

SİNTİNE SUYU ARITMA ÇAMURLARININ YÖNETİMİNDE ULTRASONİK DESTEKLİ SUSUZLAŞTIRMA: ÇEVRESEL VE EKONOMİK PERSPEKTİF

Nurullah ÖZDOĞAN¹ 

Murat EYVAZ² 

F. Olcay TOPAC^{3*} 

Alınma: 06.04.2025; düzeltme: 30.05.2025; kabul: 02.06.2025

Öz: Bu çalışma, liman atık kabul tesislerinde sintine suyu arıtımı sonucunda oluşan tehlikeli nitelikteki çamurların bertaraf maliyetlerinin azaltılmasına yönelik olarak mevcut ve alternatif susuzlaştırma teknolojilerinin performans ve maliyet açısından karşılaştırmalı analizini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, mevcut filtre pres sistemi (Senaryo 1), ultrason (US) destekli filtre pres (Senaryo 2) ve US + koagülan destekli filtre pres (Senaryo 3) olmak üzere üç farklı senaryo pilot ölçekli deneyler ile değerlendirilmiştir. Deneylerde, gerçek sintine çamuru kullanılarak 5000 mL hacminde örneklerle çalışılmış; US uygulamaları 500–2000 W aralığında ve 10–60 dakika süreyle gerçekleştirilmiş, koagülasyon aşamasında ise polialüminyum klorür, demir (III) klorür ve demülsifier gibi farklı kimyasal gruplar test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, US ve US + koagülan destekli sistemler çamur hacmini sırasıyla %10 ve %15 oranında azaltmıştır. Ancak bu fiziksel iyileşmeye rağmen, enerji ve kimyasal girdilerdeki artış nedeniyle toplam yıllık işletme maliyetleri artış göstermiştir. Senaryo 2’de yıllık maliyet, mevcut yöntemle göre %69,6 oranında artarken; Senaryo 3’te bu oran %65,2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, her üç senaryoda da çamur içerisindeki toplam organik karbon (TOC), kızdırma kaybı (LOI) ve su içeriği gibi parametrelerde önemli değişiklikler gözlenmiştir. Bu sonuçlar, ultrason tabanlı ön işlemlerin çamur karakteristiği üzerinde pozitif etkiler yarattığını, ancak mevcut ekonomik koşullarda bu sistemlerin tek başına bertaraf maliyetini azaltmak açısından yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, tam ölçekli uygulamalarda sistem verimliliği, enerji maliyetleri ve olası çevresel teşvikler göz önünde bulundurularak yeniden değerlendirme yapılması önerilmektedir. Ayrıca, çamur hacmini daha da azaltabilecek hibrit teknolojilerin veya ileri susuzlaştırma tekniklerinin araştırılması, bertaraf stratejilerinin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Sintine suyu, arıtma çamuru, ultrasonik yöntem, bertaraf maliyeti, liman atık kabul tesisi, ekonomik analiz

Ultrasound-Assisted Dewatering in the Management of Bilge Water Treatment Sludge: An Environmental and Economic Perspective

Abstract: This study aims to conduct a comparative analysis of the performance and cost efficiency of conventional and alternative dewatering technologies for the disposal of hazardous sludge generated from bilge water treatment in port waste reception facilities. In this context, three scenarios were evaluated through pilot-scale experiments: the conventional filter press system (Scenario 1), filter press supported by ultrasound (US) (Scenario 2), and filter press supported by US and coagulants (Scenario 3). Experiments were performed using real bilge sludge samples with a volume of 5000 mL. US applications were conducted within a power range of 500–2000 W for durations of 10–60 minutes, while the coagulation phase tested

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Nilüfer, Bursa

² Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Gebze, İzmit

³ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Nilüfer, Bursa

İletişim Yazarı: F. Olcay Topaç (olcaytopac@uludag.edu.tr)

different chemical groups, including polyaluminum chloride, ferric chloride, and demulsifiers. According to the results, US- and US + coagulant-assisted systems reduced sludge volume by approximately 10% and 15%, respectively. However, despite the physical improvements, the increases in energy and chemical inputs resulted in higher total annual operating costs. Compared to the conventional method, Scenario 2 exhibited a 69.6% cost increase, while Scenario 3 showed a 65.2% increase. Furthermore, significant changes were observed in parameters such as total organic carbon (TOC), loss on ignition (LOI), and moisture content across all three scenarios. These findings suggest that while ultrasonic pretreatment positively influences sludge characteristics, under current economic conditions, such systems alone are not sufficient to reduce disposal costs effectively. Therefore, for full-scale applications, it is recommended that system efficiency, energy pricing, and potential environmental incentives be taken into account. Additionally, investigating hybrid technologies or advanced dewatering techniques that could further reduce sludge volume is critical for ensuring the long-term sustainability of disposal strategies.

Keywords: Bilge water, sludge treatment, ultrasonic method, disposal cost, port reception facility, economic analysis

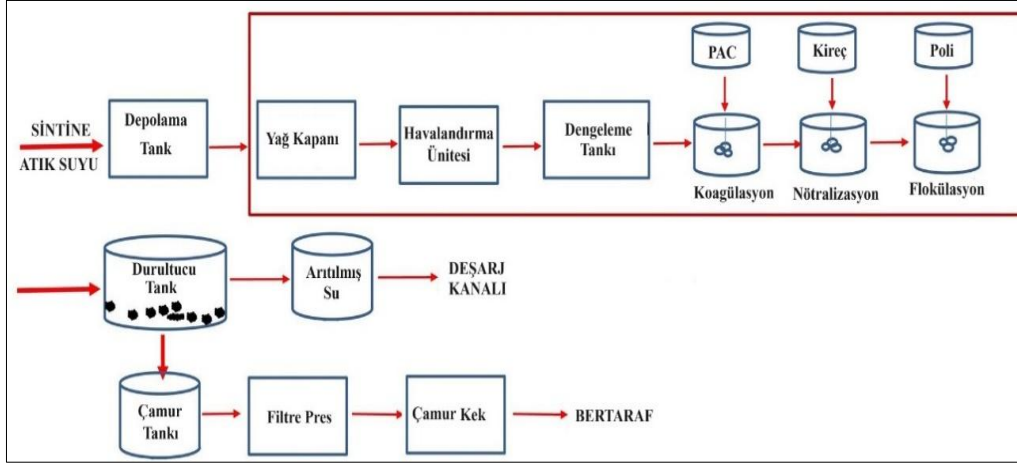
1. GİRİŞ

Dünya ticaret hacminin yaklaşık %90'ı deniz yolu ile gerçekleştirilmektedir. Bu yoğun deniz taşımacılığı sürecinde gemiler; makine daireleri, koferdamlar ve antrepolar gibi alanların temizliği sırasında sintine sularını oluşturan çeşitli atıklar üretmektedir. Sintine suları; petrol türevleri, yağ, deterjan ve çeşitli ağır metaller gibi çevresel açıdan yüksek risk taşıyan bileşenleri içermektedir. Bu tür atıkların deniz ortamına doğrudan veya dolaylı yollarla deşarj edilmesi; sucül ekosistemlerde ciddi tahribatlara, biyoçeşitliliğin azalmasına ve insan sağlığı üzerinde dolaylı olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Fletcher ve diğ., 2017; Magnusson ve diğ., 2018; Özdoğan ve diğ., 2021; Pinar ve Rodríguez-Couto, 2024; Schaerer ve diğ., 2019; Tiselius ve Magnusson, 2017).

Bu çevresel risklerin önüne geçebilmek amacıyla, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve Avrupa Birliği (AB) tarafından yayımlanan düzenlemeler doğrultusunda, gemiler sintine ve diğer gemi kaynaklı sıvı atıklarını lisanslı liman atık kabul tesislerine bırakmakla yükümlü kılınmıştır (Satır ve diğ., 2007). Bu tesisler, alınan sintine sularını fizikokimyasal proseslerle arıtarak sudan ayrılan yağ, çamur ve diğer bileşenleri bertaraf edilebilir hâle getirmeyi amaçlamaktadır Şekil 1'de sintine suyu arıtım süreci şematik olarak gösterilmiştir.

MARPOL (Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme), deniz taşımacılığının çevresel etkilerini sınırlandırmayı amaçlayan en kapsamlı ve bağlayıcı uluslararası düzenlemelerden biridir (EU Legislation, 2019). Özellikle MARPOL Ek-I kapsamında, sintine sularının izinsiz boşaltılmasına karşı ciddi yaptırımlar uygulanmakta; liman devlet kontrolleri giderek sıkılaşmaktadır (TOCPRO, 2015). Bu durum, liman işletmeleri üzerinde hem çevresel hem de ekonomik baskıyı artırmakta, bertaraf süreçlerinin daha verimli ve düşük maliyetli hâle getirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Gemi kaynaklı sıvı atıklar tesiste genel olarak iki temel işlem adımından geçirilmektedir: susuzlaştırma ve atıksu arıtımı. Sürecin ilk aşaması olan susuzlaştırma sırasında, atık yağ içerisinde bulunan serbest su, atıksu arıtma ünitesine yönlendirilmekte; geride kalan yoğun yağ fazı ise ilgili depolama tanklarına aktarılmaktadır. Bu yağ fazı, sonrasında homojenizasyon ve çökeltme işlemlerine tabi tutularak, susuzlaştırılmış yağ ürünleri ile çamur karakterli yağ bileşenlerinin birbirinden ayrılması sağlanmaktadır. Elde edilen susuzlaştırılmış yağ, ilerleyen süreçte bir yağ geri kazanım tesisine sevk edilmek üzere özel tanklarda muhafaza edilirken, çökeltme sonucu oluşan çamur ise enerji geri kazanımı amacıyla yakma prosesine yönlendirilmektedir.



Şekil 1:

Sintine suyu arıtım sürecinin şematik akışı

Sintine kaynaklı atık suların arıtım süreci ise, öncelikle atık sudaki askıda yağın uzaklaştırılmasıyla başlamaktadır. Bu amaçla, atık su ilk olarak havalandırma tankına alınmakta ve içerdiği yağ bileşenleri fiziksel yöntemlerle giderilmektedir. Ardından, arıtma ünitesine ulaşan sintine atıksuyu, burada sırasıyla koagülasyon (kimyasal çöktürme), nötralizasyon (pH dengeleme), flokülasyon (topaklaştırma) ve berraklaştırma (durultma) gibi fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilmektedir. Bu aşamalar, arıtma süreci sırasında oluşan çamurun kolaylıkla uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Nihai olarak elde edilen arıtılmış su, Şekil 2’de gösterildiği üzere, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) kanalına deşarj edilmektedir.

Ancak bu arıtma işlemleri sonucunda oluşan arıtma çamurları, yüksek oranda su ve yağ içeriğine sahip olmalarının yanı sıra, toksik ve tehlikeli maddeler de barındırmaktadır. Bu durum, söz konusu çamurların hem teknik hem de ekonomik açıdan yönetimini zorlaştırmaktadır. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (TC Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010) kapsamında bu tür çamurlar genellikle “1. sınıf tehlikeli atık” olarak sınıflandırılmakta; tarımsal, dolgu veya ikincil kullanım alternatifleri büyük ölçüde sınırlandırılmaktadır.

Çamurların su tutma kapasitesinin yüksek olması, klasik susuzlaştırma tekniklerinin verimliliğini azaltmakta ve taşıma/bertaraf maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca çamur içerisindeki emülsifiye yağlar ve ağır metaller, bertaraf teknolojilerinin seçiminde özel mühendislik çözümlerini zorunlu kılmaktadır.

Mevcut literatürde sintine suyu arıtımı üzerine çeşitli teknolojiler önerilmiş olsa da (Akbarzadeh Yazdi ve diğ., 2024; Emadian ve diğ., 2015; Karakulski ve Gryta, 2017; Ulucan ve Kurt, 2015), bu suların arıtımı sonucu oluşan çamurların bertaraf maliyetlerinin azaltılması ve yönetim etkinliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır (Özbay ve diğ., 2024; Özdoğan ve diğ., 2023). Yağ içeriği yüksek çamurların susuzlaştırılmasında ultrasonik tabanlı uygulamaların etkili sonuçlar verdiği çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur. (Wang ve diğ., 2024), ultrasonik uygulamanın viskozitesi yüksek, emülsifiye yapısı yoğun çamurlarda suyun ayrıştırılmasında ve çamur hacminin azaltılmasında önemli performans artışı sağladığını belirtmiştir. Nitekim, Antes ve diğ., (2015) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, 80 °C sıcaklık, 0.38 W/cm² ultrasonik güç ve 10 kHz frekans koşullarında 5 dakika süreyle uygulanan ultrasonik işlem sonucunda, petrol rafinerisi kaynaklı çamurda %92.6 oranında susuzlaştırma sağlandığı bildirilmiştir. Sintine çamurlarının da benzer fizikokimyasal özellikleri göz önüne alındığında, bu tür ultrasonik ön işlemlerin taşıma ve bertaraf maliyetlerini azaltmak üzere susuzlaştırma performansını artırması beklenmektedir. Bu nedenle, ultrasonik temelli teknolojilerin sintine çamurlarında uygulanabilirliğini değerlendiren teknik ve ekonomik analizler büyük önem taşımaktadır.

Çamur arıtım tekniklerine yönelik nicel karşılaştırmalar, hem hacim azaltımı hem de yağ geri kazanım potansiyeli açısından dikkate değer farklılıklar ortaya koymaktadır. Çamur hacmini minimize etmek amacıyla yaygın olarak başvurulmuş yöntemlerden biri yakma prosesisidir. Nitekim çeşitli çalışmalar, bu yöntemin çamur hacmini %90'ın üzerinde azaltabildiğini ortaya koymuştur (Zhang ve diğ., 2009). Bu düzeyde bir hacim küçülmesi oldukça etkileyici olmakla birlikte, yakma işleminin yağ geri kazanımı açısından anlamlı bir katkı sağlamadığı unutulmamalıdır. Çünkü bu süreçte, geri kazanılabilir nitelikteki organik bileşenler de dâhil olmak üzere tüm organik içerik tamamen yanmaktadır. Ayrıca bu termal yöntemin çevresel açıdan daha geniş ölçekli olumsuzluklara yol açabileceği de bilinmektedir; zira proses sırasında dioksinler ve bazı ağır metaller gibi zararlı yan ürünler açığa çıkabilmektedir (Duan ve diğ., 2024).

Elektrokinetik yöntemler ise farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sistemlerde çamur içerisine uygulanan elektriksel alan, yüklü partiküllerin yönlendirilmesini sağlayarak yağ ve su fazlarının ayrışmasına olanak tanımaktadır. Uygun proses koşulları sağlandığında, elektrokinetik arıtmayla elde edilen yağ geri kazanım verimi %60 ila %70 seviyelerine ulaşabilmektedir (Fellah Jahromi ve Elektorowicz, 2018). Ancak literatürde bildirilen verimlilik değerleri arasında farklılıklar gözlemlenmektedir; bu durum, genellikle çamurun bileşimi, kullanılan elektrotların özellikleri ve uygulanan gerilim değerleri gibi değişkenlerden kaynaklanmaktadır. Bu tür sistemler, seçici yağ ekstraksiyonuna olanak sağlamakla birlikte, proses parametrelerine—özellikle elektrot tipi, voltaj seviyesi ve çamur karakteristiği—son derece duyarlıdır (Gidudu ve Chirwa, 2022).

Ultrasonik işlemlerin tek başına kullanıldığı uygulamalarda ise kavitasyon ve mekanik parçalanma yoluyla emülsiyonların destabilizasyonu sağlanmakta, bu sayede yağ geri kazanım verimleri %65 civarına ulaşabilmektedir (Raza ve diğ., 2018). Ayrıca, ultrasonun diğer yöntemlerle birlikte kullanılması durumunda daha yüksek verimlilik elde edilebileceği de çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Bununla birlikte, sonikasyon gücünün uygun biçimde kontrol edilmemesi, istenmeyen ısınma etkilerine neden olarak prosesin etkinliğini sınırlayabilmektedir (Mylytkbayeva ve diğ., 2024).

Elde edilen bulgular, yakma işleminin hacim azaltımı açısından yüksek verimlilik sunduğunu, ancak kaynak geri kazanımı amacıyla uygun bir yöntem olmadığını ortaya koymaktadır. Buna karşın, elektrokinetik ve ultrasonik yöntemlerin yağ geri kazanımı açısından önemli potansiyel taşıdığı görülmektedir. Bu bağlamda, çalışmada önerilen ultrason destekli koagülasyon prosesi de benzer performans aralığında değerlendirilmektedir. Özellikle potasyum metoksit ile gerçekleştirilen ultrasonik aktivasyon sonrasında gözlemlenen kısmi yağ-su faz ayrımı, bu yöntemi arıtım verimliliği ile kaynak geri kazanımı arasında denge kuran uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır. Bu farklılıkların, kullanılan örnek türü (sentetik/laboratuvar ortamında hazırlanan çamur yerine gerçek sintine çamuru), uygulama süresi ve proses sıcaklığı gibi deneysel parametrelerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca bazı literatür çalışmalarında yalnızca hacim küçültme hedeflenirken, bu çalışmada yağ geri kazanımı ve çevresel parametre iyileştirmeleri birlikte ele alınmıştır. Bu yönüyle, literatürle yapılan karşılaştırmalar yalnız sonuç bazlı değil, yöntemsel bağlamda da dikkatle değerlendirilmiştir. Her ne kadar bazı kirleticiler açısından anlamlı düzeyde iyileşmeler gözlemlenmiş olsa da, yöntemin özellikle Toplam Organik Karbon (TOK) ve Kızdırma Kaybı (LOI) parametreleri açısından Sınıf 1 düzenli depolama kriterlerine tam uyum sağlamadığı da tespit edilmiştir.

TOK seviyelerinin yüksek olması, uzun vadede düzenli depolama sahaları açısından çeşitli zorluklara yol açabilmektedir. Organik madde bakımından zengin olan bu tür çamurlar, sızıntı suyu oluşumunu artırarak zaman içinde önemli bir çevresel soruna neden olabilmektedir. Söz konusu sızıntı suları, çözünmüş organik karbon içeriği yüksek olduğunda, zararlı metallerin ve diğer kirleticilerin yeraltı suyu kaynaklarına geçişini kolaylaştırmakta; bu durum ise hem ekolojik hem de halk sağlığı açısından risk oluşturmaktadır (Kjeldsen ve diğ., 2002). Öte yandan, yüksek LOI değeri, çamurda yüksek oranda artık organik madde bulunduğuna işaret etmektedir. Düzenli depolama sahalarında yaygın olan anaerobik koşullarda, bu artık organik maddeler zamanla

metan (CH_4) gazına dönüşmektedir. Metan, karbondioksit'e kıyasla 100 yıllık süreçte 28 ila 36 kat daha fazla sera gazı etkisine sahip olmasıyla dikkat çekmektedir (Paolini ve diğ. 2018).

Bu çevresel değerlendirmeler, arıtım sürecinde belirli kazanımlar sağlanmış olsa da, bazı çamur özelliklerinin hâlen iyileştirmeye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Eğer TOK ve LOI limitleri karşılanamıyorsa, bu tür çamurların nihai bertarafından önce daha ileri düzeyde arıtım tekniklerinin—örneğin ileri oksidasyon prosesleri veya termal koşullandırma yöntemlerinin—uygulanması gerekebilir. Pratik açıdan bakıldığında, Sınıf 1 kriterlerine tam uyumun sağlanamaması, atığın yönetimi sürecini karmaşıktırmakta ve toplam maliyetleri artırabilmektedir. Bu nedenle, endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğe yönelik planlamalarda, önerilen yöntemin sağladığı avantajlar ile ilave arıtım gereksinimleri arasındaki denge dikkatle değerlendirilmelidir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de bulunan bir liman atık kabul tesisinde, sintine suyu arıtımı sonucunda oluşan tehlikeli çamurların bertaraf maliyetlerini azaltmaya yönelik olarak, mevcut filtre pres sisteminin yanı sıra ultrason destekli ve ultrason + koagülan destekli alternatif sistemlerin susuzlaştırma performansları ile ekonomik etkinliklerinin karşılaştırmalı analizini yapmaktır. Bu kapsamda, pilot ölçekli deneysel çalışmalar ve ekonomik değerlendirmeler gerçekleştirilmiş; bertaraf süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik stratejik öneriler geliştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Alanı ve Veriler

Bu çalışma, Türkiye’de faaliyet gösteren lisanslı bir liman atık kabul tesisinden elde edilen beş yıllık (2016–2020) sintine suyu arıtım verilerine dayanmaktadır. Tesis, gelen sintine sularını fizikokimyasal proseslerle arıtarak oluşan çamurları filtre pres yardımıyla susuzlaştırmakta ve variller içerisinde lisanslı bertaraf tesislerine göndermektedir. Atıksu arıtma sürecinde, nihai durultucu tankın tabanında biriken flokların yoğunluğu, arıtılan su hacminin yaklaşık %3,5’ine karşılık gelen sulu çamur miktarını temsil etmektedir. Bu oran, söz konusu çamurun hem içerdiği katı maddeyi hem de bünyesindeki suyu kapsamaktadır; buna karşılık kalan %96,5’lik kısım ise saf su fazını oluşturmaktadır. Elde edilen bu sulu çamur, filtre pres gibi mekanik susuzlaştırma sistemlerinde işleme tabi tutularak daha yoğun bir forma dönüştürülmektedir. Bu işlem sonucunda elde edilen sulu çamur keki, başlangıçtaki sulu çamur hacminin yaklaşık %8’ine karşılık gelmektedir. Bu çerçevede, Tablo 1’de sunulan yüzde değerleri, çamurun fiziksel özelliklerini tanımlamakla kalmayıp, aynı zamanda nihai bertaraf stratejilerinin belirlenmesinde dikkate alınan temel teknik parametreler arasında yer almaktadır.

Çalışmada kullanılan yıllık atık su miktarları ve bertaraf edilen çamur miktarları Tablo 1’de özetlenmiştir.

2.2. Senaryoların Tanımlanması

Bu çalışmada, sintine suyu arıtımı sonucu oluşan çamurların yönetimine yönelik üç farklı sistem senaryosu tanımlanmıştır. Her senaryo, mevcut altyapıya uygulanabilir teknolojik iyileştirmelere göre kurgulanmıştır (Şekil 2).

Senaryo 1 (Mevcut durum): Tesiste hâlihazırda kullanılan yalnızca filtre pres ile susuzlaştırma yapılmaktadır. Bu senaryo, sistemin referans noktası olarak ele alınmıştır.

Senaryo 2 (US Destekli Sistem): Mevcut sisteme bir adet ultrasonik (US) modül entegre edilmiştir. Bu modül, çamur yapısının fiziksel özelliklerini değiştirerek daha verimli bir susuzlaştırma hedeflemektedir.

Senaryo 3 (US + Koagülan Destekli Sistem): US sistemine ek olarak kimyasal koagülan [polialüminyumklorür, demir (III) klorür, alüminyum potasyum metoksit, sodyum hidroksit ve

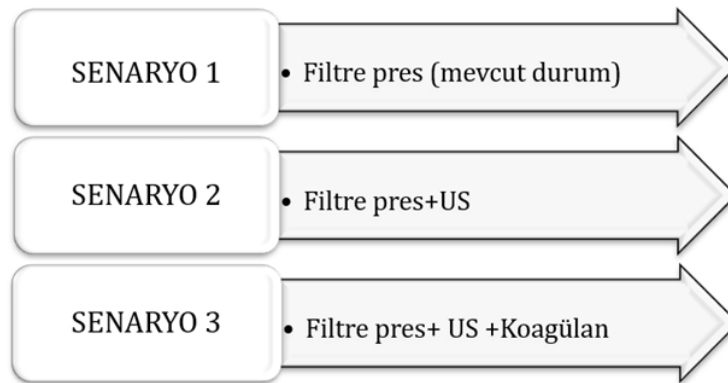
demülsifier (emülsiyon kırıcı/yüzey aktif madde)] uygulaması yapılmaktadır. Bu hibrit yaklaşım, hem fiziksel hem kimyasal yollarla çamur ayrıştırma performansını artırmayı amaçlamaktadır. Her senaryo, aynı yıllık çamur yükü ve işletme koşulları altında değerlendirilmiştir. Böylece, teknolojik müdahalelerin etkisi doğrudan karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmiştir.

Tablo 1. 2016–2020 yılları arasında tesiste arıtılan atık su ve oluşan çamur miktarları

Yıl	Arıtılan Atıksu (m ³)	Oluşan sulu çamur (m ³) (%3,5)*	Filtre edilmiş çamur keki (ton) (%8)**
2016	113 240	3 963	317
2017	153 059	5 357	428
2018	158 050	5 331	426
2019	157 564	5 514	441
2020	149 283	5 224	417
Ortalama	146 239	5 077	405

* Arıtılan atıksuyun yaklaşık %3,5'i hacimsel olarak sulu çamur formunda oluşmaktadır. Bu oran, nihai durultucu tankın tabanında biriken flokların yoğunluğunu yansıtmaktadır.

** Oluşan sulu çamurun yaklaşık %8,5'i hacim esasına göre filtre pres sistemiyle susuzlaştırılarak elde edilen çamur keki miktarını ifade etmektedir. Bu değerler, gemi atık kabul tesisinde kullanılan mevcut mekanik susuzlaştırma verilerine dayanmaktadır.



Şekil 2:
Çalışma kapsamında değerlendirilen senaryolar

2.3 Ultrasonik Deney Düzeneği

Çalışmada, radyal etki prensibiyle çalışan sürekli tip bir ultrasonik sistem (ECOTECNE marka, ECO 40 model) kullanılmıştır. Sistem, 5000 mL kapasiteli aktif sıvı/çamur rezervuarına, 2000 W/L kavitasyon gücüne ve her biri 28 cm² etki alanına sahip 20 adet sonotrota sahiptir ve yarı sürekli modda çalıştırılmıştır. Sistemin tüm bileşenleri 3 mm kalınlığında 316/S kalite

paslanmaz çelikten üretilmiştir. Sisteme ait görsel Şekil 3’te sunulurken, teknik özelliklerine ilişkin ayrıntılar Tablo 2’de verilmektedir.

Sulu çamura uygulanan ultrasonik işlemin aşağıdaki etkileri oluşturması beklenmektedir:

- (i) sulu çamurun toplam katı madde içeriğinin artırılması,
- (ii) çamur partikül hacminin küçültülmesi,
- (iii) çamur yapısının daha homojen hale getirilmesi ve
- (iv) uygulama sonrasında filtre pres aracılığıyla elde edilen kek çamurun su içeriğinin (nem muhtevasının) azaltılmasıdır (Özdoğan, 2024).



Şekil 3. Radyal etkili sürekli ultrases sistemi

Tablo 2. Ultrases reaktörünün teknik özellikleri

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

2.4 Analitik Ölçümler

Gemi sintine atıksuyu arıtma çamuru yönetiminde, tehlikeli atık sınıfında değerlendirilen altı adet parametre dikkate alınmıştır. Klorür SM 4500-CL- B ile; TÇK SM 2540 C, ÇOK SM 5310 B; TOK BS EN 13137; LOI TS EN 15935 ve su içeriği TS 10459 metotları ile analiz edilmiştir.

2.5 Deneysel Prosedür

Takip edilen altı parametrenin değişimine ilişkin olarak üç ana parametre incelenmiştir: ultrases güç yoğunluğu, ultrasonik uygulama süresi ve uygun koagülan tipi. Bu kapsamda, ultrasonik güç 500–2000 W aralığında, uygulama süresi 10–60 dakika arasında ve koagülan dozajı 500–2000 ppm arasında değişecek şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde, yalnızca incelenen

parametre değiştirilmiş; diğer tüm deney koşulları sabit tutularak, en uygun koşul bir sonraki deneyin başlangıç değeri olarak kullanılmıştır. Tüm deneylerde, ultrasonik reaktöre manuel olarak 5000 mL arıtma çamuru eklenmiş ve reaktörün giriş-çıkış valfleri kapatılmıştır. Cihaz, hedeflenen süre ve güç değerine ayarlanarak çalıştırılmış; uygun koagülan dozajı, reaktör içerisine ilave edilmiştir. Ultrasonik işlem tamamlandıktan sonra, reaktörden elde edilen arıtılmış çamur filtre presin besleme tankına aktarılmıştır. Filtre pres, 150–200 bar basınç aralığında, su çıkışı kesilene kadar (yaklaşık 45 dakika) çalıştırılmış ve bu sayede çamur keki elde edilmiştir. Ayrıca, topaklanma verimini artırmak amacıyla presleme sonrasında sisteme kuru hava beslemesi uygulanmıştır. Presten alınan çamur keki, gerekli görülmesi durumunda analiz öncesi ön arıtma işlemine tabi tutulmuştur (Özdoğan, 2024).

Tesis temelli saha çalışmasının doğası gereği, sentetik veya standardize edilmiş çamur örnekleri kullanılmamıştır. Tüm işlemler, özellikleri değişkenlik göstermekle birlikte karakteristik olarak karşılaştırılabilir nitelikte olan gerçek sintine suyu arıtma çamuru üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir atık akımı; geminin menşei, kullanılan yakıt türü ve bekletilme süresi gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterdiğinden, klasik istatistiksel deneysel tasarımlar (örneğin, rastgele bloklar, faktöriyel tasarımlar) bu çalışmada uygulanabilir olmamıştır. Bununla birlikte, atık özelliklerinin kabul edilebilir benzerlik gösterdiği koşullarda analizler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar mevcut çevresel kriterler doğrultusunda yorumlanmıştır.

2.6 Ultrasonik Destekli Ön İşlem Sistemi

Bu çalışmada, çamur susuzlaştırma performansını artırmak ve bertaraf maliyetlerini azaltmak amacıyla mevcut filtre pres sistemine entegre edilebilecek ultrasonik (US) destekli bir ön işlem modülü değerlendirilmiştir. Kullanılan sistem, sürekli çalışan ve radyal etkili bir reaktör yapısına sahip olup, çamurun fiziksel yapısını bozarak faz ayrımını kolaylaştırmayı hedeflemektedir.

US destekli sistemde her biri 15 litre kapasiteli toplam 20 adet reaktör kullanılmış ve bu reaktörler iki ayrı modül olarak yapılandırılmıştır. Reaktörler 100 W/L gücünde çalıştırılmış, işlem süresi ise her çevrim için 30 dakika olarak belirlenmiştir. Bu yapı ile bir modülün yıllık çamur işleme kapasitesi 2.600 m³ olarak hesaplanmıştır. İyileştirilmesi hedeflenen çamur miktarı göz önüne alındığında sistemin projelendirilmesi için iki modül (20 reaktör) yeterli görülmüştür. Bu sistemin kurulumu, mevcut liman atık kabul tesisine entegre edilebilecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Elektrik tüketimi ve yatırım maliyeti analizleri, pilot uygulama üzerinden elde edilen veriler doğrultusunda ilgili bölümlerde detaylandırılmıştır.

Kullanılan reaktör ve modüllere ilişkin teknik özellikler Tablo 3’de sunulmuştur.

2.7 Maliyet Analizi Yaklaşımı

Bu çalışmada geliştirilen senaryoların ekonomik açıdan karşılaştırılabilmesi için yıllık toplam maliyetler temel alınarak maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda ortak bir karşılaştırma zemini oluşturmak amacıyla, 2016–2020 yılları arasında tesiste oluşan ortalama yıllık çamur miktarı (405 ton/yıl) ve buna karşılık gelen yaklaşık varil sayısı (2.025 adet/yıl) tüm senaryolar için referans alınmıştır.

Maliyet analizinde dikkate alınan başlıca unsurlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bertaraf edilen çamur miktarı (varil bazında),
- Varil başına bertaraf ücreti (450 TL/varil),
- Ultrasonik sistemin yıllık enerji tüketimi ve birim elektrik fiyatı,
- Kimyasal (koagülan) kullanım miktarı ve birim fiyatı,
- Gerekli reaktör ve modül sayılarına göre sistemin kapasiteye uygun şekilde projelendirilmesi.

Tablo 3. Ultrasonik Sistem Reaktör ve Modül Teknik Özellikleri

Parametre	Değer
Reaktör hacmi	15 L
Proses süresi	30 dk
Reaktör saatlik çevrim adedi	2 adet
Reaktör saatlik işleme kapasitesi	30 L
Reaktör günlük kapasitesi	720 L
Reaktör yıllık kapasitesi	260 m ³
Modül (10 reaktör) saatlik kapasitesi	300 L
Modül günlük işleme kapasitesi	7,2 m ³
Modül yıllık kapasitesi	2.600 m ³
Gerekli toplam reaktör sayısı	20 adet
Gerekli toplam modül sayısı	2 adet
Reaktör birim gücü	4,8 kW
Toplam sistem gücü	48 kW
Yıllık çalışma süresi	4.320 saat
Toplam yıllık enerji tüketimi	207.360 kWh

Her bir senaryoda yalnızca yıllık işletme maliyetleri analiz edilmiştir. İlk yatırım, bakım-onarım, amortisman gibi uzun vadeli ekonomik değişkenler kapsam dışında bırakılmıştır. Bu yaklaşım, uygulamanın operasyonel verimliliği ve kısa vadeli maliyet etkilerini karşılaştırmaya olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, proseslerin uygulanabilirliğinin kısa ve uzun vadede değerlendirilebilmesi amacıyla yıllık işletme maliyetleri esas alınmıştır. Kullanılacak ekipman ve malzemelerin yerli ya da yabancı menşeli oluşu, tesisin mevcut bir yapı üzerine mi kurulacağı yoksa tamamen yeni bir sistem olarak mı inşa edileceği gibi faktörler, ilk yatırım maliyetlerinde önemli farklılıklar doğurmaktadır. Bu durum, ilk yatırım maliyetleri üzerinden sağlıklı ve karşılaştırılabilir bir analiz yapılmasını başlangıç aşamasında güçleştirmektedir. Benzer şekilde, bakım ve onarım giderleri de işletme koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, söz konusu kalemler bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar ile kimyasal madde kullanım miktarlarının maliyet analizine olan etkileri ise, çalışmada kullanılan birim fiyatlar baz alınarak yürütülen bir hassasiyet analizi ile değerlendirilmiştir. Bu analiz kapsamında, $\pm\%20$ 'lik değişim senaryolarının toplam yıllık maliyetler üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen bulgular tartışma bölümünde sunulmuştur.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Senaryo 1: Sadece Filtre Pres Yöntemi (Mevcut Durum)

Bu senaryo, mevcut uygulamayı temsil etmesi açısından karşılaştırmalı analizlerde temel senaryo (referans durum) olarak ele alınmıştır. Tesiste hâlihazırda uygulanan yalnızca filtre pres

temelli susuzlaştırma yöntemine dayanmaktadır. Sintine suyunun fizikokimyasal arıtımı sonrası oluşan çamur, herhangi bir iyileştirme işlemi uygulanmadan doğrudan varillere doldurularak bertaraf edilmektedir. Bu işlem, dış kaynaklı lisanslı bertaraf firmalarına, varil bazında belirlenen birim fiyat karşılığında yaptırılmaktadır.

Tesisin 2016–2020 verileri (Tablo 1) temel alınarak, yıllık ortalama çamur miktarı 405 ton olarak hesaplanmıştır. Her bir varilin yaklaşık 200 litre hacminde olduğu ve 1 ton çamurun ortalama 5 varil gerektirdiği dikkate alındığında, yılda yaklaşık 2.025 varil oluşmaktadır. Bertaraf işlemi için uygulanan maliyet, varil başına 450 TL olarak alınmıştır.

$$\text{Yıllık Toplam Maliyet} = 2.025 \text{ varil} \times 450 \text{ TL/varil} = 911.250 \text{ TL}$$

Bu sistem, herhangi bir teknolojik iyileştirme içermediği için hem maliyet açısından yüksek değerlere sahiptir hem de çamur özelliklerinde herhangi bir iyileştirme sağlamamaktadır. Ayrıca, düşük susuzlaştırma verimi nedeniyle taşıma ve bertaraf hacimleri artmakta, bu da operasyonel açıdan ek maliyet ve çevresel yük oluşturmaktadır. Diğer senaryolar, bu mevcut durumla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.2. Senaryo 2: Ultrason (US) Destekli Filtre Pres

Bu senaryoda, çamur susuzlaştırma işlemine ultrasonik (US) destekli bir ön işlem modülü entegre edilmiştir. Ultrasonik sistemin temel amacı, çamurun fiziksel yapısını bozarak faz ayrımını kolaylaştırmak ve su içeriğini azaltarak çamur hacmini, dolayısıyla bertaraf maliyetlerini düşürmektir.

Pilot ölçekli sistemde kullanılan US reaktörleri 100 W/L güç kapasitesinde olup, her çevrimde 30 dakikalık uygulama süresiyle çalıştırılmıştır. Sistem, her biri 15 litre hacminde 20 adet reaktörden oluşmakta ve bu reaktörler 2 modül hâlinde yapılandırılmıştır. Sistemin yıllık toplam çalışma süresi 4.320 saat olup, bu süre zarfında toplam enerji tüketimi 207.360 kWh olarak hesaplanmıştır. Elektrik birim fiyatı 3,2 TL/kWh olarak alınmış ve sistemin yıllık enerji maliyeti 725.760 TL olarak belirlenmiştir. Bu değerlere ilişkin teknik bilgiler Tablo 4’te sunulmaktadır.

Pilot ölçekli uygulamalarda yapılan deneysel gözlemler sonucunda, yalnızca ultrasonik ön işlem uygulanan çamur örneklerinde su içeriğinde yaklaşık %10 oranında bir azalma gözlemlenmiştir (ilgili fiziksel ve kimyasal ölçümler yapılmış olmakla birlikte, bu makalede detaylı veri sunulmamıştır; çalışmanın odak noktası maliyet analizidir). Bu azalma, çamur hacminin küçülmesine ve susuzlaştırma verimliliğinin artmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, Golbabaee Kootenaei ve diğ., (2022) çalışmasında, 5 dakikalık sonikasyon süresi ve 1 kW/L güç yoğunluğunda uygulanan ultrasonik ön işlem sonucunda çamur kekindeki katı madde oranı %26,4’e yükselmiş, kapiler emme süresi (CST) 86 saniyeye kadar düşmüştür. Martínez ve diğ., (2015) ise, ultrasonik ön işlem uygulanan çamur örneklerinde susuzlaştırma sonrası katı madde oranının %3,75’ten %5,16’ya yükseldiğini ve bunun yaklaşık %37,6 oranında bir iyileşmeye karşılık geldiğini bildirmiştir. Bu çalışmalar, ultrasonik uygulamaların çamur susuzlaştırma performansını artırmada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bazı çalışmalarda elde edilen yüksek giderim verimlerinin, çamurun laboratuvar ortamında hazırlanmış olması, homojen dağılım sağlaması ve sıcaklığın 60 °C’nin üzerinde tutulması gibi faktörlere bağlı olduğu belirtilmiştir Gerçek gemi sintine çamurları heterojen bileşimi ve değişken viskozite profili nedeniyle aynı düzeyde tepki vermeyebilir. Bu durum, sahaya yönelik teknolojilerin ölçeklenebilirliğini değerlendirirken göz önünde bulundurulmalıdır.

Yaklaşık %10 oranında azalan su içeriği, çamur hacmini küçülterek bertaraf için gereken yıllık varil sayısının 2.025’ten 1.822’ye düşmesini sağlamıştır. Bu senaryoda yıllık toplam maliyet aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Yeni Varil Sayısı: } \approx 1.822 \text{ adet}$$

$$\text{Bertaraf Maliyeti: } 1.822 \text{ varil} \times 450 \text{ TL} = 819.900 \text{ TL}$$

$$\text{US Sistemi Elektrik Gideri: } 725.760 \text{ TL}$$

$$\text{Toplam Yıllık Maliyet: } 1.545.660 \text{ TL}$$

Tablo 4. Ultrasonik Sistem Elektrik Tüketimi ve Maliyet Hesaplaması

Parametre	Değer
Birim reaktör elektrik gücü	4,8 kW
Bir çevrimde reaktör çalışma süresi	30 dk
Bir saat içinde reaktör çalışma süresi	30 dk
Bir saatlik enerji tüketimi (reaktör)	2,4 kWh
Toplam reaktör sayısı	20 adet
Toplam modül sayısı	2 adet
Toplam reaktör elektrik tüketimi	48 kW
Toplam yıllık çalışma süresi	4.320 saat
Toplam yıllık elektrik tüketimi	207.360 kWh
Elektrik birim fiyatı	3,5 TL/kWh
Yıllık toplam elektrik maliyeti	725.760 TL
Döviz kuru (\$)	30 TL
Yıllık elektrik maliyeti (USD)	24.192 \$
Aylık elektrik maliyeti	60.480 TL

Bu senaryo, yalnızca filtre pres kullanılan mevcut duruma göre bertaraf hacminde anlamlı bir azalma sağlamış olsa da yüksek elektrik gideri nedeniyle toplam maliyet açısından daha avantajlı bir sonuç elde edilememiştir. Ancak alternatif birim elektrik fiyatı ya da daha düşük güç tüketimli sistem tasarımları durumunda, maliyet avantajı daha belirgin hâle gelebilir. Bu nedenle ultrasonik sistemlerin ekonomik uygulanabilirliği, enerji verimliliğine ve elektrik tarifelerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir.

3.3. Senaryo 3: Ultrason + Koagülan Destekli Filtre Pres

Bu senaryoda, çamur susuzlaştırma işlemine hem ultrasonik ön işlem hem de kimyasal koagülan uygulaması entegre edilmiştir. Bu kombinasyon, fiziksel ve kimyasal yollarla çamur matrisini bozarak su ve yağ içeriğinin azaltılmasını, böylece daha verimli bir susuzlaştırma ve bertaraf hacminin minimuma indirilmesini amaçlamaktadır. Koagülasyon işlemlerinde kullanılan polialüminyum klorür, demir (III) klorür ve alum, çamur içerisindeki kolloidal maddelerin elektrostatik dengesini bozarak çökelme sürecini kolaylaştırmakta ve böylece arıtma verimliliğini artırmaktadır. Her bir kimyasalın seçimi sırasında, çevresel etkileri, piyasa fiyatları ve prosese uygunluk düzeyleri dikkate alınmıştır. Alternatif olarak değerlendirilen potasyum hidroksit ve sodyum hidroksit, pH seviyesini optimize ederek çamurdaki çözünürlük dengelerini değiştirmekte ve bu yolla flok oluşumunu teşvik etmektedir. Bir diğer koagülan olan demülsifier ise, emülsifiye sıvı karışımların faz yapısını bozarak yağ-su ayrımını kolaylaştırmaktadır. Söz konusu kimyasalların seçimi ve dozajlaması, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de operasyonel uygulanabilirlik kriterleri gözetilerek titizlikle gerçekleştirilmiştir. Her bir kimyasal, nihai hedef olan çamur karakteristiğinin yürürlükteki mevzuatlara uygun biçimde iyileştirilmesine bireysel olarak anlamlı katkılar sunmaktadır.

Pilot ölçekli uygulama sonuçlarına göre, US + koagülan kombinasyonu çamurun su içeriğinde yaklaşık %15 oranında azalma sağlamış ve bu da yıllık bertaraf varil sayısını 2.025'ten yaklaşık 1.721'e düşürmüştür. Bu kombinasyonda kullanılan koagülanlar; demülsifier (yüzey aktif madde), sodyum hidroksit (alkali koagülan) ve metanollü potasyum hidroksit (potasyum metoksit) çözeltisinden oluşmaktadır. Seçilen koagülanlar, hem literatürdeki bilgiler hem de mevcut tesis uygulamaları dikkate alınarak belirlenmiş; 500-2.000 mg/L aralığında dozajlarla uygulanmıştır. Özellikle potasyum metoksit çözeltisinin bazı koşullarda faz ayırmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu senaryoda, ultrasonik sistemin elektrik tüketimine ek olarak koagülan kullanımı kaynaklı kimyasal giderler de hesaplama dahil edilmiştir. Kullanılan dozajlara ve birim fiyatlara göre yıllık koagülan maliyeti 5.452 TL olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, toplam yıllık maliyet aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

Yeni Varil Sayısı: ≈ 1.721 adet

Bertaraf Maliyeti: $1.721 \times 450 \text{ TL} = 774.450 \text{ TL}$

US Sistemi Elektrik Gideri: 725.760 TL

Koagülan Gideri: 5.452 TL

Toplam Yıllık Maliyet: 1.505.662 TL

3.4. Senaryoların Ekonomik Karşılaştırması ve Genel Değerlendirme

Üç farklı senaryo kapsamında yapılan maliyet analizleri, sintine suyu arıtımı sonucu oluşan çamurların bertarafında teknolojik iyileştirmelerin önemli tasarruf potansiyelleri sunduğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda senaryoların yıllık toplam maliyetleri, pilot ölçekli uygulama verileri üzerinden hesaplanmış ve Tablo 5'te özetlenmiştir:

Tablo 5. Senaryolara Göre Yıllık Toplam Maliyetler

Senaryo	Toplam Yıllık Maliyet (TL)
Senaryo 1 – Sadece Filtre Pres	911.250
Senaryo 2 – Ultrases + Filtre Pres	1.545.660
Senaryo 3 – Ultrases + Koagülan + Filtre Pres	1.505.662

Bu iyileştirmeler yalnızca pilot düzeyde uygulanan sistemlerle elde edilmiş olup, tam ölçekli uygulamalarda belirgin avantajlar elde edilmesi mümkündür.

Tam ölçekli bir sistem için yapılan projeksiyonlarda (Tablo 6), ultrasonik sistemin yıllık enerji gideri, bakım-onarım maliyeti ve kimyasal kullanım bedeli birlikte değerlendirildiğinde toplam gider 1.875.760 TL olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık mevcut sistemin yıllık çamur ön işlem (elleçleme) + bertarafa gönderme (yakma) bertaraf maliyeti yaklaşık 5.872.500 TL düzeyinde olup hesaplamalar aşağıda sunulmuştur.

Gemi Atıkları ve İşletme Tesisi 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 405 000 kg/yıl olarak oluşan arıtma çamurunun ön işlem maliyeti; $405.000 \text{ kg/yıl} \times 9.000 \text{ TL/Ton} = 3.645.000 \text{ TL}$

Ön işlemi tamamlanmış atığı bertarafa gönderme (yakma)

Tesis içi oluşan 405 000 kg/yıl arıtma çamurunun, bertaraf amaçlı direkt yakmaya gönderim maliyeti; $405.000 \text{ kg/yıl} \times 5.500 \text{ TL/Ton} = 2.227.500 \text{ TL}$

Ön işlem (elleçleme) + bertarafa gönderme (yakma)

Tesis içi oluşan 405.000 kg/yıl arıtma çamurunun ön işlem (elleçleme) yapılarak, bertaraf amaçlı direkt yakmaya gönderim maliyeti;

$$405.000 \text{ kg/yıl} \times 9.000 \text{ TL/Ton} + 405.000 \text{ kg/yıl} \times 5.500 \text{ TL/Ton} = 5.872.500 \text{ TL}$$

Bu farktan hareketle, yıllık bazda 2.870.980 TL seviyesinde tasarruf potansiyeli oluşmaktadır. Buna ek olarak, karbon emisyonlarının azaltımı kapsamında sağlanabilecek çevresel teşviklerden elde edilecek ek gelir yaklaşık 400.000 TL olarak öngörülmektedir. Böylece sistemin toplam yıllık kazancı 3.270.980 TL seviyesine ulaşabilmektedir.

Tablo 6. Tam Ölçekli Uygulama için Yıllık Gider ve Tasarruf Hesaplaması

Kalem	Tutar (TL)
Yıllık enerji tüketimi (US sistemi)	725.760
Yıllık bakım maliyeti (2 modül)	400.000
Koagülan maliyeti	750.000
Toplam proje yıllık gideri	1.875.760
US sistemi toplam yıllık gider	1.125.760
US Sistem+ Proje Yıllık Gider	3.001.520
Mevcut sistem bertaraf maliyeti	5.872.500
Yıllık gider tasarrufu	2.870.980
Karbon emisyonu destek geliri	400.000
Toplam yıllık tasarruf	3.270.980

Ultrasonik sistemlerin yüksek enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyetleri bazı durumlarda ekonomik açıdan sorgulansa da, literatürde yapılan çalışmalar bu teknolojilerin uzun vadede maliyet avantajı sağlayabileceğini göstermektedir. Örneğin, Yang ve diğ., (2015) tarafından yürütülen bir çalışmada, ozon ve ultrason kombinasyonlu bir ön arıtım sisteminin kullanıldığı AAMA + O3/US2 konfigürasyonunda, geleneksel sistemlere kıyasla %14,04 oranında maliyet tasarrufu sağlandığı rapor edilmiştir. Aynı sistemde ayrıca %55,08 oranında fazla çamur üretiminde azalma elde edilmiş, bu da bertaraf hacmini ve işletme maliyetlerini doğrudan düşürmüştür. Çalışmanın ekonomik değerlendirme sonuçları, ultrasonik ön işlemin düşük enerji gereksinimi ve yüksek çamur bozundurma kapasitesi sayesinde, biyolojik arıtma süreçlerine entegre edilmesinin maliyet etkinliğini artırabileceğini göstermektedir. Tyagi ve diğ., (2014) ultrasonik çamur arıtma teknolojisinin kompakt yapısı, teknik/operasyonel kararlılığı ve çevre dostu oluşu nedeniyle hem pilot hem de tam ölçekli uygulamalarda ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Hu ve diğ., (2013) çalışmasında da, geleneksel çamur bertaraf yöntemleriyle kıyaslandığında ultrasonik arıtmanın enerji gereksinimi düşük, alan ihtiyacı az ve operasyonel verimliliği yüksek bir yöntem olduğu ifade edilmiştir. Bu avantajlar, özellikle bertaraf maliyetlerinin yüksek olduğu liman gibi özel koşullarda ultrasonik sistemlerin toplam giderler üzerindeki yükünü azaltabileceğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada değerlendirilen ultrasonik ve kimyasal destekli susuzlaştırma sistemlerinin mevcut koşullar altında ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmadığı görülmektedir. Ancak bu sistemlerin çevresel faydaları ve çamur hacmini azaltma potansiyeli

dikkate alındığında, enerji verimliliği artırılmış tasarımlar ve çevresel teşvik mekanizmaları ile desteklenmeleri hâlinde liman atık kabul tesislerinde uygulanabilir, uzun vadede sürdürülebilir bir alternatif hâline gelebilirler.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, liman atık kabul tesislerinde sintine suyu arıtımı sonucunda oluşan tehlikeli nitelikteki çamurların bertarafına yönelik üç farklı senaryo ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Uygulanan alternatif teknolojiler çamur hacmini azaltmakta kısmen başarılı olsa da, sistemlerin toplam maliyet üzerindeki etkisi olumsuz yönde olmuştur.

Pilot ölçekli uygulamalar sonucunda:

-Ultrason (US) destekli sistem, çamur hacmini %10 azaltmasına rağmen, enerji giderleri nedeniyle mevcut sisteme kıyasla toplam yıllık maliyeti %69,6 oranında artırmıştır.

-US + koagülan destekli sistem ise çamur hacmini %15 azaltmış, fakat kimyasal ve enerji giderleriyle birlikte toplam yıllık maliyeti %65,2 oranında artırmıştır.

Bu sonuçlar, ultrasonik ve koagülan destekli sistemlerin kısa vadede ekonomik avantaj sağlamadığını açıkça ortaya koymuştur. Çamur hacminde fiziksel iyileşme sağlansa da, bu kazanım bertaraf maliyetine doğrudan olumlu şekilde yansımamıştır.

Bununla birlikte, tam ölçekli sistem projeksiyonları, mevcut bertaraf yöntemleriyle karşılaştırıldığında bazı koşullarda uzun vadeli maliyet avantajlarının ve çevresel teşviklerin devreye girmesi hâlinde toplam tasarruf potansiyelinin oluşabileceğini göstermektedir. Bu nedenle aşağıdaki hususlar önerilmektedir:

-Enerji verimliliği artırılmış ultrasonik sistem tasarımlarına odaklanılmalı, düşük güç tüketimli modüller geliştirilmelidir.

-Çamur hacmini daha fazla azaltabilecek hibrit veya yenilikçi uygulamaların (örneğin termal, mekanik veya biyolojik destekli sistemler) araştırılması büyük önem taşımaktadır.

-Uygulamaların ekonomik olarak fizibilite kazanabilmesi için karbon emisyon azaltımı gibi çevresel teşvik mekanizmaları aktif biçimde değerlendirilmelidir.

-Bu tür sistemlerin yalnızca teknik değil, mevzuata uyum ve çevresel güvenlik açısından da faydaları göz önünde bulundurularak kapsamlı maliyet-yarar analizleri yapılmalıdır.

Sonuç olarak, mevcut bulgular ışığında US ve koagülan destekli sistemlerin mevcut enerji ve kimyasal maliyetleriyle doğrudan ekonomik kazanç sunmadığı görülmektedir. Ancak sistemin optimize edilmesi ve destekleyici politikaların uygulanması hâlinde, sürdürülebilir bertaraf stratejileri kapsamında potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilebilirler.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını onaylarız.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Nurullah Özdoğan deneysel sürecin yürütülmesi ve veri toplama aşamalarında, Murat Eyvaz ise veri analizi ve makale yazımında görev almıştır. F. Olcay Topaç çalışmanın yönetimi ile sonuçların değerlendirilmesi aşamalarında katkı sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, FDK-2022-833 numaralı proje kapsamında desteklenmiş olup, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ile çalışmanın yürütülmesine katkı sağlayan İBB İSTAÇ A.Ş.'ye destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Akbarzadeh Yazdi, D., Yilmaz, A. E., Güler, S., and Komesli, O. T. (2024). The investigation of parameters affecting the treatment of synthetic bilge water by continuous electrooxidation/flotation process, *Water and Environment Journal*, 38(2), 292-300. doi:10.1111/WEJ.12921;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:17476593;WGROU: STRING:PUBLICATION.
2. Antes, F.G., Diehl, L. O., Pereira, J.S.F., Guimarães, R.CL., Guarnieri, R.A., Ferreira, B.M.S., Dressler and V.L., Flores, E.M.M. (2015). Feasibility of low frequency ultrasound for water removal from crude oil emulsions, *Ultrasonics Sonochemistry*, 25(1), 70-75. doi:10.1016/J.ULTSONCH.2015.01.003.
3. Duan, J., Oba, K., Hori, T., Fujiwara, T., Lackner, S., and Terada, A. (2024). Modeling of an aerobic granular sludge process for ammonia retention: Insights into granule size, dissolved oxygen concentration, and solids retention time, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112245. doi:10.1016/J.JECE.2024.112245.
4. Emadian, S. M., Hosseini, M., Rahimnejad, M., Shahavi, M. H., and Khoshandam, B. (2015). Treatment of a low-strength bilge water of Caspian Sea ships by HUASB technique, *Ecological Engineering*, 82, 272-275. doi:10.1016/J.ECOLENG.2015.04.055.
5. EU Legislation. (2019). *Port reception facilities for ship waste Collecting waste from ships in ports*.
6. Fellah Jahromi, A., and Elektorowicz, M. (2018). Electrokinetically assisted oil-water phase separation in oily sludge with implementing novel controller system, *Journal of Hazardous Materials*, 358, 434-440. doi:10.1016/J.JHAZMAT.2018.07.032.
7. Fletcher, L.M., Zaiko, A., Atalah, J., Richter, I., Dufour, C.M., Pochon, X., Wood, SA. and Hopkins, GA. (2017). Bilge water as a vector for the spread of marine pests: a morphological, metabarcoding and experimental assessment, *Biological Invasions*, 19(10), 2851-2867. doi:10.1007/S10530-017-1489-Y/FIGURES/6.
8. Gidudu, B., and Chirwa, E. M. N. (2022). The role of pH, electrodes, surfactants, and electrolytes in electrokinetic remediation of contaminated soil, *Molecules*, 27(21), 7381. doi:10.3390/MOLECULES27217381.
9. Golbabaee Kootenaei, F., Mehrdadi, N., Nabi Bidhendi, G., Amini Rad, H., Hasanlou, H., and Mahmoudnia, A. (2022). Improvement of Sludge Dewatering by Ultrasonic Pretreatment, *International Journal of Environmental Research*, 16(4), 1-11. doi:10.1007/S41742-022-00434-5/FIGURES/7.
10. Hu, G., Li, J., and Zeng, G. (2013). Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 261, 470-490. doi:10.1016/J.JHAZMAT.2013.07.069.
11. Karakulski, K., and Gryta, M. (2017). The application of ultrafiltration for treatment of ships generated oily wastewater, *Chemical Papers*, 71(6), 1165-1173. doi:10.1007/S11696-016-0108-1/FIGURES/11.
12. Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., and Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336. doi:10.1080/10643380290813462.
13. Magnusson, K., Jalkanen, J. P., Johansson, L., Smailys, V., Telemo, P., and Winnes, H. (2018). Risk assessment of bilge water discharges in two Baltic shipping lanes. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 575-584. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.09.035.

14. Martínez, E. J., Rosas, J. G., Morán, A., and Gómez, X. (2015). Effect of ultrasound pretreatment on sludge digestion and dewatering characteristics: Application of particle size analysis, *Water*, 7(11), 6483-6495. doi:10.3390/W7116483.
15. Myltykbayeva, Z., Mussabayeva, B., Ongarbayev, Y., Imanbayev, Y., and Muktaly, D. (2024). Ultrasonic technology for hydrocarbon raw recovery and processing, *Processes*, 12(10), 2162. doi:10.3390/pr12102162.
16. Özbay, İ., Aksoy, C., Özbay, B., and Sayın, F. E. (2024). Port waste reception facilities in iron-steel industry: A case study from Türkiye, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(3), 845-853. doi:10.14744/sigma.2024.00000.
17. Özdoğan, N., Albahnasawi, A.M., Ağır,ü 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*. doi:10.1080/15567036.2021.1958956;WGROU:STRING:PUBLICATION.
18. Özdoğan, N., Albahnasawi, A. M., Eyvaz, M., Yüksel, E., & Topaç, F. O. (2023). Improving properties of bilge water's treatment sludge in a port reception facility by novel continuous ultrasonic reactor, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 45(4), 12295-12311. doi:10.1080/15567036.2023.2273411;SUBPAGE:STRING:ACCESS.
19. Özdoğan, N., Liman atık kabul tesislerinde sintine suyu arıtma çamuru özelliklerinin iyileştirilmesi için yeni yaklaşımlar, *Doktora Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2024.
20. Paolini, V., Petracchini, F., Segreto, M., Tomassetti, L., Naja, N., and Cecinato, A. (2018). Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge, *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 53(10), 899-906. doi:10.1080/10934529.2018.1459076.
21. Pinar, O., and Rodríguez-Couto, S. (2024). Biologically active secondary metabolites from white-rot fungi, *Frontiers in Chemistry*, 12, 1363354. doi:10.3389/FCHEM.2024.1363354/XML/NLM.
22. Raza, Z. A., Abid, S., and Banat, I. M. (2018). Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications, *International Biodeterioration and Biodegradation*, 126, 45-56. doi:10.1016/j.ibiod.2017.10.001
23. Satır, T., Alkan, G., Can, S., and Bak, O. (2007). Port reception facilities: using multi criteria decision making (ss. 25-28). Napoly, Italy: 2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Napoli, İtalya.
24. Schaerer, L. G., Ghannam, R. B., Butler, T. M., and Techtmanna, S. M. (2019). Global comparison of the bacterial communities of bilge water, boat surfaces, and external port water, *Applied and Environmental Microbiology*, 85(24), e01804-19. doi:10.1128/AEM.01804-19.
25. TC Çevre ve Orman Bakanlığı. (2010). Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik. 26 Mart 2010 tarihli ve 27533 sayılı Resmi Gazete. Geliş tarihi gönderen <https://resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100326-13.htm>.
26. Tiselius, P., and Magnusson, K. (2017). Toxicity of treated bilge water: The need for revised regulatory control, *Marine Pollution Bulletin*, 114(2), 860-866. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.11.010.
27. TOCPRO. (2015). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78) PRACTICAL GUIDE*.
28. Tyagi, V. K., Lo, S. L., Appels, L., and Dewil, R. (2014). Ultrasonic treatment of waste sludge: A review on mechanisms and applications, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(11), 1220-1288. doi:10.1080/10643389.2013.763587.

29. Ulucan, K., and Kurt, U. (2015). Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 747, 104-111. doi:10.1016/J.JELECHEM.2015.04.005.
30. Wang, J., Lai, Y., Wang, X., and Ji, H. (2024). Advances in ultrasonic treatment of oily sludge: mechanisms, industrial applications, and integration with combined treatment technologies, *Environmental Science and Pollution Research*, 31(10), 14466-14483. doi:10.1007/S11356-024-32089-4.
31. Yang, S. S. Guo, W.Q., Chen, Y.D., Wu, Q. L, Luo, H.C., Peng, S.M., Zheng, H.S., Feng, X.C., Zhou, X., Ren N.Q. (2015). Economical evaluation of sludge reduction and characterization of effluent organic matter in an alternating aeration activated sludge system combining ozone/ultrasound pretreatment, *Bioresource Technology*, 177, 194-203. doi:10.1016/j.biortech.2014.11.009.
32. Zhang, G., Yang, J., Liu, H., and Zhang, J. (2009). Sludge ozonation: Disintegration, supernatant changes and mechanisms, *Bioresource Technology*, 100(3), 1505-1509. doi:10.1016/j.biortech.2008.08.041.

