



**LİMAN ATIK KABUL TESİSLERİNDE SİNTİNE SUYU
ARITMA ÇAMURU ÖZELLİKLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN YENİ YAKLAŞIMLAR**

Nurullah ÖZDOĞAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİMAN ATIK KABUL TESİSLERİNDE SİNTİNE SUYU ARITMA ÇAMURU
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN YENİ YAKLAŞIMLAR**

Nurullah ÖZDOĞAN
0000-0002-3357-0240

Prof. Dr. F. Olcay TOPAÇ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

LİMAN ATIK KABUL TESİSLERİNDE SİNTİNE SUYU ARITMA ÇAMURU ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN YENİ YAKLAŞIMLAR

Nurullah ÖZDOĞAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatma Olcay TOPAÇ

Günümüzde dünya ticaretinin % 90'ı deniz yoluyla sağlanmaktadır. Ancak gemilerin iç kısımlarının yıkama sularının illegal şekilde denizlere deşarj edilmesiyle ciddi oranda deniz kirliliği meydana gelmektedir. Uluslararası Hukuk düzenlemeleri uyarınca gemiler, ürettikleri atıkları limanlarda belirlenen lisanslı atık kabul tesislerine vermekle yükümlüdür. Bu tesislerdeki en büyük problemlerden biri ise suyun fizikokimyasal arıtımından sonra oluşan yüksek hacimlerde ve tehlikeli madde içeriğine sahip arıtma çamurlarıdır. Bu çalışmadaki temel amaç, Türkiye'nin en büyük liman atık kabul tesislerinden birinde sintine suyu arıtma prosesi sırasında oluşan arıtma çamurunun özelliklerini iyileştirmek için verimli, uygun maliyetli, çevre ve sağlık dostu etkin bir yöntemin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, tesis içerisinde bir pilot ölçekli ünite kurularak sintine suyu arıtma çamuruna farklı deney şartları (ultrasonik güç, koagülan dozajı, işletme süresi, altında; (i) filtre pres, (ii) ultrases + filtre pres, (iii) ultrases + koagülan + filtre pres prosesleri uygulanmış ve birbirleri ile mukayese edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, Ultrases (US) tek başına kullanıldığında, su içeriği, Toplam Organik Karbon (TOK) ve Kızdırma Kaybı (LOI) değerlerini etkilemediği görülmüştür. US, 100 W/L ultrasonik güç ve 60 dakika işlem süresi ile çamurun Çözünmüş Organik Karbon (ÇOK) değerini %45 azaltırken, ultrases uygulama süresindeki artış (400 W/L), Toplam Çözünen Katı (TÇK) ve klorür parametrelerinin gideriminde sırasıyla % 10 ve % 22 iyileştirme sağlamıştır. Ultrasonik gücün 300 W/L, potasyum metoksit dozajının 500 mg/L ve işletme süresinin 60 dakika olduğu şartlarda, ÇOK giderimi % 40 seviyelerine, TÇK konsantrasyonu 4020 mg/L seviyelerine indirilmesi ve yine klorür konsantrasyonunda da 1. Sınıf limit değerinin karşılandığı görülmüştür. Çamur keki TOK içeriğinin ise, 100-400 W/L arasındaki ultrasonik güç ve 60 dakika işletme süresi ile azaltılsa da 1. Sınıf limit değeri elde edilememiştir. Ultrasonik gücün 300 W/L, koagülan dozajının 1000 mg/L ve işletme süresinin 60 dakika olduğu optimum şartlarda, çamur su içeriği % 65,71'e, LOI içeriği ise % 56 seviyesine düşürülmüş olsa da sınır limit değerleri karşılanamamıştır. Çalışmanın umut verici sonuçlarının, daha önce araştırılmamış olan sintine suyu çamurunun işlenmesi için yeni bir alternatif ve yol gösterici bir rehber olması öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Liman atık kabul tesisleri, sintine suyu, arıtma çamuru, çamur stabilizasyonu, susuzlaştırma, ultrases, koagülan

2024, xix + 105 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

NEW APPROACHES TO IMPROVE BILGE WATER TREATMENT SLUDGE PROPERTIES IN PORT RECEPTION FACILITIES

Nurullah ÖZDOĞAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatma Olcay TOPAÇ

Today, 90% of world trade is carried out by sea. However, serious marine pollution occurs when the washing water of the interior of ships is illegally discharged into the sea. In accordance with International Law regulations, ships are obliged to deliver the waste they produce to licensed waste reception facilities designated in ports. One of the biggest problems in these facilities is the high volumes of treatment sludge with hazardous substance content formed after the physicochemical treatment of water. The main purpose of this study is to investigate an efficient, cost-effective, environmentally, and health-friendly method to improve the properties of the sewage sludge formed during the bilge water treatment process in one of Turkey's largest port waste reception facilities. In this context, a pilot scale unit was established within the facility and the bilge water treatment sludge was processed under different test conditions (ultrasonic power, coagulant dosage, operating time; (i) filter press, (ii) ultrasound + filter press, (iii) ultrasound + coagulant + filter press processes were applied and compared with each other. According to the study results, it was seen that Ultrasound (US) did not affect the water content, Total Organic Carbon (TOC), and Loss on Ignition (LOI) values when used alone. US used 100 W/L ultrasonic power and While the Dissolved Organic Carbon (DOC) value of the sludge was reduced by 45% with a 60-minute treatment time, the increase in ultrasound application time (400 W/L) provided a 10% and 22% improvement in the removal of Total Dissolved Solids (TDS) and chloride parameters, respectively. Under conditions where the W/L potassium methoxide dosage was 500 mg/L and the operating time was 60 minutes, it was observed that DOC removal was reduced to 40%, TDS concentration was reduced to 4020 mg/L, and the Class 1 limit value was also met in the chloride concentration. Although the TOC content of the sludge cake was reduced by ultrasonic power between 100-400 W/L and 60 minutes of operation time, the limit value could not be achieved. Under optimum conditions where ultrasonic power was 300 W/L, coagulant dosage was 1000 mg/L and operating time was 60 minutes, the sludge water content was reduced to 65.71% and the LOI content was reduced to 56%, but the limit values were not met. The results of the study are expected to provide a new alternative and guiding guide for the processing of bilge water sludge, which has not been investigated before.

Key words: Port reception facilities, bilge water, treatment sludge, sludge stabilization, dewatering, ultrasound, coagulant

2024, xix + 105 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresi boyunca göstermiş olduğu rehberlik, manevi destek, bilgi paylaşımı ve o güler yüzlülüğü ile çıkmış olduğum bu yolda beni motive ederek her daim yanımda olan ve bu sürecin tamamlanmasında bana öncülük eden başta çok değerli danışman Hocam Prof. Dr. Sn. Fatma Olcay TOPAÇ'a,

Akademik camia ile tanışmama vesile olan ve bu yolda hep ilerlememi sağlayan, değerli bilgi ve görüşleriyle, sabrıyla, motivasyonu ile iyi ve kötü günümde hep yanımda olan, benden hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli Hocam Prof. Dr. Sn. Ebubekir YÜKSEL'e,

Akademik çalışmalara adım attığım bu süreçte değerli bilgi ve yol gösterici tavrıyla, göstermiş olduğu açık, samimi ve nezaketli yaklaşımı ile uzman tecrübelerinden istifade ettiğim ve bu süreç içerisinde her daim destekçim olan çok değerli Hocam Prof. Dr. Sn. N. Kâmil SALİHOĞLU'na,

Tez uygulama çalışmaları esnasında hep yanımda olan, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve tezimin tamamlanmasında bana yol gösterici olan, doktora yeterlilik jürisinde, tez izleme komitesinde ve aynı zamanda doktora tez savunma jüri üyesinde yer alan bende ayrı bir yeri olan çok değerli Hocam Doç. Dr. Sn. Murat EYVAZ'a

Doktora tez savunmasında çok değerli zamanlarını ayırarak hazır bulunan ve yapılan tez çalışmasının başarılı bulunmasına katkıda bulunarak onay veren değerli sınav jüri üyesi sayın Hocalarım Bursa Uludağ Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç Dr. Selnur UÇAROĞLU'na ve Bursa Teknik Üniversitesi Dr. Öğretim. Üyesi Aşkın BİRGÜL'e

Doktora saha çalışmalarının başlanmasında gerekli ana ekipman desteğinin sağlayan ve her konuda yardımını gördüğüm Gebze Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sn. Ahmet KARAGÜNDÜZ'e,

Lisansüstü eğitime başlamamda beni cesaretlendiren, moral veren ve bu sürece girmemde üzerimdeki etkisi oldukça fazla olan çok değerli hocam İstanbul Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sn. S. Levent KUZU'ya,

Bir İSTAÇ A. Ş çalışanı olarak, doktora eğitimim boyunca göstermiş olduğu her türlü destek ve çalışma ortamı imkânı sağlayan Deniz Hizmetleri Müdürleri Sn. İbrahim Ruhi KELLEÇİ ve Sn. Alper AYAR'a ve Tesis Şeflerimiz Sn. Temel DEREMENCİ ve Hayrettin GÜROVA'ya,

Bilimsel Araştırma Projeleri FDK-2022-833 proje numarası ile doktora tezini destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi'ne,

Doktora eğitim sürecinin ilgili enstitü ile sağlıklı bir şekilde yürütülmesinde bizlere yardımcı olan ve görevini layıkıyla yapan bölüm sekreteri Sn. Dilek YÜCEER'e ve yine bu süreçte üniversitede bulunduğum günlerde odasında dinlendiğim, çayımı içtiğim ve o güzel sohbetinden keyif aldığım değerli ablamız Sn. Alime ÇINAR'a,

Doktora tez çalışması saha uygulamaları hususunda gerekli olan ana ekipman, bakım, tedarik ve lojistik destek süreçlerinde her daim yanımda olan, proses işleyiş sistemi ile alakalı vermiş olduğu değerli bilgi ve katkılarıyla tez çalışmalarının tamamlanmasına yardımcı olan STS Makine Genel Direktörü Sn. Oğuz ŞAHİN'e, ECOTECNE Genel Müdürü Mr. Dott. Sergio CECCHIN'e, Üretim Müdürü Mr. P.I. Bruno MARTINI'ye,

Saha çalışmalarında bana yardımcı olan Tesis Formenleri Sn. S. Mehmet ER'e, Sn. İsmail ÇELİKBİLEK'e, Sn. Bünyamin SÜNNETÇİ'ye, Mekanik Ustası Sn. Harun AKSOY'a, Elektrik Teknisyenleri başta Sn. Enver TÜĞMEN'e, Sn. İ. Halil KANIKARA'ya, Sn. Hakan GÜNDÜZ'e, Mekanik Teknisyenleri Sn. İsmail KARAKUŞ'a, Sn. Sakin AKÇA'ya, Sn. Recep YAZICI'ya, Sn. Yunus KALEMKUŞ'a, Sn. İbrahim KALEMKUŞ'a, Sn. Fikret YILDIRIM'a, Sn. Kahraman KAN'a, Sn. Gazi AYGÜL'e, Sn. Murat ÇEPNİ'ye, idari personel Sn. İbrahim ÖZGİRAY'a, Sn. Murat KAHRAMAN'a ve diğer tüm tesis çalışanı değerli arkadaşlarıma,

Proje uygulama adımlarında değerli bilgi ve uzman görüşlerinden faydalandığım ve her zaman yanımda olan sayın Hocalarım Dr. Ercan GÜRBULAK'a, Dr. Ahmed ALBAHNASAWI'ye, Dr. E. Ender ÇELEBİ'ye, Arş. Gör. Havva AĞIR SARI'ya ve Tek. Fahrettin DUYUM'a ve değerli bilgilerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen Trio Teknik'ten Sn. Metin YILDIRIM'a,

Laboratuvar çalışmalarında gerekli izin ve her türlü desteği sahsıma sağlayan değerli yöneticim Atık İşletme Müdürü Sn. Bekir TOMBUL ve iş arkadaşım Laboratuvar Şefi Sn. ŞAFAK ASLAN'a, laboratuvar analizlerinde bana her zaman destek olan başta Sn. Tayfun BAĞLAN, Sn. Asım EMEK, Sn. Aydın SELEK ve Sn. Azize Ada ER olmak üzere Sn. Nesrin ELMACI'ya, Sn. Nagihan KARACA'ya, Sn. Erkan GÜLER'e ve Sn. Rümeysa Betül KAHRAMAN'a,

Doktora eğitimi süresi boyunca gerek eğitimime devamlılığım konusunda gerekse de değerli bilgi ve görüşlerini benimle paylaşan iş arkadaşlarım ve meslektaşlarım Kim. Müh. Abdurrahman ÇELİK'e, Sn. Resul AĞBULUT'a, Çev. Müh. Mustafa YELCİ'ye ve Mak. Müh. Alaeddin ATAŞ'a,

Tez çalışmalarımda bilgisi ve tecrübeleriyle fikirlerinden yararlandığım saygıdeğer büyüğüm Sn. Metin GÖBÜLÜK'e, Sn. Kenan SARI'ya ve Sn. Ahmet KUZU'ya,

Çıkmış olduğum akademik yolda daimî destekçim olan ve bu yolda hep yanımda olacağını ifade eden, çalışma motivasyonumu her zaman üst seviyede tutmamı sağlayan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen çok değerli büyüğüm Sn. Eyyüp GÜÇLÜ'ye ve Sn. Mustafa KORKUTAN'a,

Çalışma hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, hayat direktörüm olan, amcam Sn. Hikmet ÖZDOĞAN'a,

Eğitim süresince manevi olarak desteklerini her zaman gördüğüm ve geçmişte de iyi ve kötü günlerimde beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli dostlarım ve kıymetli arkadaşlarım Sn. Serdar YILDIZ'a, Sn. İbrahim ÇELİK'e, Sn. Kenan ÇELİK'e, Sn. İhsan TOPRAK'a, Sn. Hüseyin BOZKURT'a, Sn. Ali ZİLAN'a, Sn. Hakkı ACAR'a, Sn. Erhan YAŞIN'e, Sn. Ethem KUTLU'ya ve Sn. İlyas ERYİĞİT'e,

Tüm okul hayatım boyunca kendilerinden her zaman feyiz aldığım, ileri görüşlü fikir ve düşünceleri ile benim buralara kadar gelmemde üzerimde emeği olan çok değerli ve kıymetli hocalarım Sn. Sinan YALMAN'a, Sn. Şevket ESKİN'e, Sn. Osman YILMAZ'a, Doktora eğitimim süresince faydalandığım, Bursa Terminal ile İstanbul Sabiha Gökçen şehirlerarasında taşımacılık yaparak vermiş olduğu kaliteli hizmet ve ulaşım imkânı ile BBBUS markasını bizlere sunan BURSA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ BURULAŞ A.Ş. idare yönetimine ve tüm çalışanlarına,

Doktor eğitimim süresince moral ve motivasyonumu üst seviyede tutan, oldukça meşakkatli olan bu zorlu yolun stresini üzerimden alan, beni çocukluğuma götüren ve o güzel günleri tekrar yad etmemi sağlayarak mutlu kılan, her bölümünü heyecanla ve keyifle takip ettiğim GÖNÜL DAĞI dizisini bizlere sunan, Türkiye Radyo Televizyonu Kurumu'na ve Gönül Dağı Dizi 'sinin başta yönetmen olmak üzere değerli oyuncularına, set çalışanlarına ve emeği geçen tüm herkese,

Doktora eğitim sürecinin en başından beridir verdikleri manevi destek, cesaret ve pek çok zaman evlerinde misafir ederek göstermiş oldukları konukseverliğinden ötürü, eşimin ablası aynı zamanda lise öğretmenim olan çok değerli hocam Sn. Nurcan METİN'e, eşi Sn. Mehmet METİN'e ve biricik kızları Sn. Ceren METİN'e,

Bu sürecin başından beridir hep yanımda olan ve hiçbir zaman manevi desteklerini esirgemeyen rahmetli canım annem Enginaz ÖZDOĞAN'a, babam Mürsel ÖZDOĞAN'a, kız kardeşim Vildan ÖZDOĞAN'a, kardeşim Abdullah ÖZDOĞAN'a ve abim Ömer ÖZDOĞAN'a,

Ve göstermiş olduğu her türlü özveri ve desteklerinden dolayı da ayrıca hayat arkadaşım değerli eşim Ayşe ÖZDOĞAN ve biricik oğlum Özhan Eren ÖZDOĞAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Nurullah ÖZDOĞAN

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. Arıtma Çamurları Bertaraf Yöntemleri.....	6
2.2. Ultrases	8
2.3. Ultrases Üretimi	9
2.4. Ultrasesin Fiziksel ve Kimyasal Etkileri.....	11
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	17
3.1. Çalışma Alanı.....	17
3.2. Çamur Numunesi	18
3.3. Deneysel Düzenek.....	19
3.4. Tesiste Kullanılan Koagülan Tipleri	22
3.5. Alternatif Koagülan Tipleri.....	24
3.6. Çamur Bertaraf Maliyeti	28
3.7. Deneysel Prosedür.....	33
3.8. Çamur Bertarafına Yönelik İyileştirme Adımları	34
3.8.1. Senaryo 1: Tesis arıtma çamuru susuzlaştırma	37
3.8.2. Senaryo 2: Tesis arıtma çamuru ultrases destekli iyileştirme	38
3.8.3. Senaryo 3: Tesis arıtma çamuru ultrases + koagülan destekli iyileştirme	38
3.9. Kimyasallar	41
3.10. Analitik Prosedür	41
3.10.1. Susuzlaştırma deneylerinin yürütülmesi ve numunelerin toplanması.....	41
3.10.2. Analizlerin yürütülmesi.....	42
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	49
4.1. Çamur Karakterizasyonu.....	49
4.2. Çamur Yağ İçeriği.....	51
4.3. Atık Kabul Tesisi Çamur Susuzlaştırma İşlemi	56
4.4. Ultrasonik Güç ve İşletme Süresinin Gem Sintine Atıksuyu Arıtma Çamurlarının İyileştirilmesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi	58
4.4.1. Ultrasonik yöntem ile çamur susuzlaştırma ve iyileştirme çalışmaları.....	58
4.5. Ultrasonik Güç, İşletme Süresi ve Koagülanın Gemi Sintine Atıksuyu Arıtma Çamurlarının İyileştirilmesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....	70
4.5.1. Ultrases destekli tesiste kullanılan koagülanlarının sulu çamur içerisinde faz ayırım üzerine etkisi	70
4.5.2. Ultrases destekli alternatif koagülanların sulu çamur içerisinde faz ayırım üzerine etkisi	73
5. SONUÇ	90
KAYNAKLAR	94
EKLER	101

EK 1	Eluat hazırlamada kullanılan çizelge	102
EK 2	Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik kriterleri (Ek-2C)	104
ÖZGEÇMİŞ		105



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Ag⁺
AgCl
AgNO₃
Al₂O₃
Al (OH)aCl_b (SO₄)_c
Alum
Al₂(SO₄)₃18H₂O
As
Ba
°C
CaO
CO₂
Cd
Cl⁻
ÇOK (DOC)
Cm
cm²
cm³
Cr
Cu
C₈H₅KO₄
Dk
dm²
F⁻
FeCl₃
g
Hg
Hz
H₃PO₄
H₂SO₄
IC
K
kg
KHz
KOH
KOİ
kVa
kW
kWh
K₂CrO₄
L
LOI
mg
mHz

Açıklama

Gümüş iyonu
Gümüş klorür
Gümüş nitrat
Alüminyum oksit
Polialüminyuklorür
Alüminyum sülfat
Sulu Alüminyum sülfat
Arsenik
Baryum
Santigrat derece
Kalsiyum oksit
Karbondioksit
Kadmiyum
Klor iyonu
Çözünmüş organik karbon
Santimetre
Santimetrekaire
Santimetreküüp
Krom
Bakır
Potasyum hidrojen ftalat
Dakika
Desimetrekaire
Florür iyonu
Demir (III) klorür
Gram
Civa
Hertz
Fosforik asit
Sülfürik asit
İnorganik karbon
Kelvin
Kilogram
Kilohertz
Potasyum hidroksit
Kimyasal oksijen ihtiyacı
Kilo volt amper
Kilowatt
Kilowatt saat
Potasyum kromat
Litre
Kızdırma kaybı
Miligram
Megahertz

mL	Mililitre
mm	Milimetre
Mo	Molibden
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
N	Normalite
NaCl	Sodyum klorür
Na ₂ CO ₃	Sodyum karbonat
NaHCO ₃	Sodyum bikarbonat
NaOH	Sodyum hidroksit
Ni	Nikel
Pb	Kurşun
pH	Hidrojen iyon konsantrasyonu
pp	Polipropilen
Sb	Antimon
Se	Selenyum
(SO ₄) ⁻²	Sülfat iyonu
TC	Toplam karbon
TÇK	Toplam çözünen katı
TOK (TOC)	Toplam organik karbon
V	Volt
vb.	Ve benzeri
VS	Uçucu katı madde
W	Watt
Zn	Çinko
≤	Küçük eşit
≥	Büyük eşit
µm	Mikrometre
~	Yaklaşık
µs	Mikro saniye
%	Yüzde

Kısaltmalar

AB (EU)
AC
ADDDY
AISI
BS-EN
CAS
DAF
IMO
ISO
İSKİ
İSTAÇ A. Ş
LTP
MARPOL
NPOC

Açıklama

Avrupa Birliği
Alternatif Akım
Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
İngiltere ve Avrupa Standartları
Amerikan Kimyasal Özetler Servisi
Çözünmüş Hava Flotasyonu
Uluslararası Deniz Örgütü
Uluslararası Standartlar Teşkilatı
İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Tic. A.Ş
Lisansüstü Tez Projesi
Deniz Kirliliği Uluslararası Sözleşmesi
Uçurulamayan Organik Karbon

PRF	Liman Atık Kabul Tesisleri
S/S	Solidifikasyon/Stabilizasyon
SM	Standart Metot
ST	% 2 kadar Karbon İçeren Karbon Çeliği
TSİ	Türkiye Standartları Enstitüsü
TS	Türkiye Standartları
US	Ultrases



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Sesin frekans aralıkları 9
Şekil 2.2.	Ultrases prob b) Ultrases transdüser 9
Şekil 2.3.	a) Ferromanyetik metal b) Piezoelektrik seramik kristal 10
Şekil 2.4.	a) Demülsifier öncesi b) Dümülsifier sonrası 12
Şekil 2.5.	a) Ultrases sonrası b) Ultrases + demülsifier sonrası 12
	Ham petrol emülsiyonundaki su damlacıklarının yayılımı 13
Şekil 2.6.	a) Demülsifikasyon öncesi b) Demülsifikasyon sonrası 13
	c) Ultrases + demülsifikasyon sonrası 13
Şekil 2.7.	Ultrases uygulama öncesi yağ-su emülsiyon karışım görünümü 13
Şekil 2.8.	Ultrases uygulama sonrası yağ-su emülsiyon karışım görünümü 14
	a) 30 dakika sonrası b) 60 dakika sonrası 14
Şekil 3.1.	Atık kabul tesisi (Haydarpaşa Limanı) yer haritası 17
Şekil 3.2.	Liman atık kabul tesisi fizikokimyasal atık su arıtma sürecinin şematik diyagramı 18
Şekil 3.3.	Radyal etkili sürekli ultrases sistemi 20
Şekil 3.4.	Mini filtre pres cihazı 21
Şekil 3.5.	Çalışmada kullanılan koagülan türleri a) Polialüminyumklorür 23
	b) Demir (III) klorür c) Alum 23
Şekil 3.6.	Çalışmada kullanılan alternatif koagülan türleri a) Potasyum 25
	hidroksit b) Demülsifier c) Sodyum hidroksit 25
Şekil 3.7.	DeneySEL çalışma planı şematik gösterimi 34
Şekil 3.8.	Çamur yönetimine ait deneySEL çalışma planı şematik 34
	gösterimi 34
Şekil 3.9.	Deney düzeneği tasarım görünümü 36
Şekil 3.10.	a) Saha uygulaması b) Numune haznesi c) Mini filtre-pres 37
Şekil 4.1.	Ham sulu çamur santrifüj test faz ayrımı a) Üst yağ fazı b) Alt 52
	su fazı c) dip tortu (yağsız katı madde) 52
Şekil 4.2.	Arıtma çamurundaki tehlikeli sınıfta yer alan parametrelerin 55
	zamanla değişimi. a) Su içeriği, b) TOK içeriği c) LOI içeriği, 55
	d) Klorür içeriği 55
Şekil 4.3.	Tesis filtre pres ünitesi 57
Şekil 4.4.	Atıksu arıtım ve çamur oluşum değerleri 57
Şekil 4.5.	Farklı ultrasonik güçlerde ultrases çalışma süresinin çamur su 61
	içeriğine etkisi 61
Şekil 4.6.	Çalışma süresinin ve ultrasonik gücün sintine suyu arıtma 63
	çamurunun toplam organik karbon içeriğine etkisi 63
Şekil 4.7.	Çalışma süresinin ve ultrasonik gücün sintine suyu arıtma 64
	çamurunun çözünmüş karbon içeriğine etkisi 64
Şekil 4.8.	Çalışma süresi ve ultrasonik gücün sintine suyu arıtma 67
	çamurunun kızdırma kaybı içeriğine etkisi 67
Şekil 4.9.	Sintine suyu arıtma çamurunda çalışma süresi ve ultrasonik 68
	gücün toplam çözünen katı içeriğine etkisi 68

Şekil 4.10.	Sintine suyu arıtma çamurunda çalışma süresinin ve ultrasonik gücün klorür içeriğine etkisi	69
Şekil 4.11.	Sulu çamura uygulanan ultrases + koagülan işlem sonrası faz ayrımı için dinlendirilmesi a) 60 dk. b) 120 dk. c) 240 dk.	73
Şekil 4.12.	Sulu çamura uygulanan koagülan işlemi sonrası faz ayrımı için dinlendirilmesi a) Potasyum metoksit b) Demülsifier c) Sodyum hidroksit	74
Şekil 4.13.	Ultrases + koagülan sonrası işlenmiş sulu çamurun faz ayrımı için dinlendirilmesi a) Potasyum metoksit b) Demülsifier c) Sodyum hidroksit	76
Şekil 4.14.	Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin çözünmüş organik karbon üzerine etkisi	79
Şekil 4.15.	Çamur kekinde ÇOK giderim mukayesesi	80
Şekil 4.16.	Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin toplam çözünen katı üzerine etkisi	81
Şekil 4.17.	Çamur kekinde TÇK giderim mukayesesi	82
Şekil 4.18.	Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin klorür üzerine etkisi	83
Şekil 4.19.	Çamur kekinde Klorür giderim mukayesesi	84
Şekil 4.20.	Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin toplam organik karbon üzerine etkisi	85
Şekil 4.21.	Çamur kekinde TOK giderim mukayesesi	86
Şekil 4.22.	Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin su muhtevası üzerine etkisi	86
Şekil 4.23.	Çamur kekinde SU giderim mukayesesi	87
Şekil 4.24.	Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin kızdırma kaybı üzerine etkisi	88
Şekil 4.25.	Çamur kekinde LOI giderim mukayesesi	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Ultrases çamur susuzlaştırma uygulamaları	15
Çizelge 3.1. US reaktörünün teknik özellikleri	20
Çizelge 3.2. Mini filtre pres ve filtre pres bezi teknik özellikler	21
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan koagülanların özellikleri	26
Çizelge 3.4. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz standartları ve işlem prosedürleri	26
Çizelge 3.5. Tesiste arıtılan atık su miktarları (2016-2020 yılları arası)	29
Çizelge 3.6. Arıtılan atıksu hacmine göre oluşan muhtemel arıtma çamur miktarı	29
Çizelge 3.7. Ultrases destekli çamur iyileştirmede kullanılacak gerekli reaktör ve modül hesaplamaları	31
Çizelge 3.8. Ultrases sistemi yıllık elektrik harcaması	32
Çizelge 3.9. Ultrases sistemi ile yapılacak toplam gider ve tasarruf	33
Çizelge 3.10. Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik (ADDDY) Ek-2C analizleri	40
Çizelge 3.11. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlere ait metot ve cihazlar	47
Çizelge 4.1. Sintine atıksuyu arıtma çamuru karakterizasyon analiz sonuçları (2022 yılı)	50
Çizelge 4.2. Sintine atıksuyu arıtma çamuru karakterizasyon analiz sonuçları (2020-2022 yılları arası)	53
Çizelge 4.3. Ultrasonik güç ve işletme süresinin çamur su içeriğine (nem) etkisi analiz sonuçları	60
Çizelge 4.4. Ultrasonik güç ve işletme süresinin toplam organik karbon içeriğine etkisi analiz sonuçları	63
Çizelge 4.5. Ultrasonik güç ve işletme süresinin çözünmüş organik karbon içeriğine etkisi analiz sonuçları	64
Çizelge 4.6. Ultrasonik güç ve işletme süresinin kızdırma kaybı içeriğine etkisi analiz sonuçları	66
Çizelge 4.7. Ultrasonik güç ve işletme süresinin toplam çözünen katı üzerine etkisi analiz sonuçları	68
Çizelge 4.8. Ultrasonik güç ve işletme süresinin klorür üzerine etkisi analiz sonuçları	69
Çizelge 4.9. Koagülanın işlenmemiş (ham) sulu çamur üzerindeki faz ayırma sonuçları	72
Çizelge 4.10. Ultrases + koagülan ile işlenmiş sulu çamura ait faz ayırma sonuçları	72
Çizelge 4.11. Koagülanın işlenmemiş (ham) sulu çamur üzerindeki faz ayırma sonuçları	74

Çizelge 4.12.	Ultras + koagulan ile işlenmiş sulu çamura ait faz ayrım sonuçları	74
Çizelge 4.13.	Ultras + koagulan ile işlenmiş sulu çamura ait faz ayrım sonuçları	75
Çizelge 4.14.	Ultrasonik güç, koagulan ve işletme süresinin hedef parametreler üzerine etkisinin incelenmesi	77
Çizelge 4.15.	Ultrasonik güç, koagulan ve işletme süresinin hedef parametreler üzerine etkisinin incelenmesi	78



1. GİRİŞ

Hali hazırda dünya ticaretinin % 90'ı deniz yoluyla yapılmaktadır. Ancak gemilerin makine bölmeleri, koferdamlar, antrepolar, vb. bölgelerdeki tank içi yıkama sularının usulsüz bir şekilde denizlere deşarj edilmesi ciddi oranda deniz kirliliğini meydana gelmektedir. Deşarj edilen bu atıklar, yüksek oranda yağ, petrol türevleri ve hidrokarbonları içeren kirli balast, slop, çamur ve sintine ve suları olarak sınıflandırılmaktadır (Ulucan & Kurt, 2015). Bu atıklardaki toksik bileşikler hem sucul yaşamı olumsuz etkilemekte hem de besin zincirine karışarak insanların sağlık açısından olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır (Beyer vd., 2016). Atık maddelerin deniz ortamına salınması hem ekosistem hem de insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Bu deşarjlar, okyanus asitliğini değiştirmekte zararlı maddeleri besin zincirine sokarak kimyasal kirliliğin meydana getirmekte, bozulmayan atık ve plastiklerin yutulması nedeniyle deniz hayvanlarının ölümü gibi çeşitli olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Deniz çöpünün birikmesi aynı zamanda kıyı şeridinin doğal ve ekonomik değeri üzerinde de olumsuz etkilere vardır (Difeto & Hitchens, 2010; Peters vd., 2019). Kara kaynaklı kaynaklar şu anda birçok deniz bölgesindeki deniz çöpünün çoğunluğunu oluştururken, gemiler ise okyanusa boşaltılan küresel atıkların yaklaşık % 20'sine katkıda bulunmaktadır. Avrupa Komisyonu, alınan kararlar gereği yapılan bazı iyileştirmelere rağmen, her yıl AB deniz sularına, gemilerden hâlâ 60 000 ila 300 000 ton atık, ayrıca ticari gemilerden 31 000 metreküp yağlı atık ve 136 000 metreküp kanalizasyon/sintine suyu atığının illegal olarak boşaltıldığını tahmin etmektedir. Gemilerden kaynaklanan atıklar; sintine, slop, slaç, petrol ve hidrokarbon içeren kirli balast suları ile yüksek oranda petrol ve türevleridir (Cansu, 2008; Özdoğan vd., 2018; Ulucan, 2011). Bunlardan yüksek petrol ve petrol içeriğiyle bilinen sintine suyu, deniz taşıtlarından kaynaklanan önemli bir kirleticisi olarak kabul edilmektedir. Bu atıksu, gemi gövdesinin en alt iç kısmında, makine dairesi ve kazanın altında depolanmakta ve atık su ile deniz suyundan oluşan aşındırıcı bir karışım oluşturmaktadır (Körbahti & Artut, 2010; Öz & Çetin, 2021; Özdoğan vd., 2023). Sintine suyunun spesifik kirlilik özellikleri, gemi tipine ve çalışma moduna bağlı olarak değişmektedir. Sintine suyunda karşılaşılan yaygın kirleticiler arasında yakıtlar, yağlar, gres, deterjanlar, yüzey aktif maddeler, solventler ve tuzlar bulunur. Sintine suyunun deniz yaşam alanlarına boşaltılması, yoğunluğunun suya göre daha düşük olması

nedeniyle su yüzeyinde yağ bazlı bir tabaka oluşturarak, deniz suyunda çözünmüş oksijen seviyelerini ve güneş ışığı nüfuzunun azalması gibi olumsuz etkiler doğurmaktadır (Öz & Çetin, 2021; Özdoğan vd., 2023). Ayrıca sintine suyunun salınması balıkların ve kuşların sırasıyla solungaçlarına ve tüyelerine yapıştığı için önemli ölümlere yol açmaktadır. Deniz çöplerinin önemli bir kısmının karasal kaynaklardan kaynaklandığı belirtilmekle birlikte, deniz ve kıyı ekosistemlerinin korunması açısından gemilerden atık boşaltımının sınırlandırılması büyük önem taşımaktadır. Yetkililer için denizdeki atıkların yasal olup olmadığını tespit etmek oldukça zordur. Uluslararası hukuk ve AB düzenlemeleri uyarınca gemiler, yolculukları sırasında ürettikleri atıkları limanlarda belirlenen atık kabul tesislerine vermekle yasal olarak yükümlüyken, AB limanlarının da atıklarını veren bu gemiler için bu tesisleri sağlamakla yükümlülüğü bulunmaktadır (EU Legislation, 2021; Satir vd., 2007). Bu tedbirlerin uygulanmasına rağmen denizlere yapılan illegal deşarjlar devam etmektedir. Avrupa Komisyonu bu konuyu ele almak için, Ocak 2018'de gemi atıklarının toplanmasının iyileştirilmesi ve limanlarda deniz taşımacılığı operasyonlarının verimli bir şekilde işleyişinin sağlanması amacıyla yeni bir yasa teklifi sundu. İlgili kurumlar arasındaki müzakerelerin tamamlanmasıyla birlikte, Üye Devletlere direktif hükümlerini kendi ulusal kanunlarına aktarmaları için 28 Haziran 2021 tarihine kadar süre verildi (EU Legislation, 2021; Özdoğan vd., 2021). Gemilerden kaynaklanan deniz kirliliğinin önüne geçilmesi için uluslararası ve bölgesel anlaşmalar yapılmıştır. Bu anlaşmaların üye ülkelere getirmiş olduğu yaptırımlardan biri de gemi limanlarında ve tanker terminallerinde atık kabul tesisleri inşa etme zorunluluğudur (MARPOL 73/78) Practical Guide, 2015). Liman atık kabul tesisleri, gemi atıklarının, ikincil deniz kirliliği oluşturmayacak şekilde, uluslararası anlaşmalar çerçevesinde kontrollü bir şekilde toplandığı ve işlendiği arıtma tesisleridir. Gemi atık yağlarının kabul edildiği tesislerde temel proses, yağın sudan ayrıştırılmasıdır. Bu tesislerde proses gereği ilk olarak yağ ve su birbirinden ayrılmakta, yağdan arındırılmış su arıtma ünitesine gönderilirken, ayrılan yağ ise ekonomik olarak yeniden kullanılmak üzere geri kazanım tesisine gönderilmektedir. Suyun fizikokimyasal arıtımında oluşan arıtma çamurları, bu tür tesisler için hem miktar hem yağ içeriği hem de tehlikeli maddelerin varlığı açısından üç büyük zorluk teşkil etmektedir.

Çamur miktarı: Bu liman tesislerin su arıtma prosesindeki kimyasal dozaj ünitelerinin otomasyonsuz olması, gelen atık su bileşenlerinin değişkenliği, beklenen teorik değerden daha yüksek çamur miktarına neden olabilmektedir.

Çamurdaki yağ içeriği: Atık sudan yağı ayırmak için emülsiyon kırıcı kimyasallar kullanılmasına rağmen, bir miktar yağ suda çeşitli şekillerde kalarak arıtma çamuruna geçmektedir. Bu durum flokların parçalanmasıyla son çıkış tankındaki çökeltme işlemini olumsuz yönde etkileyerek hem çökeltme işleminin olumsuz etkilenmesine hem de askıda katı maddelerin deşarj hattından arıtılmış suya kaçmasına neden olmaktadır. Proses çıktısı olan arıtma çamurları geçici atık depolama için big bag olarak adlandırılan çuvallara konulmaktadır. Çamurun bünyesine hapsolmuş yağ, atık çamurun nihai bertaraf alanına taşınması esnasında big bag çuvallardan sızarak depolama alanında görüntü kirliliği, toprak kirliliği ve koku oluşumu gibi sorunlara neden olmaktadır.

Çamurdaki tehlikeli madde içeriği: Yönetmelik Ek 2C (*Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*, 2019)'ye göre çamurun tehlike sınıfının belirlenmesinde As, Cd, Pb gibi (ağır) metaller ile F⁻, SO₄⁻², ÇOK, TÇK, TOK, LOI, su muhtevası gibi inorganik ve organik parametrelerin analizi yapılmaktadır. Sintine suyu arıtma çamurunun tehlikeli sınıfta yer almasına sebep olan (Ek-2C 1. sınıf değerini aşan) parametreler genellikle Klorür, TOK, LOI, TÇK, ÇOK ve su muhtevası gibi parametrelerdir. Çamur tehlikeli madde kategorisinde yer aldığından tarımsal amaçlı veya dolgu/örtü malzemesi olarak kullanılamamaktadır.

Açıkça görüldüğü gibi, işletme modu veya kapasitesindeki farklılıklara bakılmaksızın, atık su arıtma tesislerinde çamur üretimi ve yönetimi önemli çevresel sorunlardır. Çamur, öncelikle anaerobik ve aerobik sindirim gibi biyolojik stabilizasyon yöntemleriyle işlenen karmaşık bir malzemedir. Bununla birlikte, karmaşık organiklerin, mikrobiyal topakların, hücre dışı polimerik maddelerin ve çeşitli inhibitör bileşiklerin varlığı, bu yöntemlerin etkinliğini önemli ölçüde engellemektedir. Bu sınırlayıcı faktörlerin üstesinden gelmek için literatürde tek başına veya kombinasyon halinde kullanılabilecek çeşitli ön arıtma/arıtma teknolojileri önerilmektedir. Yöntem seçimi doğrudan çamurun türü (birincil veya ikincil çamur) ve özellikleriyle ilgilidir. Bağımsız ön arıtma yöntemlerine örnek olarak termal hidroliz (Abelleira-Pereira vd., 2015), ultrasonik işlemler (Cano vd., 2015) , Fenton oksidasyonu (Şahinkaya vd., 2015) ve mekanik susuzlaştırma (Ruffino vd., 2015) işlemlerini sıralayabiliriz. Bu ön arıtma süreçlerini sıklıkla anaerobik arıtma

takip eder. Ayrıca bahsedilen ön arıtma yöntemleri aynı anda da kullanılabilir. Örneğin ultrasonik ve fenton süreçlerini birleştiren bir ön arıtma çalışmada, çözünabilir kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) konsantrasyonunun yaklaşık iki kat arttığı gözlemlenmiştir (Gong vd., 2015). Çamur arıtma yöntemlerinin kombinasyonu veya modifikasyonu, çamurun azaltılması, çamurun parçalanması, toksisitesinin en aza indirilmesi ve biyoenerji üretimi gibi faydalar elde etmeyi amaçlamaktadır. Çamur arıtma yöntemlerinin seçimi öncelikle yüksek enerji gereksinimleri ve çevre koşulları tarafından belirlenmektedir.

Gemi atıkları ile ilgili olarak, liman atık kabul tesislerine kabul edilen sintine ve yağlı atık suların arıtılması sonucu oluşan atık çamurlar, yüklenici firma tarafından varil başına belirli bir maliyetle bertaraf edilmek üzere toplanmaktadır. Oluşan atık çamurdan alınan numuneler, tehlikesiz veya tehlikeli olmasına göre varil başına değerlendirilmekte ve fiyatlandırılmaktadır (Gensure, 1995). Sintine suyu arıtımında, ultrafiltrasyon membranları ve bunu takip eden fotokatalitik işlemler, arıtılmış sintine suyunun denize deşarj edilmesini sağlamıştır (Karakulski & Gryta, 2017). Ancak sintine suyu arıtımında flotasyon, santrifüj, filtrasyon ve flokülasyon gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yine de sintine suyunun hızlı homojenizasyonu nedeniyle bu arıtma yöntemleri çoğu zaman istenen verimliliği sağlayamamaktadır (Rincón & La Motta, 2014). Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) denizlerin gemiler tarafından kirletilmesinin önlenmesi sözleşmesi (Marpol 73/78) şartlarına göre gros tonajı 400 veya daha fazla olan gemilerin, gemide yağlı sintine suyu arıtma teknolojilerini bulundurması gerekmektedir. Bu yönetmelik, 15 mg/L'den daha az yağ/gres içeren arıtılmış sintine suyunun kıyıda 12 deniz milinden fazla mesafeye boşaltılmasına izin vermektedir. Ancak bu arıtma sonucu ortaya çıkan sintine çamurlarının maliyetten kaçınmak amacıyla yasa dışı olarak doğrudan denizlere ve okyanuslara boşaltıldığı gözlemlenmiştir (Körbahti & Artut, 2010). Sintine suyunun arıtımı için çeşitli yöntemler araştırılırken (Church vd., 2019; Emadian vd., 2015; Tawakkoly vd., 2019) arıtma nedeniyle oluşan çamurların bertarafına ilişkin araştırmalar literatürde ihmal edilmiştir.

Tesiste yapılan sintine suyu arıtma çamurunun karakterizasyon çalışmalarında çamurun ulusal yönetmeliklere Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik (ADDY-Ek-2C) Kriterleri'ne göre birinci sınıf tehlike kategorisine girdiği görülmüştür. Dolayısıyla bu çamurun birinci sınıf çöp depolama sahasına gömülerek bertaraf edilmesi mümkün

değildir. Bu çalışmada gemi atık sintine suyu arıtma çamurunun karakterizasyon parametrelerinden altı tanesi çamurun birinci sınıf tehlikeli olarak sınıflandırılmasına yol açmıştır. Bu parametreler çamurun su içeriğini, kızdırma kaybını, toplam organik karbonu, çözülmüş organik karbonu, toplam çözülmüş katıları ve klor miktarını içermektedir. Uygun bertaraf için çamur içerisindeki değerlerin mevzuata uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Sintine suyu arıtımına yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, bilgimiz dahilinde sintine suyunun arıtılması sonucu ortaya çıkan arıtma çamurlarının bertarafına ilişkin herhangi bir çalışma henüz mevcut değildir. Mevcut literatür, evsel atıksu arıtımından kaynaklanan çamurların ve çeşitli endüstriyel yağlı çamurların yönetimini ele alan çok sayıda çalışma içermektedir. Örnekler arasında petrol çamuru ve tank dibi çamurunun susuzlaştırılması (Al-Futaisi vd., 2007; Gallego vd., 2007) , petrol geri kazanımı (Al-Zahrani & Putra, 2013), petrol bileşikleri ile kirlenmiş toprağın iyileştirilmesi (Li vd., 2013) ve çamurun tuzdan arındırılması (Mirghaffari, 2017) çalışmaları yer almaktadır.

Dolayısıyla bu araştırmanın temel amacı, Türkiye'nin sayılı büyük liman atık kabul tesislerinden birinde, sintine suyu arıtma prosesi sırasında oluşan arıtma çamurunun özelliklerini iyileştirmek için verimli, uygun maliyetli, çevre dostu ve sağlık bilincine sahip bir yöntemin araştırılmasıdır. Tehlikeli atık olarak sınıflandırılan, taşıma ve depolama konusunda zorluklarla karşılaşan sintine suyu arıtma çamurunun ulusal mevzuat kriterlerine uygun hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Arıtma Çamurları Bertaraf Yöntemleri

Tek başına kullanılan ön arıtma metotlarına örnek olarak termal hidroliz (Abelleira-Pereira vd., 2015), ultrases prosesi (Cano vd., 2015), fenton (Şahinkaya vd., 2015) ve mekanik susuzlaştırma (Ruffino vd., 2015) verilebilir. Bu ön arıtma proseslerini genellikle anaerobik arıtma takip etmektedir. Ayrıca bahsedilen ön arıtma yöntemleri aynı anda da kullanılabilir. Örneğin ultrasonik ve fenton proseslerin kombine olarak kullanıldığı bir ön arıtma çalışmasında çözünabilir KOİ miktarı yaklaşık iki katına kadar yükseltilmiştir (Gong vd., 2015). Çamur arıtma yöntemlerinin bir arada kullanılması ya da modifiye edilmesiyle çamur azaltımı, çamurun bozunması, toksisitesinin minimize edilmesi ve biyoenerji üretimi gibi faydalar hedeflenmektedir. Çamur arıtma yöntemlerinin seçiminde yüksek enerji gereksinimi ve çevre şartları başlıca belirleyici faktörler olmaktadır.

Gemi atıkları söz konusu olduğunda, liman atık kabul tesisine kabul edilen sintine ve yağlı atıksuların arıtılması sonucu oluşan atık çamurlar, yüklenici firma tarafından belli bir ücret karşılığında alınarak bertaraf edilmektedir. Oluşan atık çamurdan alınan numuneler incelenerek tehlikesiz ve tehlikeli olma durumuna göre varil başına bertaraf maliyeti olarak ücretlendirilmektedir (Gensure, 1995). Sintine suyu arıtımında ultrafiltrasyon membranları ve sonrasında kullanılan fotokatalitik proses, arıtılmış sintine suyunun denize deşarjına imkân sağlamıştır (Karakulski vd., 1998). Bunun dışında, yüzdürme, santrifüj, süzme ve yumaklaştırma gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler sintine sularının arıtımı için yaygın olarak kullanılsa da sintine suyunun çabuk homojonize olmasından dolayı, bu tip arıtma metotlarından istenilen verim alınamamaktadır (Rincón & La Motta, 2014). Deniz örgütünün denizlere yönelik kirliliğinin önlenmesi için yapmış olduğu Marpol 73/78 sözleşmesi gereği, 400 groston ve üzerinde olan gemiler bünyelerinde yağlı sintine suyu arıtma teknolojileri bulundurmak zorundadır. Bu düzenleme ile arıtılan ve 15 mg/L den daha az yağ/gres içeren sintine sularının karadan 12 deniz milinden daha uzakta deşarj edilebilmesine izin verilmiştir. Ancak bu suların arıtımı sonucu oluşan sintine çamurlarının ise maliyetten kaçınmak adına illegal olarak doğrudan denizlere ve okyanuslara boşaltıldığı görülmektedir.

(Körbahti & Artut, 2010). Literatürde sintine atıksularının arıtımına yönelik farklı metotlar araştırılmaya devam ederken (Emadian vd., 2015; Tawakkoly vd., 2019) arıtma sonucu oluşan çamurların bertarafı ile ilgili araştırmalar ihmal edilmektedir.

Literatürde çamur bertarafında kullanılan yöntemler arasından proses çıktısı olan yağlı çamur arıtılmasında uygulanan oksidasyon çabuk ve hızlı sonuç vererek ortalama % 90 oranında yağ geri kazanımı sağlarken, yüksek maliyet, kompleks ekipman gereksinimi ve yüksek çevresel kirlilik ile karakterize edilmektedir (Cui vd., 2009; Ferrarese vd., 2008; Mater vd., 2006). Yağlı çamur arıtımında kullanılan bir diğer metot olan elektro kinetik proses ile yapılan uygulamada ortalama % 60 oranında çabuk ve verimli bir şekilde yağ geri kazanımı sağlanırken, bu uygulamanın karışık ve ancak küçük ölçekli olarak uygulanabilmesi bir dezavantaj olarak görülmektedir (L. Yang vd., 2005). Yapılan bir diğer uygulama olan ultrasonik proseste çabuk sonuç alınabilmesi, yüksek verimli olması ve çevresel kirlilik oluşturmada çamurdaki yağı ortalama % 70 geri kazanabilmesi başlıca avantajları olurken, yüksek maliyetli ve laboratuvar ölçekli olması ise prosesin büyük ölçekli tesislerde ele alınmasını kısıtlamaktadır (N. Xu vd., 2009). Yine benzer yağlı çamurların bertarafında piroliz yöntemi basit işletme prosedürüne sahip olmasının yanı sıra yüksek maliyet ve enerji gereksinimi bir dezavantaj olmaktadır (J. Liu vd., 2009). Kullanılan bir diğer proses olan yakma yöntemi hızlı ve verimli sonuç verirken, yüksek maliyeti ve hava kirliliğine sebebiyet vermesi yöntemin başlıca kısıtları olmaktadır (Scala & Chirone, 2004). Düşük işletme maliyeti ve büyük ölçekli kullanım imkanının desteklenmesi, yağlı çamurların araziye serilerek tarım uygulamalarında tercih edilmesine sebep olmaktadır. Ancak, çamur ıslah sürecinin uzun olması, geniş alan ihtiyacı ve toprak kirliliği açısından çevresel kaygılar oluşturmaması bu yöntemin dezavantajı olmaktadır (Admon vd., 2001).

Bünyesinde yağ içeren arıtma çamurlarının yönetiminde ele alınacak iyileştirme metotları, seçilecek yöntem, maliyet ve mevcut bertaraf yaklaşımlarına göre değişebilir. Bu tür çamurların yönetimi için seçilecek metotların performans ve verimliliğini değerlendirmek açısından bazı özel analiz yaklaşımlar gerekebilir. Yağlı çamur üreten sintine sularının arıtma çamurları için, çevre ve sağlık açısından tehdit oluşturmayan, ekonomik açıdan faydalı alternatif bir çamur yönetim metodu geliştirilmesi elzemdir.

Ayrıca;

1- Literatürde, atıksu arıtma çamurlarının yönetimi konusuna bazı çalışmalar bulunsa da sintine atıksularının arıtma çamurlarıyla ilgili özel bir araştırma yapılmadığı görülmektedir.

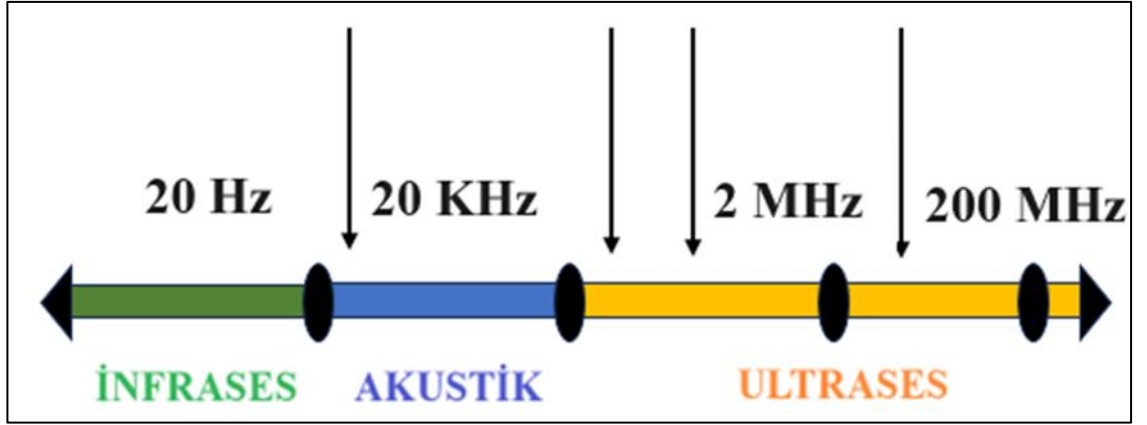
2- Literatürde petrol endüstrisinin üretim proseslerinde dip ürün olarak adlandırılan yağlı çamurlardan yağ geri kazanımı üzerine araştırmalar yer almasına rağmen, benzer sektörde yer alan sintine atıksularının arıtma çamurlarının yağ içeriğinin azaltılmasına yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3- Ulusal düzeyde yapılan akademik tez çalışmaları dikkate alındığında ise direkt olarak liman atık kabul tesisleri ile ilgili sadece 2 yüksek lisans çalışması ve sintine sularının arıtımına yönelik olarak ise 8 yüksek lisans tez çalışması olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sintine atıksularının arıtma çalışmalarının gerçek ölçekte yönetimi ile ilgili bir çalışmanın bulunmadığı da görülmektedir. Bu nedenle, susuzlaştırılması ve yağının alınmasının zorluğu sebebiyle PRF'lerin başlıca problemi olan yüksek miktardaki sintine suyu arıtma çamurları ve tehlikeli madde kategorisine giren içeriği bu çamurlarla ilgili özel önlemlerin ve araştırmaların yürütülmesini gerektirmektedir.

Petrol türevli-yağlı çamurların arıtılması ve bertarafı, işletmeler ve yerel yönetimler için oldukça zor bir yükümlülüktür. Bertaraf işlemleri işletme maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yakma, depolama ve biyolojik arıtma gibi çeşitli prosesler ve geleneksel teknolojilerin çoğu, verimlilik, işletme zorluğu ve maliyet gibi bazı sınırlamalar veya çevre dostu olmamaları nedeniyle ticari olarak pratik bulunmamıştır. Bu çalışma kapsamında ilk defa gemi sintine atıksuyu arıtma çamurunun özelliklerinin iyileştirilmesinde ultrases prosesi uygulanmıştır. Ultrases prosesi ile ilgili genel bilgiler takip eden bölümde verilmiştir.

2.2. Ultrases

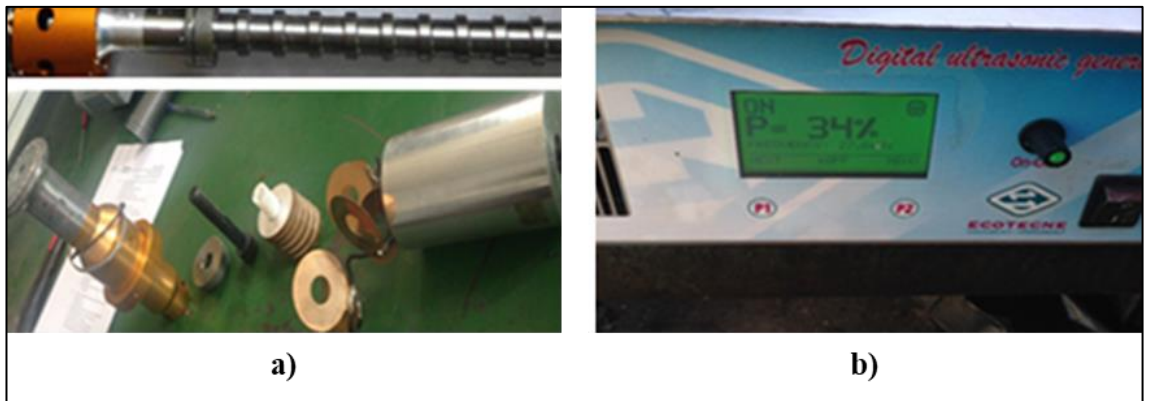
Mevcut verilere dayanarak, ultrases terimi, akustik dalgaların yüksek frekansta bir türünü ifade eder (Büyüktanır, 2010). Bu tür ses dalgaları, insan kulağının duyamayacağı kadar yüksek frekansta olabilir. Örneğin, gaz ortamında 5 MHz 'ye kadar yükselebilen ultrases, sıvı ve katı ortamlarda 500 MHz'e kadar var olabilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Sesin frekans aralıkları (Zengi, 2011)

2.3. Ultrases Üretimi

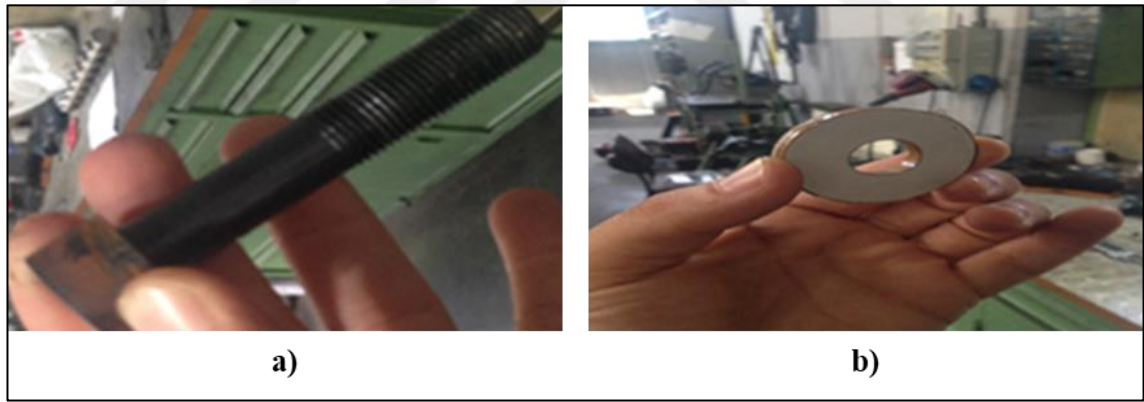
Ultrases üretimi, piezoelektrik etkilerden faydalanmak amacıyla prob veya transdüser olarak adlandırılan düzeneklerin kullanılması ile gerçekleştirilir (Şekil 2.2). Bazı kristal ve seramik malzemeler, dışarıdan mekanik bir baskı uygulandığında, bu malzemeler üzerinde elektriksel bir gerilim oluşmasına yol açan piezoelektrik özelliklere sahiptir. Piezoelektrik etki, ilk defa Pierre ve Jacques Curie adlı iki kardeşin 1880 yılında kristaller üzerinde yaptıkları araştırma sonucunda keşfedilmiştir. Bu çalışmada, kristallerin üzerine bir ağırlık bindirildiğinde veya eksenleri boyunca sıkıştırıldığında piezoelektrik olarak adlandırılan bir gerilimin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir (Cansu, 2008).



Şekil 2.2. a) Ultrases prob b) Ultrases transdüser

Piezoelektrik karakteristikler sergileyen kristaller, genellikle disk veya prizma şeklinde boyutlandırılır ve yüzeyleri ince bir iletken metal (örneğin altın, gümüş veya alüminyum)

ile kaplanır. Bu seramik kristaller Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Bu kristallerin alt ve üst yüzeylerine mekanik bir basınç uygulandığında, yüzeylerde kutuplaşmalar meydana gelirken tam tersi bir durumda ise voltaj frekansına bağlı olarak hızlı bir şekilde uzama ve kısaltmalar gözlemlenir. Bu mekanik uzama ve kısaltmalar, ultrasesi oluşturur (Büyüktanır, 2010). Başka bir ifadeyle, piezoelektrik bir kristalin çift yönlü bir etki sergilediğini belirtmek mümkündür. Piezoelektrik özellik gösteren kristallere yüksek bir basınç uygulandığında elektrik üretilirken, düşük voltaj uygulandığında ise frekans (titreşim) üretilir. Elektrik alanında boyutları değişebilen maddelere ferroelektrik madde denir. Şekil 2.3 a'da görülen prob mekanizmasının içinde bulunan ferroelektrik madde, transdüserden gelen elektrik alanına maruz kaldığında, metal çubuk boyunda nanometrik ölçeklerde uzama ve kısaltmalar meydana gelir. Bu ferroelektrik metaldeki uzama ve kısalma hareketleri, metal çubuk yönünde bulunan piezoelektrik seramik kristallere iletilir. Kristaller üzerindeki bu hareketler, kristallerin üzerinde titreşim oluşturarak radial bir şekilde probun başından uç kısmına kadar iletilir. Bu şekilde belirli frekans aralıklarına sahip titreşimler üretilmiş olur (İngeç & Tekin, 2004).



Şekil 2.3. a) Ferromanyetik metal b) Piezoelektrik seramik kristal

Sıvı içindeki ultrases dalgalarının etkisi, kavitasyon oluşumunu tetikler. Kavitasyon, sıvı ortamda basınç değişikliklerinden kaynaklanan baloncuk oluşumu, büyüme ve sonuç olarak patlama ile sonlanır. Ultrases dalgaları sıvı içinde iletilirken, titreşim dalgalarının neden olduğu basınç farklılıkları baloncukların oluşumunu tetikler. Oluşan baloncuklar büyüyerek zamanla iç kısımlara doğru çökmeye başlar. Kavitasyon, sürekli ve kesintili kavitasyon olmak üzere iki çeşittir. Sürekli kavitasyon, kesintili kavitasyona göre daha az

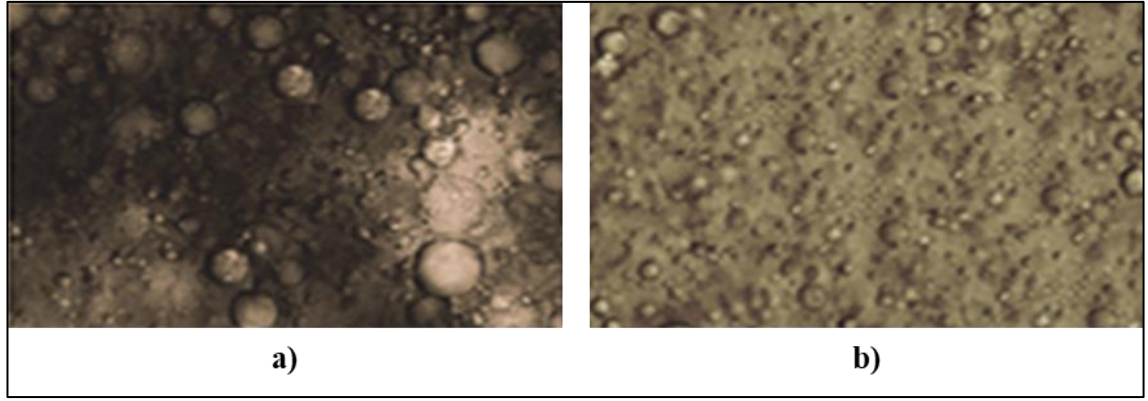
etkilidir. Kesintili kavitasyona maruz kalan baloncuklar daha hızlı çöker ve bu çökme sırasında 2000–4000 Kelvin gibi oldukça yüksek sıcaklığa ve 330 atmosfer basınç değerlerine kadar çıkar. Bu şatlarda, sıvı ortamda bulunan hidrojen atomları ve hidroksil iyonları serbest halde kalır. Bu atomlar ve iyonlar ile başlayan kimyasal reaksiyon zincirleri organik bileşenlerin parçalanmasına ve ayrışmasına yol açar (Zengi, 2011).

2.4. Ultrasesin Fiziksel ve Kimyasal Etkileri

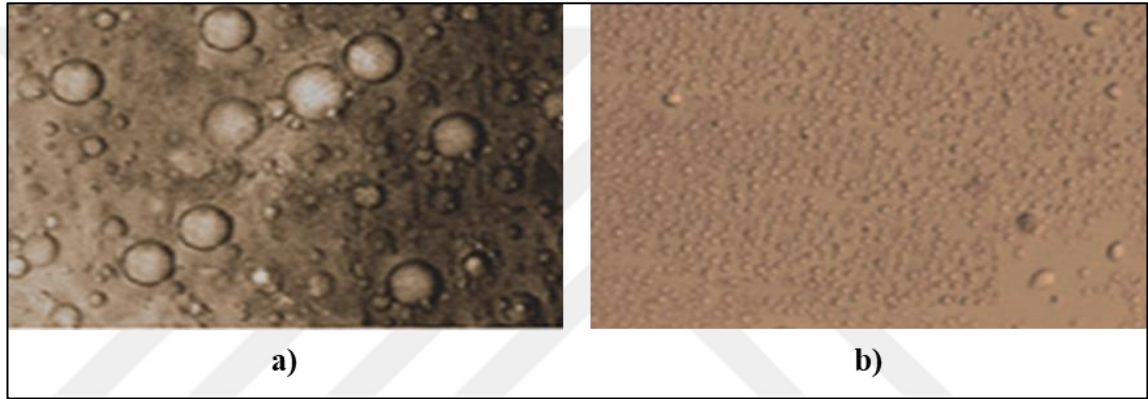
Ultrases dalgası sıvı yüzeyinde yukarı yönlü (hava-sıvı geçiş aralığı) sıvı moleküllerini püskürterek sıvı yüzeyinde bir sis tabakası oluşturur. Bu durum, reaksiyon hızını artırır, oksitlenmeye neden olur, bileşim değişikliklerine yol açarak kaynama sıcaklığını etkilemektedir. Ayrıca molekül zincirlerin parçalanmasına da sebebiyet vermektedir. (Şipal, 2014).

Günümüzde, ultrases teknolojisi, biyolojik araştırmalardan mühendisliğe, jeolojiden endüstriye kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları arasında biyolojik saflaştırma ve hücre parçalama, mühendislikte öğütme ve kesme işlemlerinde, jeolojik maden ve petrol aramada, özellikle metal ve kimya endüstrisi gibi sektörlerde tercih edilmektedir (Zengi, 2011).

Yapılan bir araştırmada, ham petrol yağının içerisindeki suyun emülsiyon halinden ayrılmasına yardımcı olmak amacıyla ultrases teknolojisi ve kimyasal demülsifier kullanılmıştır. Demülsifierin, 70°C üzeri sıcaklıklarda tek başına kullanımı ve ultrases ile kombine olarak kullanımının öncesi ve sonrasına ait farklı görünümeler elde edilmiştir. Bu görünümeler Şekil 2.4 ve 2.5'te sunulmuştur. Bu sonuçlar ultrases uygulamasının suyun ayrılma işlemine olumlu yönde katkı sağladığının açıkça göstergesidir.

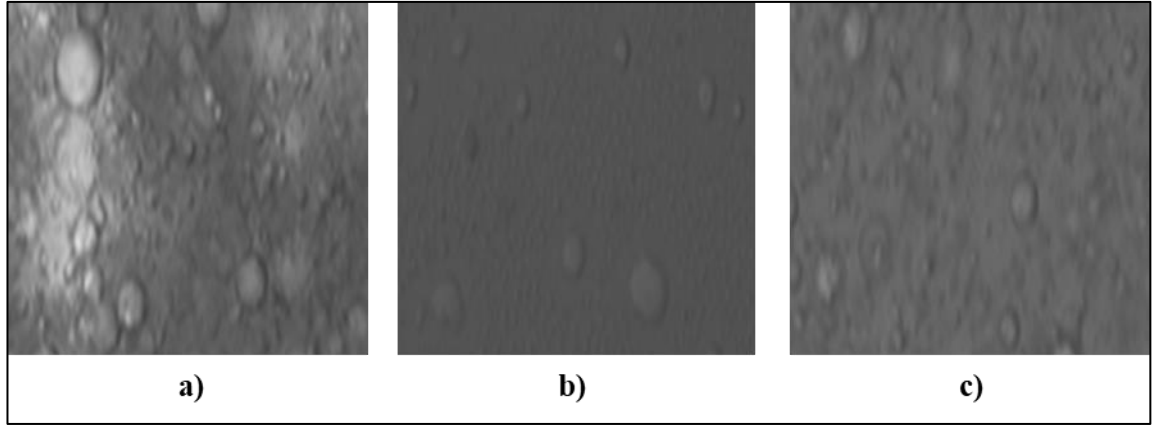


Şekil 2.4. a) Demülsifier öncesi b) Dümülsifier sonrası (Yi vd., 2017)



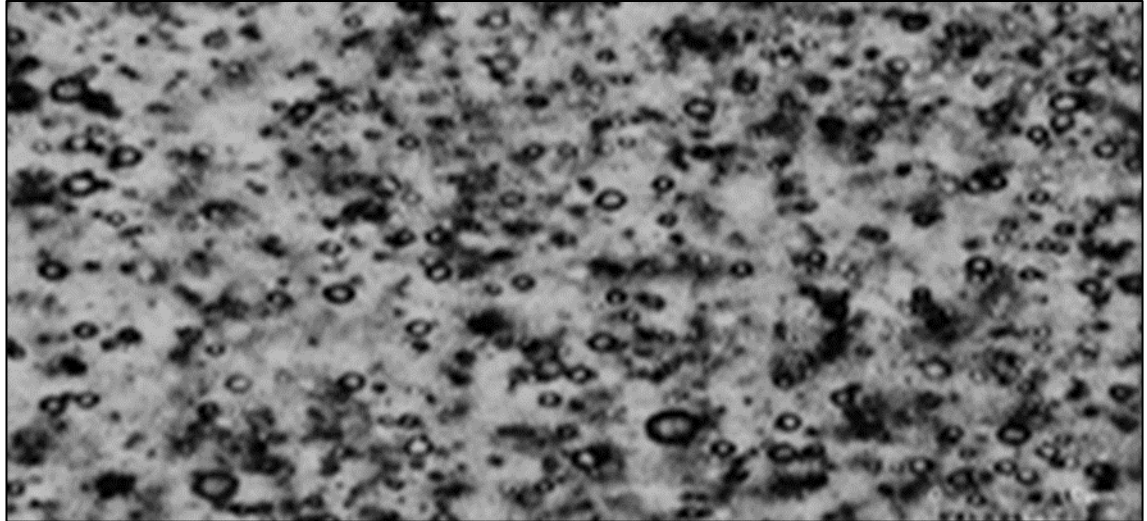
Şekil 2.5. a) Ultrases sonrası b) Ultrases + demülsifier sonrası (Yi vd., 2017)

Doğu Çin bölgesindeki petrol işleme sahasında yapılan bir çalışmada, su ile emülsiyeye olmuş halde bulunan ham petrolün susuzlaştırılmasında ultrases teknolojisi kullanılmıştır. Çalışmada, optimum şartların ultrasonik gücün 100 Watt, işleme süresinin 10 dakika ve kimyasal dozajın ise 50 mg/L olduğu görülmüştür ve böylelikle ultrases ile gerçekleştirilen ham petrol susuzlaştırma işleminin daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu yöntemle, yüksek su içeriğine sahip ham petrolün, düşük su içeriğine sahip ham petrole göre daha hızlı demülsifikasyona uğramış olduğu Şekil 2.6'da görülmektedir.

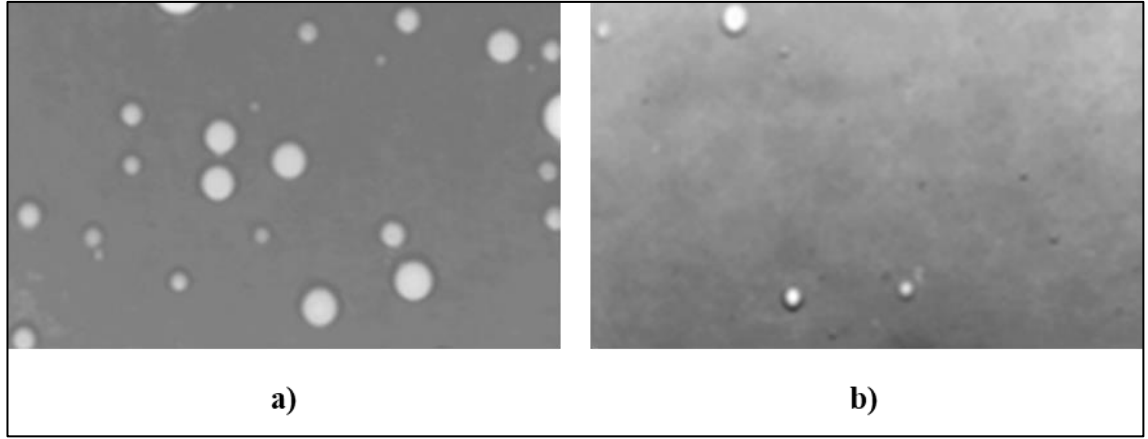


Şekil 2.6. Ham petrol emülsiyonundaki su damlacıklarının yayılımı a) Demülsifikasyon öncesi b) Demülsifikasyon sonrası c) Ultrases + demülsifikasyon sonrası (X. G. Yang vd., 2009)

Ultrasonik yöntem ile ham petrolün susuzlaştırma ve tuzsuzlaştırma yapılan bir diğer araştırmada, ham petrol yağı 80 °C sıcaklıkta, 5 dakika süresince 0,38 W/cm² güçteki ultrasonik ses dalgaları etkisine maruz bırakılmıştır. İşlem sonucunda ham petrolün susuzlaştırma oranının % 92,6, tuzsuzlaştırma oranının ise % 87,9 olduğu gözlenmiştir. Rafineri sonrası nihai tuz konsantrasyonunun 3,85 mg/L değerine düştüğü raporlara kaydedilmiştir. İlgili çalışmaya ait bazı resimler Şekil 2.7 ve 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Ultrases uygulama öncesi yağ-su emülsiyon karışım görünümü (Ye vd., 2008)



Şekil 2.8. Ultrases uygulama sonrası yağ-su emülsiyе karışım görünümü a) 30 dakika sonrası b) 60 dakika sonrası (Ye vd., 2008)

Literatürde yukarıda bahsedilen çalışmalara benzer şekilde yağ/su ve su/yağ emülsiyonlarının fazlara ayrılması için ultrasesin kullanıldığı ve işletme parametrelerinin optimize edildiği pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları Çizelge 2.1 ‘de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1. Ultrases çamur susuzlaştırma uygulamaları

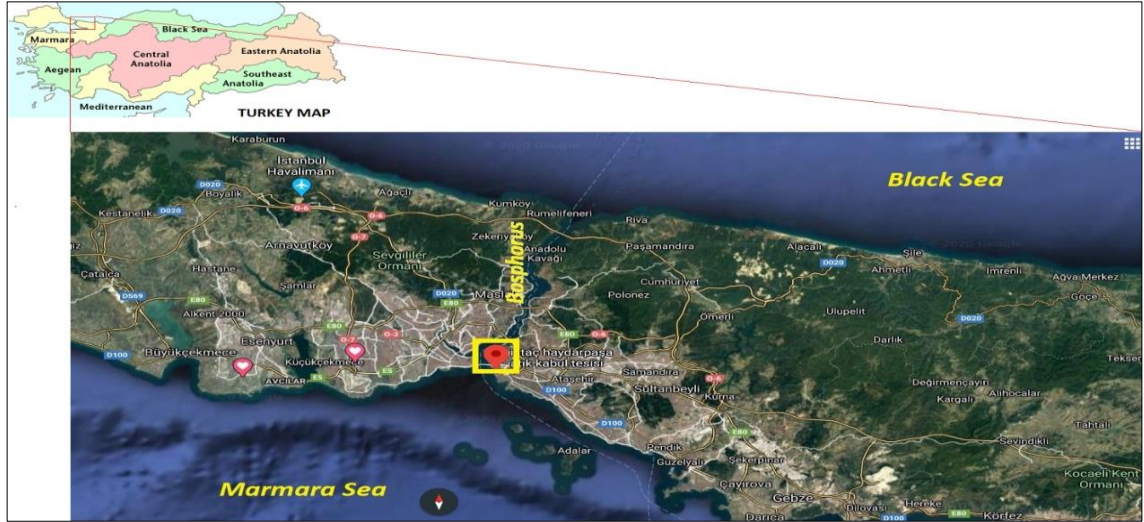
İncelenen/Parametre	Matriks	Yöntem	Deney şartları	Sonuç	Referans
Çamur özümleme, partikül boyutu dağılımı, çamurun suyunu bırakma özelliği	Atıksu arıtma çamuru	Ultrases	300 W 24 kHz	% 14 suyunu bırakma 224 mL/g VS spesifik metan üretimi	(Martínez vd., 2015)
Biyogaz üretim verimi Organik madde giderimi	Atıksu arıtma çamuru	Termal + Ultrases	100°C 1 saat 40 kHz	Biyogaz üretiminde % 19 artış Uçucu katıların gideriminde % 50'nin üzerine yükselme Antibiyotik içeriğinde azalma	(H. Liu vd., 2021)
Metan üretim verimi Organik madde giderimi	Atıksu arıtma çamuru	CaO + Ultrases	20°C sıcaklık 20 kHz 1800 W 0.04 CaO g/g + 150 W	Metan üretiminde % 40 artış Çamur parçalanma hızında artış	(Yuan vd., 2019)
Susuzlaştırma	Atıksu arıtma çamuru	Ultrases	1500 W 20 kHz	Çamur hacminde % 50'nin üzerinde azalma	(Wolski & Zawieja, 2012)
Susuzlaştırma/hacim azaltma	İçme suyu arıtma çamuru	Ultrases (Prob/banyo)	25-160 kHz 0.03-5 W/mL	Susuzlaştırma özelliğinde iyileştirme US ile kimyasal ihtiyacı	(Meng vd., 2018)

Çizelge 2.1’de de özetlenen çalışmalardan görüldüğü gibi ultrases prosesi tek başına ya da termal parçalama veya kimyasal katkı ile kullanıldığında çamurun susuzlaştırılma özelliğini iyileştirdiği ve organik madde içeriğinin azaltılabildiği sonuçları elde edilmiştir. Yine bu çalışmaların genellikle su ve atıksu arıtma tesislerinin arıtma çamurlarına yönelik olduğu görülmektedir. Bilindiği kadarıyla gemi atık sintine atıksu arıtma çamurlarının ultrases prosesi ile iyileştirilmesi ve ıslahına yönelik bir çalışma literatürde mevcut değildir. Ayrıca ultrasesin kullanıldığı mevcut çamur susuzlaştırma çalışmalarında bu yöntemin en uygun bir metot ile kombine olarak kullanılması ve işletme maliyetinin azaltılmasına yönelik çalışmalara hala ihtiyaç duyulduğu rapor edilmektedir (X. Xu, Cao, Wang, vd., 2019). Bu kapsamda bu tezin amacı, Türkiye’nin sayılı büyük liman atık kabul tesislerinden birinde sintine sularının arıtılması sonrasında oluşan arıtma çamuru özelliklerinin iyileştirilmesi için yüksek verimli, ekonomik, çevre ve sağlık dostu ve ülkemiz koşullarında uygulanabilecek optimum iyileştirme yöntemini araştırmaktır. Böylelikle sintine suyu arıtma çamurunun Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2C kriterlerine uygun içeriğe getirilmesi hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında araştırılan yöntemler, materyaller ve deney planı bölüm 3’te verilmiştir.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı

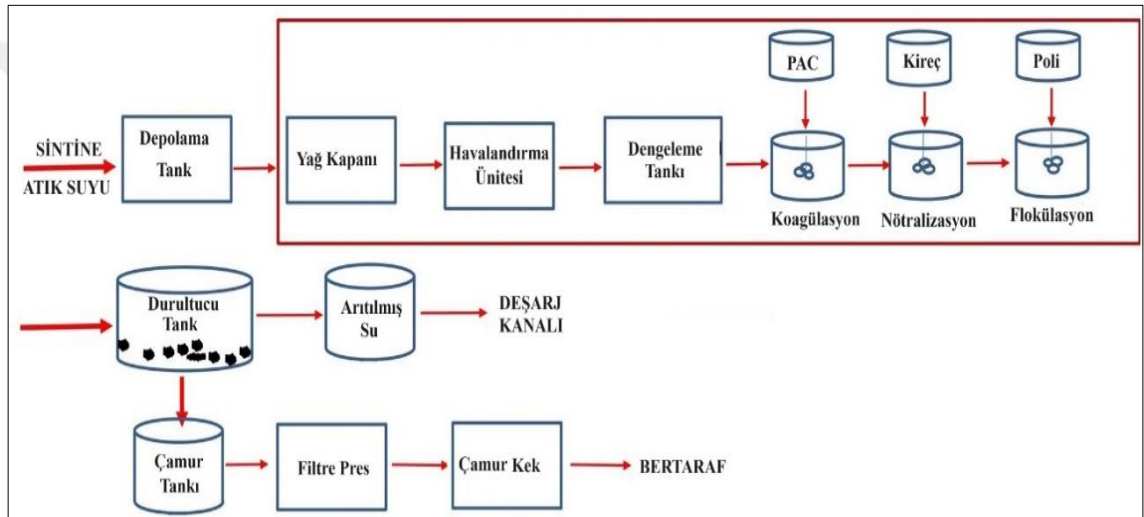
Bu araştırma, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi Türkiye'deki İstanbul Haydarpaşa Limanı Kabul Tesisi'nde gerçekleştirilmiştir. Tesis, Türkiye'de 40.997781N, 29.019017E koordinatlarında bulunmaktadır. 5235 m³ kara tankeri kapasitesi, 12 000 m³ aylık atık toplama kapasitesi ve 1550 m³ depolama kapasitesiyle ülkenin ikinci büyük atık alım tesisidir. Ayrıca yıllık 225 000 m³ atık hacmiyle Avrupa'nın en büyük atık kabul tesisleri arasında yer almaktadır. Tesisin ana işlevi, lisanslı atık alım gemileri tarafından toplanan atık yağları sudan ayırarak ve ayırma sonrası oluşan atıksuyun arıtılmasını sağlamaktır. Tesiste uygulanan süreç susuzlaştırma ve atık su arıtma olmak üzere iki ana adımdan oluşmaktadır. Susuzlaştırma sırasında atık yağda bulunan serbest su uzaklaştırılır ve geride atık yağ kalır. Bu atık yağ daha sonra homojenizasyona ve çökelmeye tabi tutulur. Daha sonra susuz ürünlere ve çamur yağlarına ayrıştırılır. Susuzlaştırılan petrol, sonrasında bir petrol geri kazanım tesisine nakledilmek üzere depolanır. Eş zamanlı olarak proseste oluşan çamur, yakma yoluyla enerji geri kazanımına yönlendirilmektedir.



Şekil 3.1. Atık kabul tesisi (Haydarpaşa Limanı) yer haritası

Atık su arıtımında süreç, askıdaki yağ içeriğinin atık sudan uzaklaştırılmasıyla başlar. Arıtılan atık su daha sonra özel tanklarda pıhtılaşma, nötrleştirme, topaklanma ve arıtılma

dahil olmak üzere çeşitli aşamalardan geçer. Bu aşamalar arıtma işlemi sırasında oluşan çamurun dışarı atılmasını kolaylaştırır. Arıtılan su daha sonra Şekil 3.2'de gösterildiği gibi İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) kanalına deşarj edilmektedir. Tesisteki atık yağların bertarafı ve yönetimi, hidrokarbon bakımından zengin suyun arıtma amaçlı kullanılmasını ve kanalizasyon sistemine deşarj edilmesini içermektedir. Ayrıca tesis, prosesten elde edilen solventin boya inceltici olarak da satışını gerçekleştirmektedir. Ayrıca hafif ve ağır yağ karışımları da çeşitli yağ türleri halinde piyasaya sunulmaktadır. Yağ çamuru (damıtma sonrası dip ürün) olarak bilinen artık ürün, enerji geri kazanımı amacıyla Çevre Bakanlığı tarafından yetkilendirilmiş tesislere nakledilmektedir.



Şekil 3.2. Liman atık kabul tesisi fizikokimyasal atık su arıtma sürecinin şematik diyagramı

3.2. Çamur Numunesi

Çalışmada kullanılan sintine atık suyu arıtma çamuru İstanbul Haydarpaşa Liman Atık Kabul Tesisi içerisindeki atıksu arıtma tesisinden temin edilmiştir. PRF’de lisanslı atık kabul gemilerinin getirdiği atıklar, özel olarak hazırlanmış atık kabul hatları ile yetkili personel tarafından tasarlanan depolama tanklarına alınmaktadır. Gemi ve atık yağın ilk doğal ayrımı için (yoğunluk farkından dolayı) farklı tanklara aktarılmakta ve dinlendirilmektedir (prosedüre göre en az 6 saat). Süreç daha sonra iki şekilde devam etmektedir: ilki gemi atık yağının susuzlaştırılması, diğeri ise atık su arıtımıdır. Bekletme ve ısıtma işlemi ile yapılan tank içi susuzlaştırma işlemi sonrasında tank altı serbest su fazı oluşmaktadır. Oluşan bu kirli sintine atıksuyu, öncelikle arıtma ünitesinde bulunan

serbest su havuzuna transfer edilir. Atıksu daha sonra buradan, fiziksel ve kimyasal arıtma ünitesindeki yağ ayırma bölümünde bulunan yağ kapanı bölmesine gönderilir. Bu bölmede, serbest su içinde bulunan yağlı yapı yüzeyde toplanarak yağ ayrıştırıcı bölmesine aktarılır. Yağ ayırma bölgesinden geçen serbest su, bünyesindeki çözünmüş yağ molekülleri ve kirleticilerden arındırılması için 20 m³'lük çözünmüş hava flotasyonu (DAF) besleme havuz bölmesine alınır. DAF içerisinde mikro baloncuk ile yüzdürme işlemi uygulanmaktadır. Havuzun savağından alınan yağ, yağ işleme tankına gönderilir. Su ise cazibe ile akarak arıtma bölmesi dengeleme havuzuna alınır. Dengeleme havuzu 80 m³'lük betonarme bir havuzdur ve sızdırmazlık için sac kaplama yapılmıştır. Tüm arıtma ünitesi bu havuzun üzerinde bulunmaktadır. Dengeleme tankında hidrolik bekleme süresince bekleyen atık su, pompa vasıtasıyla alttan çekilerek koagülasyon tankına pompalanır. Dengeleme havuzundaki su, pH ayarı ile koagülasyon ve flokülasyon ünitelerine gönderilmektedir. Kireç, polialüminyum klorür ve anyonik polielektrolit gibi kimyasallar kullanılarak oluşturulan floklar durultucu tankına (120 m³) gönderilir. Durultucunun dip kısmında toplanan floklar dipte çamur birikintisi oluşturmaktadır. Tank dibinde oluşan bu sintine suyu arıtma çamurunun yoğunlaştırılması ve yağ içeriğinin azaltılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında planlanan çalışma adımları aşağıda sunulmuştur.

3.3. Deneysel Düzenek

Çalışmada radyal etkili sürekli ultrases sistemi (ECOTECNE marka, ECO 40 model) kullanılmıştır. Sistemde aktif 5000 mL sıvı/çamur rezervuarı, 2000 W/L kavitasyon gücü ve her biri 28 cm² etkili ultrases alanına sahip 20 adet sonotrot bulunmaktadır ve yarı sürekli olarak çalıştırılmıştır. Sistem 316/S, 3 mm paslanmaz çelikten imal edilmiş olup, sisteme ait resim Şekil 3.3'te verilmiş, teknik özellikleri ise Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

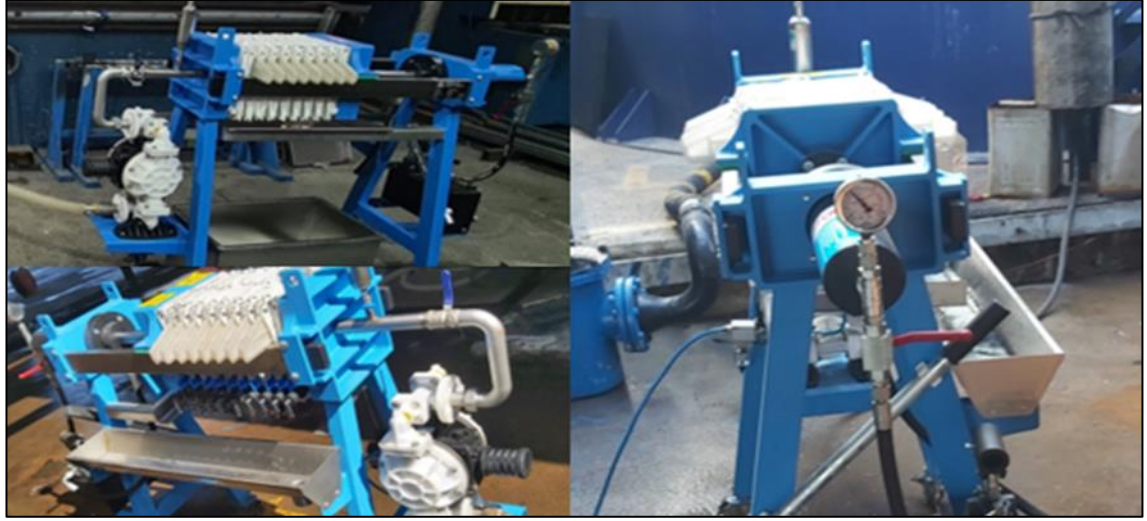


Şekil 3.3. Radyal etkili sürekli ultrases sistemi

Çizelge 3.1. US reaktörünün teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
Mekanik güç	2200 W
Elektrik güç	4,5 kVA
Frekans aralığı	22-40 kHz
Voltaj	AC 230 V
Malzeme	316/S 3 mm paslanmaz çelik
Boyutlar	1500×450×350
Reaktör hacmi	5 Litre

Çalışmada kekleştirme amaçlı kullanılan mini filtre pres cihazı, bezi ve cihaza ait teknik özellikler Şekil 3.4 ve Çizelge 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.4. Mini filtre pres cihazı

Çizelge 3.2. Mini filtre pres ve filtre pres bezi teknik özellikler

Kapasite (Lt/şarj)	8 L/ şarj
Plaka Bilgileri	
Plaka miktarı (adet)	10 adet 1 baş + 8 ara + 1 son
Plaka tipi	Chamber
Plaka Ebatları (mm)	250×250 mm
Plaka kolları	K 1004
Kek hacmi (L)	0,8 L
Kek kalınlığı (mm)	20 mm
Besleme	Merkezden
Süzüntü suyu deşarjı şekli	Açık musluklu deşarj
Süzüntü suyu deşarjı yönü	Tek taraftan
Plaka kolları	K 1004
Bez malzemesi	Arfil, PP
Malzeme Özellikleri	
Giriş Borusu	AISI 304
Dayama plakaları yüzeyi	Karbon çelik epoksi koruma +PP baş-son plaka
Süzüntü suyu tavaşı	AISI 304
Çamur tavaşı	Karbon çelik epoksi koruma
Filtre pres kolları	ST-52 +coal tar epoksi boyalı+ AISI 304 kaplama
Yağ tankı	Karbon çelik epoksi koruma
Çalıştırma	
Pres Açma kapama	Manuel el pompalı
Plaka aralama	Manuel

Çizelge 3.2. Mini filtre pres ve filtre pres bezi teknik özellikler (devam)

Filtre pres bezi	
Muhteviyatı	% 100 Polipropilen
Ebatlar	190 mm x 190 mm
Delik Çapı	10 mm
Kalınlık	2 mm ± 0,1 mm
Gramaj	610 gr./m ² ±20 gr.
Çözümlü ipliği	1cm'de 27 tel 1300 denye polipropilen iplik
Atkı ipliği	1 cm'de 9 tel 1300 denye polipropilen iplik
Çalışma sıcaklığı	100 °C
Hava geçirgenliği	32,5 L/dm ² .dk.

3.4. Tesiste Kullanılan Koagülan Tipleri

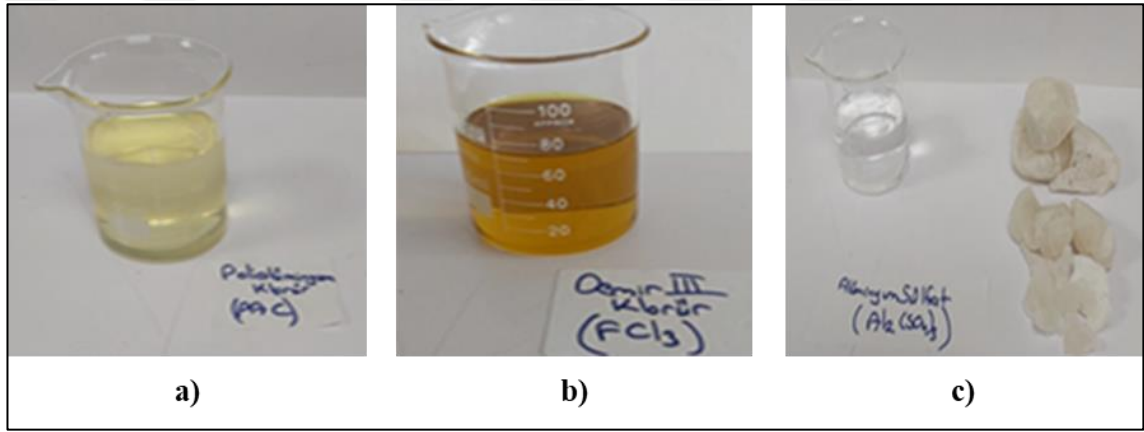
Atıksuların kimyasal arıtma sistemi ile arıtılmasında kullanılan koagülanların bazıları Polialüminyumklorür, Demir (III) klorür ve Alum 'dür. Bu koagülan maddeler, suya alkalinite veren iyonlarla reaksiyona girerek suda çözünmeyen metal hidroksit floklarını oluşturan metal tuzlarıdır. Atıksu içerisinde bulunan koloidal ve askıdaki katı maddelerin, karıştırma, pH ayarı, sıcaklık ve koagülan madde etkisiyle tanecik yapılarında büyümeler meydana gelir. Büyüyen tanecikler başka bir katı maddenin etrafında yığılarak yer çekimi etkisiyle de bulunduğu ortamda çökebilir özellik kazanarak atıksu ortamından ayrılırlar. Bu işleme koagülasyon ve flokülasyon adı verilmektedir. Projede koagülan kullanımındaki amaç, çamur yapısı içerisine hapsolmuş ve çamur bağ yapısı ile kimyasal olarak bir arada tutulan yağ moleküllerinin bulunduğu ortamdan uzaklaştırılmasına yardımcı olmaktır. Koagülan denemelerinin başarılı olması durumunda, 1'inci ve 2'nci adımda iyileştirilemeyen veya iyileşme yönünde olumlu bir ilerleme sağlanamayan Toplam Organik Karbon, Kızdırma Kaybı ve Su Muhtevası parametrelerinin, 1. sınıf tehlike parametreleri altına düşürülerek tehlike kategorisi sınıfından çıkarılması gerçekleşmiş olacaktır.

İlk 2 adımda iyileştirilemeyen hedef parametrelerin iyileştirilmesinde uygulanan koagülan madde için öngörülen bazı kimyasallar, projede alternatif olarak değerlendirilmiştir. Son adımda için seçilen koagülan tipleri, tesiste konvansiyonel susuzlaştırma işlemlerinde kullanılan Polialüminyumklorür, Demir (III) klorür ve Alum

kimyasallarıdır (Şekil 3.5). Bu koagülanların deney düzeneği reaktör tasarım görünümünde olduğu gibi ultrases öncesi ve ultrases ile aynı zamanda kullanımı gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.9). Koagülan kimyasallar ile yapılan çalışmalarda hedef, bir önceki açıklamalarda da belirtildiği üzere sulu çamur içeriğindeki organik yağ kısmının uzaklaştırılmasıdır (faz ayrımı).

Örneğin, tesiste konvansiyonel susuzlaştırma işlemlerinde kullanılan koagülanlar ve susuzlaştırma verimine etkileri dikkate alındığında;

- i). Çamurun klor içeriğini azaltmada katyonik poliakrilamid polimeri,
- ii). Flokleştirmede ve su muhtevası gideriminde polialüminyumklorür, demir III klorür ve alum'un başarıyla uygulandığı görülmüştür.



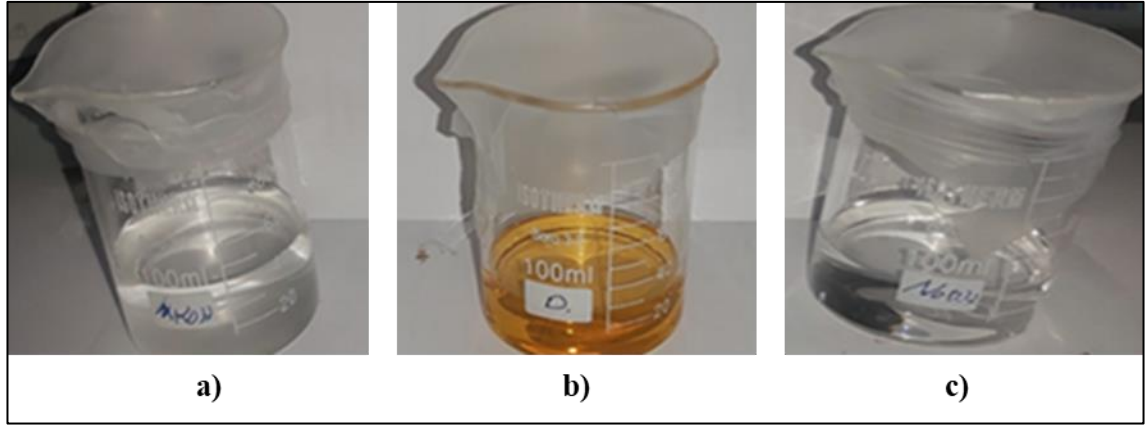
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan koagülan türleri a) Polialüminyumklorür b) Demir (III) klorür c) Alum

Yapılan örnek bir çalışma da sintine suyunun, yüksek oranlarda petrol ve petrol türevli bileşikler içermesinden dolayı denizler için önemli bir kirletici kaynağı olduğu raporlanmıştır. Bu çalışmada sintine suyu karakterizasyonu belirleme çalışmalarında yağ-gres içeriğinin 900 mg/L olduğu tespit edilmiştir (Öz & Çetin, 2021). Başka bir çalışma örneğinde ise sintine suyuna ait yağ içeriğinin 6,5 mg/L ile 736 mg/L arasında değiştiği rapor edilmiştir (Karakulski & Gryta, 2017). Petrol çamurunun susuzlaştırılması amacıyla bir çamur arıtma tesisinden alınan numuneye ultrases metodu uygulanmıştır. Bu çalışma neticesinde ultrasesin, yağlı çamurdaki damlacık boyutu dağılımını değiştirmede etkili bir yöntem olduğu raporlanmıştır (Mao vd., 2016). Yapılan başka bir çalışmada % 1 yağ içeriğine sahip çamurun arıtımında ultrases prosesi Fenton birlikte kullanılmıştır.

Prosesin performansı çamur içerisindeki petrol hidrokarbonlarının parçalanması kriteri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ultrasonik gücün belli bir aralıkta artırılmasının, hidrokarbon fraksiyonlarının parçalanmasını da artırdığı rapor edilmiştir (Sivagami vd., 2019). Sondaj çamurunun susuzlaştırılmasıyla ilgili yürütülen örnek bir diğer çalışmada ise Fe (II) ile aktifleştirilmiş sülfat radikali ile oksidasyon prosesine yardımcı proses olarak ultrases kullanılmıştır. Ultrasonik kavitasyonun etkisiyle bağlı suyun ve floklar içerisindeki organiklerin açığa çıkmasıyla, hem oksidasyon ve susuzlaştırma veriminin artırıldığı, hem de reaksiyon sürelerinin önemli ölçüde azaltıldığı tespit edilmiştir (L. Liu vd., 2018).

3.5. Alternatif Koagülan Tipleri

3'üncü adım çamur iyileştirme çalışmalarında, tesiste kullanılan koagülan türlerine ek olarak, sulu çamur içeriğindeki yağlı organik yapıyı ayırmada yardımcı olacak farklı tip koagülanlar da bu çalışmada alternatif olarak değerlendirilmiştir. Bu koagülanlar, mevcut tesiste konvansiyonel petrol ve petrol türevli organik atık yağların susuzlaştırması işlemlerinde kullanılan demülsifier (emülsiyon kırıcı/yüzey aktif madde), yine atıksu arıtma kimyasalı olarak bilinen alkali koagülan (sodyum hidroksit) ve bir diğer alternatif koagülan olarak gösterebileceğimiz metanollü potasyum hidroksit (potasyum metoksit) çözeltisi tercih edilmiştir (Şekil 3.6). Bu tür koagülanların, sulu çamur yapısı içerisine hapsolmuş olan ve çamur bağ yapısı ile kimyasal olarak bir arada tutulan yağ moleküllerini ortamdan uzaklaştırmada etkili olduğu literatür çalışmalarında rapor edilmiştir. Bu koagülanlar deney düzeneği reaktör tasarım görünümünde olduğu gibi ultrases öncesi ve ultrases ile aynı zamanda kullanımı gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.9). Bu projede uygulanan dozaj miktarları, mevcut sistemde de uygulanan ve rapor döneminde tesiste kullanılan koagülan dozajları (bkz. Çizelge 4.11 ve 12) dikkate alınarak belirlenmiş ve yakın değerlerde dozlama aralığı seçilmiştir. Koagülan performansı, çamur içerisindeki petrol hidrokarbonlarının parçalanarak, hazne içerisinde yağ-su faz ayrımı oluşturup/oluşturmadığına bakılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan alternatif koagülan türleri a) Potasyum hidroksit b) Demülsifier c) Sodyum hidroksit

Yapılan örnek çalışmalarda;

i). Ultrases + demülsifier (emülsiyon kırıcı) kombine metodu ile % 50 ila 60 arasında değişebilen petrol türevli organik atık yağ su içeriğinin % 10'un altına düşürüldüğü tespit edilmiştir (Özdoğan, 2018). Elde edilen sonuçlar, ham petrolün susuzlaştırılması için ultrasonik yöntemin kullanılabileceğini gösteren benzer bir çalışmada, ham petrol örneğine 5 dakika boyunca 0.38 W/cm^2 ultrasonik şiddet uygulandığında % 92,6 susuzlaştırma elde edildiği şeklindedir (Ye vd., 2008).

ii). Yağlı atıksu ve sıvı karışım ortamında bulunan yağ moleküllerinin, bağlı bulunduğu kimyasal zincir yapısını kırmada ve faz ayırımında asidik ve alkali maddelerin başarıyla uygulandığı bazı araştırmalar mevcuttur. Bir araştırmada, oldukça yüksek yağ-gres içeriğine sahip giriş atık suyundaki yağ-gres gideriminde ortamın pH değeri 2'nin altına düşürülerek ele alınmıştır. Bu çalışma ile % 89 verimle yağ-gres giderimi elde edilmiştir (Print vd., 2021). Petrol ve petrol türevi organik madde içeren atık suların arıtımı ile ilgili yapılan başka bir araştırmada, asit kraking, çözünmüş hava flotasyonu ve aktif çamur sisteminden oluşan bir arıtma sistemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerin kullanımı sonrasında, KOİ giderim verimi % 94, askıda katı madde giderim verimi % 96 ve yağ-gres giderim verimi ise % 98 olarak ölçülmüştür (Nalbur & Karaelli, 2019).

iii). Yapılan diğer bir çalışmada, Çin Zhejiang bölgesindeki Sinopec Petrol Rafinerisinden alınan yüksek kaliteli yağ ürünü içeren yağlı çamur numunesinde, yağlı çamurun gerçek katı ve sıvı (bir yağ fazı ve sulu faz karışımı) verimlerini açıklığa kavuşturmak için, potasyum hidroksitin piroliz katalitik üzerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, potasyum hidroksitin yağlı çamurdan yüksek kaliteli yağ

ürününün üretilmesinde büyük bir katalitik etki göstererek, kalıntı ve sıvı kütle fraksiyonlarının sırasıyla % 75,5 ve % 24 gibi değerlere ulaştırdığı rapor edilmiştir (B. Lin vd., 2017).

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan koagülanların özellikleri

Kimyasal ve Teknik Özellikler	CAS Numara	Molekül ağırlık (g/mol)	Kimyasal formül	pH (20°C)	Yoğunluk (g/cm ³) (20°C)	Renk
Polilüminyum klorür Al (OH) _a Cl _b (SO ₄) _c	7784-13-6	101,9613	Al ₂ O ₃	3,0	1,4	Sarı
Demir (III) klorür	7705-08-0	162,204	FeCl ₃	1,0	1,43	Koyu kahverengi
Alum	7 784-31-8	666,41	Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18H ₂ O	2,5-4,0	1,72	Renk siz
Potasyum hidroksit	1310-58-3	56,11	KOH	14	1,09	Renk siz
Demülsisifer	Özel ürün	981	Özel ürün	4,5-5,0	0,981	Açık kahverengi
Sodyum hidroksit	1310-73-2	40	NaOH	14	1,508	Renksiz

Çizelge 3.4. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz standartları ve işlem prosedürleri

Parametre (ADDDY-EK 2C)	Birim	Standart	Analiz Metodu	Referans
Toplam Organik Karbon	%	BS EN 13137	Yüksek Sıcaklık Yakma Yöntemi	(TC, 2001)

Çizelge 3.4. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz standartları ve işlem prosedürleri (devam)

Parametre (ADDDY-EK 2C)	Birim	Standart	Analiz Metodu	Referans
Kızdırma Kaybı	%	BS EN 15935	Gravimetrik Metot (550 ± 25 °C)	(CEN-Avrupa Standardizasyon Komitesi, 2021)
Su İçeriği (Nem)	%	TS 10459	Gravimetrik Metot (Atık)	(TSI, 1992)
Çözülmüş Organik Karbon	mg/L	SM 5310 B	Yüksek Sıcaklık Yakma Yöntemi	(WC vd., 2022)
Toplam Çözünen Katı	mg/L	SM 2540 C	Gravimetrik Metot	(WC vd., 2022)
Klorür (Cl ⁻)	mg/L	ISO 9297	Titrimetrik Metot	(ISO, 2021)

Yapılan analizler doğrultusunda, proje uygulama adımlarına yönelik olarak

- Ultrases işlem süresi,
- Ultrases güç aralığı,
- Ultrases frekans aralığı,
- Ultrases işlem sonrası bekleme süresi,
- Koagülan seçimi,
- Koagülan dozajı,
- Ultrases ve koagülanın birlikte kullanımında işlem önceliğinin belirlenmesi, gibi en iyi uygulama şartları belirlenmiştir.

2'nci ve 3'üncü uygulama adımlarında yapılan deneysel çalışmalar ve analizler ile aşağıda verilen sorulara cevap aranmıştır.

1. Ultrasesin çamur hacmini (su içeriği) azaltmaya etkisi ne yönde olacaktır?
2. Ultrasesin çamur kızdırma kaybı değerine (LOI) etkisi ne yönde olacaktır?
3. Ultrasesin çamurun TOK, Klorür TÇK ve ÇOK içeriğine etkisi ne yönde olacaktır?
4. Ultrasesin ve seçilecek koagülanın eş zamanlı uygulanmasının çamur hacmini (su içeriği) azaltmaya etkisi ne yönde olacaktır?
5. Ultrasesin ve seçilecek koagülanın eş zamanlı uygulanmasının çamur kızdırma kaybı değerine (LOI) etkisi ne yönde olacaktır?
6. Ultrasesin ve seçilecek koagülanın eş zamanlı uygulanmasının çamurun TOK, Klorür, TÇK ve ÇOK içeriğine etkisi ne yönde olacaktır?

3.6. Çamur Bertaraf Maliyeti

Mevcut PRF'de su içeriği yüksek olan sulu çamur ilk olarak filtre pres ünitesine gönderilmektedir. Filtre preste susuzlaştırılarak elde edilen çamur keki big bag çuvallarda toplanarak endüstriyel atık tesisine iletilmektedir. Öncesinde yapılan çamur analiz sonuçlarına göre endüstriyel atık tesisine gelen çamurlar burada işlenerek yakıt değeri artırılır (çamur için kalorifik değer, klor içeriği vb.). Uygun yakıt değerine ulaşan atıklar, Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Ham Madde Tebliği'ne göre, enerji geri kazanımı için yakma tesisine gönderilerek bertaraf edilmektedir. Isıl değeri uygun olmayan ancak depolamaya uygun, tehlikeli ve tehlikesiz endüstriyel atıklar 1. sınıf düzenli depolama sahasında bertaraf edilmektedir. Depolamaya uygun olmayan tehlikeli atıklar ise stabilizasyon ön işlemine tabi tutularak düzenli depolama kriterlerine uygun hale getirilir. Bu durum bu tür atıkların bertarafında ilave maliyetlere neden olmaktadır. Bazı durumlarda diğer atıklarla karıştırılarak daha uygun şekilde bertaraf edilmesi tercih edilmektedir.

Tesiste hâlihazırda işletilen atıksu arıtma ünitesi, kesikli olarak çalıştırılmakta ve fiziko-kimyasal arıtma tipi olarak işlev görmektedir. Atıksu arıtma ünitesinin kapasitesi 40 m³/saat olup, yıllık ortalama 350 000 m³ atıksu işleyebilme kapasitesine sahiptir. Ancak, gemi atık kabul tesisine gelen atıkların sürekliliği olmadığı ve miktarları değişken olabildiği için, bahsedilen kapasite rakamlarına bugüne dek ulaşamamıştır. Çizelge 3.5

ve 3.6’da gösterilen son beş yıllık veriler dikkate alındığında, tesise gelen atıksu miktarı ortalama 150 000 m³/yıl (ortalama % 3’ü sulu çamur olup, 500 litre/saat sulu çamur oluşumu) olup, arıtılan atıksu sonrasında 1. Sınıf tehlike kategorisine sahip yaklaşık 250 000 kg/yıl arıtma çamuru meydana gelmektedir. Tesise gelen atığın karakterizasyonuna bağlı olarak oluşan atıksu arıtma çamur miktarı, bazı zamanlarda 190 000 ila 250 000 kg/yıl arasında değişiklik gösterebilmektedir. Tesiste işlenen gemi sintine atıksularının arıtılması ile oluşan çamur kekinin bertarafında yönelik yapılan maliyet hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.5. Tesiste arıtılan atık su miktarları (2016-2020 yılları arası)

Tarih (Yıl)	Gelen Atık Miktarı (m ³)	Gelen Atıktaki Atıksu Yüzdesi (%)	Arıtılan Atıksu Miktarı (m ³)
2016	137 314	82,47	113 240
2017	175 138	87,39	153 059
2018	180 822	87,41	158 050
2019	181 957	86,59	157 564
2020	176 517	84,57	149 283
Ortalama	170 350	85,69	146 239

Çizelge 3.6. Arıtılan atıksu hacmine göre oluşan muhtemel arıtma çamur miktarı

Tarih (Yıl)	Arıtılan Atıksu Miktarı (m ³)	Arıtılan Atık Su Sonrası Oluşan Sulu Çamur Miktarı (m ³) (% 3,5)	Sulu Çamurun Fitre pres Sonrasında Oluşturduğu Kek Çamur Miktarı (m ³) (% 8)
2016	113 240	3 963	306
2017	153 059	5 357	414
2018	158 050	5 331	427
2019	157 564	5 514	426
2020	149 283	5 224	404
Ortalama	146 239	5 077	395

Gemi Atıkları ve İşletme Tesisleri fiziko-kimyasal arıtma ünitesi proses çıktısı sonrası oluşan atıksu arıtma çamurlarının elleçleme ve bertarafa gönderme (yakma) genel maliyetleri sırasıyla;

Ön işlem (elleçleme)

Tesis içi ortalama 395 000 kg/yıl olarak oluşan arıtma çamurunun ön işlem maliyeti;
 $395\,000\text{ kg/yıl} \times 7500\text{ TL/Ton} = \mathbf{2\,962\,000\text{ TL}}$

Ön işlemi tamamlanmış atığı bertarafa gönderme (yakma)

Tesis içi oluşan 395 000 kg/yıl arıtma çamurunun, bertaraf amaçlı direkt yakmaya gönderim maliyeti; $395\,000\text{ kg/yıl} \times 4000\text{ TL/Ton} = \mathbf{1\,580\,000\text{ TL}}$

Ön işlem (elleçleme) + bertarafa gönderme (yakma)

Tesis içi oluşan 395 000 kg/yıl arıtma çamurunun ön işlem (elleçleme) yapılarak, bertaraf amaçlı direkt yakmaya gönderim maliyeti;
 $395\,000\text{ kg/yıl} \times 7500\text{ TL/Ton} + 395\,000\text{ kg/yıl} \times 4000\text{ TL/Ton} = \mathbf{4\,542\,000\text{ TL}}$

Görüldüğü üzere, atık kabul tesisinin işletmecisi olan İSTAÇ A.Ş Endüstriyel Atık Birimi tarafından oldukça zahmetli ve ek maliyetli ön işlemlerden (elleçleme; laboratuvar analizleri sonrası uygun oranlarda diğer tehlikeli atıklar ile karıştırılması ve bertaraf tesisine uygun atık kodu oluşturulması) geçirilen arıtma çamurunun, belirli bir ücreti karşılığında uygun bertaraf tesislerine gönderilmesi durumunun ortadan kaldırılması amacıyla, proje kapsamındaki çamur susuzlaştırma/iyileştirme yaklaşımı önerilmiştir. Böylelikle, tesisin rutin işleyişi sonrası oluşan ve yapılan analizler neticesinde tehlikeli kategoride olduğu belirlenen, gemi sintine atıksuyu arıtma çamurlarının, herhangi bir elleçlemeye tabi tutulmadan maliyetsiz bir şekilde direkt olarak 1. Sınıf düzenli depolama alanında gömülmesi ve orada bertaraf edilmesi sağlanacaktır. Bu hedefler doğrultusunda şirket için yıllık mali kazancın **4 542 000 TL** arasında olması beklenmektedir. Yapılacak yeni çamur iyileştirme sistemine ait harcamalar bu kazançtan düşürülerek yıllık tasarruf kazanç belirlenecektir. Yeni yöntem ile yapılacak çamur bertaraf işlemleri sonrası elde edilecek yıllık tasarruf miktarı ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Bu veriler dikkate alınarak, 30 L/saatlik sürekli/yarı sürekli işletilebilen bir ultrases reaktörü yaklaşımının başarıya ulaşması halinde bu reaktörden 20 adet (yukarıda bahsedilen 500 L/saat çamur hesabına göre) tesis içerisine kurulmasıyla gerçek (arazi) ölçekli uygulamalarda kullanılabilmesi de fizibil olacak ve benzer tesisler için örnek durum teşkil edecektir. Tesis içerisine kurulacak olan ultrasonik destekli çamur iyileştirme prosesi için gerekli reaktör ve modül hesaplamaları Çizelge 3.7’de detaylı bir şekilde verilmiştir. Ultrasonik sistem mevcut sisteme göre birtakım avantajlar içermektedir.

Çizelge 3.7. Ultrases destekli çamur iyileştirmede kullanılacak gerekli reaktör ve modül hesaplamaları

<i>1Reaktör (RA-40L) Çevrim ve Kapasite Bilgileri</i>		
Reaktör sulu çamur işleme kapasitesi	15	L
Proses süresi	30	dk.
Reaktör saatlik çevrim adedi	2	Adet
Reaktör saatlik işleme kapasitesi	30	L
Günlük kapasite	720	L
Aylık kapasite	22	m ³
Yıllık kapasite	260	m ³
<i>Modül (RA-M = 10×RA-40L) Çevrim ve Kapasite Bilgileri</i>		
Reaktör sulu çamur işleme kapasitesi	150	L
Proses süresi	30	dk.
Reaktör saatlik çevrim	2	Adet
Saatlik sulu çamur işleme kapasitesi	300	L
Günlük sulu çamur kapasitesi	7,2	m ³
Aylık sulu çamur işleme kapasitesi	216	m ³
Yıllık sulu çamur işleme kapasite	2600	m ³
<i>Tesis Atık Toplama Bilgileri</i>		
Tesis yıllık toplanan atık sintine suyu miktarı	150 000	m ³

Çizelge 3.7. Ultrases destekli çamur iyileştirmede kullanılacak gerekli reaktör ve modül hesaplamaları (devam)

Arıtma sonrası oluşan yıllık sulu çamur miktarı	5000	m ³
İyileştirilecek günlük sulu çamur miktarı	14	m ³
İyileştirilecek saatlik sulu çamur miktarı	600	L
Gerekli toplam reaktör sayısı	19,2	Adet
Gerekli toplam modül sayısı	1,92	Adet
Projelendirecek sistem reaktör adedi	20	Adet
Projelendirecek sistem modül adedi	2	Adet
Proseste kullanılacak toplam koagülan miktarı	4000	kg

Çizelge 3.8. Ultrases sistemi yıllık elektrik harcaması

Birim rektör elektrik gücü	4,8	kW
Bir çevrim içinde reaktör çalışma süresi	30	dk.
Bir saat içinde reaktör çalışma süresi	30	dk.
Bir saat içinde reaktörün harcadığı enerji	2,4	kW
Projelendirilecek reaktör sayısı	20	Adet
Projelendirilecek modül sayısı	2	Adet
Toplam reaktör elektrik tüketimi	48	kW
Toplam reaktör yıllık çalışma süresi	4320	Saat
Toplam reaktör yıllık elektrik tüketimi	207 360	kWh
Elektrik birim fiyatı	3,2	TL/kWh
Yıllık toplam elektrik tüketimi	725 760	TL
Aylık toplam elektrik tüketimi	60 480	TL
Döviz kur (\$)	30	TL
Yıllık toplam elektrik tüketimi (dolar)	24 192	\$

Çizelge 3.9. Ultrases sistemi ile yapılacak toplam gider ve tasarruf

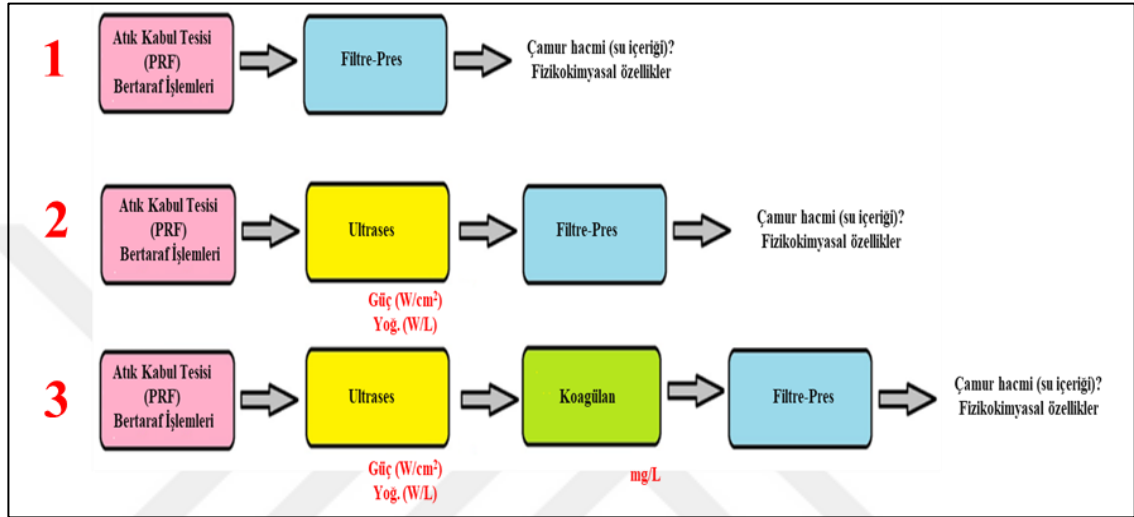
Yıllık enerji tüketimi	725 760	TL
Yıllık bakım maliyeti (iki adet modül)	400 000	TL
Ultrases sistemi toplam yıllık giderleri	1 125 760	TL
Projede kullanılacak koagülan maliyeti	750 000	
Projeye yıllık gider maliyeti	1 875 760	TL
Yıllık mevcut sistem arıtma çamuru bertaraf maliyeti	4 542 000	TL
Yıllık giderlerde yapılacak tasarruf	2 666 240	TL
Ultrases sistemi ile yıllık karbon emisyon destek geliri	400 000	TL
Projelendirilecek ultrases sistemi kurulumu ile yapılacak yıllık toplam tasarruf	3 066 240	TL

3.7. Deneysel Prosedür

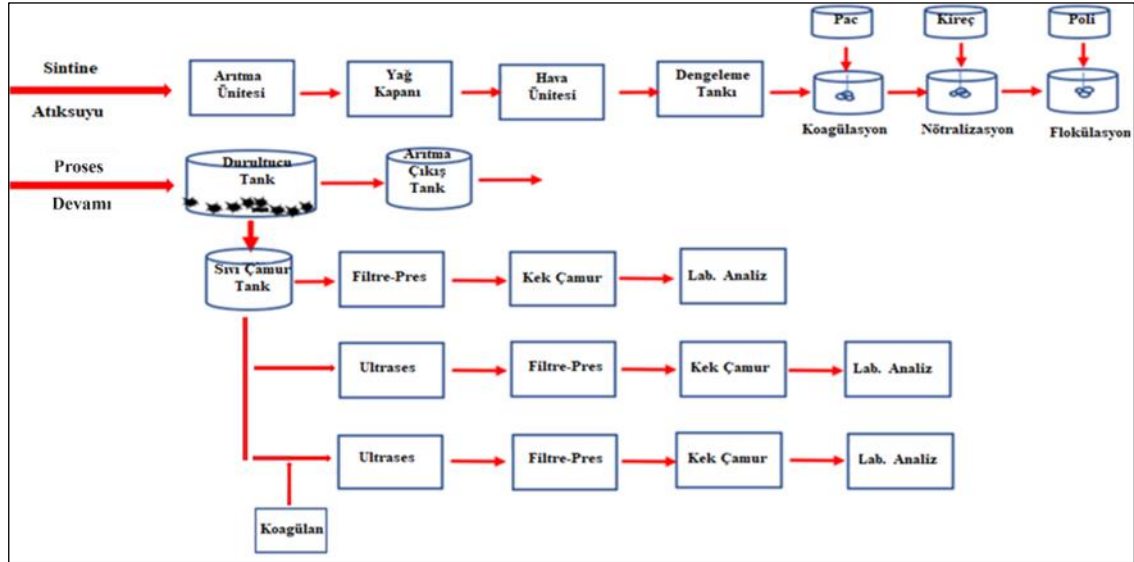
Çamur içerisinde tehlikeli atık sınıfında kalan altı parametrenin (su içeriği, toplam organik karbon, çözünmüş organik karbon, kızdırma kaybı, toplam çözünmüş katı madde ve klorür) değişimine ilişkin üç ana parametre ultrases (güç yoğunluğu), ultrasonik süre ve uygun koagülan tipi incelenmektedir. Yapılan incelemede ultrasonik güç 500-2000 W arasında tutulmuş, ultrases (US) uygulama süresi 10-60 dakika aralığında ve koagülan dozajı 500-2000 ppm arası olacak şekilde çalışmalar yapılmıştır. İncelenen parametrenin dışındaki deney koşulları, her deneyde sabit tutularak en uygun şekilde elde edilen parametre bir sonraki deneylere uygulandı. Tüm deneylerde, US reaktörüne 5000 mL arıtma çamuru elle eklenmiş ve reaktörün giriş ve çıkışı kapatılmıştır. Ultrasonik cihaz istenilen çalışma süresine ve güce ayarlanarak, cihaz içerisine uygun koagülan dozajı eklenerek çalıştırıldı. Deney yapıldıktan sonra reaktörden çıkan arıtılmış çamur, filtre pres besleme tankına alındı. Filtre presinin 150-200 bar basınçta su çıkışı kesilinceye kadar (yaklaşık 45 dakika) çalıştırılmasıyla filtre keki elde edildi. Ayrıca topaklanma verimini arttırmak için sisteme kekleştirme sonrasında kuru hava beslemesi uygulanmıştır. Presten alınan çamur keki, analizin yapılabilmesi için (gerekliyse) ön arıtma işlemine tabi tutulmuştur.

3.8. Çamur Bertarafına Yönelik İyileştirme Adımları

Çalışmada takip edilmesi planlanan proses aşamaları Şekil 3.7 ve 3.8’de şematik olarak gösterilmiştir. Sintine atıksu çamurlarına yönelik gerçekleştirilen 2’nci ve 3’üncü iyileştirme adımları ve çalışmada takip edilmesi planlanan proses aşamaları Şekil 3.9’da deney düzeneği tasarımında gösterilmiştir.



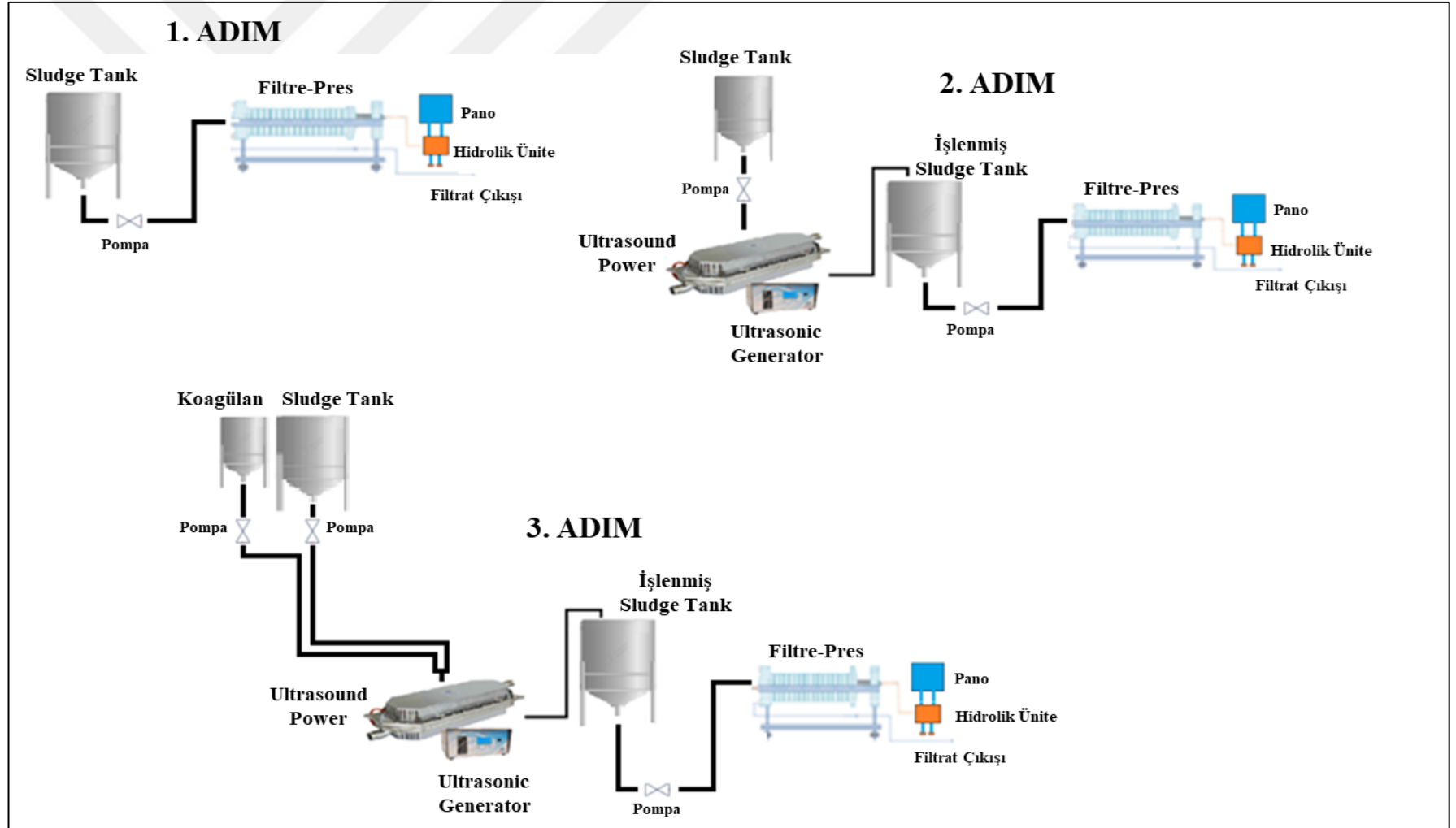
Şekil 3.7. Deneysel çalışma planı şematik gösterimi



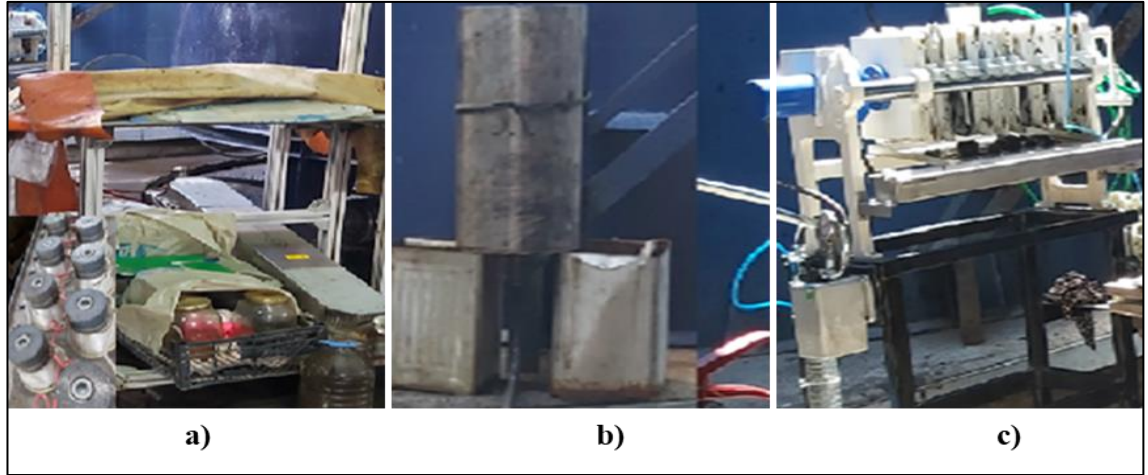
Şekil 3.8. Çamur yönetimine ait deneysel çalışma planı şematik gösterimi

Takip edilen iyileştirme adımımda ilk olarak ultrases susuzlaştırma deneyleri yapılmış ve bu deneyler sonrasında analize gönderilecek numunelerin toplanması gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm saha uygulamaları, İstanbul  evre Yönetimi Sanayi Ticaret ve Anonim şirketi (İSTAÇ A.ř) Gemi Atıkları Toplama ve İşleme Tesisi ’nde yapılmıştır. Analizler için temin edilen örnekler kısa sürede ve güvenli bir şekilde Bursa Uludağ  niversitesi  evre Mühendisliği laboratuvarlarına iletilmiştir. 2’nci adımda gerçekleştirilen iyileştirme adımları sonrası susuzlaştırılarak elde edilen kek çamur örnekleri, her bir uygulama sonrası ayrı ayrı toplanmış ve mevcut sisteme kıyasla uygulama adımlarının iyileştirme verimliliği çeşitli parametreler üzerinden izlenmiştir. Bu  alışma kapsamında 3 farklı senaryo üzerinde durulmuştur.





Şekil 3.9. Deney düzeneği tasarım görünümü



Şekil 3.10. a) Saha uygulaması b) Numune haznesi c) Mini filtre-pres

3.8.1. Senaryo 1: Tesis arıtma çamuru susuzlaştırma

Liman atık kabul tesislerine gelen atıkların işlenmesi sonrası oluşan proses çamurlarının bertarafına yönelik sadece susuzlaştırma (filtre pres) işlemi yapılmıştır. Tesise gelen atıksu, bünyesindeki çözünmüş yağ molekülleri ve kirleticilerden arındırılması için 20 m³'lük DAF besleme havuz bölmesine alınmaktadır. DAF içerisinde mikro baloncuk ile yüzdürme işlemi uygulanmaktadır. Havuzun savağından alınan yağ, tekrardan işlenmek üzere yağ işleme tankına alınır. Su ise cazibe ile akarak arıtma bölmesi dengeleme havuzuna alınır. Dengeleme havuzu 80 m³'lük betonarme bir havuzdur ve sızdırmazlık sağlanabilmesi için sac kaplama yapılmıştır. Tüm arıtma ünitesi betonarme dengeleme havuzunun üzerinde bulunmaktadır. Dengeleme tankında hidrolik bekleme süresince bekleyen atık su, pompa vasıtasıyla alttan çekilerek koagülasyon tankına pompalanır. Koagülasyon tankına gelen atıksu, pH ayarı yapıldıktan sonra nötralizasyon ve flokülasyon ünitelerine gönderilmektedir. Kireç, polialüminyum klorür ve anyonik polielektrolit gibi kimyasalların kullanılarak oluşturulan floklar, cazibe ile durultucu tankına (120 m³) gönderilir. Durultucu tankı dip kısmında toplanan floklar dipte çamur birikintisi oluşturmaktadır. Tank dibinde biriken flok çamurları (sulu çamur) filtre pres öncesi sulu çamur tankına oradan da tesis bünyesinde bulunan ve atıksu arıtma ünitesi proses şemasında yer alan büyük ölçekli filtre prese gönderilerek susuzlaştırma işlemine tabi tutulmaktadır. Filtre pres ile yapılan susuzlaştırma sonrası elde edilen kek çamur numunelere uygulanan analizler ile 2'nci ve 3'üncü iyileştirme adımlarının verimliliği

takip edilmiştir. İyileştirme adımlarında kullanılan sulu çamur örnekleri, filtre pres çamur besleme tankından (tesiste mevcut sulu çamur tank) alınmıştır.

3.8.2. Senaryo 2: Tesis arıtma çamuru ultrasses destekli iyileştirme

Planlanan bu aşamada ise proses sonucu oluşan sıvı çamura, filtre pres öncesinde uygun optimum şartlarda ultrasses dezintegrasyon işlemi uygulanmıştır. Dezintegrasyon yönteminde çamurun birçok özelliği değişikliğe uğramaktadır (Müller vd., 2004). Arıtma çamuru dezintegrasyonu, dış gerilmenin verdiği etkiyle arıtma çamurunun yapısal özelliklerinin bozulması olarak adlandırılmaktadır. Fiziksel, kimyasal veya biyolojik kuvvetler uygulanarak dezintegrasyon gerçekleştirilebilmekte ve çamur içerisinde bulunan suların (serbest su, flok suyu, kapiler su ve kimyasal bağlı su) uzaklaştırılması sonucu, nihai çamur hacminde meydana gelecek değişiklikler izlenebilmektedir. (Filibeli & Erden Kaynak, 2010). Dezintegrasyon işleminde, çamura uygulanan gerilimler sayesinde çamur floklarının yapısı bozulmakta, mikroorganizma hücre duvar yapıları parçalanmakta ve hücre içeriğindeki organik bileşenler sıvı faza geçerek çözünür forma dönüşmektedir. Ultras ses uygulama ile ses titreşim enerjisi ısı enerjisine dönüşerek ortam sıcaklığını arttırmakta ve emülsiyeye olmuş farklı yoğunluklardaki sıvı karışımların molekül zincirlerinin ayrışması sağlanmaktadır (Ingeç & Tekin, 2004) Bu adımda uygulanan ultras ses işleminin, katı madde hacmini azaltması (P. Zhang vd., 2007) ve çamur çürüme özelliğini hızlandırması beklenmektedir (Tehim vd., 2003). Yine bu aşamada mini filtre pres kullanımıyla yapılan susuzlaştırma işlemi ile elde edilen kek çamur numunesinin nem içeriği, toplam organik karbon, toplam çözünen katı madde miktarı değişiklikleri izlenmiştir (*Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*, 2019). Böylece uygulanan ultras ses işlemin su içeriğine (nem), çamur kızdırma kaybı değerine, toplam organik karbon ve toplam çözünen katı madde değerlerine yönelik etkisinin ne olacağı tespit edilerek yapılan bu iyileştirmenin, 1'inci uygulama adımına kıyasla performansı ölçülmüştür.

3.8.3. Senaryo 3: Tesis arıtma çamuru ultras ses + koagülan destekli iyileştirme

Bu son aşamada, proses sonucu oluşan sıvı çamur, ultras ses ile koagülanın kombine olarak kullanıldığı işlemlerden geçerek, filtre-pres sonrası elde edilen kek çamur özelliklerinin

birbirleri ile mukayese yapılmıştır (Yuan vd., 2019). Bu adımda, arıtma ünitesi nihai çıkış tankı dibinde oluşan sulu çamura (yoğun flok) ultrases ve koagülan eş zamanlı uygulanmıştır. Bu kombine işlem öncesinde, uygulamaya tabi tutulan sulu çamur içerisine eklenen yeni koagülan/koagülan optimum dozajı ve ultrases uygulama şartları;

- i). Sulu çamurun toplam katı içeriğini artırmasına,
- ii). Çamur partikül hacmini azaltmasına,
- iii). Çamur yapısının homojenliğini artırmasına,
- iv). Uygulama sonrasında filtre presten geçerek oluşan kek çamurun su içeriğine (nem muhtevası) etkisinin ne olacağı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında sulu çamura uygulanan işlem sırası, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2C analiz kriterleri ile tespit edilmiştir (Feng vd., 2009; Ruiz-Hernando vd., 2013). Çamur karakterizasyonu sonucunda elde edilen veriler ışığında teorik şartların belirlenmesi, uygulanan ultrases enerji ve gereken koagülan miktarının optimize edilmesi açısından önemlidir. Yeni koagülan olarak kullanılan demülsifier farklı oranlarda denenerek optimum dozaj ve çamurdaki tehlikeli madde (nem, toplam organik karbon, klorür, kızdırma kaybı vb.) giderim verimi izlenmiştir.

Bu aşamada, 2'nci adımda öngörülen senaryolar doğrultusunda, elde edilen kek çamur numunelerine ait analizler ve bu analizler doğrultusunda uygulama adımlarına ait optimum şartlar belirlenmiştir. Planlanan son adımda yapılmış analizler için, Bursa Uludağ Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarlarının alt yapısı kullanılmıştır.

Proje kapsamında yapılan iyileştirme adımları sonrası yapılan analizler;

- Toplam Organik Karbon,
- Klorür
- Kızdırma Kaybı,
- Nem Tayini,
- Çözünmüş Organik Karbon,
- Toplam Çözünen Katı, olmak üzere 6 farklı parametreden oluşmaktadır.

Uygulama adımları sonrası yapılan analizler ve analiz yöntemleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik (ADDDY) Ek-2C analizleri

ADDDY EK-2C Analizleri	Analiz Yöntemleri
Toplam Organik Karbon	TOC analizi orijinal numunenin cihazda okutulmasıyla elde edilir. Bu işlem cihazın SSM modülünde gerçekleştirilir. Kullanılan Cihaz: TOC Cihazı
Çözünmüş Organik Karbon	DOC analizi numune eluatının cihazda okutulmasıyla elde edilir. Kullanılan Cihaz: TOC Cihazı
Toplam Çözünen Katı	Analiz metoduna uygun olarak vezin kaplarına alınan belli hacimlerdeki numune eluatının su muhteviyatı, su banyosunda uçurulur. Ardından 2 saat boyunca 180 °C etüvde kurutma işlemi uygulanır ve son tartım alınarak hesaplama yapılır. Kullanılan Cihazlar: Su Banyosu ve Etüv Fırın
Klorür	Analiz standardına uygun olarak numune eluatının Gümüş Nitrat (AgNO_3) çözeltisiyle titrasyonu yapılarak sonuç tayin edilir.
Ek 1 Eluat hazırlama (Nem Dahil)	75 °C etüvde kurutulularak nem değeri tayin edilen numunenin, elde edilen değere göre eluatı hazırlanır. Eluat hazırlama işlemi nem oranına göre belirlenen "saf su + numune" karışımının 24 saat karıştırılması esasına dayanır. Kullanılan Cihaz: Etüv Fırını
Klorür	Analiz standardına uygun olarak numune eluatının Gümüş Nitrat (AgNO_3) çözeltisiyle titrasyonu yapılarak sonuç tayin edilir.

Proje 3'üncü adım uygulama çalışmasında, proses sonucu oluşan sıvı çamur, ultrases ile koagülanın kombine olarak kullanıldığı işlemlerden geçerek, filtre-pres sonrası elde edilen kek çamur numunesinin özellikleri birbirleri ile mukayese edilmiştir. Bu adımda,

arıtma ünitesi nihai çıkış tankı dibinde oluşan sulu çamura (yoğun flok) ultrases ve koagülan eş zamanlı uygulanmıştır. Bu adımda önceden belirlenen koagülanlar farklı oranlarda denenerek optimum dozaj ve çamur içerisindeki tehlikeli madde (nem, toplam organik karbon, klorür, kızdırma kaybı vb.) giderim verimi takip edilmiştir.

3.9. Kimyasallar

Anot, katot malzemenin kaplanması, susuzlaştırma deneylerinin yürütülmesi ve numunelerin toplanması deneylerin yürütülmesi ve analizlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan tüm kimyasal malzemeler analitik saflıkta ve Mercek ve Sigma Aldrich markadır. Yapılan tüm analiz süreçlerinde çözelti hazırlanması, numune seyreltme işlemlerinin yapılmasında ultra saf su kullanılmıştır.

Çalışma kapsamındaki kimyasallar, yapılan uygulama adımları sonrası elde edilen kek çamur numunelerin laboratuvarında analizlerinin yapılabilmesi ve iyileştirme adımları verimliliğinin izlenebilmesi için kullanılmıştır. Bu kimyasallar ithalata ihtiyaç duyulmayan genel tuz, asit ve baz türü kimyasallardır. Bu parametreler için cam süzme seti, vakum pompası ve numune saklama kaplarına da ihtiyaç duyulmuştur. Alınan Bilimsel Araştırma Projesi ek bütçe desteği ile bu ihtiyaçlar giderilmiş ve tez çalışmalarına devam edilmiştir.

3.10. Analitik Prosedür

3.10.1. Susuzlaştırma deneylerinin yürütülmesi ve numunelerin toplanması

Çalışma kapsamındaki ultrases uygulamaları, susuzlaştırma deneyleri ve numunelerin toplanması İSTAÇ A.Ş Gemi Atıkları Toplama ve İşleme Tesisi 'nde gerçekleşmiştir. Numuneler, arıtma tesisi nihai durultucu çıkış tankı alt bölmesinden (sulu çamur fazı toplanma bölgesi) temin edilmiştir. Proses adımlarının son aşamasında susuzlaştırma işlemi için ihtiyaç duyulan ve prosesin ana demirbaşlarından birisi olan mini filtre-pres cihazı, geçici bir süre için Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden temin edilmiş ve sonrasında bu demirbaş malzemesinin kalıcı temini 24/06/2023 tarihinde onaylanan Lisansüstü Tez Projesi (LTP) desteği ile sağlanmıştır.

3.10.2. Analizlerin yürütülmesi

Proje kapsamında yapılan TOK, Klorür, LOI, Nem Tayini, ÇOK ve TÇK analizleri için, Bursa Uludağ Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarlarının alt yapısı kullanılmıştır. İhtiyaç durumunda çalışma kapsamında yürütülen bazı analizler İSTAÇ A.Ş. Çevre Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu laboratuvarda yürütülen analizlerin yapılabilmesi hususunda kurum onayı başvurusu yapılarak gereken izinler alınmıştır.

Nem tayini

Su muhtevası tayini için kekleştirilen çamur numunesinden için uygun miktarlarda alınarak alınır. Daha önce darası alınmış kurutma kabına konulur. Daha sonra 105 °C sıcaklığa sahip etüvde 24 saatlik süre ile bekletilir. Bu süre sonunda etüvden çıkarılan numuneler desikatör içerisinde 30 dakika süre ile soğutmaya bırakılır. İşlem sonunda desikatörden çıkarılan numuneler hassas terazide tartılarak ilk ve son numune tartım farkları hesaplanarak % nem tayini tespit edilir. (TSI 10459: 1992).

Nem tayini hesaplanması (%) = Filtre pres işlemi sonrasında elde edilen çamur kekine ait nem tayini hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$W_w = \frac{(M_b - M_c)}{(M_b - M_a) \times F} \quad (3.1)$$

Bu formülde; W_w = Çamur kekinin su içeriği (%), M_a = boş kabın darası (g), M_b = çamur keki bulunduran kap (g), M_c = kuru kek çamur ihtiva eden kap (g) ve F = % sonuç için 100 ifadesini temsil etmektedir.

Eluat hazırlama

Nem içerik oranı belirlenen çamur numuneden belirli oranlarda alınarak test miktarının hazırlanması için gerekli hesaplamalar yapılır. Çizelge EK 2 (Eluat hazırlamada kullanılan çizelge)'de gösterilen nem oranına karşılık gelen yaş kütle, hassas terazide tartılarak 1 litre cam hazne içerisine konulur. Daha sonra bu numune içerisine Çizelge EK 2'de belirtilen miktarda $5 < \text{pH} < 7,5$ aralığında, iletkenliği $0,5 \mu\text{S/cm}$ özelliğine sahip ultra saf

su (deiyonize) su ilave edilir ve toplam numune hacmi 1 litreye tamamlanır. Toplamda 1 litre olan numune 24 saat çalkalama cihazında (eluat hazırlama cihazı) çalkalanır. Çalkalama sırasında şişedeki katıların çökelmemesi önem arz etmektedir. Eluat hazırlama işlemindeki amaç, yapılan saha çalışması sonucunda elde edilen kek numunedeki toplam çözünen katının sıvı ortamına geçmesini sağlamaktır. Sıvı-katı kısım birbirinden ayrılıp süzme işlemlerinin yapılmasıyla suda çözünürleştirme işlemi gerçekleştirilmiş olur (Katı Atıklarda Ön İşlem (Eluat Hazırlama) Talimatı, 2023).

Süzme işlemi

İşlem sonrası hazne içerisinde üst su fazdan alınan numuneler, katı sıvı ayrımı için santrifüj işlemine tabi tutulur. Santrifüjden çıkan numune ilk önce kaba süzgeç kâğıdından daha sonra toplam çözünen katı analizi için cam elyaf filtreden süzülür. Klorür ve çözünmüş organik karbon analizleri için ise son olarak 0,45µm membran filtreden süzülerek eluatı analize hazır hale getirilir. Süzme işlemleri için alınan sıvı hacmi yaklaşık 50 mL'dir. Bu oran yapılan tekrar test sayısına göre artırılabilir.

Toplam çözünen katı tayini

Homojen hale getirilmiş numunenin belli miktardaki hacmi filtre edildikten sonra sabit tartıma gelmiş uygun numune kabında süzüntünün buharlaştırılması ve ardından 180°C de sabit tartıma getirilmesi esas alınır. Tartı kabındaki son ürün çözünmüş toplam katı miktarını temsil eder (SM 2540 C).

Toplam çözünen katı tayini hesaplanması (mg/L) = Uygulama işlemi il elde edilen çamur kekinin 24 saat eluat işlemi sonrası su fazına geçen toplam çözünen katı maddelerin tayini aşağıdaki formül uygulanmıştır.

$$M_{TÇK} = \frac{(M_{son} - M_{kroze}) \times 1000}{(V_{numune})} \quad (3.2)$$

Bu formülde; $M_{TÇK}$ = Toplam çözünen katı madde (mg/L), M_{kroze} = krozeye ait kütle (g), M_{son} = kuru numune + kroze kütlesi (son tartım sonrası) (g) ve V_{numune} = numuneden alınan sıvı hacmi (mL) miktarını ifade etmektedir.

Çözünmüş organik karbon tayini

Numune içerisindeki çözünmüş toplam karbon bozunarak ya da okside olarak, inorganik karbon ise orto-fosforik asit aracılığı ile karbondioksit'e dönüştürülür. Açığa çıkan CO₂'in in dedektörde okunması ile numunedeki çözünmüş toplam karbon, inorganik karbon ve toplam organik karbon miktarı mg/L cinsinden cihazda okunur (SM 5310 B).

Çözünmüş organik karbon tayini hesaplanması (mg/L) = TOC-L CPH cihazı analiz sonucunu uçurulamayan organik karbon (NPOC) olarak mg/L biriminde verir. Okunan her numune cihazda 3 tekrar yapılmaktadır. Uzak değer cihaz tarafından otomatik olarak atılır ve birbirine yakın diğer değerlerin ortalaması alınarak mg/L cinsinden sonuç verilir. Ancak seyreltme yapıldıysa hesap aşağıdaki gibi yapılır. Filtre pres işlemi sonrasında elde edilen çamur kekine ait çözünmüş organik karbon tayini hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\frac{\text{ÇOK}}{\text{NPOC}} = \text{Seyreltme Katsayısı} \times \text{Cihazda Okunan Değer} \quad (3.3)$$

Bu formülde; ÇOK = Çözünmüş organik karbon (mg/L) ifadesini temsil etmektedir.

Klorür tayini

Klorür iyonları, ilave edilen gümüş iyonları ile reaksiyona girer ve kantitatif olarak çökebilen AgCl oluşturur. İndikatör olarak kullanılan kromat iyonları gümüş, (Ag⁺) iyonunun gereğinden biraz fazlasının ilavesi ile kırmızı kahve renkli gümüş kromat çökeleğini oluşturur. Bu reaksiyon dönüm noktasının belirlenmesi için kullanılır. Çökmenin gerçekleşmesi için titrasyon süresince pH 5 ile 9,5 aralığında tutulur (ISO 9297:2011).

Klorür tayini hesaplanması (mg/L) = Uygulama işlemi ile elde edilen çamur kekinin 24 saat eluat işlemi sonrası su fazına geçen klorür muhtevası pCl litrede mg olarak aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$\rho_{CI} = \frac{(V_s - V_b) \times c \times f}{V_a} \quad (3.4)$$

Bu formülde; V_a = Numune hacmi (mL), V_b = şahit numunenin titrasyonunda kullanılan gümüş nitrat (AgNO_3) çözeltisi hacmi (mL), V_s = numunenin titrasyonunda kullanılan gümüş nitrat (AgNO_3) çözeltisi hacmi (mL), C = AgNO_3 çözeltisinin konsantrasyonu mol/L, f = dönüşüm faktörü, atık eluat için $f=35\ 450$ değeri kullanılmaktadır.

Kızdırma kaybı tayini

Kuru numunenin 550°C sıcaklıkta 60 dakika yakılarak, kızdırma sonucunda gaz olarak açığa çıkan maddelerin kütlelerinin % olarak hesaplanması ile elde edilir. Homojenliği sağlanamayan numunelerde kurutulmuş ve öğütülmüş numunede çalışma yapılır. Numunelerin kurutma işlemi 105°C 'de gerçekleştirilir (BS EN 15935: 2021).

Kızdırma kaybı tayini hesaplanması (%) = Filtre pres işlemi sonrasında elde edilen çamur kekine ait kuru kütlelerin kızdırma kaybı kütlece % olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$W_{LOI} = \frac{(M_b - M_c)}{(M_b - M_a)} \times 100 \quad (3.5)$$

Bu formülde; W_{LOI} = Numunenin kuru kütlelerin kızdırma kaybı % (m/m), M_b = kuru kütle içeren kroze kütle (g), M_c = kızdırılmış kuru kütle içeren kroze kütle (g), M_a = boş kroze kütle (g) ifadesini temsil etmektedir.

Toplam organik karbon tayini

Kurutulmamış numunede bulunan toplam karbon, yüksek ısı (900°C) ve katalist aracılığı ile karbondioksit ihtiva etmeyen oksijenli bir gaz kullanılarak CO_2 'e dönüştürülür. Yine kurutulmamış numune 200°C 'de orto-fosforik asit eşliğinde yakılarak yapısındaki inorganik karbonun karbondioksit dönüştürülmesi sağlanır. Açığa çıkan karbondioksit taşıyıcı gaz aracılığı ile dedektöre iletilir. Cihaza verilen numunedeki TC ve IC değerleri

mg vy. % olarak okunur. Gerekli hesaplamalar ile kuru maddedeki TC, IC ve buna bağı olarak TOC değerleri % olarak hesaplanır (BS EN 13137: 2001).

Toplam organik karbon tayini hesaplanması (%) = Filtre pres işlemi sonrasında elde edilen çamur kekine toplam organik karbon (%) hesaplanması aşağıdaki gibidir. Kullanılan standardın içerisindeki toplam organik karbon % TC ve toplam inorganik karbon % IC miktarı aşağıdaki gibi oran orantı yapılarak hesaplanır.

$$\%TC_{std} = \frac{(100 \times M_{tc})}{(M_{std})} \quad (3.6)$$

Bu formülde; % TC_{std} = Standardın içerisindeki % toplam karbon miktarı, M_{TC} = standardın içerisindeki toplam karbon miktarı (g), M_{STD} = standardın moleküler ağırlığı (g) olarak ifade edilmektedir.

$$\%IC_{std} = \frac{(100 \times M_{ic})}{(M_{std})} \quad (3.7)$$

Bu formülde; % IC_{std} = Standardın içerisindeki % toplam karbon miktarı, M_{IC} = standardın içerisindeki inorganik karbon miktarı (g), M_{std} = standardın moleküler ağırlığı (g) olarak ifade edilmektedir.

Numunenin analizi gerçek numunede yapıldıktan sonra sonuç daima kuru madde esasına uygun olarak verilir. Numuneye ait nem değeri üzerinden kuru madde miktarına geçilerek % TC, % IC ve % TOC değerlerinden herhangi biri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\%TC_{km} = \frac{(\% TC \times 100)}{(100 - \% Nem)} \quad (3.8)$$

Bu formülde; % TC_{km} = Kuru numunedeki Toplam Karbon yüzdesi, % TC = cihazda okunan toplam, karbon yüzdesi ve % Nem = numuneye ait nem yüzdesini ifade etmektedir.

Numuneye ait raporlandırılan %, TOC değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\%TOC_{km} = \%TC_{km} - \%IC_{km} \quad (3.9)$$

$$\% TC = \frac{(100 \times mg_{TC})}{M_{TC}} \quad (3.10)$$

Bu formülde; mg_{TC} = Cihazın okuduğu mg TC değerini, M_{TC} = cihaza TC okuması için verilmiş olan numune kütlesini (mg) ifade etmektedir.

$$\% IC = \frac{(100 \times mg_{IC})}{(M_{IC})} \quad (3.11)$$

Bu formülde; mg_{IC} = Cihazın okuduğu mg IC değerini, M_{IC} = cihaza IC okuması için verilmiş olan numune kütlesini (mg) ifade etmektedir. Daha sonra tekrar kuru madde miktarı baz alınarak % TOC_{km} olarak analiz sonuçlanır.

Çalışma süresince yapılan tüm analiz yöntem, metot ve kullanılan cihaz/model bilgisi Çizelge 3.11.' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlere ait metot ve cihazlar

Parametre	Analiz Metodu	Cihaz/Model	Analiz Cihazı
Toplam Organik Karbon ve Çözülmüş Organik Karbon	Yüksek Sıcaklık Yakma Yöntemi (BS EN 13137:2001)	SHIMADZU TOC-L CPH	
Kızdırma Kaybı	Gravimetrik Metot (550 ± 25 °C) (BS EN 15935: 2021)	CARBOLITE CWF 1100	

Çizelge 3.11. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlere ait metot ve cihazlar (devam)

Su İçeriği (Nem)	Gravimetrik Metot (TSI 10459: 1992)	MEMMERT UFE 600 / UFE 800 / UN	
Toplam Çözünen Katı	Gravimetrik Metot (SM 2540 C)	VAKUM SÜZME SETİ /NÜVE NB 20	
Klorür	Titrimetrik Metot (ISO 9297: 2021)	TİTRATÖR	

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Çamur Karakterizasyonu

Öncelikle tesiste oluşan çamurun içeriği analiz edilerek, çamurun karakteristik yapısı hakkında gereken veriler raporlanmıştır. Liman atık kabul tesislerindeki sintine suyu arıtma çamurları yağ içeriği, su içeriği, kızdırma kaybı, inorganik iyonlar ve bazı metaller ile karakterize edilmektedir. Tez kapsamında arıtma çamurlarında Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik kriterleri Ek-2C de 1. Sınıf depolama kriterlerinde yer alan parametreler analiz edilmiştir.

Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik Ek-2C kriterleri (bkz. Ek 2)

Parametre	Birim	3. Sınıf Sınır Değeri	2 Sınıf Sınır Değeri	1. Sınıf Sınır Değeri
ÇOK	mg/L	50	80	100
TÇK	mg/L	400	6000	10 000
Klorür	mg/L	80	1500	2500
TOK	%		5 %	6
LOI	%			10
Su Muhtevası	%	50	50	50

Yukarıda çizelgeye (Ek 2) göre verilen kriterler baz alınarak, atığa yönelik yapılan analiz sonuçları değerlendirmeye alınır. Bu değerlendirme kapsamında elde edilen analiz sonuçları, yönetmelik kapsamında atığın hangi sınıfta ait olduğunu göstermektedir.

Sonuç (mg/L); [$<3. Sınıf = İnert$] ($>3. Sınıf, <2 Sınıf = Tehlikesiz$) ($>2. Sınıf, <1 Sınıf = Tehlikeli$) ($> 1 Sınıf = Çok Tehlikeli$) olarak değerlendirilir.

Bu çalışmada, liman atık kabul tesislerindeki fizikokimyasal atıksu arıtma ünitesi sonrasında oluşan gemi sintine suyu arıtma çamurunun, bertaraf öncesi özelliklerinin (tehlikeli madde içeriğinin azaltılması, susuzlaştırılması) iyileştirilmesi araştırılmıştır. Üç yıllık (üç aylık periyotlar halinde) ve yıllık (aylık periyot halinde) bazlarda yapılan çamur

karakterizasyon çalışmaları sonucu ait elde edilen bulgular Çizelge 4.1. ve 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sintine atıksuyu arıtma çamuru karakterizasyon analiz sonuçları (2022 yılı)

Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik Kriterleri (Ek-2C)					Analiz
Parametre	Birim	Limitler (3. sınıf)	Limitler (2. sınıf)	Limitler (1. sınıf)	Sonuç
Arsenik (As)	mg/L	0,05	0,2	2,5	0,001
Baryum (Ba)	mg/L	2	10	30	0,416
Kadmiyum (Cd)	mg/L	0,004	0,1	0,5	0,004
Krom (Total)	mg/L	0,05	1	7	0.0
Bakır (Cu)	mg/L	0,2	5	10	0,171
Civa (Hg)	mg/L	0,001	0,02	0,2	0,002
Molibden (Mo)	mg/L	0,05	1	3	0,011
Nikel (Ni)	mg/L	0,04	1	4	0,027
Kurşun (Pb)	mg/L	0,05	1	5	0,018
Antimon (Sb)	mg/L	0,006	0,07	0,5	0,011
Selenyum (Se)	mg/L	0,01	0,05	0,7	0,009
Çinko (Zn)	mg/L	0,4	5	20	0,26
pH			≤6		7,86
Flor (F ⁻)	mg/L	1	15	20	0,96
Sülfat (SO ₄ ⁼)	mg/L	100	2000	5000	1062
Çözülmüş Organ Karbon	mg/L	50	80	100	109

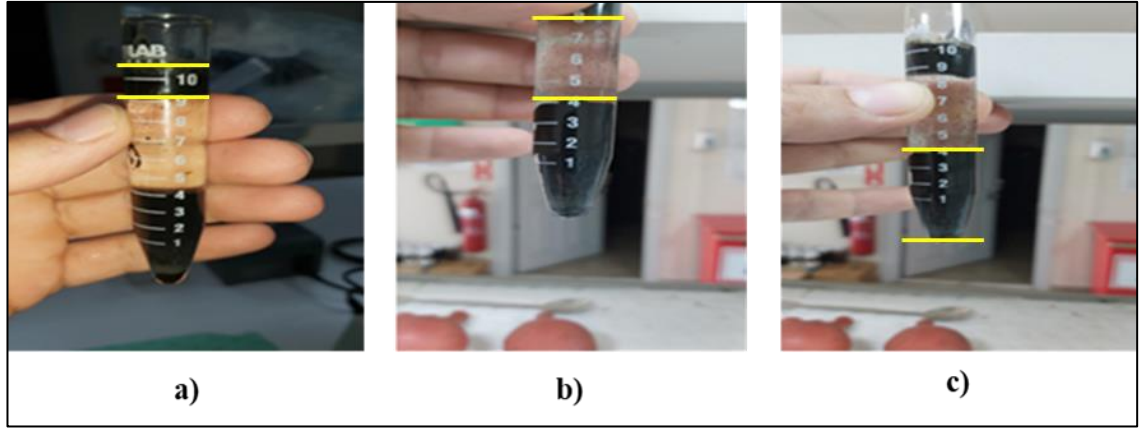
Çizelge 4.1. Sintine atıksuyu arıtma çamuru karakterizasyon analiz sonuçları (2022 yılı) (devam)

Toplam Çözünen Katı	mg/L	400	6000	10000	10627
Klorür	mg/L	80	1500	2500	4552
Toplam Organik Karbon	%		5	6	50
Kızdırma Kaybı	%			10	55
Su İçeriği	%	50	50	50	77

Yapılan bu örnek çalışmaya göre arıtma çamuru; As, Ba, Cd, Se, T. Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Florür, Zn ve ÇOK bakımından 3. Sınıf; Hg, Mo ve Sülfat bakımından 2. Sınıf; TÇK bakımından 1. Sınıf tehlikeli olduğu görülmektedir. Klorür, TOK, LOI, Su Muhtevası bakımından ise 1. Sınıf değerini aşarak çok tehlikeli olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Çamur Yağ İçeriği

Yapılan çamur karakterizasyon belirleme çalışmaları neticesinde, sulu çamur içeriğindeki petrol ve petrol türevli organik yağ içeriği ortalama % 5 ila % 15 arasında değişebildiği görülmüştür. Bu durum arıtma ünitesine gelen farklı karakteristikteki sintine sularından kaynaklanmaktadır. Bunun sebebi, petrol ve petrol türevi bulaşmış atıklardaki (sintine, slop, slaç, kirli balast, atık yağ) organik içeriğin yüksek ve değişken olmasıdır. Proses sonrası oluşan sintine sulu çamur içerisindeki organik yağ içeriğinin tespiti için santrifüj testi uygulanmıştır. Bu test sonucunda sulu çamur içeriğindeki yağ seviyesinin ortalama % 10 seviyelerinde olduğu Şekil 4.1’de verilmiştir.



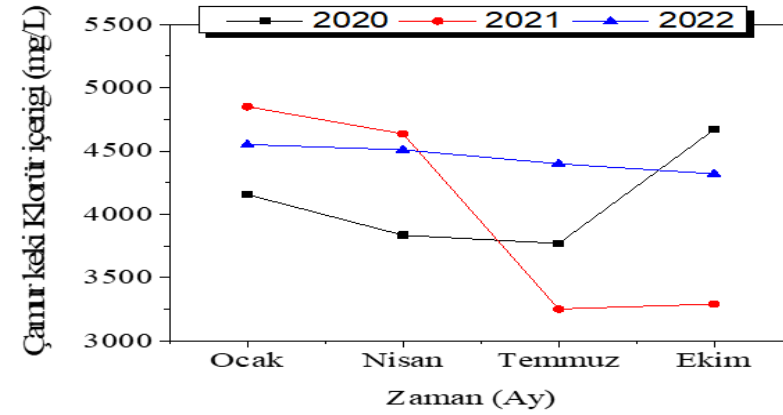
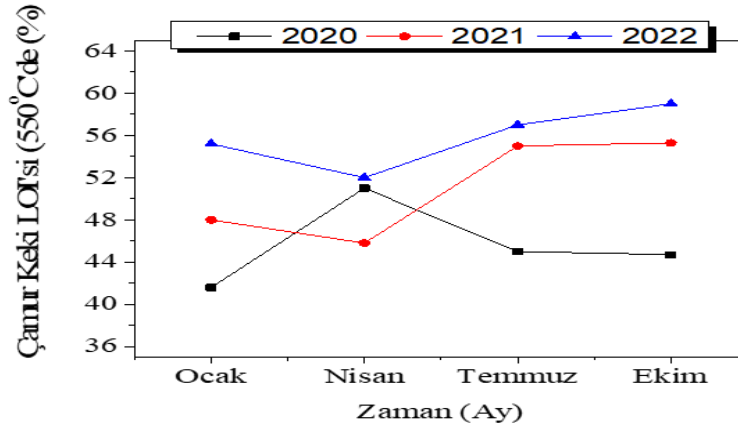
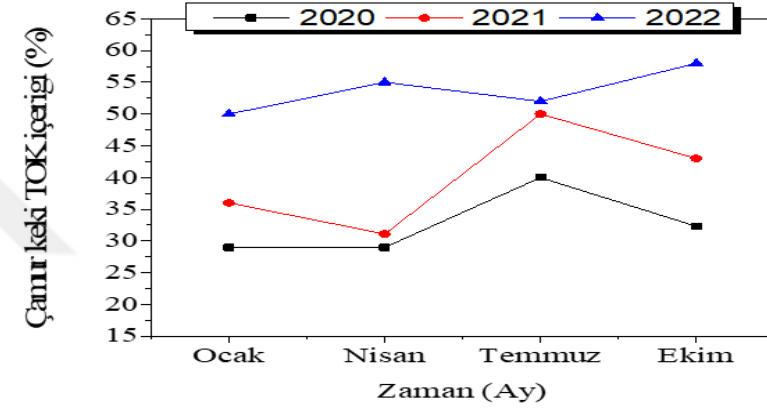
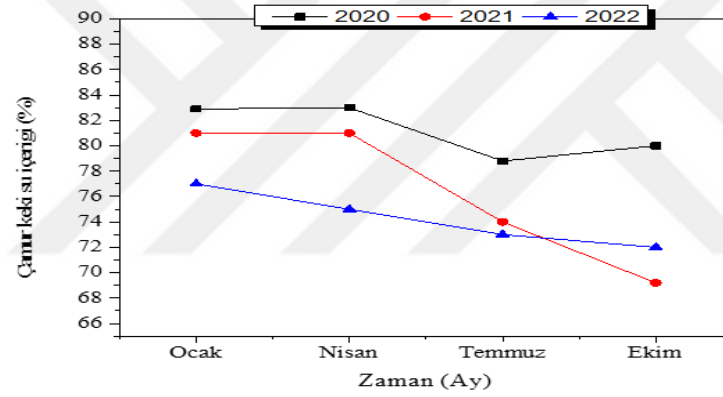
Şekil 4.1. Ham sulu çamur santrifüj test faz ayrımı a) Üst yağ fazı b) Alt su fazı c) dip tortu (yağsız katı madde)

Çizelge 4.2. Sintine atıksuyu arıtma çamuru karakterizasyon analiz sonuçları (2020-2022 yılları arası)

Analiz Parametre	2020				2021				2022			
	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim
Nem (%)	82,9	83	78,8	80	81	81	74	69,2	77	75	73	72
TOK (%)	29	29	40	32,3	36	31,1	50	43	50	55	52	58
LOI (%)	41,6	51	45	44,7	48	45,8	55	55,3	55,2	52	57	59
Klorür (mg/L)	4157	3836	3770	4670	4851	4636	3253	3292	4552	4510	4400	4320

Yukarıdaki çizelgede 2020 ve 2022 yılları arasında alınan numunelere ait ölçüm sonuçlarını vermektedir. Bu tür atık suların arıtılmasından elde edilen arıtma çamurları, genellikle ağır metaller ve sınır değerini aşan bazı parametreler sebebiyle çok tehlikeli olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çamurlar, genellikle organik formlarda (örneğin petrol türevli atıklar) bileşikler içermektedir. Arıtma çamurundaki tehlikeli sınıfta yer alan bazı parametrelerin zamanla nasıl değiştiği grafik Şekil 4.2’de verilmiştir.





Şekil 4.2. Arıtma çamurundaki tehlikeli sınıfta yer alan parametrelerin zamanla değişimi. a) Su içeriği, b) TOK içeriği c) LOI içeriği, d) Klorür içeriği

4.3. Atık Kabul Tesisi Çamur Susuzlaştırma İşlemi

Atıksu arıtımı sonucu oluşan arıtma çamuru içeriğindeki suyun uzaklaştırılması, bertaraf edilmeden önce yapılması gereken önemli bir işlemdir. Çamurun susuzlaştırılmasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi, filtre pres kullanımıdır. Bir filtre pres, çamurun filtre bezleriyle kaplı bir dizi filtre plakasından geçirilmesiyle çalışır. Plakalar yüksek basınç altında birbirine bastırılır, bu da suyun çamurdan ve filtre bezlerinden sıkılarak dışarı atılmasına ve geride daha kuru, daha katı bir kek bırakılmasına neden olur. Bu kekin daha sonra orijinal çamurdan daha kolay ve verimli bir şekilde bertaraf edilmesi mümkündür. Bu çalışmada filtre presleme öncesinde tesiste aşağıdaki standart prosedür uygulanmaktadır. Lisanslı atık alım gemileri ile liman atık kabul tesislerine getirilen atıklar, yetkili personel tarafından atık kabul depolama tanklarına alınmaktadır. Atıklar, geminin ve atık yağın ilk doğal ayrıştırması için (yoğunluk farkından dolayı) farklı tanklara aktararak ve dinlendirilmektedir (prosedür gereği en az altı saat). Daha sonra süreç iki şekilde ilerlemektedir. Birincisi geminin atık yağının susuzlaştırılması, diğeri ise atık suyun arıtılmasıdır. Susuzlaştırma işleminden elde edilen serbest su fazı, serbest su depolama tankına ve buradan da ayırıcı plakaların bulunduğu fiziksel-kimyasal arıtma ünitesinin yağ kapalı bölümüne gönderilir. Burada serbest su içerisinde bulunan yağ, bu bölmedeki ayırıcı plakalar sayesinde yüzeyde kalır ve yağ dolu savak tarafından yağ cebi haznesine alınır. Yağ kapalı plakalarından geçen serbest su, çözünmüş yağ moleküllerinden ve kirleticilerden arındırılmak üzere çözünmüş hava flotasyonu tankına alınır. Çözünmüş hava flotasyonu ünitesinde mikrokabarcıklarla flotasyon işlemi uygulanmaktadır. Yağ tutucudan toplanan yağ, yağ işleme tankına gönderilir. Su ise yerçekimi ile dengeleme tankına alınır. Hidrolik bekletme süresi boyunca dengeleme tankında bekleyen atık su alttan drene edilerek sırasıyla hızlı (koagülasyon) ve yavaş karıştırma (flokülasyon) tanklarına iletilir ve ardından durultucu tankına verilir. Durultucu tank dibine çöken floklar sintine suyu arıtma çamurunu oluşturmaktadır. Oluşan sulu çamur otomatik olarak filtre prese alınarak susuzlaştırılır. Tesisdeki filtre pres, 1000 x 1000 mm ebadında 20 plakalı, ortalama pres kek hacmi 500 litre, kek kalınlığı 32 mm olan, merkezi beslemeli otomatik ünitedir (Şekil 4.3). Çamur besleme pompası, ortalama beş bar diyaframlı, iki m³/h kapasiteli, yüksek basınçlı alüminyum

gövdeye sahiptir. Tesiste bulunan atıksu arıtma ünitesine ait hesaplanmış gerçek atıksu arıtım ve çamur oluşum değerlerini gösteren veriler Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Tesis filtre pres ünitesi

FİZİKO-KİMYASAL ATIKSU ARITMA TESİSİ			
ORTALAMA KAPASİTE			
423 m ³ /gün	ARITILAN ATIKSU	423 m ³ /gün	0,07%
3,5%		0,28%	
14,8 m ³ /gün	SULU ÇAMUR	14,8 m ³ /gün	423 m ³ /gün
8,0%		2,00%	
1,18 m ³ /gün	KEK ÇAMUR	1,18 m ³ /gün	
25%			
296 kg/gün	KURU KATI MADDE	296 kg/gün	296 kg/gün

Şekil 4.4. Atıksu arıtım ve çamur oluşum değerleri

Filtre presten elde edilen çamur kekinin özellikleri yukarıda Çizelge 4.1'de verilmiştir. Tabloya göre tesisteki arıtma çamurları tehlikeli atık sınıfına göre; As, Ba, Cd, Se, T. Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Florür, Zn ve çözünmüş organik karbon açısından Sınıf 3; Hg, Mo ve Sülfat açısından Sınıf 2; toplam çözünmüş katı madde bakımından ise birinci sınıf tehlikeli atık olduğu görülmektedir. Ancak klorür, toplam organik karbon, kızdırma kaybı ve su içeriği dikkate alındığında bu parametreler birinci sınıf sınırlarını aşmakta ve son derece tehlikeli sınıfta kabul edilmektedir.

4.4. Ultrasonik Güç ve İşletme Süresinin Gem Sintine Atıksuyu Arıtma Çamurlarının İyileştirilmesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Proje kapsamında yapılan 2'nci adım uygulama çalışmalarında, ultrases güç ve işletme süreleri değiştirilerek ham çamur üzerinde iyileştirme deneyleri yapılmış ve her deney sonrasında elde edilen kek çamur örnekleri hedef analizlerine tabi tutulmuştur. Bu adımda yapılan tüm analizler ikişer tekrarlı olarak çalışılmıştır. Bu analizler için izlenen parametreler, 3 farklı grup çalışması olarak ele alınmıştır. Yapılan çalışmalarda toplam organik karbon, kızdırma kaybı, su muhtevası (nem), klorür, çözünmüş organik karbon ve toplam çözünen katı olmak üzere 6 farklı hedef parametre takip edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, her bir parametre için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve ilgili parametrelere ait 3 farklı grup çalışmasının ortalama değerleri alınarak çizelge ve grafiklere geçirilmiştir. Uygulanan farklı güç (watt), işletme süreleri (dakika) ve analiz sonuçları bu bölümde yer alan çizelgelerde detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çizelgelerde yer alan sıfır (0) dakika proses uygulaması süresi, işlenmemiş ham çamurun ilgili parametreye ait sonuçlarını göstermektedir. 2'nci adım uygulama süreçlerinde elde edilen kek çamur örneklerine ait hedef parametre analiz sonuçları, hem işlenmemiş ham çamur analizlerine göre hem de Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2C 1. Sınıf kriterlerine (bkz. Ek 2) göre mukayese edilmiştir.

4.4.1. Ultrasonik yöntem ile çamur susuzlaştırma ve iyileştirme çalışmaları

Çamur susuzlaştırma, hacmi azalttığı ve çamurun elleçleme ve bertaraf özelliklerini iyileştirdiği için sintine suyu arıtma çamurunun yönetiminde kritik bir adımdır. Mekanik susuzlaştırma ve kimyasal şartlandırma gibi geleneksel çamur susuzlaştırma

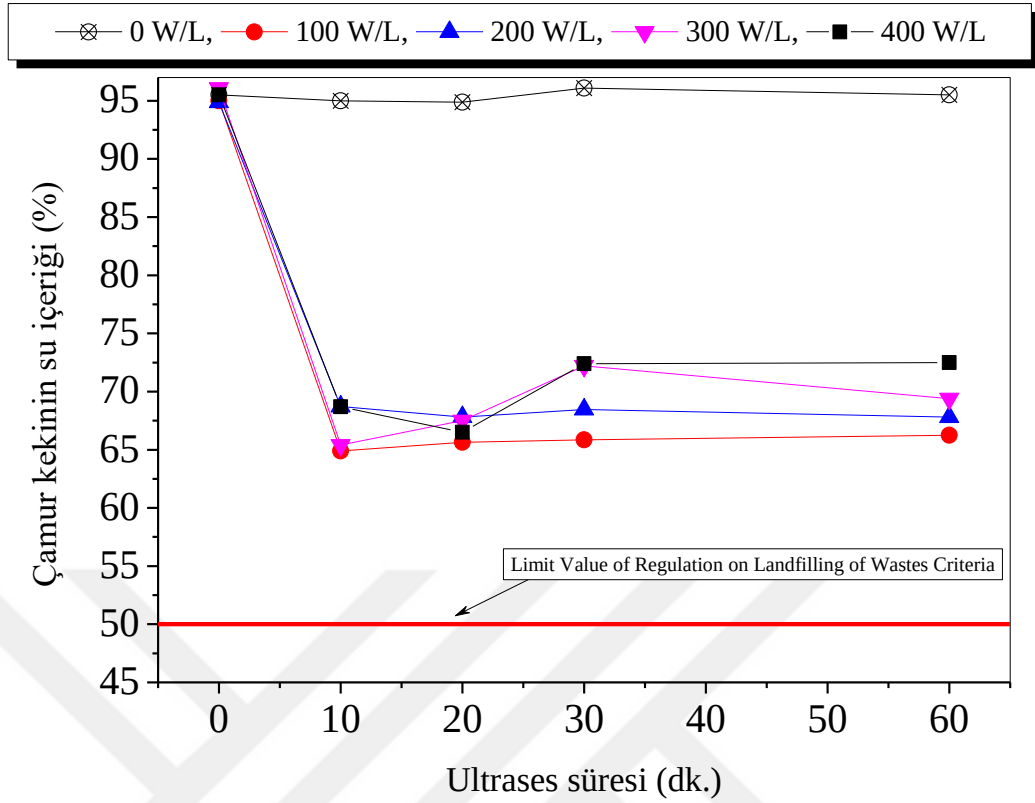
yöntemlerinin verimlilik, enerji tüketimi ve çevresel etki açısından sınırlamaları vardır. Bu nedenle sintine suyu arıtma çamurunun susuzlaştırma performansının arttırılmasına yönelik yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Ultrasonik arıtma, çamurun fizikokimyasal özelliklerini geliştirme ve sıvı ve katı fazların ayrılmasını iyileştirme kabiliyeti nedeniyle çamur susuzlaştırma için umut verici bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır (Pilli vd., 2011). Tesisteki atık su arıtma çamurlarının susuzlaştırılması amacıyla uygulanan filtre pres çıkışında, çamur kekinin altı parametresi tehlikeli atık sınıfında kalmaktadır. Bu parametreler toplam organik karbonu, çözünmüş organik karbonu, kızdırma kaybını, toplam çözünmüş katıları ve klorürün yanı sıra su içeriğini içerir. Farklı ultrasonik güçlerde ultrases çalışma süresinin çamur su içeriğine etkisi Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.5'teki 0 değeri, ultrases uygulanmamış çamuru yani sintine suyu arıtımı sonrası oluşan çamuru göstermektedir. Grafikteki diğer noktalar, çamurun ultrases ile işlenmesinden sonra elde edilen çamur keki örneklerini temsil etmektedir. Şekle göre ultrases çalışma süresinin 60 dakikaya kadar arttırılmasının veya ultrases gücünün 100 W/L'den 400 W/L'ye çıkarılmasının çamur su içeriğinin değişimi üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Tesiste mevcut filtre pres kek uygulaması sayesinde çamur su içeriğinin % 70 civarına kadar azaltılabileceği dikkate alındığında ultrases ile aynı susuzlaştırma verimine sahip olduğu söylenebilir. Bunun aksine, ultrasonik dalgaların çamur susuzlaştırma işlemi üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri olabilir. Ultrasonik dalgaların çamur arıtımında ikili etkisi vardır. Öncelikle çamurun çatlamasını sağlayarak iç suyun açığa çıkmasına neden olurlar. Bu, çamur parçacıklarının topaklanmasını ve pıhtılaşmasını teşvik ederek sedimentasyon ve susuzlaştırma performansının artmasına yol açar.

Bununla birlikte, ultrasonik etki aynı zamanda çamur topaklarının yapısına zarar vererek daha küçük parçacık boyutlarına yol açarak olumsuz sonuçlara da yol açabilir. Bu daha küçük parçacıkların nemi emme eğilimi daha yüksektir, bu da çamur suyunun ayrılmasını ve etkili dehidrasyonun sağlanmasını daha zorlu hale getirir (X. Xu, Cao, Liu, vd., 2019). Ultrasonik kırma için uygun çalışma koşullarının seçimi çok önemlidir. Yüksek güç ve uzun süreli ultrasonik işlem kullanılması, çamur yapısında aşırı hasara neden olabilir, bu da flokların tamamen parçalanmasına ve hücre içi organik madde ve nemin açığa çıkmasına neden olur. Bu, organik maddenin arıtılmasına yardımcı olabilirken, küçük parçacıkların artması nedeniyle çamur susuzlaştırma performansını olumsuz yönde

etkileyebilir. Bu nedenle, farklı işleme amaçları için uygun işleme koşullarının ve süresinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir. Bu olumsuz etkileri azaltmak için ultrasonik iyileştirme süresi aşırı uzun olmamalıdır (X. Xu, Cao, Liu, vd., 2019). Susuzlaştırmadan önce ultrasonik ön arıtmadan sonra özelliklerde önemli değişikliklerin olmaması, çamur bileşimi, değişkenlik ve katı konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir. Sintine suyu arıtma çamurunun bileşimi, maddelerin kolayca parçalanmaması nedeniyle ultrasonik ön arıtmadan çok fazla etkilenmeyebilir, dolayısıyla ön arıtma önemli değişiklikler sağlamayabilir. Ayrıca çamurdaki katı madde konsantrasyonu da ultrasonik ön arıtmanın etkinliğini etkileyebilir. Çamur çok seyreltilmişse ultrasonik dalgaların etkisi sınırlı olabilir. Tersine, eğer çamur çok konsantre ise ultrasonik iyileştirme iyi yanıt vermeyebilir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan ultrasonik reaktöre sadece su veya sadece homojen emülsifiye yağ numunesi verildiğinde cihaz sorunsuz çalışmaktadır ancak yağlı çamur beslendiğinde cihaz zaman zaman "ultrases enerji dağılımı yük dengeleme" hatası verebilmektedir. Örneklemin homojenliğinin US performansını etkilediği söylenebilir.

Çizelge 4.3. Ultrasonik güç ve işletme süresinin çamur su içeriğine (nem) etkisi analiz sonuçları

Proses uygulama süresi (dk.)		Ultrases uygulama güç aralığı (Watt/L)				
		0	100	200	300	400
		Su muhtevası analiz sonuçları (%)				
Ham Çamur	0	95,5	95	94,87	96,1	95,5
İşlenmiş Çamur	10	95	64,90	68,72	65,40	68,70
	20	94,87	65,63	67,80	67,50	66,50
	30	96,1	65,86	68,46	72,20	72,40
	60	95,5	66,24	67,81	69,40	72,50



Şekil 4.5. Farklı ultrasonik güçlerde ultrases çalışma süresinin çamur su içeriğine etkisi

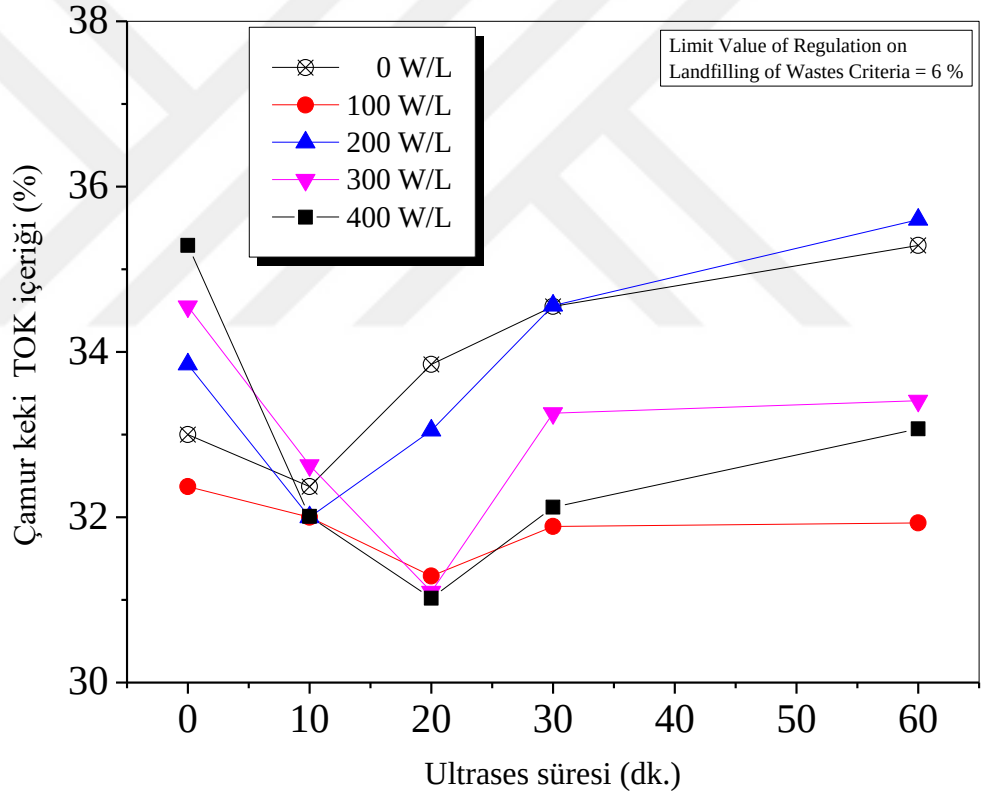
Toplam organik karbon (TOK), organik bileşikler için önemli bir göstergedir çünkü karbon, bu bileşikler için vektör görevi görür (Ning vd., 2014). Bu nedenle çamur kekindeki % TOC içeriği Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Çamur numuneleri 24 saat fırında kurutularak su içeriği belirlendi, ardından ölçüm için öğütülerek hazırlandı, kuru katı olarak tartıldı ve doğrudan ölçüm için TOC cihazına verildi. Çamur kekinin % TOK içeriği farklı çalışma koşullarına göre 31 ile 36 arasında değişmektedir. Literatürdeki benzer ultrasonik çamur susuzlaştırma çalışmalarında, kısa iyileştirme süreli yüksek ultrases gücünün, daha uzun iyileştirme süreli düşük ultrases gücüne göre daha verimli olduğu bildirilmektedir (Grönroos vd., 2005). Bu çalışmada en düşük TOK içeriği 20 dakikalık sonikasyon süresinde 400 W/L ile elde edildi. Ancak literatürdeki çalışmalardan farklı olarak çalışmanın gerçek ölçekli bir tesisten anlık örneklerle yürütüldüğü göz ardı edilmemelidir. Bununla birlikte, TOK değişimindeki ihmal edilebilir değişiklik, literatürde bildirilen yalnızca ultrases kullanılarak yapılan benzer çamur arıtma çalışmaları ile tutarlı görünmektedir (Gong vd., 2015; Ning vd., 2014). Deniz yük araçlarının kargo tankları, taşınan yükün bütünlüğünün ve kalitesinin

bozulmaması için her sefer öncesinde temizlenmektedir. Bu temizleme işlemi sırasında kullanılan solüsyonlar organik içeriği yüksek kimyasallardan oluşmaktadır. Temizlik amacıyla kullanılan bu kimyasallar, taşınan yükün cinsine göre farklı karakteristik özellikler gösterebilmektedir. Gemi tanklarının yıkanması sonucu ortaya çıkan atık su, tank temizleme kimyasallarının kullanılması nedeniyle petrol ve petrol türevi yağlı kalıntılar da dahil olmak üzere yüksek oranda organik kimyasallar içermektedir. Atık suyun fizikokimyasal arıtılmasından sonra bile, atık su arıtımından elde edilen çamur hala yağlı içeriğe sahip olabilir ve bu da çamurun TOK içeriğini yükseltir. Çamurun TOK ve su içeriği değerlerinin benzer eğilimler verdiği Şekil 4.5 ve 4.6'da göstermektedir Yüksek organik içeriğin çamur susuzlaştırma üzerindeki etkisi iki şekilde açıklanabilir. Birincisi, çamur içindeki organik içerik, çamur topakları arasında suyu daha fazla su tutar ve ikinci olarak, yağlı içerik, filtre presinin gözeneklerini tıkayarak suyun filtrasyonunu engeller. Bu çalışmadaki çamur, yüksek organik içeriği nedeniyle stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) tesislerinde işlenememektedir. Bu nedenle Haydarpaşa Atık Kabul Tesisi'nden S/S ünitesine gelen tehlikeli arıtma çamurları 1. sınıf düzenli depolama sahasında depolanamamaktadır. Limiti aşan organik değerlerden biri çözünmüş organik karbon (ÇOK)'dur ve sonikasyonun ardından çamur kekindeki ÇOK konsantrasyonları Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Sonikasyonun çamur topaklarını parçalayabildiği ve bazı hücrel organik maddeleri çözündürebildiği ve böylece organik maddelerin uzaklaştırılmasına yol açabildiği bilinmektedir (Savun vd., 2016). Bu arada, tipik olarak, daha güçlü ultrasonikasyon enerji yoğunlukları ile daha büyük kavitasyon etkileri gözlemlenir (Meng vd., 2018) bu da organik madde giderimini artıran başka bir destekleyicidir. Ancak şekilden de görülebileceği gibi sonikasyon süresi ve yoğunluğu ile çamur kekinde kalan ÇOK arasında güçlü bir korelasyon kurulamamaktadır. Bu durum, bu çalışmadaki sintine suyu arıtma çamurunun, literatürdeki benzer çamur arıtma çalışmalarından farklı olarak, evsel atıksu arıtma çamuru veya endüstriyel proses çamuruna göre çok farklı fraksiyonlarda ve değişkenlikte organik madde içermesine katkıda bulunabilir.

Çizelge 4.4. Ultrasonik güç ve işletme süresinin toplam organik karbon içeriğine etkisi analiz sonuçları

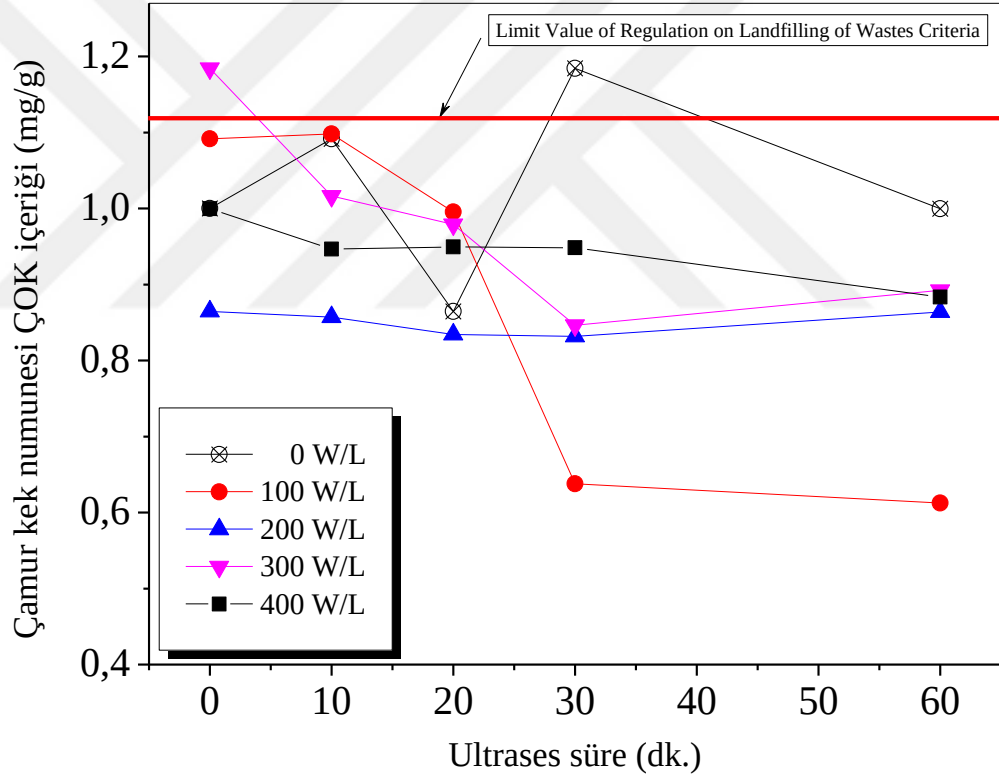
Proses Uygulama Süresi (dk.)		Ultrases uygulama güç aralığı (Watt/L)				
		0	100	200	300	400
		Toplam organik karbon sonuçları (%)				
Ham Çamur	0	33	32,37	33,85	34,55	35,29
İşlenmiş Çamur	10	32,37	32	32	32,63	32,01
	20	33,85	31,29	33,05	31,1	31,02
	30	34,55	31,88	34,56	33,26	32,12
	60	35,29	31,93	35,6	33,41	33,07



Şekil 4.6. Çalışma süresinin ve ultrasonik gücün sintine suyu arıtma çamurunun toplam organik karbon içeriğine etkisi

Çizelge 4.5. Ultrasonik güç ve işletme süresinin çözünmüş organik karbon içeriğine etkisi analiz sonuçları

Proses Uygulama Süresi (dk.)		Ultrases uygulama güç aralığı (Watt/L)				
		0	100	200	300	400
		Çözünmüş organik karbon analiz sonuçları (mg/g)				
Ham Çamur	0	1	1,09	0,86	1,18	0,99
İşlenmiş Çamur	10	1,09	1,09	0,85	1,01	0,94
	20	0,86	0,99	0,83	0,97	0,94
	30	1,18	0,63	0,83	0,84	0,94
	60	0,99	0,61	0,86	0,89	0,88



Şekil 4.7. Çalışma süresinin ve ultrasonik gücün sintine suyu arıtma çamurunun çözünmüş karbon içeriğine etkisi

Kızdırma kaybı değerinin, çamur malzemesinde bulunan organik bileşimin dolaylı ancak makul ölçüde kesin bir göstergesi olarak hizmet ettiğini belirtmektedir (O’Kelly, 2005). Bu çalışmada LOI ölçümünün iki amacı; (i) arıtma tesisi nedeniyle oluşan çamur kekinin

yerel yasal düzenlemelere uygun olarak düzenli depolama sahasına gömülüp gömülemeyeceğinin belirlenmesi, (ii) çamurun susuzlaştırılabilirlik özelliğini gösteren bir gösterge olarak kullanılmasıdır. Çamur keki örneklerinde kızdırma kaybı, 10-60 dakika ultrasonikasyon arasındaki dört farklı çalışma süresine göre değerlendirilmiş ve Şekil 4.8'de sunulmuştur. Ayrıca işlem görmemiş çamur kekinin LOI değerleri aynı grafik üzerinde ultrasonik zamanın sıfır olduğu değere karşılık gelen y eksenini değerinde gösterilmektedir. Aynı zamanda dört farklı ultrasonik güç değerinin LOI üzerindeki etkileri grafikte gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi ultrases uygulaması yapılmayan çamur kekinin LOI değerleri de tesise kabul edilen farklı günlerde atık yağ içeriğinin farklı olması ve dolayısıyla farklı özelliklerdeki arıtma çamuru nedeniyle farklı çıkmıştır. Grafiğe bakıldığında, ultrases uygulama süresi ve gücü, her ne kadar farklı başlangıç özelliklerine sahip olsa da LOI değerlerinde herhangi bir eğilim yaratmamaktadır. Bu çalışmada LOI değerlerinin yasal sınır olan (bkz. Ek 2) % 10'un altına düşürülmesi hedeflenmiş olsa da farklı deney koşullarında bu değerler % 57,5 ile % 60 arasında kalmıştır. Yukarıda belirtilen koşullar altında ultrasesin yetersiz kalması, tesise gelen sıvı atık içeriğinin yüksek ve değişken sayıda organik bileşen içermesi ile değerlendirilebilir. Ayrıca çamurun yetersiz susuzlaştırılması sıklıkla gelen çamur beslemesinin kalitesiyle ilişkilendirilir. (Kopp & Dichtl, 2001)'e göre, kızdırma kaybının boyutu ile mevcut serbest su miktarı arasında dikkate değer bir korelasyon vardır. Kızdırma kaybındaki artış, serbest su içeriğinde bir azalmaya ve kılcal su içeriğinde bir artışa neden olur ve bu da susuzlaştırma prosesleri için zorluklar oluşturur.

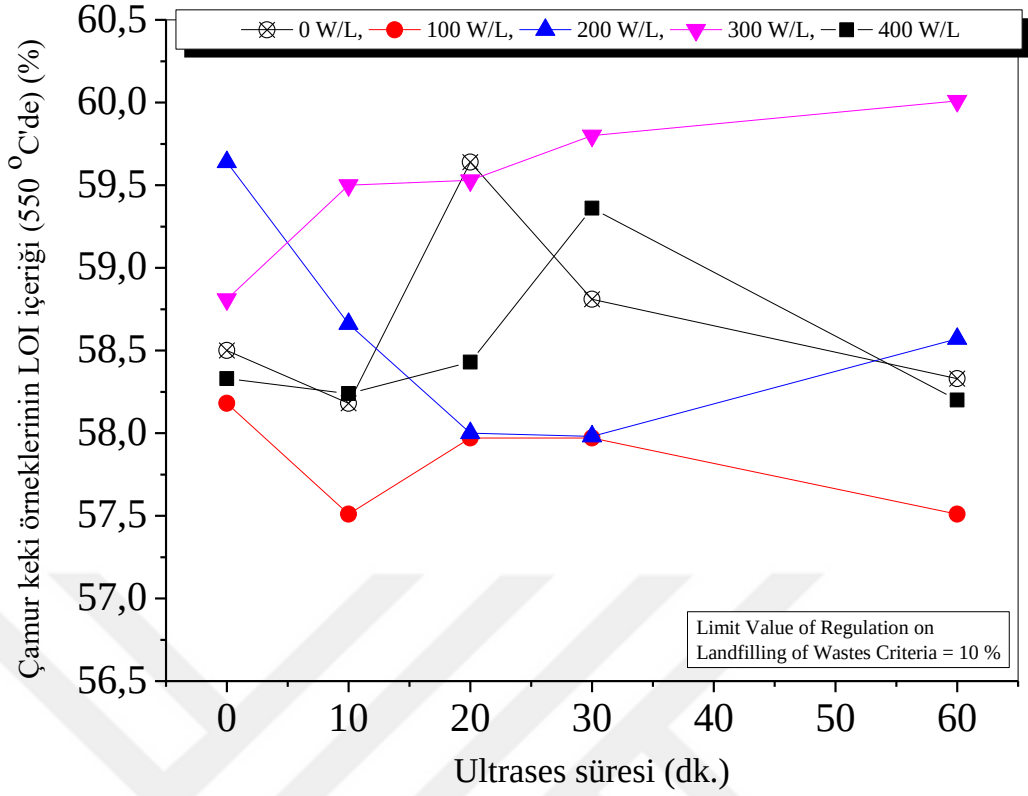
Bu çalışmada tesisteki çamurun su içeriği % 95 olup, bu değer mevzuat sınırının üzerinde (bkz. Ek 2) kalsa da ultrases ile ancak % 60 ila 70 civarına düşürülebilmektedir. Sonuçta çamurdaki organik bileşiklerin sayısı arttıkça çamur parçacıklarının yoğunluğu azalır. Bunun nedeni, organik parçacıkların inorganik parçacıklara kıyasla daha küçük bir temas açısına sahip olmaları ve bunun sonucunda suyun kılcal kuvvetler yoluyla daha fazla bağlanmasıdır (Dixon vd., 2003). Çamurun susuzlaştırılabilirliğini karakterize etmek için en çok kullanılan parametre, uçucu katı madde içeriği veya kızdırma kaybıdır. Daha yüksek kızdırma kaybı değerlerine sahip çamurlar genellikle susuzlaştırmada daha büyük zorluk sergiler. Ulaşılabilir susuzlaştırma sonuçları, uçucu katı içeriği azaldıkça iyileşme eğilimindedir. Farklı kalitede katı yağ, sıvı yağ ve tutuşma kaybı içeren bazı çamur arıtma sistemlerinden toplanan verilerin analizi, yüksek organik katı içeriğine (özellikle katı ve

sıvı yağ) sahip çamurun, daha düşük organik katı içeriğine sahip çamurla karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha düşük susuzlaştırma verimliliği sergilediğini göstermektedir (Kopp & Dichtl, 2001). Bu çalışmada elde edilen yüksek LOI değerleri ve düşük susuzlaştırma verimleri de literatürde bildirilen verilerle tutarlıdır (Nielsen, 2011).

Sintine suyu arıtımı sırasında çamur kekindeki toplam çözünmüş katıların (TÇK) değişimi üzerinde sonikasyon süresi ve yoğunluğunun etkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Farklı zamanlarda alınan atığın özelliklerindeki farklılıklara rağmen (başlangıç TÇK değerleri 46 ila 57 mg/g arasında değişmektedir), sonikasyon süresi arttıkça çamur kekindeki TDS seviyeleri azalmaktadır. Ayrıca mevcut literatür, bu çamur değişikliklerinin boyutu ile kullanılan ultrasonik enerji seviyesi arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ileri sürmektedir (Feng vd., 2009). Ancak çamurun litresi başına uygulanan ultrasonik güçteki değişim ile TÇK'daki değişim arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Sonuç olarak, sonikasyon süresinin bu çalışma koşulları altında TÇK değişimini etkileyen birincil faktör olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Ultrasonik güç ve işletme süresinin kızdırma kaybı içeriğine etkisi analiz sonuçları

Proses uygulama süresi (dk.)		Ultrases uygulama güç aralığı (Watt/L)				
		0	100	200	300	400
		Kızdırma kaybı analiz sonuçları (%)				
Ham Çamur	0	58,5	58,18	59,64	58,81	58,33
İşlenmiş Çamur	10	58,18	57,51	58,66	59,5	58,24
	20	59,64	57,97	58	59,53	58,43
	30	58,81	57,97	57,98	59,8	59,36
	60	58,33	57,51	58,57	60,01	58,20

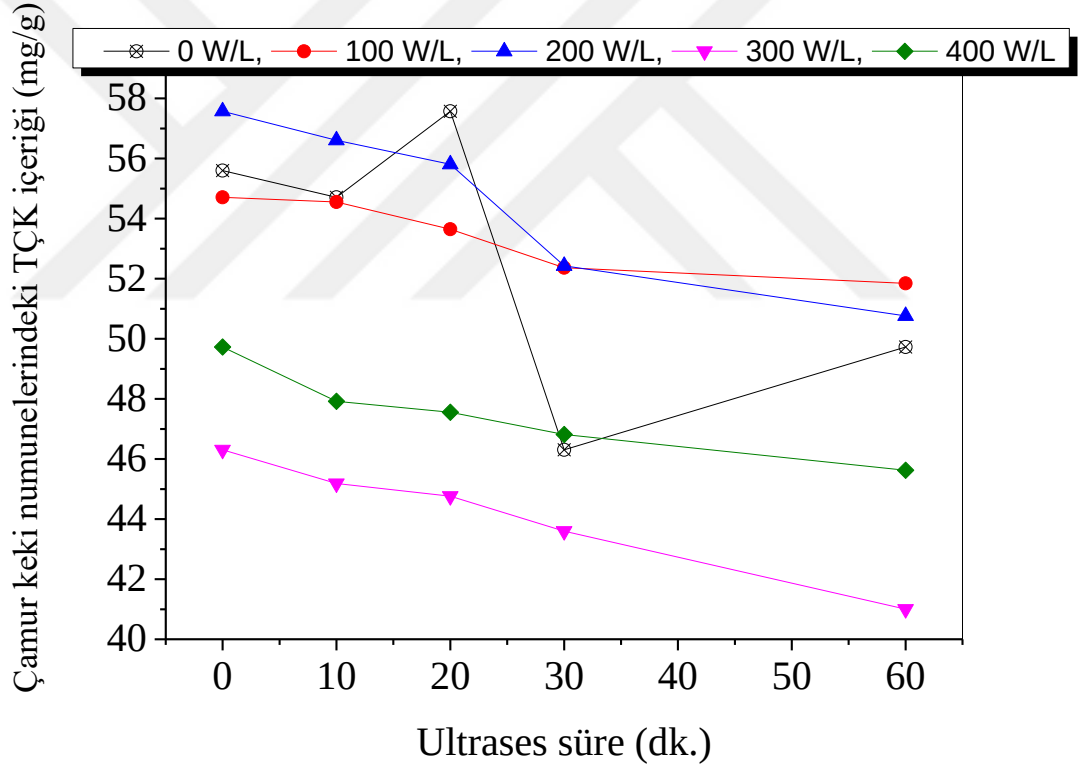


Şekil 4.8. Çalışma süresi ve ultrasonik gücün sintine suyu arıtma çamurunun kızdırma kaybı içeriğine etkisi

Yerel mevzuat sınırlarını aşan parametrelerden biri olan klorürün sintine suyu arıtma çamurundaki farklı ultrasonik süre ve güç koşullarındaki değişimi Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Sonikasyon süresinin artmasıyla birlikte sintine suyu arıtma çamuru kekindeki başlangıçtaki klorür içeriği ~20-22 mg/g arasında olan bu numune, maksimum sonikasyon süresi olan 60 dakika içerisinde farklı ultrases güçlerine bağlı olarak ~14-18 mg/g'a düşmüştür. Ultrasesin çamurdaki su moleküllerinin kavitasyona neden olabileceği ve bunun da su molekülleri ile çamur parçacıkları arasındaki bağları parçalayabileceği atfedilebilir. Bu, çamurdan suyun salınmasına yol açabilir ve bu daha sonra uzaklaştırılabilir. Su uzaklaştırıldıkça çamurdaki klorür konsantrasyonu da azalacaktır. Ancak ultrasonik güç (W/L) ile çamur kekindeki klorür içeriği arasında herhangi bir ilişki kurulamamıştır.

Çizelge 4.7. Ultrasonik güç ve işletme süresinin toplam çözünen katı üzerine etkisi analiz sonuçları

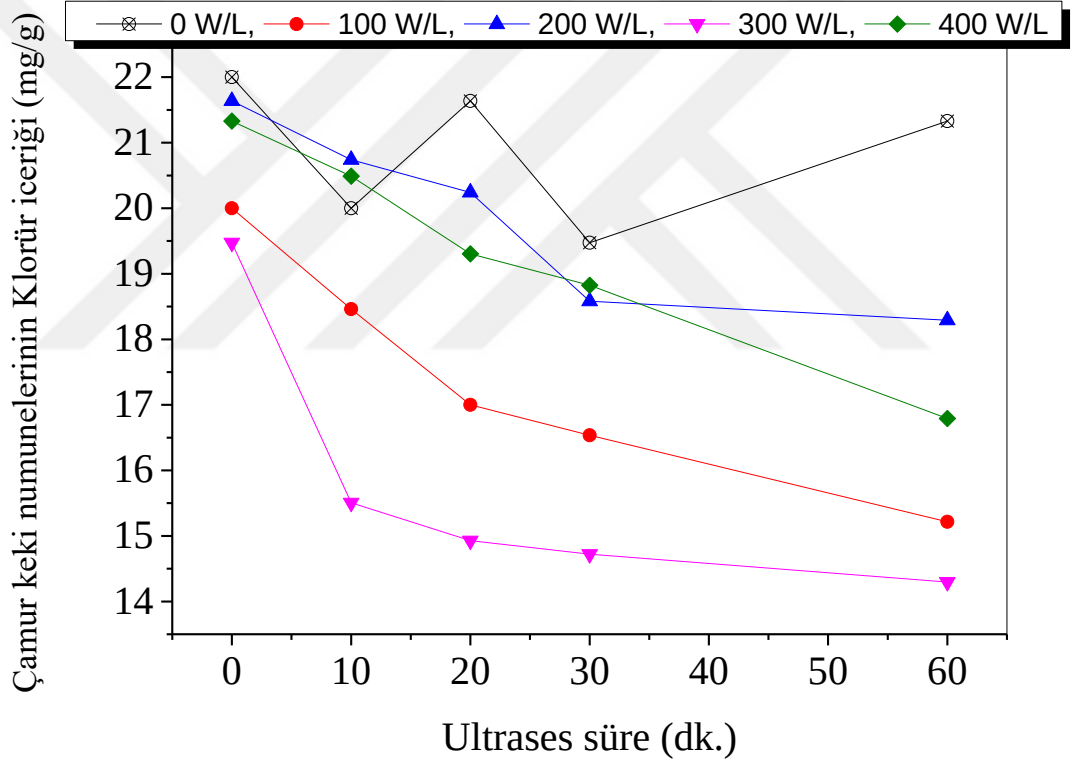
Proses uygulama süresi (dk.)		Ultrases uygulama güç aralığı (Watt/L)				
		0	100	200	300	400
		Toplam çözünen katı analiz sonuçları (mg/g)				
Ham Çamur	0	55,6	54,70	57,57	46,30	49,72
İşlenmiş Çamur	10	54,70	54,55	56,60	45,18	47,91
	20	57,57	53,64	55,80	44,76	47,55
	30	46,30	52,36	52,43	43,59	46,81
	60	49,72	51,84	50,76	41,00	45,62



Şekil 4.9. Sintine suyu arıtma çamurunda çalışma süresi ve ultrasonik gücün toplam çözünen katı içeriğine etkisi

Çizelge 4.8. Ultrasonik güç ve işletme süresinin klorür üzerine etkisi analiz sonuçları

Proses uygulama süresi (dk.)		Ultrases uygulama güç aralığı (Watt/L)				
		0	100	200	300	400
		Klorür analiz sonuçları (mg/g)				
Ham Çamur	0	22	20	21,63	19,47	21,33
İşlenmiş Çamur	10	20	18,46	20,74	15,50	20,48
	20	21,63	17	20,24	14,92	19,30
	30	19,47	16,53	18,58	14,72	18,82
	60	21,33	15,21	18,29	14,29	16,79



Şekil 4.10. Sintine suyu arıtma çamurunda çalışma süresinin ve ultrasonik gücün klorür içeriğine etkisi

4.5. Ultrasonik Güç, İşletme Süresi ve Koagülanın Gemi Sintine Atıksuyu Arıtma Çamurlarının İyileştirilmesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Atık su arıtma prosesleri, genellikle % 90'ın üzerinde su içeren büyük miktarlarda çamur üretir. Bertaraf öncesi çamur arıtmanın en önemli kısmı, taşıma ve taşıma maliyetlerini azaltmak amacıyla çamur hacminin su ayrıştırma yoluyla azaltılmasıdır. Çamur, küçük çamur parçacıklarının suda stabil bir süspansiyon oluşturduğu ve su fazından ayrılmasının çok zor olduğu kolloidal bir sistemdir. Genellikle mekanik susuzlaştırma yoluyla katı-su ayırımından önce çamur parçacıklarının daha büyük parçacıklar veya floklar halinde topaklaşmasına yardımcı olmak için flokülanlar ve pıhtılaştırıcılar gibi kimyasal koagülanlar gereklidir. Yaygın olarak kullanılan mekanik susuzlaştırma proseslerinden bazıları santrifüjleme, vakumlu filtreleme ve basınçlı filtrelemedir. Bununla birlikte, çamur katılarının yüksek oranda sıkıştırılabilir doğasından dolayı, çamur susuzlaştırma hızı genellikle filtreleme ortamının ve filtre kekinin körlenmesi nedeniyle engellenir. Genel prosesin verimliliği tehlikeye girer ve bunun sonucunda yüksek katı içeriği elde etmek için daha uzun sıkıştırma süresi veya daha yüksek basınç gerekir. Çamurun sıkıştırılabilirliğini azaltmak ve sıkıştırma sırasında katı çamurun mekanik mukavemetini ve geçirgenliğini geliştirmek için çamur susuzlaştırmadaki rollerine bağlı olarak genellikle iskelet yapıcılar veya filtre yardımcıları olarak bilinen fiziksel koşullandırıcılar kullanılır. Bu fiziksel şartlandırıcılar, mekanik susuzlaştırma sırasında yüksek basınç altında gözenekli kalabilen, geçirgen ve daha rijit bir kafes yapısı oluşturabilmektedir (Qi vd., 2011).

4.5.1. Ultrases destekli tesiste kullanılan koagülanlarının sulu çamur içerisinde faz ayırım üzerine etkisi

Çamur susuzlaştırmada aktif karbon (Albertson & Kopper, 1983), ince aktif karbon parçacıkları (Albertson & Kopper, 1983; Lauer & Manfred, 1989) ve ağaç talaşı, buğday tortusu (Y.-F. Lin vd., 2001) gibi biyolojik atıklar da dahil olmak üzere, fiziksel koşullandırıcılar olarak çok çeşitli karbon bazlı malzemeler kullanılmıştır. Uçucu kül (Albertson & Kopper, 1983; Benttez vd., 1994; C. Chen vd., 2010), çimento fırın tozu (Benttez vd., 1994) ve alçıtaşı (Zhao, 2006) gibi mineraller de kullanılmıştır. Smollen ve Kafaar yaptıkları çalışmada, çamurun polielektrolit ve çömlek kullanılarak

şartlandırmasını karşılamışlardır. Tek başına aktif karbon eklenmesi çamur keki katı içeriğini iyileştirse de kimyasal koşullandırıcı da kullanıldığında en yüksek kek katı konsantrasyonu elde edildiğini raporlamışlardır (Smollen & Kafaar, 1997). Filtre yardımcı malzeme kullanmadaki amaç, genellikle filtrelenen ürünün hacmi, kek katı içeriği ve filtrelemeye karşı spesifik direnç (Jing vd., 1999; Lee vd., 2001; Nelson & Brattlof, 1979) ve net çamur verimi (Y.-F. Lin vd., 2001; Zall vd., 1987) gibi parametreler kullanılarak değerlendirilir (Thapa, Qi, Clayton, vd., 2009). Thapa ve arkadaşları (Thapa, Qi, Clayton, vd., 2009), çamurun susuzlaştırılmasını iyileştirmek için filtre yardımcısı olarak bilinen düşük dereceli kömür linyitini kullanmışlardır. Bu sayede kek gözenekliliğini, geçirgenliğini ve sıkıştırmaya karşı direncini nicel olarak analiz ederek, linyitin çamur susuzlaştırmaya etkisini, filtre keki özellikleriyle ilişkilendirmiştir. Fiziksel şartlandırıcılar, kimyasal şartlandırıcılar ve çamur kolloidleri arasındaki kimyasal etkileşimler, bu malzemelerin yüklü doğasına ve çamur susuzlaştırmadaki rollerine dayanarak önerilmiştir (Tenney & Gerald Cole, 1968). Deneysel veriler, çamur katıları ile homojen ve sert bir yapı oluşturarak çamurun susuzlaştırılmasına yardımcı olan bu etkileşimlerin meydana geldiğine dair kanıtlar sağlamıştır (Thapa, Qi, & Hoadley, 2009; Zhao & Bache, 2001).

Gemi sintine atıksuyu arıtma çamurunun iyileştirilmesi için uygulanan 2'nci adım ultrasonik metot, tehlikeli bazı çamur parametrelerinde iyileştirmeler meydana getirmiştir. Bu iyileştirmelerin uygulanan ultrasonik güç ve işlem süresi ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle gücün 1500 ila 2000 Watt, işlem süresinin ise 30 ila 60 dakika aralığında olması, uygulanan yöntemin optimum etkili olduğu aralıklardır. Bu projede seçilen ve kullanılan koagülan dozajları (Polialüminyumklorür, Demir III Klorür ve Alum), mevcut sistemde de uygulanan dozajlar dikkate alınarak belirlenmiş ve yakın değerlerde dozlamalar yapılmıştır. Bu dozajlama oranları her üç koagülan içinde 150 ila 1000 ppm aralarında değiştirilerek, 3'üncü uygulama adımında kullanılmıştır. Ultrases öncesi sadece koagülanın ve ultrases + koagülanın eş zamanlı olarak kullanıldığı kombine yöntemin, hazne içerisindeki sulu çamurda bir faz ayrımı meydana getirebileceği durum gözlemlenmiştir. Bu gözleme ait sonuçlar Çizelge 4.9 ve 4.10' da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Koagülanın işlenmemiş (ham) sulu çamur üzerindeki faz ayırım sonuçları

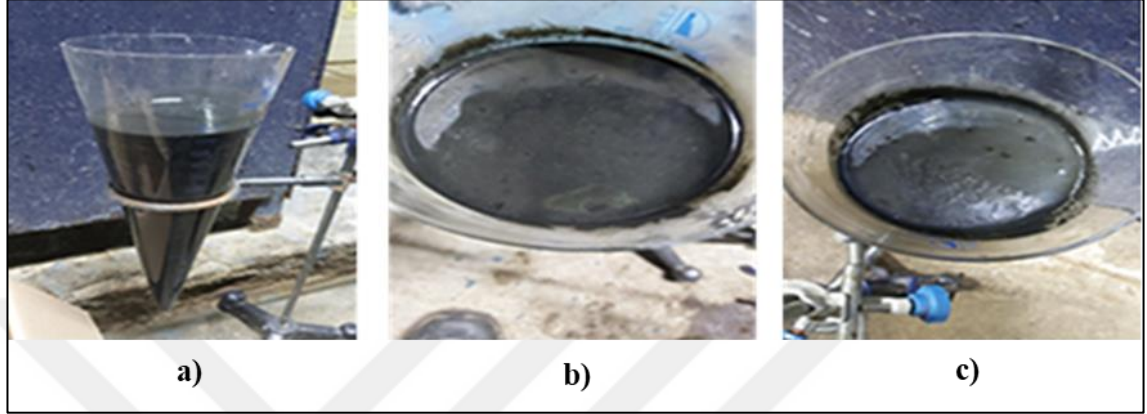
Koagülan / Koagülan dozaj (ppm)								
Polialüminyumklorür			Demir (III) klorür			Alum		
150	500	1000	150	500	1000	150	500	1000
Ultras ses öncesi (sadece koagülan) gözlemlenen faz ayırımı								
Faz ayırım yok			Faz ayırım yok			Faz ayırım yok		

Çizelge 4.10. Ultras ses + koagülan ile işlenmiş sulu çamura ait faz ayırım sonuçları

Ultras ses güç aralığı ve uygulama süresi		Koagülan / Koagülan dozaj (ppm)								
		Polialüminyumklorür			Demir (III) klorür			Alum		
Güç (Watt)	İşlem süresi (dk.)	150	500	1000	150	500	1000	150	500	1000
		Ultras ses + koagülan (eş zamanlı) sonrası gözlemlenen faz ayırımı								
1500	30	Faz ayırım yok			Faz ayırım yok			Faz ayırım yok		
	60	Faz ayırım yok			Faz ayırım yok			Faz ayırım yok		
2000	30	Faz ayırım yok			Faz ayırım yok			Faz ayırım yok		
	60	Faz ayırım yok			Faz ayırım yok			Faz ayırım yok		

Petrol türevli organik yağ ile emülsiyeye olmuş ham sulu çamura uygulanan farklı tip koagülan ve ultras ses+koagülan sonrasında işlenmiş çamur numuneleri, 1 litrelik cam İmhoff hunisine alınarak 60, 120 ve 240 dakika boyunca dinlendirmeye bırakılmıştır. Polialüminyumklorür, demir (III) klorür ve alum koagülanları ile işlenmiş çamur numuneleri her seferinde hazne içine alınmış ve belirli zaman aralıklarında bekletilmiştir. Burada izlenen bekletme prosedürü hep aynı kalmış ve değiştirilmemiştir (Şekil 4.11). Dinlendirmedeki amaç, hazne içerisinde bulunan sulu çamurda faz ayırımının oluşup/oluşmadığını tespit etmektir. Dinlendirme süresi sonunda hazne içerisinde

bulunan sulu çamur görünümünün açık gri renkte olduğu ve daha homojenik bir görünüm aldığı gözlemlenmiştir. Fakat bu adımda uygulanan koagülan ve ultrases+koagülan kombine yönteminin, sulu çamur kimyasal yapısına hapsolmuş petrol türevli organik yağ bileşenlerini (su-yag fazı) ayırmada yetersiz kaldığı görülmüştür.



Şekil 4.11. Sulu çamura uygulanan ultrases + koagülan işlem sonrası faz ayrımı için dinlendirilmesi a) 60 dk. b) 120 dk. c) 240 dk.

4.5.2. Ultrases destekli alternatif koagülanların sulu çamur içerisinde faz ayrım üzerine etkisi

Bu aşamada ultrases öncesinde sulu çamur içerisine farklı tip koagülanlar eklenerek US reaktörüne aktarılmış ve iyileştirmeye çalışmaları başlatılmıştır. İşlenen çamur numuneleri Imhoff hunisine alınarak üst yağ faz ayrımı için 240 dakika süreyle bekletilmeye bırakılmıştır. Bu aşamada alternatif koagülan tipleri olarak, potasyum metoksit, demülsifier ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. İşlenmiş çamur numunelerinin, hazne içerisine alınması ve bekletilmesinde izlenen bekletme prosedürü, yine bir önceki koagülan uygulama prosedüründe de olduğu gibi hep aynı kalmış ve değiştirilmemiştir (Şekil 4.12). Bekleme sonrasında metanollü potasyum hidroksit çözeltisinin, Imhoff hunisinde bulunan sulu çamur yapısında kısmen bir üst yağ fazı oluşturduğu görülmüştür. Görünen bu faz istenilen düzeye ulaşamamış ve çamur içerisinde hapsolmuş yağ tamamen ayrılamamıştır. Seçilen diğer alternatif koagülanların ise sulu çamur yapısında herhangi bir üst yağ fazı ayırımında katkısı gözlemlenmemiştir. Bu duruma ait sonuçlar Çizelge 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Koagülanın işlenmemiş (ham) sulu çamur üzerindeki faz ayırma sonuçları

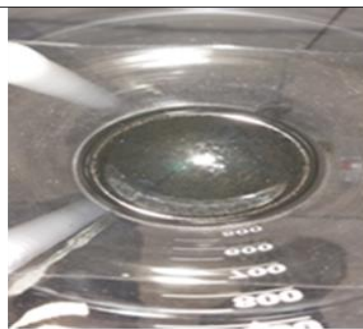
Koagülan / Koagülan dozaj (ppm)								
Potasyum metoksit			Demülsifier			Sodyum hidroksit		
500	1000	2000	500	1000	2000	500	1000	2000
Ultras ses öncesi (sadece koagülan) gözlemlenen faz ayrımı								
Faz ayırma yok			Faz ayırma yok			Faz ayırma yok		

Çizelge 4.12. Ultras ses + koagülan ile işlenmiş sulu çamura ait faz ayırma sonuçları

Ultras ses güç aralığı ve uygulama süresi		Koagülan / Koagülan dozaj (ppm)								
		Potasyum metoksit			Demülsifier			Sodyum hidroksit		
Güç (Watt)	İşlem süresi (dk.)	500	1000	2000	500	1000	2000	500	1000	2000
		Ultras ses + koagülan (eş zamanlı) sonrası gözlemlenen faz ayrımı								
1500	30	Faz ayırma var			Faz ayırma yok			Faz ayırma yok		
	60	Faz ayırma var			Faz ayırma yok			Faz ayırma yok		



a)



b)



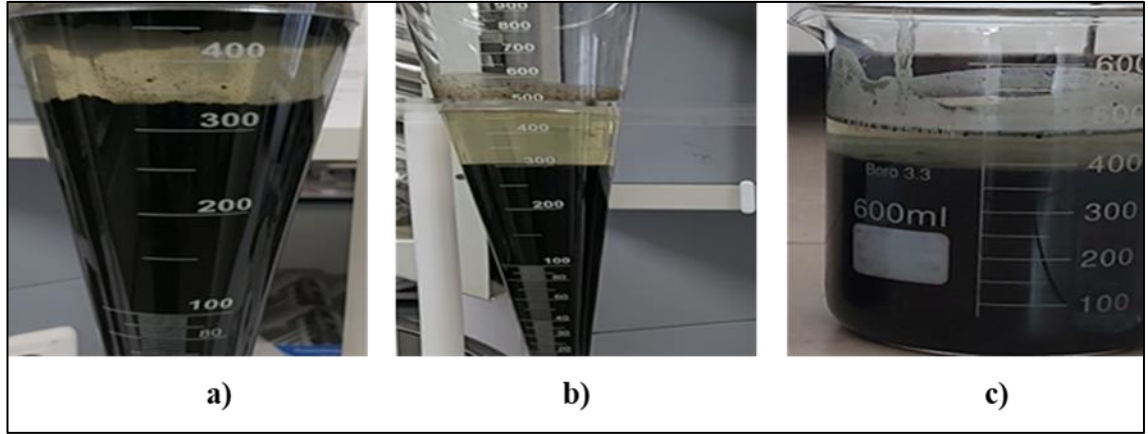
c)

Şekil 4.12. Sulu çamura uygulanan koagülan işlemi sonrası faz ayrımı için dinlendirilmesi a) Potasyum metoksit b) Demülsifier c) Sodyum hidroksit

Bir önceki adımda yapılan iyileştirme işlemlerinde kullanılan potasyum metoksit, diğer koagülanlara aksine kısmen olsa olumlu bir sonuç verdiği Çizelge 4.13'te yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu sebeple 3'üncü adım iyileştirme çalışmalarına, sulu çamur yapısında karışık halde bulunan yağlı yapının alınmasında, metanollü potasyum hidroksit çözeltisi ile devam edilmiştir. Sulu çamura potasyum metoksit eklenerek ultrases işlemi uygulanmış ve sonrasında İmhoff hunisine alınarak üst yağ faz ayrımı için 240 dakika bekletilmeye bırakılmıştır. Bekleme sonrasında İmhoff hunisinde bulunan karışık sulu çamurda, üst yağlı sulu çamur fazı görülmüştür (Şekil 4.13). Görünen bu faz istenilen düzeye ulaşamamış ve çamur içerisinde bulunan yağ yapısı tamamen ayrılamamıştır. Bu adımda kullanılan alternatif koagülan kimyasalların vermiş olduğu sonuçlara göre potasyum metoksit çözeltisinin kısmen etkili bir sonuç verdiği ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.13. Ultrases + koagülan ile işlenmiş sulu çamura ait faz ayırım sonuçları

Ultrases güç aralığı ve uygulama süresi		Koagülan / koagülan dozaj (ppm)		
		Potasyum metoksit		
Güç (Watt)	İşlem süresi (dk.)	500	1000	2000
		Ultrases + koagülan (eş zamanlı) sonrası gözlemlenen faz ayrımı		
1500 Watt	30	Faz ayırım yok	Faz ayırım var	Faz ayırım var
	60	Faz ayırım yok	Faz ayırım var	Faz ayırım var
2000 Watt	30	Faz ayırım yok	Faz ayırım var	Faz ayırım var
	60	Faz ayırım yok	Faz ayırım var	Faz ayırım var



Şekil 4.13. Ultrases + koagülan sonrası işlenmiş sulu çamurun faz ayrımı için dinlendirilmesi a) Potasyum metoksit b) Demülsifier c) Sodyum hidroksit

Proje kapsamında 3'üncü adım uygulama çalışmalarında, ultrasonik güç ve koagülanın eş zamanlı kullanıldığı farklı işletme sürelerinde ham çamur üzerinde uygulama deneyleri yapılmış ve her deney sonrasında elde edilen kek çamur örnekleri hedef analizlerine tabi tutulmuştur. Bu analizler için izlenen parametreler, daha önce 1'inci ve 2'nci adımda yapılan grup analiz sonuçlarına bakılarak değerlendirilmiştir. Bu son adımda, TOK, LOI, Su Muhtevası, Klorür, ÇOK ve TÇK olmak üzere 6 farklı hedef parametre takip edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları her bir parametre için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve ilgili parametreye ait çizelge ve grafiğe geçirilmiştir. Uygulanan farklı ultrasonik güç, koagülan, işletme süreleri deney ve analiz sonuçları çizelgelerde detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çizelgelerde yer alan sıfır (0) dakika proses uygulaması süresi, işlenmemiş ham çamurun ilgili parametreye ait sonuçlar Çizelge 4.14 ve 4.15'te görülmektedir. 2'nci adım uygulama süreçlerinde elde edilen kek çamur örneklerine ait hedef parametre analiz sonuçları, hem işlenmemiş ham çamur analizlerine göre hem de ADDDY EK-2C 1. Sınıf kriterlerine göre mukayese edilmiştir (bkz. Ek 2).

Çizelge 4.14. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin hedef parametreler üzerine etkisinin incelenmesi

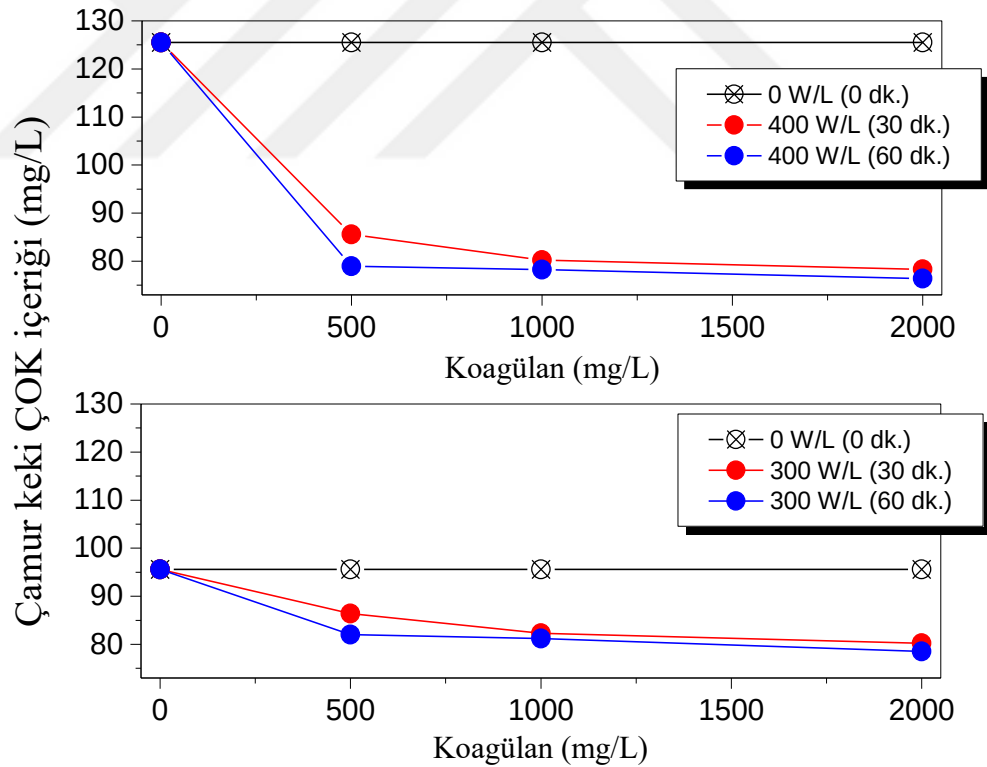
Çamur kek türü		Ham kek	İşlenmiş çamur keki					
Ultras es güç (watt)		-	1500					
İşlem süresi (dk.)		-	30			60		
Koagülan adı		-	Metanollü Potasyum Hidroksit					
Koagülan dozaj (mg/L)		-	500	1000	2000	500	1000	2000
Analiz parametre	ÇOK (mg/L)	95,6	86,4	82,3	80,2	82	81,2	78,5
	TÇK (mg/L)	4260	4250	4200	4175	4180	4140	4050
	Klorür (mg/L)	2860	2445	2400	2350	2300	2200	2135
	TOK (%)	36,80	32,60	32,50	31,45	33,4	33,1	32,3
	LOI (%)	57,4	56,8	56,1	55,6	57	56,5	56,32
	Su Muhtevası (%)	68,5	67,5	67,5	66,1	67,1	66,5	65,52

Çizelge 4.15. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin hedef parametreler üzerine etkisinin incelenmesi

Çamur kek türü		Ham kek	İşlenmiş çamur keki					
Ultrases güç (watt)		-	2000					
İşlem süresi (dk.)		-	30			60		
Koagülan adı		-	Metanollü Potasyum Hidroksit					
Koagülan dozaj (mg/L)		-	500	1000	2000	500	1000	2000
Analiz Parametre	ÇOK (mg/L)	125,5	85,6	80,2	78,3	78,95	78,25	76,4
	TÇK (mg/L)	4289	4050	4005	3954	4005	3987	3900
	Klorür (mg/L)	2950	2500	2380	2240	2108	2080	2005
	TOK (%)	35,36	33,10	31,67	31,35	34	33,5	33,5
	LOI (%)	60,1	57,1	56,5	56,5	58,7	58,1	57,7
	Su Muhtevası (%)	69,87	67,3	67,40	66,5	65,9	65,4	64,7

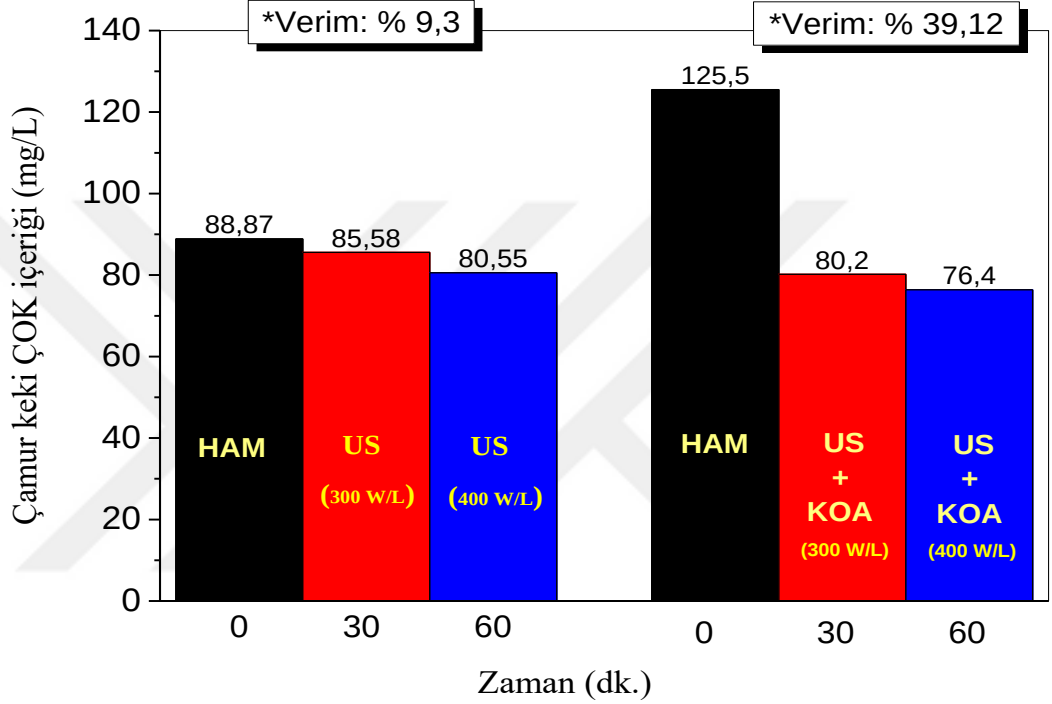
Farklı ultrasonik güç, koagülan ve işletme süre şartlarında elde edilen analiz sonuçları yukarıda Çizelge 4.14 ve 4.15'te verilmiş olup, bu sonuçlar Şekil 14.14 ve 4.19'da grafik haline getirilmiştir

Farklı işletme süreleri ve koagülan dozajlarının ÇOK giderimine etkisi Şekil 4.14'te sunulmuştur. Bu deney grubunda, önceki çalışmalardan elde edilen optimum deney koşulları (1 500 ve 2 000 Watt ultrasonik güç, 30 ve 60 dakika işletme süresi) seçilmiştir. Şekil 4.14'ten görülebileceği gibi, ultrases ve koagülanın (500 mg/L koagülan dozajı) hem 30 hem de 60 dakikalık US sürelerinde % 35-40 civarında ÇOK giderimine ulaşılmıştır. Koagülan dozajının 500 mg/L üzerindeki değerlere yükseltilmesinin ise ÇOK gideriminde etkili olmadığı söylenebilir. Bu durum, sulu çamur ve yağdan oluşan iki fazlı sistemde, fonksiyonel zincirleri potasyum hidroksit tarafından parçalanan (J. Liu vd., 2016) ve metanol ile polaritesi artırılan (He vd., 2023) organik maddelerin/yağın ekstraksiyonunun, yağ-su fazları arasında dengeye ulaşması ile açıklanabilir. Çamur keki ÇOK gideriminde sadece ultrases ve ultrases + koagülan kullanılan adımların birbirleri ile mukayesesi ise Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Ultrasesin yanında koagülan ilâvesinin, ÇOK giderimini % 9,3'ten % 39,12 seviyesine yükselttiği görülmektedir.



Şekil 4.14. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin çözünmüş organik karbon üzerine etkisi

Farklı ultrasonik güç (300 ve 400 W/L) ile yürütülen çalışmalar sonucunda, işlenmiş çamur kekindeki nihai çözünmüş organik karbon giderim verimi ortalama % 27,68 olarak hesaplanmıştır. Giriş değeri (ham) ortalama 110,55 mg/L olan çamur kekindeki çözünmüş organik karbon miktarı, bu adımda 79,94 mg/L seviyelerine indirilerek, 1. Sınıf limit değeri (100 mg/L) sağlanmıştır (Şekil 4.14).

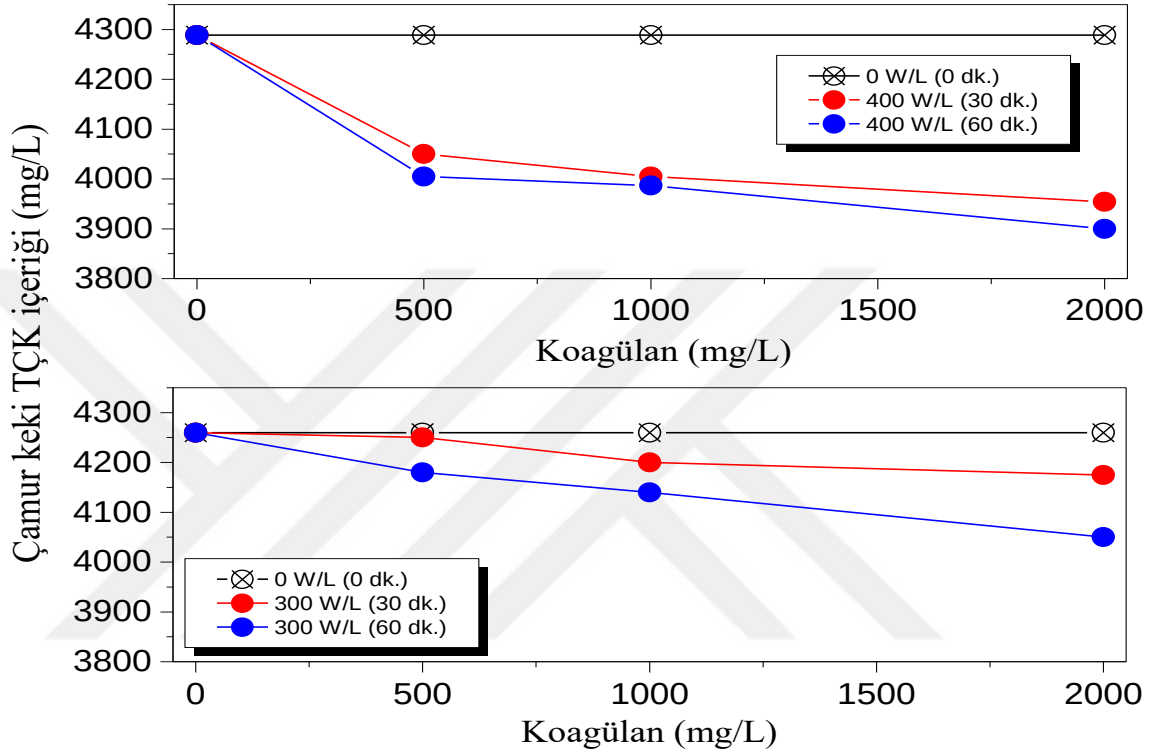


Şekil 4.15. Çamur kekinde ÇOK giderim mukayesesi

(*Kutu içerisinde verilen verim değerleri 400 W/L dikkate alınarak hesaplanmıştır).

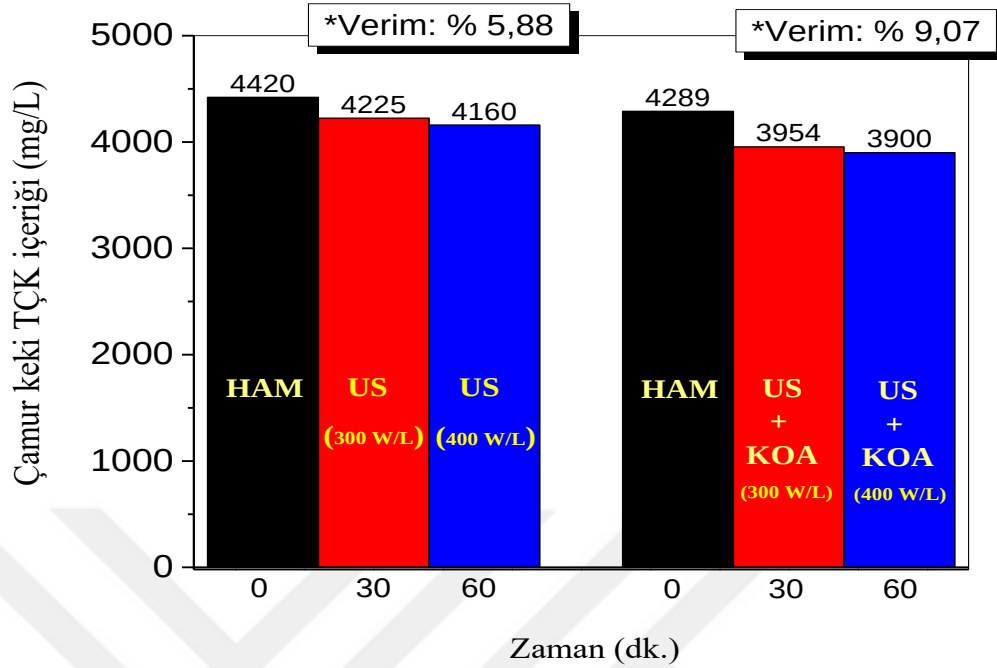
Farklı işletme süreleri ve koagülan dozajlarının TÇK giderimine etkisi Şekil 4.16’da sunulmuştur. Bu deney grubunda, önceki çalışmalardan elde edilen optimum deney koşulları (1500 ve 2000 Watt ultrasonik güç, 30 ve 60 dakika işletme süresi) seçilmiştir. Şekil 4.16’dan görülebileceği gibi, ultrases ve koagülanın (500 mg/L koagülan dozajı) hem 30 hem de 60 dakikalık US sürelerinde % 5-10 civarında TÇK giderimine ulaşılmıştır. TÇK gideriminde elde edilen trend de ÇOK giderimindeki eğilime benzer olarak ancak daha düşük giderme verimleri ile elde edilmiştir. Bu durumda, yağlı çamurların alkali maddelerle arıtımında tercih edilen potasyum metoksite (G. Chen vd., 2019) parçalayabileceği organik madde muhtevasının, mineralize edemediği katı

maddelerden daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Çamur keki TÇK gideriminde sadece ultrases ve ultrases + koagülan kullanılan adımların birbirleri ile mukayesesi ise Şekil 4.17’te gösterilmektedir. Ultrasesin yanında koagülan ilâvesinin, TÇK giderimini % 5,88’den % 9,07 seviyesine yükselttiği görülmektedir.



Şekil 4.16. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin toplam çözünen katı üzerine etkisi

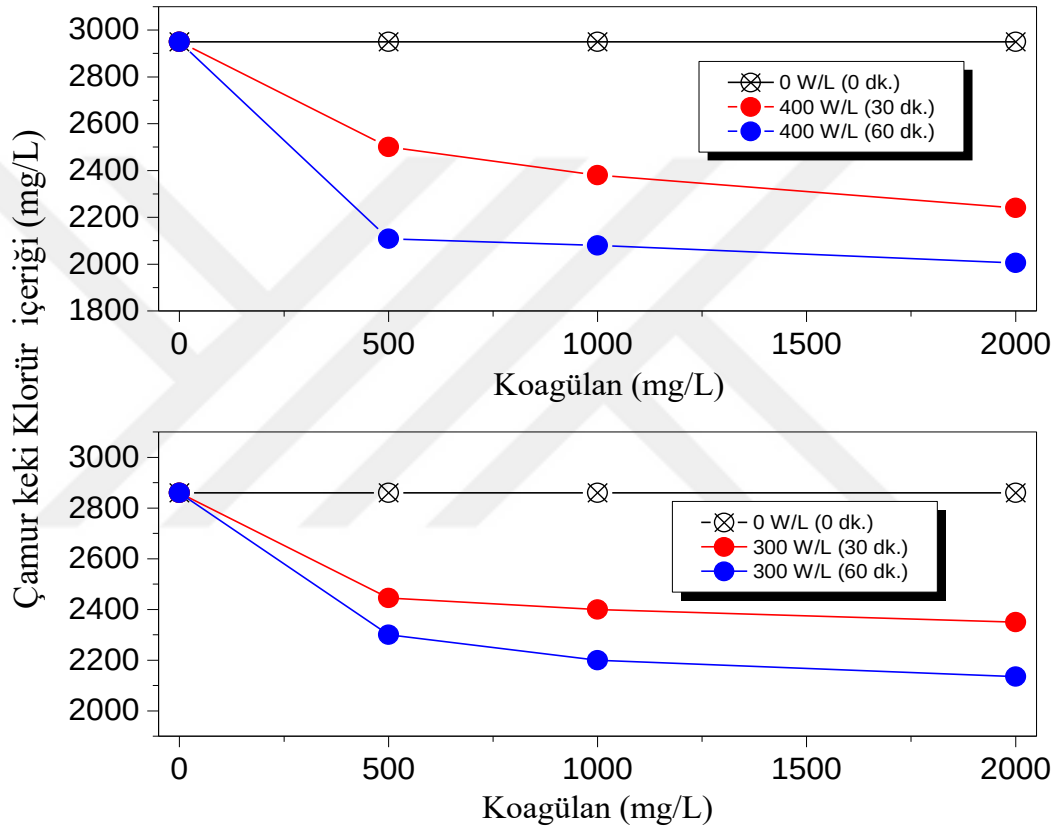
Farklı ultrasonik güç (300 ve 400 W/L) ile yürütülen çalışmalar sonucunda, işlenmiş çamur kekindeki nihai TÇK giderim verimi ortalama % 5,95 olarak hesaplanmıştır. Giriş değeri (ham) ortalama 4 275 mg/L olan çamur kekindeki TÇK konsantrasyonu, bu adımda 4020 mg/L seviyelerine indirilerek, 1. Sınıf limit değeri (10000 mg/L) sağlanmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.17. Çamur kekinde TÇK giderim mukayesesi
(*Kutu içerisinde verilen verim değerleri 400 W/L dikkate alınarak hesaplanmıştır).

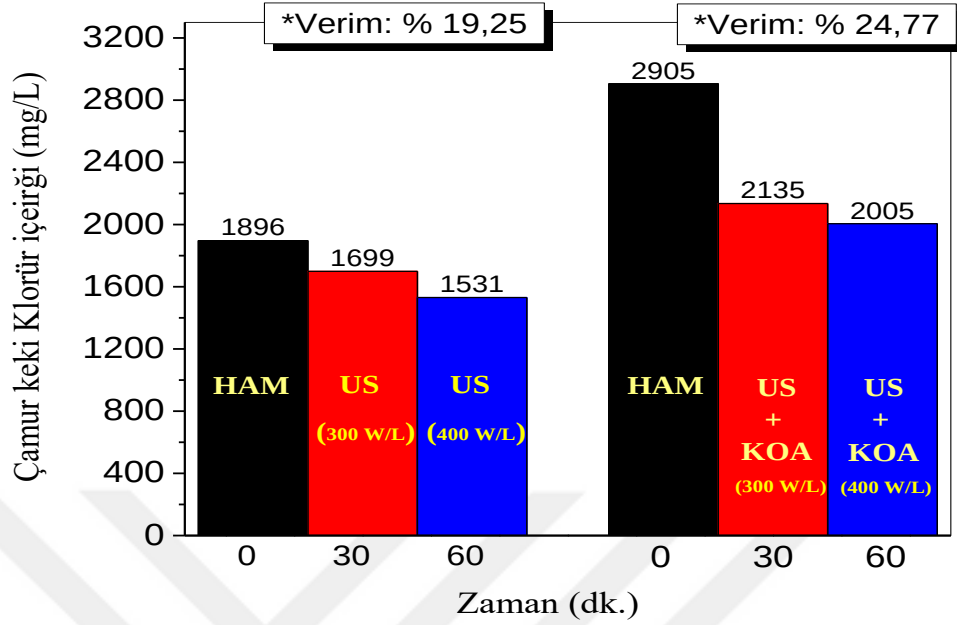
Farklı işletme süreleri ve koagülan dozajlarının klorür giderimine etkisi Şekil 4.18’de sunulmuştur. Bu deney grubunda, önceki çalışmalardan elde edilen optimum deney koşulları (1500 ve 2000 Watt ultrasonik güç, 30 ve 60 dakika işletme süresi) seçilmiştir. Şekil 4.18’den görülebileceği gibi, ultrases ve koagülanın (500 mg/L koagülan dozajı) hem 30 hem de 60 dakikalık US sürelerinde % 20-30 civarında klorür giderimine ulaşılmıştır. Klorür gideriminde elde edilen trend de TÇK giderimindeki eğilime benzer olarak ancak daha yüksek giderme verimleri ile elde edilmiştir. Ultrasesin, daha düşük bir reaktif miktarı ve daha kısa bir reaksiyon süresi yoluyla klorür iyonlarının etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayabileceği literatürde rapor edilmektedir (L. Zhang vd., 2021). Bu durum ultrasesin kavitasyon ve ortamdaki mekanik karıştırma etkilerine atfedilmekte ve sonuçta reaktan parçacıklarının kirletici ile hızlı teması sağlanarak, uzaklaştırma hızının artması ve reaksiyon süresi ile kullanılan reaktif madde miktarının azalması durumu meydana gelmektedir. Netice olarak, ultrasesin klorür gideriminde yardımcı bir proses olduğu belirtilmektedir. Şekil 4.18’de koagülanın ultrases prosesine yardımcı olduğu gibi bir sonuç gözükse de tek başına koagülan kullanıldığında sulu

çamurda faz ayrımının gözlenmemesi de ultrasesin koagülanın yağlı çamur içerisindeki reaksiyonlarına yardımcı olduğu ve literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılabilir. Çamur kekindeki klorür gideriminde sadece ultrases ve ultrases + koagülan kullanılan adımların birbirleri ile mukayesesi ise Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Ultrasesin yanında koagülan ilâvesinin, klorür giderimini % 19,25’ten % 24,77 seviyesine yükselttiği görülmektedir.



Şekil 4.18. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin klorür üzerine etkisi

Farklı ultrasonik güç (300 ve 400 W/L) ile yürütülen çalışmalar sonucunda, işlenmiş çamur kekindeki nihai klorür giderim verimi ortalama % 24,77 olarak hesaplanmıştır. Giriş değeri (ham) ortalama 2905 mg/L olan çamur kekindeki klorür konsantrasyonu, bu adımda 2183 mg/L seviyelerine indirilerek, 1. Sınıf limit değeri (2500 mg/L) sağlanmıştır (Şekil 4.18).



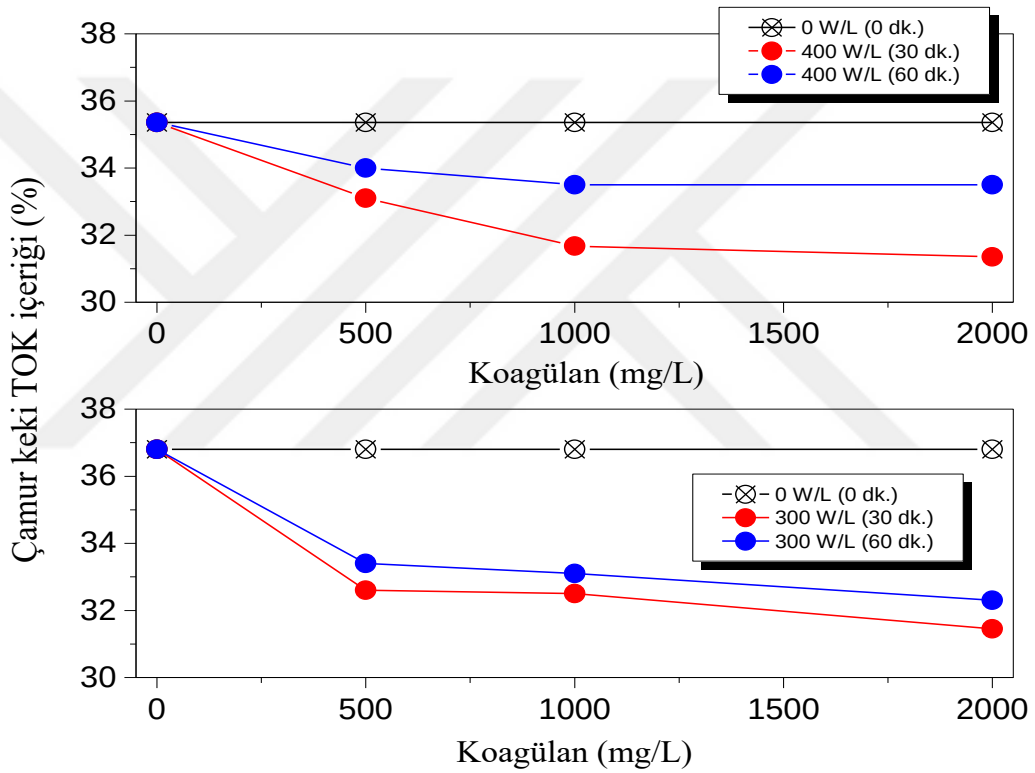
Şekil 4.19. Çamur kekinde Klorür giderim mukayesesi

(*Kutu içerisinde verilen verim değerleri 400 W/L dikkate alınarak hesaplanmıştır).

Farklı işletme süreleri ve koagülan dozajlarının TOK ve su giderimine etkisi Şekil 4.20 ve 4.22’de sunulmuştur. Bu deney grubunda, önceki çalışmalardan elde edilen optimum deney koşulları (1500 ve 2000 Watt ultrasonik güç, 30 ve 60 dakika işletme süresi) seçilmiştir. Şekil 4.20 ve 4.22’den görülebileceği gibi, ultrases ve koagülanın (500 mg/L koagülan dozajı) hem 30 hem de 60 dakikalık US sürelerinde TOK ve su içeriği azaltımında sırasıyla % 9-11 ve % 1-7 değerlerine ulaşılmıştır. Konteyner gemilerinin yük tankları, taşınmış olduğu farklı yüklerin kalitesini ve saflığını korumak amacıyla her seferinde dikkatlice yıkanmaktadır. Tank yıkamada kullanılan kimyasallar genellikle yüksek organik içeriğe sahiptir. Kimyasal bileşenler arasında aseton, sitrik asit, kerosen, metanol, metil etil keton, izotridekanol, difenil eter, naftalin gibi maddeler bulunmaktadır (Msds-Coal-Tar-Remover-20220411, 2023; Msds-Oil-Spill-Dispersant-Type-I-20220831, 2023; MSsds-Ecoclean-20220411, 2023). Bu kimyasallar, taşınan yük türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Gemi tanklarının bu kimyasallarla temizlenmesi sonucunda oluşan atıksu, genellikle petrol türevi yağ kalıntıları içerir. Sintine atıksuyunun fizikokimyasal arıtılmasından sonra bile, atıksu arıtımından elde edilen çamur hâlâ yağlı içeriğe sahip olabilmekte ve bu da çamurun TOC içeriğini

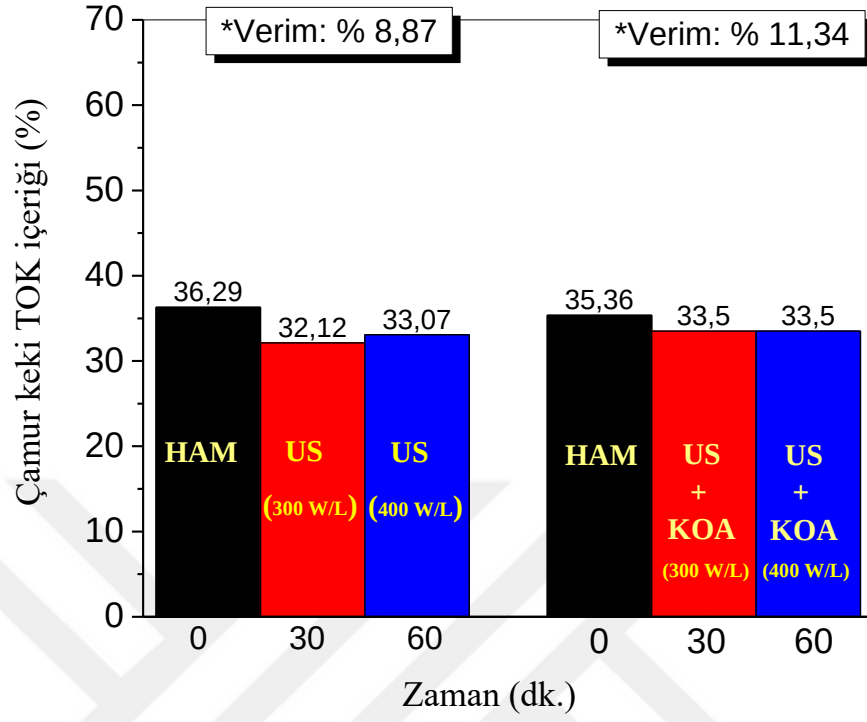
yükseltmektedir. Yapılan çamur keki karakterizasyon belirleme çalışmalardan elde edilen bilgiler bu problemi doğrulamaktadır (bkz. Çizelge 4.1). Çamurun TOC ve su içeriği değerlerindeki değişimler benzer eğilimler göstermektedir (Şekil 4.20 ve 22). Yüksek organik içeriğin çamur susuzlaştırma üzerindeki etkisi iki şekilde açıklanabilir:

Birincisi, çamur içindeki organik içeriğin çamur flokları arasındaki suyu daha fazla bağlaması ve ikinci olarak, yağlı içeriğin filtre presin gözeneklerini tıkayarak suyun filtrasyonunu engellemesidir.

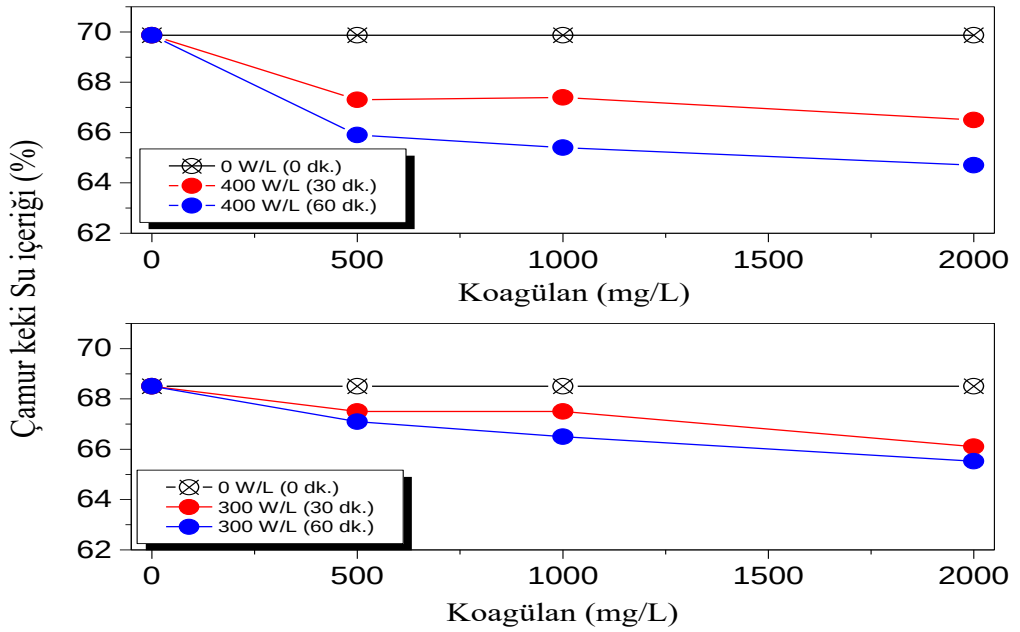


Şekil 4.20. Ultrasonik güç, koagulan ve işletme süresinin toplam organik karbon üzerine etkisi

Farklı ultrasonik güç (300 ve 400 W/L) ile yürütülen çalışmalar sonucunda, işlenmiş çamur kekindeki nihai TOK giderim verimi ortalama % 10,84 olarak hesaplanmıştır. Giriş değeri (ham) ortalama % 36,08 olan çamur kekindeki TOK konsantrasyonu, bu adımda % 32,17 seviyesine indirilmiş olsa da 1. Sınıf limit değeri (% 6) sağlanamamıştır (Şekil 4.20).

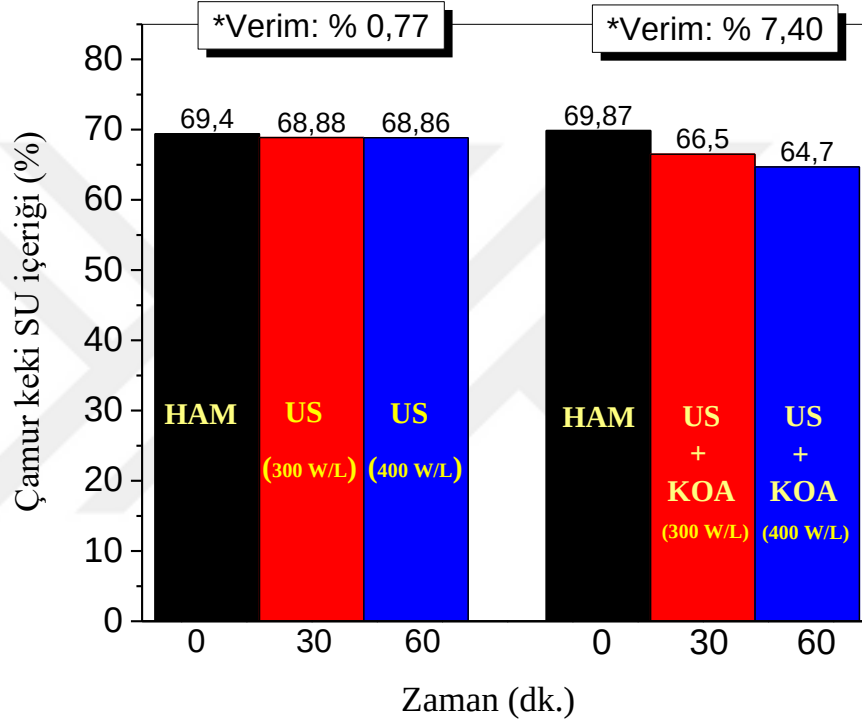


Şekil 4.21. Çamur kekinde TOK giderim mukayesesi
(*Kutu içerisinde verilen verim değerleri 400 W/L dikkate alınarak hesaplanmıştır).



Şekil 4.22. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin su muhtevası üzerine etkisi

Farklı ultrasonik güç (300 ve 400 W/L) ile yürütülen çalışmalar sonucunda, işlenmiş çamur kekindeki nihai su muhtevası giderim verimi ortalama % 5,02 olarak hesaplanmıştır. Giriş değeri (ham) ortalama % 69,19 olan çamur kekindeki su muhtevası, bu adımda % 65,71 seviyesine indirilmiş olsa da 1. Sınıf limit değeri (% 50) sağlanamamıştır (Şekil 4.22).

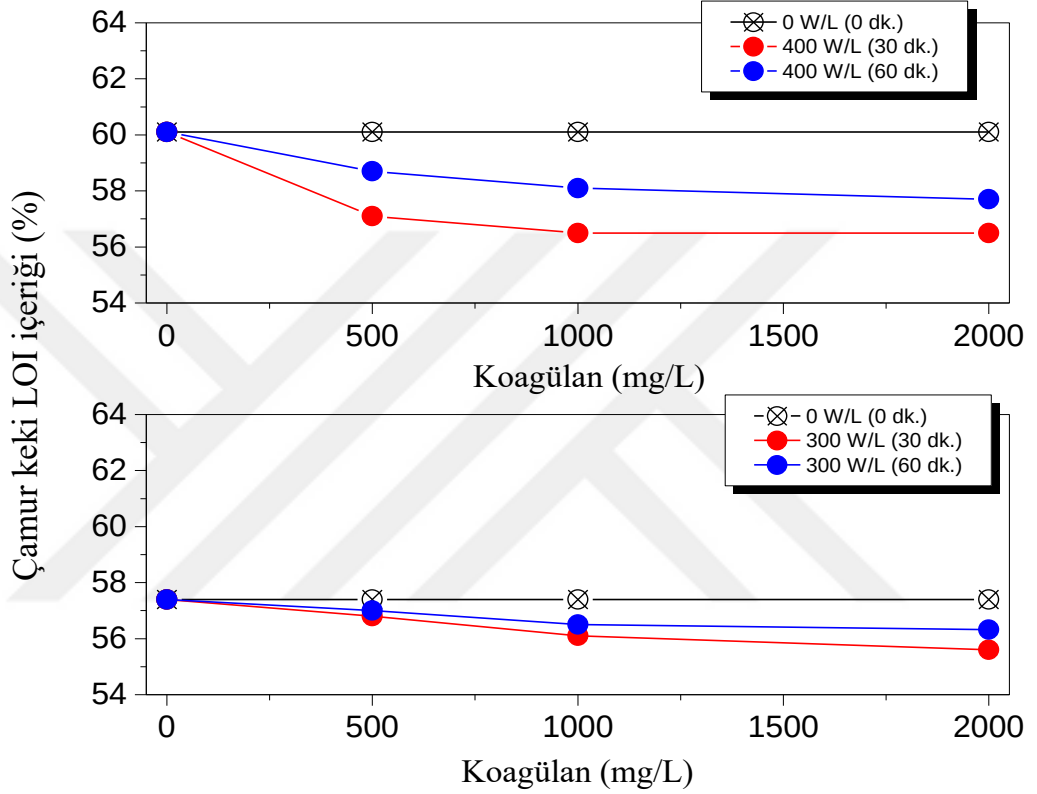


Şekil 4.23. Çamur kekinde SU giderim mukayesesi

(*Kutu içerisinde verilen verim değerleri 400 W/L dikkate alınarak hesaplanmıştır).

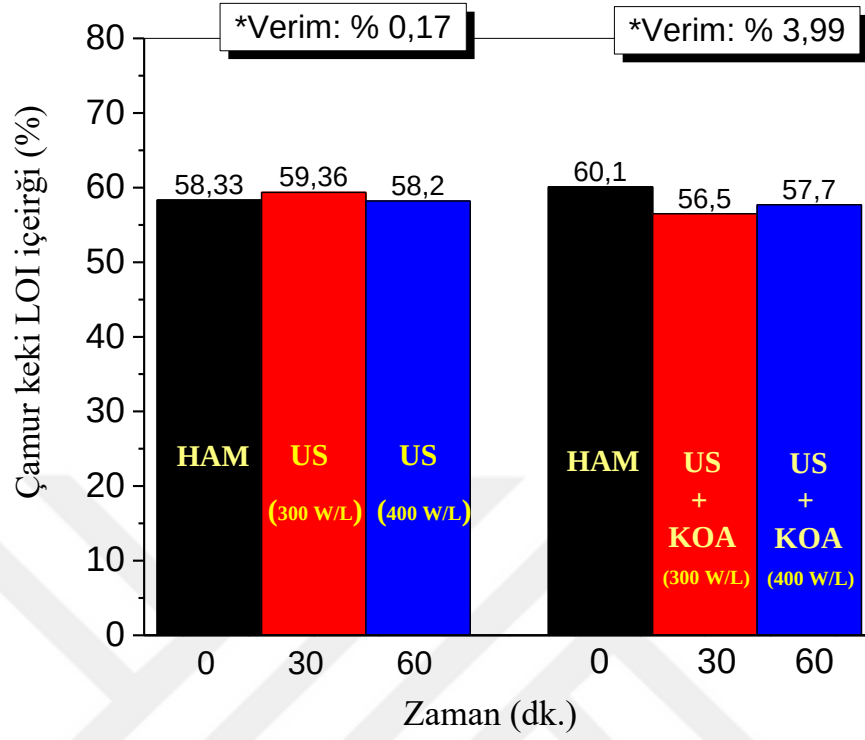
Farklı işletme süreleri ve koagülan dozajlarının LOI giderimine etkisi Şekil 4.24'te sunulmuştur. Bu deney grubunda, önceki çalışmalardan elde edilen optimum deney koşulları (1500 ve 2000 Watt ultrasonik güç, 30 ve 60 dakika işletme süresi) seçilmiştir. Şekil 4.24'ten görülebileceği gibi, ultrases ve koagülanın (500 mg/L koagülan dozajı) hem 30 hem de 60 dakikalık US sürelerinde % 1-4 civarında LOI giderimine ulaşılmıştır. LOI giderim veriminde belirgin bir değişikliğin meydana gelmediği görülmektedir. Bu durum çamur keki TOK giderim çalışmalarında da gözlemlenmiştir. LOI değeri, atık numune içerisindeki tüm yanabilecek organik maddeleri temsil etmektedir. Çamur keki

LOI parametresi, içerisinde aynı zamanda toplam organik maddeleri de içerdiğinden, deney sonucunda LOI giderim veriminin düşmesi, TOK giderim veriminin de düşmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, TOK giderim verimi çalışmalarında elde edilen sonuçların aslında, çamur keki LOI içeriğinde herhangi bir olumlu değişikliğe sebep olmayacağına işaret edebilir.



Şekil 4.24. Ultrasonik güç, koagülan ve işletme süresinin kızdırma kaybı üzerine etkisi

Farklı ultrasonik güç (300 ve 400 W/L) ile yürütülen çalışmalar sonucunda, işlenmiş çamur kekindeki nihai LOI giderimi ortalama % 3,75 olarak hesaplanmıştır. Giriş değeri (ham) ortalama % 58,75 olan çamur kekindeki LOI içeriği, bu adımda % 56,55 seviyesine indirilmiş olsa da 1. Sınıf limit değeri (% 10) sağlanamamıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.25. Çamur kekinde LOI giderim mukayesesi
 (*Kutu içerisinde verilen verim değerleri 400 W/L dikkate alınarak hesaplanmıştır).

5. SONUÇ

Sintine suyu arıtımı yapan tesislerin karşılaştığı başlıca sorun, yüksek miktarda çamur açığa çıkması ve bu çamurun önemli miktarda yağ ve tehlikeli maddeler içermesidir. Sintine suyunda değişen özelliklere sahip, % 10 ila % 20 arasında değişen oranlarda petrol ve petrol türevli organik yağların bulunması, bu suların arıtılmasında sadece zorluklar meydana getirmekle kalmamakta, aynı zamanda sintine suyu arıtma çamurunun yönetimini de karmaşık hale getirmektedir. Suyun fizikokimyasal arıtımından sonra oluşan arıtma çamurları, bu tür tesisler için hem miktar hem yağ içeriği hem de tehlikeli maddelerin varlığı açısından üç büyük zorluk teşkil etmektedir:

- i. Tesise gelen atıksu bileşenlerinin değişkenliği, beklenen teorik değerden daha yüksek çamur miktarına neden olabilmekte,
- ii. Atıksudan yağ ayırmak için emülsiyon kırıcılar kullanılmasına rağmen, bir miktar yağ suda çeşitli şekillerde kalabilir ve arıtma çamuruna da taşınabilir. Bu durum flokların parçalanmasıyla son çıkış tankındaki çökeltme işlemini olumsuz yönde etkileyerek hem çökeltme işleminin olumsuz etkilenmesine hem de askıda katı maddelerin deşarj hattında arıtılmış suya kaçmasına neden olmakta,
- iii. Çamurun içindeki yağ, nihai bertaraf alanına taşıma sırasında geçici atık depolama için kullanılan big-bag çuvallardan sızarak depolama alanında görüntü kirliliği, toprak kirliliği ve koku oluşumu gibi sorunlara sebebiyet verebilmekte,
- iv. Big-bag torbaların nihai bertaraf sahasına taşınması sırasında sızıntı problemleriyle karşılaşılabilenekte,
- v. Zaman zaman mevzuat limitlerini aşan parametreler, çamuru tehlikeli madde sınıfına sokabilmekte ve bu durumda çamur tarımsal amaçlı veya dolgu/örtü malzemesi olarak kullanılamamaktadır.

Açıkça görüldüğü gibi, işletme modu veya kapasitesindeki farklılıklara bakılmaksızın, atıksu arıtma tesislerinde çamur üretimi ve yönetimi önemli çevresel kaygılardır. Çamur içeriğindeki karmaşık yapıli organikler, çözünebilir mikrobiyal ürünler, hücre dışı polimerik maddeler ve çeşitli inhibitör bileşiklerin varlığı çamur yönetiminde kullanılan yöntemlerin etkinliğini önemli ölçüde engellemektedir. Bu sınırlayıcı faktörlerin

üstesinden gelmek için literatürde tek başına veya kombinasyon halinde kullanılabilecek çeşitli ön arıtma/arıtma teknolojileri önerilmektedir. Yöntemin seçimi doğrudan çamurun türü (birincil veya ikincil çamur) ve özellikleriyle ilgili olmaktadır. Çamur arıtma yöntemlerinin kombinasyonu veya modifikasyonu; çamurun azaltılması, çamurun parçalanması, toksisitesinin en aza indirilmesi ve biyoenerji üretimi gibi faydalar elde etmeyi amaçlamaktadır. Bununla beraber, bu çalışmaya konu olan sintine suyu arıtma çamurları, tehlikeli madde sınıfında yer alabilecek içeriğiyle, diğer arıtma çamurlarından ayrılmaktadır. Literatürde arıtma çamurlarının yönetimine ilişkin pek çok çalışma yer almasına rağmen, sintine suyu arıtma çamurlarının yönetimine dair bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, Türkiye'nin en büyük liman atık kabul tesislerinden birisinde sintine atıksuyu arıtımı için kurulan fizikokimyasal arıtma tesisinde oluşan arıtma çamurlarının yönetimini amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında, tesis içerisinde bir pilot ölçekli ünite kurularak sintine suyu arıtma çamuruna farklı deney şartları (ultrasonik güç (100-400 W/L), koagülan dozajı (500-2000 mg/L), işletme süresi (10-60 dakika)) altında;

- 1) Filtre pres,
- 2) Ultrases + filtre pres,
- 3) Ultrases + koagülan + filtre pres

prosesleri uygulanmış ve birbirleri ile mukayese edilmiştir. Hedef, ulusal mevzuata göre çamuru tehlikeli atık olarak sınıflandıran parametrelerden, limitlere uymayan altı adet parametreyi (su içeriği, toplam organik karbon, çözünmüş organik karbon, yanma kaybı, toplam çözünmüş katılar ve klorür) limit değerlerin altına düşürmektir. Her bir proses sonunda elde edilen çamur kekleri analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki başlık adı altında özetlenmiştir.

Ultrases destekli çamur iyileştirme sonuçları

- US, filtre presten önce ön arıtım olarak tek başına kullanıldığında, **çamurun su içeriğini** azaltmada etkili olmamıştır.
- US'nin **TOK ve kızdırma kaybı** değerlerini etkilemediği söylenebilir.
- US, 100 W/L ultrasonik güç ve 60 dakika uygulama süresi ile çamurun **çözünmüş organik karbonunu** %45 azaltmıştır.
- US uygulama süresindeki artış, **TÇK ve klorür** parametrelerinin gideriminde sırasıyla % 10 ve % 22 iyileştirme sağlamıştır.
- Ultrasesin yanında koagülan ilâvesinin, **ÇOK** giderimini % 9,3'ten % 39,12 seviyesine yükselttiği görülmektedir. Bu parametrede 1. Sınıf limit değeri (100 mg/L) sağlanmıştır.

Ultrases + koagülan destekli çamur iyileştirme sonuçları

- Ultrasesin yanında koagülan ilâvesinin, **TÇK** giderimini % 5,88'den % 9,07 seviyesine yükselttiği görülmektedir. Giriş değeri (ham) ortalama 4 275 mg/L olan çamur kekindeki **TÇK** konsantrasyonu, bu adımda 4020 mg/L seviyelerine indirilerek, 1. Sınıf limit değeri (10000 mg/L) sağlanmıştır.
- Ultrasese ek olarak koagülan kullanımının, **klorür** giderimini % 19,25'ten % 24,77 seviyesine yükselttiği görülmektedir. Böylelikle bu parametrede de 1. Sınıf limit değeri elde edilmiştir.
- Giriş değeri (ham) ortalama % 36,08 olan çamur kekindeki **TOK** konsantrasyonu, ultrasesin + koagülan uygulaması ile % 32,17 seviyesine indirilmiş olsa da 1. Sınıf limit değeri (% 6) sağlanamamıştır.
- Ultrasesin beraberinde koagülan ilâvesi ile **çamur su içeriği** % 65,71 seviyesine indirilmiş olsa da 1. Sınıf limit değeri (% 50) sağlanamamıştır.
- Ultrases ile koagülan eş zamanlı kullanımı **LOI** giderim veriminde belirgin bir değişiklik meydana getirmediği görülmektedir. Bu parametrede elde edilen % 56,55 **LOI** seviyesi ile 1. Sınıf limit değeri (% 10) sağlanamamıştır.

Bu çalışmanın kapsamı içinde önerilen yaklaşım, yoğun işçilik ve ek maliyetli ön işlem süreçlerinden geçen arıtılmış çamurları belirli bir ücret karşılığında uygun bertaraf tesislerine gönderme uygulamasını ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Böylelikle, tehlikeli olarak sınıflandırılabilen arıtma çamurlarının, benzer liman atık kabul tesislerinin rutin işleminden sonra herhangi bir ek işlem olmaksızın doğrudan depolama alanına maliyet-etkin bir şekilde gömülmesi hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında, çamuru tehlikeli madde kategorisinde sınıflandıran altı adet parametreden üç tanesinde yasal limitler sağlanabilmiştir. İçeriği itibariyle yönetimi zor olan sintine suyu arıtma çamurundaki diğer üç parametrenin de yasal limitlere uygun hale getirilmesi için ilave çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci ve en önemli hedeflerden biri ise, gerçek ölçekli bir US reaktörü ve kimyasal işlemi birleştiren bir tesisin tasarlanmasıdır. Bu durumda, tesis içinde sürekli veya yarı sürekli olarak çalışabilen 30 L/saat hızında iki modül (20 ünite) ultrasonik reaktörün kurulmasıyla tesis çamur kapasitesini yönetmek mümkün olabilecektir. Böylelikle, ultrasonik reaktörün uygulanması ile atık bertaraf maliyeti, yaklaşık olarak atık bertarafının % 2,15 'ini (2023 yılı için yıllık 4 600 000 TL değerine karşılık gelmektedir) oluşturan çamur bertaraf maliyeti azaltılacaktır.

Gelecekteki çalışmalarda, sintine suyu arıtma çamurlarının yönetiminde ve ulusal yasal limitlere uygunluğunun sağlanmasında, ultrasesin etkinliğini artıracak çeşitli ekstraksiyon kimyasallarının da kullanılarak daha fazla parametrenin hesaplamalara katıldığı bir deneysel tasarım uygulanmalı ve ayrıca işletme maliyetinin yanında karbon borsası geliri gibi sürdürülebilirlik hedeflerinin de dikkate alınacağı araştırmalar yürütülmelidir. Sonuç olarak, bu çalışmanın kısmen umut verici sonuçlarının, daha önce araştırılmamış olan sintine suyu çamurunun işlenmesi için yeni bir alternatif ve yol gösterici bir rehber olması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abelleira-Pereira, J. M., Pérez-Elvira, S. I., Sánchez-Oneto, J., de la Cruz, R., Portela, J. R., & Nebot, E. (2015). Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by advanced thermal hydrolysis pretreatment. *Water Research*, 71, 330-340. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.027>
- Admon, S., Green, M., & Avnimelech, Y. (2001). Biodegradation kinetics of hydrocarbons in soil during land treatment of oily sludge. *Bioremediation Journal*, 5(3), 193-209. <https://doi.org/10.1080/20018891079285>
- Albertson, O. E., & Kopper, M. (1983). Fine-Coal-Aided Centrifugal Dewatering of Waste Activated Sludge. *İçinde Journal (Water Pollution Control Federation)* (C. 55, Sayı 2).
- Al-Futaisi, A., Jamrah, A., Yaghi, B., & Taha, R. (2007). Assessment of alternative management techniques of tank bottom petroleum sludge in Oman. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 557-564. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.023>
- Al-Zahrani, S. M., & Putra, M. D. (2013). Used lubricating oil regeneration by various solvent extraction techniques. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(2), 536-539. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.007>
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. (2019).
- Benttez, J., Rodriguez, A., & Suarez, A. (1994). Optimization Technique For Sewage Sludge Conditioning With Polymer And Skeleton Builders. *İçinde War. Res* (C. 28, Sayı 94).
- Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., & Collier, T. K. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *İçinde Marine Pollution Bulletin* (C. 110, Sayı 1, ss. 28-51). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
- Büyüktanır, A. (2010). Ultrases. *İçinde Fizik Eğitimi Anabilim Dalı*.
- Cano, R., Pérez-Elvira, S. I., & Fdz-Polanco, F. (2015). Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. *İçinde Applied Energy* (C. 149, ss. 176-185). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.132>
- Cansu, Ç. (2008). *Ultrases ile Ağaçların Bazı Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı.
- Chen, C., Zhang, P., Zeng, G., Deng, J., Zhou, Y., & Lu, H. (2010). Sewage sludge conditioning with coal fly ash modified by sulfuric acid. *Chemical Engineering Journal*, 158(3), 616-622. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.021>
- Chen, G., Cheng, C., Zhang, J., Sun, Y., Hu, Q., Qu, C., & Dong, S. (2019). Synergistic effect of surfactant and alkali on the treatment of oil sludge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106420>
- Church, J., Lundin, J. G., Diaz, D., Mercado, D., Willner, M. R., Lee, W. H., & Paynter, D. M. (2019). Identification and characterization of bilgewater emulsions. *İçinde Science of the Total Environment* (C. 691, ss. 981-995). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.510>
- Cui, B., Cui, F., Jing, G., Xu, S., Huo, W., & Liu, S. (2009). Oxidation of oily sludge in supercritical water. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 511-517. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.008>

- Difeto, P. M., & Hitchens, A. B. (2010). *Waste and port reception facilities*.
- Dixon, A., Simon, M., & Burkitt, T. (2003). Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: Comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. *Ecological Engineering*, 20(4), 297-308. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00007-7)
- Emadian, S. M., Hosseini, M., Rahimnejad, M., Shahavi, M. H., & Khoshandam, B. (2015). Treatment of a low-strength bilge water of Caspian Sea ships by Huasb technique. *Ecological Engineering*, 82, 272-275. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.055>
- EU Legislation. (2021). *Port reception facilities for ship waste Collecting waste from ships in ports*.
- Feng, X., Lei, H., Deng, J., Yu, Q., & Li, H. (2009). Physical and chemical characteristics of waste activated sludge treated ultrasonically. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(1), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.03.012>
- Ferrarese, E., Andreottola, G., & Oprea, I. A. (2008). Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.080>
- Filibeli, A., & Erden Kaynak, G. (2010). Pre-treatment processes applied to decrease quantity and to improve dewatering properties of treatment plant sludge. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(1), 145-150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jctb.2298>
- Gallego, J. L. R., García-Martínez, M. J., Llamas, J. F., Belloch, C., Peláez, A. I., & Sánchez, J. (2007). Biodegradation of oil tank bottom sludge using microbial consortia. *Biodegradation*, 18(3), 269-281. <https://doi.org/10.1007/s10532-006-9061-y>
- Gensure, L. J. R. (1995). Pearl Harbor Naval Base's Donut-Free Bilge and Oily Wastewater Disposal Program. *Naval Engineers Journal*, 107(6), 65-77. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1995.tb03124.x>
- Gong, C., Jiang, J., & Li, D. (2015). Ultrasound coupled with Fenton oxidation pre-treatment of sludge to release organic carbon, nitrogen and phosphorus. *Science of the Total Environment*, 532, 495-500. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.131>
- Grönroos, A., Kyllönen, H., Korpijärvi, K., Pirkonen, P., Paavola, T., Jokela, J., & Rintala, J. (2005). Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (SCOD) of sewage sludge for digestion. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1-2 SPEC. ISS.), 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.05.012>
- He, X., Li, G., Mo, W., Yuan, J., Wei, X., & Wu, Y. (2023). Investigation on the Composition and Extraction Mechanism of the Soluble Species from Oily Sludge by Solvent Extraction. *ACS Omega*, 8(21), 18472-18478. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08188>
- Ingeç, T., & Tekin, T. (2004). Effect of ultrasound on the production reaction kinetics of sodium thiosulfate. *Chemical Engineering and Technology*, 27(2), 150-153. <https://doi.org/10.1002/ceat.200401905>
- İngeç, T., & Tekin, T. (2004). Ultrases Enerjisinin Kimyasal Kinetik Üzerine Etkisi. *Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 7-10.
- Jing, S. R., Lin, Y. F., Lin, Y. M., Hsu, C. S., Huang, C. S., & Lee, D. Y. (1999). Evaluation of effective conditioners for enhancing sludge dewatering and

- subsequent detachment from filter cloth. *Journal of Environmental Science and Health- Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 34(7), 1517-1531. <https://doi.org/10.1080/10934529909376909>
- Karakulski, K., & Gryta, M. (2017). The application of ultrafiltration for treatment of ships generated oily wastewater. *Chemical Papers*, 71(6), 1165-1173. <https://doi.org/10.1007/s11696-016-0108-1>
- Karakulski, K., Morawski, W. A., & Grzechulska, J. (1998). Purification of bilge water by hybrid ultrafiltration and photocatalytic processes. *Separation and Purification Technology*, 14(1-3), 163-173. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(98\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(98)00071-9)
- Katı Atıklarda Ön İşlem (Eluat Hazırlama) Talimatı. (2023). <https://kalite.istac.com.tr/QDMSNET/BSAT/Default.aspx>
- Kopp, J., & Dichtl, N. (2001). *Prediction of full-scale dewatering results of sewage sludges by the physical water distribution*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/43/11/135/428871/135.pdf>
- Körbahti, B. K., & Artut, K. (2010). Electrochemical oil/water demulsification and purification of bilge water using Pt/Ir electrodes. *Desalination*, 258(1-3), 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.008>
- Lauer, H., & Manfred; (1989). *1 Patent Number: 45 Date of Patent: 54 Process for Producing Combustible Sewage Sludge Filter Cakes In Filter Presses 75 Inventors: Bruno Sander, Ludwigshafen*.
- Lee, D. Y., Jing, S. R., & Lin, Y. F. (2001). *Using seafood waste as sludge conditioners*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/44/10/301/424175/301.pdf>
- Li, J., Song, X., Hu, G., & Thring, R. W. (2013). Ultrasonic desorption of petroleum hydrocarbons from crude oil contaminated soils. *Journal of Environmental Science and Health- Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 48(11), 1378-1389. <https://doi.org/10.1080/10934529.2013.781885>
- Lin, B., Wang, J., Huang, Q., & Chi, Y. (2017). Effects of potassium hydroxide on the catalytic pyrolysis of oily sludge for high-quality oil product. *Fuel*, 200, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.065>
- Lin, Y.-F., Jing, S.-R., & Lee, D.-Y. (2001). *Recycling of wood chips and wheat dregs for sludge processing*.
- Liu, H., Wang, X., Qin, S., Lai, W., Yang, X., Xu, S., & Lichtfouse, E. (2021). Comprehensive role of thermal combined ultrasonic pre-treatment in sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 789, 147862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147862>
- Liu, J., Jiang, X., Zhou, L., Han, X., & Cui, Z. (2009). Pyrolysis treatment of oil sludge and model-free kinetics analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 1208-1215. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.072>
- Liu, J., Wang, K., Ma, L., & Tang, T. (2016). Insight into the role of potassium hydroxide for accelerating the degradation of anhydride-cured epoxy resin in subcritical methanol. *Journal of Supercritical Fluids*, 107, 605-611. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.07.022>
- Liu, L., Yan, H., Yang, C., & Zhu, G. (2018). Dewatering of drilling sludge by ultrasound assisted Fe(ii)-activated persulfate oxidation. *RSC Advances*, 8(52), 29756-29766. <https://doi.org/10.1039/c8ra03376e>
- Mao, F., Han, X., Huang, Q., Yan, J., & Chi, Y. (2016). Effect of frequency on ultrasound-assisted centrifugal dewatering of petroleum sludge. *Drying Technology*, 34(16), 1948-1956. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1144611>

- (MARPOL 73/78) *Practical Guide*. (2015).
- Martínez, E. J., Rosas, J. G., Morán, A., & Gómez, X. (2015). Effect of ultrasound pretreatment on sludge digestion and dewatering characteristics: Application of particle size analysis. *Water (Switzerland)*, 7(11), 6483-6495. <https://doi.org/10.3390/w7116483>
- Mater, L., Sperb, R. M., Madureira, L. A. S., Rosin, A. P., Correa, A. X. R., & Radetski, C. M. (2006). Proposal of a sequential treatment methodology for the safe reuse of oil sludge-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 136, 967-971. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.041>
- Meng, Z., Zhou, Z., Zheng, D., Liu, L., Dong, J., Yang, Y., Li, X., & Zhang, T. (2018). Optimizing dewaterability of drinking water treatment sludge by ultrasound treatment: Correlations to sludge physicochemical properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.027>
- Meng, Z., Zhou, Z., Zheng, D., Liu, L., Dong, J., Yang, Y., Li, X., & Zhang, T. (2018b). Optimizing dewaterability of drinking water treatment sludge by ultrasound treatment: Correlations to sludge physicochemical properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45(3), 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.027>
- Mirghaffari, N. (2017). *Treatment and Recycling of Oily Sludges Produced in the Petroleum Industry*.
- MsdS-Coal-Tar-Remover-20220411*. (2023, Ekim 30). <https://vecom-marine.com/wp-content/uploads/2022/11/MSDS-Coal-Tar-Remover-20220411.pdf>
- MsdS-Oil-Spill-Dispersant-Type-I-20220831*. (2023). <https://vecom-marine.com/wp-content/uploads/2022/11/MSDS-Oil-Spill-Dispersant-Type-I-20220831.pdf>
- MSdS-Ecoclean-20220411*. (2023). <https://vecom-marine.com/wp-content/uploads/2022/11/MSDS-Ecoclean-20220411.pdf>
- Müller, J. A., Winter, A., & Strükmann, G. (2004). Investigation and assessment of sludge pre-treatment processes. *İçinde Water Science and Technology (C. 49)*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/49/10/97/420353/97.pdf>
- Nalbur, B., & Karaelli, E. (2019). Petrol İçeren Atıksuların Arıtılabilirliği ve Arıtım Sisteminin Tasarlanması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(1), 231-242. <https://doi.org/10.17482/uumfd.463341>
- Nelson, R. F., & Brattlof, B. D. (1979). Sludge Pressure Filtration with Fly Ash Addition. *İçinde Journal (Water Pollution Control Federation) (C. 51, Sayı 5)*.
- Nielsen, S. (2011). Sludge treatment reed bed facilities- Organic load and operation problems. *Water Science and Technology*, 63(5), 941-947. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.273>
- Ning, X. an, Chen, H., Wu, J., Wang, Y., Liu, J., & Lin, M. (2014). Effects of ultrasound assisted Fenton treatment on textile dyeing sludge structure and dewaterability. *Chemical Engineering Journal*, 242, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.064>
- O'Kelly, B. C. (2005). Mechanical properties of dewatered sewage sludge. *Waste Management*, 25(1), 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.003>
- Öz, Ç., & Çetin, E. (2021). Treatment of bilge water by fenton oxidation followed by granular activated carbon adsorption. *Water (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/w13192792>
- Özdoğan, N., Albahnasawi, A., Gürbulak, E., Ağır, H., Eyvaz, M., & Yüksel, E. (2023). Pretreatment of Bilge Water By Different Flocculants. *ICHEAS 4th International Conference*, 592-593.

- Özdoğan, N. (2018). *Petrol Türevli Atık Yağların Ultrasonik Yöntemle Susuzlaştırılması* [Yüksek Lisans Tez]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özdoğan, N., Albahnasawi, A. M., Ağır, H., Arslan, S., Gunaydin, O., Gürbulak, E., Eyvaz, M., & Yüksel, E. (2021). Demulsifying of waste oils in a port reception facility by ultrasound with a new coagulant: techno-economic evaluation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1958956>
- Özdoğan, N., Gürbulak, E., Arslan, S., Günaydin, O., Duyum, F., Eyvaz, M., & Yüksel, E. (2018). Petrol Türevli Atık Yağların Ultrasonik Yöntemle Susuzlaştırılması. *Bursa Uluslararası Su ve Çevre Kongresi*, 1689-1697.
- Peters, K., Nosa, J., & Amedu, M. (2019). *Assessment of port reception facilities and waste management Assessment of port reception facilities and waste management control in Nigeria: case study: (Tin Can Island Port) control in Nigeria: case study: (Tin Can Island Port)*. https://commons.wmu.se/all_dissertations
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R. J., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2011). Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. *İçinde Ultrasonics Sonochemistry* (C. 18, Sayı 1, ss. 1-18). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.014>
- Print, I., Kaykıoğlu, G., & Balci, C. N. (2021). *Zeytin Karasuyunun Ön Arıtımında Asitle Parçalama ve Kireçle Çöktürme Uygulamalarının Karşılaştırılması*. 3412, 45-49.
- Qi, Y., Thapa, K. B., & Hoadley, A. F. A. (2011). Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties- A review. *İçinde Chemical Engineering Journal* (C. 171, Sayı 2, ss. 373-384). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.060>
- Rincón, G. J., & La Motta, E. J. (2014). Simultaneous removal of oil and grease, and heavy metals from artificial bilge water using electro-coagulation/flotation. *Journal of Environmental Management*, 144, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.004>
- Ruffino, B., Campo, G., Genon, G., Lorenzi, E., Novarino, D., Scibilia, G., & Zanetti, M. (2015). Improvement of anaerobic digestion of sewage sludge in a wastewater treatment plant by means of mechanical and thermal pre-treatments: Performance, energy and economical assessment. *Bioresource Technology*, 175, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.071>
- Ruiz-Hernando, M., Martinez-Elorza, G., Labanda, J., & Llorens, J. (2013). Dewaterability of sewage sludge by ultrasonic, thermal and chemical treatments. *Chemical Engineering Journal*, 230, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.046>
- Satir, T., Alkan, G. B., & Bak, O. A. (2007). *Port Reception Facilities: Using Multi Criteria Decision Making*. <https://www.researchgate.net/publication/237443815>
- Savun, B., Neis, U., Ince, N. H., & Yenigün, O. (2016). Pretreatment of Sewage Sludge by Low-frequency Ultrasound. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 15(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/jaots-2012-0217>
- Scala, F., & Chirone, R. (2004). Fluidized bed combustion of alternative solid fuels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(7), 691-699. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2003.12.005>
- Sivagami, K., Anand, D., Divyapriya, G., & Nambi, I. (2019). Treatment of petroleum oil spill sludge using the combined ultrasound and Fenton oxidation process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.007>

- Smollen, M., & Kafaar, A. (1997). Investigation into alternative sludge conditioning prior to dewatering. *Water Science and Technology*, 36(11), 115-119. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00701-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00701-4)
- Şahinkaya, S., Kalipci, E., & Aras, S. (2015). Disintegration of waste activated sludge by different applications of Fenton process. *Process Safety and Environmental Protection*, 93, 274-281. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.05.010>
- Şipal, Y. Z. (2014). *Türkiye’de Deniz Ulaşım Sektöründeki Firmaların Gemi Yatırım Stratejileri ve Finansmanı* [Yüksek Lisans Tez]. Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Tawakkoly, B., Alizadehdakhel, A., & Dorosti, F. (2019). Evaluation of COD and turbidity removal from compost leachate wastewater using *Salvia hispanica* as a natural coagulant. *Industrial Crops and Products*, 137, 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.038>
- TC, T. C. C. 292. (2001). *BS EN 13137:2001 Characterisation Of Waste. Determination Of Total Organic Carbon (TOC) In Waste, Sludges And Sediments (British Standard)*.
- Tenney, M. W., & Gerald Cole, T. (1968). The Use of Fly Ash in Conditioning Biological Sludges for Vacuum Filtration. *İçinde Journal (Water Pollution Control Federation)* (C. 40, Sayı 8). <https://about.jstor.org/terms>
- Thapa, K. B., Qi, Y., Clayton, S. A., & Hoadley, A. F. A. (2009). Lignite aided dewatering of digested sewage sludge. *Water Research*, 43(3), 623-634. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.005>
- Thapa, K. B., Qi, Y., & Hoadley, A. F. A. (2009). Interaction of polyelectrolyte with digested sewage sludge and lignite in sludge dewatering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 334(1-3), 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.10.007>
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., & Neis, U. (2003). Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization. *İçinde Wat. Res* (C. 35, Sayı 8).
- TSI. (1992). *TSE- TS 10459 Wastes- Determination of Moisture In Solid Wastes*.
- Ulucan, K. (2011). *Sintine Sularının Elektrokimyasal Olarak Arıtılabilirliğinin Araştırılması*. [Yüksek Lisans Tez]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ulucan, K., & Kurt, U. (2015). *Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach*. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.04.005>
- Wolski, P., & Zawieja, I. (2012). Effect of ultrasound field on dewatering of sewage sludge. *Archives of Environmental Protection*, 38(2), 25-31. <https://doi.org/10.2478/v10265-012-0015-7>
- Xu, N., Wang, W., Han, P., & Lu, X. (2009). Effects of ultrasound on oily sludge deoiling. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 914-917. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.091>
- Xu, X., Cao, D., Liu, J., Gao, J., & Wang, X. (2019). Research on ultrasound-assisted demulsification/dehydration for crude oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57, 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.024>
- Xu, X., Cao, D., Wang, Z., Liu, J., Gao, J., Sanchuan, M., & Wang, Z. (2019). Study on ultrasonic treatment for municipal sludge. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(May), 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.008>

- Yang, L., Nakhla, G., & Bassi, A. (2005). Electro-kinetic dewatering of oily sludges. *Journal of Hazardous Materials*, 125, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.040>
- Yang, X. G., Tan, W., & Tan, X. F. (2009). Demulsification of crude oil emulsion via ultrasonic chemical method. *Petroleum Science and Technology*, 27(17), 2010-2020. <https://doi.org/10.1080/10916460802637577>
- Ye, G., Lu, X., Han, P., Peng, F., Wang, Y., & Shen, X. (2008). Application of ultrasound on crude oil pretreatment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(12), 2346-2350. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.01.010>
- Ye, G., Lü, X., Peng, F., Han, P., & Shen, X. (2008). Pretreatment of Crude Oil by Ultrasonic-electric United Desalting and Dewatering. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(4), 564-569. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60122-6](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60122-6)
- Yi, M., Huang, J., & Wang, L. (2017). Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier. *Journal of Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9147926>
- Yuan, H., Guan, R., Wachemo, A. C., Zhu, C., Zou, D., Li, Y., Liu, Y., Zuo, X., & Li, X. (2019). Enhancing methane production of excess sludge and dewatered sludge with combined low frequency CaO-ultrasonic pretreatment. *Bioresource Technology*, 273, 425-430. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.040>
- Zall, J., Galil, N., & Rehbun, M. (1987). Skeleton Builders for Conditioning Oily Sludge. *İçinde Journal (Water Pollution Control Federation)* (C. 59, Sayı 7).
- Zengi, M. B. (2011). *Ultrases Kullanımının Direkt Filtrasyona Etkilerinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tez]. Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Zhang, L., Lv, P., He, Y., Li, S., Peng, J., Zhang, L., Chen, K., & Yin, S. (2021). Ultrasound-assisted cleaning chloride from wastewater using Friedel's salt precipitation. *Journal of Hazardous Materials*, 403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123545>
- Zhang, P., Zhang, G., & Wang, W. (2007). Ultrasonic treatment of biological sludge: Floc disintegration, cell lysis and inactivation. *Bioresource Technology*, 98(1), 207-210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.12.002>
- Zhao, Y. Q. (2006). Involvement of gypsum (CaSO₄ 2H₂O) in water treatment sludge dewatering: A potential benefit in disposal and reuse. *Separation Science and Technology*, 41(12), 2785-2794. <https://doi.org/10.1080/01496390600785558>
- Zhao, Y. Q., & Bache, D. H. (2001). Conditioning of alum sludge with polymer and gypsum. *İçinde Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (C. 194). www.elsevier.com/locate/colsurfa

EKLER

- EK 1** Eluat hazırlamada kullanılan çizelge
- EK 2** Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik kriterleri (Ek-2C)



EK 1 Eluat hazırlamada kullanılan çizelge (*Katı Atıklarda Ön İşlem (Eluat Hazırlama) Talimatı*, 2023)

Nem Oranı	Süzücü Hacmi	Yaş Kütle Miktarı (g)	Nem Oranı	Süzücü Hacmi	Yaş Numune. Miktarı
10	890,00	100,00	50	810	180
11	888,88	101,12	51	806,33	183,67
12	887,73	102,27	52	802,50	187,50
13	886,55	103,45	53	798,51	191,49
14	885,35	104,65	54	794,35	195,65
15	884,12	105,88	55	790,00	200,00
16	882,86	107,14	56	785,45	204,55
17	881,57	108,43	57	780,70	209,30
18	880,24	109,76	58	775,71	214,29
19	878,89	111,11	59	770,49	219,51
20	877,50	112,50	60	765,00	225,00
21	876,08	113,92	61	759,23	230,77
22	874,62	115,38	62	753,16	236,84
23	873,12	116,88	63	746,76	243,24
24	871,58	118,42	64	740,00	250,00
25	870,00	120,00	65	732,86	257,14
26	868,38	121,62	66	725,29	264,71
27	866,71	123,29	67	717,27	272,73
28	865,00	125,00	68	708,75	281,25
29	863,24	126,76	69	699,68	290,32
30	861,43	128,57	70	690,00	300,00
31	859,57	130,43	71	679,66	310,34
32	857,65	132,35	72	668,57	321,43
33	855,67	134,33	73	656,67	333,33
34	853,64	136,36	74	643,85	346,15
35	851,54	138,46	75	630,00	360,00
36	849,38	140,63	76	615,00	375,00
37	847,14	142,86	77	598,70	391,30
38	844,84	145,16	78	580,91	409,09
39	842,46	147,54	79	561,43	428,57
40	840,00	150,00	80	540,00	450,00
41	837,46	152,54	81	516,32	473,68
42	834,83	155,17	82	490,00	500,00
43	832,11	157,89	83	460,59	529,41
44	829,29	160,71	84	427,50	562,50
45	826,36	163,64	85	390,00	600,00
46	823,33	166,67	86	347,14	642,86

EK 1 Eluat hazırlamada kullanılan çizelge (devam)

Nem Oranı	Süzücü Hacmi	Yaş Kütle Miktarı (g)	Nem Oranı	Süzücü Hacmi	Yaş Numune. Miktarı
47	820,19	169,81	87	297,69	692,31
48	816,92	173,08	88	240,00	750,00
49	813,53	176,47	89	171,82	818,18
			90	90	900

EK 2 Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik kriterleri (Ek-2C) (*Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*, 2019)

Parametre	Birim	3. Sınıf Sınır Değeri	2 Sınıf Sınır Değeri	1. Sınıf Sınır Değeri
Çözülmüş Organik Karbon	mg/L	50	80	100
Toplam Çözünen Katı	mg/L	400	6000	10000
Klorür	mg/L	80	1500	2500
Toplam Organik Karbon	%		5	6
Kızdırma Kaybı	%			10
Su Muhtevası	%	50	50	50

Analiz Sonuç (mg/L); [$(<3. \text{ Sınıf} = \text{İnert})$ ($>3. \text{ Sınıf}, <2 \text{ Sınıf} = \text{Tehlikesiz}$) ($>2. \text{ Sınıf}, <1 \text{ Sınıf} = \text{Tehlikeli}$) ($> 1 \text{ Sınıf} = \text{Çok Tehlikeli}$)]