

Arıtma Çamuru Küllerinden Kimyasal Ekstraksiyonla Fosfor Geri Kazanımının Araştırılması

Nigar ZEYNALOVA¹, **Bülent YORULMAZ²**, **Ahmet DEMİRAK¹**, **Feyyaz KESKİN³**¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Muğla, Türkiye²Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Muğla, Türkiye³Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Çevre Sorunları Araştırma ve Uygulama Merkezi, Muğla, Türkiye

Öz: Arıtma çamurlarının yakılarak bertarafı sonucu oluşan küllerin yüksek fosfor içeriğinden dolayı fosfor geri kazanımı, oluşan bu küllerin değerlendirilmesinde önemli bir seçenektir. Bu çalışmada Köyceğiz-Dalyan bölgesindeki arıtma tesisinden alınan arıtma çamurunda kimyasal ekstraksiyon yöntemi ile fosfor geri kazanımı araştırıldı. Arıtma çamurları 850 °C'de kül haline getirilmiş ve HCl, H₂SO₄ ve NaOH'ın farklı derişimlerdeki çözeltileri ile ekstrakte edilerek fosfor miktarları spektrofotometrik olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek verim 38,3 g/kg olarak 1M H₂SO₄ çözeltisi ile elde edildiği belirlenmiştir. Ancak ekonomik ve çevresel faktörler göz önüne alındığında 0.05 M H₂SO₄ çözeltisi ile elde edilen 36 g/kg verimin daha etkin olabileceği vurgulanmıştır. Bu sonuçlarla birlikte metal toksisitesi düşük olan arıtma çamuru örneklerinin bu alandaki arıtma çamurlarından, çevresel riski daha düşük fosfor elde edileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Arıtma çamuru, Fosfor geri kazanımı, Kimyasal ekstraksiyon**Investigation of Phosphorus Recovery by Chemical Extraction from Sewage Sludge Ashes**

Abstract: Phosphorus recovery due to the high phosphorus content of the ashes formed as a result of the burning and disposal of treatment sludge is an important option in the evaluation of these ashes. In this study, phosphorus recovery was investigated by chemical extraction method in the treatment sludge taken from the treatment plant in the Köyceğiz-Dalyan region. Treatment sludge was ashed at 850 °C and extracted with solutions of HCl, H₂SO₄ and NaOH in different concentrations and phosphorus quantities were detected spectrophotometrically. As a result, the highest yield was determined to be obtained with 1 M H₂SO₄ solution as 38.3 g/kg. However, considering the economic and environmental factors, it is emphasized that the yield of 36 g/kg obtained with 0.05 M H₂SO₄ solution may be more effective. These results show that treatment sludge samples with low metal toxicity will obtain phosphorus with lower environmental risk from the treatment sludge in this area.

Keywords: Treatment sludge, Phosphorus recovery, Chemical extraction**GİRİŞ**

Fosfor, yaşamın temel besin elementlerinden biri olup, yerkabuğunda en fazla bulunan on birinci element olmasına rağmen, yenilenemez ve kaynakları sınırlıdır (Zhou ve ark., 2017; Amann ve ark., 2018; Chrispim ve ark., 2019; Remmen ve ark., 2019; Semerci ve ark., 2019; Yang ve ark., 2019; Boinardi ve ark., 2021; Yu ve ark., 2021).

Fosfor rezervlerinin sınırlı olması ve literatürde bu rezervlerin gelecekte tükeneyeceğine dair tespitlerin bulunması nedeniyle alternatif fosfor kaynakları üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır (Karabacak, 2021). Küresel olarak, antropojenik fosfor içeriğinin (sadece dışkı ve idrardaki mevcut fosfor dikkate alındığında) fosfor ihtiyacının %22'sini karşılayabileceği tahmin edilmektedir (Mihelcic ve ark., 2011; Chrispim ve ark., 2019, Lee ve ark., 2018). Bu nedenle evsel ve endüstriyel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru önemli bir fosfor kaynağı olarak görülmektedir. Bu husus göz önüne alındığında artan nüfus, sanayileşme ve kentleşme ile birlikte miktarı giderek artan atık çamurların depolanmasının ve bertaraf maliyetinin yüksek olması sebebiyle kullanılabilir hale getirilmesi çevre ve ekonomik açıdan oldukça önemlidir (Pradhan ve ark., 2021; Pires ve Martinho, 2019; Smol ark., 2020). Bu

nedenlerle son dönemde fosfor geri kazanımı için sürdürülebilir çözümler giderek daha fazla teşvik edilmektedir (EC, 2017). Fosforun arıtma çamurundan geri kazanımında kimyasal ekstraksiyon, termokimyasal ekstraksiyon ve elektrodialitik başlıca olmak üzere farklı yöntemler kullanılmaktadır (Karabacak, 2021). Bunların arasında kimyasal ekstraksiyon yöntemi, fosforun geri kazanımında etkili, çalışma prensibinin basit, pahalı ekipman gerektirmediği için en uygun ve yaygın metotlardan biridir (Donatello ve Cheeseman, 2013; Abis ve ark., 2018; Remmen ve ark., 2019; Wang ve ark., 2021). Ancak ekstraksiyon için kullanılan asit, baz ve şelat ajanı çözeltilerinin, fosfor ile birlikte ağır metalleri de ekstrakte etmesi bu yöntemin büyük dezavantajıdır (Karabacak, 2021). Bu çalışmanın amacı, Muğla ilinde Özel Çevre Koruma Bölgesi (ÖÇKB) sınırları içerisinde yer alan Dalyan Atık Su Arıtma Tesisinden ağır metal konsantrasyonu düşük arıtma çamuru örneklerinde kimyasal ekstraksiyon yöntemiyle fosfor geri kazanımının araştırılmasıdır.

* **Corresponding Author:** ze.nigar07@gmail.com

Bu çalışma yüksek lisans tez ürünüdür.

Geliş Tarihi: 29 Aralık 2021

Kabul Tarihi: 27 Eylül 2022

MATERYAL ve YÖNTEM

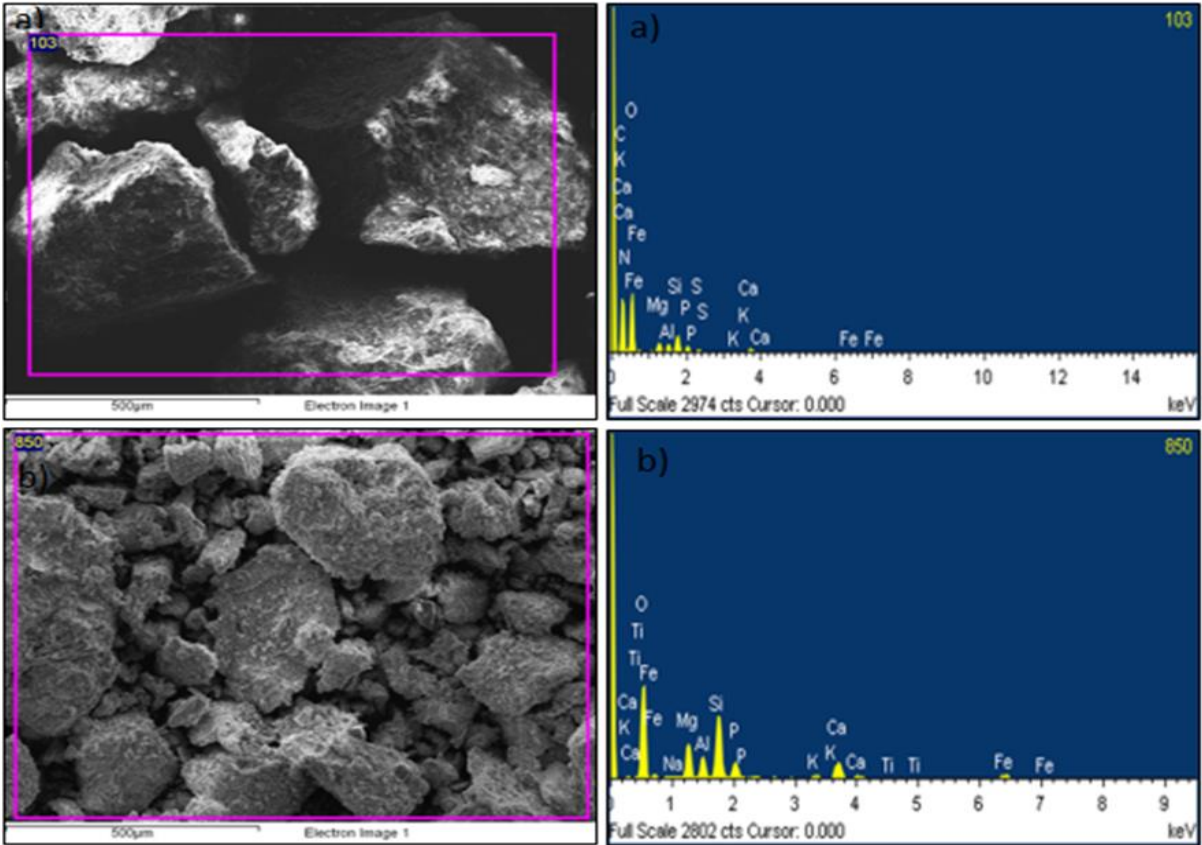
Örneklerin Alınması ve Analize Hazırlanması

Toplam kıyı uzunluğu 1100 km'yi aşan Muğla Türkiye'nin en uzun kıyı şeridine sahip ilidir ve Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre nüfusunun 938.751 kişi olduğu bildirilmiştir (TÜİK, 2018). Ancak ülkemizin başlıca turizm merkezlerinden olan ve il sınırları içerisinde dört tane ÖÇKB barındıran Muğla'da yaz aylarında nüfus çok fazla artmaktadır. Bu da özellikle turizm sezonunda çok fazla arıtma çamuru oluşmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada arıtma çamuru örnekleri 1988 yılında ÖÇKB ilan edilen Köyceğiz-Dalyan Bölgesinde Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğüne (MUSKI) bağlı olarak faaliyet

gösteren Dalyan Atık Su Arıtma Tesisinden alınmıştır. Tesiste çamur dekantör sistem ile susuzlaştırılmakta ve ortalama 2,5 ton/gün, 912,5 ton/yıl çamur tesisten çıkmaktadır.

Arıtma çamuru açık havada kurutulup preslenmiş olarak bertarafa gönderilmeye hazır örneklerden plastik kaplara alınarak Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma ve Uygulama Merkezi (MÜÇEMER) Su Analiz Laboratuvarı'na getirildi. Atık çamur örnekleri 103 °C' de kurutulup homojen hale getirildi ve eleme işlemi yapılarak <63 µm boyutundaki partiküller ve bu partiküllerden 850 °C de kül haline getirilen örnekler ekstraksiyon için hazırlandı. Hazırlanan örneklerin SEM görüntüleri ve EDS spektrumları elde edilmiş ve sonuçları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kuru arıtma çamuru (a) ve külünün (b) EDS spektrumu ve SEM görüntüsü

103 °C'de kurularak hazırlanan örneğin SEM görüntüleri incelendiğinde örneğin büyük boyutlarda, düzgün bir yapıya sahip ancak gözenekli yapısının olmadığı görülmektedir (Şekil 1a). 850 °C'de kül haline getirilen örneklerin ise parçalanarak çok daha küçük boyutlarda ve gözenekli hale geldiği görülmektedir (Şekil 1b). Böylece hem organik maddenin tamamen uzaklaşması (yakma sonrası kütle kaybı %55) hem de örneklerin daha küçük boyutlu ve gözenekli hale gelmesi sonucu fosfor ekstraksiyon verimi artmıştır. EDS sonuçları göz önüne alındığında arıtma çamuru kül haline getirildikten

sonra karbonun tamamen ayrıştığı ve inorganik maddelerin kaldığı görülmektedir. Kül yapısında en yüksek element yüzdesinin oksijen olduğu, sonrasında Si, Ca, Al, Fe ve P elementlerinin yüksek bir yüzdeye sahip olduğu görülmektedir. Arıtma çamuru küllerinde yapılan çalışmalarda ana bileşenlerin SiO_2 , CaO , P_2O_5 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşikleri olduğu belirtilmiştir (Karabacak, 2021). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki bulgular ile benzerlik göstermektedir.

Reaktifler ve Cihazlar

Çalışmada kullanılan kimyasallar Merck markadır. Atık çamur örneklerinin kurutma işleminde Memmert marka etüv, yakma işlemlerinde CEM Mars 6 marka mikrodalga cihazı kullanıldı. Yıkama ve seyreltme işlemlerinde Milli-Q Millipore (18.2 MΩ cm⁻¹) saf su cihazı kullanıldı. Çalkalama işlemlerinde soğutmalı çalkalayıcı, santrifüj işlemlerinde Eppendorf ve tartım işlemlerinde Sartorius marka hassas tartım cihazı kullanıldı. Fosfor konsantrasyonlarının tespiti Agilent Cary60 UV/Vis marka spektrofotometre ile yapıldı. Fosfor ölçümleri askorbik asit metodu kullanılarak yapıldı (APHA, 2012). SEM-EDS analizleri JEOL JSM-7600F marka cihaz ile yapıldı.

Kimyasal Ekstraksiyon Çalışmaları

Aritma çamuru küllerinden ve 103 °C'de kurutulmuş örneklerden 1 gr alınıp plastik erlenlere konuldu. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan (0.01, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 3.5 mol/L) NaOH, H₂SO₄ ve HCl çözeltilerinden erlenlere 50 ml eklendi. Erlen içerisindeki örnekler çalkalayıcıda 2 saat boyunca 200 rpm hızla çalkalandı. Çalkalama işleminden sonra 5 dk 3500 rpm' de santrifüj edildi ve sıvı kısım alınarak askorbik asit metodu ile spektrofotometrede fosfor ölçümü olarak yapıldı (APHA, 2012). Ölçümler üç tekrarlı yapıp sonuçlar ortalama olarak rapor edildi ve grup ortalamaları karşılaştırmak amacıyla da bağımsız iki örneklem t testi

yapıldı. Böylece asit ve baz çözeltilerinin ekstraksiyon verimine olan etkisi değerlendirildi. Ayrıca derişim çalışmalarındaki prosedür aynen uygulanarak 0.1 mol/L'lik HCl çözeltisiyle de 15-300 dk arasında optimum ekstraksiyon süresi tayin edildi.

Ağır Metal Analizleri

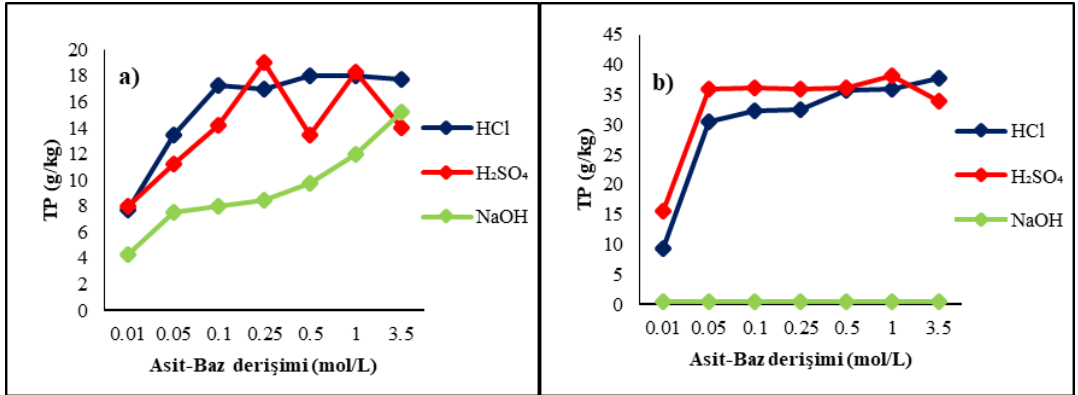
Aritma çamuru örnekleri bertaraf edilmeden önce ağır metal analizleri MUSKİ tarafından akredite yetkili laboratuvara yaptırılmıştır. Çalışmada sunulan ağır metal sonuçları bu döneme ait analiz sonuç raporundan alınmıştır. Örnekler EPA 3051 A (2007) metoduna göre kral suyu kullanılarak mikrodalgada hazırlanmıştır.

Cd, Cr, Pb ve Ni konsantrasyonları EPA (2019) 200.7 metoduna göre indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometri (ICP-OES) ile Hg konsantrasyonu ise EPA (1998) 6020 A metoduna göre indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) ile ölçülmüştür.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Kimyasal Ekstraksiyon Sonuçları

Farklı konsantrasyonlarda HCl, H₂SO₄ ve NaOH kullanılarak yalnızca kurutulmuş ve kül haline getirilmiş arıtma çamuru örneklerinde yapılan ekstraksiyon çalışmaları sonucunda elde edilen fosfor konsantrasyonları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. 103 °C de kurutulmuş örnekte (a) ve arıtma çamuru külünde (b) fosfor geri kazanımı

103 °C'de susuz hale getirilmiş örneklerde H₂SO₄ ile en yüksek fosfor geri kazanımı 19 g/kg olarak 0,25 mol/L (M) derişime sahip çözeltide, HCl çözeltilerinde 0,1-3,5 M aralığındaki derişime sahip çözeltilerde 17-18 g/kg, NaOH ile yapılan ekstraksiyonda ise en yüksek 15,3 g/kg olarak tespit edilmiştir. Bunun birlikte HCl ve NaOH ile yapılan ekstraksiyonda derişim arttıkça geri kazanım oranının arttığı, ancak HCl çözeltilerinde 0,1 M çözeltisinden sonra geri kazanım oranının neredeyse sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 2a). H₂SO₄ çözeltilerinde ise düşük derişimlerden yüksek derişime doğru daha keskin bir artış gözlenirken 0,25-3,5 M arasındaki çözeltilerde artış ve azalışlar gözlenmektedir (Şekil 2a). 850 °C'de kül haline getirilmiş arıtma çamuru örneklerinde fosfor geri kazanımları en

yüksek 1 M H₂SO₄ çözeltisinde 38,3 g/kg, sonrasında 3,5 M HCl çözeltisinde 37,8 g/kg olarak ve NaOH çözeltilerinin tüm derişimlerinde ise 0,5 g/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 2b). Yapılan çalışmalarda asit kullanımının baz kullanımına göre daha verimli olduğunu göstermektedir (Stark, 2005; Koutsoukos ve Valsami-Jones, 2004; Stark, 2006; Chapagain, 2016). İki asidin farklı derişimdeki çözeltilerinden elde edilen fosfor konsantrasyonları birbirleri ile kıyaslandığında kurutulmuş örneklerde 0.1 M ve 1 M'lık HCl ve H₂SO₄ çözeltileri ile elde edilen fosfor konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığı (p>0.05), diğer çözeltilerle yapılan ekstraksiyon sonucunda elde edilen fosfor konsantrasyonları arasında ise anlamlı bir fark olduğu (p<0.05) tespit edilmiştir. Kül halindeki örneklerde ise iki

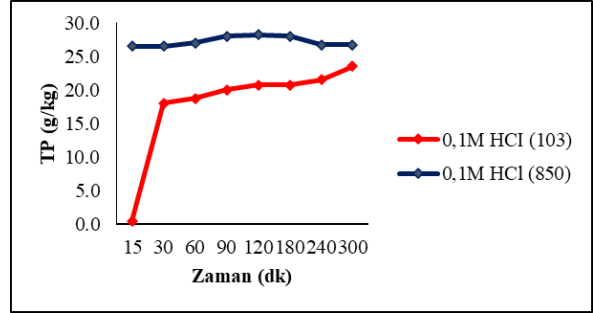
asidin farklı derişimlerdeki tüm çözeltileri ile elde edilen fosfor konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu ($p < 0.05$) tespit edilmiştir. Bununla birlikte H_2SO_4 nün 0.05, 0.1, 0.25 ve 0.5 M'lık çözeltilerinden elde edilen fosfor konsantrasyonları değerlendirildiğinde aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığı ($p > 0.05$) tespit edilmiştir. Buna göre doğrudan uygulama veya gübre hammaddesi üretimi için ekonomik ve çevresel faktörler göz önüne alındığında 0.05 M H_2SO_4 çözeltisi (36 g/kg) ile daha etkin bir ekstraksiyon prosesi gerçekleştirileceği söylenebilir.

İki örnekteki sonuçlar dikkate alındığında kül haline getirilmiş örneklerde asit çözeltileri ile fosfor geri kazanımı, susuz arıtma çamurunun yaklaşık iki katı olarak tespit edilmiştir. Bu durum kül haline getirilen çamur örneklerinde organik maddelerin tamamen uzaklaştırılıp, fosforun özellikle Ca ile inorganik formda zenginleşmesi ve matriks etkisinin ortadan kalkarak çözeltilerin daha etkin ekstraksiyon yapması ile açıklanabilir. Nitekim Şekil 2'daki grafikte H_2SO_4 ün derişimi arttıkça fosfor geri kazanımında beklenmeyen azalışların meydana geldiği görülmektedir. Bu değişken sonucun H_2SO_4 'ün güçlü yükseltgen bir asit olması nedeniyle organik maddelerle yapmış olduğu etkileşimlerden kaynaklanması olasıdır. Stark (2005) tarafından, azalan organik madde miktarı ile fosfor geri kazanımının kolaylaştığı belirtilmektedir. Ayrıca arıtma çamuru küllerinde NaOH fosfor geri kazanımındaki yaklaşık 30 katlık azalma, arıtma çamurundaki fosforun 850 °C'de termal işlem görmesiyle büyük oranda Ca ile apatit formunda birikmesinden kaynaklanmaktadır. Çünkü apatit formundaki fosfor yalnızca asit çözeltileri ile ekstrakte edilebilmektedir. Ancak kül haline getirilmeden önce kurutulmuş çamur örneklerinde NaOH ile daha yüksek verimli fosfor geri kazanımı sağlanmıştır. Bunun nedeni çamurun stabilizasyonu için kullanılan kireç kaynaklı Ca'nın konsantrasyonuna bağlı olarak fosforun $Ca_3(PO_4)_2$ formunda fikse olması ve NaOH'ın bu yapıdaki ekstraksiyonda daha etkin olmasıdır.

Ekstraksiyon Süresi

Kurutulmuş örneklerde HCl çözeltilerinin matris etkisinden daha az etkilenmesi, 0.1M'lık çözeltiden sonrakilerde ekstraksiyon veriminde çok az değişiklik meydana gelmesi, NaOH çözeltileri ile ekstraksiyon veriminin asitlere göre oldukça düşük olması ve H_2SO_4 çözeltilerinin ekstraksiyon veriminin HCl çözeltileri ile benzer eğilim göstermesinden dolayı yalnızca 0.1M'lık HCl ile ekstraksiyon süresi değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada kül haline getirilmiş olan örneklerde fosfor ekstraksiyonunun yaklaşık 15 dakikalık süre içerisinde maksimuma ulaştığı, yalnızca 103 °C de kurutulmuş örneklerde ise bu sürenin 30 dakikaya çıktığı görülmektedir (Şekil 3). Bu sonuç arıtma çamurlarını kül haline getirerek, organik madde matriksinin ortadan

kalkmasıyla fosfor ekstraksiyon süresinin de azaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3. 850 ve 103 °C'de ekstraksiyon zamanına bağlı toplam fosfor (TP) konsantrasyonu

Aritma Çamurlarında Ağır Metal Konsantrasyonları

Aritma çamurlarının doğrudan kullanımı ile ilgili mevzuatta talep edilen toksik metallerin analizleri yetkili akredite laboratuvar tarafından yapılmış olup, sonuçlar MUSKİ den temin edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Aritma çamurunda ağır metal konsantrasyonları (Resmi Gazete, 2010)

Metal	Sınır Değer (mg/kg)	Tespit Edilen (mg/kg)
Civa	10	<0.1
Kadmiyum	10	<1
Krom	1000	46.3
Kurşun	750	10.17
Nikel	300	118.8

Elde edilen sonuçlar Eysel ve Kentsel Aritma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmeliğin "Toprakta Kullanılabilecek Stabilize Aritma Çamurunda Müsaade Edilecek Maksimum Ağır Metal Muhtevaları" Çizelge 1'e göre değerlendirildiğinde metal konsantrasyonlarının sınır değerlerin oldukça altında olduğu tespit edilmiştir. Bu durum arıtma çamurunun alındığı Köyceğiz Dalyan bölgesinde endüstriyel faaliyetlerin neredeyse hiç olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak arıtma çamuru kullanımını sınırlayan en önemli faktörlerden biri olan ağır metal konsantrasyonlarının benzer turizm alanlarında düşük olduğu düşünülmektedir. Bundan dolayı gerek doğrudan kullanımda gerekse ekstraksiyon ile fosfor geri kazanımında kullanım potansiyelinin oldukça yüksek olduğu düşünülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmanın sonuçlarına göre en yüksek fosfor kazanımı arıtma çamuru küllerinden 1 M H_2SO_4 çözeltisiyle elde edilse de, ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirildiğinde 0.05 M H_2SO_4 ile yapılan ekstraksiyonun pratik

uygulamalarda daha etkin olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte arıtma çamurunun kül haline getirilmesiyle, matriks etkisinin ortadan kalkması ve yüzey alanının artarak ekstraksiyon veriminin artması ve ekstraksiyon süresinin azalması gibi avantajların sağlandığı belirlenmiştir. Buna göre arıtma çamuru küllerinin gübre hammaddesi olarak kullanılabilme potansiyeli vardır. Bununla birlikte çalışma alanı seçilen bölgedeki arıtma çamurlarının ağır metal içeriklerinin daha düşük olması nedeniyle, toprağın özellikleri ve yetiştirilecek ürünün ihtiyacı göz önüne alınarak arıtma çamurunun stabilizasyonu sonrasında tarımsal aktivitelerde kullanım potansiyelinin yüksek olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma yüksek lisans tez projesi kapsamında tamamlandı. Projeyi BAP No: 19/081/16/1 ile destekleyen Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederiz. MUSKİ yetkililerine ve Dalyan Atık Su Arıtma Tesisi çalışanlarına arıtma çamuru temini ve ağır metal analizleri için teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR

- Abis M, Calmano W, Kuchta K (2018) Innovative technologies for phosphorus recovery from sewage sludge ash. *Detritus* 1: 23-29.
- Amann A, Zoboli O, Krampe J, Rechberger H, Zessner M, Egle L (2018) Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 130: 127-139.
- APHA, AWWA, WEF, (2012) Standart Methods for The Examination of Water and Wastewater. 22st. Edition, American Public Health Association, Washington, 4-103:4-169.
- Boinardi G, Turolla A, Fiameni L, Gelmi E, Malpei F, Bontempi E, Canziani R (2021) Assessment of a simple and replicable procedure for selective phosphorus recovery from sewage sludge ashes by wet chemical extraction and precipitation. *Chemosphere* 285: 131476.
- Chapagain Y (2016) Metots and Possibility of Recycling of Phosphorus from Sludge, *Environmental Engineering*. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences Helsinki Finland: 1-51.
- Chripim MC, Scholz M, Nolasco MA (2019) Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of environmental management*, 248: 109268.
- Donatello S, Cheeseman CR, (2013) Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): a review. *Waste Manag.* 33: 2328-2340.

- Environmental Protection Agency, U.S., (1998) Method 6020: Inductively coupled plasma-mass spectrometry.
- Environmental Protection Agency, U.S., (2007) "EPA 3051 A Microwave Assisted Acid Digestion Of Sediments, Sludges, Soils, and Oils
- Environmental Protection Agency, U.S., (2019) "EPA 200.7-Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry". USA, EPA 200.7, 2019.
- European Commission (EC 2017)
https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specifc-interest/critical_en.
- Karabacak, E (2021) Arıtma Çamuru Yakma Fırını Küllerinden Fosfor Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Koutsoukos PG, Valsami-Jones E (2004) Principles of phosphate dissolution and precipitation. In: Valsami-Jones, E. (Editor). *Phosphorus in Environmental Technologies, Principles and Applications*. IWA publishing, London, ISBN: 1 84339 001 9:195-248.
- Lee CG, Alvarez PJJ, Kim HG, Jeong S, Lee S, Lee KB, Lee SH, Choi JW (2018) Phosphorous recovery from sewage sludge using calcium silicate hydrates. *Chemosphere* 193: 1087-1093.
- Mihelcic JR, Fry LM, Shaw R (2011) Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. *Chemosphere* 84: 832-839.
- Pires A, Martinho G (2019) Waste hierarchy index for circular economy in waste management. *Waste Manage* 95: 298-305.
- Pradhan SK, Heinonen-Tanski H, Veijalainen AM, Peräniemi S, Torvinen E (2021) Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Using Acidithiobacilli. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18: 7135.
- Remmen K, Müller B, Köser J, Wessling M, Wintgens T (2019) Phosphorus recovery in an acidic environment using layer-by-layer modified membranes. *Journal of Membrane Science* 582: 254-263.
- Resmi Gazete, 2010. Eysel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. Ankara
- Semerci N, Kunt B, Calli B (2019) Phosphorus recovery from sewage sludge ash with bioleaching and electro dialysis. *International Biodeterioration & Biodegradation* 144: 104739.
- Smol M, Adam C, Kugler SA (2020) Inventory of Polish municipal sewage sludge ash (SSA)-Mass flows, chemical composition, and phosphorus recovery potential. *Waste Management* 116: 31-39.

- Stark K (2005) Phosphorus Release from Swage Sludge by use of Acids and Bases. Division of water resources engineering. Royal institute of technology (KTH), S-100 44 Stockholm, Sweden, 1-12.
- Stark K (2006) Phosphorus Recovery by use of Sludge Fractionation. Royal institute of technology (KTH), Vatten 62:49-56. S-100 44 Stockholm, Sweden, 1-8.
- TÜİK (2018) Türkiye İstatistik Kurumu. www.tuik.gov.tr.
- Wang Q, Li J-S, Xue Q, Poon CS (2021) Alkaline modification of the acid residue of incinerated sewage sludge ash after phosphorus recovery for heavy metal removal from aqueous solutions. Waste Management 123: 80-87.
- Yang F, Chen J, Yang M, Wang X, Sun Y, Xu Y, Qian G (2019) Phosphorus recovery from sewage sludge via incineration with chlorine-based additives. Waste Management 95: 644-651.
- Yu X, Nakamura Y, Otsuka M, Omori D, Haruta S (2021) Development of a novel phosphorus recovery system using incinerated sewage sludge ash (ISSA) and phosphorus-selective adsorbent. Waste Management 120: 41-49.
- Zhou K, Barjenbruch M, Kabbe C, Inial G, Remy C (2017) Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective. Journal of Environmental Sciences, 52: 151-159.