.1 : Polimer çeşidine göre geotekstil özellikleri (Şengül, 2016).

Özellikler	Polimer Çeşidi			
	PP	PET	PA	PE
Dayanım	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük
Modül	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük
Bozulma Gerilmesi	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek

Çizelge 2.1 (devam) : Polimer çeşidine göre geotekstil özellikleri (Şengül, 2016).

Özellikler	Polimer Çeşidi			
	PP	PET	PA	PE
Kayma Dayanımı	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Birim Ağırlığı	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük
Maliyet	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük
UV Işınlara Dayanıklılık (Stabil)	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
UV Işınlara Dayanıklılık (Sabit Olmayan)	Orta	Yüksek	Orta	Düşük
Alkalilere Dayanıklılık	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Haşere, Böceklerle Dayanıklılık	Orta	Orta	Orta	Yüksek
Petrol Ürünlerine Dayanıklılık	Düşük	Orta	Orta	Düşük
Temizlik Ürünlerine Dayanıklılık	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

2.1.2 Geotekstillerin sınıflandırılması

Geotekstiller, yapım tekniğine, polimer bileşimine, ağırlığına, mühendislik fonksiyonlarına göre birçok farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Yapım tekniğine göre sınıflandırma bunlardan en yaygın olanıdır ve bu sınıflandırmada genel olarak iki ana grup vardır. Bunlar, örgülü ve örgüsüz geotekstiller olarak tanımlanır. Bu gruplar da kendi aralarında yapıldıkları ipliğin ve fiberin cinsine göre alt gruplara ayrılırlar (Turan, 2016).

2.1.2.1 Örgülü geotekstiller

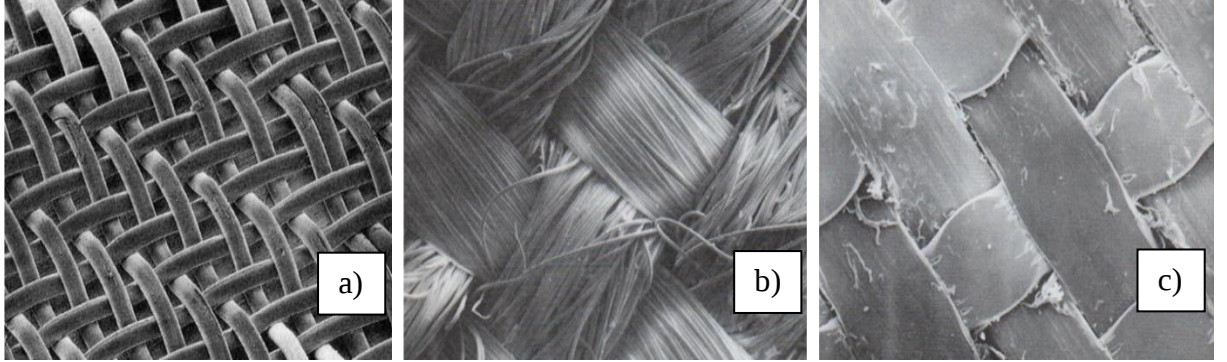
Örgülü geotekstiller, geleneksel dokuma tezgahlarında örülerek, kalınlığı bir milimetre kadar olan ve üniform gözenekli bir geotekstil elde edilir (Şekil 2.1).

Örgülü geotekstiller, geometrik bir yaklaşımla üç grupta toplanmaktadır:

- Monofilament örgülüler: Tekil ve kalın ipliklerden oluşur.
- Multifilament örgülüler: İnce liflerin birleşiminden oluşur.
- Şerit veya film örgülüler: İnce, uzun filmlerin şerit halinde kesilmesi sonucu oluşur.

Örgülü geotekstiller; yük taşıma kapasitesinin artırılması, alt temel tabakasının kalınlığının sınırlandırılması, zemin ile alt temel tabakasının ayrılması amacıyla geliştirilmiştir (Koerner, 2016). Otoyollar, şehir içi yollar, karayolları, kırsal kesim yolları, geçici yollar, bisiklet-yaya yolları, donatılı toprak duvarlar, demiryolları,

tramvay ve hafif raylı sistemler, yaya yolları, hava alanları, spor sahaları, araba parkları, hendek geçişleri ve drenaj sistemleri örgülü geotekstilin uygulandığı yerlerdir (Koerner, 2016).

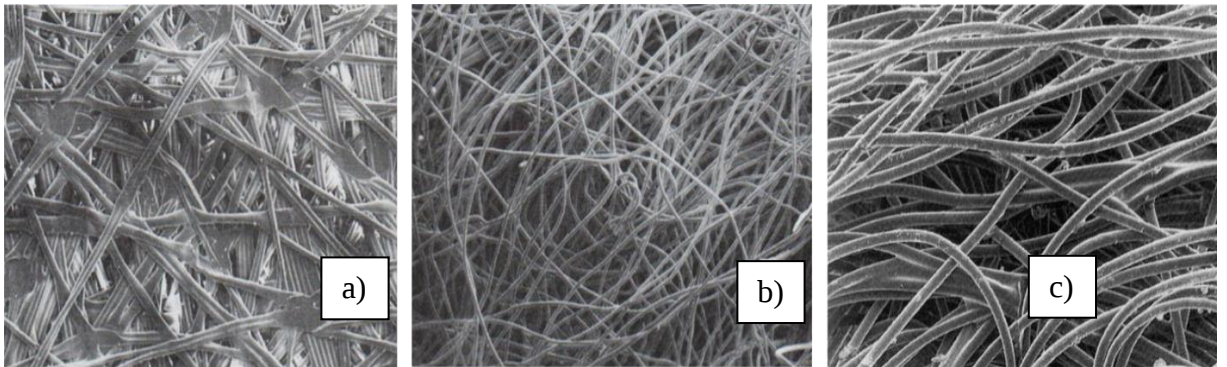


Şekil 2.1 : a) Örgülü monofilament (Ingold ve Miller, 1988); b) Örgülü multifilament (Koerner, 1998); c) Şerit tip örgülü (Koerner, 1998).

2.1.2.2 Örgüsüz geotekstiller

Örgüsüz geotekstiller, örgü metodu kullanılmadan, polimer ipliklerin belli bir yönde veya rastgele doğrultuda, gevşek ağ yapısı şeklinde birbirine bağlanması ile elde edilirler (Ingold ve Miller, 1988). Bu bağlama işlemi ise mekanik, termik (ısı) veya kimyasal yol ile olur.

Örgüsüz geotekstiller, yol inşaatları, bina inşaatları, zemin uygulamaları, drenaj ve filtrasyon sistemleri, hidrolik yapılar ve atık depolama sahaları gibi alanlarda; ayırma, filtrasyon, güçlendirme, drenaj, koruma ve yalıtım gibi amaçla tercih edilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : a) Örgüsüz geotekstil – Isıl birleşim (Koerner, 2016); b) Örgüsüz geotekstil – Mekanik birleşim (Koerner, 2016); c) Örgüsüz geotekstil – Kimyasal birleşim (Ingold ve Miller, 1988).

2.1.3 Geotekstillerin genel kullanım amaçları

Geotekstilller; inşaatın çeşitli evrelerinde farklı amaçlar için kullanılırlar. Geoteknik uygulamalarda genellikle geotekstillerin birkaç fonksiyonundan aynı anda yararlanılır. Geotekstilller pek çok işleve sahiptir ancak ayırma, güçlendirme, drenaj ve filtrasyon en önemlileridir. Aşağıda bunlar kısaca anlatılmaktadır.

2.1.3.1 Ayırma

Geotekstillerin zemin uygulamalarındaki önemli fonksiyonlarından biri de ayırma özelliğidir (Şekil 2.3). Ayırma işlevi, birbirine benzemeyen iki malzemeyi karışmaktan korumak amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaçla geotekstil ya dolgu ile doğal zeminin ya da iki farklı dolgunun arasına yerleştirildiğinde, tabakaları birbirinden ayırır ve üst yapıdan gelen statik veya dinamik yükten dolayı oluşabilecek malzeme karışımını önlenmiş olur. Geotekstilller, esneklik, süreklilik, yüksek çekme dayanımı ve geçirimsizlik özelliklerinden dolayı suyun doğal sirkülasyonuna engel olmadan değişik geoteknik özelliklere sahip iki zemini birbirinden ayırır (Koerner, 2016).

Geotekstil, ayırma amaçlı kullanıldığında bu işlevinin yanında drenaj, filtrasyon ve güçlendirme açısından da fayda sağlamaktadır.



Şekil 2.3 : Geotekstilin ayırma amacıyla kullanımı (Koerner, 2016).

2.1.3.2 Güçlendirme

Geotekstilin kullanım amaçlarından biri de güçlendirmedir. Güçlendirme uygulamalarında geotekstilin işlevi, sürtünme ve adezyon kuvvetlerinin etkisiyle, zeminin çekme direnci ve kopmadan önceki deformasyon kabiliyetini artırarak,

zeminlerin güçlendirilmesine olanak sağlamaktır (Yılmaz ve Eskişar, 2007). Geotekstilin güçlendirme fonksiyonunu sağlayabilmesi için belli bir dayanıma ve çekme kuvvetlerine karşı durabilecek uzunlukta olması gerekir. Son yıllarda zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan çelik şeritler ve ankrajlı duvarlarda kullanılan çelik ankrajlar yerine geotekstil kullanımı yaygınlaşmıştır.

2.1.3.3 Drenaj

Drenaj işlevi, geotekstilin kendi düzlemi içinde sıvı veya gaz akımını sağlamasıdır. Geotekstiller, zemine oranla çok daha yüksek geçirgenliğe sahip oldukları için özellikle yeterli eğim sağlandığında ve gözenekli olduklarında, kendi düzlemlerinde suyu iletirler. Bu özellikleri nedeniyle su tahliyesinin gerekli olduğu birçok mühendislik uygulamasında kullanımı büyük avantajlar sağlamaktadır (Koerner, 2016). Şekil 2.4'te geotekstillerin drenaj amacıyla kullanımına ait bir örnek uygulama görünmektedir.

Geotekstillerin düzlemi içinden gaz veya sıvı (su) akışı normal filtre malzemelerinden çok daha kolay sağlanmaktadır. Drenaj için daha çok kısmen daha kalın örgüsüz geotekstil ürünler tercih edilmektedir. Ürünün seçiminde geotekstilin basınca yüksek dayanım göstermesi ve iyi filtre özelliğine sahip olması gibi özelliklere dikkat edilmelidir (Rashid ve diğ, 2020).



Şekil 2.4 : Geotekstilin drenaj amacıyla kullanımı (Koerner, 2016).

2.1.3.4 Filtrasyon

Geotekstilin filtrasyon amacıyla kullanılması en eski, en çok bilinen ve en çok kullanılan yöntemdir (Şekil 2.5). Geotekstilin filtrasyon işlevi, suyun geçişini

sağlarken küçük tanelerin taşınmasını engelleyerek ince daneli zeminlerde borulanmayı önlemesi ile sağlanmaktadır. Bu işlevde geotekstil delikli boru veya agrega, filtre malzemesi gibi bir drenaj ortamını tıkanmaya karşı korur.

Bir zemin uygulamasında, geotekstilin filtrasyon görevini yerine getirebilmesi için su akışının geotekstil düzlemine dik doğrultuda gerçekleşmesi gerekir. Filtrasyon uygulamalarında geotekstil suyun geçişine izin veren filtre gibi davranır. Buna karşın belirlenmiş en küçük dane çaplı zemini tutar ve geçmesine izin vermez. Filtrasyon uygulamasında kullanılacak geotekstilin seçiminde, yeterli su geçirgenliği, yüksek porozite, uygun sıkışma oranı ve maksimum gözenek açıklığı gibi özelliklere sahip olması önemlidir. Ayrıca, boşluk suyu basıncının oluşumunu önlemek ve su akışına engel olmamak adına, geotekstil en az zemin kadar geçirgenliğe sahip olmalıdır (Yılmaz ve Eskişar, 2007).



Şekil 2.5 : Geotekstilin filtrasyon amacıyla kullanımı (Koerner, 2016).

2.2 Geotekstil Tüpler

Geotekstil tüpler, genellikle polipropilen kullanılarak imal edilen yüksek mukavemetli geotekstil kumaş tabakalarının birlikte dikilmesiyle oluşturulan, nispeten büyük miktarda atık malzemeyi tutabilen ekipmanlardır. Geotekstil tüplerin gözenekli bir yapıya sahip olması, yüksek su içeriğine sahip malzeme veya bulamaçla doldurulduğunda, katıları tutarken suyun dışarı atılmasına izin verir (Khachan ve Bhatia, 2017). Şekil 2.6’da geotekstil tüplerin arazi uygulamalarından bir örnek görülmektedir.



filtre kek üretmeyi amaçlamaktadır. Yerçekimi etkisi ile çalışan çökeltme havuzlarının inşa edildikten sonra çalıştırılması nispeten kolaydır. Bununla birlikte, yeterince uzun bir tutma süresi oluşturmak için çok geniş bir yüzey alanı gereklidir ve havuz, kapasitesini korumak için döngüsel tarama gerektirecektir (Moo-Young ve diğ, 2002; Newman ve diğ, 2004). Bu teknolojiler, büyük hacimlerde çamur ve çamurları susuzlaştırma yeteneğine sahiptir ancak hem ön ekipman maliyetleri hem de uzun vadeli bakım maliyetleri yüksektir (Newman ve diğ, 2004). Mekanik sistemlerin kurulum ve işletme maliyetlerinin yanı sıra işletmedeki sürecin zor olması geotekstil tüp ile susuzlaştırma teknolojinin gelişmesine büyük katkı sağlamaktadır. Çünkü mekanik sistemlere nazaran geotekstil tüp ile susuzlaştırma düşük maliyetli ve çok daha az bakım gerektiren bir sistemdir.

Geotekstil tüp ile susuzlaştırma, yüksek su içeriğine sahip atık malzeme/çamurunun katı oranının artırılması için bir geotekstil tüp veya bir dizi geotekstil tüpe hidrolik olarak pompalandığı bir işlem olarak tanımlanabilir.

Geotekstil tüpler, tortuları ve yeraltı suyunu kirletici ağır metalleri tutarken yüksek su içeriğine sahip çamurları susuzlaştırmak için geotekstillerin hidrolik özellikleri kullanılır. Seçilen geotekstil, suyun hızlı bir şekilde süzülmesine izin verecek kadar geçirgen olmalı, ancak bunu aşırı ince parçacık kaybı olmadan yapmalıdır. Geotekstil tüpler ayrıca tüm yüzeyinde susuzlaştırmının gerçekleşebileceği 3 boyutlu yüzey alanı sağlar. Diğer teknolojilerin aksine, geotekstil tüpler sahaya özel boyutlarda üretilebilir ve belirli bir susuzlaştırma işleminin ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanabilir. Tüplerin ayrıca taşınması ve kullanılması kolaydır ve sınırlı bertaraf tesisleri ve mekanik sistemlerden önemli ölçüde daha ekonomiktir (Lawson, 2008).

Geotekstil tüpler 200 metre uzunluğunda ve 10 metre çapında geniş boyutlarda dahi üretilebilmektedir. Uygulanacak proje kapsamında her boyutta geotekstil tüpler hazırlanabilmesi büyük bir avantaj sağlamaktadır (Lawson, 2008).

2.2.1 Geotekstil tüplerle susuzlaştırma aşamaları

Geotekstil tüpler ile susuzlaştırma işlemi oldukça basit olmakla beraber dikkat gerektiren üç aşamadan meydana gelmektedir. Bu aşamalar; dolum, susuzlaştırma ve konsolidasyon aşamalarıdır. Bu aşamalar sırasında sürekli takip edilmesi gerekmektedir. Bu aşamalar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- ***Dolum Aşaması***

Dolum aşamasında, yüksek dayanımlı ve belirli çaptan büyük daneleri tutma özelliğine sahip geotekstillerden imal edilmiş geotekstil tüpler, besleme bacasından tüp tamamen dolacak şekilde atık çamur, kirletilmiş zemin veya tarama ile elde edilmiş atık malzeme ile doldurulur (Şekil 2.7). Geotekstil tüp, içine doldurulan malzemenin dane yapısına uygun olarak seçilmeli ve yüksek verim alınabilmesi için katı malzemeyi büyük oranda tüp içinde tutmalıdır. Geotekstil tüp dolumu yapılırken genellikle küçük daneleri bir araya getirerek daha büyük topak yapılar oluşturacak polimerler kullanılmaktadır. Bu kimyasal malzemelerin seçimi önem arz etmektedir. Dolum yapılacak her malzemenin kendine uygun bir polimer malzeme ve optimum dozaj vardır. Bu polimer malzeme dolumdan önce pompa sistemine eklenmektedir.



Şekil 2.7 : Geotekstil tüplerin dolum aşaması (Şengül, 2016).

- ***Susuzlaştırma Aşaması***

Suyun uzaklaştırılması aşamasında, fazla su hiçbir ek işlem yapmadan geotekstil tüpten drene olur (Şekil 2.8). Bu aşamada çıkan su hacmi kadar torbada yer açıldığında, tekrar dolum işlemi gerçekleştirilir. Drene olan su genellikle tekrar kullanılabilir veya ek bir arıtma işlemi yapılmadan doğal ortama bırakılabilir kalitede olmaktadır. Geotekstil tüpün içerisinde tutulan katı malzeme miktarı ile geotekstil tüp yüzeyinden sızan sızıntı suyun kalitesi doğru orantılıdır. Yani ne kadar çok katı malzeme tüp içerisinde tutulursa sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı o derece azalmış olacak ve böylece su kalitesi daha optimum olacaktır.



Şekil 2.8 : Susuzlaştırma aşaması (Şengül, 2016).

- ***Konsolidasyon Aşaması***

Geotekstil tüp dolumunun son aşaması konsolidasyon aşamasıdır. Burada tamamen doldurulan geotekstil tüp kendi ağırlığı altında konsolide olması için bırakılmaktadır. Bu aşamanın süresi dolum yapılan malzemeye göre farklılık gösterebilmektedir. Zamanla tüp içerisindeki su tüp yüzeyinden sızarak uzaklaşmakta ve tüp içerisindeki filtre kekin yoğunluğu artmaktadır. Geotekstil tüp içindeki malzeme istenilen katı madde oranına sahip olduğu zaman susuzlaştırma işlemi tamamlanmış olur. Daha sonra tüp açılarak içindeki katı malzeme istenilen kullanım veya depolama noktasına taşınır. Bazen geotekstil tüplerin tasarımı uygulamaya göre özel boyutlarda olabilmektedir. Böyle durumlarda geotekstil tüp açılmadan taşıma mümkündür. Şekil 2.9’da geotekstil tüp içerisindeki filtre kekin çıkarılmasına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.9 : Konsolidasyon sonrası katı malzeme (Şengül, 2016).

2.3 Polimerik FlokÜlantlar (Polielektrolitler)

Polimerlerin akrilamit türevi olan flokÜlantlar organik yapıya sahiptirler. İyonik olmayan, anyonik ve katyonik yüklere sahip olan flokÜlantlar arıtma tesislerinde kullanılmakla beraber erozyon önlenmesinde de kullanılmaktadırlar.

Geotekstil tüp ile susuzlaştırma yönteminde çamurun yapısını ve fiziko-kimyasal özelliklerini değiştirerek verimi arttıran polimerlerin kullanılması önemli bir ön aşamadır. Temelde, polimerler flokülasyon sürecinde küçük danelerin daha büyük toprak yapıya (flok yapı) dönüşmesiyle geotekstil tüp içerisinde daha hızlı ve daha kolay bir çökelme ve susuzlaştırma sağlamaktadır.

İyonik polimerlerden sentetik olan katyonik ve anyonik akrilamit türevi polimerler, sıvı şartlandırıcı olarak geotekstil tüp ile susuzlaştırmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür şartlandırıcıların kullanılmasının nedeni, yük nötralizasyonu ve köprüleme mekanizmasını sağlayarak küçük çaplarda olan parçacıkların bir araya gelerek flok oluşturmasını sağlamaktır. Mandıra lagünleri üzerinde yapılan polimerli ve polimersiz çalışmalarda, flok oluşumu sağlanarak çamurun fosfordan %79-99 arasında arındırılabilirdiği Worley ve diğ., (2008) tarafından ispatlanmıştır. Yapılan başka bir çalışmada poliakrilamid katkı maddelerinin susuzlaştırma verimi üzerindeki etkileri Satyamurthy ve diğ. (2011) tarafından incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, kimyasal katkı maddelerinin kullanılması ile birlikte susuzlaştırma süresinde %85 azalma tespit edilmiştir. Koerner ve Koerner, (2006) ise yaptıkları orta ölçekli torba deneylerinde, siltli kil numunesinin katyonik polimer kullanılarak susuzlaştırılma işleminde, uygulama süresinden 80 dk tasarruf sağladığı belirlenmiştir.

Son çalışmalar sonucunda üretilmiş polimer katkı maddeleri; emülsiyon, kuru form ve çözelti şeklinde ticari olarak üretilmektedir (Moo-Young ve diğ., 2002). Alınan numune örneklerinde polimer katkı maddelerinin kullanımı, sudaki bulanıklığın azaltılmasında ve çamur kekinin oluşumunun sağlanması için flok oluşumunda rol oynayabilmektedir. Günümüzde yapılan çalışmalarda, susuzlaştırma verimini arttırmak, susuzlaştırma süresini azaltmak ve askıda katkı madde miktarının tutulma miktarını arttırmak için polimerler kullanılmaktadır (Ratnayesuraj ve Bhatia, 2018; Ardila ve diğ., 2020).

Tipik flokülasyon işleminde katyonik ve anyonik polimerlerin katkısı vardır ve bu özelliğe bağlı olarak; geotekstil tüp susuzlaştırma çalışmalarında, susuzlaştırma hızını

arttırmada ve susuzlaştırma süresini azaltmada etkin role sahiptir. Geotekstil tüp susuzlaştırma uygulamalarında kullanılan polimerler ise yüksek moleküler ağırlığa sahip emülsiyon kimyasal katkı maddeleridir (Şengül, 2016). Kullanılan ideal bir polimer katkı maddesinin tipi, dozajı ve konsantrasyonu susuzlaştırılmak istenen numuneye özgü olmalıdır. Genel olarak yapılan araştırmalara göre, gerekli olan optimum polimer miktarı minimum düzeydedir. Buna bağlı olarak, öncelikle küçük ölçekli deneylerin yapılması uygun görülmektedir.

Polimer katkı maddelerinin çeşitliliği, molekül ağırlıkları ve kimyasal özellikleri açısından ele alınabilmektedir. Polimer zinciri uzadıkça polimerin molekül ağırlığı artmaktadır (Cosgrove, 2005). Polimer flokülantlar, akrilamit türevi ve organik yapıda olan katkı maddeleridir ve cilde zarar vermeyen ve arıtma tesislerinde kullanılabilen beyaz renkli toz polimerlerdir. Ancak kullanılırken, suda çözünmüş olarak uygulanmalıdır (Şengül, 2016).

Polimerler, monomerlerin dizilişine göre farklılık göstererek doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı yapıda olabilir. Flokülasyon için en ideal polimer yapısı doğrusaldır. Bunun nedeni, doğrusal yapıya sahip olan polimerlerin çözünmesi kolay olduğu için yüzey alanını ve parçacık etkileşimini arttırmaktadır (Gregory, 2005). Eğer monomerler bir yük taşırsa o polimer, polielektrolit olarak adlandırılır. Polielektrolitler, geotekstil tüp ile susuzlaştırmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Polielektrolitlerin önemli özelliklerinden biri de yük yoğunluğudur (CD). Eğer katyonik polimerlerin CD değeri %60 ise bu durum, monomer birimlerinin %60'ının katyonik ve %40'ının iyonik olduğunu göstermektedir. Polimer flokülantlar yüklerine bağlı olarak üçe ayrılırlar: Yüksüz, katyonik ve anyonik. Hem anyonik hem de katyonik polimerler için yük, kopolimerlerinin oranına bağlıdır (Maurer, 2009).

Polimer flokülantların elde edilmesi için birçok yöntem mevcuttur. Flokülantlar farklı formlarda (toz, tane, emülsiyon ve sıvı çözelti olarak) üretilmektedir. Polimer flokülantlar üretilirken farklı her form için aynı monomer kullanılır. Toz formdaki polimer flokülantlar, jel oluşturabilmek için monomerlerin su ve katalizör kullanılarak jel polimerazasyonu elde edilmesini sağlamaktadır. Jel elde edildikten sonra kurutulur, öğütülür ve elenir. Elde edilen partikül boyutu 0-1 mm arasındadır. Toz formdaki flokülantların molekül ağırlığı fazla olduğu için çözünme süresi de fazladır (30-240 dk). Emülsiyon formdakiler ise, yağ içerisinde bulunan polimer hidrojenlerin

süspansiyonlarıdır. Hidrojellerin boyutu ise 1 mikron civarındadır. Bir diğer yöntem ise tane şeklindeki flokülantların emülsiyon formuna benzer bir üretim içermesidir. Jel boncuk olarak adlandırılan polimer flokülantlar, santrifüjlenmeden ve kurutulmadan önce yağ ve su ile damıtılır. Polimer flokülantlar üretimlerinden en düşük molekül ağırlığına sahip olanı jel boncuklardır. Parçacıkların boyutu 300 mikron civarında olduğu için çözünmeleri de kolaydır (Floerger, 2010).

Polimerik flokülantlar; katyonik, anyonik ve iyonik olmayan olarak üçe ayrılmaktadır.

2.3.1 Katyonik flokülantlar

Pozitif yüke (+) sahip olan katyonik flokülantlar, genellikle atık su arıtma tesislerinin çamur susuzlaştırma ünitelerinde yaygın olarak kullanılan akrilamit türevi polimerlerdir. Atık su arıtma tesislerinde meydana gelen flokların yüzeyde tutulması ve oluşan atık su çamurunun susuzlaştırılmasında, süreyi azaltmak ve verimi arttırmak için kullanılmaktadır (Şengül, 2016).

Katyonik flokülantlar kullanılarak susuzlaştırma uygulaması, askıda katı madde parçacıkları ve sulu çözelti içindeki polimer arasında meydana gelen iyon değişimine dayanmaktadır. İyon değişimi sonucunda elektriksel yüke sahip olan katı parçacıklarının kararlı yapılarının bozulmasıyla koagülasyon ya da flokülasyon meydana gelmektedir. Susuzlaştırma işlemi uygulanacak olan çamur numunesine göre kullanılması gereken katyonik flokülant dozajı ve türü de değişmektedir. Kullanılması gereken katyonik flokülantların türüne ve dozajına jar deneyi ile karar verilebilmektedir. Katyonik flokülantlar %0.05 – 0.1(genellikle %0.5) arasında seyreltilerek kullanılmaktadır (Şengül, 2016).

2.3.2 Anyonik flokülantlar

Negatif yüke (-) sahip olan anyonik flokülantlar, genellikle flokülasyon işlemi için askıda katı madde ve ağır metal arıtımında, kimyasal arıtma ve madencilik faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan kontamine suyun arıtımında kullanılan polimer türüdür. Katyonik flokülantların da kullanıldığı çamur susuzlaştırma uygulamalarında da kullanılmaktadır ancak katyonik flokülantlara göre anyonik flokülantlarda su çıkışı daha fazladır (Şengül, 2016).

Anyonik flokülantlar, atık su arıtma tesislerinde koagülasyon işleminin ardından uygulanan flokülasyon işleminin gerçekleşmesi için, madencilik ve kâğıt

endüstrilerinde, su ve atık su tesislerinde ise katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Maurer, 2009; Şengül, 2016).

Anyonik flokülantlar, düşük, orta, yüksek, çok yüksek molekül ağırlıklı flokülantlar olarak ele alınabilir. Düşük ve yüksek molekül ağırlıklı flokülantlar; kâğıt, petrol, tekstil ve gıda sektörlerinde, atık su arıtma tesislerinde sudaki organik maddenin flokülasyonunu sağlamak için tercih edilmektedir. Orta ve çok yüksek molekül ağırlığına sahip flokülantlar ise, kâğıt endüstrisinde ve başka endüstriyel atık su arıtma tesislerinde flokülasyonu sağlamak için kullanılabilir. Bunlara bağlı olarak; anyonik ve katyonik polimerlerin ortak özelliği, flokülasyonu sağlamak, susuzlaştırma verimini arttırmak ve geotekstil tüp ile susuzlaştırma uygulamalarında elde edilen çamurun susuzlaştırılması işleminde kullanılmaktadır (Maurer, 2009; Şengül, 2016). Anyonik flokülantlar inorganik zeminlerin susuzlaştırılmasında etkili topaklaştırma özelliklerine sahiptirler (Cantré ve Saatho, 2011).

2.3.3 İyonik olmayan flokülantlar

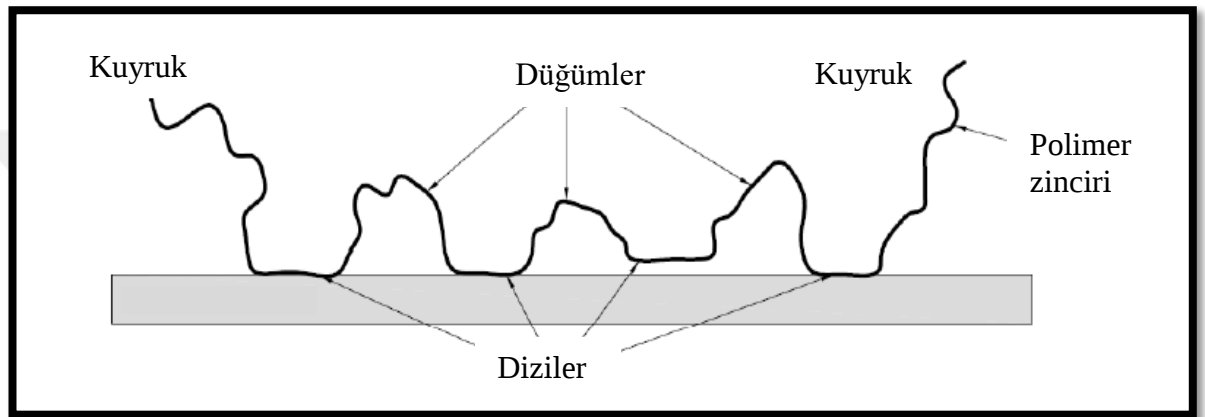
Polielektrolitler, katyonik ve anyonik flokülantlarda olduğu gibi üzerinde pozitif veya negatif yük bulundurmeyen flokülantlardır. Anyonik flokülantların kullanım alanlarıyla benzerlik göstermektedirler. Atık su ve maden sektöründen meydana gelen atık suların flokülasyonunda, zeta potansiyeli ve kararlılık açısından daha verimli sonuçlar vermektedir (Maurer, 2009; Şengül, 2016).

2.4 Flokülasyon

Flokülasyon, yüksek molekül ağırlığına sahip polimerlerin küçük partikülleri bir araya getirerek topak (flok) oluşturmaya verilen isimdir (Şengül, 2016). Flokülasyonun temel mekanizması ise, her bir parçacığı çevreleyen bir enerji bariyeri bulunmaktadır. Bu enerji bariyeri nedeni ile süspansiyon içerisinde askıda kalırlar. Bu enerji bariyeri ortadan kaldırılabilirse kararsız bir parçacık elde edilir ve flokülasyon gerçekleşir. Flokülasyon mekanizması da iki şekilde gerçekleşebilir. İlk mekanizma, polimer flokülantların partiküller tarafından adsorbe edilmesi ve bu partikülleri birbirine bağlayan köprüleme mekanizmasının meydana gelmesidir. İkinci mekanizma ise, süspansiyon halinde bulunan parçacıklar tarafından zıt yüke sahip polimerlerin adsorbe edilmesi ve parçacıklar arasındaki itme kuvvetinin azaltılarak yük nötralizasyonunun sağlanması esasına dayanmaktadır (Maurer, 2009).

2.4.1 Polimer adsorbsiyonu

Her iki mekanizmanın da meydana gelmesinden önce kullanılan polimerler ilk olarak küçük tanecikler tarafından adsorbe edilirler. Geotekstil tüp ile susuzlaştırma uygulamalarında kullanılan polimerlerin yüksek viskozite ve düşük doğal difüzyon oranına sahip olmasının nedeni, polimerlerin yüksek molekül ağırlıklarında olmasıdır. Difüzyon hızı adsorpsiyon hızından daha düşük olduğu için polimerlerin hızlı karıştırılarak uygulanması gerekir (Bratby, 2008). Adsorbe edilen polimer zinciri Şekil 2.10’ da gösterilmektedir.



Şekil 2.10 : Partikül yüzeyine polimerin adsorbe olmasıyla oluşan polimer zinciri (Gregory, 2005).

Kimyasal reaksiyonlar ve adsorpsiyon mekanizmasının türünden dolayı adsorbe edilmiş olan polimer zincirinin konfigürasyonu etkilenmektedir. Genellikle, partikül yüzeyi ve polimer zinciri arasındaki etkileşim zayıfsa, polimer zincirinin kuyruk kısmının çözelti içerisine daha fazla genişlemesine neden olmaktadır. Ancak polimer zinciri ve partikül yüzeyi arasındaki etkileşim ne kadar fazla olursa, polimer zincirinde kuyruk oluşumu olmaksızın daha düz bir polimer zinciri elde edilmektedir (Maurer, 2009).

Partikül yüzeyine bir polimer zincirinin bağlanması dört farklı adsorpsiyon etkileşimiyle bağlanabilmektedir (Gregory, 2005):

1. Elektrostatik etkileşim
2. Hidrojen bağı
3. Hidrofobik etkileşim
4. İyonik bağ

2.4.1.1 Elektrostatik etkileşim

Zıt yüke sahip polimer zinciri ve partikül yüzeyi arasındaki etkileşim güçlüdür. Yük yoğunluğu arttıkça, polimer zinciri ve partikül yüzeyi arasındaki adsorpsiyon etkileşimi de artar ve düz bir polimer zinciri elde edilir (Maurer, 2009).

2.4.1.2 Hidrojen bağı

Metal oksitlerin flokülasyonu için MgO, SiO₂, CaO gibi poliakrilamidler kullanıldığında hidrojen bağları amid grubu (N-C=O) formuna dönüşebilirler (Maurer, 2009).

2.4.1.3 Hidrofobik etkileşim

Eğer partikül yüzeyinde polar inorganik gruplar veya hidrojen bağı yok ise suyun afinitesinden bahsedilmez ve partikül yüzeyi hidrofobik durumdadır. Hidrofobik durumdaki partikül yüzeyi ve polimer zinciri arasındaki etkileşim Israelachvili ve Pashley tarafından 1984 yılında ölçülmüş ve Van der Waals kuvvetlerinden daha güçlü bir etkileşim olduğu saptanmıştır (Maurer, 2009).

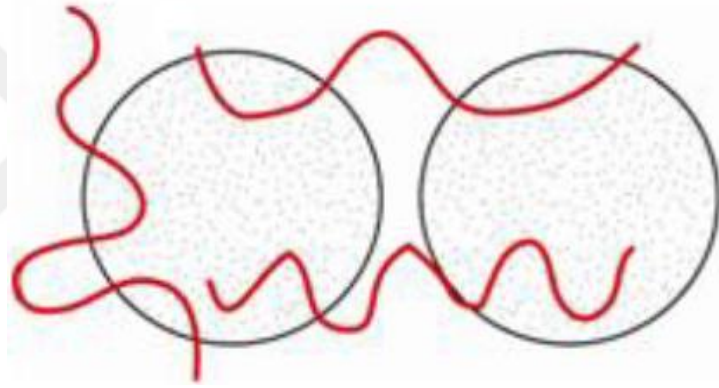
2.4.1.4 İyonik bağ

Eğer yeterli metal iyonu konsantrasyonu varsa anyonik polimerler iyonik bağ yoluyla elektrostatik itme kuvvetlerine rağmen negatif yüklü parçacık yüzeylerine bağlanabilirler. Örnek olarak karboksil grupları (-COOH) Ca⁺² iyonları tarafından anyonik partikül yüzeylerine bağlanarak adsorpsiyona katkıda bulunabilir (Elimelech ve diğ., 1995). Buna bağlı olarak, çok düşük kalsiyum oranlarında negatif yüklü parçacıklar anyonik polimerler yardımıyla flokülasyonu gerçekleştirebilir ancak kalsiyum iyonu ortamda yoksa flokülasyon gerçekleşemez (Gregory, 2005).

2.4.2 Köprüleme mekanizması

Köprüleme mekanizmasında; süspansiyona bir polimer eklenir ve başlangıçta tek bir parçacığa bir polimer zinciri bağlanır. Süspansiyon karıştırıldığında parçacıklar ve polimer zinciri arasında çarpışmalar meydana gelir ve polimer zinciri birden fazla parçacığa bağlanır. Bu da bir köprü ağı oluşturur. Köprüleme mekanizması Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

Polimer köprüleme için gerekli olan en önemli koşul, partikül yüzey alanında polimer zincirinin bağlanabilmesi için yeterli boş alanın olmasıdır (Tripathy, 2006). Düşük polimer dozajlarında köprüleme mekanizmasının meydana gelmesi için yetersiz miktarda polimer bulunurken, aşırı polimer dozajı uygulanır ise partikül yüzey alanları tamamen doymuş hale gelir ve süspansiyonun tekrar stabilizasyonuna neden olur (Gregory, 2005). Bunlara bağlı olarak, en verimli köprüleme mekanizması elde edilmesi için çok yüksek molekül ağırlığına sahip doğrusal yapıdaki polimer zinciriyle elde edilebilir (Elimelech, 1995). Köprüleme flokülasyonunu arttıran özellikler, polimer zincirinin özelliğini arttıran yüksek molekül ağırlığına sahip polimer kullanımı ve polimer zincirinin doğrusal yapıda olmasıdır. Anyonik polimerler ve negatif yüklü partikül yüzeyleri arasındaki elektrostatik itme kuvveti, polimer adsorpsiyonunu engelleyebilmektedir (Nasser, 2006).

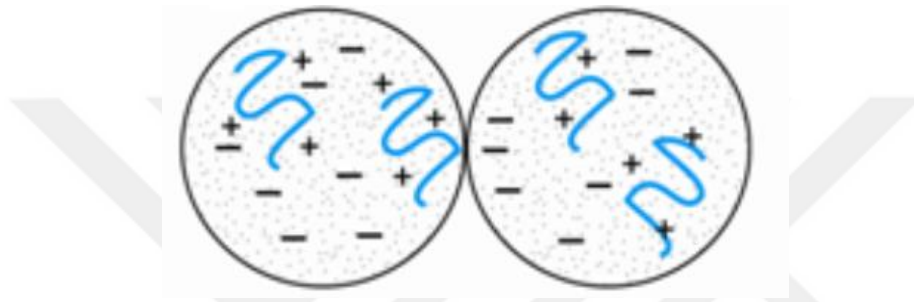


Şekil 2.11 : Köprüleme Mekanizması (Maurer, 2009).

2.4.3 Yük nötralizasyon mekanizması

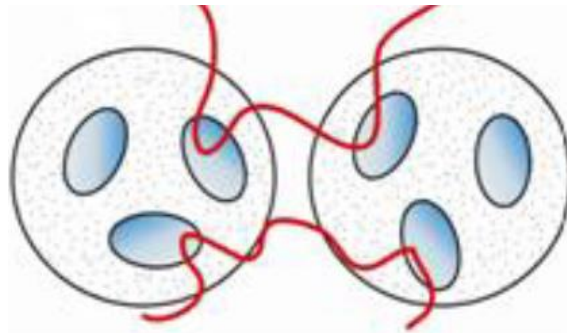
Yük nötralizasyon mekanizması, kullanılan katyonik polimerler ve negatif yüklü partiküller arasındaki denge mekanizmasının bozulması ile açıklanabilir. Yük nötralizasyon mekanizması da köprüleme flokülasyonu tarafından engellenir. Negatif yüklü partikül ve pozitif yüklü polimer arasındaki güçlü adsorpsiyon etkisi, mekânsal olarak ayrılmış karşıt elektrik yüklerinin ince tabakası olan elektrik çift tabaka (EDL) itme kuvvetini azaltır ve flokülasyonu sağlar. Ancak negatif yüklü partikül yüzeyine fazla miktarda polimer katkısı yapılırsa polimer adsorpsiyonu, yük nötralizasyonuna baskın gelerek tekrar sistemin stabilizasyonuna neden olabilir. Buna ek olarak, yapılan bir çalışmada sıfır zeta potansiyelini veren konsantrasyon değerinin optimum polimer dozaj aralığıyla elde edildiği görülmüştür (Gregory, 2005). Ayrıca, polimerlerin maruz

kaldığı yüksek enerjiye sahip adsorpsiyon ve güçlü çekme kuvvetlerinden dolayı pozitif yüklü polimerler, negatif yüklü partikül parçacıklarının yüzeyinde düz bir yayılım gösterme eğilimindedirler (Lyklema, 1987). Buna bağlı olarak, polimerlerin molekül ağırlığı ve yük yoğunluğu dikkate alındığında, yük yoğunluğunun en önemli belirleyici polimer özelliği olduğundan bahsedilebilir (Elimelech, 1995). Kısa boyutlara sahip polimer zincirleri, partikül yüzeyi kadar boyuta sahip olmadıklarında ve düşük molekül ağırlığındaki katyonik polimerler kullanıldığında, köprüleme flokülasyonunun gerçekleşme olasılığı düşmektedir (Nasser, 2006). Yük nötrleşmesini gösteren şematik görsel Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Yük nötralizasyonu (Maurer, 2009).

Yük nötralizasyon mekanizmasının önemli bir kısmını, kullanılan katyonik polimerlerin partikül yükünü eşit şekilde nötralize edemediği yük mozaik modeli oluşturmaktadır (D.R, 1971). Bu duruma yol açan koşullar ise, kullanılan polimerlerin yük yoğunluğunun partikül yüzeyindekilere göre yüksek olmasından kaynaklanmasıdır (Elimelech ve diğ, 1995). Yük yoğunluğu farkına bağlı olarak, partikül yüzeyindeki her kısım geometrik açıdan ele alındığında, polimerler tarafından nötralize edilemez. Bunun nedeni ise, yüksek yük yoğunluğuna sahip polimer zincirleri üzerindeki yükler arasındaki mesafenin, zayıf partikül yüzeylerindeki yüklerin arasındaki mesafeye göre daha az olmasıdır (Bolto, 2007).



Şekil 2.13 : Çift polimer flokülasyonu (Maurer, 2009).

Nötrale edilemeyen partikül yüzeyleri, yama şeklinde adsorbe edilen polimerlerin birbirleriyle etkileşime girerek flock oluşturmaya sebep olabilirler ve zıt yüklü yama şeklindeki polimerler arasında güçlü bir çekim kuvveti oluşturabilir (Elimelech ve diğ., 1995). Bu şekilde üretilen flocklar, köprüleme mekanizması ile oluşturulan flocklar kadar güçlü değildir ancak yük nötralizasyonu ile oluşturulan flocklardan daha güçlüdür (Bolto, 2007).

Düşük molekül ağırlığına ve yüksek yük yoğunluğuna sahip katyonik polimerler ve yüksek molekül ağırlığına sahip anyonik polimerlerin birlikte kullanılmasının etkili flokülasyon oluşumunu sağladığı tespit edilmiştir (Gregory, 2005). Çift polimer flokülasyon sistemi Şekil 2.13' te gösterilmektedir.

2.5 Geotekstil Tüp ile Susuzlaştırma

Limanlarda, marinalarda ve su kanallarında su derinliğin korunması ve ortam sürekliliğinin devamı için deniz dibi sedimentlerin dönemsel olarak taranması büyük önem taşımaktadır. Büyük hacimli su içerikleri ve kirlilik potansiyeli açısından dip tarama malzemelerinin çevresel yönetim maliyeti oldukça yüksek olabilmektedir. Bu nedenle, yürütülecek bir tarama faaliyetinin aşamalarının planlanması sırasında taranacak malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal özelliklerine göre karar şeması oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Çevresel açıdan bu malzemelerin yönetimi 3 şekilde olmaktadır. Bunlar; denize boşaltım, karada bertaraf veya faydalı kullanımdır (OSPAR, 2009). Bir bölgede kontrolsüz olarak yapılacak bir denize boşaltım faaliyeti bölgenin ekolojik yapısını bozabileceği gibi deniz tabanında çeşitli stabilite problemlerini de beraberinde getirebilmektedir (Sheehan ve Harrington 2012). Tehlikeli atık sınıfına girmedikçe tarama malzemelerinin karada bertaraf seçeneği yüksek maliyeti, geniş alan ve uzun süreli takip gerektirmesi sebepleriyle çoğunlukla tercih edilmemektedir (Agustini ve diğ., 2007; LIFE, 2002). Bu bakımdan dip tarama malzemelerinin iyileştirilerek faydalı kullanım alanlarında değerlendirmesi araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Sedimentlerin tek başına kullanılması (Tang ve diğ., 2011; Wang, 2009), deponi sahaları için günlük ara örtü ve geçirimsiz tabaka imalatlarında (Krause ve McDonnell, 2000; Riordan ve diğ., 2008, Cevikbilen ve diğ., 2020) kıyı koruma yapıları gibi mühendislik yapılarında kullanımı Cai ve diğ. (2017) ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Madencilik, temel insan ihtiyaçlarının karşılanması açısından, tarım sektörü ile birlikte en önemli iki ekonomik faaliyet alanından birisidir. Sanayi devriminin arkasındaki itici g olan madencilik faaliyetleri, insanlığın artan ihtiyaçlarını karşılamak adına günden güne artarak devam etmektedir. Madencilik, bulunduğu bölgede yüksek miktarlarda atık madde ortaya çıkaran önemli bir endüstriyel faaliyettir. Bu yüzden günümüzde en kötü ikinci küresel kirletici arasında görülmektedir (Blacksmith Institute, 2018). Yerkabuğunun farklı derinliklerinde bulunabilen cevher madeni, madencilik faaliyetleri sırasında açığa çıkan toplam kazı hacminin yalnızca küçük bir bölümüdür. Hedef mineral veya element kazanılırken kazılan toprak, fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerden geçmekte, çeşitli atıklar ve sıyırma malzemeleri de açığa çıkmaktadır (Salomons, 2005). Bu durum, doğal ortamdaki bazı elementlerin miktarlarını 1000 katının da üzerine çıkararak maden bölgesinde ve çevresinde kirliliğe yol açabilmektedir (Dudka ve Adriano, 1997; Gosar ve diğ, 2016).

Teknolojik gelişmelerin ve sanayileşmenin bir sonucu olarak meydana gelen kentleşme ve hızlı nüfus artışı birçok alanda endüstriyel süreçlerden kaynaklanan yüksek su içeriğine sahip atık malzemelerin oluşmasına sebep olmuştur. Bu endüstriyel atıklar, yüksek maliyetli, büyük alanlara ihtiyaç duyan ve uzun dönem takip edilmesi gereken düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmektedir. Dünyanın neredeyse her yerinde yan ürün olarak ortaya çıkan ve miktarı milyonlarca tonu bulan uçucu küllerin bertaraf sorunu buna örnek olarak verilebilir (Yazıcı, 2008; Agustini ve diğ, 2016). Aynı zamanda bu atık malzemelerin farklı alanlarda geri kazanılması da mümkündür. Sediment, atık cam, silisli zemin, atık yakma tesisi uçucu külleri, atık seramik tozu, metal çamuru, arıtma çamuru ve maden atıkları gibi atık malzemelerden yapay hafif agrega üretimine yönelik çalışmalar mevcuttur (Chang ve diğ, 2016; Tang ve diğ, 2015; Scheinherrov ve diğ, 2016; Chang ve diğ, 2007; Cheeseman ve Virdi, 2005; Huang ve diğ, 2007).

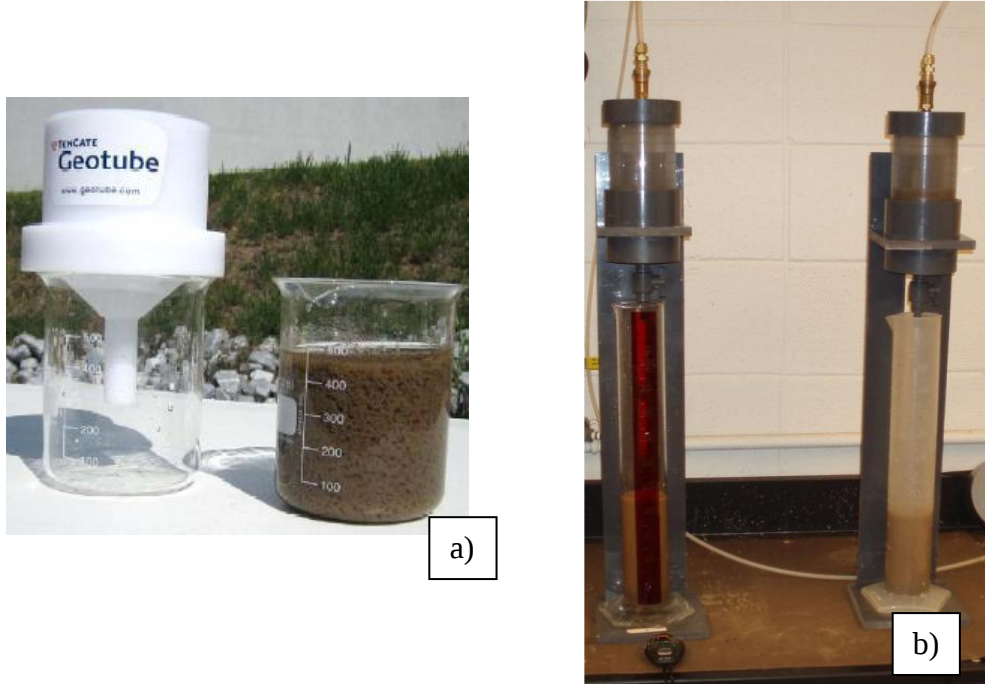
Tarama sırasında kesici emici uçlu, kepçeli veya kovalı tarak gemisi gibi farklı tarama yöntemleri kullanılmaktadır. Tarama tekniğine göre ortaya çıkan tarama çamurunun su içeriği farklılık göstermekte, özellikle kazıcı emici uçla gerçekleştirilen tarama faaliyetlerinde tarama amurlarının su içeriği yüksek kalmaktadır. Vakum filtre, santrifüj, bant filtre, pres filtre ve çamur kurutma yatakları ile susuzlaştırılan tarama malzemelerinin hacimleri azaltılırken çamur lagünlerinde depolanmaları da sağlanmaktadır.

Yüksek su içeriğine sahip atık malzemelerin geotekstil tüp ile susuzlaştırılmasında poliakrilamid katkı kullanımının oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmektedir (Koerner ve Koerner, 2006; Satyamurthy ve Bhatia, 2009; Watts ve Trainer, 2009; Chu ve diğ, 2011; Khachan ve diğ, 2011; Berilgen ve Bulut, 2016). Bu yöntemde yüksek mukavemetli dikişlerden meydana gelen yüksek geçirgenliğe sahip geotekstil tüpler, içine doldurulan atık çamurları için filtrasyon görevi yaparken, dolum öncesinde çamur karışımına eklenen poliakrilamid katkıları küçük taneleri bir araya getirerek daha büyük floklar oluşturmaktadır. Bu sayede boşluk suyunun çıkış hızı artmakta, süpernatant fazına geçen katı madde miktarı oldukça azaltılmaktadır. Satyamurt ve diğ. (2011) poliakrilamid ve geotekstil tüp kullandığı çalışmalarda susuzlaştırma süresinde % 85'e varan azalmalar gözlemlemiştir. Susuzlaştırma çalışmalarında kullanılan poliakrilamidlerin anyonik ve katyonik karakteri susuzlaştırma veriminde önemli bir yer tutmaktadır (Leshchinsky ve diğ, 1996; Aydılek ve Edil, 2002; Moo-Young ve diğ, 2002). Worley ve diğ. (2008) tarafından mandıra lagünleriyle poliakrilamidli ve poliakrilamidsiz geotekstil kullanılarak yapılan çalışmalarda çamurun içindeki fosfordan da büyük oranda arındırılabilirdiği görülmektedir.

Araştırmacılar tarafından susuzlaştırma performansının belirlenebilmesi için birçok deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzenekleri, herhangi bir standart olmamasına rağmen araştırmacılar tarafından geotekstil tüplerin susuzlaştırma performansının araştırılması için sıklıkla kullanılmaktadır. Mevcut deney yöntemleri arasında küçük ölçekli laboratuvar testleri, büyük ölçekli saha testleri ve laboratuvar veya sahada gerçekleştirilebilecek orta ölçekli deneyler bulunur. Küçük ölçekli laboratuvar deneyleri tipik olarak düşen seviyeli deney (FHT) (Şekil 2.14a) ve basınçlı filtre deneyi (PFT)'ni (Şekil 2.14b) içerir. PFT deneyi, FHT deney düzeneğinin modifiye edilmiş bir halidir. PFT deneyinde, deney düzeneğinin üst kapağından deney hücreğine basınç verilerek deney yapılır. 34,5 kPa civarında uygulanan basınç, geotekstil tüp ile susuzlaştırma sırasında tüp içerisindeki iç basıncı temsil eder (Maurer ve diğ, 2012). Bu deneyler standartlaştırılmadığından, birkaç çeşidi mevcuttur. Örnek olarak Syracuse Üniversitesinde geliştirilen PFT deney düzeneği (Moo-Young ve diğ, 2002), Basınçlı filtre deneyi (Kutay ve Aydılek, 2004) ve filtre deney aleti (Muthukumaran ve Ilamparuthi, 2006) gösterilebilir. Bu deney düzenekleri boyut olarak ve geotekstil malzemenin desteklenme durumlarına göre değişiklik göstermektedirler.

Birçok araştırmacı susuzlaştırma performansını araştırırken küçük ölçekli laboratuvar deneyleri kullanmıştır (Moo-Young ve diğ, 2002; Kutay ve Aydilek, 2004; Liao ve Bhatia, 2005; Muthukumaran ve Ilamparuthi, 2006; Satyamurthy, 2008).

Asılı Torba Testi (HBT) (Şekil 2.14c) ve Geotekstil Tüp Susuzlaştırma Testi (GDT) (Şekil 2.14d) gibi orta ölçekli deneyler tam ölçekli geotekstil tüp ile susuzlaştırılma işleminin daha iyi temsilcileridir. Ancak, deney süreleri uzundur ve büyük miktarlarda çamur ve geotekstil malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır (Koerner ve Koerner, 2006). HBT deney düzeneğinde basit bir çerçeveye asılan 40cm eninde ve 150cm uzunluğa sahip standart bir geotekstil torba kullanılmaktadır. GDT deney düzeneği sahada geotekstil tüp susuzlaştırılması uygulamalarının iyi bir şekilde temsil etmesi için geliştirilen yeni bir deney sistemidir. GDT deneyinde, tam ölçekli bir tüpün şekline çok benzeyen ve her yönden susuzlaştırmaya izin veren yastık şeklinde bir torba kullanır. Korner ve Korner (2010) GDT deney düzeneğini daha küçük boyutta olması (böylelikle daha az malzeme ihtiyacı) ve geometrisinin saha uygulamalarını daha çok temsil etmesinden dolayı HBT deney düzeneğine tercih etmiştir (Koerner ve Koerner, 2010). Büyük susuzlaştırma projelerinden önce büyük ölçekli deneylerin yapılması faydalı olacaktır. Araştırmacılar tarafından sınırlı olmasına rağmen büyük ölçekli deneyler yapılmıştır (Mori ve diğ, 2002; Shin ve Oh, 2003). Şekil 2.14'te araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.14 : Susuzlaştırmada kullanılan deney düzeneği a) FHT (Tencate, 2007a); b)FHT/PFT (Grzelak, 2009), c) HBT (Grzelak, 2009), d) GDT (Tencate, 2007b).



Şekil 2.14 (devam) : Susuzlaştırmada kullanılan deney düzenekleri a) FHT (Tencate, 2015); b)FHT/PFT (Grzelak, 2009), c) HBT (Grzelak, 2009), d) GDT (Tencate, 2007).

Birçok araştırmacı tarafından susuzlaştırma işleminde kullanılacak geotekstil malzemenin özelliklerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalara ait sonuçlar özet olarak Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Araştırmacılar tarafından yapılan susuzlaştırma çalışmalarında filtre seçimi ile ilgili sonuçlar.

Kriter	Kullanılan zemin ve geotekstil	Kaynak
<u>Tutunma</u> : $O_{85}/D_{75} < 1$ bütün POA	PCB ile kirlenmiş arıtma tesisi çamuru; Örgülü geotekstil	Aydilek, (2002)
<u>Tıkanma</u> : $O_{40}/D_{15} > 1$ ---- $0.5 < POA < 8$		
$O_{40}/D_{30} > 1$ ---- $POA > 8$		
<u>Tutunma</u> : $O_{95}/D_{85} < 1$	Kumlu ve siltli çamur; Örgülü geotekstil	Moo-Young ve diğ, (2002)
<u>Tıkanma</u> : $POA(\%) = 1-5$		
<u>Tutunma</u> : $O_{95} < 0.3$ mm veya $O_{90}/D_{90} = 2-5$	Killi çamur; Örgülü geotekstil	
<u>Tutunma</u> : $O_{85}/D_{50} < 1$ bütün POA	Siltli kumlu çamur; Örgülü geotekstil	Aydilek, (2006)
<u>Tıkanma</u> : $O_{40}/D_{15} > 1$ bütün POA < 8		
$O_{40}/D_{30} > 1$ bütün POA > 8		

Çizelge 2.2 (devam) : Araştırmacılar tarafından yapılan susuzlaştırma çalışmalarında filtre seçimi ile ilgili sonuçlar.

Kriter	Kullanılan zemin ve geotekstil	Kaynak
AOS<0.425 mm 40<AOS/D ₁₅ <125 0.3<AOS x D ₈₅ /D ₁₅ <1.7	Siltli çamur; Örgülü geotekstil	Muthukumaran ve Ilmaparuthi, (2006)

Turan ve diğ. (2014) tarafından İstanbul ve çevresinde deniz ve dere tabanından alınan yüksek su muhtevasına sahip tarama çamurunu anyonik ve katyonik poliakrilamid kullanarak hazırladıkları küçük ölçekli bir geotekstil tüp içerisinde susuzlaştırma çalışması yapılmıştı. Çalışmada, tarama çamurunun susuzlaştırılmasında geotekstillerin filtrasyon ve depolamada büyük fayda sağladığı hem anyonik ve hem de katyonik polimer katkıların çökeltme etkinliği gösterdiği görülmüştür. Ancak süzülen suyun bulanıklılık ve torba içinde tutulabilen kuru kekin katı madde miktarı göz önünde tutulduğunda en iyi performansı katyonik katkıların verdiği gözlenmiştir. Şekil 2.15'te katkılara göre sızıntı suyunun duruluğu görülmektedir. Haliç dip tarama çamurundan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerde başlangıç katı madde miktarı % 10 olan çamura, katı miktarına göre 1.5 kg/ton dozajında % 0.1'lik katyonik "Proestol 822" katkısı ilave edildiğinde yedi gün sonunda kuru kekin katı madde miktarının ortalama % 49 olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.15 : GDT Deneyleri sırasında torba dışına sızan suyun görünümü (Turan ve diğ, 2014).

Mastin ve Lebster (2008), susuzlaştırma işleminde geotekstil tüp uygulaması ile diğer yöntemler arasında tesis kurulum maliyetleri açısından karşılaştırmalar yapmış ve en ekonomik çözümün geotekstil tüp uygulamasının olduğunu ortaya koymuştur. Çizelge 2.3'te geotekstil tüp uygulamasının diğer susuzlaştırma yöntemleriyle maliyet açısından karşılaştırılması verilmiştir. Ayrıca, çalışmada sırasıyla Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te verildiği üzere işçi saat ve çevresel faktörler açısından da değerlendirmelerde bulunulmuş, geotekstil tüp uygulamasının diğer susuzlaştırma yöntemlerine göre daha avantajlı olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : Geotekstil tüp kullanımı ile susuzlaştırmanın diğer yöntemlere göre maliyet karşılaştırması (Mastin ve Lebster, 2008).

Susuzlaştırma Yöntemi	Maliyet
Geotekstil tüp	~3-4.6 \$/m ³ geotüp dahil Polimer, test, teknik yardım, vs. dahil
Kapalı atık alanı	~11.5-38 \$/m ³ + işletme ve bakım masrafları ~15-92 \$/m ³
Mekanik (belt filter) pres	~20 \$/m ³ (~\$22 bin/hafta) ekipman kiralama + binanın inşası, taşıyıcı, kamyonu yükleme alanı, polimer, yakıt, işletme ve bakım masrafları

Çizelge 2.4 : Geotekstil tüp kullanımı ile susuzlaştırmanın diğer yöntemlere göre katı madde ve çalışma alanı yönünden kıyaslanması (Mastin ve Lebster, 2008).

Susuzlaştırma Yöntemi	Maliyet
Geotekstil tüp	10-30 işçi saat---montaj, manifold sistemi, katı maddenin pompalanması dahil Mevsimsel etki ---Pompalar için donmaya karşı önlem ~100 işçi saat~1.9 milyon litre+ aletin sürekli çalışması
Mekanik (belt filter) press	Mevsimsel etki---Polimer besleme boruları için donmaya karşı önlem+ kullanıcı/ teknisyen sürekli gözetim/bakım

Berilgen ve Bulut (2016) tarafından yapılan Haliç dip tarama çamurunun geotekstil kullanılarak susuzlaştırılması çalışmalarında katyonik poliakrilamidlerin anyonik poliakrilamidlerden daha etkili olduğu söylenmektedir. Aynı çalışmada, optimum

dozaj olarak katı oranı %0.5 poliakrilamid olarak bulunmuştur. Bu oran 500ppm değerine denk gelmektedir.

Çizelge 2.5 : Geotekstil tüp kullanımı ile susuzlaştırmanın diğer yöntemlere göre çalışma alanı yönünden kıyaslanması (Mastin ve Lebster, 2008).

Susuzlaştırma Yöntemi	Maliyet
Geotekstil tüp	İki (2) tane 20m çevre x 33m uzunluğa sahip geotüpler için 555 m ² alana ihtiyaç var Katı maddenin idaresi---atmosfer kapalı sistem Kokular, patojen ve diğer kirleticilerle temas riski az
Mekanik (belt filter) pres	Küçük çalışma alanlı araziler ve şehir içi alanlarda daha kullanışlı Katı maddenin idaresi--- atmosfer açık, uçucu maddeler kaçabilir, yüksek sesli, kullanıcı/teknisyen kirleticilere maruz kalabilir

Susuzlaştırma işleminde geotekstil malzemeler bir filtre görevi görmektedir. Geotekstillerde görünür açıklık boyutu (AOS) önemli bir parametredir. Yapılan çalışmalarda AOS'nin 0.42 ve daha küçük olduğunda susuzlaştırılma işlemlerinde yeterli olduğu belirlenmiştir (Maurer ve diğ, 2012; Khachan ve diğ, 2012; Cetin ve diğ, 2017).

Susuzlaştırma çalışmalarına bakıldığında, birçok araştırmacı tarafından yüksek su içeriğine sahip uçucu küllerin geotekstil ve poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırılması çalışılmıştır. Maurer ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada F ve C tipi uçucu küllerin bu yöntem ile susuzlaştırılması çalışılmıştır. İki tip uçucu kül için de geotekstil tüplerin kullanılarak susuzlaştırılmasının mümkün olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca F tipi uçucu küller için hem anyonik hem de katyonik, C tipi uçucu küller için ise yalnız anyonik poliakrilamidlerin etkili olduğu belirlenmiştir. Khanchan ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, C sınıfı uçucu küllerin susuzlaştırılmasında dört farklı tipte ve farklı görünür açıklık boyutunda (AOS) geotekstil kullanılmıştır. Geotekstilin hidrolik özelliklerinin $AOS \leq 0.42mm$ olduğunda susuzlaştırma performansı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

Poliakrilamid eklenerek yapılan susuzlaştırma işlemi sonunda meydana gelen filtre kekin ilk durumuna göre mukavemetinin arttığı görülmüştür (Khanchan ve diğ., 2012). Çetin ve diğ. (2017) yaptığı çalışmada geotekstil ve poliakrilamid eklenerek uçucu külün susuzlaştırılması sırasında fiber eklenmesinin susuzlaştırma süresi üzerinde ciddi bir etki oluşturmadığı anlaşılmıştır. Fakat oluşan filtre kekin mukavemeti daha yüksek olmuştur (Çetin ve diğ, 2017).

Maden atıklarının susuzlaştırılması hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu konu hakkında az sayıda çalışmanın mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Bu kısıtlı çalışmalar elektroosmotik akış (Lockhart ve Stickland, 1984), elektrokinetik enerji kullanımı (Johns, 2004; Lee ve diğ, 2016) ve geosentetik kullanımı (Fourie ve diğ, 2007) üzerinedir. Maden atıklarının susuzlaştırılması ile ilgili literatürde sınırlı olmak ile beraber farklı yöntemler uygulanmıştır. Fakat yapılan çalışmalar görece eskidir. Maden atıklarının susuzlaştırılmasında geotekstil tüp kullanılması hakkında çok sınırlı sayıda çalışma olduğu anlaşılmaktadır.

Bazı araştırmacılar sentetik poliakrilamid kullanımının insan ve çevre sağlığı açısından sorunlar oluşturabileceğini ifade etmektedir (Glover ve diğ, 2004; McLaughlin ve Bartholomew, 2007; Semsar ve diğ, 2007). Bu nedenle saha çalışmalarında kullanılacak uygun poliakrilamid ve miktarlarının belirlenmesinde azami dikkatin gösterilmesi gerekmektedir. Flokülasyonun geotekstil tüp içinde tamamlanması önemlidir. Aksi durumda aşırı dozlama sonucu ortamda kalan polimer aşırısı sızıntı suyuyla beraber deşarj edilirken ya boru hatlarında ya da saha içinde flokülasyon olmasına yol açacaktır. Literatürde yapılan çalışmalarda sızıntı suyunda ağır metal varlığı (Khachan, 2012; Berilgen ve Bulut, 2016), azot bileşikleri ve organik madde içeriği (Guerdat, 2013) araştırılmıştır.

Araştırmacılar tarafından laboratuvar ölçeğinde hızlı bir şekilde susuzlaştırma işleminin yapılabilmesi için küçük ölçekli deney aletleri denenmektedir (Khanchan ve diğ., 2012; Çetin ve diğ, 2017; Ratnayesuraj ve Bhatia, 2018). Son zamanlarda arıtma çamurlarının geotekstil tüp ve poliakrilamid kullanılarak susuzlaştırılmaları ile ilgili çalışmalar da yapılmaktadır (Guimarães ve diğ, 2014; Ardila ve diğ, 2020). Yapılan çalışmalarda arıtma çamurlarının bu yöntem ile susuzlaştırılmasının ekonomik ve çevresel açıdan faydalarının olduğu belirtilmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışması kapsamında belirlenen Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının geotekstil tüp kullanılarak susuzlaştırılması ve geoteknik mühendisliği bakımından değerlendirilmesi için yapılan deneyler ve bu deneylerin metotları verilmiştir. Birinci kısımda Haliç dip tarama çamuru ve maden atığı hakkında bilgiler verilmiştir. Burada malzemelerin tanımı, malzemelerin alındığı yerler ve malzemelerin endeks özellikleri verilmiştir. İkinci kısımda ise tez çalışmasında yapılan deneyler ve deneylerin metotları verilmiştir. Bu kısımda ilk olarak malzemelerin zeta potansiyelleri araştırılmıştır. Jar deneyi yapılarak 13 farklı poliakrilamid seçimi yapılmıştır. Filtre deneyi yapılarak geotekstil malzeme ve poliakrilamid arasındaki susuzlaştırma performansı araştırılmıştır. Daha sonra laboratuvar ölçeğinde üç boyutlu deney sistemi olan geotekstil susuzlaştırma deneyleri yapılarak malzemelerin susuzlaştırma performansları araştırılmıştır. Geoteknik mühendisliği açısından değerlendirme yapılabilmesi için malzeme özelinde deneyler yapılmıştır. Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyleri sonunda poliakrilamid katkısız ve katkılı olarak morfolojik analizler yapılmıştır. Burada poliakrilamid sonunda yeni oluşan topak formun fiziksel görüntüsünün incelenmesi amaçlanmıştır. Son olarak susuzlaştırma işlemi sonrası oluşan sızıntı suyunun çevresel etkilerin araştırılması için kimyasal analizler yapılmıştır.

3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Tez çalışması kapsamında, İstanbul il sınırları içerisinde bulunan Haliç dip tarama çamuru ve İstanbul Kemerburgaz'da bulunan bir agrega madeninden alınan maden atığı malzeme olarak kullanılmıştır. Geotekstil malzeme olarak piyasada susuzlaştırma uygulamalarında kullanılan bir geotekstil seçilmiştir. Çalışmada 2 farklı firmadan temin edilen 13 farklı poliakrilamid kullanılmıştır. Bunların 11 tanesi anyonik yüklüken 2 tanesi ise katyonik yüke sahiptir. Tüm malzemeler ve malzemelerin özellikleri başlıklar halinde sırasıyla verilmiştir.

3.1.1 Haliç dip tarama malzemesi ve geoteknik özelliği

Dünyanın en güzel tabii limanlarından biri olan Haliç, M.Ö. 7000 yıllarında, Kağıthane Deresi ile Alibeyköy Deresi'nin birleştiği kesimin membaini oluşturan

bölgenin, Marmara ve İstanbul Boğazı'ndan gelen deniz sularıyla kavuşması ile oluşmuştur. Toplam uzunluğu 7.5 kilometreye yakın olan Haliç, Alibeyköy – Kağıthane uç noktasından kuzey batı ile güney doğu yönünde kıvrılarak İstanbul Boğazı'nın Sarayburnu Tophane kıyılarına kadar uzanır. Haliç'in en geniş yeri Cibali ile Kasımpaşa arasında yaklaşık 700 metre olup derinliği ise başlangıç kısmında 1-2 metre olmasına rağmen Boğaz girişinde 60 metreyi bulmaktadır. Haliç'in tabanı derelerin sürükleyip getirdiği kum, silt ve organik çökeller yüzünden yoğun çamur katmanlarıyla örtülüdür (Berilgen ve Turan, 2016). Şekil 3.1'de Haliç görüntüsü verilmiştir.

Haliç tabanında biriken dip çamuru yaklaşık olarak 50 yıldır sorun teşkil etmektedir. 1997 yılında ilk büyük tarama çalışmasına başlanmıştır. İstanbul Büyükşehir Belediye (İBB) tarafından Haliç'in temizlenmesi için, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Çevre Mühendisliği Bölümü liderliğinde Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) ve Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi (GTÜ) iş birliği ile hazırlanan Haliç Islah (Rehabilitasyon) Projesi Nihai Raporu (Öztürk, 1995) ve Çevresel Etki Değerlendirmesi Raporu (Öztürk, 1996) doğrultusunda proje başlatılmıştır. Proje kapsamında Haliç'in Balat-Hasköy ile Eyüp-Sütlüce arasındaki kısmında asgari 5 m ve Sütlüce-Eyüp hattı ile Silahtar arasındaki bölgede ise 4 m derinlik sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 3.1 : Haliç'in görünümü (Url-1).

Mayıs 1997 itibariyle başlayan tarama işlemleri 1998 sonunda tamamlanmıştır. Tarama projesinde Haliç içinde bulunan tarihi adalar mevcut şekliyle korunmuştur. Silahtar'ın menba tarafında 100 m genişliğinde su kanalları oluşturulmuş ve bu kanal

kıyılarında seddeler inşa edilerek arka kısmında çamur dolgu ve peyzaj alanları teşkil edilmiştir. Haliç sahilindeki depo alanlarında 1 Temmuz 1997 itibariyle 150.000 m³ oldukça katı yapıda çamur depolanmıştır. Bu alanlar, depolanan çamurun kurummasını müteakip yeşil alan olarak düzenlenmiştir. Tarama ve düzenleme çalışması yapılan kısmın uzunluğu ~5 km ve genişliği ortalama 200 m'dir. Takribi 1.000.000 m³ tarama alanından ortaya çıkan yaklaşık 5 milyon m³ %10-15 katı oranına sahip tarama çamurunun büyük kısmı basınçlı iki paralel boru hattı ile Küçükköy-Cebeci bölgesindeki terkedilmiş taş ocaklarında inşa edilen çamur barajına basılmıştır. Şekil 3.2'de tarama sürecinde boru hattı güzergahı ve pompa istasyon yerleri görülmektedir.

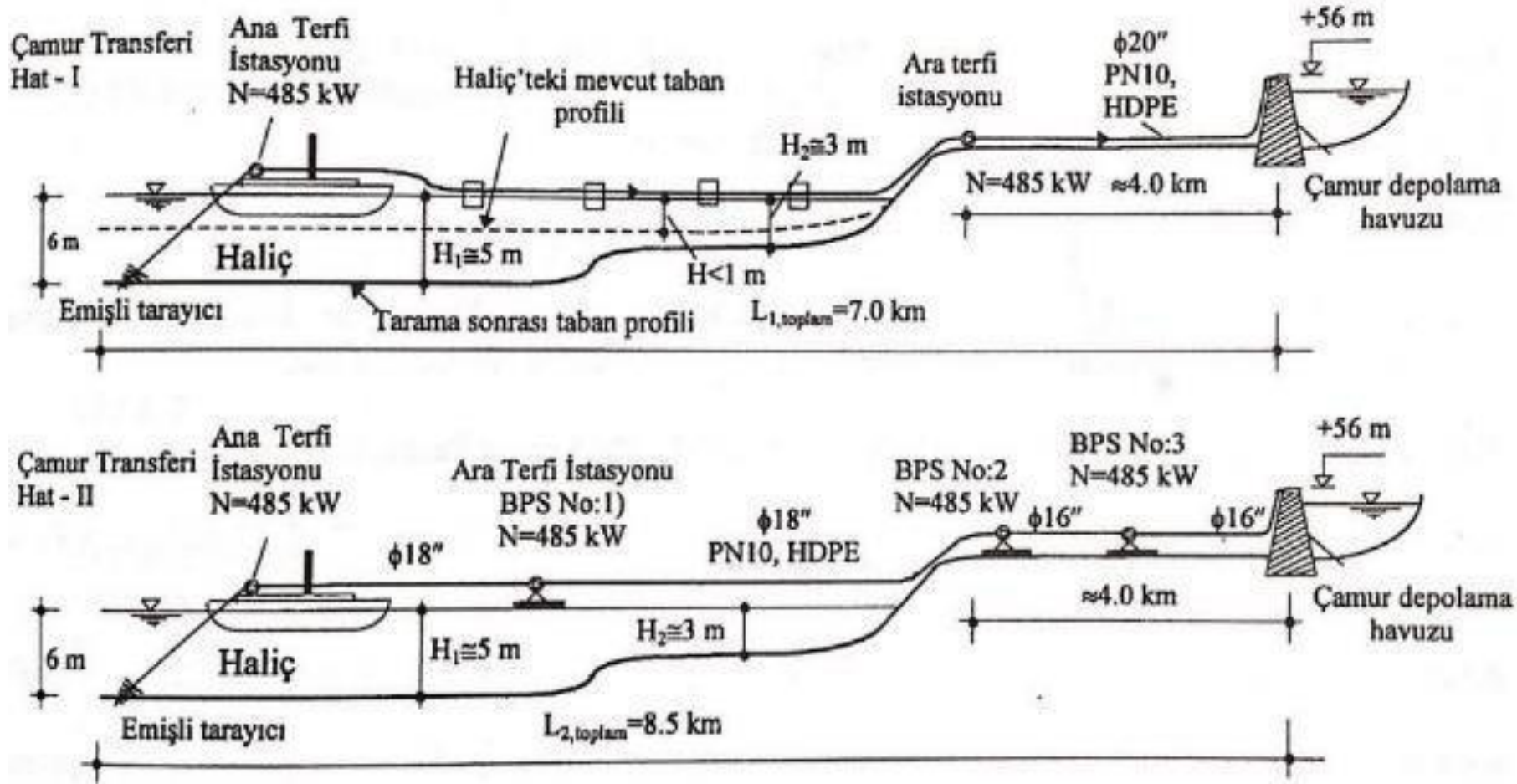
Şekil 3.2 : Tarama sürecinde (1997-99) boru hattı güzergahı ve pompa istasyon yerleri (Öztürk, 2016).

Haliç tabanındaki çamur, emici-parçalayıcı ekipmanı olan tekneler vasıtasıyla emilerek tarama gemisindeki özel hazneye alınmış ve hava ile temas ettirilmeksizin pompalanmıştır. Kirlenmenin geniş bir alana yayılmasını önlemek için su içinde dalgalanma ve türbülansın minimum seviyede kalmasına dikkat edilmiştir. Tarama işlerinde Amerika ve Hollanda yapımı kesici kafalı tarama teknesi (Fatih ve Kocatepe) ve 1 adet Auger tip tarama teknesi (Yavuz) kullanılmıştır. Bu tekneler üzerindeki pompalarla taranan çamur, hava ile temas ettirilmeden terfi hattına basılmıştır. İki paralel boru hattı ile toplam 2000 m³/saat debide çamur-su karışımı basılmıştır. Bu değer 1 saatte 200 adet kamyonun taşıma kapasitesine eşittir. Paralel iki boru hattının toplam maksimum günlük kapasitesi 60.000 m³/gün'dür. -6 m kotundan emilen %50 çamur %50 Haliç suyu karışımı çamur barajında +60 m kotuna yükseltmiş ve terfi hattında yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) borular kullanılmıştır (Öztürk, 2016). Tarama ve iletim sistemi ile ilgili bilgiler Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Taş ocaklarının ağzında kret kotu 60 m'ye ulaşan çamur barajı yapılmıştır. Yapılan barajda depolanan çamurun konsolidasyon süresini azaltmak için tabandan sızıntı suyu alınmış ve bu şekilde barajda çökelen çamurdan süzülen su Küçükköy Deresi üzerinden tekrar Haliç'e verilmiştir. Çamur depolama barajında susuzlaştırmanın daha kolay olması için geotekstil ile donatılmış özel dren elemanları kullanılmıştır. Susuzlaştırma tamamlanıp çamur yeterince konsolide olduktan sonra alanın üzeri bitkisel toprakla örtülerek bitkilendirilmiştir.

Haliç Islah (Rehabilitasyon) Projesi kapsamında tarama, peyzaj ve çevre düzenleme ile İSKİ'nin çevre koruma altyapı tesislerinin yapımı dahil yapılan yatırımların bedeli, 2000 yılı itibarı ile ~470 x 106 \$ olarak hesaplanmıştır (Öztürk 2016). İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin vizyon ve gurur projesi olan Haliç Rehabilitasyon Projesi, Dünya Büyükşehir Belediyeleri Birliği'nin 2002 yılı en iyi Çevre Koruma Projesi (Metropolis Award 2002)'ne layık görülmüştür.

1997 ve 1999 yılları arasında yapılan ıslah projesinden sonra Haliç'te belli aralıklarla dip tarama faaliyeti devam etmektedir. Fakat bu denli büyük ölçekte bir ıslah projesi daha yapılmamıştır.



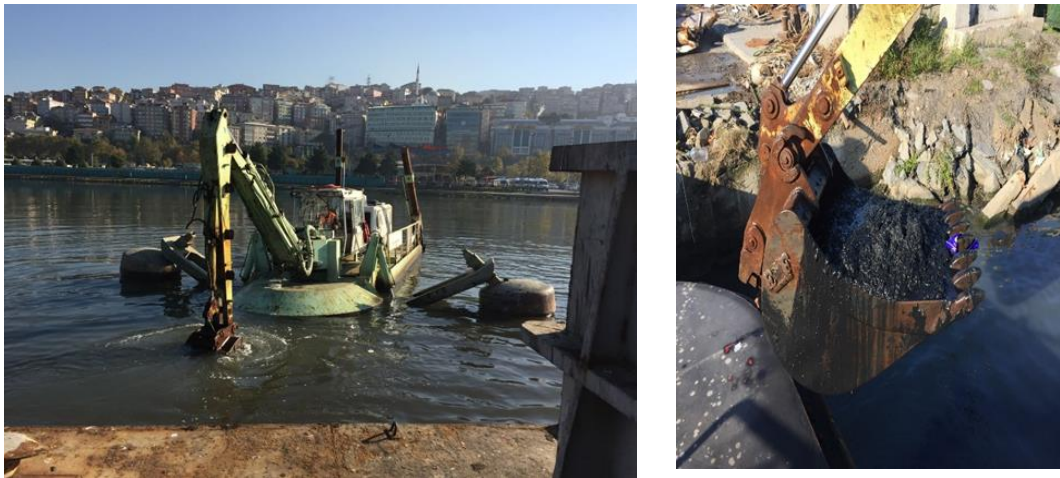
Şekil 3.3 : Haliç tarama ve çamur uzaklaştırma ile ilgili teknik bilgiler (Öztürk, 2016).

3.1.1.1 Haliç dip tarama çalışması ve temini

İBB Deniz Hizmetleri Müdürlüğüne yapılan talep doğrultusunda Eyüp ilçesinde bulunan eski Deniz Hizmetleri Müdürlüğü binasının yakınında numune alımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Tarama sonucu alınan numune ağır egzoz kokusuna sahip olup rengi siyah rengindedir. Tarama sırasında taramaya ve numune alımına ait alanda çekilen fotoğraflar Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Haliç'te yapılan taramanın gerçekleştiği yerin uydu görüntüsü.



Şekil 3.5 : Haliç dip taramasının gerçekleştiği alanda çekilen fotoğraflar.



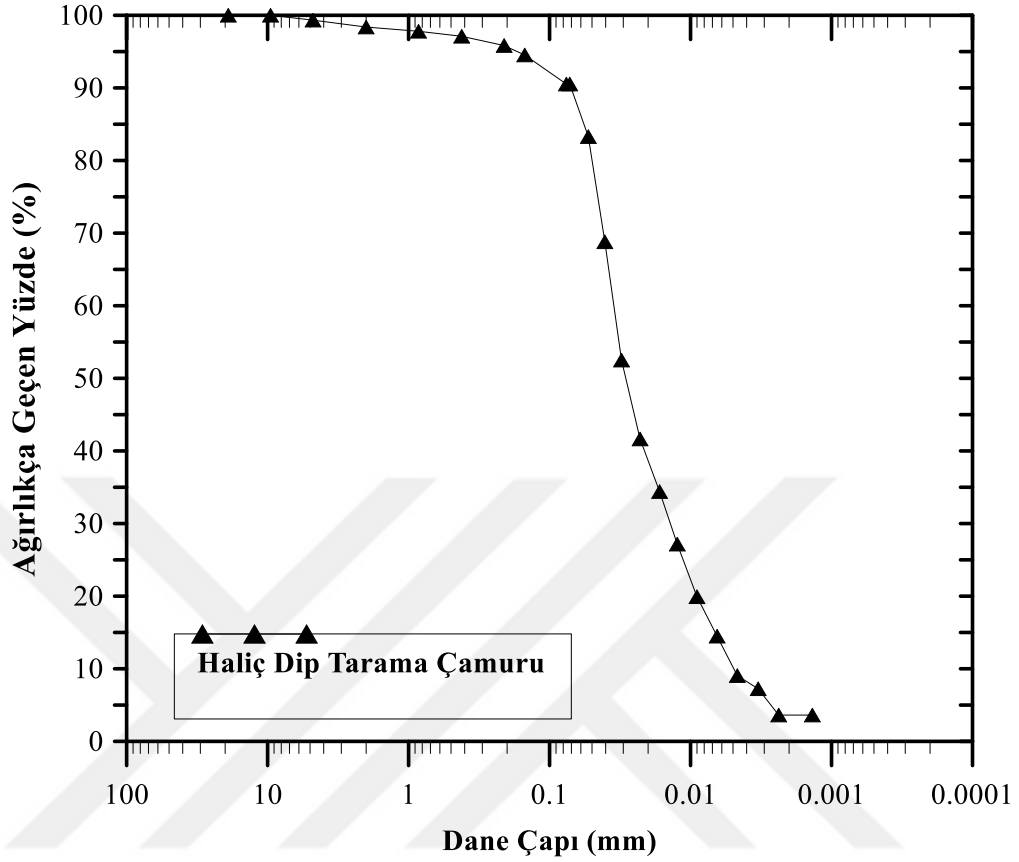
Şekil 3.5 (devam) : Haliç dip taramasının gerçekleştiği alanda çekilen fotoğraflar.

3.1.1.2 Haliç dip tarama malzemesinin geoteknik özellikleri

Tarama alanından İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarına getirilen çamur numuneleri güneş görmeyen oda sıcaklığında kapalı bir yerde saklanmıştır. Haliç dip tarama çamurunun endeks özelliklerini bulmak için elek analizi, hidrometre analizi, Atterberg kıvam limitleri deneyi, piknometre deneyi ve organik madde içerik tayini yapılmıştır. Şekil 3.6'da Haliç dip tarama çamuruna ait granülometri eğrisi verilmiştir. İçerisinde çakıl boyutunda dane bulundurmayan Haliç dip tarama çamuru %8 civarında kum içeriğine sahiptir. %90 oranında silt boyutunda daneler içeren tarama çamurunun birleşik zemin sınıflandırma sistemi (USCS)'ne göre zemin sınıfı yüksek plastisiteli silt (MH) olarak bulunmuştur. Plastik özellik gösteren Haliç dip tarama çamurunun likit limit değeri %59 iken plastik limit değeri ise %45 olarak bulunmuştur. Haliç dip tarama çamurunun dane özgül ağırlığı (Gs) 2.46 olarak hesaplanmıştır. Haliç dip tarama çamurunun, tarama dönemine göre farklılık gösterebilmesine rağmen organik madde içeriği de %1.2 olarak bulunmuştur. Çizelge 3.1'de tarama çamuruna ait belirlenen endeks özellikleri deney standartları ile verilmiştir.

Haliç dip tarama çamurunun fiziksel görünümünün araştırılması için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile farklı derinliklerde görüntüler alınmıştır. Şekil 3.7'de 1000 kat büyütülerek alınan SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsünde HALIÇ dip tarama çamurunun içerisinde homojen olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda Quante-FEG 250 marka cihaz kullanılarak elementel analiz yapılmıştır. Elementel analiz sonucunda

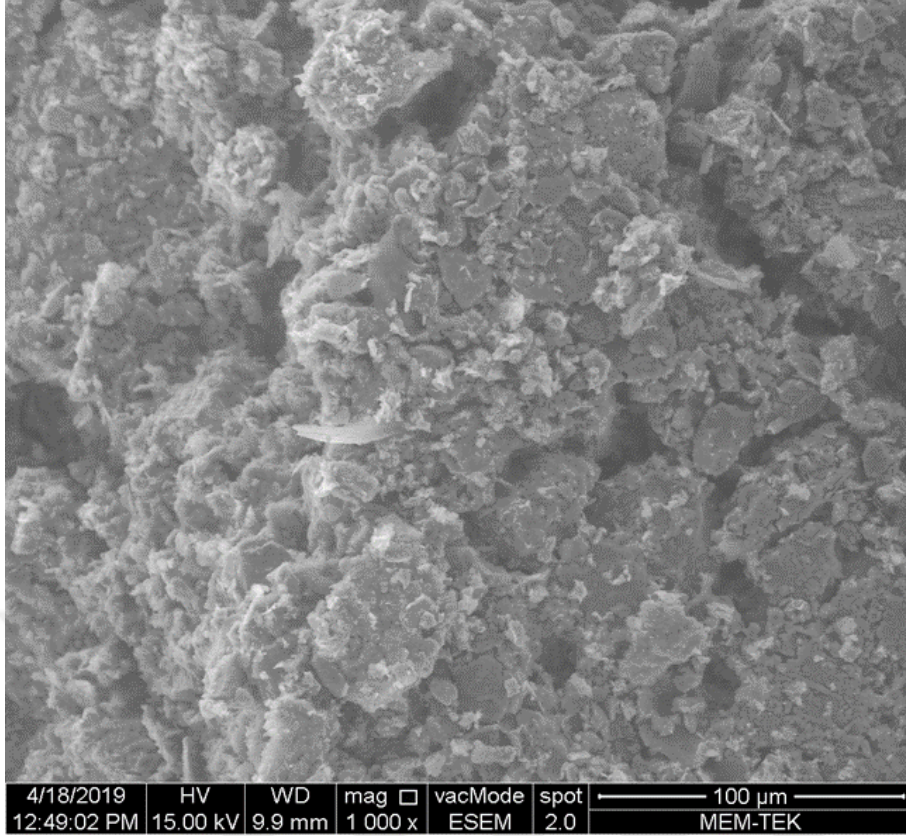
Haliç dip tarama çamurunun içerisinde bulunan elementlerin ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.6 : Haliç dip tarama çamuruna ait granülometri eğrisi.

Çizelge 3.1 : Haliç dip tarama çamurunun endeks özellikleri.

Özellik	Değer	Standart
Organik Madde Yüzdesi (%)	1.2	SM 2540C
Likit Limit (%)	59	ASTM D4318-17e
Plastik Limit (%)	45	ASTM D4318-17e
Plastisite indisi (%)	14	ASTM D4318-17e
Dane Özgül Ağırlığı (Gs)	2.46	ASTM D854-14
İnce Dane Oranı (%)	90	ASTM D2487-17
D_{85} (mm)	0.07	
D_{50} (mm)	0.03	
D_{15} (mm)	0.007	
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi	MH	ASTM D2487-17



Şekil 3.7 : Haliç dip tarama çamuruna ait 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.

Çizelge 3.2 : Haliç dip tarama çamuruna ait elementel analiz sonucu.

Element	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K
Wt (%)	7.01	45.34	1.37	1.43	1.81	10.57	25.24	0.71	0.62	1.17

3.1.2 Maden atığı ve geoteknik özelliği

Maden atığı, maden işletmelerindeki cevher hazırlama tesislerinde değerli mineraller alındıktan sonra arta kalan ve suyla karıştırılarak atık barajına gönderilen ve ekonomik değeri olmayan malzemelerdir. Tüm endüstriyel faaliyetlerde olduğu gibi madenlerin işletilmesi sonucunda da atık meydana gelmektedir. Madencilik faaliyetlerinde atık/ürün oranına bağlı olarak büyük miktarlarda atık oluşmaktadır.

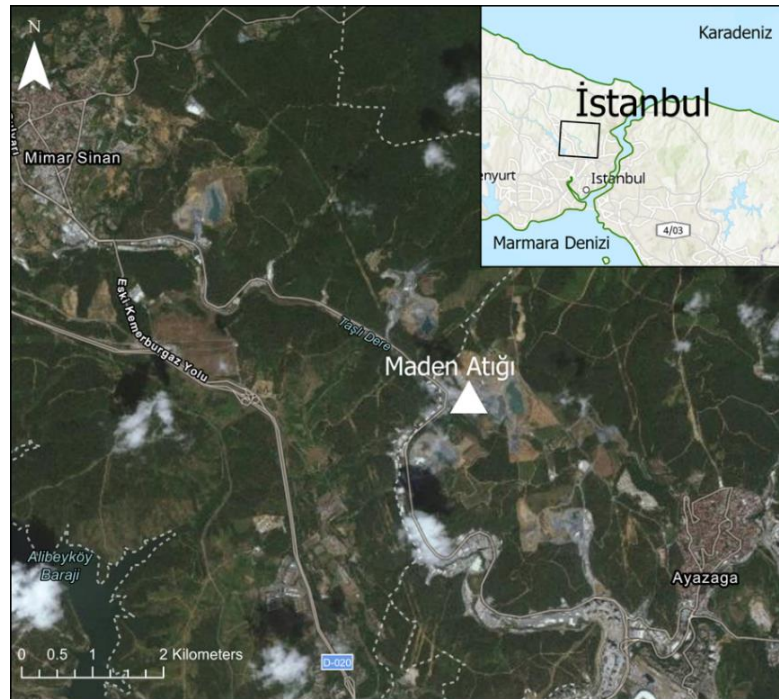
Maden atıkları;

- Bitkisel üst toprak
- Örtü-kazı (dekapaj)
- Atık kaya, kil, pasa...
- Zenginleştirme atıklarından meydana gelmektedir.

Madencilik faaliyetleri süresince ortaya çıkan atıklar birçok çevresel etkilere sebep olur. Bunlar; su kirliliği, duraysızlık, görsel kirlilik, arazi veriminin azalması, ekosistemin bozulması, tozlanma ve erozyondur.

Maden atıklarının özellikleri madenden madene değişiklik göstermektedir. Bu atıklar inorganik yapıya sahip olduklarından genellikle tehlikesiz ve inert olmaktadır. Maden atıklarının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek amacıyla geri kazanım çok önemlidir. Farklı maden atıkları için ülkemizde geliştirilmeye başlanmış proje aşamasında olan geri kazanım yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar arasında aşağıdaki örnekler sayılabilir:

- Fosfat işletmesi atıklarının asit tepkimeli topraklarda fosforlu gübre olarak kullanımı
- Kil içerikli kömür hazırlama tesisi atıklarından temiz kömür üretimi ve atık kilin tuğla üretiminde kullanımı
- Mermer atıklarının yüksek miktarda kalsiyum karbonat içeren tozlarının tavuk yemi olarak kullanımı
- Linyit kömürü atıklarının hümik asit esaslı sıvı organik gübre üretiminde kullanımı
- Tehlikesiz kömür cürufplarının asfalt yapımında dolgu malzemesi olarak kullanımı



Şekil 3.8 : Maden atığının temin edildiği yerin uydu görüntüsü.

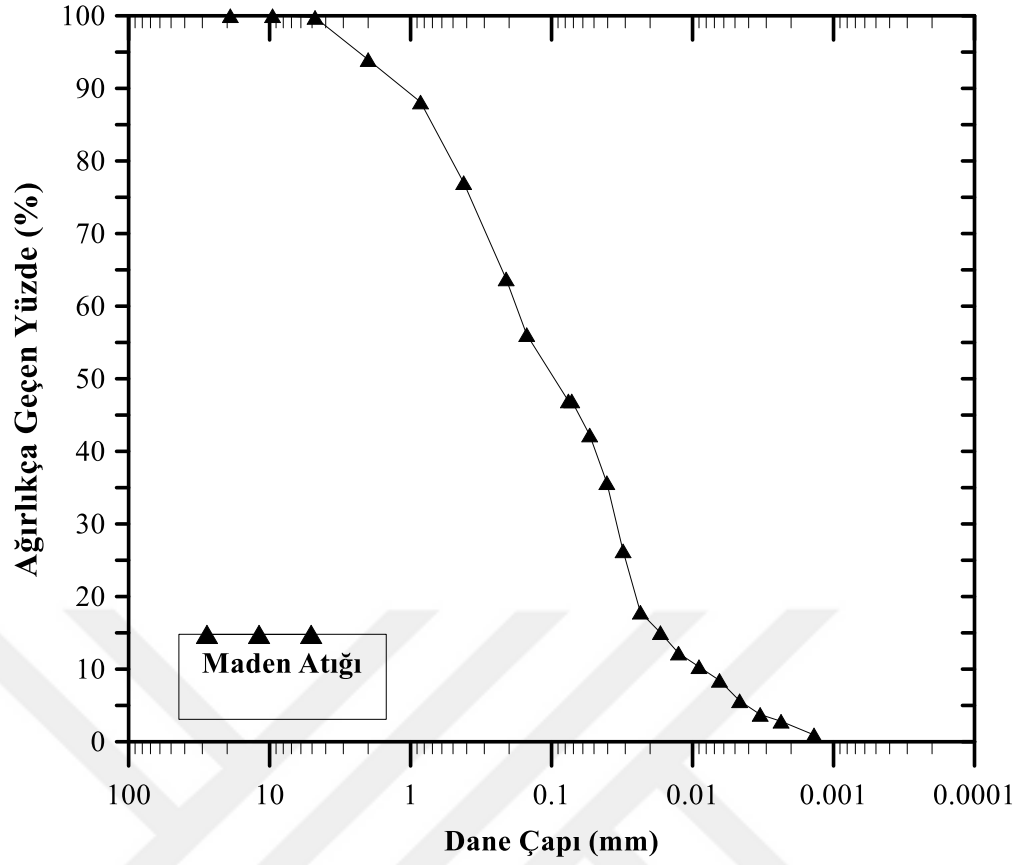
Tez çalışması kapsamında kullanılan maden atığının temin edildiği yerin uydu görüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir. Madencilik faaliyetleri sırasında açığa çıkan maden atığının depolandığı yapay suni göl Şekil 3.9’da görülmektedir. Numuneler yapay atık gölüne giden deşarj hattından 15 litrelik kapaklı plastik bidonlara doldurulmak suretiyle alınmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarlarında nem odalarına transfer edilen numuneler deney zamanına kadar kapalı bidonlarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.9 : Maden sahasında atık malzemelerin biriktirilmesi ile oluşan suni göl.

3.1.2.1 Maden atığının geoteknik özellikleri

Maden atığının endeks özelliklerini bulmak için elek analizi, hidrometre analizi, Atterberg kıvam limitleri deneyi, piknometre deneyi ve organik madde tayini yapılmıştır. Maden atığının Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)’ne göre zemin sınıfı killi kum (SM) olarak bulunmuştur. Plastik özellik göstermeyen maden atığının özgül ağırlığı (G_s) 2.65 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.10’da maden atığına ait granülometri eğrisi verilmiştir. Çizelge 3.3’te maden atığına ait yapılan endeks özellikleri deney standartları ile birlikte verilmiştir. Maden atığının organik içeriğinin bulunmadığı ve inorganik yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır.



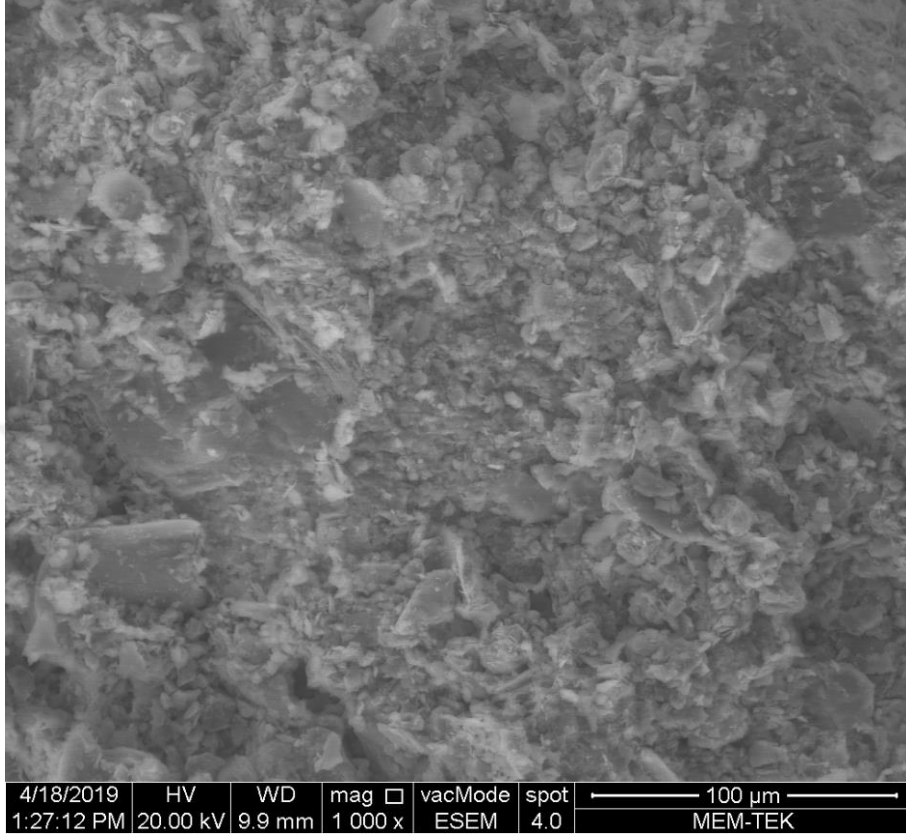
Şekil 3.10 : Maden atığına ait granülometri eğrisi.

Çizelge 3.3 : Maden atığına ait endeks özellikleri.

Özellik	Değer	Standart
Organik Madde Yüzdesi (%)	0	SM 2540C
Likit Limit (%)	Plastik Değil	ASTM D4318-17e
Plastik Limit (%)	Plastik Değil	ASTM D4318-17e
Plastisite İndisi (%)	Plastik Değil	ASTM D4318-17e
Dane Özgül Ağırlığı (Gs)	2.65	ASTM D854-14
İnce Dane Oranı (%)	47	ASTM D2487-17
D_{85} (mm)	0.8	
D_{50} (mm)	0.1	
D_{15} (mm)	0.015	
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi	SM	ASTM D2487-17

Maden atığının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü alınmıştır. Şekil 3.11’de 1000 kat büyütürken alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Aynı zamanda Quante-

FEG 250 marka cihaz kullanılarak elementel analiz yapılmış ve Çizelge 3.4'te elementel analiz sonucu verilmiştir. Elementel analiz sonucunda ağırlıkça yüzde olarak maden atığı içerisindeki element yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 3.11 : Maden atığına ait 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.

Çizelge 3.4 : Maden atığının elementel analiz sonucu.

Element	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Wt (%)	5.42	36.35	1.07	0.83	4.75	13.2	24.84	1.73	0.68	11.12

3.1.3 Geotekstil

İstenilen çekme dayanımına göre farklı ham maddelerden üretilebilen geotekstillerin kalınlık ve ağırlıkları da farklılık göstermektedir. Filtrasyon amacıyla farklı örgü tiplerinde imal edilen geotekstillerin hidrolik iletkenleri için geçirgenlik değerlerine bakılmaktadır. Geotekstil tüp içerisinde tutulmak istenen en küçük dane çapı için ise geotekstilin boşluk boyutu dağılımı (O95) ve görünür açıklık boyutu (AOS) gibi fiziksel özellikleri de önem kazanmaktadır. Susuzlaştırma işlemlerinde sahada yaygın kullanım alanına sahip olan ve özellikleri Çizelge 3.5'te verilen geotekstil malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 3.5 : Geotekstil malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri (Tencate, 2015).

Özellik	Açıklama	Birim	Değer	Metod
Fiziksel	Materyal		Polipropilen	
	Kütle / birim alan	g/m ²	585	ASTM D5261
	Kalınlık	mm	1.8	ASTM D5199
Mekanik	Görünen açıklık boyutu (AOS)	mm	0.42	ASTM D4751
	Minimum çekme dayanımı	kN/m	78	ASTM D4595
	Minimum dikiş dayanımı	kN/m	70	ASTM D4884
	Su akış hızı	l/min/m ²	813	ASTM D4491
Filtre	Gözenek boyutu dağılımı (O ₅₀)	Mikron	80	ASTM D6767
	Gözenek boyutu dağılımı (O ₉₅)	Mikron	195	ASTM D6767

3.1.4 Poliakrilamidler

Bir polimer grubu olan poliakrilamidler ince sedimentleri birbirine bağlayan topaklaştırıcı vazifesi görürler. Bu sayede yüksek su içerikli atık malzemelere karıştırılan poliakrilamidler hızlı bir şekilde sıvı-katı ayrımını sağlamaktadırlar (Leshchinsky ve diğ, 1996; Aydılek ve Edil, 2002; Shin ve Oh, 2007; Yan ve Li, 2012; Ye ve diğ, 2012). Poliakrilamidler, katıldıkları ortamın pH'ına ve süspansiyon içerisindeki daneler ile kurdukları bağın tipine (yüzey absorpsiyonu veya kimyasal yük değişimi) göre farklı etkinlik göstermektedir. Bu nedenle her atık süspansiyonu için uygun katkının seçimi, kimyasal tipleri, rölatif yükleri, kütle yoğunlukları, moleküler ağırlıkları farklı bir dizi poliakrilamid ile çalışılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada flokülasyon amacıyla farklı üretici firmalardan temin edilen 11 adet anyonik ve 2 adet katyonik poliakrilamid kullanılmıştır. Çizelge 3.6'da çalışmada kullanılan poliakrilamidler ve özellikleri verilmiştir.

Mülkiyet hakları ve izinleri nedeniyle, poliakrilamidlerin iyonik yükü ve moleküler ağırlığı, kesin sayısal değerler yerine çok düşük, orta-yüksek ve yüksek gibi göreceli açıklamalar kullanılarak ölçülür.

Çizelge 3.6 : Poliakrilamidlerin özellikleri.

Poliakrilamid	Şarj Tipi	İyon Aktivitesi	Kütle Yoğunluğu (kg/L)	Molekül Ağırlığı
A1	Anyonik	İyonik Olmayan	0.72	Düşük - Orta
A2	Anyonik	Düşük	0.73	Orta

Çizelge 3.6 (devam) : Poliakrilamidlerin özellikleri.

A3	Anyonik	Düşük - Orta	0.74	Orta
A4	Anyonik	Orta	0.73	Orta - Yüksek
A5	Anyonik	Orta	0.74	Orta - Yüksek
A6	Anyonik	Orta	0.76	Orta - Yüksek
A7	Anyonik	Orta	0.82	Yüksek
A8	Anyonik	Orta - Yüksek	0.85	Yüksek
A9	Anyonik	Yüksek	0.90	Yüksek
A10	Anyonik	Yüksek	0.72	Yüksek
A11	Anyonik	Çok Yüksek	0.74	Yüksek
C1	Katyonik	Orta	0.71	Yüksek
C2	Katyonik	Orta - Yüksek	0.78	Yüksek

3.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan Yöntemler

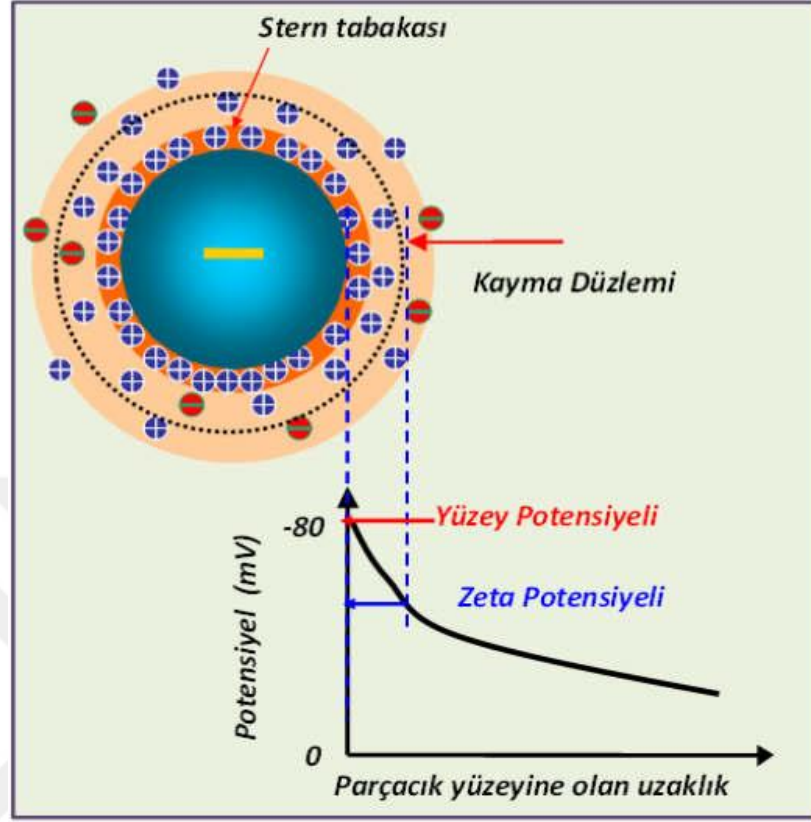
3.2.1 Zeta Potansiyeli

Zeta potansiyel, su içerisindeki danelerin birbiri arasındaki itme veya çekme potansiyeli değerinin ölçümüdür. Zeta potansiyel ölçümü dağılma mekanizmaları ile ilgili ayrıntılı bilgi verir ve elektrostatik dağılma kontrolünün anahtarıdır. Belli bir yükteki dane, süspansiyon içerisindeki karşı yükteki iyonları çeker, sonuç olarak, yüklü tanenin yüzeyinde güçlü bir bağ yüzeyi oluşur ve daha sonra da yüklü tanenin yüzeyinden dışa doğru yayılmış bir yüzey oluşur. Yayılmış bu yüzey içerisinde "kayma yüzeyi" diye adlandırılan bir sınır bulunur.

Şekil 3.12’de sıvı içerisinde bulunan bir parçacığın şematik gösterimi verilmiştir. Yüklü tane ve onun etrafında bulunan iyonların kayma yüzey sınırına kadar olan kısım tek bir parça olarak hareket eder. Bu kayma yüzeyindeki potansiyel zeta potansiyeli olarak isimlendirilir ve hem tanenin yüzey yapısından hem de içinde bulunduğu sıvının içeriğinden etkilenir. Danelerin polar sıvılar içerisindeki davranışlarını yüzeylerindeki elektrik yükü değil, zeta potansiyel değerleri belirler.

Tez çalışması kapsamında Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının zeta potansiyeli ölçülmüştür. Jar deneyi ile belirlenen en etkili poliakrilamidlerin ve bu poliakrilamidler için belirlenen optimum dozaj kullanılarak elde edilen katı sıvı ayırımında oluşan sıvı kısmının da zeta potansiyeline bakılmıştır. Ölçümler Malvern Zeta Sizer Nano cihazı ile yapılmıştır. Sıvı içerisindeki danelerin zeta potansiyeli susuzlaştırma işlemi için önem arz etmektedir. Zeta potansiyeli ne kadar sıfıra yakın

ise daneler o kadar kararsız olmaktadır. Böylelikle küçük bir dış etkiyle bir araya gelerek topak oluşturmaktadırlar.



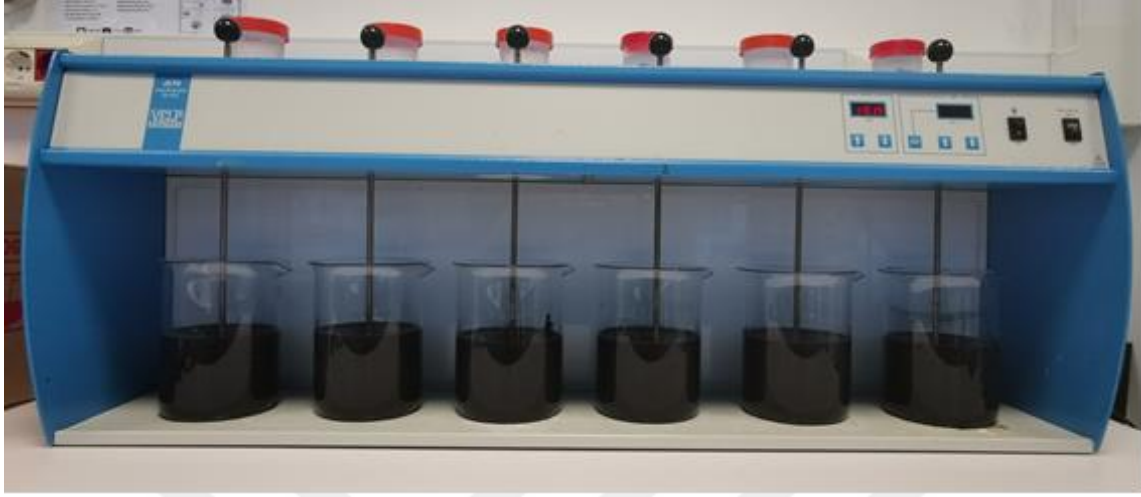
Şekil 3.12 : Sıvı içinde bulunan parçacığın şematik gösterimi (Malvern Instruments Ltd, 2001).

3.2.2 Jar deneyi

Jar deneyinde (flokülasyon) aynı anda 6 beher çalışmasına imkân veren ve karıştırıcıların dönme hızı ile süresinin ayarlanabildiği Velp JLT6 marka Jar-Test deney aleti kullanılmıştır. Şekil 3.13'te çalışmada kullanılan jar deney aleti görülmektedir. Deneyler, ASTM D2025-19 standardına uygun şekilde İstanbul Teknik Üniversitesi MEMTEK laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Jar deneyi sonunda bulanıklık ölçümleri yapılmıştır. Bulanıklık ölçümleri Şekil 3.14a'da görünen HACH 2100P Turbidimeter cihazıyla ASTM D7725-17 standartlarına uygun olarak ölçülmüştür. Bulanıklık ölçümlerinin birimi NTU (Nephelometric Turbidity Unit) olarak verilmiştir. Bu deneyi yapmamızdaki temel amaç, 13 farklı poliakrilamid içerisinden en etkili sonuç vereninin belirlenmesidir. Bunun için 2 kriter belirlenmiştir. Bunlardan birincisi çökelme hızı diğeri ise bulanıklık değeridir. Bu iki değer içinde en hızlı çökelme hızı ve en düşük bulanıklık

değerini veren poliakrilamid en etkili katı-sıvı ayrımı yaptığı kabul edilecektir. Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi MEMTEK Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

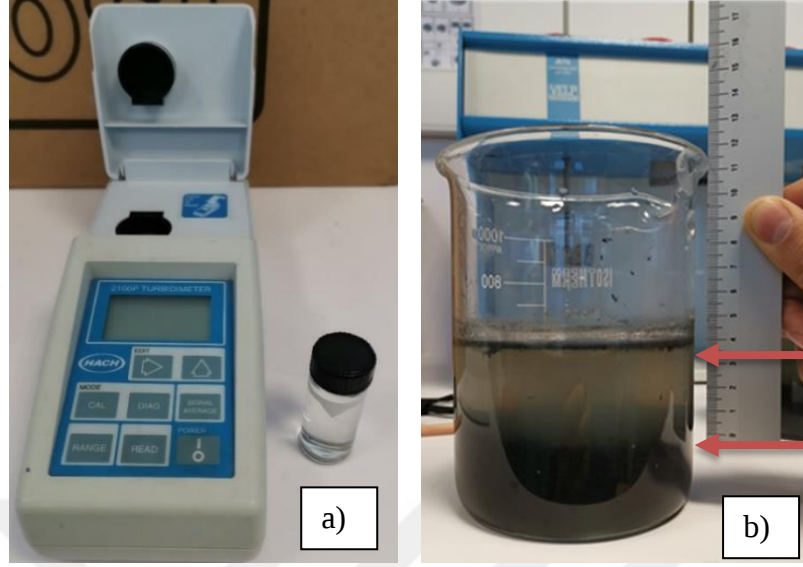


Şekil 3.13 : Jar deneyinin yapıldığı deney aleti (Velp JLT6 marka Jar deneyi cihazı).

Jar deneyi aşağıdaki adımlara göre uygulanmıştır:

- Her deney için 1000 ml’lik beherler kullanılmıştır. 600 ml ve %10 katı oranına sahip karışımlar hazırlanmıştır.
- İlk olarak hazırlanan 600 ml’lik karışımlar poliakrilamid eklenmeden önce 150 rpm (dakikadaki dönme sayısı) hızında 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Bu işlem bittikten sonra karışıma uygun dozajda poliakrilamid çözeltisi eklenmiştir. Birinci aşamada 13 farklı poliakrilamid içerisinden en uygun olanının seçimi için bütün poliakrilamidler aynı dozajda eklenmiştir.
- İnorganik malzemelerinin çökelme işlemleri hızlı gerçekleşmekte olduğundan dolayı poliakrilamid eklendiğinden sonra nihai çökelme süresi belirlenmiştir. Daha sonra cetvel yardımıyla çökelme miktarı belirlenmiştir (Şekil 3.14b). Bu ölçümler yardımıyla çökelme hızı hesaplanmıştır.
- Bulanıklık ölçümleri, nihai flokülasyon işleminin sonunda 10 dakika bekledikten sonra, otomatik pipet yardımıyla yüzeyden yaklaşık 3 cm derinlikten yeterli miktarda sıvı alınarak suyun bulanıklığına bakılarak yapılmıştır.
- 13 poliakrilamid içerisinde en yüksek çökelme hızı ve en düşük bulanıklık değeri veren poliakrilamid seçilmiştir. Daha sonra optimum dozaj

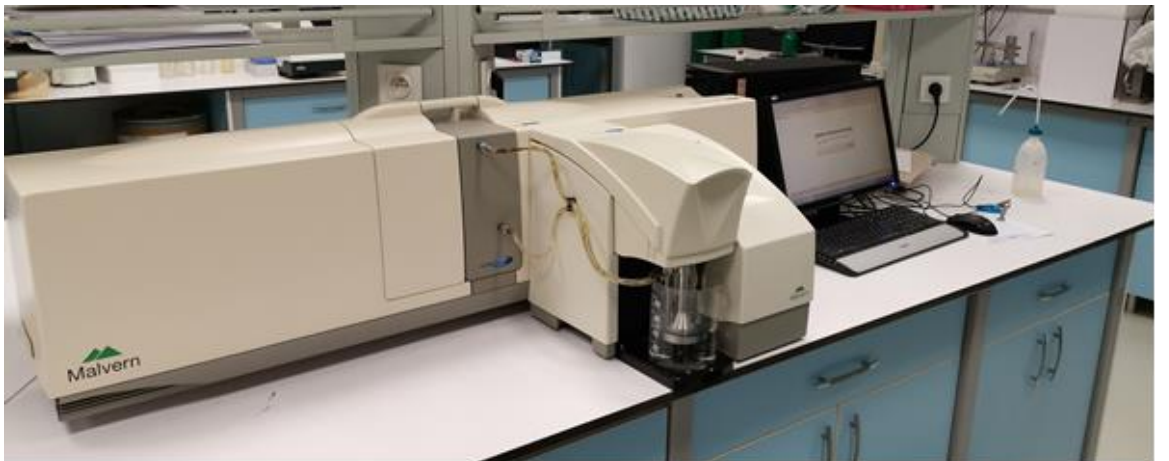
belirlenebilmesi için seçilen poliakrilamidin farklı dozajlarında Jar deneyi aynı şartlarla tekrarlanmıştır.



Şekil 3.14 : a) Bulanıklık cihazı (HACH 2100P Turbidimetre) b) çökeltme boyunun cetvel yardımı ile ölçümü.

3.2.3 Dane boyutu ölçümü

Jar deneyleri ve bulanıklık ölçümleriyle belirlenen poliakrilamid ve optimum dozajlardan sonra flokülasyonda oluşan topak büyüklüklerinin değişimini belirleyebilmek adına dane boyutu dağılımı ölçümleri yapılmıştır. Bunun için Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.15’ Te cihazın resmi verilmiştir. Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi MEMTEK Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15 : Dane boyutu dağılımı ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer 2000).

Flokülasyon için uygun poliakrilamidin eklenmesiyle küçük daneler birbirlerine yaklaşıp bir toprak yapı oluşturmaktadır. Poliakrilamidin uygunluğunun yanı sıra dozaj değişimi de bu toprak yapının büyüklüğünü etkilemektedir. Susuzlaştırma çalışmalarında toprak büyüklüğü önem arz etmektedir. Bu bakımdan oluşacak olan toprak boyutunun değişimini tespit etmek ve en uygun dozajı belirleyebilmek hem ekonomik anlamda hem de susuzlaştırma verimi bakımından önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının poliakrilamid eklenmeden dane boyut dağılımı ölçülmüştür. Daha sonra flokülasyon çalışması sonunda tespit edilen uygun poliakrilamid ile değişen dozajlarda ölçümler tekrarlanmıştır. Ancak poliakrilamid eklenmeden yapılan deney ile poliakrilamid eklenmesiyle yapılan deney arasında karıştırma hızları arasında farklılıklar vardır. Öncelikle poliakrilamid eklenmeden yapılan deneyde karıştırma hızının yüksek olması (1400rpm) gerekmektedir. Çünkü karıştırma ne kadar hızlı olursa danelerin birbirinden ayrılması ve böylelikle cihaz tarafından dane boyutlarının ölçülmesi daha sağlıklı olacaktır. Fakat poliakrilamid eklenmesiyle oluşturulan toprak yapının ölçümü için yaptığımız deneyde cihazın karıştırma hızının mümkün olduğu kadar yavaş olması sağlanmıştır. Çünkü amaç flokülasyon olayı sonucunda değişen toprak büyüklüğü dağılımını ölçmektir. Hızlı karıştırma sonunda toprak yapıda bozulma meydana gelmektedir. Yapılan denemeler ile 900rpm karıştırma hızında MasterSizer cihazının sağlıklı ölçüm yapabildiği görülmüştür. Bu yüzden poliakrilamid eklenmesiyle hazırlanan numunelerin ölçümleri 900rpm karıştırma hızıyla gerçekleştirilmiştir.

Haliç çamuru ve maden atığı için poliakrilamid eklenmeden ve belirlenen poliakrilamidin 10, 20, 30, 40 ve 50ppm olarak değişen dozajları ile ölçümler yapılmıştır.

3.2.4 Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT)

Filtrasyon malzemesi olarak kullanılacak geotekstil ile poliakrilamid kullanılarak oluşturulan floklar arasındaki uyumu belirlemek için laboratuvar ölçeğinde düzenek olan Hızlı Susuzlaştırma Deneyi (RDT) yapılmıştır. Deneylerde kullanılan RDT düzeneği kurulurken Tencate firması tarafından verilen hızlı susuzlaştırma seti geliştirilerek daha hassas veri alınması sağlanmıştır (Tencate, 2015). Dolum haznesi ile onu taşıyan kaideden oluşan deney düzeneği Şekil 3.16'daki gibidir. Deney

öncesinde filtrasyon amacıyla kullanılacak geotekstil malzeme, alt ve üst parça olarak ikiye ayrılabilen dolum haznesinin arasına yerleştirilmektedir.

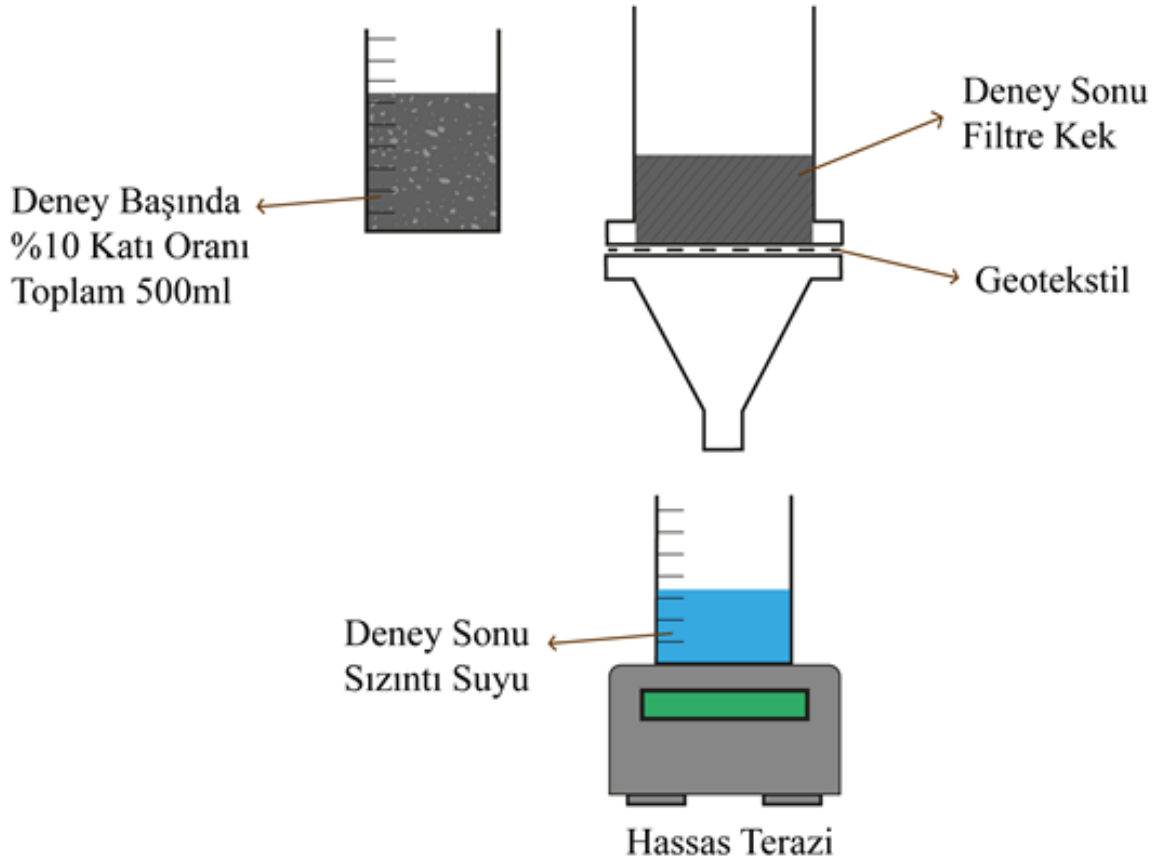


Şekil 3.16 : Hızlı Susuzlaştırma Deney (RDT) düzeneği.

Deneylerde başlangıçta %10 katı oranında hazırlanan 500 ml’lik çamur numuneleri kullanılmıştır. Deney öncesinde hazırlanan karışımların homojen olması için Jar deney aleti ile 150 rpm hızında 2 dakika hızlı karıştırma yapılmıştır. Daha sonra deneyler önce poliakrilamid katkısız, daha sonra farklı poliakrilamid dozajlarında katkılı karışımlar ile tekrar edilmiştir. Deney başlangıcında, hazırlanan karışımlara poliakrilamid eklendikten sonra Jar deney aletiyle karışımlar 90 rpm hızıyla 1 dakika karıştırdıktan sonra deney haznesine karışım eklenmiştir. Deney süresince geotekstilden geçerek alttaki mezürde toplanan sızıntı suyunun miktarı bilgisayara bağlı terazi yardımıyla saniyede 4 veri alınarak kaydedilmektedir.

Deneylerde, poliakrilamid uygunluğu ve dozajını belirlemek için 3 kriter takip edilmiştir. Bunlar, zaman, filtreden sızan su içerisindeki katı miktarı, filtre olarak kullanılan geotekstilin üzerinde kalan filtre kekinin su muhtevasıdır. Bahsedilen bu üç kriter karşılaştırılıp optimum dozaj belirlenmiştir. Şekil 3.17’de RDT deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, Haliç dip tarama çamuru ve maden atığı numuneleri üzerinde poliakrilamid katkısız ve 10, 20, 30, 40 ve 50ppm dozlarında poliakrilamid katkılı olarak Hızlı Susuzlaştırma Deneyleri (RDT) yapılmıştır. Tüm deneyler 3 set olarak yapılmış ve sonuç grafikler ortalama alınarak çizilmiştir.



Şekil 3.17 : Hızlı susuzlaştırma deney (RDT) düzeneğinin şematik gösterimi.

3.2.5 Goetekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT)

Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) olarak adlandırılan bu deney, saha uygulamalarında kullanılan sistemin gerçek ölçekli örneğidir. Geotekstil tüpler susuzlaştırma işlemini bünyelerindeki geotekstillerin filtre işlevi görmesiyle yaparlar. Geotekstil malzeme, içerisine doldurulacak çamur malzemeye dayanabilecek şekilde dört köşesinden dikilerek kapalı hale getirilmiş, 53cm x 53cm ebatlarında, yaklaşık 28.000 cm³ hacminde çamur dolum kapasiteli, dört tarafı kapalı torba halindedir (ASTM D7701 2011; Tencate 2007). Bu geotekstil torbanın üzerinde çamur dolumunu sağlamak amacıyla bir giriş ve bu girişe adapte edilmiş bir boru (68.5 cm yükseklik, 10 cm çap) bulunmaktadır. Bu deney düzeneği firmadan hazır halde temin edilmiştir. Şekil 3.18’de GDT düzeneği verilmiştir. Düzenek sızıntı suyunun biriktirebilecek kadar büyük konteynır içerisine konulmuştur. Dolumlar bittikten sonra konteynır içerisinde biriken sızıntı sularının hacimleri belli aralıklarla ölçülmüştür. Dolum bittikten 7 gün sonra deney sonlandırılmıştır. 7 gün boyunca her günün sonunda tüp

içerisinden numune alınarak su muhtevası değeri ölçülmüştür. Aynı zamanda konteynır içindeki sızıntı suyunun bulanıklık ölçümleri de yapılmıştır.

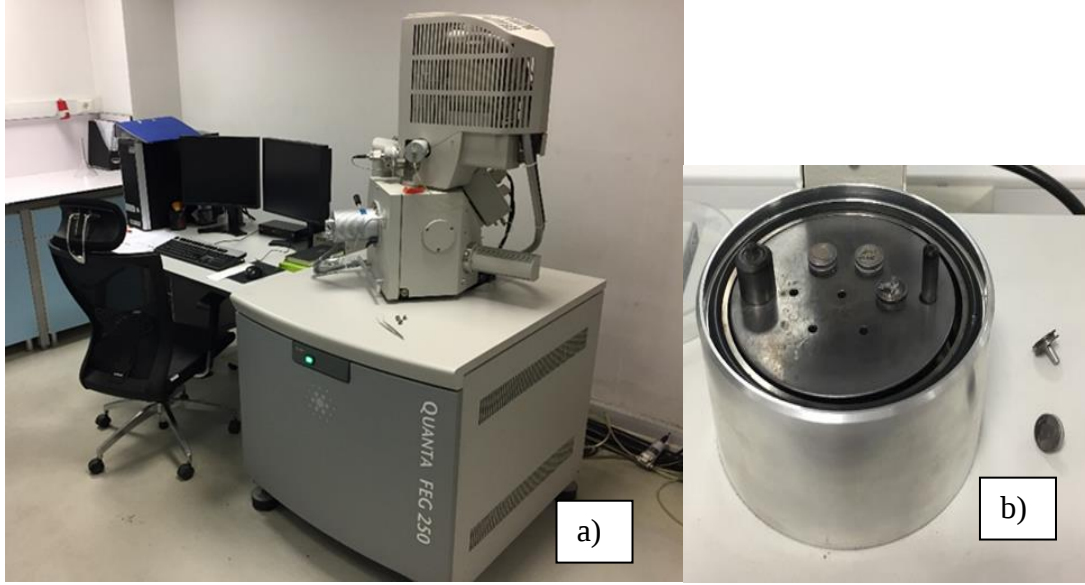


Şekil 3.18 : Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) düzeneği.

Tez çalışması kapsamında, Haliç dip tarama çamuru ve maden atığı numuneleri üzerinde poliakrilamid katkısız ve seçilen poliakrilamidin optimum dozda katkılı olarak GDT deneyleri yapılmıştır.

3.2.6 Morfolojik analizler

Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Dağılım X-Ray Spektroskopisi (SEM-EDS) kullanılarak Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının susuzlaştırma öncesi ve sonrası çamur numuneleri görüntülenmiş ve elementel analizleri yapılmıştır. Burada temel amaç topaklaşma öncesi ve sonrası çamur numunelerindeki fiziksel görünüşteki farklılıkları araştırmaktadır. Analizler FEI Quanta FEG 200 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.19a). Numunelerin SEM görüntülerinin alınmasından önce altın veya paladyum ile kaplanarak iletkenliğinin artırılması gerekmektedir. Numunelerin hazırlanışına ait görsel Şekil 3.19b’de verilmiştir.



Şekil 3.19 : a) FEI Quanta FEG 200 SEM-EDS cihazı ve b) numunelerin hazırlanışı.

3.2.7 Kimyasal analizler

Susuzlaştırma uygulamalarında poliakrilamid kullanılması temel adımlardan biridir. Poliakrilamid küçük daneleri kimyasal bağlar kurup bir araya getirerek daha büyük topak yapılar oluşturur. Böylelikle hem susuzlaştırma süresini hızlandırır hem de tüp içerisinde daha fazla katı malzeme tutulmasını sağlar. Susuzlaştırma işlemlerinde fazla miktarda poliakrilamid kullanılmasının hem ekonomik hem de çevre açısından olumsuz etkileri olmaktadır. Sızıntı suyunun alıcı ortama verildiği düşünülürse fazla miktarda kullanılan poliakrilamidler sızıntı suyu ile alıcı ortama geçebilmekte ve buralarda ince daneli malzemelerin kontrolsüz bir şekilde çökelmelerine sebep olabileceği düşünülmektedir. Bu yüzden Haliç dip tarama malzemesinin ve maden atığının seçilen poliakrilamid ve optimum dozajındaki flokülasyonu sonrası oluşan supernatant kısım ve filtre kekinin bünyesindeki poliakrilamid kalıntısını kontrol etmek amacıyla Perkin Elmer - Spectrum 100 FTIR-ATR cihazı kullanılarak Fourier-Dönüşümlü İnfrared Spektrumu taranmıştır. Bu deney İstanbul Teknik Üniversitesi MEMTEK laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20’de Deneylerin yapıldığı cihaz görülmektedir.

Aynı zamanda, Haliç dip tarama malzemesinin ve maden atığının poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı olarak yapılan GDT sonrası oluşan sızıntı suyunun kalite parametreleri incelenmiştir. Bunun için, iyon tayininde iyon kromatografi (IC, Dionex ICS-3000), ağır metal ve diğer elementel analizde İndüktif Eşleşmiş Plazma

Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES, Perkin Elmer) kullanılmıştır. Analizler doğrultusunda, çıkış suyu kalitesi hem ulusal hem uluslararası içme suyu standartlarıyla karşılaştırılmıştır (SKKY, 2004; EPA, 2003; WHO, 2004). Su analizleri İstanbul Teknik Üniversitesi evre mühendisliği bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. şekil 3.21’de Deneylerin yapıldığı cihaz görünmektedir.



şekil 3.20 : Perkin Elmer - Spectrum 100 FTIR-ATR cihazı.



şekil 3.21 : IC, Dionex ICS-3000 cihazı.

4. DENEY SONUÇLARI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez kapsamında incelenen Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının susuzlaştırma araştırmalarının sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Bölüm 4.1’de Haliç dip tarama çamurunun, Bölüm 4.2’de maden atığının susuzlaştırması için yapılan deneylerin sonuçları ve sonuçların değerlendirmesi verilmiştir.

4.1 Haliç Dip Tarama Çamuru

Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırma performansının araştırılması için yapılan deneylere ait sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

4.1.1 Zeta potansiyeli ölçümü

Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırma çalışmaları %10 katı oranıyla hazırlanan çözeltilerle yapılmıştır. Aynı karışımlarda zeta potansiyeli ölçülmüş ve sonuç -13,5 mV olarak bulunmuştur. Bu değerinde en etkili parametre pH’tır. Zeta potansiyel değerinin sıfıra yakın olması poliakrilamid tüketimini azaltır ve daha etkili çalışmasını sağlar. Bu yüzden farklı pH değerlerinde zeta potansiyeli ölçümü yapılmıştır. Haliç dip tarama çamurunun doğal pH değeri 6,8’dir. Çizelge 4.1’de farklı pH’larda ölçülen zeta potansiyeli değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1 : Haliç dip tarama çamurunda pH’a bağlı zeta potansiyeli ölçümü.

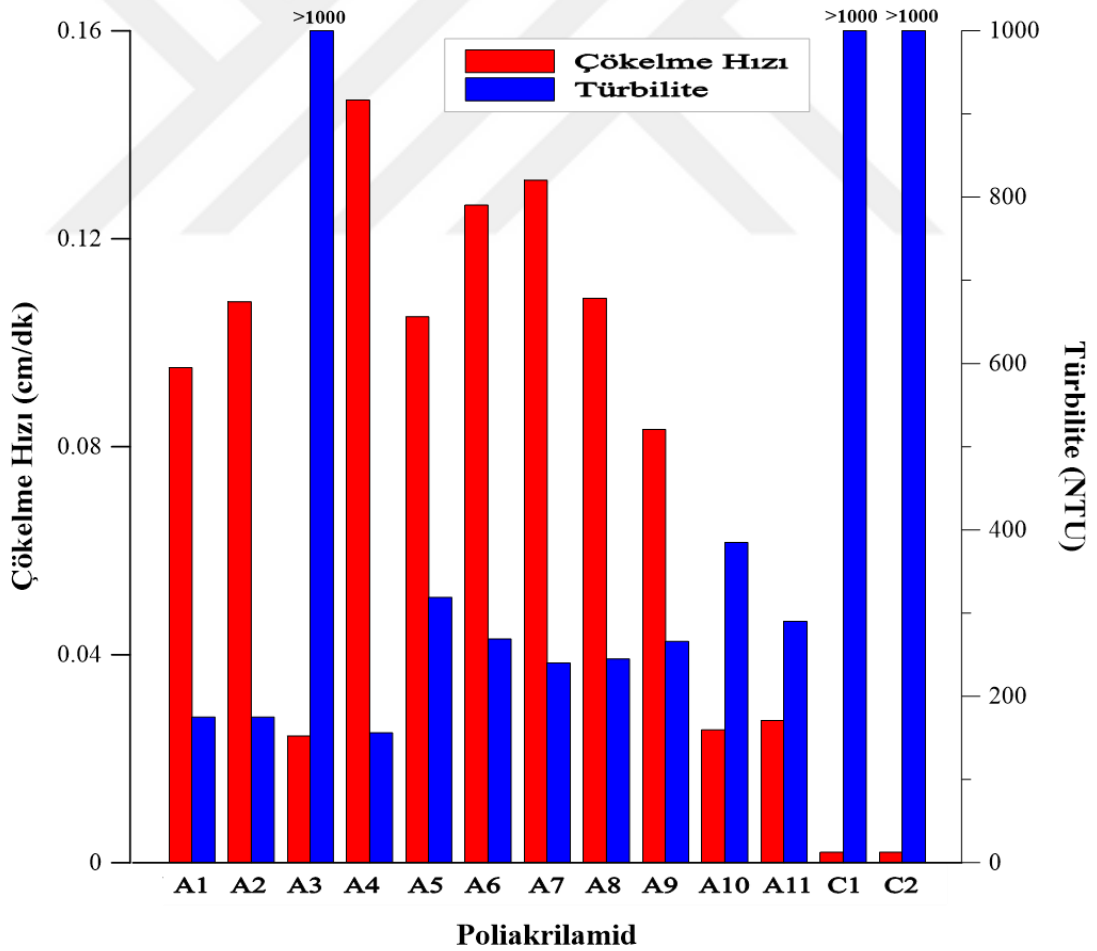
pH	Zeta Potansiyeli (mV)
3	-8.14 ± 2.71
4	-9.88 ± 0.94
5	-9.56 ± 0.95
6	-12.00 ± 1.27
7	-10.00 ± 0.31
8	-9.10 ± 0.30
9	-10.90 ± 1.59

Yapılan ölçümlerde pH değişiminin zeta potansiyeli değeri üzerinde ciddi bir değişim meydana getirmediği anlaşılmıştır. Burada Haliç dip tarama çamurundaki yüksek tuzluluğun etkili olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden susuzlaştırma çalışmasında

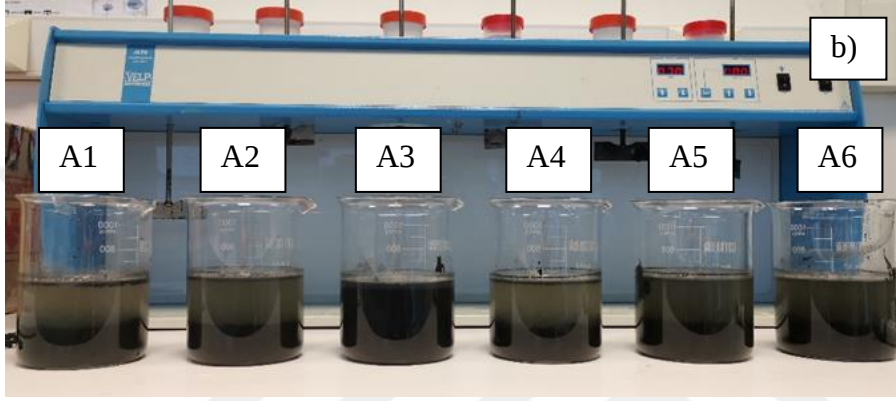
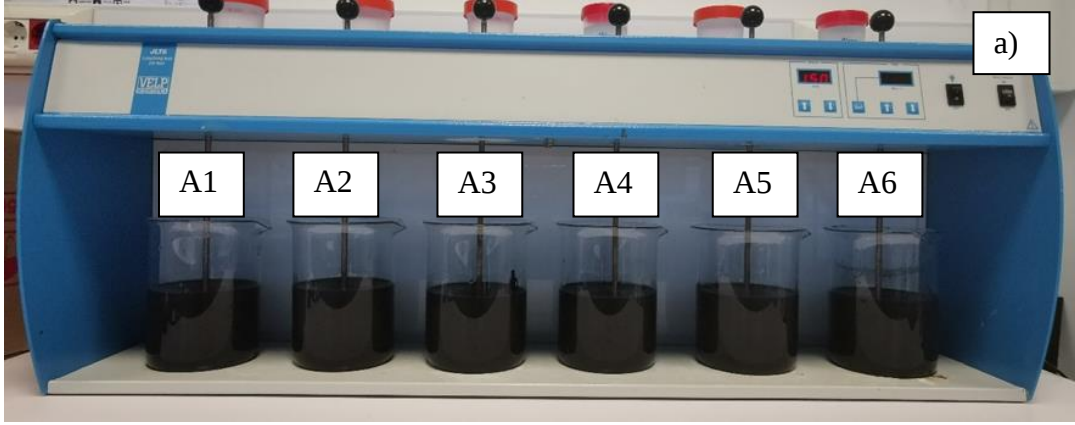
herhangi bir pH değişimi yapılmadan doğal pH değeri 6,8 ile araştırmaya devam edilmiştir.

4.1.2 Jar deneyi (Flokülasyon)

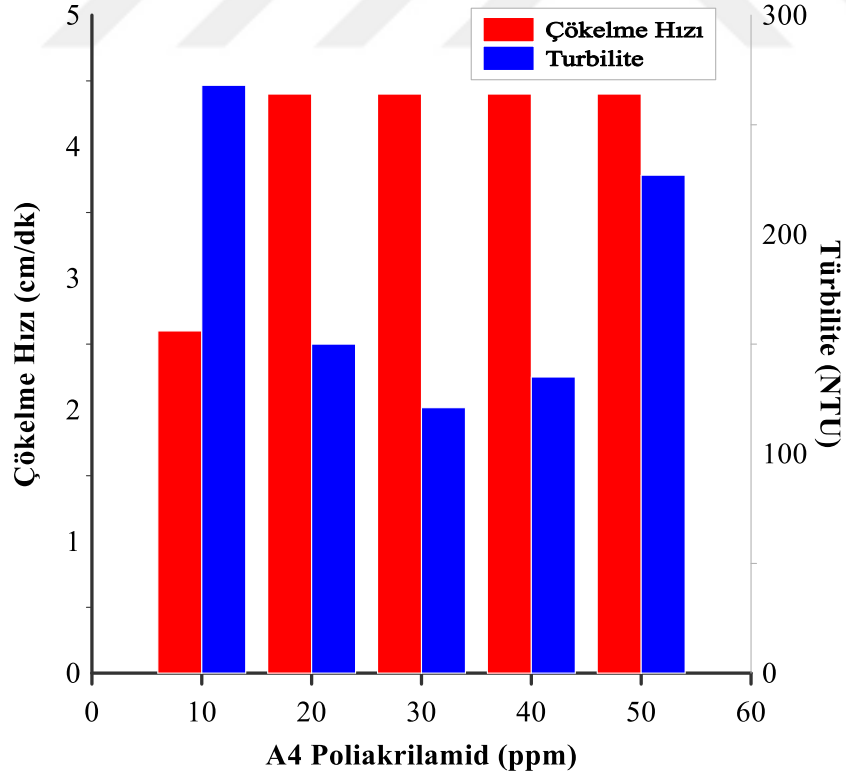
Haliç dip tarama çamurunun %10 katı oranına sahip karışımının bulanıklık değeri yaklaşık 41800 NTU olarak ölçölmüştür. Bu karışıma 10ppm dozajında Çizelge 3.6’da verilen 13 farklı poliakrilamid kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçölen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri şekil 4.1’de verilmiştir. Deneylerde katyonik poliakrilamidlerin çamur numuneleri üzerinde etkili olmadığı görölmüştür. Kullanılan katkılardan A4 poliakrilamidinin aynı sürede diğerlerine oranla bulanık değerini daha fazla düşördüğü (şekil 4.2 soldan 4. beher) gözlenmiştir. şekil 4.1’den de anlaşılacağı üzere A4 poliakrilamidi çökelme hızı ve bulanıklık ağıısından en etkili sonucu vermiştir.



şekil 4.1 : 13 farklı poliakrilamid kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçölen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.



Şekil 4.2 : Flokülasyon deneyi a) öncesi ve b) sonrası görünümü.

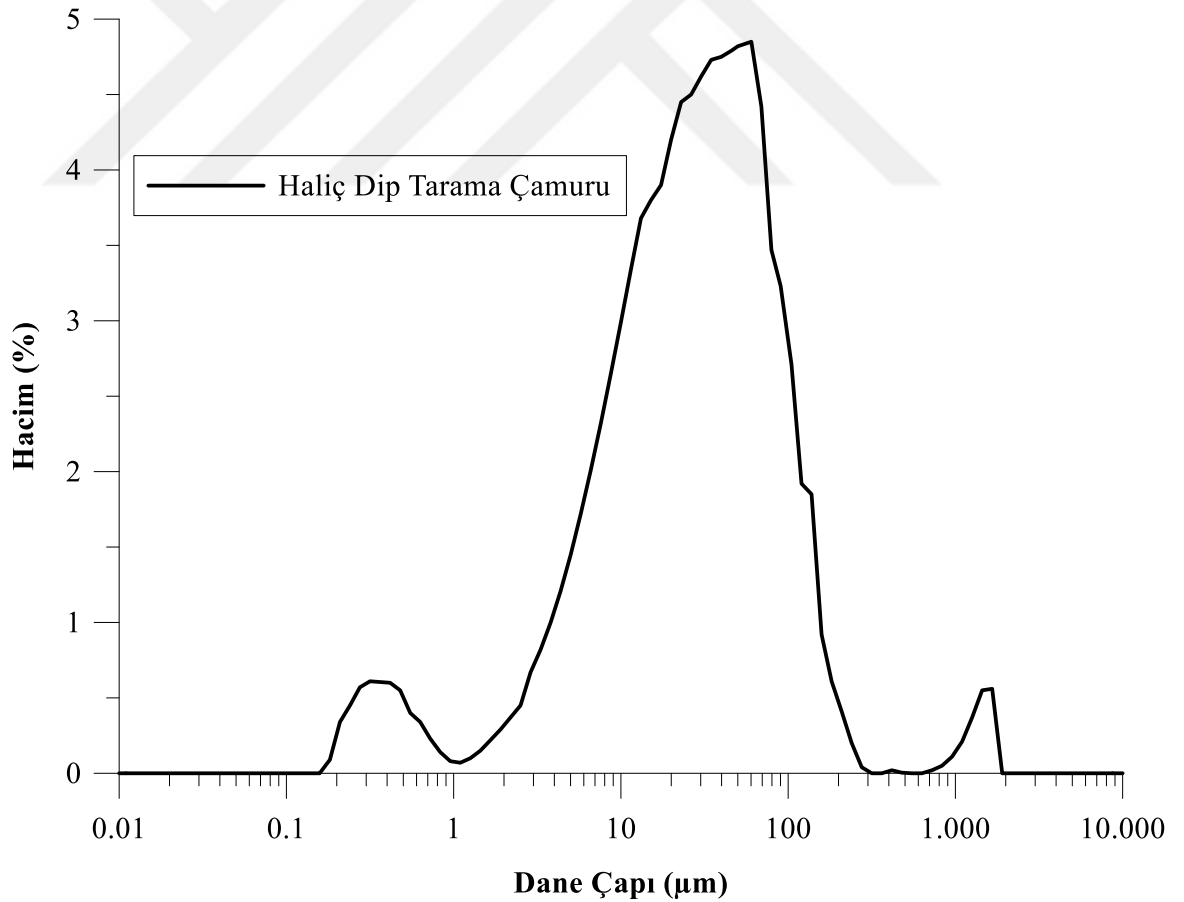


Şekil 4.3 : A4 poliakrilamidiyle kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.

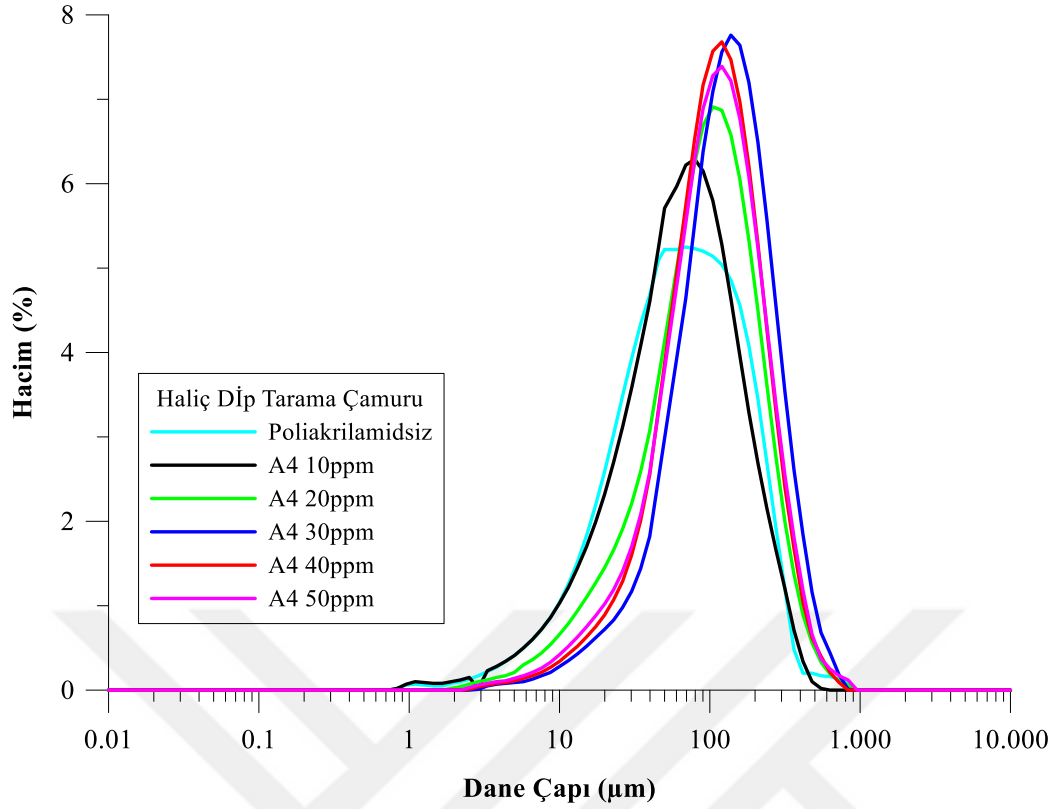
En etkili poliakrilamid olarak belirlenen A4 poliakrilamidin optimum dozajının belirlenmesi için 10, 20, 30, 40 ve 50ppm dozajlarda flokülasyon deneyi tekrarlanmıştır. Şekil 4.3’de verilen deney sonuçlarına göre 30ppm dozajın çökelme hızının en verimli olduğu anlaşılmaktadır.

4.1.3 Dane boyutu ölçümleri

İlk olarak Haliç dip tarama çamurunun ham halinin dane boyutu dağılımı ölçülmüştür. Şekil 4.4’de bu ölçümün dağılımı hacim yüzdesi olarak verilmektedir. Jar deneyi sonucunda belirlenen A4 poliakrilamidinin 10, 20, 30, 40, ve 50ppm kullanılmasıyla oluşan filtre keklerinin partikül ölçümü yapılmış olup Şekil 4.5’de verilmiştir. Buna göre poliakrilamid eklenmesi flok büyüklüğünü optimum dozaja kadar artırmakta ve optimum dozaj üzerine çıkıldığında ise flok büyüklüğü azalmaktadır. Optimum 30ppm dozajın üzerine çıkıldığında bulanıklığın artmasının sebebinin de bu olduğu düşünülmektedir.



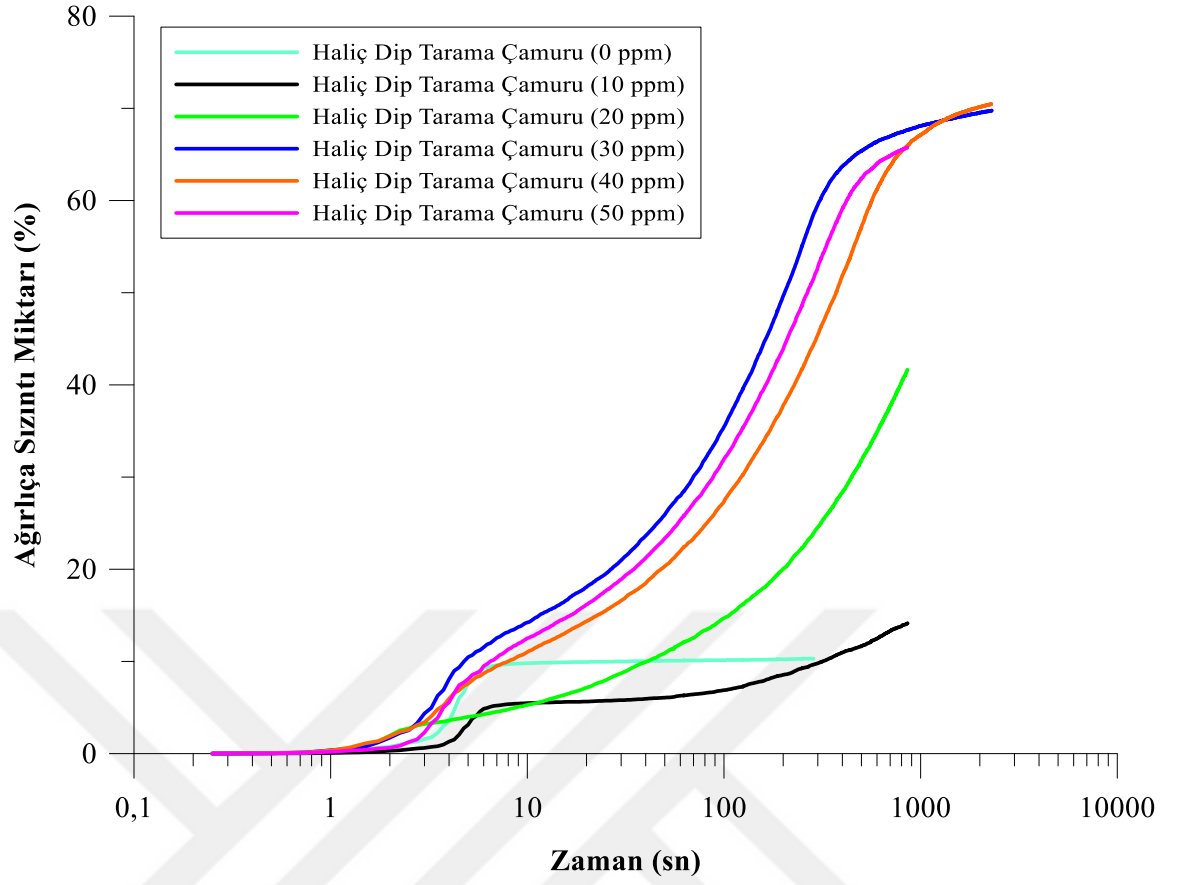
Şekil 4.4 : Haliç dip tarama çamurunun dane boyutu dağılımı.



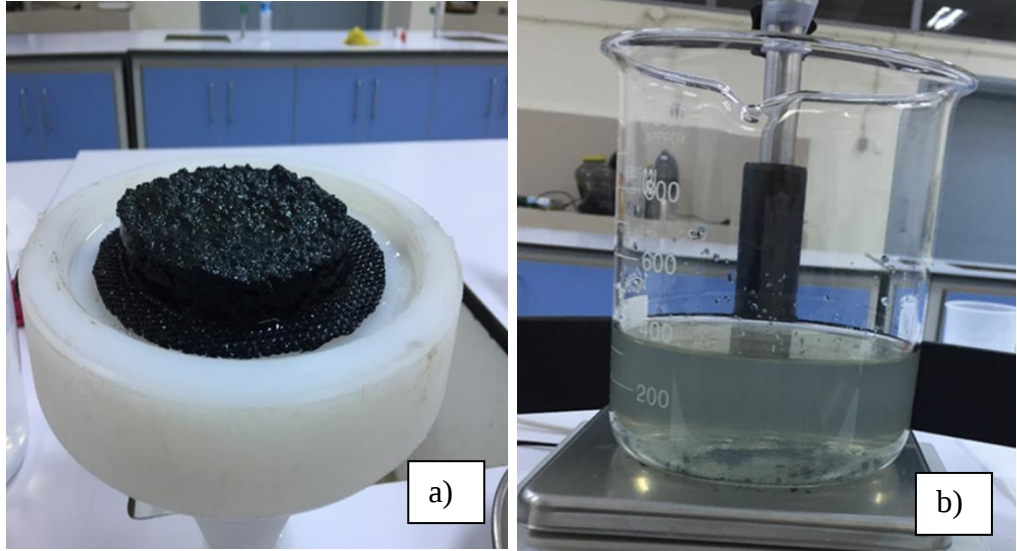
Şekil 4.5 : Haliç dip tarama çamurunun A4 poliakrilamidinin farklı dozajlar kullanılarak yapılan partikül boyutu dağılımı.

4.1.4 Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT)

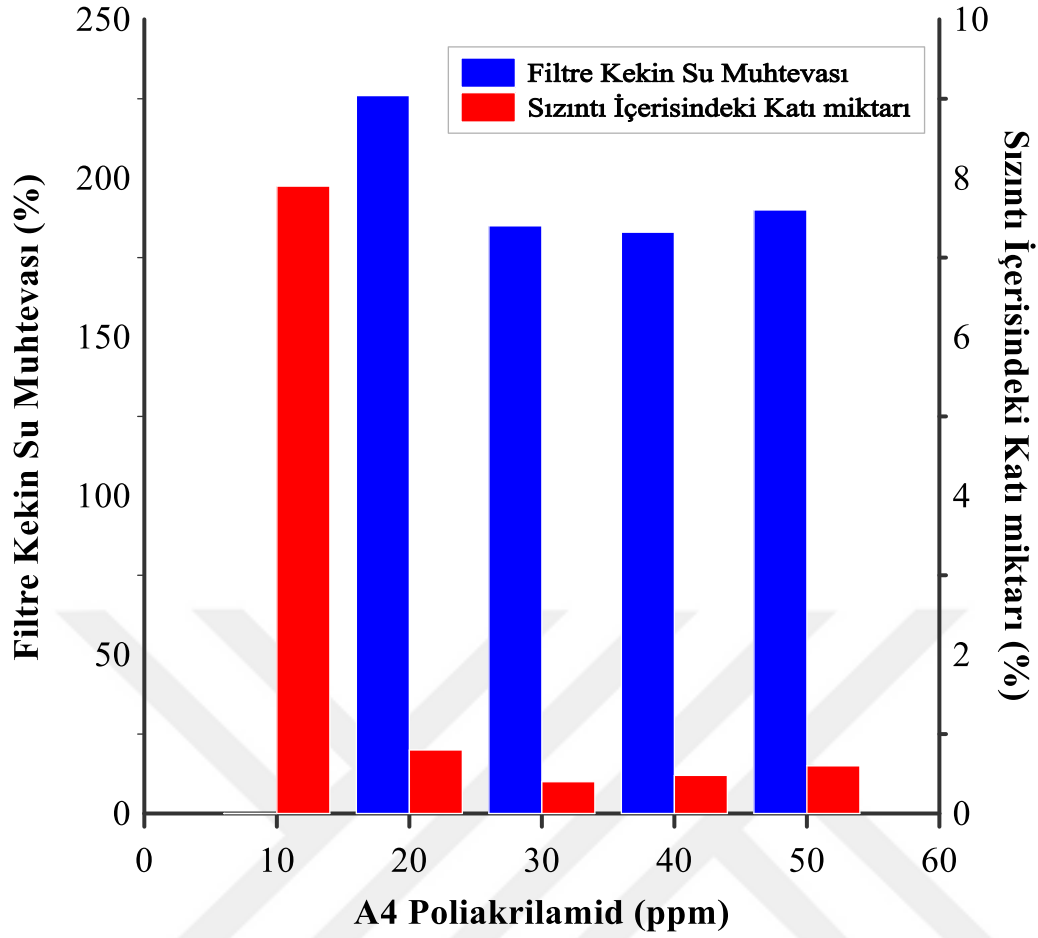
Haliç tarama çamurunun %10 katı oranıyla hazırlanan ve 0, 10, 20, 30, 40 ve 50ppm poliakrilamid eklenerek, hazırlanan süspansiyonlarının RDT deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.7’de deney sonunda meydana gelen filtre kek ve sızıntı suyunun görüntüsü verilmiştir. RDT’de kaydedilen zamana bağlı ağırlıkça sızıntı miktarı Şekil 4.6’da verilmiştir. Buna göre, poliakrilamid kullanılmadığında süspansiyonun çamur karışımı kısa sürede geotekstilin gözeneklerini tıkayarak filtrasyonu engellemiş, poliakrilamid eklendiğinde ise filtrasyon devam etmiştir. 10ppm poliakrilamid katkılı süspansiyonda flokülasyonun verimli olmadığı, 20ppm poliakrilamid katkılı süspansiyonda ise filtrasyon hızının düşük kaldığı gözlemlenmiştir. 30, 40 ve 50ppm poliakrilamid katkılı süspansiyonlarda flokülasyonun yeterli düzeye ulaştığı ve 30ppm dozajda susuzlaştırma hızının en yüksek olduğu tespit edilmiştir. RDT deneyi sonunda ölçülen filtre kekinin su muhtevası ve sızıntı suyuna geçen katı madde miktarları Şekil 4.8’de verilmiştir. Buna göre, filtre kekinin su muhtevasının ve sızıntı suyuna geçen katı madde miktarının düşük olduğu 30ppm dozajının optimum olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6 : Haliç dip tarama çamurunun A4 poliakrilamid kullanılarak yapılan RDT sonucu.



Şekil 4.7 : RDT sonrası oluşan a) filtre keki ve b) sızıntı suyu görüntüleri.



Şekil 4.8 : Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT) sonucunda oluşan filtre kekin su muhtevası ve sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı yüzdesi.

Flokülasyon sonucunda Haliç dip tarama çamurunun su içerisindeki zeta potansiyeli değerinin değişimini görebilmek için zeta potansiyel ölçümleri yapılmıştır. A4 poliakrilamidin ve RDT sonrası oluşan sızıntı suyunun zeta potansiyeli değerleri ölçülmüştür. Çizelge 4.2’de ölçülen zeta potansiyeli değerleri verilmiştir. Haliç dip tarama çamurunun poliakrilamid eklenmeden önceki zeta potansiyel değeri, poliakrilamid eklenerek yapılan RDT sonucunda oluşan sızıntı suyunun zeta potansiyeli ile karşılaştırıldığında bir miktar düştüğü görülmüştür.

Çizelge 4.2 : RDT sonrası zeta potansiyeli değerleri.

Malzemeler	Zeta Potansiyeli (mV)
Haliç Çamuru	-13.5
A4 Poliakrilamid	-37.9
Sızıntı Suyu (30ppm)	-17.9

4.1.4 Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT)

Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi ile %10 katı oranlı poliakrilamid katkısız ve 30ppm A4 poliakrilamid katkılı hazırlanan tarama çamur süspansiyonlarının susuzlaştırma performansları karşılaştırılmıştır. Deneyde kullanılan yastık tipi geotekstil tüp birer gün ara ile iki seferde doldurulmuştur. Hem poliakrilamid katkısız hem de poliakrilamid katkılı süspansiyon için birinci gün yapılabilen dolum kapasitesi, geotekstil tüp içerisinde tutulabilen tarama malzemeleri nedeniyle ikinci gün yarıya düşmüştür. Poliakrilamid katkısız olarak yapılan deneyde toplam 60 litre karışım kullanılırken polikarilamid katkılı yapılan deneyde ise toplam 150 litre karışım kullanılmıştır. Poliakrilamid katkısız yapılan deneyde deney başlangıcından bir süre sonra geotekstil tüpün gözenekleri tıkanmıştır. Çizelge 4.3'te yapılan GDT'ye ait sonuçlar özetlenmiştir. Buna göre 30ppm A4 poliakrilamid kullanılarak yapılan deneyde kullanılan katı içeriğin neredeyse tamamı tüp içerisinde tutulmuş, poliakrilamid-katkısız göre sızıntı suyunun bulanıklık değeri %99.7 oranında azalmıştır. Tüp içerisinde tutulan malzemenin katı ağırlığının toplam ağırlığına oranı olarak tanımlanan katı içerik değeri, poliakrilamid katkısı ile %42 oranında artmıştır. Ayrıca, susuzlaştırma ile tarama malzemesinin su muhtevastaki azalmanın başlangıçtaki su muhtevasına oranı olarak tanımlanan Filtrasyon Verimliliği (Filtration Efficiency) değeri (Moo-Young ve diğ, 2002) de poliakrilamid katkılı süspansiyonda %99.2 daha yüksek bulunmuştur.

Çizelge 4.3 : Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonuçları.

Parametreler	PAM Katkısız	PAM Katkılı
Toplam Dolum Yapılan Çamur Miktarı ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	60	150
Toplam Sızıntı Miktarı ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	46.9	116.4
Başlangıca Göre Sızan Katı Miktarı (%)	51	0,8
Bulanıklık (NTU)	32.800	92
GDT Sonrası Katı Oranı (%)	12	54
Filtrasyon Verimliliği (%)	44.1	99.2

Şekil 4.9a'da poliakrilamid katkısız yapılan GDT sonucunda oluşan sızıntı suyu görülmektedir. Sızıntı suyu koyu siyah rengindedir. Şekil 4.9b'de ise poliakrilamid katkılı yapılan GDT sonucunda oluşan sızıntı suyu görülmektedir. Poliakrilamid

kullanıldığında Şekil 4.9’da da görüldüğü gibi suyun bulanıklık değerinde ciddi bir düşüş meydana gelmektedir.



Şekil 4.9 : GDT sonucu a) katkısız ve b) katkılı.

4.1.5 Mühendislik parametrelerinin belirlenmesi

Haliç dip tarama çamurunun ham hali ve geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi sonrası tüp içerisinde oluşan filtre kekinin mühendislik parametrelerini bulabilmek için konsolidasyon deneyi ve konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli basınç deneyi (UU) yapılmıştır. Tüm deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.1.5.1 Konsolidasyon deneyi

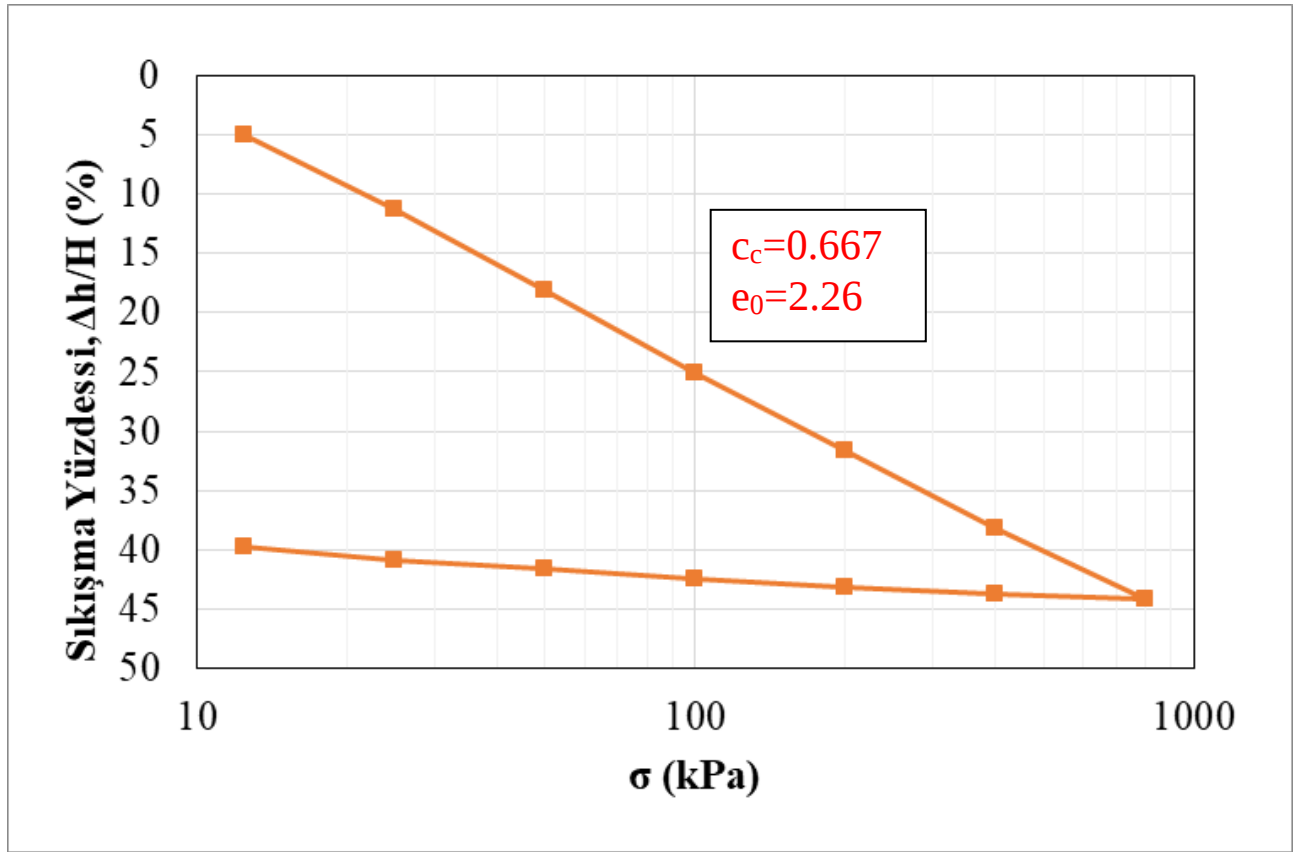
Haliç dip tarama çamurunun hem poliakrilamid katkısız yani ham hali için hem de poliakrilamid eklenerek yapılan geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi sonucunda oluşan filtre kek için konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

- ***Haliç Dip Tarama Çamurunun Konsolidasyon Deneyi Sonuçları***

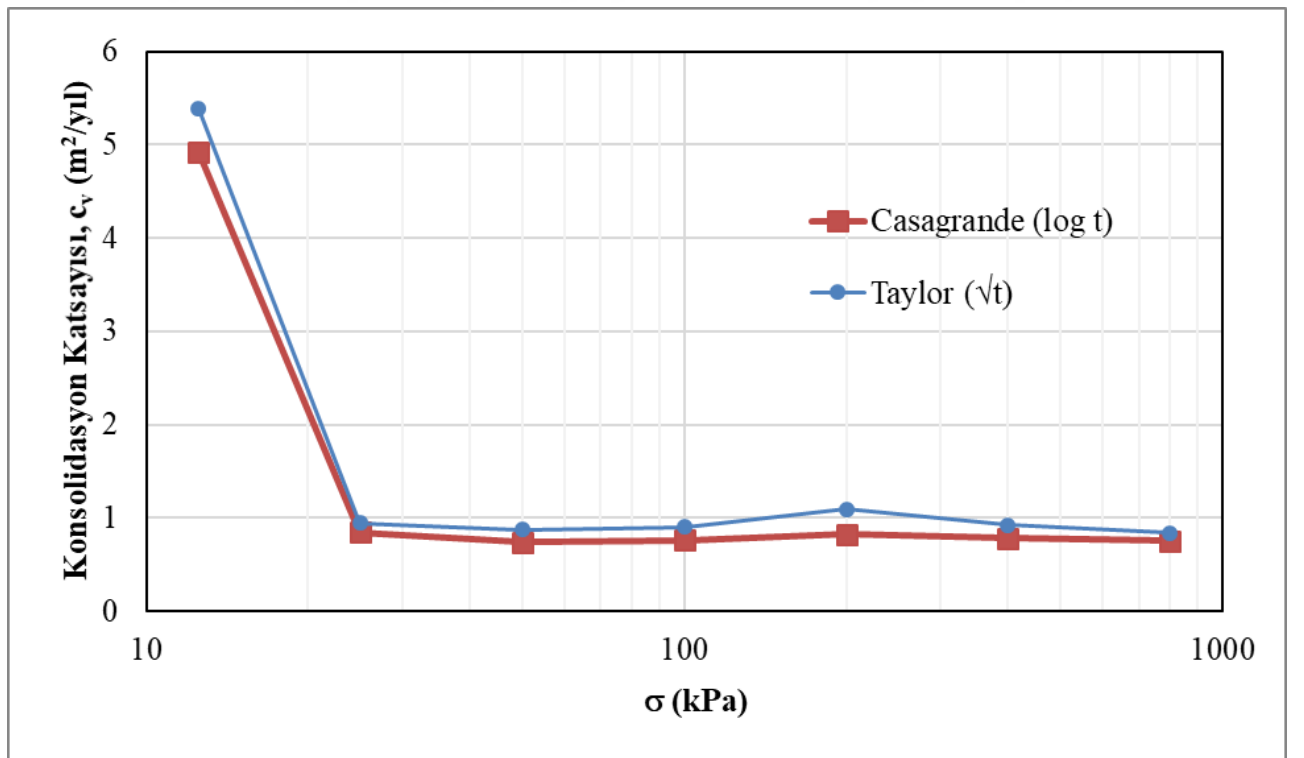
Haliç tarama çamurunun likit limit değeri %59 olarak bulunmuştur. Bu değerin 1.5 katına denk gelecek şekilde su eklenerek hazırlanan numune üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Likit limit değerinin 1.5 katı su eklenerek numunenin hazırlanmasındaki amaç, numunenin suya doymun olmasını sağlamaktır. Şekil 4.10'da deney sonunda elde edilen sıkışma yüzdesi-normal gerilme arasındaki ilişki yarı logaritmik grafikte verilmiştir. 12.5 kPa yük altında Haliç dip tarama malzemesi %5'lik sıkışma göstermiştir. 800 kPa yük altında ise yaklaşık %44 sıkışma göstermiştir. Daha sonra yük boşaltması olduğunda %5 civarında deformasyonda geri dönüş olmuştur.

Konsolidasyon katsayıları (c_v) Casagrande ($\log t$) ve Taylor ($\sqrt{t}$) yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11'de bu iki yöntem kullanılarak hesaplanan konsolidasyon katsayısı (c_v) -normal gerilme arasındaki ilişki yarı logaritmik grafikte verilmiştir. Grafikten de anlaşılabacağı üzere 25 kPa yükten sonra konsolidasyon katsayısı yaklaşık 0.8 m²/yıl değerinde sabitlenmiştir.

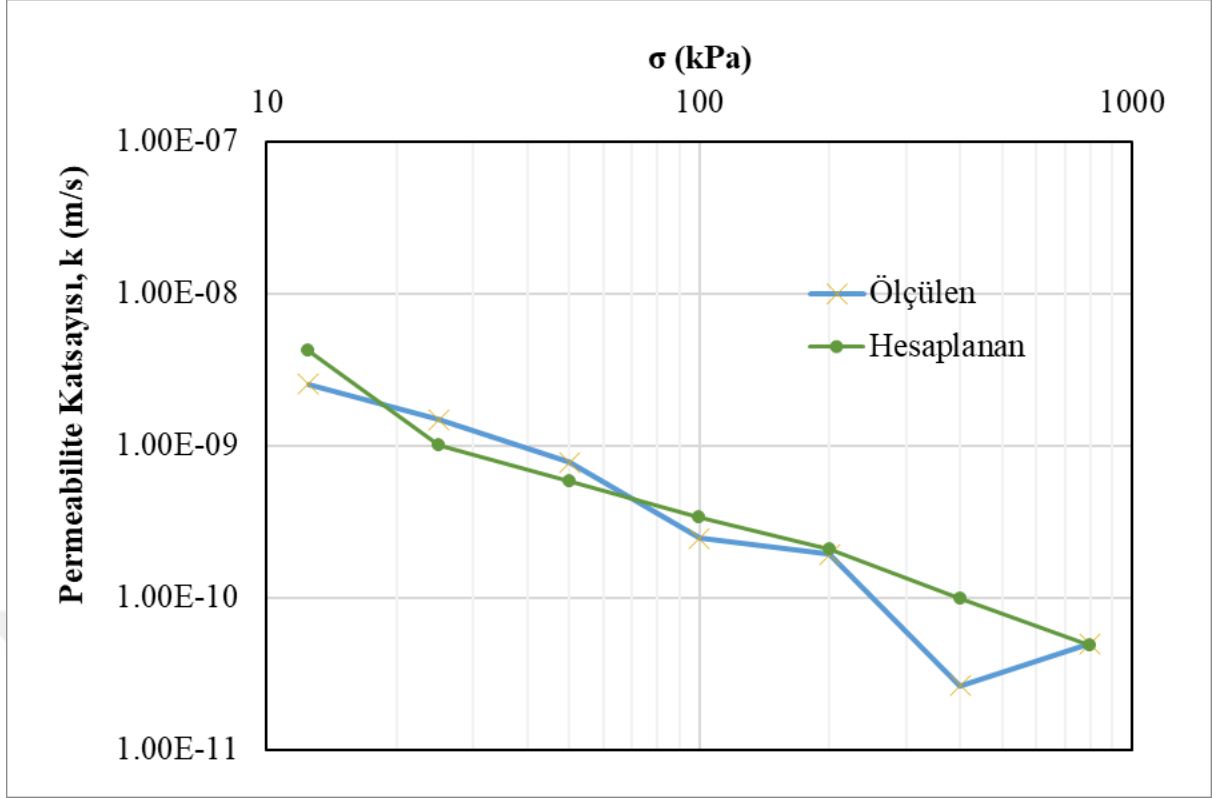
Deney sırasında uygulanan normal gerilme değerleri sonunda permeabilite ölçümleri düşen seviyeli permeabilite deneyi standartına uygun olarak yapılmıştır. Konsolidasyon deneyi sonuçlarının kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 4.12'de ölçülen ve hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir. Permeabilite katsayısı 10^{-9} - 10^{-11} m/s arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.10 : Haliç tarama çamurunun ham hali üzerinde yapılan konsolidasyon deneyi sıkışma yüzdesi - normal gerilme.



Şekil 4.11 : Haliç dip tarama çamurunun konsolidasyon katsayısı (cv).



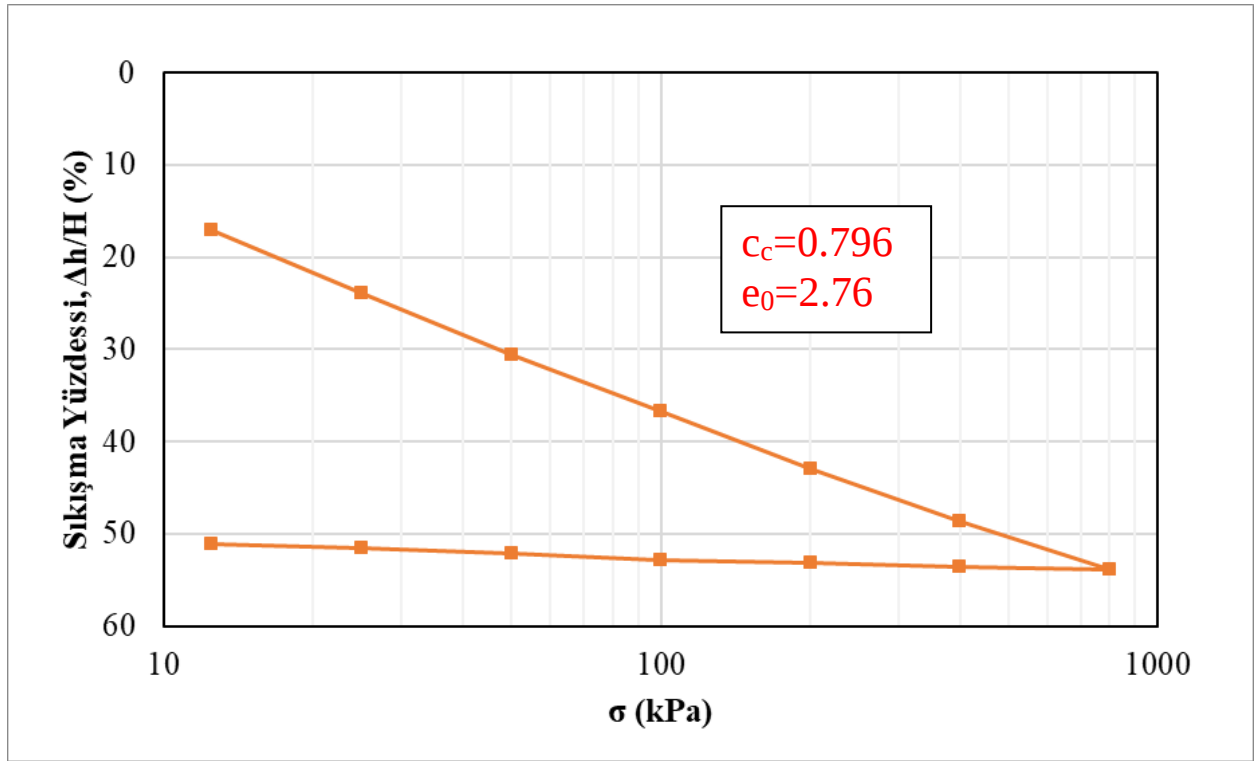
Şekil 4.12 : Haliç dip tarama çamurunun farklı gerilmelerde ölçülen hesaplanan permeabilite katsayısı.

- **GDT Sonunda Elde Edilen Filtre Kekin Konsolidasyon Deneyi Sonuçları**

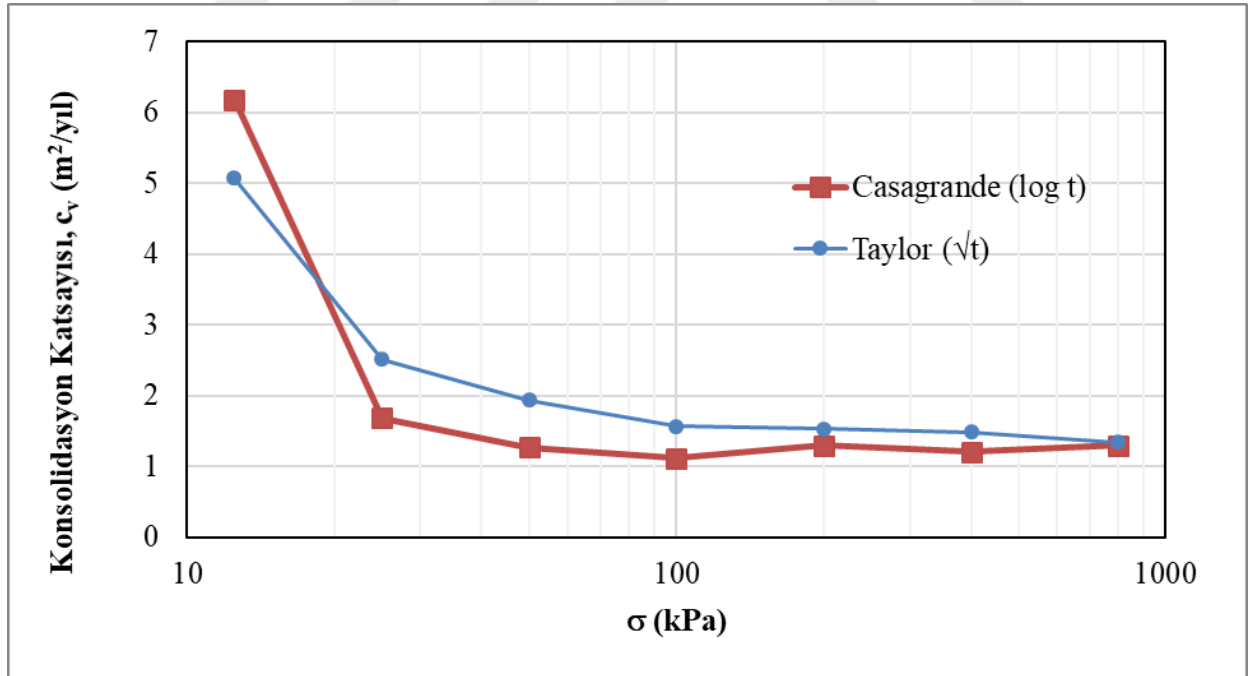
Haliç dip tarama çamurunun 30ppm A4 poliakrilamid kullanılarak yapılan GDT sonunda tüp içerisindeki filtre kekinden alınan örselenmemiş numune üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deney ASTM D2435-96d standardına uygun olarak yapılmıştır. Şekil 4.13’de deney sonunda elde edilen sıkışma yüzdesi-normal gerilme arasındaki ilişki yarı logaritmik grafikte verilmiştir.

Konsolidasyon katsayıları (c_v) Casagrande ($\log t$) ve Taylor ($\sqrt{t}$) yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.14’de iki yöntem kullanılarak hesaplanan c_v değerleri verilmektedir.

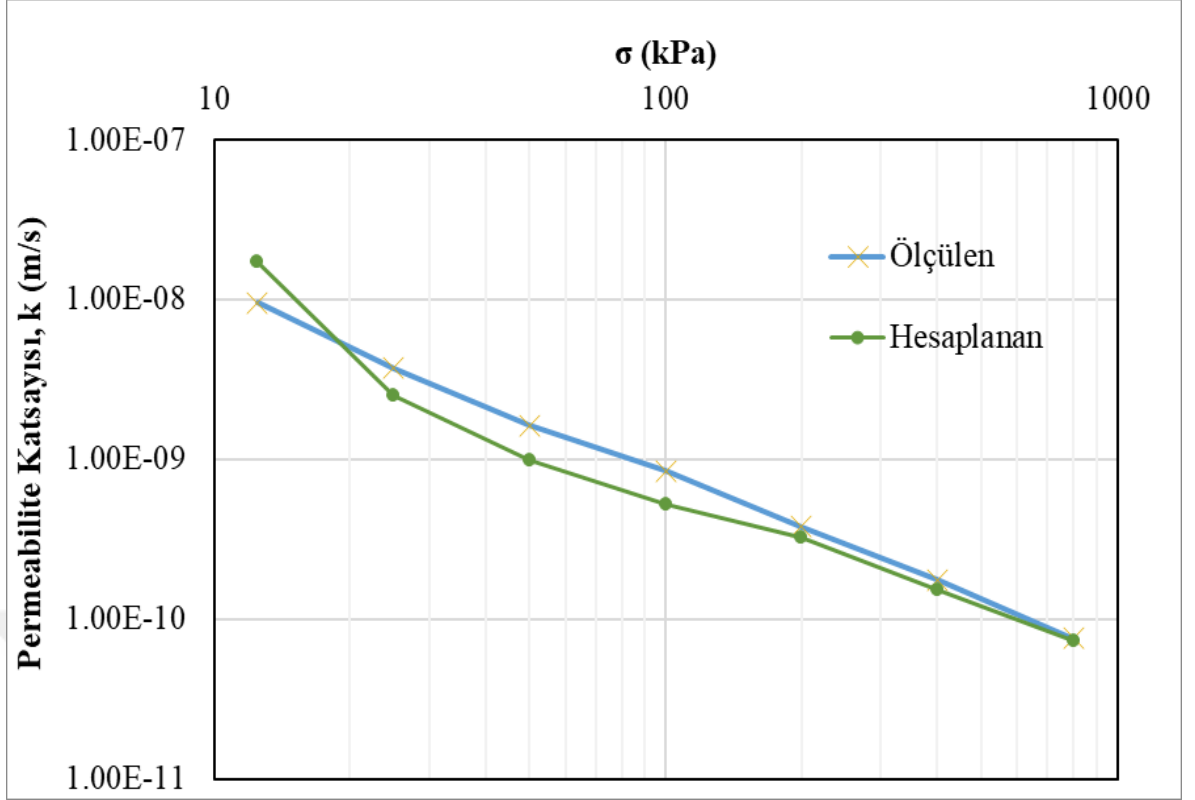
Deney sırasında uygulanan normal gerilme değerleri sonunda permeabilite ölçümleri düşen seviyeli permeabilite deneyi standartına uygun olarak yapılmıştır. Konsolidasyon deneyi sonuçlarının kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 4.15’de ölçülen ve hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir. Permeabilite katsayısı 10^{-9} - 10^{-11} m/s arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin konsolidasyon deneyi sıkışma yüzdesi - normal gerilme grafiği.



Şekil 4.14 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin farklı basınçlarda hesaplanan konsolidasyon katsayısı.



Şekil 4.15 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkı GDT sonrası oluşan filtre kekinin farklı gerilmeler altında ölçülen hesaplanan permeabilite katsayısı.

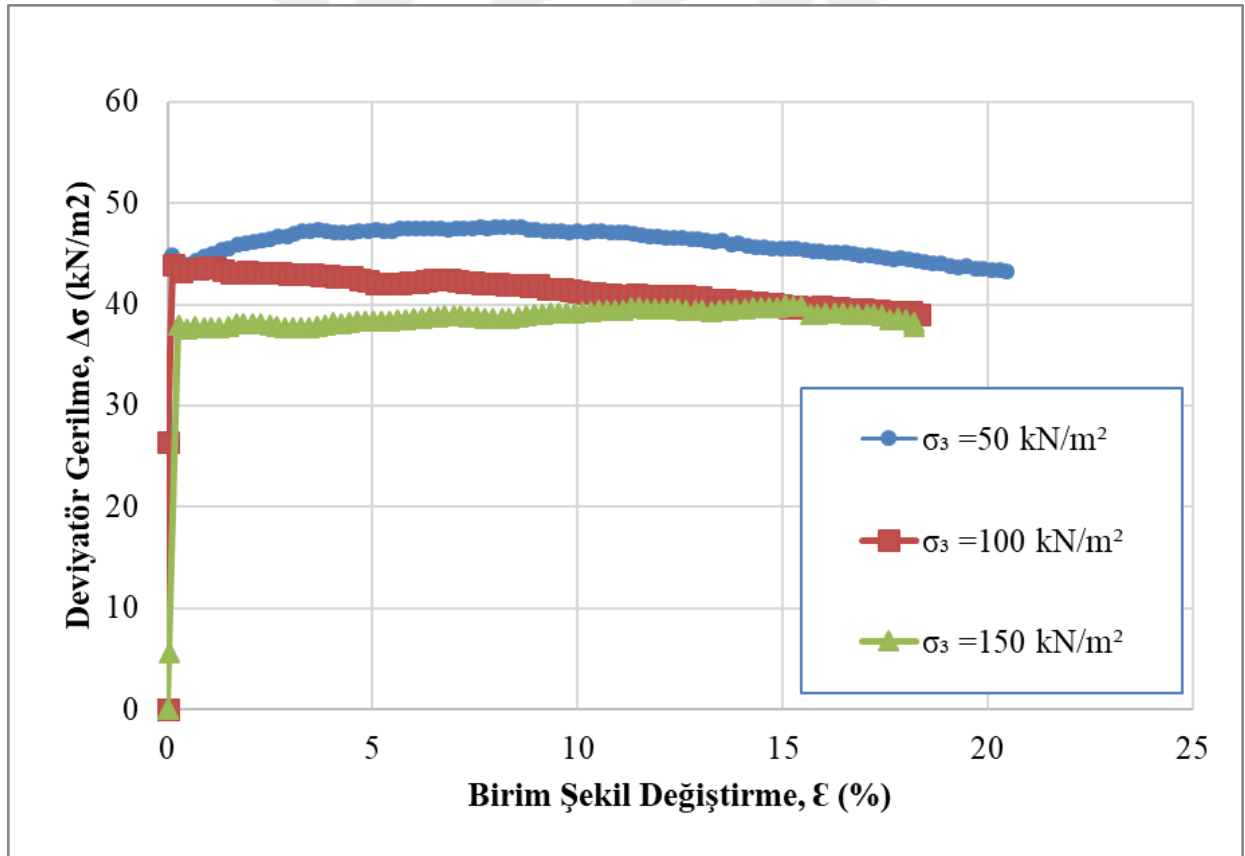
4.1.5.2 Üç eksenli basınç deneyi (konsolidasyonsuz- drenajsız, (UU))

Haliç dip tarama çamuru 30ppm A4 poliakrilamidi kullanılarak gerçekleştirilen GDT sonrasında geotekstil tüp içerisinde oluşan filtre kekinin mukavemet parametrelerinin bulunabilmesi için üç eksenli basınç deneyi (UU) yapılmıştır. Şekil 4.16a'da tüp içerisinde çıkarılan örselenmemiş numune ve Şekil 4.16b'de ise deneyin yapıldığı cihaz görülmektedir.

Çevre basıncı değerleri 50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa alınarak deney 3 defa yapılmıştır. Deneylere ait deviyatör gerilme – düşey deplasman eğrileri Şekil 4.17'de verilmiştir. Deney sonuçlarında GDT deney sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_u) değerinin yaklaşık 45 kPa olduğu hesaplanmıştır. Drenajsız kayma mukavemet değeri yaklaşık 22.5 kPa değerindedir. Yapılan 3 farklı çevre gerilmesindeki sonuçlarda kısmi farklılıklar bulunmaktadır. Bunun nedeni deneyde kullanılan numunelerin suya doymun olmamasından dolayıdır. Çünkü tüp dolumu yapıldıktan ve 7 gün beklendikten sonra geotekstil tüp açılmış ve numuneler alınmıştır.



Şekil 4.16 : Haliç dip tarama çamurunun kimyasal katkılı GDT sonrası a) geotekstil tüp içerisinden çıkarılan örselenmemiş numune ve b) üç eksenli basınç deneyi cihazı.



Şekil 4.17 : Üç eksenli basınç deneyine ait deviyator gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri.

4.1.6 Morfolojik analiz

Poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı yapılan GDT sonrası oluşan filtre keklerinin morfolojik analizleri için Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Yayımlı X-Ray Spektroskopi (SEM-EDS) kullanılarak görüntüleri alınmış ve elementel analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.18a,b,c’de Haliç dip tarama çamurunun poliakrilamid katkısız ve Şekil 4.18d,e,f’de ise poliakrilamid katkılı olarak SEM görüntüleri farklı büyüklüklerde verilmiştir. Çizelge 4.4’te poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı olarak yapılan analizler sonucunda Haliç dip tarama çamuruna ait elementel analiz sonuçları verilmiştir.

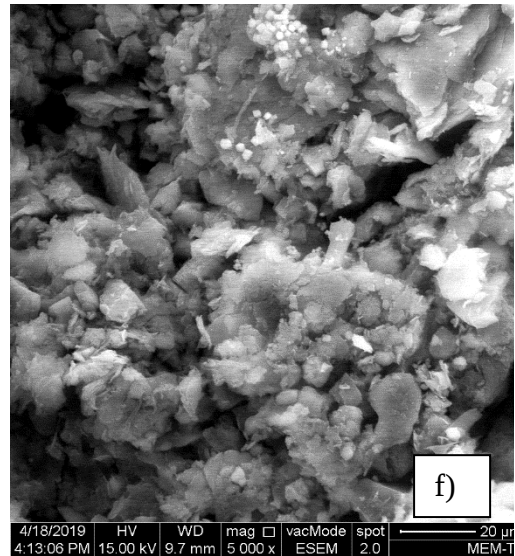
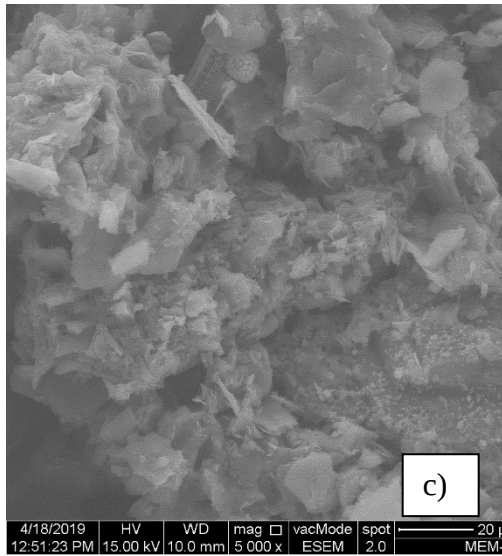
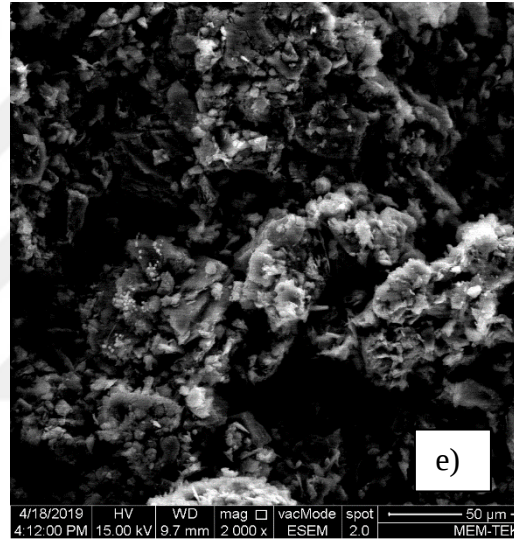
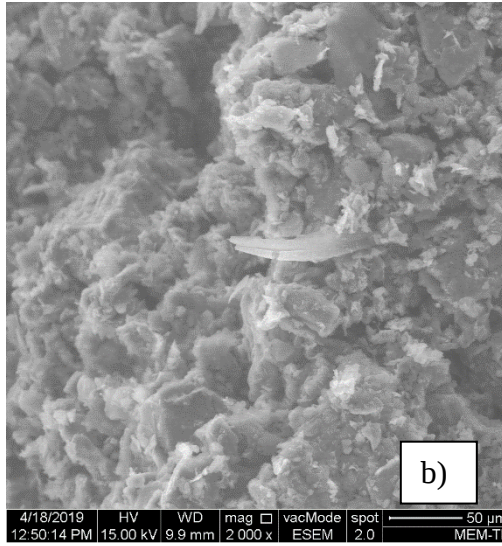
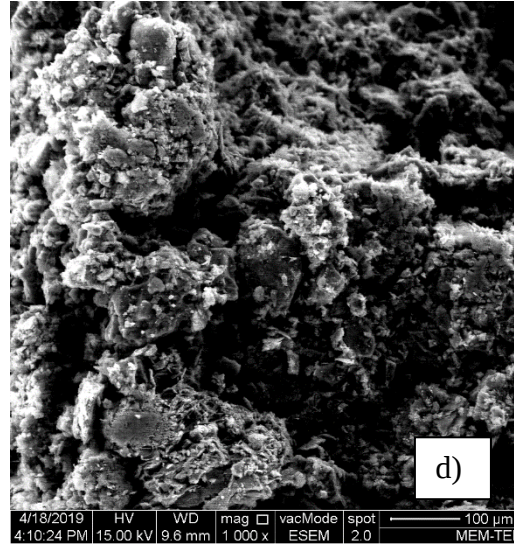
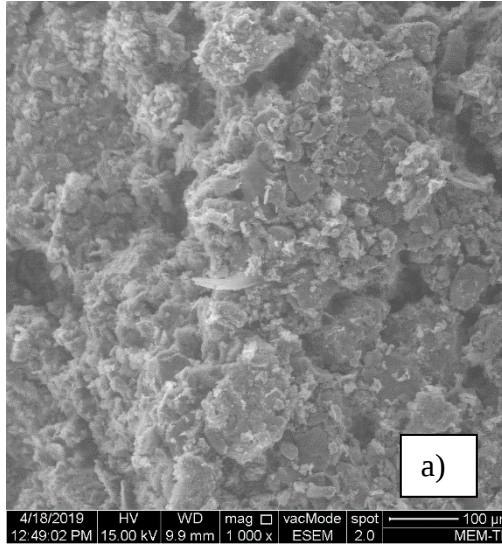
Çizelge 4.4 : Haliç dip tarama çamurunun elementel analiz sonucu.

Element	PAM Katkısız	PAM Katkılı
	$W_T(\%)$	$W_T(\%)$
C	07.01	06.21
O	45.34	43.45
F	01.37	01.31
Na	01.43	00.84
Mg	01.81	01.81
Al	10.57	10.83
Si	25.24	24.88
S	00.71	01.33
Cl	00.62	05.80
K	01.17	04.86
Ca	01.46	00.84
Fe	03.27	01.81

W_T : Atom Ağırlığı

Çizelge 4.4’te Haliç dip tarama çamurunun poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı elementel analiz sonucu atom ağırlığı (W_T) cinsinden verilmiştir. S (Kükürt), Cl (Klor) ve K (Potasyum) elementlerinin atom ağırlıklarının yüzdesinde poliakrilamid eklendikten sonra artış meydana gelmiştir. Bu artış poliakrilamidin yapısında bu elementlerin bulunmasından dolayı olmaktadır. Bazı elementlerde atom ağırlıkları yüzdesinde küçük değişiklikler görülmektedir. Bu analizin yapıldığı bölgedeki yapıların yoğunluğunun değişiminden kaynaklanmaktadır.

SEM görüntüleri bakıldığında, Şekil 4.18a’da poliakrilamid kullanılmadan ve Şekil 4.18d’de ise poliakrilamid kullanılarak 1000 kat yaklaştırarak alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Bu iki görüntü karşılaştırıldığında poliakrilamid kullanıldığında danelerin yan yana gelerek topaklaşarak flok halinde yapılar oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.18 : Haliç dip tarama çamurunun a, b, c) poliakrilamid katkısız ve d, e, f) poliakrilamid katkılı SEM görüntüleri

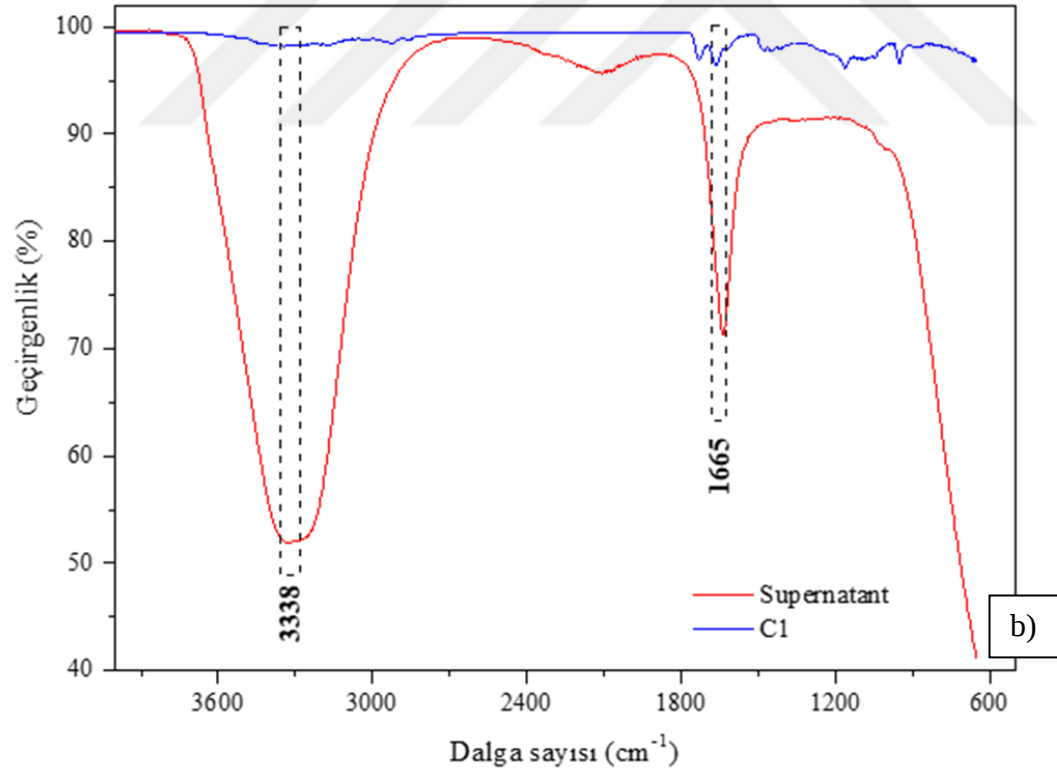
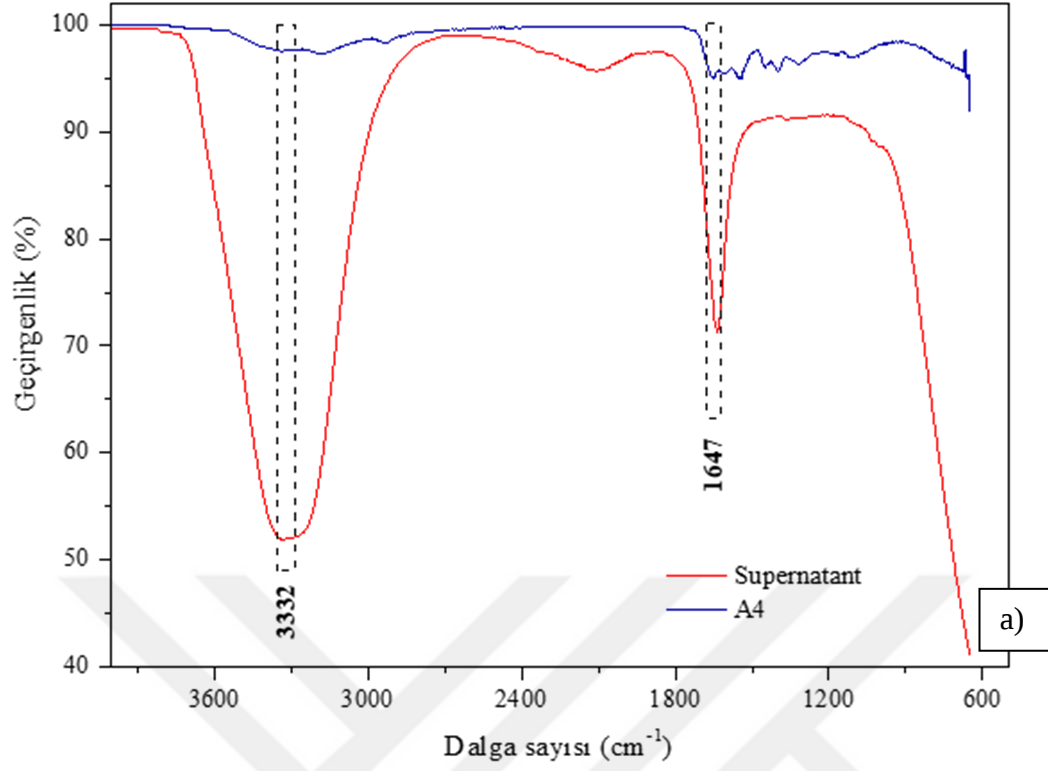
4.1.7 Kimyasal analizler

Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi sonrası oluşan filtre kek ve sızıntı suyunun çevre açısından değerlendirmek için kimyasal analizler yapılmıştır. Burada Fourier-Dönüşümlü Infrared Spektroskopi (FTIR) ile susuzlaştırma işlemi için kullanılan poliakrilamidin filtre kek içinde kalıp kalmadığı araştırılmıştır. Susuzlaştırma işlemi sonrası oluşan sızıntı suyunun su kalitesi açısından kontrolü için de sızıntı içerisindeki ağır metaller ölçülmüştür. Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırma işleminin Haliç kenarında yapılacağı ve sızıntı suyunun da Haliç'e yönlendirileceği öngörülmüştür. Bu yüzden yapılan su analiz sonuçları ulusal deniz suyu standartları ile karşılaştırılmıştır.

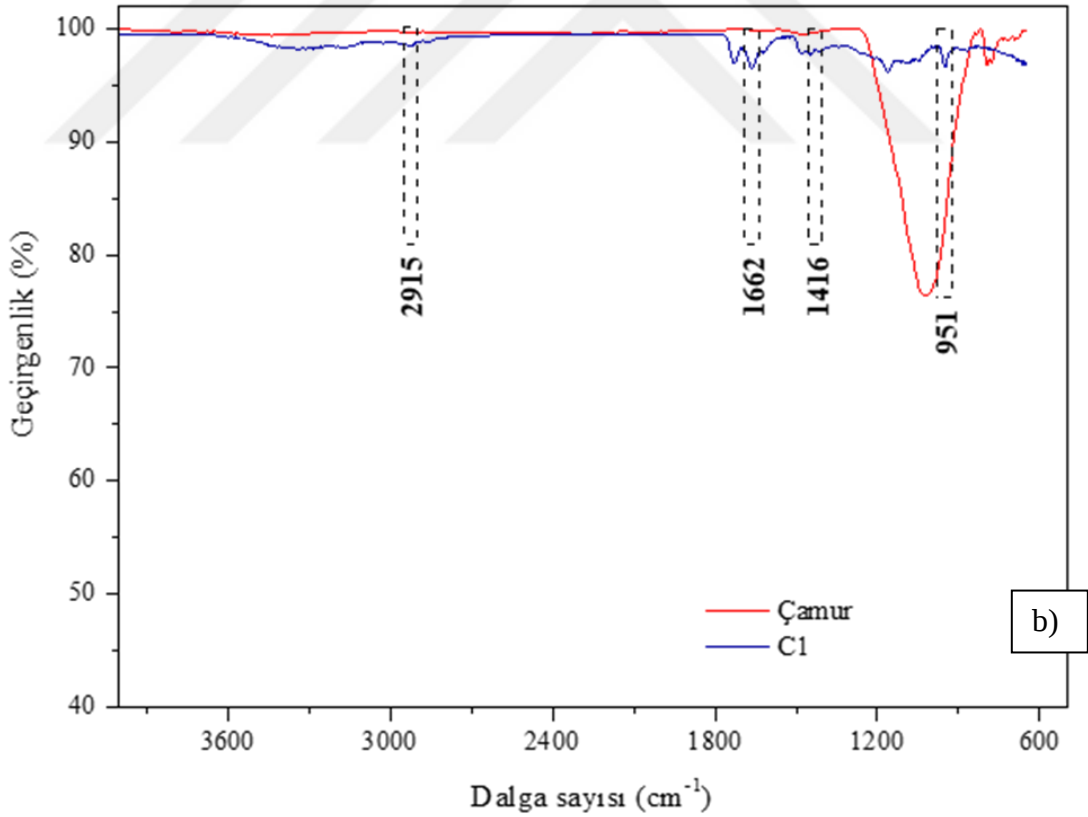
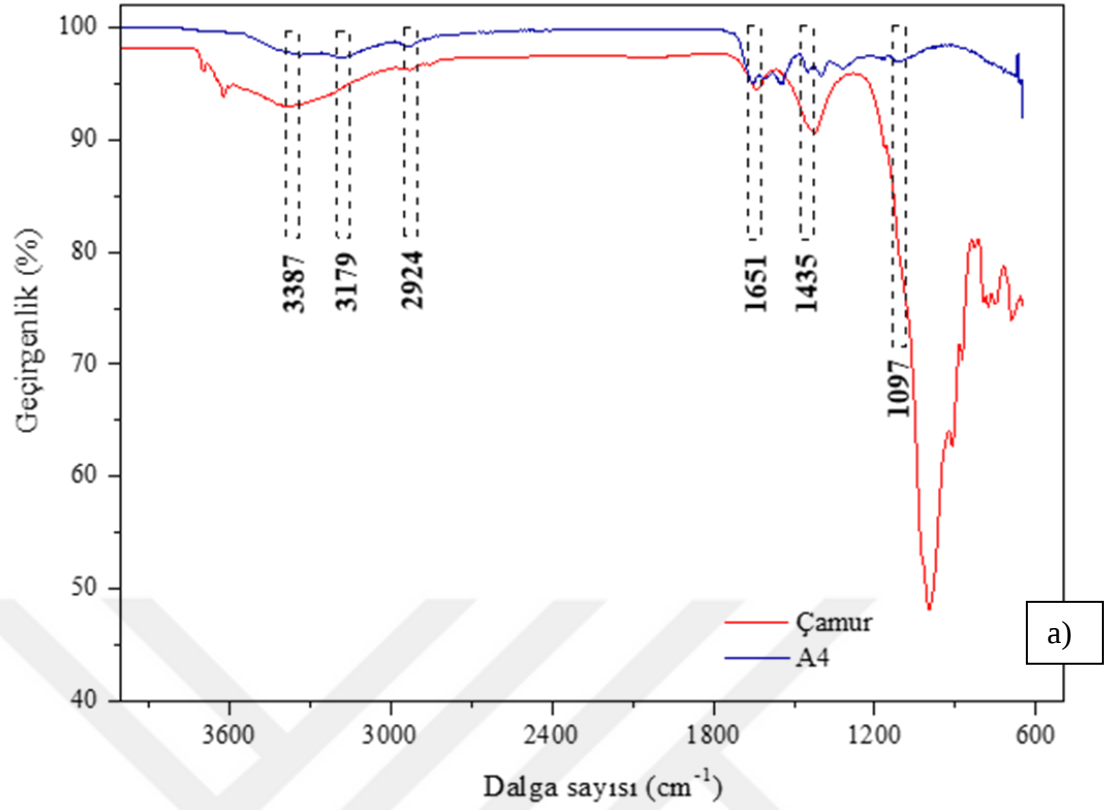
4.1.7.1 Fourier-dönüşümlü infrared spektroskopi (FTIR)

Çıkış suyunda poliakrilamid kalıntısını değerlendirmek amacıyla Jar deneyinde Haliç dip tarama çamuru üzerinde etki göstermeyen C1 katyonik poliakrilamidi ile deneylerde kullanılan A4 anyonik poliakrilamidi için Fourier-Dönüşümlü Infrared Spektroskopi (FTIR) analizi yapılmıştır. Haliç dip tarama çamurunun 30ppm dozajlı poliakrilamid ile çöktürüldükten sonra oluşan supernatant (sıvı kısım) fazı ve filtre kek analiz edilmiştir.

Anyonik poliakrilamid ile yapılan flokülasyon sonucu oluşan supernatant fazında sadece su piklerinin oluştuğu görülmüş ($3300-3450\text{ cm}^{-1}$ ve 1650 cm^{-1} bandı) ve poliakrilamid kalıntısına rastlanmamıştır (Şekil 4.19a). Çöktürülen çamurdaki spektruma bakıldığında ise poliakrilamid ile çakışmalara rastlanmaktadır (Şekil 4.20a). Bunlar; C-H gerilme titreşimi (3387 cm^{-1}), N-H bağı (1540 cm^{-1}), hidrojen-bağı *cis*-formu ($3180-3140\text{ cm}^{-1}$), $-\text{NH}_2$ gerilme titreşimi (3433 cm^{-1}), $-\text{CH}_3$ and $-\text{CH}_2-$ asimetrik gerilme titreşimi (2934 ve 2840 cm^{-1}), $-\text{CH}_2-\text{N}$ içindeki $-\text{CH}_2-$ bağ titreşimi (1452 cm^{-1}), C–O– gerilme titreşimi (1161 cm^{-1}). Birincil aminler katı fazda $1670-1650\text{ cm}^{-1}$ de çıkan C=O gerilme titreşiminden ötürü güçlü bağlar taşır. Katyonik poliakrilamid ile yapılan flokülasyon sonucunda supernatantta kalıntı görülmemiştir (Şekil 4.19b). Ancak çamurda da pik çakışmaları daha az bulunmuştur ve A4 poliakrilamidine göre veriminin daha düşük olduğunu göstermiştir (Şekil 4.20b). Poliakrilamid konsantrasyonu düşük ve suda seyreltik dağılmıştır. Bu durum sadece su piklerinin görünür olmasını açıklamaktadır.



Şekil 4.19 : Haliç dip tarama çamurunun a) A4 ve b) C1 poliakrilamidleri ile yapılan flokülasyonunun supernatant fazın FTIR spektrumu.



Şekil 4.20 : Haliç dip tarama çamurunun a) A4 ve b) C1 poliakrilamidleri ile flokülasyonun çamur fazına ait FTIR spektrumu.

4.1.7.2 Sızıntı suyu analizi

Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırma işlemi sırasında geotekstil tüp ile poliakrilamidin birlikte kullanılması sırasında açığa çıkacak sızıntı suyunun çevresel risklerini belirlemek amacıyla sızıntı suyunun kalitesi incelenmiştir. Haliç yakınında susuzlaştırılacak olan dip tarama çamurunun susuzlaştırma işlemi sonrasında sızan suyun Haliç'e deşarj edileceği düşünülmektedir. Bu yüzden analizlerle elde edilen değerler, Çevre ve Şehircilik Bakanlığının kabul ettiği deniz suyu kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Çizelge 4.5'de verilen değerlere göre susuzlaştırma sonunda sızan suyun kalitesi belirtilen standartların limit değerlerini karşılamaktadır. Susuzlaştırma sonucunda sızıntı suyunun kalitesinde iyileşmeler olmuştur. Çizelge 4.5'te de görüldüğü gibi Nikel haricinde çizelgedeki tüm ağır metallerin miktarında azalmalar meydana gelmiştir. Poliakrilamid eklenmeden önce Kadmiyum elementi deniz suyu kalite parametresinin üst sınır değerinin üzerinde olmasına rağmen poliakrilamid kullanılarak yapılan susuzlaştırma sonrası bu değer istenilen üst sınır değerini sağladığı görülmüştür.

Çizelge 4.5 : Susuzlaştırma işlemi sonucunda sızan suyun analiz sonuçları.

Parametre	Birim	Susuzlaştırma Öncesi	Susuzlaştırma Sonrası	Deniz Suyu Kalite Parametreleri*
pH		6.8	7.0	6-9
Nikel (Ni)	µg/L	1	1	100
Çinko (Zn)	µg/L	20	1	100
Kadmiyum (Cd)	µg/L	33	4	10
Krom (Cr)	µg/L	146	15	100
Kurşun (Pb)	µg/L	62	7	100
Arsenik (As)	µg/L	23	10	100

* SKKY (2004), Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 31 Aralık 25687 Sayılı Resmi Gazete.

4.1.7 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Haliç dip tarama çamurları ile ilgili yapılan çalışmalarda tarama numunelerinin endeks özelliklerinin büyük ölçüde benzerlik göstermesine karşın organik içeriklerinde farklılıklar gözlenmektedir. Söz konusu organik içerikler bölgesel olduğu kadar

dönemsel olarak da değişkenlik gösterebilmektedir. Berilgen ve Bulut (2016) tarafından yapılan çalışmada Haliç dip tarama çamurunun organik içeriğinin %3.5 olduğu söylenirken, bu çalışmada kullanılan çamur numunelerin organik içeriği %1 olarak tespit edilmiştir.

%10 katı oranıyla çalışılan Haliç dip tarama çamuru numunelerinde pH 6.8 ortam değerinde zeta potansiyel değeri -13.5mV olarak ölçülmüştür. Bu değerin çalışılan 3~9 pH ortam değerleri için -8 ile -12 mV aralığında salınım yaptığı görülmüştür. Bu bakımdan zeta potansiyeli üzerinde pH ayarlanmasının etkisinin oldukça sınırlı kalması sebebiyle ortamın doğal pH değerinde flokülasyon uygulamasının daha ekonomik olacağı belirlenmiştir.

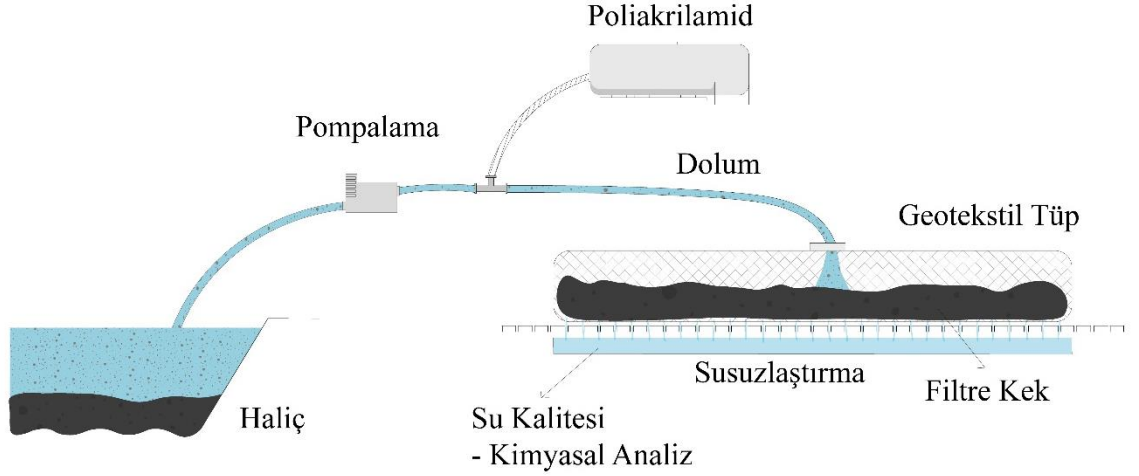
Çalışmada etkinliği 3 ile 10 pH aralığında değişen anyonik ve katyonik karakterde toplam 13 farklı poliakrilamid kullanılmıştır. Katyonik tipte poliakrilamidler flokülasyon deneyinde başarı sağlayamamıştır. Bu bakımdan araştırmalar anyonik karakterde poliakrilamidlere odaklanmıştır. Moleküler ağırlıkları ile rölatif yükleri düşükten çok yükseğe değişkenlik gösteren anyonik karakterdeki poliakrilamidlerin düşük - orta rölatif yük ve moleküler ağırlığa sahip olanlarının flokülasyon deneylerinde daha büyük bir başarı elde ettiği görülmektedir. Bulunan sonuç bu poliakrilamidlerin pH çalışma aralığının daha geniş olması ve doğal ortam pH değerini kapsaması açısından da uyumludur. Buna göre, flokülasyon deneylerinde çökelme hızı ve bulanıklık değerleri göz önüne alındığında A4 anyonik poliakrilamidinin 30ppm dozajda en etkili katı-sıvı ayrımını sağladığı anlaşılmaktadır. Nitekim kontrol amaçlı dane boyutu ölçümlerinin de yapılması ile A4 poliakrilamidi için 30ppm değerinde en iyi floklaşmayı göstermektedir.

KontROLSÜZ çevre yapılaşmalarının bulunduğu akarsu havzalarında atık suların derelere karışması taşınan sedimanın pH değerlerinde dönemsel farklılık oluşmasına neden olacaktır. Bu durum dere ağzında biriken sedimanın özelliklerine de yansıtacağından böyle bölgelerde yürütülecek tarama faaliyetlerinde uygun poliakrilamid kullanımı için detaylı ön incelemelerin gerekliliği bulunmaktadır. 7.5 km uzunluğundaki Haliç limanda 1997-1999 yılları arasında 5 m su derinliği sağlanması amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı tarama faaliyetleri öncesinde çevre atık sularının derelere karışması büyük ölçüde önlenmiştir. Günümüzde dönemsel olarak bölgesel olarak yürütülmeye devam edilen tarama faaliyetleri için sedimentlerin ortam pH

değerlerinde çevre kirliliğine bağlı değişiklik beklenmemektedir. Ancak göl sedimentlerinde sıcaklık artışı ile organik madde miktarında azalma meydana geldiği bilinmektedir (Gudasz ve diğ, 2010; Karpuzcu, 2012). Bu yüzden hava sıcaklığının düşük olduğu zamanlarda yapılan taramalarda çamurun organik içeriğinin daha fazla olması beklenmektedir. Tüm bu bilgiler Haliç bölgesinde yapılacak tarama faaliyetlerinin dönemine ve tarama derinliğine göre tarama çamuru ile etkin çalışacak poliakrilamidin değişkenlik göstereceğini işaret etmektedir. Nitekim bu çalışmanın tersine Berilgen ve Bulut (2016) tarafından yapılan Haliç dip çamurunun geotekstil kullanılarak susuzlaştırılması çalışmalarında katyonik poliakrilamidlerin anyonik poliakrilamidlerden daha etkili olduğu bulunmuştur. Berilgen ve Bulut (2016) tarafından yapılan çalışmada, optimum dozaj olarak katı oranı %0.5 poliakrilamid olarak bulunmuştur. Bu oran 500ppm değerine denk gelmektedir. Önceki çalışmanın tarama mevsimi bilinmemekle birlikte, bu çalışmada tarama Eylül ayında gerçekleştirilmiş, optimum dozajın anyonik bir poliakrilamid için 30ppm değerine kadar düştüğü gösterilmiştir.

RDT deneylerinde %10 katı oranlı tarama çamur süspansiyonlarının flokülasyon deneyleri sonucunda belirlenen A4 poliakrilamidinin (PAM) farklı dozajlarında sızan katı madde miktarı ve filtre kekin su muhtevasının en düşük, sızma hızının en yüksek olduğu dozaj 30ppm olarak belirlenmiştir. Bu sonuç flokülasyon deneylerinde ölçülen sedimentasyon hızı, bulanıklık ve polimer dozajının verimliliği ile uyumludur.

GDT deneyinde Haliç dip tarama çamurunun poliakrilamid katkısız süspansiyonunda filtrasyon verimi oldukça sınırlı kalmıştır. Bunun nedeni SEM analizlerinde de gözlenen plak şekilli dane çatısının kısa sürede geotekstilin gözeneklerini tıkaması olarak yorumlanmıştır. PAM kullanılması ile filtrasyon verimindeki yaklaşık 5 katlık artışın nedeni belirlenen optimum dozajla oluşturulan yüzeyi daha az pürüzlü ayrık topak yapılar arasında kalan boşluk hacimlerinin sürekliliğinin sağlanması ve bu boşluklardan suyun kolayca drene olabilmesidir. Çalışmada, Haliç dip tarama çamurunun geotekstil ile susuzlaştırılması kapsamında yapılan GDT deneyinde katı içeriği ve filtrasyon verimliliği değerleri açısından daha önce yapılan çalışmaya kıyasla daha düşük poliakrilamid dozajıyla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.21'de Haliç dip tarama çamurunun geotekstil tüp ile susuzlaştırılmasının şematik gösterimi görülmektedir.



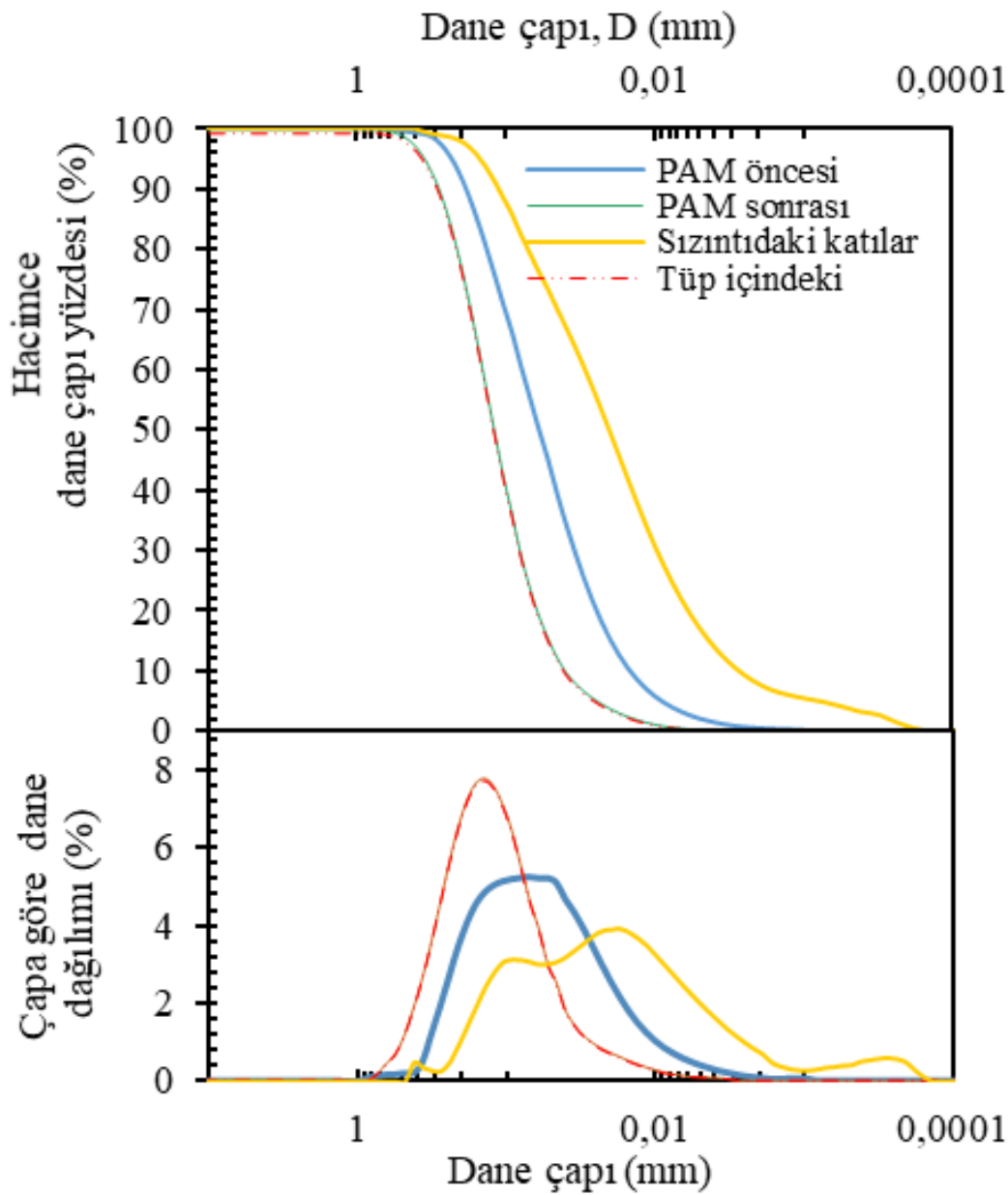
Şekil 4.21 : Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırılmasının şematik gösterimi.

Şekil 4.22’de poliakrilamid öncesi ve sonrası danelerin hacimce çap dağılımları GDT deneyi sonrasında tutulan tarama malzemesi ve sızıntı suyundaki katı içeriğin çap dağılımı ile birlikte verilmiştir. Buna göre, GDT öncesi poliakrilamid katkısının flok oluşumundaki başarısı açıkça görülmektedir. GDT sonrası sızıntı suyundaki katı içeriğin çap dağılımında filtre keki oluşana kadar geçen büyük çaplı partiküllerden ve dolum işleminin birkaç seferde tamamlanmasından kaynaklandığı düşünülen dalgalanmalar gözlenmiştir. Ancak sızan katı içeriğin yüzdesinin çok düşük kalması nedeniyle tüp içerisinde kalacak tarama malzemesinin çap dağılımı GDT öncesi ile poliakrilamid sonrası örtüşmektedir.

Tarama malzemesinin geotekstil tüp ile susuzlaştırılmasında ağır metal kirleticilerini tutmadaki başarısı büyük ölçüde 60 µm altındaki danelerin tutulmasına bağlıdır (Berg ve Oliveria, 2019). Farklı dozajlarda PAM şartlandırması ile Haliç tarama çamurlarının dane çapı dağılımındaki değişimini incelenmiş ve optimum dozajda flokülasyon ve sedimentasyon hızı açısından en efektif flok çaplarına ulaşıldığını görünmüştür. Buna göre geotekstil tüp uygulamalarında poliakrilamid kullanımının susuzlaştırma sürecini hızlandıracağı gibi çıkış suyundaki ağır metal kirleticilerinin düzeyini azaltacağı anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, Haliç tarama çamurun poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı süspansiyonları ile GDT deneyi sonrası sızıntı suyundaki katı madde içeriğinin dane çapı dağılımı belirlenmiştir (Şekil 4.22). Buna göre, poliakrilamid katkısız

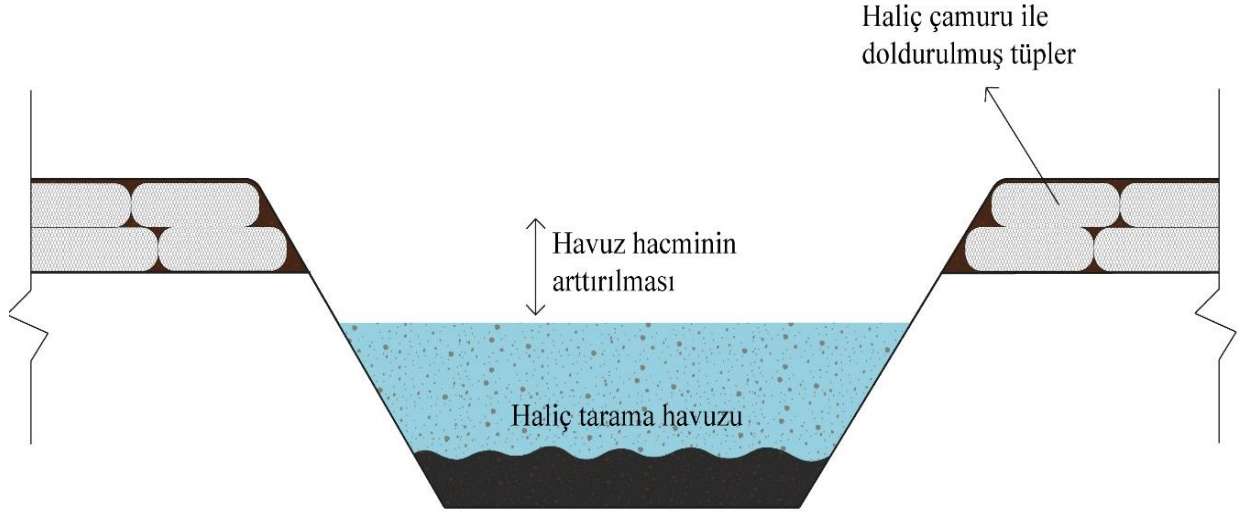
süspansiyonda 60 μm altındaki partiküllerin hacimce %50 olan değerinin 30ppm A4 poliakrilamid ile %19.0 değerine düştüğü, GDT deneyinde sızıntı suyuna geçen 60 μm altındaki partiküllerin miktarının da %18.8 değeri ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak sızıntı suyunun kimyasal analizlerinde poliakrilamid sonrası geotekstil tüp ile süspansiyonların susuzlaştırması sırasında kirleticilerin büyük oranda tüp içerisinde tutulabildiği anlaşılmıştır (Çizelge 4.4). Analizlerde PAM şartlandırma öncesi giriş süspansiyonu ile sızıntı suyunda en yüksek oranda gözlenen sodyum ve klorür deniz suyunda baskın olan ve tuzluluğun ana sebeplerinden olan iki iyondur.



Şekil 4.22 : Geotekstil tüp ile susuzlaştırmada hacimce dane çapı dağılımının değişimi.

Tuzluluk yağışlara bağlı olarak değişmektedir. Karadeniz'in tuzluluğu Marmara'dan daha düşüktür ve oradan gelen akıntılar zaman zaman tuzluluğu etkilemektedir (Kılıç ve diğ, 2019).

Bölgede tarama hacminin büyüklüğü ve tarama faaliyetinin süreklilik gerektirmesi nedeniyle eski taş ocakları atık havuzu olarak düzenlenmiştir. Literatürde bu tür atık havuzların dolum kapasitelerini artırmak amacıyla mevcut sedde yapısının yükseltilebildiği görülmektedir. Bu amaçla geotekstil tüplerin bu imalatlarda kullanılması ile ekonomiye büyük katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Ancak oluşacak seddenin stabilitesi, geçirgenliği ve sızıntı suyunun yönetimi dikkat edilmesi gereken hususlardır. Bu çalışmada, geotekstil tüp ile susuzlaştırılma sırasında poliakrilamid kullanımının Haliç tarama çamur süspansiyonlarında filtrasyon hızını arttırdığı ve sızıntı suyundaki katı içeriği, bulanıklığı azalttığı ve kirleticileri büyük ölçüde tüp içerisinde kalmasını sağladığı görülmektedir. Şekil 4.13'de susuzlaştırma sonrası tarama malzemesinin ek yüklemeler altında sıkışma kapasitesinin oldukça yüksek, şişme potansiyelinin ise sınırlı kaldığı gösterilmiştir. Tarama malzemesinin yaklaşık 100 kN/m² gerilmelere kadar geçirgenliğinin 10⁻⁹ m/s düzeylerine inmediği anlaşılmaktadır. Buna göre tarama malzemesi dolgulu geotekstil tüplerin sedde imalatlarında kullanılabilmesi için yerinde önyükleme uygulaması ile iyileştirilmesi tarama malzemesinin sıkışabilirliğini sınırlandıracak ve geçirgenliğini azaltacaktır. Bu amaçla önyükleme olarak tarama çamur dolgulu geotekstil tüplerin kullanılabileceği öngörülmüştür. Ancak yerel zemin koşullarına ve planlanan sedde geometrisine göre imalat aşamaları değişkenlik göstereceğinden bu çalışma kapsamına alınmamıştır. Tasarımda kullanılacak geotekstil tüp boyutlarının geçici olarak önyüklemede kullanılanlarla aynı olmasının imalat kolaylığı sağlayacağı düşünülmektedir. Tüp dizilimi sırasında oluşacak olan ara boşlukların kum ile doldurulması, tarama malzemelerinin konsolidasyon sürecini hızlandırırken, seddenin geçirimsizliğini arttıracaktır. Bu nedenle, sahada zamana bağlı oturma davranışının takibi ile istenilen geometriye getirilen seddenin, geçirimsiz bir malzeme ile kaplanması uygun olacaktır. Tüm bu süreç boyunca çıkan sızıntı suyunun çevre ortama verilebilmesi için gerekli analizlerin yapılması ve kirlilik düzeyinin ortam şartlarına göre istenilen seviyelere indirilmesi gerekmektedir. Şekil 4.23'te Haliç dip tarama çamurunun susuzlaştırılması ve sedde oluşturulmasının şematik gösterimi verilmiştir. Burada sedde kullanılarak çamur havuzlarının hacminin artırılabilceği düşünülmektedir.



Şekil 4.23 : Sedde imalatında Haliç dip tarama çamuru dolgulu geotekstil tüp kullanımı.

4.2 Maden Atığı

Maden atığının susuzlaştırma performansının araştırılması için yapılan deneylere ait sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

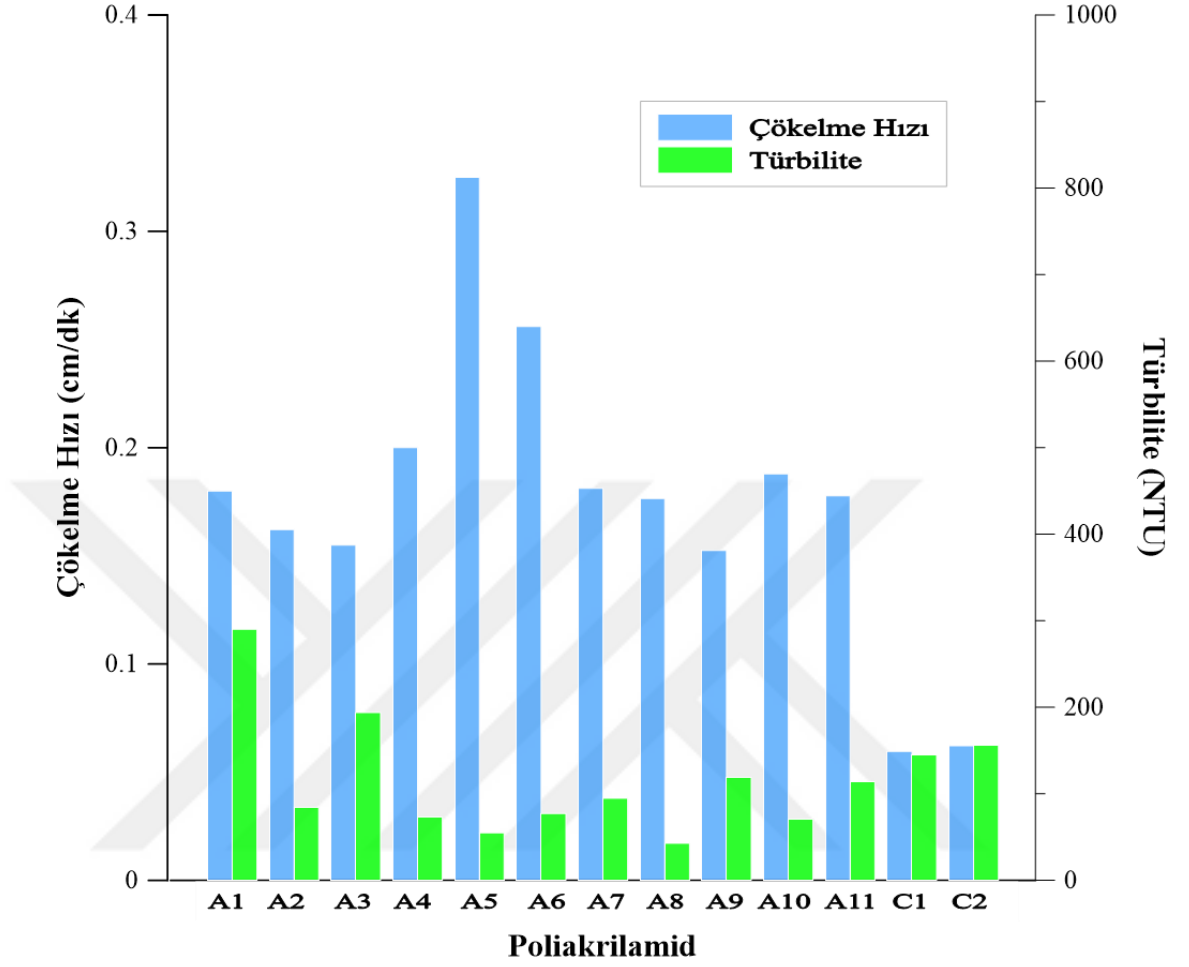
4.2.1 Zeta potansiyeli ölçümü

Maden atığının susuzlaştırma araştırması %10 katı oranıyla yapılmıştır. Bu yüzden %10 katı oranıyla hazırlanan karışımların zeta potansiyeline bakılmıştır. Burada zeta potansiyeli -19.7 mV olarak ölçülmüştür. Maden atığının susuzlaştırması işleminden sonra sızıntı suyunun maden ocağında tekrar proses suyu olarak kullanılması planlanmıştır. Bundan dolayı maden atığının susuzlaştırmasında pH değiştirilmeden doğal 7,3 pH değeri ile deneylere devam edilmiştir.

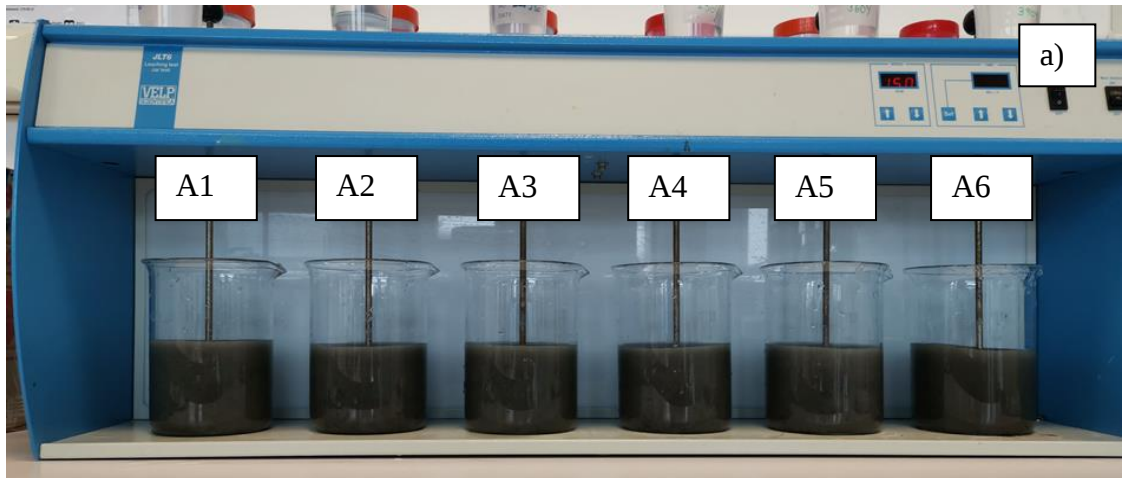
4.2.2 Jar deneyi (Flokülasyon)

Maden atığının %10 katı oranına sahip karışımının bulanıklık değeri yaklaşık 39.800 NTU olarak ölçülmüştür. Aynı karışıma 10ppm dozajında Çizelge 3.6'da verilen 13 farklı poliakrilamid kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökeltme hızları ve bulanıklık değerleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Deneylerde katyonik poliakrilamidlerin çamur numuneleri üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Kullanılan katkılardan A5 poliakrilamidinin aynı sürede diğerlerine oranla bulanık değerini daha fazla düşürdüğü (Şekil 4.25b soldan 5. beher) gözlenmiştir. Şekil 4.24'de de

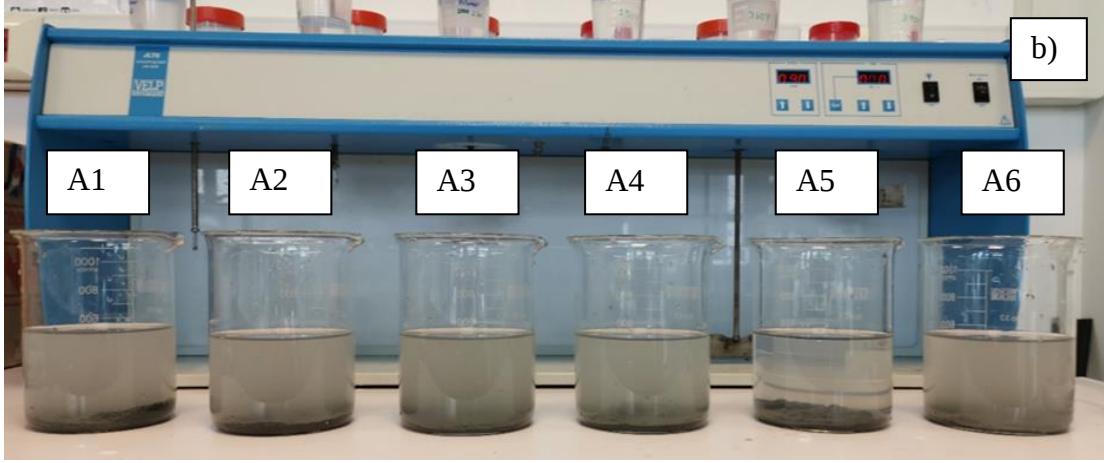
anlaşılabacağı üzere A5 poliakrilamidi çökeltme hızı ve bulanıklık açısından en etkili sonucu vermiştir.



Şekil 4.24 : 13 farklı poliakrilamid kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökeltme hızları ve bulanıklık değerleri.

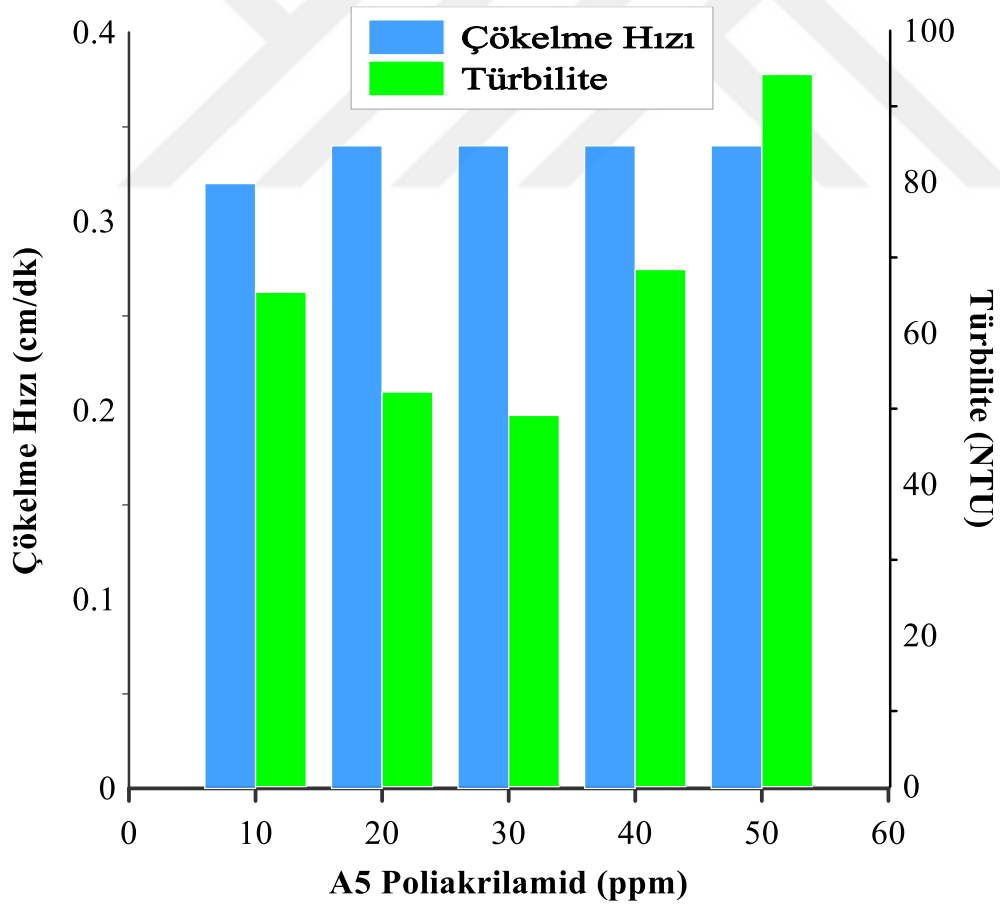


Şekil 4.25 : Flokülasyon deneyi a) öncesi ve b) sonrası görünümü.



Şekil 4.25 (devam) : Flokülasyon deneyi a) öncesi ve b) sonrası görünümü.

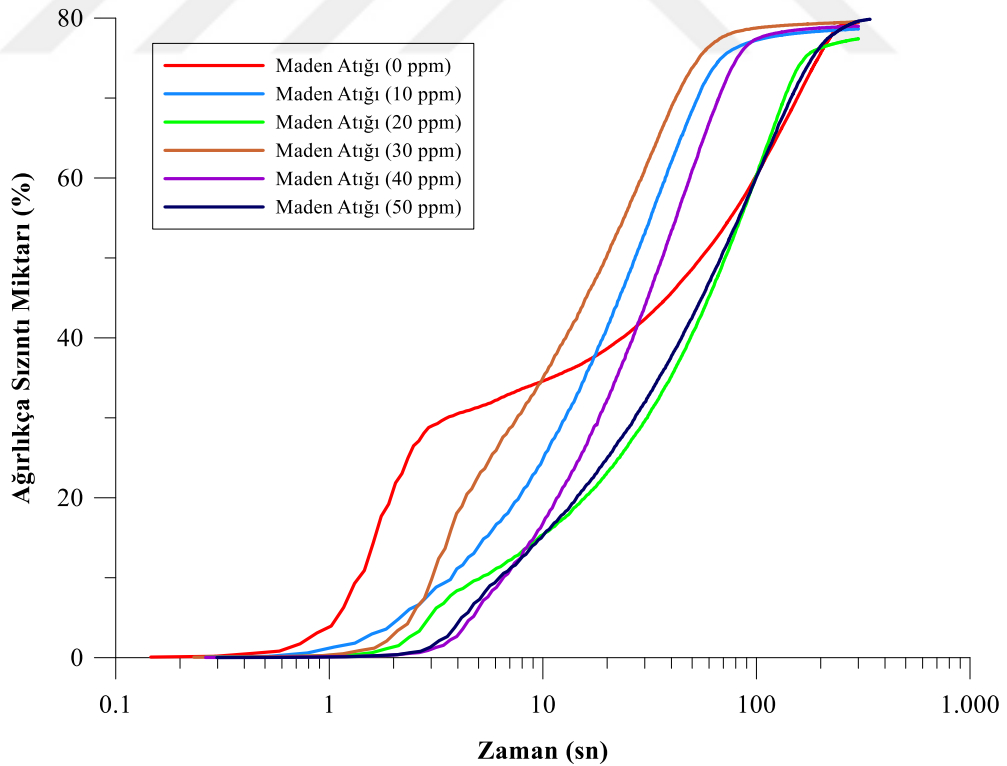
En etkili poliakrilamid olarak belirlenen A5 poliakrilamidin optimum dozajının belirlenmesi için 10, 20, 30, 40 ve 50ppm dozajlarda flokülasyon deneyi tekrarlanmıştır. Şekil 4.26’da verilen deney sonuçlarına göre 30ppm dozajın çökelme hızı en verimli olduğu anlaşılmaktadır.



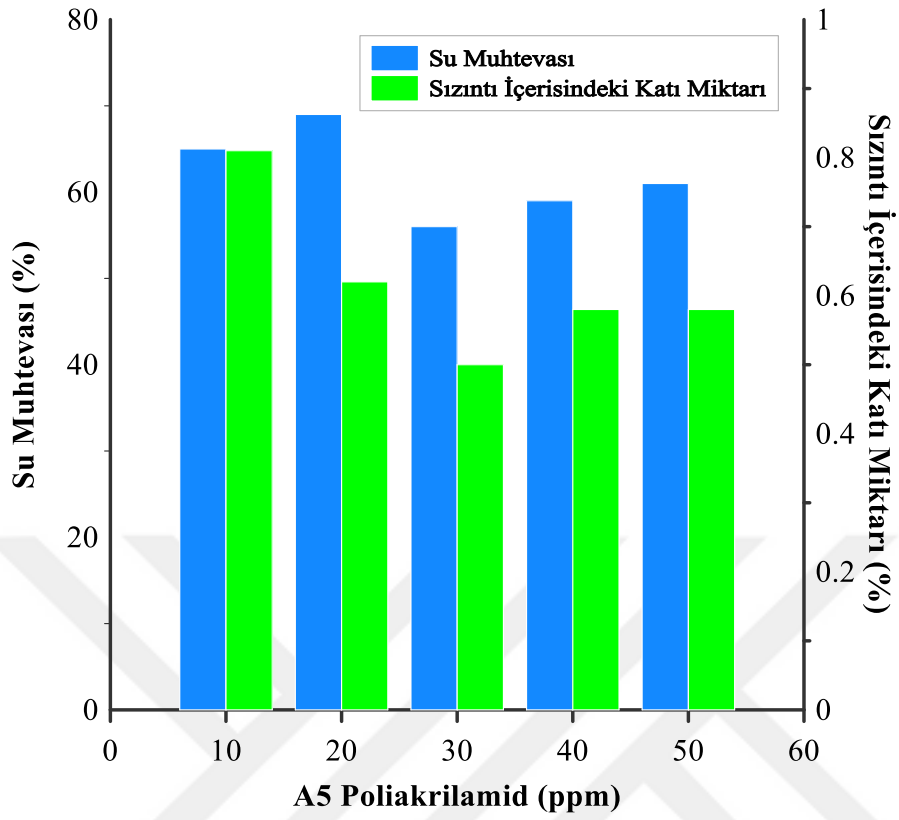
Şekil 4.26 : A5 poliakrilamidiyle kullanılarak yapılan flokülasyon deneyleri sonrasında ölçülen çökelme hızları ve bulanıklık değerleri.

4.2.3 Hızlı susuzlaştırma deneyi (RDT)

Maden atığının %10 katı oranıyla hazırlanan ve 0, 10, 20, 30, 40 ve 50ppm poliakrilamid eklenerek, hazırlanan süspansiyonlarının RDT deneyleri yapılmıştır. RDT’de kaydedilen zamana bağlı ağırlıkça sızıntı miktarı Şekil 4.27’de verilmiştir. Buna göre, poliakrilamid kullanılmadığında maden atığının granüler yapıda olmasından dolayı hızlı bir susuzlaşma meydana gelmektedir. Fakat sızıntı suyu içerisinde 500ml’lik karışımın içindeki toplam katı miktarının %13’ü geotekstilden geçmektedir. Toplam katı miktarının %87’si ise geotekstil üzerinde kalmaktadır. 10ppm poliakrilamid katkılı süspansiyonda flokülasyonun verimli olmadığı, 20ppm poliakrilamid katkılı süspansiyonda ise filtrasyon hızının düşük kaldığı gözlenmiştir. 30, 40 ve 50ppm poliakrilamid katkılı süspansiyonlarda flokülasyonun yeterli düzeye ulaştığı ve 30ppm dozajda susuzlaştırma hızının en yüksek olduğu tespit edilmiştir. RDT deneyi sonunda ölçülen filtre kekinin su muhtevası ve sızıntı suyuna geçen katı madde miktarları Şekil 4.28’de verilmiştir. Buna göre, filtre kekinin su muhtevasının ve sızıntı suyuna geçen katı madde miktarının düşük olduğu 30ppm dozajının optimum olduğu anlaşılmaktadır.

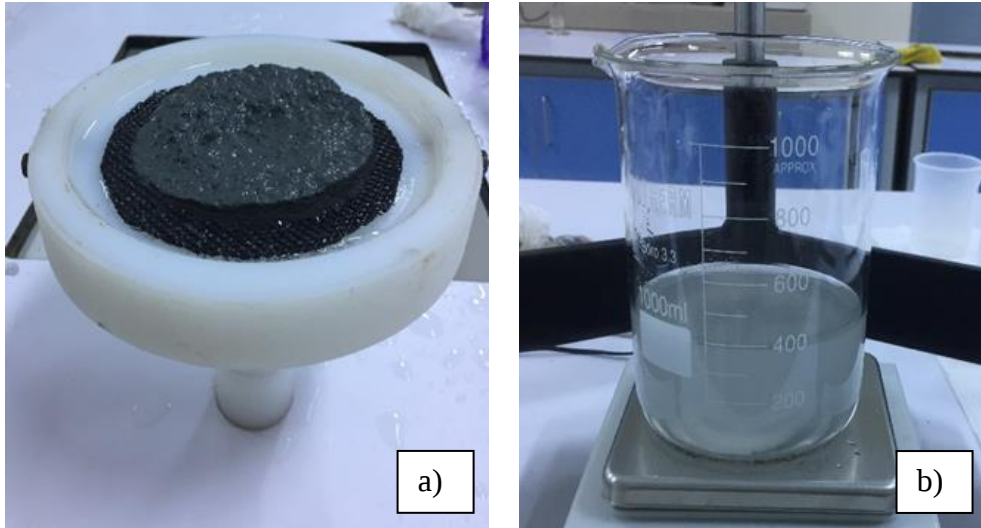


Şekil 4.27 : Maden atığının A5 poliakrilamid kullanılarak yapılan RDT sonucu.



Şekil 4.28 : RDT sonucunda oluşan filtre kekin su muhtevası - sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı yüzdesi.

Şekil 4.29’da deney sonunda meydana gelen filtre kek ve sızıntı suyunun görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.29 : RDT sonrası oluşan a) filtre keki ve b) sızıntı suyu görüntüleri.

4.2.4 Geotekstil t p susuzlaştırma deneyi (GDT)

GDT ile %10 katı oranlı poliakrilamid katkısız ve 30ppm A5 poliakrilamid katkılı hazırlanan maden atığı süspansiyonlarının susuzlaştırılabilirlikleri karşılaştırılmıştır. Deneyde kullanılan maden atığının permeabilitesinin yüksek olmasından dolayı geotekstil t p tek seferde aynı günde doldurulmuştur. GDT deneylerinde %10 katı oranına sahip maden atığı karışımlarının yastık tipi geotekstil t be dolumları katkısız için 570 lt, katkılı için 300 lt ile tek seferde tamamlanmıştır. Çizelge 4.6'da yapılan GDT'ye ait sonuçlar özetlenmiştir. Buna göre 30ppm A5 poliakrilamid kullanılarak yapılan deneyde kullanılan katı içeriğin neredeyse tamamı t p içerisinde tutulmuş, poliakrilamid katkısız göre sızıntı suyunun bulanıklığı %99.6 oranında giderilmiştir (şekil 4.26b). Dolum sonrası bir gün süre ile belirli aralıklara sızıntı hacimi ölçülmüştür. İlk 15 ve 1440 dakika içinde geçen sızıntı hacminin toplam dolum hacmine oranı sırasıyla katkısız maden atığı için %86.7 ve %86.8, katkılı maden atığı için ise %74.1 ve %76.8 olduğu, zamanla hacimce değişimin oldukça sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Geotekstil t p içerisinde tutulan maden atıklarının su muhtevalarındaki değişimine bakıldığında dolumu takip eden 1. gün, 2. gün, 3. gün ve 7. gün sonunda sırasıyla katkısız maden atığı için %15, %14.5, %14 ve %10.5, katkılı maden atığı için %29, %27, %24 ve %20 olarak zamanla azaldığı belirlenmiştir. Her iki karışım için de belirlenen su muhtevası değerlerinin RDT deneyleri ile bulunanlardan daha düşük çıktığı görünmüştür. RDT deneylerinde filtre kekinin su muhtevasının 5 dakika içerisinde alınmış olması ve RDT deneylerinde tek yönlü olan drenaj koşullarının GDT deneylerinde 3 yönlü olması sebebiyle bu beklenen bir sonuçtur. İncelenen tüm zaman dilimleri için GDT deneylerinde RDT deneylerindeki benzer bir şekilde katkılı maden atığının su muhtevası değerleri ince daneli malzemeleri de barındırması sebebiyle katkısız maden atığının su muhtevası değerlerine göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, susuzlaştırma ile tarama malzemesinin su muhtevastaki azalımın başlangıçtaki su muhtevasına oranı olarak tanımlanan Filtrasyon Verimliliği (Filtration Efficiency) değeri de poliakrilamid katkılı süspansiyonda %72 daha yüksek bulunmuştur (Moo-Young ve diğ, 2002). şekil 4.30'da GDT sonrası oluşan görüntüler verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonuçları.

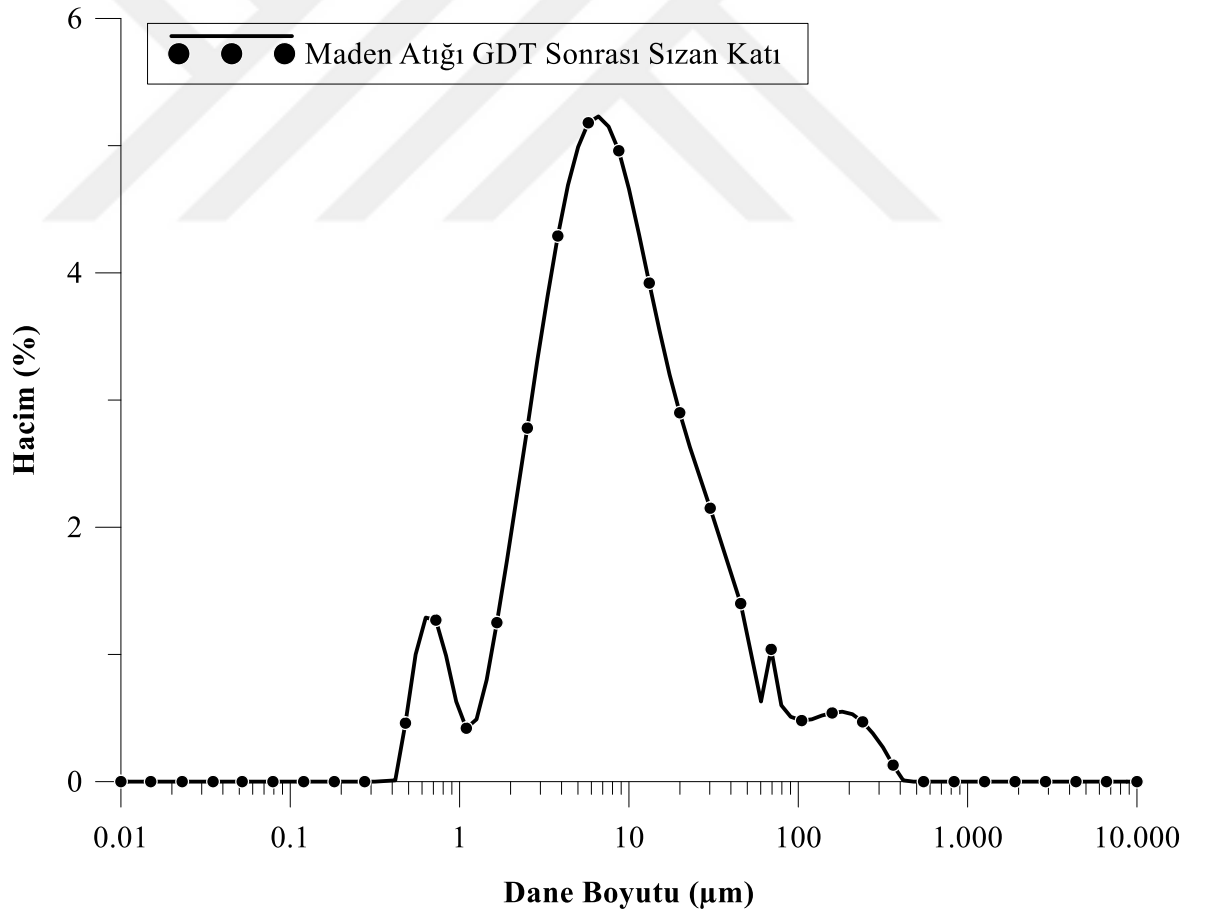
GDT Sonuçları	PAM Katkısız	PAM Katkılı
Toplam Dolum Yapılan Çamur Miktarı ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	570	300
Toplam Sızıntı Miktarı ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	495,0	230.3
Başlangıca Göre Sızan Katı Miktarı (%)	13.4	0.4
Türbilité (NTU)	39800	92
GDT Sonrası Katı Oranı (%)	87.7	83.3
Filtrasyon Verimliliği (%)	18.5	90.5



Şekil 4.30 : GDT sonucu a) katkısız b) katkılı görüntüleri.

Poliakrilamid katkısız GDT sonunda görülmüştür ki, kimyasal katkı kullanılmadan dolunda kullanılan maden atığının ağırlıkça %87'si tüp içerisinde tutulabilmektedir. Katı miktarının ağırlıkça %13'ü ise sızıntı suyuyla beraber konteynerde toplanmaktadır. Sızıntı suyuna geçen %13 oranındaki katı malzemenin dane boyutunu belirlemek için dane boyutu dağılımı ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.31). Grafikten anlaşılacağı üzere filtre için kullanılan geotekstil malzemenin açıklık çapı olan 43µm'den küçük malzemeler beklendiği gibi sızıntı suyuyla beraber geotekstil tüpün açıklıklarında sızmıştır.

Geotekstil tüp içerisinde tutulan bu malzemenin ham hali ile kullanılabilirliğinin araştırılması için mühendislik deneyleri yapılmıştır. Bunlar; standart proktor deneyi, Yaş Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi (CBR) ve kesme kutusu deneyidir. Ayrıca geotekstil tüpten sızarak konteyner içerisinde biriken %13'lük ince malzeme ile RDT yapılarak optimum poliakrilamid dozajı belirlenmiştir.



Şekil 4.31 : Maden atığı katkısız GDT sonrasında sızan katı malzemenin dane boyutu dağılımı.

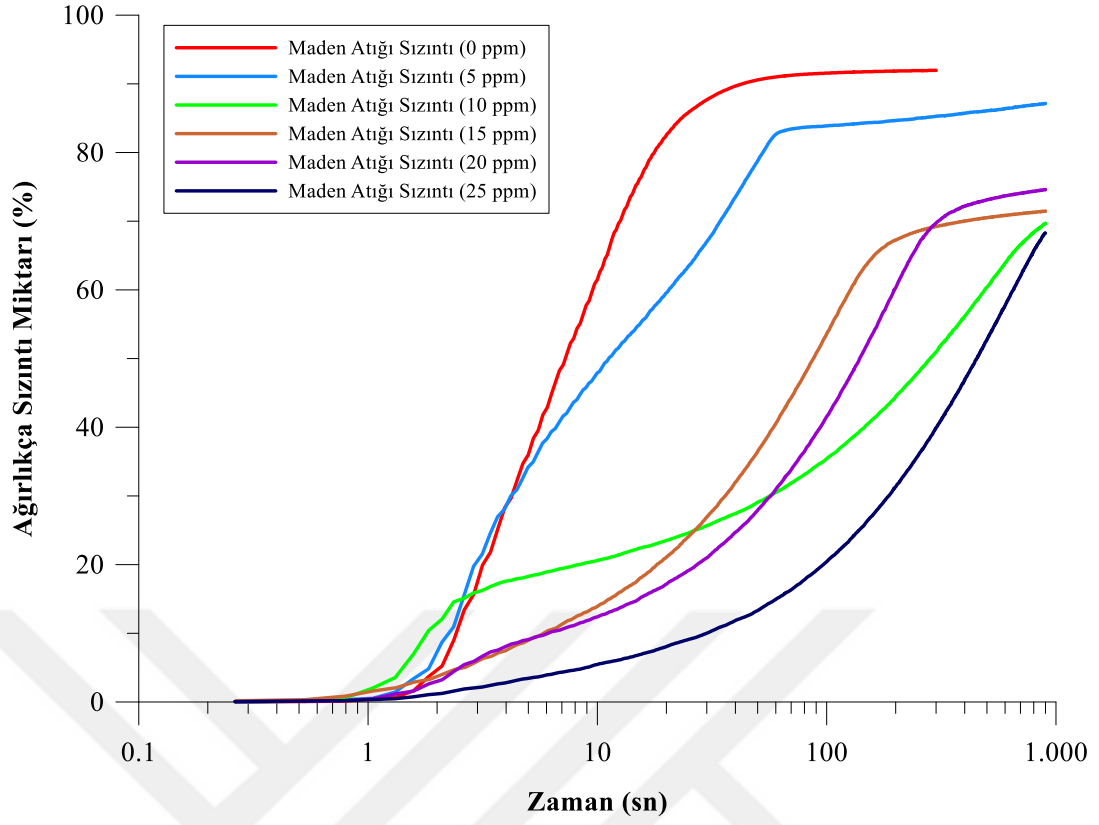
- ***Katkısız GDT Sonrası Oluşan Sızıntı Katı Malzemenin Optimum Poliakrilamid Dozajının Belirlenmesi***

Maden atığının poliakrilamid katkısız yapılan GDT deneyinde sızıntı suyuna geçen %13 oranındaki ince malzeme için uygun dozajın belirlenmesi amacıyla Hızlı Susuzlaştırma Deneyi (RDT) yapılmıştır. Deneylerde maden atığı için daha önce yapılan deneylerde belirlenen A5 poliakrilamidi kullanılmıştır. Deneylerde %10 katı oranında hazırlanan karışımlar kullanılmıştır. Daha sonra 0, 5, 10, 15, 20 ve 25ppm olarak farklı dozajlarda A5 poliakrilamidi kullanılarak RDT yapılmıştır. Poliakrilamid eklenerek yapılan denemede deney süresinin poliakrilamid kullanılmamasında 5 dakika diğer deneylerin tamamında 15 dakika olarak belirlenmiştir.

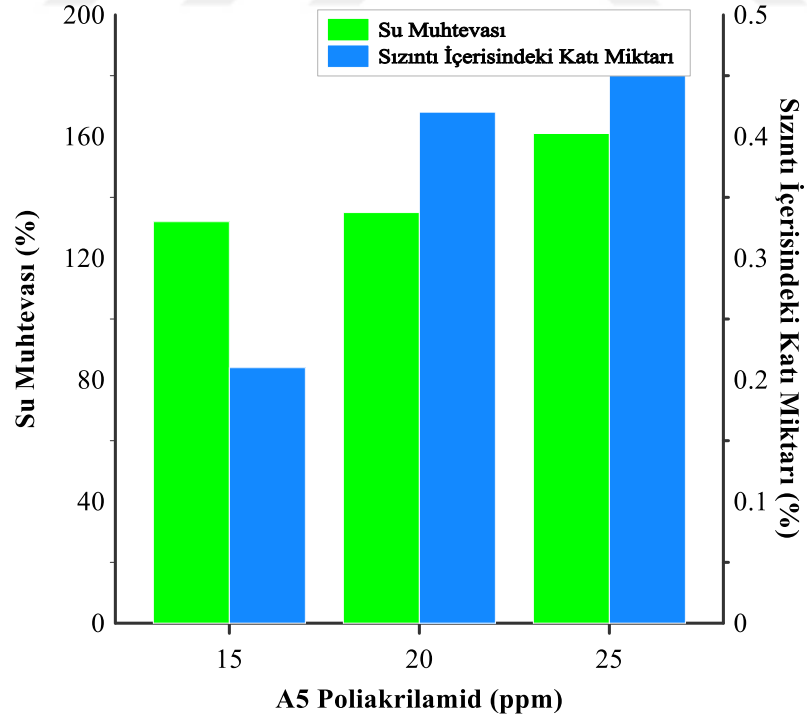
Şekil 4.32 'de gerçekleştirilen 6 farklı RDT sonucunda elde edilen sızıntı miktarının zamana bağlı değişimi görülmektedir. 0 ve 5ppm dozajlarda flokülasyon yeterli düzeyde olmamıştır. Bu yüzden yapılan filtre deneylerinde sızan suyun içerisinde geçen katı miktarı çok fazla olduğundan ağırlıkla sızan yüzdesi yüksek olmaktadır. 10ppm'lik dozajdan sonra ince malzemede yeterli topaklaşma meydana gelmiştir. Bunlar göz önüne alındığında grafikteki poliakrilamid katkısız ve 5ppm dozajına ait eğriler anlamlı değildir. 10ppm dozajda yapılan RDT sonrası flokülasyon oluşmuştur fakat susuzlaşma verimi çok düşük olduğundan filtre kekin su muhtevası ölçülememiştir.

Deney sonunda oluşan filtre kekin su muhtevası ve sızıntı suyun içindeki katı miktarı ölçülmüştür. Şekil 4.33'te bu iki değerinin farklı ppm değerlerinde hesaplanan değerleri verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 15ppm poliakrilamid dozajında hem su muhtevası değerinde hem de sızıntı içerisindeki katı miktarı yüzdesinde en düşük değerler hesaplanmıştır. İki grafik beraber düşünüldüğünde 15ppm dozalamanın en iyi sonucu verdiği ortaya çıkmaktadır. Maden atığı için A5 poliakrilamidi için başlangıçta belirlenen optimum dozajı 30ppm iken yeni durumda optimum dozaj 15ppm'e düşmüştür.

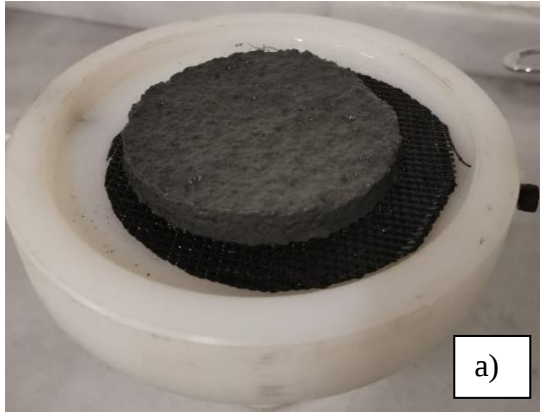
Şekil 4.34'de 15ppm poliakrilamid kullanılmasıyla yapılan deney sonunda meydana gelen filtre kek ve sızan su görüntüleri verilmiştir. Sızıntı suyunun bulanıklık değerine bakıldığında 52 NTU olarak ölçülmüştür. Maden atığının 30ppm dozaj uygulandığında sızıntı suyunun bulanıklık değeri 92 NTU olarak ölçülmüş iken bu değer 52 NTU'ya düşmüştür.



Şekil 4.32 : Maden atığının sızan katı kısmının A5 poliakrilamid kullanılarak yapılan RDT sonucu.



Şekil 4.33 : RDT sonucunda oluşan filtre kekin su muhtevası -sızıntı suyu içerisindeki katı miktarı yüzdesi.



Şekil 4.34 : RDT sonunda oluşan a) filtre kek ve b) sızıntı suyu görüntüleri.

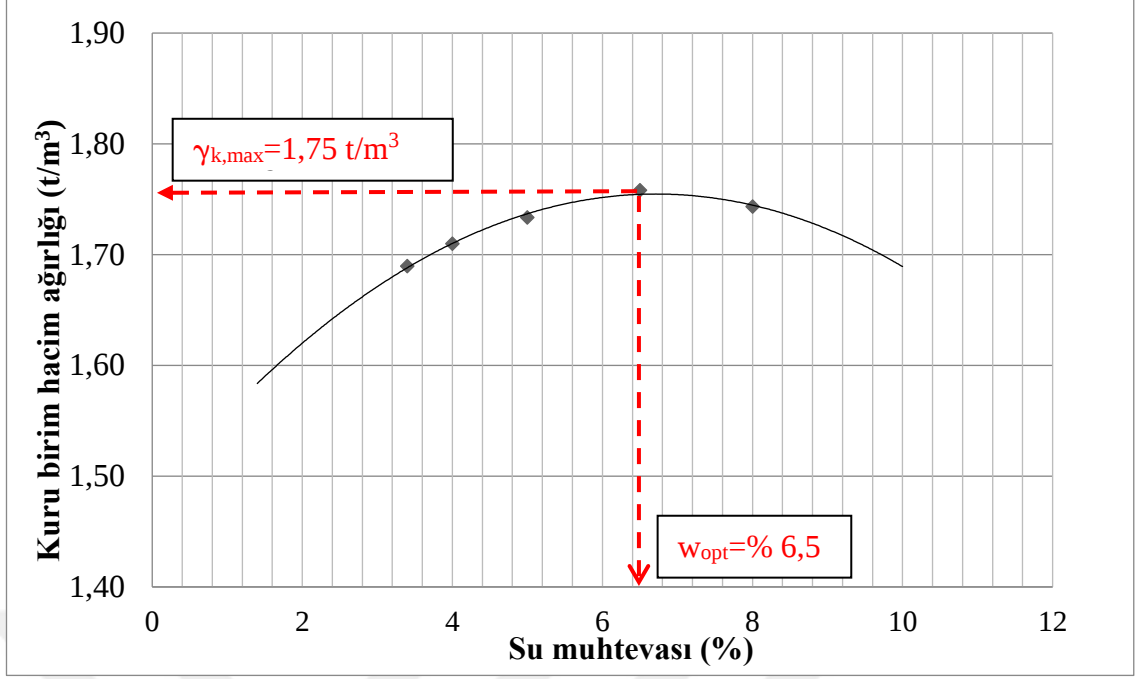
4.2.5 Mühendislik parametrelerinin belirlenmesi

4.2.5.1 Katkısız GDT sonrası oluşan filtre kekinin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi

Geotekstil susuzlaştırma deneyi sonrası tüp içerisinde oluşan ham malzemenin ilk olarak Standart Proktor Deneyi yapılarak maksimum kuru birim hacim ağırlığı ($\gamma_{k,mak}$) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri bulunmuştur. Daha sonra proktor sıkılığında hazırlanan numune üzerinde Yaş Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi (CBR) yapılarak şişme yüzdesi ve CBR değeri bulunmuştur. Son olarak poliakrilamid katkısız yapılan GDT sonrası tüp içerisinde kendi ağırlığı ile sıkışmış doğal durum için ve Proktor sıkılığında hazırlanmış numuneler için kesme kutusu deneyi yapılarak mukavemet parametre değeri olan kayma mukavemeti açısı (ϕ) bulunmuştur.

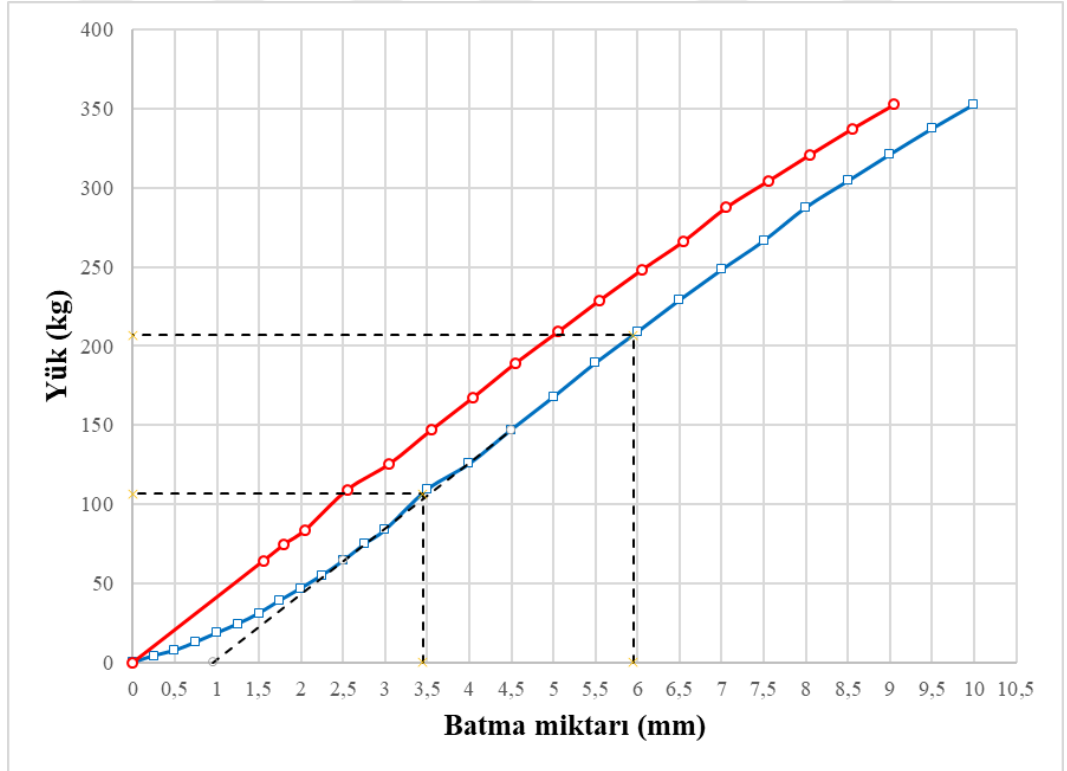
- **Standart Proktor Deneyi**

Standart Proktor deneyi, ASTM D698-12e1 standardına göre yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.35’de verilmiştir. Deney sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.755 t/m^3 ve optimum su muhtevası ise % 6.5 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.35 : Standart proktor deneyinin kuru birim hacim ağırlığı- su muhtevası grafiği.

- **Yaş Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi (CBR)**



Şekil 4.36 : Yaş CBR deneyinin yük – batma miktarı grafiği.

Yaş Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi (CBR), ASTM D1883-14 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Optimum su muhtevasında proktor sıkılığında hazırlanan numune ASTM D1883-14 standartta belirtilen 2.6 kPa sabit sürşarj yükü altında 3 gün su içerisinde bekletilmiştir. Herhangi bir şişmenin gerçekleşmediği numunede CBR deneyi %8 olarak ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.36'da verilmiştir.

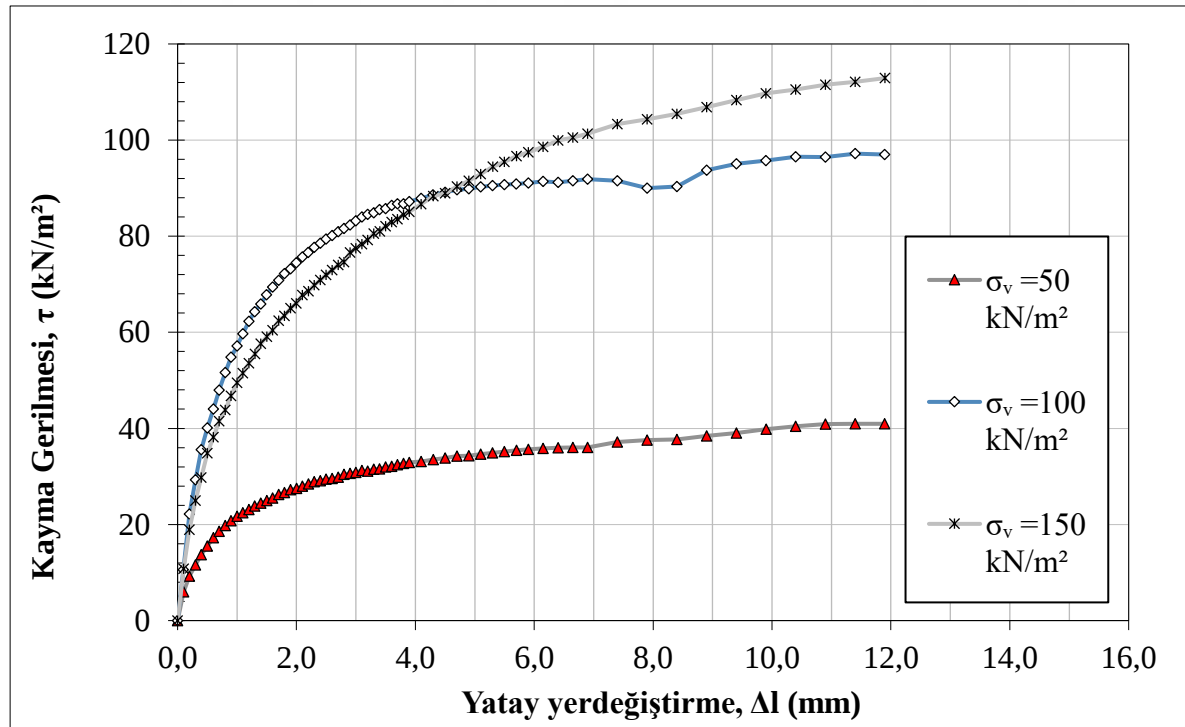
Şekil 4.36'da grafikte mavi renkte verilen eğri düzeltilmemiş CBR eğrisidir. Kırmızı renkte verilen eğri ise düzeltilmiş CBR eğrisidir.

- **Kesme Kutusu Deneyi**

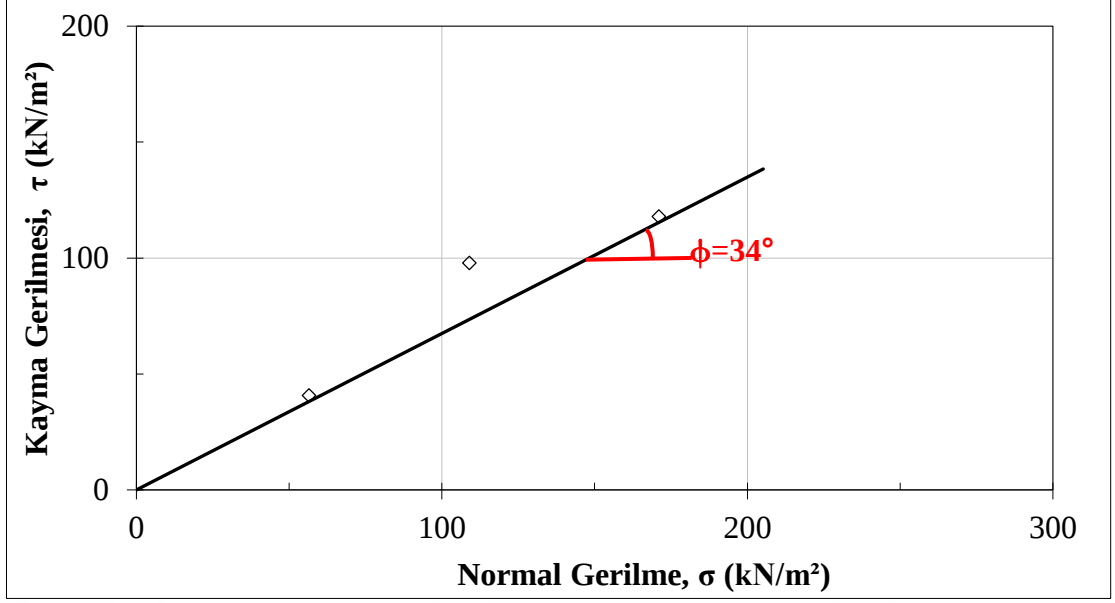
Poliakrilamid katkısız yapılan GDT sonrası oluşan filtre kekin mukavemet parametreleri kesme kutusu deneyi ile belirlenmiştir. Deneyler tüp içerisinde oluşan filtre kekin doğal durumundaki sıkılığı ve proktor sıkılığında olacak şekilde 2 farklı sıkılıkta yapılmıştır. Deney ASTM D6528-07 standardına göre ve İTÜ Geoteknik laboratuvarında bulunan otomatik kesme kutusu deney aleti kullanılarak yapılmıştır.

Doğal Sıkılıkta Yapılan Kesme Kutusu Deneyi

Yapılan deney sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.37 ve 4.38'de verilmiştir. Deney sonunda kayma mukavemet açısı $\phi=34^\circ$ olarak hesaplanmıştır.



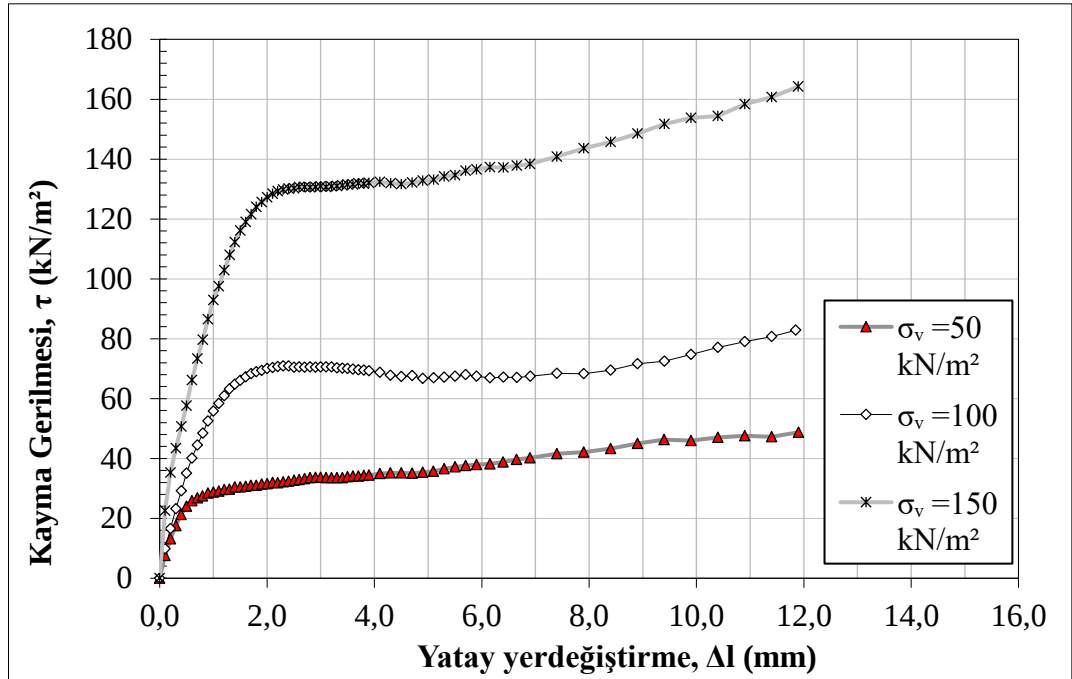
Şekil 4.37 : Kayma gerilmesi ve yatay yer değiştirme grafiği.



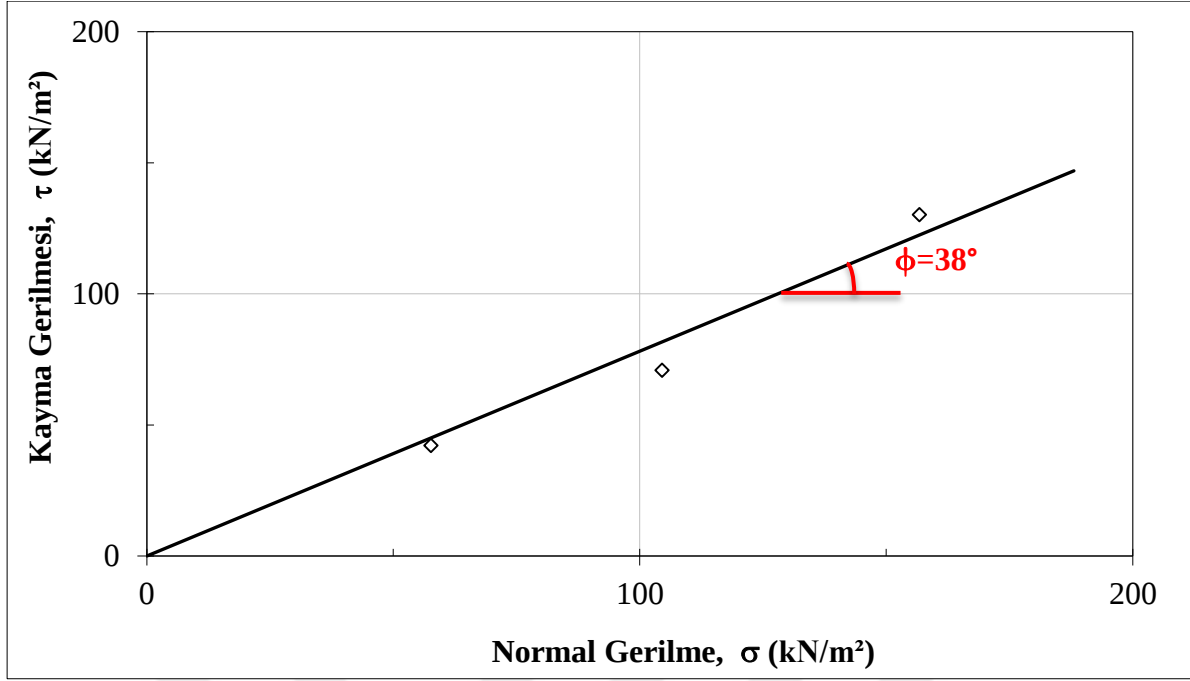
Şekil 4.38 : Kayma gerilmesi ve normal gerilme grafiği.

Proktor Sıkılığında Elde Edilen Numune ile Yapılan Kesme Kutusu Deneyi

Yapılan deney sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.39 ve 4.40’da verilmiştir. Deney sonunda kayma mukavemet açısı $\phi=38^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Proktor sıkılığında elde edilen numune ile yapılan deneyde elde edilen kayma mukavemet açısı doğal sıkılıkta yapılan deneyde elde edilen kayma mukavemet açısından beklendiği gibi büyük çıkmıştır.



Şekil 4.39 : Kayma gerilmesi ve yatay yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.40 : Kayma gerilmesi ve normal gerilme grafiği.

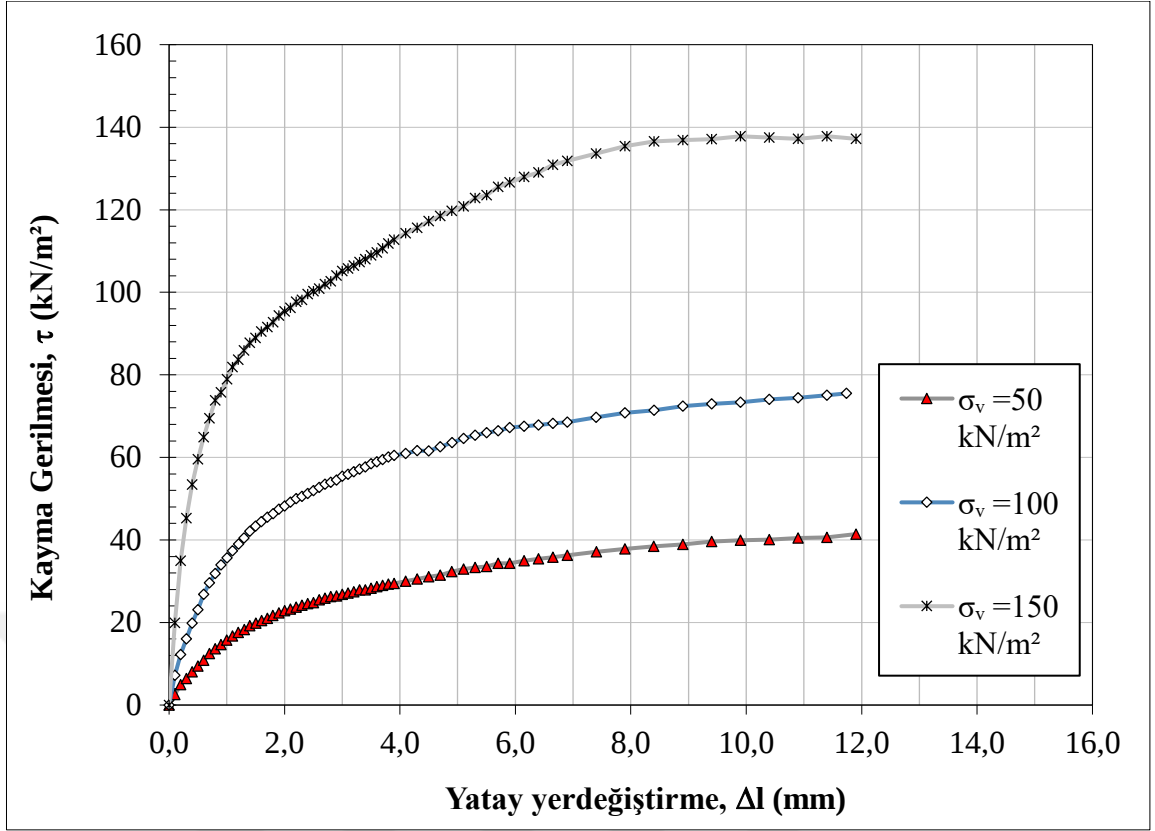
4.2.5.2 Katkılı GDT sonrası oluşan filtre kekinin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi

A5 poliakrilamidin 30ppm dozajla yapılan Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi sonrasında geotekstil tüp içerisinde oluşan filtre kekin mukavemet parametrelerini bulabilmek için kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

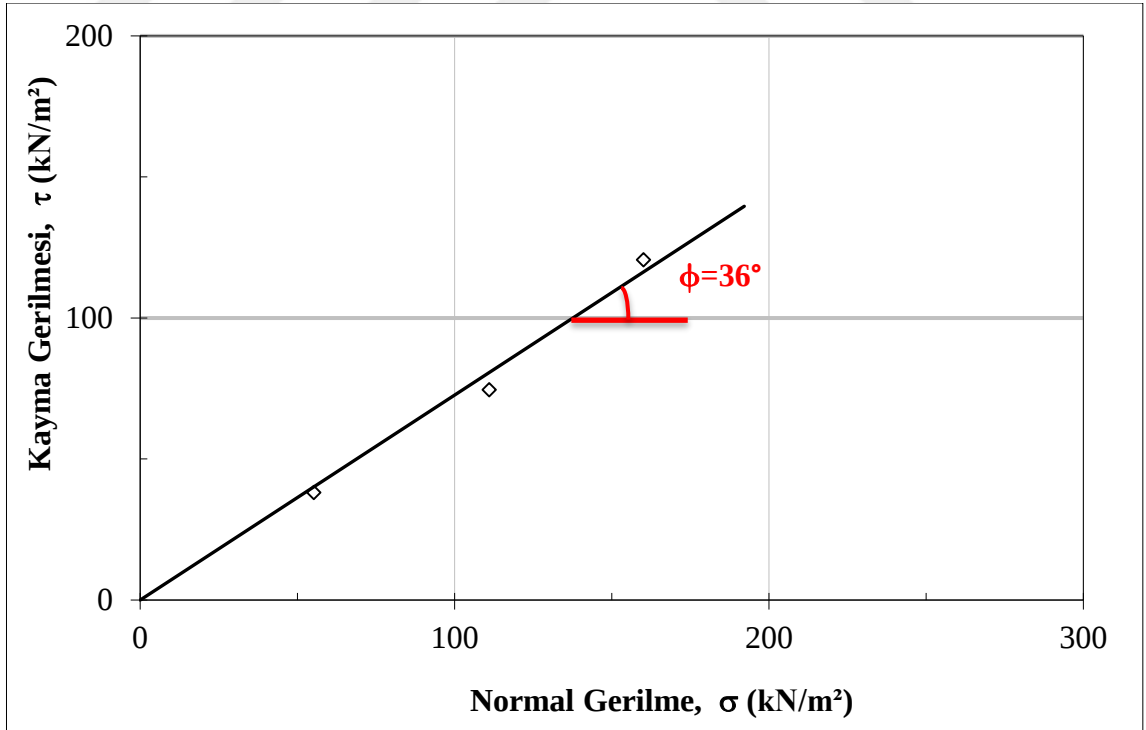
- **Kesme Kutusu Deneyi**

Deney sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.41 ve 4.42’de verilmiştir. Deney sonunda kayma mukavemet açısının $\phi=36^\circ$ olduğu hesaplanmıştır.

Poliakrilamid katkısız ve katkılı Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi sonunda tüp içerisinde bulunan filtre keklerin kayma mukavemet açıları sırasıyla $\phi=34^\circ$ ve $\phi=36^\circ$ ’dir. Poliakrilamid katkısız Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi sonunda tüp içerisinde bulunan filtre kekin Standart Proktor deneyinde bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17.5 kN/m³ ve optimum su muhtevası ise % 6.5 değerlerine göre hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneyi sonucunda kayma mukavemet açısı $\phi=38^\circ$ olarak bulunmuştur. Maden atığının kayma mukavemet açısının kumun kayma mukavemet açısı değerine yakın olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.41 : Kayma gerilmesi - yatay yer değıştirme grafiğı.



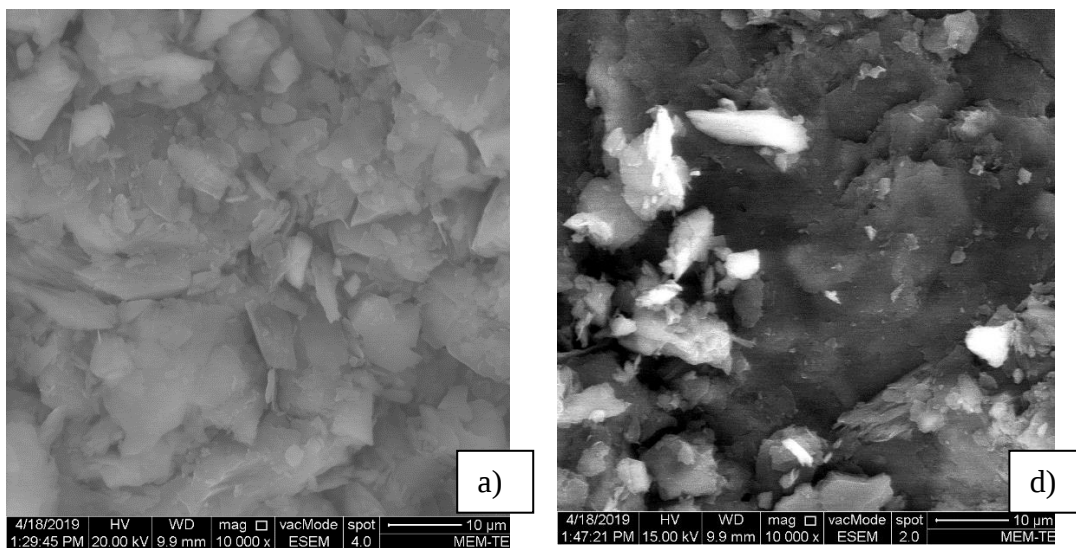
Şekil 4.42 : Kayma gerilmesi - normal gerilme grafiğı.

4.2.6 Morfolojik analiz

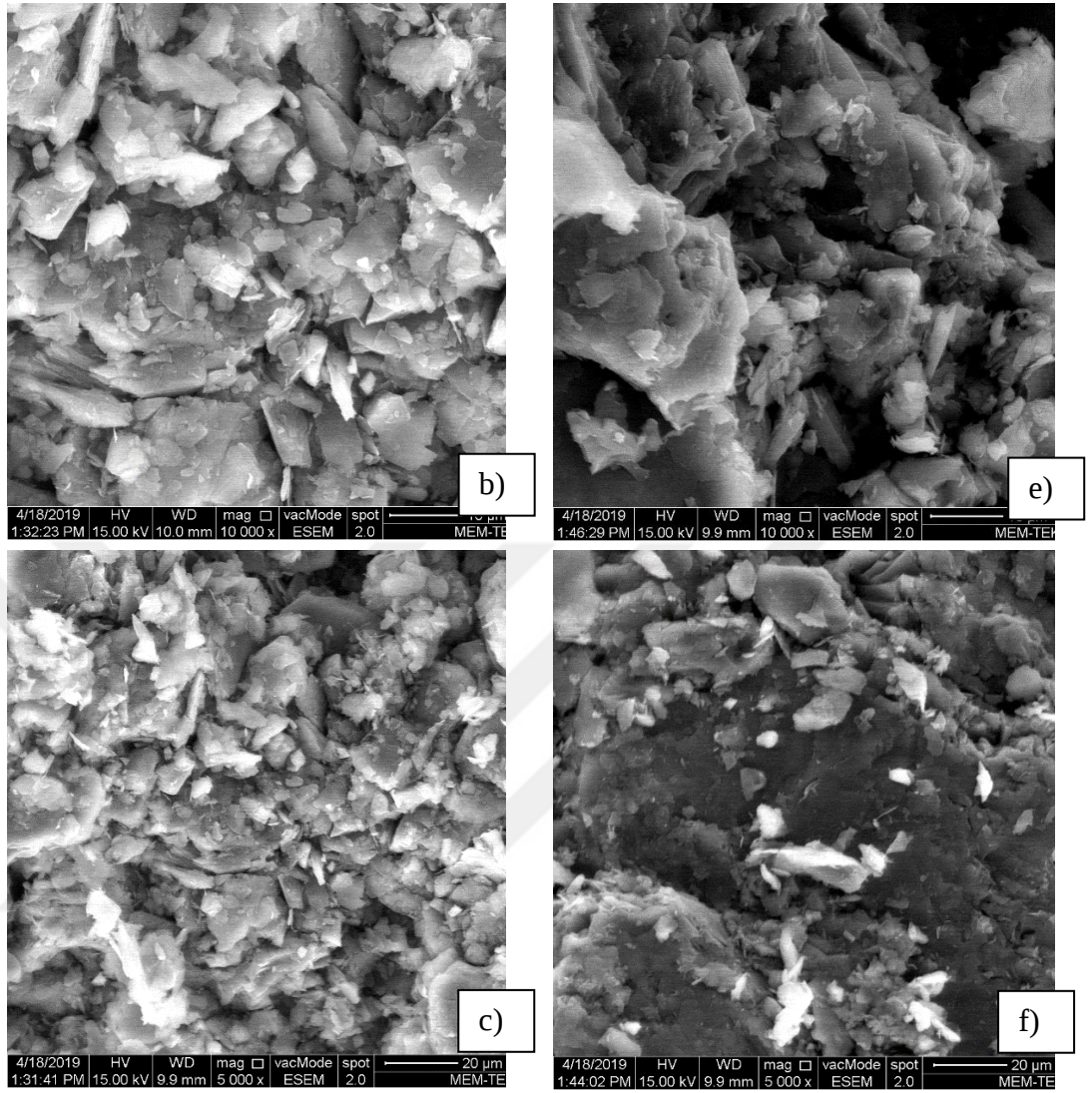
Poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı yapılan GDT sonrası oluşan filtre keklerinin morfolojik analizleri için Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Yayımlı X-Ray Spektroskopi (SEM-EDS) kullanılarak görüntü alınmıştır. Aynı zamanda elementel analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.43'de maden atığının poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı olarak SEM görüntüleri farklı büyüklüklerde verilmiştir. Çizelge 4.7'de poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı olarak yapılan analizler sonucunda maden atığına ait elementel analiz sonuçları verilmiştir.

SEM görüntüleri bakıldığında, Şekil 4.43b'da poliakrilamid kullanılmadan ve Şekil 4.43e'de ise poliakrilamid kullanılarak 10000 kat yaklaştırarak alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Bu iki görüntü karşılaştırıldığında poliakrilamid kullanıldığında danelerin yanyana gelerek topaklaşarak flok halinde yapılar oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 4.7'de maden atığının poliakrilamid katkısız ve poliakrilamid katkılı elementel analiz sonucu atom ağırlığı (W_T) cinsinden verilmiştir. Ca (Kalsiyum) elementinin atom ağırlığının yüzdesi poliakrilamid eklendikten sonra artış göstermiştir. Bu artış poliakrilamidin yapısında bu elementin bulunmasından dolayı olmaktadır. Bazı elementlerde atom ağırlıkları yüzdesinde küçük değişiklikler görülmektedir. Bu analizin yapıldığı bölgedeki yapıların yoğunluğunun değişiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.43 : Maden atığının a, b, c) poliakrilamid katkısız ve d, e, f) poliakrilamid katkılı SEM görüntüleri.



Şekil 4.43 (devam) : Maden atığının a, b, c) poliakrilamid katkısız ve d, e, f) poliakrilamid katkılı SEM görüntüleri.

Çizelge 4.7 : Maden atığının elementel analiz sonucu.

Element	PAM Katkısız	PAMKatkılı
	W _T (%)	W _T (%)
C	05.42	06.21
O	36.35	43.45
F	01.07	00.84
Na	00.83	00.38
Mg	04.75	01.81
Al	13.20	10.83
Si	24.84	24.88
K	01.73	01.33
Ca	00.68	05.80
Fe	11.12	04.86

W_T: Atom ağırlığı

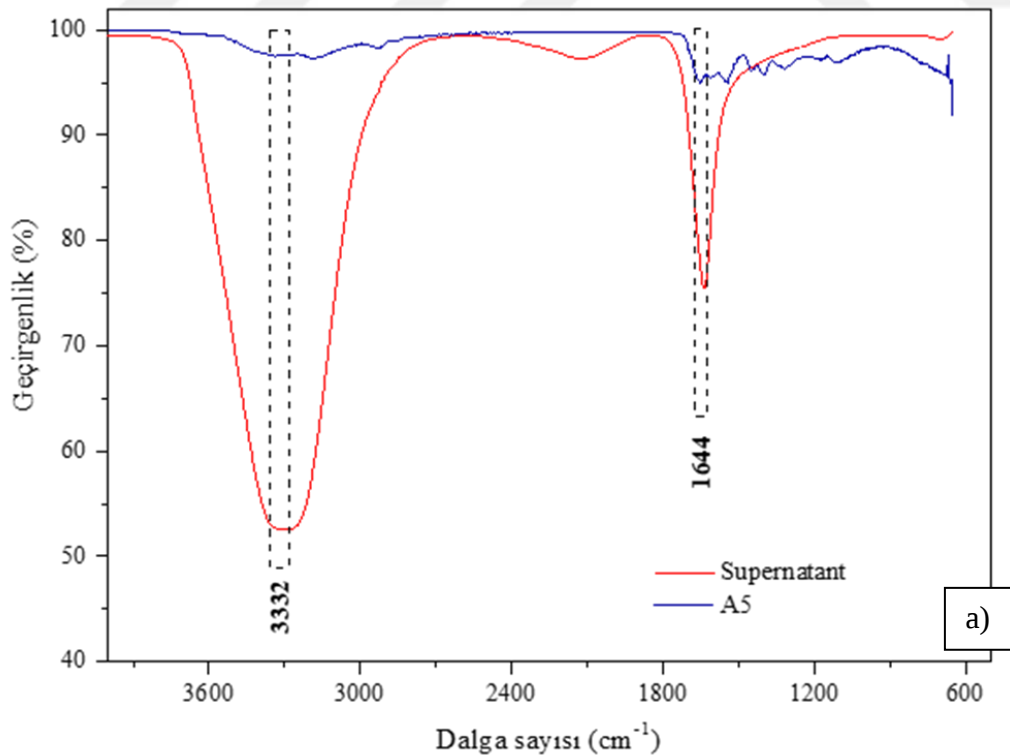
4.2.7 Kimyasal analizler

4.2.7.1 Fourier-dönüşümlü infrared spektroskopi (FTIR)

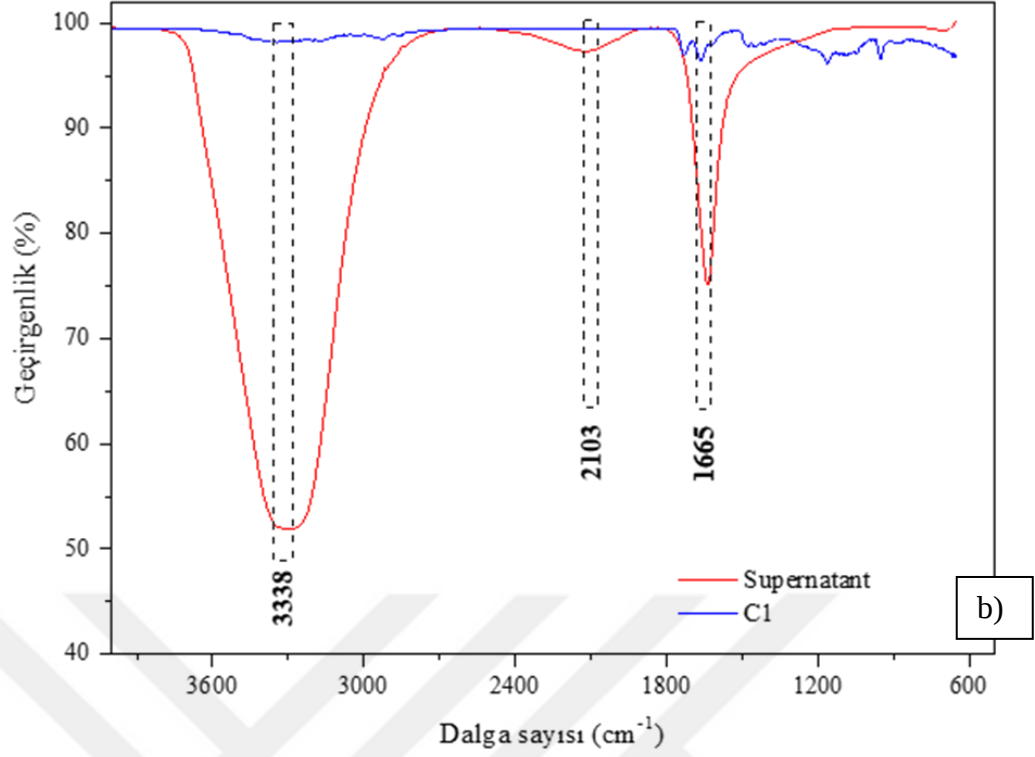
Çıkış suyunda poliakrilamid kalıntısını değerlendirmek amacıyla hem katyonik hem anyonik poliakrilamid ile FTIR analizi yapılmıştır. Maden atığı 30ppm dozajlı poliakrilamid ile çöktürüldükten sonra supernatant fazı ve çamur analiz edilmiştir.

Şekil 4.44’de hem anyonik hem katyonik poliakrilamid ile yapılan flokülasyon sonucu supernatant fazında sadece su piklerinin oluştuğu görülmüştür (3300-3450 cm^{-1} bandı ve 1650 cm^{-1} bandı). Poliakrilamid konsantrasyonu düşük ve suda seyreltik dağılmıştır. Bu durum sadece su piklerinin görünür olmasını açıklamaktadır.

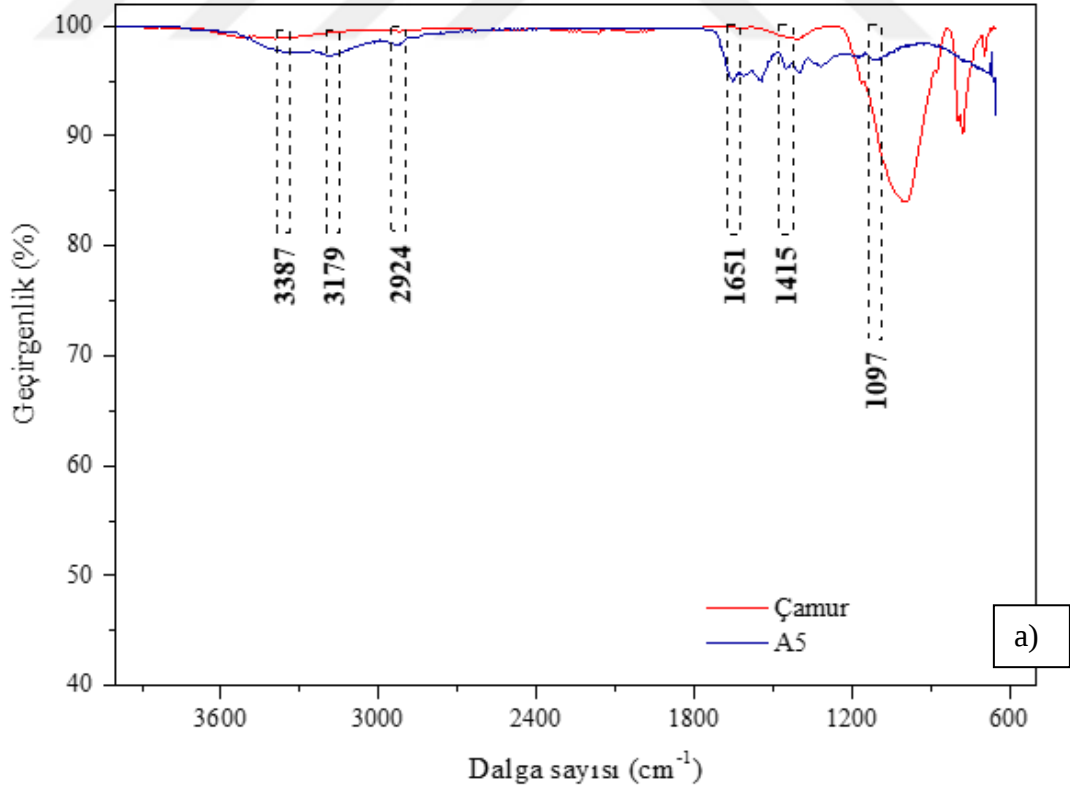
Maden atığının A5 ve C1 poliakrilamid ile yapılan flokülasyonu sonucunda çamur fazının FTIR spektrumu incelendiğinde her iki poliakrilamid de benzer piklerin çakıştığı görülmektedir (Şekil 4.45). Bu da iki poliakrilamidin çökmeye olumlu etkisi olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak maden atığı spekturumunda pik yoğunlukları daha fazla olmaktadır. Bu yüzden A5 poliakrilamidin çamur fazında daha fazla bulunduğu ve çökmeye daha verimli olduğu açıktır.



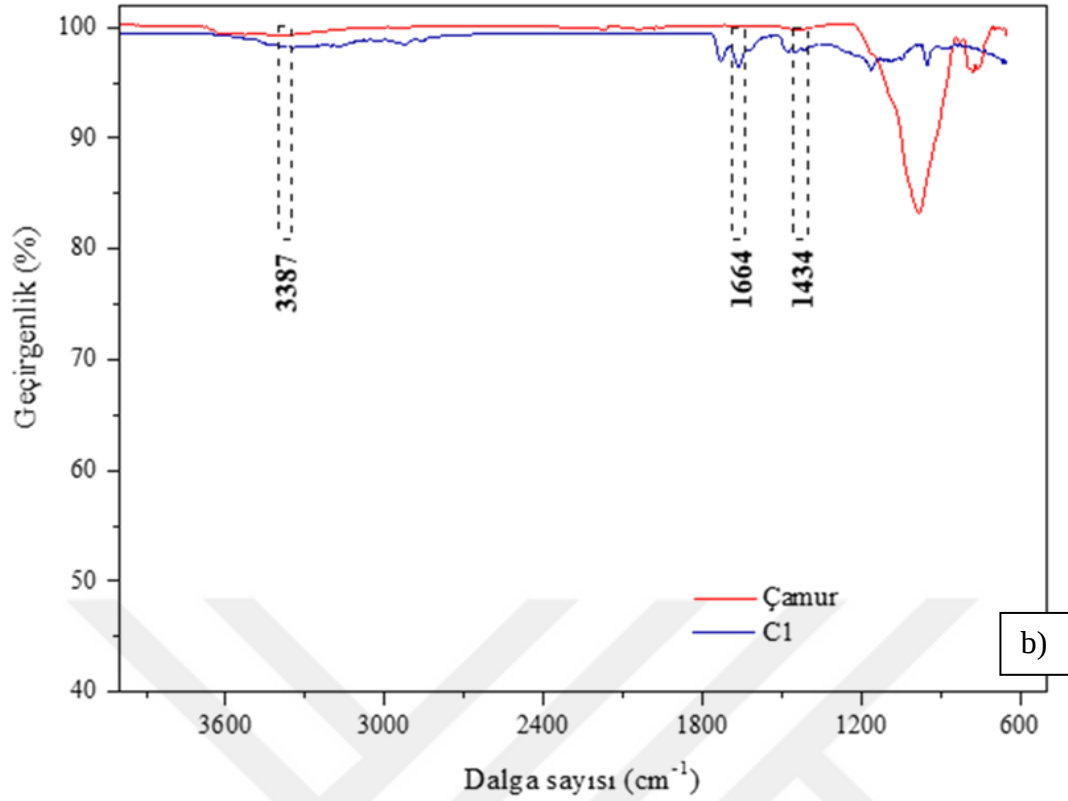
Şekil 4.44 : Maden atığının A5 ve C1 poliakrilamidleri ile yapılan flokülasyonunun supernatant fazın FTIR spektrumu.



Şekil 4.44 (devam) : Maden atığının A5 ve C1 poliakrilamidleri ile yapılan flokülasyonunun supernatant fazın FTIR spektrumu.



Şekil 4.45 : Maden atığının a) A5 ve b) C1 poliakrilamidleri ile flokülasyonunun çamur fazına ait FTIR spektrumu.



Şekil 4.45 (devam) : Maden atığının a) A5 ve b) C1 poliakrilamidleri ile flokülasyonun çamur fazına ait FTIR spektrumu.

4.2.7.2 Sızıntı suyunun analizi

Maden atığının susuzlaştırma işlemi sırasında geotekstil tüp ile poliakrilamidin birlikte kullanılması sırasında açığa çıkacak sızıntı suyunun çevresel risklerini belirlemek amacıyla sızıntı suyunun kalitesi incelenmiştir. Çalışılan su kalite parametreleri Çizelge 4.8’de özetlenmiş, belirlenen değerler Türk Standartları TS266 (TSE, 1997), Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO, 2004) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA, 2003) su kalite standartlarında verilen limit değerlerle kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Buna göre, geotekstil tüp sızıntı suyunun alıcı ortama deşarj edilmesi ile yeraltı suyuna sızma riski göz önüne alındığında sızıntı suyu değerlerinin ulusal ve uluslararası içme suyu standartlarıyla kıyaslanmıştır. Susuzlaştırılma işlemi sonunda oluşan sızıntı suyunun ulusal ve uluslararası kriterleri sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda sızıntı suyunun madencilik faaliyetinde proses suyu olarak da kullanılabilecek kalitede olduğu anlaşılmaktadır. Böylelikle, sızıntı suyunun proses suyu olarak kullanılması madencilik faaliyetleri açısından işletmelere çevresel ve ekonomik olarak büyük kazanımlar sağlayacaktır.

Çizelge 4.8 : Filtre sızıntı suyunun su kalitesi parametreleri ve standartlar.

Parametreler	Birim	Sızıntı suyu	EPA	TS 266	WHO
pH		6.8	6.5-8.5	6.5-9.5	6.5-8.0
Flor (F)	mg/L	0.110	2	1.500	1.500
Klorür (Cl)	mg/L	41.610	250	250	250
Nitrit (NO ₂)	mg/L	< 0.050	4.5	-	3
Nitrat (NO ₃)	mg/L	2.790	45	50	50
Sodyum (Na)	mg/L	34.010	-	200	200
Amonyum (NH ₄)	mg/L	0.530	-	0.500	1.500
Demir (Fe)	mg/L	-	0.300	0.200	0.300
Mangan (Mn)	mg/L	0.022	0.050	0.050	0.100
Nikel (Ni)	mg/L	0.001	-	0.020	0.020
Bakır (Cu)	mg/L	-	1	2	2
Çinko (Zn)	mg/L	0.002	5	-	3
Antimon (Sb)	mg/L	-	0.006	0.005	0.020
Kadmiyum (Cd)	mg/L	0.003	0.005	0.005	0.003
Krom (Cr)	mg/L	0.015	0.100	0.050	0.050
Kurşun (Pb)	mg/L	0.007	0.015	0.500	2
Selenyum (Se)	mg/L	0.008	0.050	0.010	0.010
Arsenik (As)	mg/L	-	0.010	0.010	0.010

- : Bulunmadığını göstermektedir

4.2.8 Sonuçların değerlendirilmesi

%10 katı oranıyla çalışılan maden atığı numunelerinde pH 7.3 ortam değerinde zeta potansiyel değeri -19.7mV olarak ölçülmüştür. Maden atığının susuzlaştırılması sonucunda oluşacak sızıntı suyunun maden sahasında proses suyu olarak kullanılması planlanmıştır. Bu yüzden susuzlaştırma araştırmasına maden atığının doğal pH değeri ile devam edilmesine karar verilmiştir.

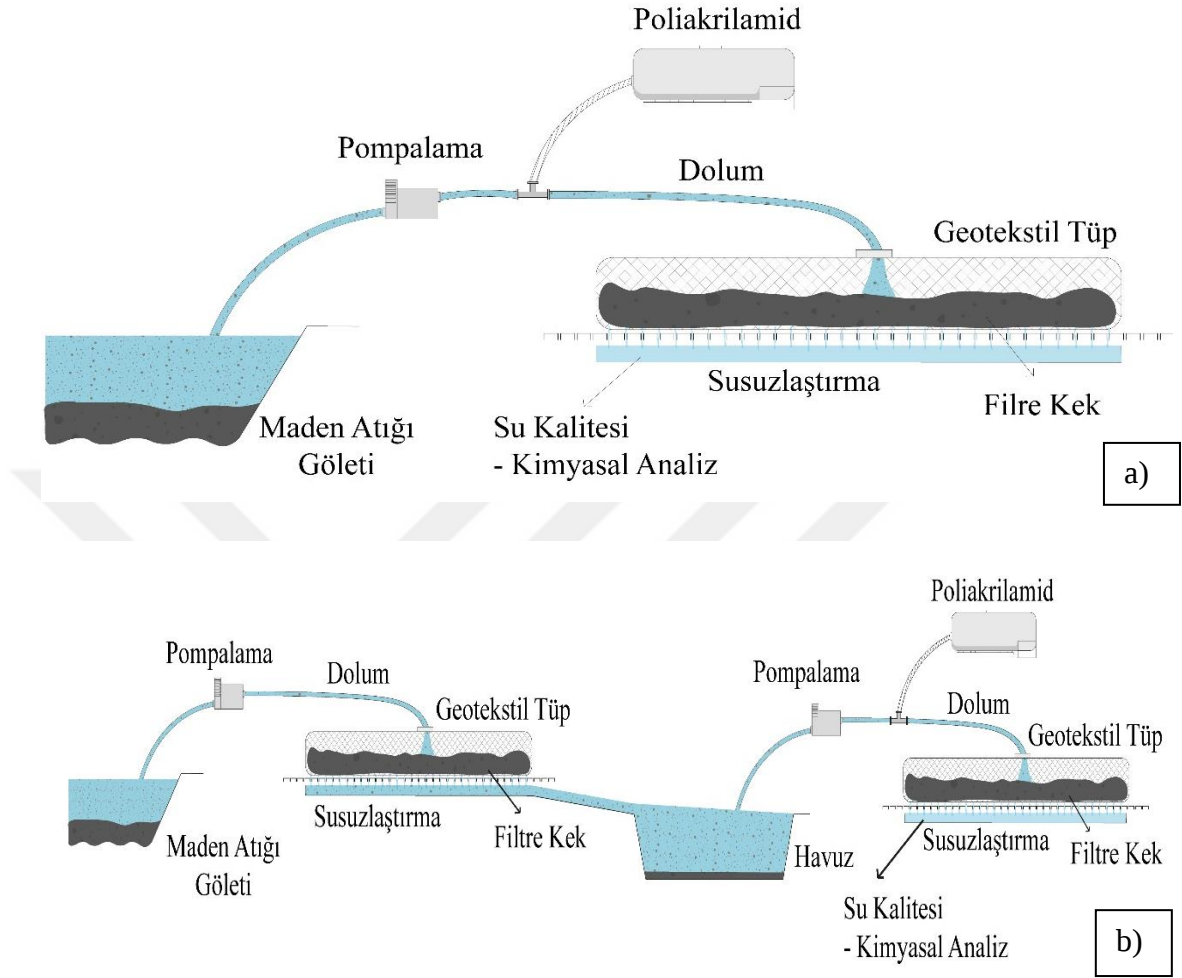
Çalışmada maden atığının %10 katı oranıyla hazırlanan karışımları kullanılmıştır. Yapılan flokülasyon deneylerinde anyonik poliakrilamid olan A5 poliakrilamidinin 30ppm dozajında en etkili sonucu verdiği 10 dakika gibi kısa bir süre sonunda bulanıklık değerinin 43NTU'ya (%99.9 verimlilik) kadar düştüğü görülmüştür. Susuzlaştırmada kullanılacak olan geotekstil malzeme ve seçilen poliakrilamidin

uygunluğu RDT deneyleri ile test edilmiştir. Geotekstilden geçen sızıntı suyu içerisindeki katı maddelerin dane çapı dağılımına bakıldığında geotekstilin görünür açıklık boyutu (AOS) değeri ile uyumlu sonuç vermiştir. Maden atığının RDT deneylerinde filtre kekinin oluşması ile sızıntı suyunun çıkış hızında ani bir düşüş olduğu gözlenmiş, 0.43mm dane çapının altındaki tüm danelerin geotekstilden geçmediğı anlaşılmıştır. Bu sayede katkısız maden atığının ağırlıkça %87'si geotekstil içinde tutulabilmiştir. 30ppm dozajlı A5 poliakrilamidinin kullanılmasıyla bu oran %99.5'e kadar yükseltilmiştir. 3 boyutlu filtrasyon koşullarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen GDT deneylerinde yastık tipi geotekstil içerisine katkısız maden atığı ile 570 litre, kimyasal katkılı olan ile ise 300 litre dolum yapılabilmiştir. Sızıntı suyuna geçen katı madde miktarı açısından GDT deneylerinde RDT deneyleriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. GDT deneylerinde filtre keklerinin su muhtevaları RDT deneyleri ile belirlenenden daha düşük bulunmuştur. Bunun nedeninin RDT deneyindeki tek boyutlu filtrasyonun GDT deneylerinde 3 boyutlu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Her iki deneyde de filtre kekinin su muhtevaları katkı kullanılan karışımlarda ince daneli malzemeleri de içermesinden dolayı katkısız olan maden atığına göre daha yüksek bulunmuştur.

Susuzlaştırma çalışmaları sırasında filtre kekinin yeterince susuzlaştırılması ve sızıntı suyuna mümkün olduğunca az katı maddenin geçmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada agrega maden atığının susuzlaştırma işlemlerini optimize etmek amacıyla iki aşamalı geotekstil ile susuzlaştırma alternatifi üzerinde çalışılmıştır. Katkı kullanılmayan maden atığında geotekstil tüp içerisine daha fazla dolum yapılabilmesi ve filtre kekinin daha düşük su muhtevalarına sahip olması sebebiyle birinci aşamada susuzlaştırma katkısız gerçekleştirilecektir. Sızıntı suyu içerisine geçebilecek katı madde miktarının alıcı ortama deşarj edilmeden önce tutulabilmesi için katkı kullanarak yine geotekstil tüp içerisinde susuzlaştırılacaktır. Böylece ekonomik ve çevresel kazanımlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

Öncelikle maden atığının katkısız geotekstil ile susuzlaştırılması ile sızıntı suyuna geçen katı madde için uygun poliakrilamid dozajı belirlenmiştir. Bu kapsamda GDT deneylerinde sızıntı suyu içerisine geçen katı madde miktarı kullanılmıştır. Filtre keklerinin su muhtevaları ve sızan katı miktarları da dikkate alındığında 15ppm'lik dozajın optimum dozaj olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.30). Bu sonuç poliakrilamidin

önceki susuzlaştırma alternatifi için belirlenen 30ppm dozajına göre daha efektif kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.46 : Susuzlaştırma alternatifleri a) Tek geotekstil tüplü seçenek b) Çift geotekstil tüplü seçenek.

Tüm bu bilgiler ışığında susuzlaştırma çalışmasının arazide 2 seçenek oluşturarak yapılabileceği düşünülmektedir. Birinci seçenek atığın atık gölünden alınıp kimyasal katkı eklenerek geotekstil tüpte susuzlaştırmasının yapılmasıdır (Şekil 4.46a). İkinci seçenek ise atık gölünden ilk alındığında kimyasal katkının kullanılmaması ve tüpten sızan %13'lük katı kısmın bir havuzda biriktirilmesi ve daha sonra bu havuzdan pompa yardımıyla çekilen çamura kimyasal katkı kullanarak geotekstil tüpte susuzlaştırmasının yapılmasıdır (Şekil 4.46b).

İkinci seçeneğin uygulanmasında hem maliyeti düşürmesi hem de ilk aşamada tüp içerisinde biriken atık malzemenin faydalı kullanım alternatiflerinin belirlenmesi açısından katkısız olması ve su muhtevasının daha düşük olması gibi avantajları vardır. Bu seçenekle yaklaşık %93 oranında daha az kimyasal madde tüketimi

sağlanmaktadır. Bu durum çevresel ekosistemin korunması açısından büyük bir fayda sağlayacaktır. Buna ek olarak, geotekstil tüp hacminin yaklaşık %40 oranında daha fazla kullanılması imkânı da vardır.

Su geri kazanımı her sektörde olduğu gibi maden sektöründe de büyük önem arz etmektedir. Su madenin en yakınındaki alıcı ortamdan çekilmektedir. Yapılan susuzlaştırma işleminde sızıntı suyunun alıcı ortama deşarjı ile madencilik faaliyetlerinde kullanılacak su geri kazanılmış olmaktadır. Ulusal ve uluslararası standartlarla yapılan kıyaslamaya göre suyun içme suyu kalitesine yakın olduğu belirlenmiştir.





5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının geotekstil tüp ile susuzlaştırılması ve geoteknik mühendisliği açısından değerlendirilmesi amaçlanarak araştırmalar yapılmıştır. İlk olarak Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının endeks özellikleri bulunmuştur. Her iki malzeme için de zeta potansiyeli araştırması yapılmış ve daha sonra 13 farklı poliakrilamid içerisinde en etkili katı-sıvı ayrımını sağlayan poliakrilamid ve optimum dozaj bulunması için Jar deneyleri yapılmıştır. Hızlı Susuzlaştırma deneyi ve Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyleri gerçekleştirilerek seçilen geotekstil ile Haliç dip tarama çamurunun ve maden atığının susuzlaştırma performansları araştırılmıştır. Mühendislik deneyleri ile susuzlaştırılan malzemelerin geoteknik mühendisliği bakımından değerlendirilmesi yapılmıştır. Kimyasal analizler yapılmış ve susuzlaştırma sonunda oluşan ürünlerin çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Haliç dip tarama çamuru ve maden atığı için elde edilen sonuçlar ilk olarak Haliç dip tarama çamuru için daha sonra maden atığı için maddeler halinde verilmiştir.

Haliç dip tarama çamuru için elde edilen sonuçlar;

- Farklı pH'larda yapılan elektrokinetik potansiyel ölçümlerinde bütün pH değerlerinde negatif yüzey elektrik yükü ve doğal pH'da (7) -10 mV'luk bir zetapotansiyel değeri tespit edilmiştir. Elektrokinetik potansiyel pH'dan bağımsız olup değişmemekte ve dolayısıyla flokülasyon için her pH değerinde çalışmak mümkün olmaktadır. Böylelikle susuzlaştırma deneylerini malzemelerin doğal pH değeriyle yapılmasının daha uygun olduğuna karar verilmiştir.
- Yapılan flokülasyon deneylerinden Haliç tarama çamuru için anyonik poliakrilamidlerin katyonik poliakrilamidlere göre daha etkili katı - sıvı ayrımı performansı verdiği görülmüştür. Aynı zamanda uygun poliakrilamid seçimi yapılırken birden çok poliakrilamid denemek gerektiği anlaşılmaktadır. 11 tane anyonik poliakrilamid deneylerde kullanılmış olup her bir poliakrilamidin farklı verimde sonuç verdiği anlaşılmıştır. Fakat düşük yük aktivitesi ve yük

molekül ağırlığına sahip anyonik poliakrilamidlerin etkili katı-sıvı ayrımı sağlamadığı anlaşılmıştır.

- A4 poliakrilamidin 30ppm dozaj uygulaması ile bulanıklık değeri karıştırma işlemi sonundan 10sn gibi kısa bir süre sonrasında 121 NTU (%99.7 verim) değerine kadar düşmüştür. Optimum dozajın üzerindeki dozajlarda ise bulanıklık değeri yükselmiştir.
- Partikül ölçümlerinde A4 poliakrilamid için en büyük flok ölçümü optimum dozaj olan 30 ppm de gerçekleşmiş ve flokların yaklaşık %94'ünün $45\mu\text{m}$ 'den büyük olduğu görülmüştür. Optimum dozaj üzerindeki dozajlarda flok boyutları önemli bir değişim göstermemiştir.
- Poliakrilamid katkılı yapılan GDT sonrası sızıntı suyunun bulanıklık değeri 92 NTU (99.7% verim)'ya düşmüştür. Poliakrilamid katkısı kullanıldığında tüp içerisinde oluşan filtre kekin katı oranı %12'den %54'e yükselmiştir. Filtrasyon verimlilik değeri de %49.4'ten %99.2'e çıkmıştır.
- Poliakrilamid katkılı tarama çamur numunelerinin Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonrası konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen kayma mukavemeti değeri yaklaşık 45 kPa olarak elde edilmiştir. Haliç dip tarama çamurunun likit limit değerinin %59 olarak bulunmuştur. Üç eksenli basınç deneyinde kullanılan numunelerin yaklaşık su muhteva değerlerinin %100 olduğu bilinmektedir. Bu yüzden deney sonu numunelerin 22.5 kPa civarında mukavemet göstermesi bize poliakrilamidlerin uygulandığı malzemelerin su tutma kapasitesini artırdığını göstermektedir..
- Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonunda oluşan çıkış suyunun kimyasal analizi incelendiğinde insan kaynaklı (antropojenik) kirliliğin azaldığı belirlenmiştir.
- Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonunda küçük danelerin bir araya gelerek oluşturduğu topaklaşma ve boşlukların lokalize olduğu SEM-EDS analizi ile görüntülenmiştir.
- Geotekstil tüp içerisinde ön susuzlaştırma işlemi sonrası tarama çamur malzemesinin ek yüklemelere maruz bırakılması durumunda, incelenen $12.5 \text{ kN/m}^2 \sim 800 \text{ kN/m}^2$ gerilme aralığı için sıkışabilirliğin sırasıyla %18~%52 ve geçirgenliğin 10^{-7} - 10^{-11} m/s aralığında değiştiği görülmüştür.

Tarama çamur dolgulu geotekstil tüplerin önyüklemeye ile iyileştirilebileceği ve sedde imalatlarında kullanılabileceği öngörülmektedir.

- Fourier-Dönüşümlü Infrared Spektroskopisi (FTIR) spektrumları incelendiğinde A4 poliakrilamidinin 30 ppm optimum dozajının kullanıldığında poliakrilamidlerin tamamen çamur fazında (filtre keki) bloke olduğu ve çıkış suyunda bulunmadığı tespit edilmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı sedde geometrileri için pilot çalışmaların devam ettirilmesi ve geoteknik alanda susuzlaştırılmış dip tarama çamurlarının kullanım alanlarının araştırılması ekonomik ve çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlayacaktır. Aynı zamanda farklı yöntemlerle yapılan susuzlaştırma işlemleri arasında maliyet analizi karşılaştırılması yerinde olacaktır. Ayrıca, organik içeriği fazla olan sedimentlerin bu yöntemle susuzlaştırılmasının önem kazanacağı düşünülmektedir.

Maden atığı için elde edilen sonuçlar;

- Literatürde maden atığının susuzlaştırılmasında geotekstil tüp kullanımı oldukça sınırlıdır. Bu çalışma ile maden atığının susuzlaştırılması geotekstil tüplerin etkili bir yöntem olarak kullanılabileceği gösterilmektedir.
- Yapılan flokülasyon deneylerinde maden atığı için anyonik poliakrilamidler katyonik poliakrilamidlere göre daha iyi flokülasyon etkinliği göstermiştir.
- Hızlı Susuzlaştırma deneyi (RDT) ve Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar birbirini doğrular niteliktedir.
- Poliakrilamid katkısız numunenin Geotekstil tüp susuzlaştırma deneyi (GDT) dolumu için %10 katı oranına sahip 570 lt karışım kullanılmıştır. Dolum sırasında kullanılan katı atık malzemesinin ağırlıkça %87'si tüp içerisinde kalırken %13'lük kısmı ise sızıntı suyuna geçmektedir.
- Tüp içerisinde tutulan katı atık malzemenin dolgu malzemesi olarak kullanımının değerlendirilmesi amacıyla Proktor deneyi, yaş CBR deneyi ve kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Proktor deneyi sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17.5 kN/m^3 ve optimum su muhtevası ise %6.5 bulunmuştur. Yaş CBR deneyi sonunda herhangi bir şişmenin gerçekleşmediği numunede CBR deneyi %8 olarak ölçülmüştür. GDT deneyi

sonrası t p içerisinden alınan örselenmemiş numunenin kesme kutusu deneyinde kayma mukavemet açısı $\phi=34^\circ$, Proktor sıklığında yapılan kesme kutusu kutusu deneyinde ise kayma mukavemet açısı $\phi=38^\circ$ olarak hesaplanmıştır.

- Karayolları Teknik  artnamesinde (2013) belirtilen dolgu imalatlarına uygun nitelikli kazı malzemesinin $w_{Lmaks}=\%60$, $I_{pmaks}=\%35$, minimum $\gamma_{kmaks}=14.5$ kN/m³ ve ya  CBR  i me yüzdesinin $\leq\%3$ olması kriterlerini uyması gerekmektedir. Dolguların  styapı tabanını oluşturan kesiminde esnek üstyapı taban malzemesi olarak ya  CBR $\leq\%8$ olan dolgu malzemelerinin kullanılamayacağı belirtilmektedir. Buna göre söz konusu maden atığı ile teşkil edilecek dolgularda üstyapı projelendirme raporunda kalınlığı verilecek koruyucu tabaka seçme malzemesiyle teşkil edilecek kesimin altındaki kısımlarda kullanılmasının uygunluğu bulunmaktadır. Bu kriterler baz alındığında poliakrilamid kullanılmadığında t p içerisinde tutulabilen maden atığının karayolları dolgu uygulamalarında nitelikli kazı malzemesi olarak kullanılabileceği görülmektedir.
- Sızıntı suyu içerisine geçen $\%13$ 'l k atık malzeme için optimum poliakrilamid dozajı belirlemek için filtre deneyi yapılmış ve optimum dozajın A5 poliakrilamid için 15ppm olduğu anlaşılmaktadır.
- Daha önce filtrasyon ve filtre deneyleri sonucunda belirlenen A5 poliakrilamidi ve 30 ppm dozajla yapılan Geotekstil t p susuzlaştırma deneyinde (GDT) dolum için $\%10$ katı oranına sahip 300 litre karışım kullanılmıştır. Dolum sırasında kullanılan atık malzemesinin ağırlıkça neredeyse tamamının t p içerisinde kaldığı anlaşılmaktadır.
- Poliakrilamid eklendikten sonra yapılan GDT deneyi sonunda t p içerisinde kalan filtre kek için yapılan kesme kutusu deneyinde kayma mukavemet açısının $\phi=36^\circ$ hesaplanmıştır.
- Agregata  ocaklarında ortaya çıkan maden atığının geotekstil tüp ile susuzlaştırma işlemi için iki senaryo kar ıla tırılmı tır. Geotekstil tüp ile susuzlaştırma çalışmalarında katkısız maden atığının sızıntı suyunda katkılıya oranla daha fazla katı madde oranı belirlenmi tır. Ancak katkının, sadece geotekstil tüp ile susuzlaştırma sonrası açığa çıkan sızıntı suyuna uygulanması ve ikinci bir geotekstil tüp ile susuzlaştırılması ile son çıkış suyundaki katı

madde miktarının aynı seviyelere düşürülebildiği gösterilmiştir. Bu sayede kimyasal katkı ihtiyacında yaklaşık %93 oranında azalma sağlanmıştır. Ayrıca, ilk aşamada katkı kullanılmaması durumunda geotekstil tüplere yaklaşık %40 oranında daha fazla maden atığı dolumu gerçekleştirilebilmiştir. Böylece geotekstil tüp ile susuzlaştırma işleminde hem geotekstil tüpün hem de kimyasal katkıların daha efektif olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Ekonomi ve çevre sağlığı açısından önerilen metot büyük fayda sağlamaktadır.

- Ulusal ve uluslararası standartlarla yapılan kıyaslama neticesinde pek çok parametre açısından içme suyuna yakın bir kalitede sızıntı suyu elde edilmektedir. Bu bakımdan çıkış suyunun madencilik faaliyetlerinde yeniden değerlendirilmesi ekonomik açıdan uygun olacaktır.

Maden atıklarının susuzlaştırılması işleminden sonra faydalı kullanım alanlarının belirlenmesi araştırmacılar tarafından üzerinde durulması gereken konular arasında olduğu düşünülmektedir. Maden atıkların dünya üzerindeki miktarları göz önüne alındığında bunun dünya ekonomisine ve çevre sağlığına sağlayacağı katkılar değerli olacaktır.



KAYNAKLAR

- Agustini F., Skoczylas, F., & Lafhaj, Z.** (2007). About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment. *Cement and Concrete Composites* vol. 29, pp. 270–278, 2007.
- Ardila, M. A. A., Souza, S.T., Silva, J. L., Valentin, C. A. & Dantas A. B.** (2020). Geotextile Tube Dewatering performance assessment: an experimental study of sludge dewatering generated at a water treatment plant, *Sustainability*, 12, 8129.
- ASTM** (1994). *Standard Guide for Collection, Storage, Characterisation and Manipulation of Sediment or Toxicological Testing*. American Society for Testing and Material, Annual Book of Standards 11 (04): E1391–96.
- ASTM** (2011). Standard Test Method for Determining the Flow Rate of Water and Suspended Solids from a Geotextile Bag - D7701. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 7.
- Aydilek, A. H. & Edil., T. B.** (2002). Filtration performance of woven geotextiles with wastewater treatment sludge. *Geosynthetics International* 9(1): 41–69.
- Aydilek, A.H.** (2006). A Semi-Analytical Model for Development of Woven Geotextile Filter Selection Criteria. *Geosynthetics International*, Vol. 13, No. 2, pp. 59-72.
- Başar, H. M., Güzel B., Erdoğan-Özer P., Hocaoglu-Murat S., Özel D., Ergenekon Ş. & Tolun L.** (2018). Deniz dibi tarama malzemesinin faydalı kullanımı için yıkama-eleme tesisi tasarımı ve yıkama-eleme prosesi atık suyunun yönetimi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 735-747.
- Berg G.V. D., & Oliveira, F. A. P. D.** (2019). Adequacy of geotextile tube dewatering in three river remediation scenarios. *River Basin Management X WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 234, 155-165.
- Berilgen, S. A. & Bulut, T. B.** (2016). Laboratory investigations for dewatering of Golden Horn dredged sludge with geotextile tubes. *Marine Georesources & Geotechnology*, 34, 638-647.
- Berilgen, S. A., Bicer, P., Berilgen, M. M., & Ozaydin, K.** (2006). Assessment of consolidation behavior of Golden Horn marine dredged material. *Marine Georesources & Geotechnology* 24, 1–16.
- Blacksmith Institute** (2018). <http://www.worstopolluted.org> (Accessed 11th June, 2018).
- Bolto, B. A.** (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research* 41.

- Bratby, J.** (2008). *Coagulation and Flocculation in Wastewater Treatment*. International Water Association.
- Bray, R. N.** (2008). *Environmental Aspects of Dredging*, IADC/CEDA and Taylor & Francis Publishers, London, United Kingdom.
- Cai Y., Qiao H., Wang, J., Geng, X., Wang P. & Cai, Y.** (2017). Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading, *Engineering Geology* 222, 10-19.
- Cantré, S. & Saatho, F.** (2011) Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. *Geosynthetics International*, 18, 90–103.
- Cetin, D., Sengul, T., Bahatia, S. K., & Khachan, M. M.** (2016). Effect of polymer and fiber usage on dewatering and compressibility behavior of fly ash slurries. *Marine Georesources & Geotechnology* 35(5), 678-687.
- Chang C.T., Hong G.B., & Lin H.S.** (2016). Artificial lightweight aggregate from different waste materials, *Environmental Engineering Science*, 33, 283–289.
- Chang F.C., Lo S.L., Lee M.Y., Ko C.H., Lin, J.D. & Huang S.C.** (2007). Leachability of metals from sludge-based artificial lightweight aggregate, *Journal of Hazardous Materials*, 146, 98–105.
- Cheeseman C. & Viridi G.S.** (2005). Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 45, 18–30.
- Chu, J., Guo, W. & Yan, S. W.** (2011). Geosynthetic tubes and geosynthetic mats: Analyses and applications. *Geotechnical Engineering* 42(1), 56–65.
- Cosgrove, T.** (2005). *Colloid Science: Principles, Methods and Applications*.
- Çelikkan, H.** (2003). *Suda Çözünen Polimerler, Polimer Teknolojisi*. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Çevikbilen G., Başar, H.M., Karadoğan, Ü., Teymur, B., Dağlı, S., & Tolun, L.** (2020). Assessment of the use of dredged marine materials in sanitary landfills: A case study from the Marmara sea. *Waste Management*, 113, 70-79. doi:10.1016/j.wasman.2020.05.044
- D.R., K.** (1971). *Theoretical and experimental investigations of the flocculation of charged particles in aqueous solutions by polyelectrolytes of opposite charge*. California Institute of Technology.
- Driscoll, J., Rupakheti P., Bhatia S. K. & Khachan M.M.** (2016). Comparison of 1-D and 2-D tests in geotextile dewatering applications, *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, 2(27).
- Dudka S. & Adriano DC.** (1997). Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review. *Journal of Environmental Quality*, 26(3), 590-602, 1997.
- Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X., & Williams, R.Z.** (1995). *Particle Deposition and Aggregation*. Butterworth Heinmann Publishing.

- EPA** (2003). National primary drinking water standards, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 816-F-03-016.
- Fatema, N., Bahatia, S. K., & Grady, W.F.** (2018). Comparison of 1-D and 2-D geotextile dewatering tests with fly ash slurry. *Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics*, 16-21 September 2018, Seoul, Korea.
- Feng, L., Zheng, H., Wang, Y., Zhang, S., & Xu, B.** (2017). Ultrasonic-template technology inducing and regulating cationic microblocks in CPAM: characterization, mechanism and sludge flocculation performance. *RSC Advances*, 7(38), 23444-23456.
- Floerger.** (2010). Water Soluable Polymers. *SNF Floerger*.
- Fourie, A. B., Johns D. G. & Jones C. J. F. P.** (2007). Dewatering of mine tailings using eletrokinetic geosynthetics. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Fowler, J., Duke, M., Schmidt, M., & Crabtree, B.** (2000). Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes. Geotec Associates.
- Glover, S.M., Yan, Y., Jameson, G. J., & Biggs, S.** (2004). Dewatering properties of dual-polymer-flocculated systems. *International Journal of Mineral Processing* 73, 145- 160.
- Gosar, M., Šajn, R., & Teršič, T.** (2016). Distribution pattern of mercury in the Slovenian soil: Geochemical mapping based on multiple geochemical datasets. *Journal of Geochemical Exploration*, 167, 38–48.
- Gregory, J.** (2005). Particles in water: properties and processes. CRC Press.
- Grzelak, M. D.** (2009). Dewatering of low percent solids slurries using geotextile tubes. Department of Civil Engineering, Syracuse University, Syracuse, NY.
- Gudas, C., Bastviken, D., & Steger, K.** (2010). Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 466, 478–481.
- Guimarães, M., Urashima, D.D.C. & Vidal, D.D.M.** (2014). Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. *Geosynthetics International*, 21, 310–320.c
- Güzel B., Başar, H. M., Güneş K., Karakaş-Yenisoy S. & Tolun L.** (2019). Investigation of topsoil production from marine dredged materials (DMs) in Turkey for urban landscaping works, *Heliyon*, 5, 2405-8440.
- He, J., Chu, J., Tan, K. S., Vu, T. T. & Lam P. K.** (2017). Sedimentation behavior of flocculant-treated soil slurry, *Marine Georesources & Geotechnology*, 35:(5), 593-602.
- Huang S.C., Chang F.C., Lo S.L., Lee M.Y., Wang C.F., & Lin J.D.** (2007). Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash, *Journal of Hazardous Materials*, 144, 52–58, 2007
- Ingold, T., & Miller, K.** (1988). Geotextiles Handbook. Thomas Telford Limited, London.

- IOC–UNEP–IMO.** (2000). Global investigation of pollution in the marine environment (GIPME 2000). *Guidance on Assessment of Sediment Quality*, 439.
- Jia H., Jian, C., Soon, K. T., Thu, T. V., & Kok, P. L.** (2017). Sedimentation behavior of flocculant-treated soil slurry. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5), 593-602.
- Johns, D.J.** (2004). *Electrokinetic dewatering of mine tailings*. M.Sc.(Eng) dissertation. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa
- Karpuzcu, M.** (2012). Çevre kirlenmesi ve kontrolü (Vol. 28). Kubbealtı Publishing, İstanbul.
- Khachan, M. & Bhatia, S.** (2017). The efficacy and use of small centrifuge for evaluating geotextile tube dewatering performance, *Geotextile and Geomembrane*, 45, 280–293.
- Khachan, M.M., Bader, R. A., Bhatia, S. K., & Maurer., B. S.** (2011). *Comparative dewatering performance of slurries conditioned with synthetic polymers vs. eco – friendly polymers. geo- frontiers 2011*, ASCE 2011, 3050- 3058.
- Khachan, M.M., Bhatia, S. K., Maurer, B. S., & Gustafson, A. C.** (2012). Dewatering and utilization of fly ash slurries using geotextile tubes. *Indian Geotech*, 42(3), 194-205.
- Kılıç, Ö., Belivermiş, M., Sezer, N., Kalaycı, G., & Gözel, F.** (2019). Multi-pollutant Monitoring in a Rehabilitated Estuary: Elements and Radionuclides. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 103(2), 354-361.
- Koerner, G. R. & Koerner, R. M.** (2006). Geotextile tube assessment using a hanging bag test. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 129–137.
- Koerner, R.** (1998). *Designing with Geosynthetics*. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Koerner, R.** (2005). *Designing with Geosynthetics* (5th Edition b.). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Koerner, R.M.** (2016). *Geotextiles from design to applications*, Woodhead Publishing, Elsevier Ltd. All rights reserved 2016.
- Koerner, R.M., & Koerner, G. R.** (2010). Performance tests for the selection of fabrics and additives when used as geotextile bags, containers, and tube. *Geotechnical Testing Journal*, 33, No. 3.
- Kotan, D.** (2008). *Geotekstil Donatılı Zemin İstinat Duvarları ile Yamaçlarda Stabilitenin Artırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Krause P.R. & McDonnell, K. A.** (2000). The Beneficial Reuse of Dredged Material for Upland Disposal, HLA Project No. 48881, California, USA.
- Kutay, M.E. & Aydılek, A.H.** (2004). Retention Performance of Geosynthetic Containers Confining Geomaterials. *Geosynthetics International*, Vol. 11, No. 2, pp. 100-113.

- Lawson, C. R.** (2008). Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, 15(6), 384–427.
- Lee, J. L., Shang, J. Q., & Xu, Y.** (2016). Electrokinetic Dewatering of Mine Tailings Using DSA Electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 4143–4160.
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H. I., & Gilbert, P. A.** (1996). Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some design aspects. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(8), 682–690.
- LIFE**, (2002). Methods for Management and Reuse of Polluted Sediments. European Project Realized by in vivo, France (in French).
- Liao, K., & Bhatia, S. K.** (2005). *Geotextile tube: Filtration performance of woven geotextiles under pressure*. *Geosynthetics '05*, IFAI Las Vegas, Nevada, 15.
- Lockhart, N.C. & Stickland, R.E.** (1984). Dewatering coal washery tailings ponds by electroosmosis. *Powder Technology*, 40, 215–221.
- Lyklema, J. A. & Fleer G.J.** (1987). Electrical contributions to the effect of macromolecules on colloid stability. *Colloids and Surfaces*, 25, 357–368.
- Malvern Instruments Ltd**, (2001). Zeta potential—an introduction in 30 minutes (technical note MRK654-01). Zetasizer Nano series technical note.
- Mastin, B.J. and Lebster, G.E.** (2009). *Chemical conditioning optimization for geotextile tube dewatering*. Proceedings Twenty Ninth Western Dredging Association Technical Conference, Tempe, USA, June, pp. 101–112.
- Maurer B. W., Gustafson, A. C., Bhatia, S. K., & Palomino, A. M.** (2012). Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry. *Fuel*, 97, 411–417.
- Maurer, B. W.** (2009). *Flocculation and Filtration in the Geotextile Tube Environment*.
- McLaughlin, R.A., & Bartholomew, N.** (2007). Soil factors influencing suspended sediment flocculation by polyacrylamide. *Soil Science Society of America Journal*, 71, No. 2, 537–544.
- Moo-Young, H. K., Douglas, A. G. & Mo, X.** (2002). Testing Procedures to Assess the Viability of Dewatering with Geotextile Tubes. *Geotextiles and Geomembranes* 20 (5): 289–303.
- Mori, H., Miki, H., & Tsuneoka, N.** (2002). The geotube method for dioxin contaminated soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 281–288.
- Muthukumar, A. & Ilamparuthi, K.** (2006). Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4), 210–219.
- Muthukumar, A.E. & Ilamparuthi, K.** (2006). Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, No. 4, 210–219.

- Müller, M. & Vidal, D.** (2019). Comparison between open and closed system for dewatering with geotextile: field and comparative study, *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, 13, 634–639.
- Nasser, M. A.** (2006). The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behavior of kaolinite suspensions. *Separation and Purification Technology*.
- Newman, P., Hodgson, M., & Rosselot, E.** (2004). The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques. *Minerals Engineering* (17), 115–121.
- OSPAR Commission,** (2009). JAMP Assessment of the Environmental Impact of Dumping of Wastes at Sea. Oslo-Paris Commission, Biodiversity Series, London, United Kingdom, pp. 433.
- Özener, A.** (2001). Geotekstil Donatılı Şevlerin ve İstinat Yapılarının Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi. Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk İ.** (2016). Haliç’te tarama sonrası iyi su durumunu sağlayıcı ilave koruma tedbirleri ana planı projesi, Istanbul Metropolitan Municipality, Turkey.
- Rashid, A.S.A., Shirazi, M.G., Nazir R., Mohamad H., Sahdi F. & Horpibulsuk S.** (2020). Bearing capacity performance of soft cohesive soil treated by kenaf limited life geotextile, *Marine Georesources & Geotechnology*, 38:6, 755-760.
- Ratnayesuraj, C.R. & Bhatia, S.K.** (2018). Testing and analytical modeling of two-dimensional geotextile tube dewatering process, *Geosynthetics International*, 25, 132–149.
- Riordan J., Murphy, J.P., & Harrington, J. R.** (2008). *Construction and Demolition Waste and Dredge Material as Landfill Liner in Ireland, 1st Middle European Conference on Landfill Technology. The Hungarian Academy of Sciences*, Budapest, Hungary.
- Salomons, W.** (2005). Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemistry Exploration*, 52(1-2), 5– 23.
- Satyamurthy, R. & Bhatia, S. K.** (2009). Effect of polymer conditioning on dewatering characteristic of fine sediment slurry using geotextiles. *Geosynthetics International*, 16(2), 83-96.
- Satyamurthy, R. & Bhatia, S. K.** (2009). Effect of polymer conditioning on dewatering characteristic of fine sediment slurry using geotextiles. *Geosynthetics International* 16, No. 2, 83-96.
- Scheinherrová L., Trník A., Kulovaná T., Pavlík Z., Rahhal V., & Irassar E.F.** (2016). Hydration of blended cement pastes containing waste ceramic powder as a function of age. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1752, 040025-1–040025-6.
- Semsar, M. S., Scholz, S., & Kulicke, W. M.** (2007). Cationic starches as substitute for synthetic cationic flocculants in solid–liquid separation of harbor sludge. *The Journal of Physical Chemistry*, 111(29), 8641–8641-8.

- Shall-el, H. & Zhang P.** (2004). Process for dewatering and utilization of mining wastes. *Minerals Engineering*, 17 (2004), 269-277.
- Sharrer, M.J., Rishel, K., & Summerfelt, S.** 2009. Evaluation of geotextile filtration applying coagulant and flocculant amendments for aquaculture biosolids dewatering and phosphorus removal. *Aquacultural Engineering*, 40, No:1- 10.
- Sheehan, C. & Harrington, J.** (2012). Management of dredge material in the republic of Ireland – a review. *Waste Management*, 32, 1031- 1044.
- Shin, E. C. & Oh, Y. I.** (2007). Coastal erosion prevention by geotextile tube technology. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(4–5), 264–277.
- Shin, E.C., & Oh, Y.I.** (2003). Analysis of geotextile tube behavior by large-scale field model tests. *Geosynthetics International*, 10(4), 131-141.
- Shukla, S.** (2002). *Geosynthetics and Their Applications*. Thomas Telford Publishing, London.
- Shukla, S., & Yin, J.-H.** (2006). *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. Taylor and Francis,. London, UK.
- Silva, R.A.E., Negri, R.G. & Vidal, D.D.M.** (2019). A new image-based technique for measuring pore size distribution of nonwoven geotextiles, *Geosynthetics International*, 26, 261–272.
- SKKY**, (2004). Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 31 Aralık 25687 Sayılı Resmi Gazete.
- Socrates, G.** (2004). Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. John Wiley & Sons.
- Şengül, E.** (2016). *Tarama Çamurlarının Anyonik Katkılar Kullanılarak Geotekstil Tüpler ile Susuzlaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tang C.W., Chen, H. J., Wang ,S. Y., & Spaulding, J.** (2011). Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry. *Cement and Concrete Composites*, 33, 292–300.
- Tang C.W., Chen, H. J., Wang., S. Y., & Spaulding, J.** (2011). Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry. *Cement and Concrete Composites*, 33, 292–300.
- TenCate**, (2007). TenCate Geotube1 GDT test: A demonstration of Geotube1 dewatering technology. Commerce, GA: TenCate Geosynthetics North America.
- TenCate**, (2015). TenCate RDT Test. TENCATE Corporation. http://www.tencate.com/amer/Images/bro_rdt_tcm29-12759.pdf (accessed April 13, 2015).
- Tripathy, T. A.** (2006). Flocculation: a new way to treat the waste water. *Journal of physical sciences*, 93-127.
- TSE**, (1997). TS-266, Türk İçme Suyu Standartları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.1997.

- Turan, B. & Berilgen S.A.** (2014). Taranmış çamurların susuzlaştırılmasında kimyasal katkı etkinliği. *Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN Onuruna Geoteknikte Gelişmeler ve Deneyimler Sempozyumu*, (s. 80-90). Yıldız Teknik Üniversitesi , 2 Haziran 2014.
- Turan, B.** (2016). *Tarama Çamurlarının Geotekstil Tüpler ile Susuzlaştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Url-1** <<https://www.ibt.istanbul/News/Detail/35888>> , erişim tarihi 11.01.2021.
- US EPA, & WDNR.** (2007). Record of Decision Amendment, Lower Fox River and Green Bay Superfund Site. U. S. Environmental Protection Agency and Wisconsin Department of Natural Resources.
- Wang, H.Y.** (2009). Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. *Construction and Building Materials* 23, 2332–2337.
- Watts, M. & Trainer, E.** (2009). *Disposal of coal mine slurry waste using geotextile containers at the North River Mine, Chevron Mining Inc. Geosynthetics 2009*, Salt Lake City, Utah, IFAI. 439-448.
- Watts, M. & Trainer, E.** (2009). Disposal of coal mine slurry waste using geotextile containers at the North River Mine, Chevron Mining Inc. *Geosynthetics 2009*, Salt Lake City, Utah, IFAI. 439-448.
- WHO** (2004). Guidelines of drinking water, Volume 1. Geneva: World Health Organization.
- Worley, J., W., Bass, T., M., & Vendrell, P., F.** (2008). Use of Geotextile Tubes with Chemical Amendments to Dewater Dairy Lagoon Solids. *Bioresour., Technol.*, 91, Pp., 4451-4459.
- Yan, S. W. & J. Chu.** (2010). Construction of an offshore dike using slurry filled geotextile mats. *Geotextiles and Geomembranes* 28, 422–33.
- Yazıcı, H.** (2008) The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of selfcompacting concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 456–462.
- Yee, T. W. & Lawson, C. R.** (2012). Modelling the geotextile tube dewatering process. *Geosynthetics International*, 19(6), 339–53.
- Yılmaz, H., & Eskişar, T.** (2007). Geosentetik Ürünlerin Geoteknik Mühendisliği Sorunlarının Çözümünde Kullanımı ve Sağlanan Faydalar. 2. Geoteknik Sempozyumu, ĐMO Adana, 22-23 Kasım 2007 , (s. 437-452.).

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ümit KARADOĞAN
Doğum Tarihi ve Yeri :
E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılı Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölüm birinciliği
- 2012-2014 yılları arasında Muş Alparslan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim elemanı
- 2014- ...yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim elemanı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karadoğan, Ü.**, Çevikbilen G., & Teymur B. (2019). Haliç Dip Tarama Çamurunun Susuzlaştırılma Çalışmalarında Geotekstil Kullanımı, 8. *Ulusal Geosentetik Konferansı*, 16-17 Mayıs, İstanbul, Türkiye, 2019.
- **Karadoğan Ü.**, Korkut, S., Çevikbilen, G., Teymur, B., & Koyuncu., İ. (2020). Evaluation of beneficial of polyacrylamide use dewatering of dredged sludge obtained from golden horn. *Marine Georesources & Geotechnology*.

