

**Marmara Bölgesinde Bulunan Organize Sanayi Bölgelerinin
Atık Su Arıtma Tesislerinde Oluşan Arıtma Çamurlarının Enerji
Kaynağı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi**

**EVALUATION OF THE USE OF TREATMENT SLUDGE GENERATED IN WASTE
WATER TREATMENT FACILITIES OF ORGANIZED INDUSTRIAL ZONES IN
MARMARA REGION AS ENERGY SOURCE**



**ANTALYA
İL MİLLÎ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ**

Ömer ERSOY^{1*}

Prof. Dr. Mahmut ÖZBAY²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

¹Gazi Üniversitesi, Institute of Science, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, Türkiye

²Gazi University, Faculty of Engineering, Ankara, Türkiye

*omer_ersoy@msn.com

ORCID: 0000-0002-8251-18020

²mahmutozbay@hotmail.com

ORCID: 0000-0003-0426-0072

MAKALE BİLGİSİ / ARTICLE INFORMATION

Geliş Tarihi / Date Received

02.02.2023

Kabul Tarihi / Date Accepted

07.04.2023

Yayın Tarihi / Date Published

Ağustos / August 2023

Yayın Sezonu / Pub Date Season

Ocak - Haziran / January - June

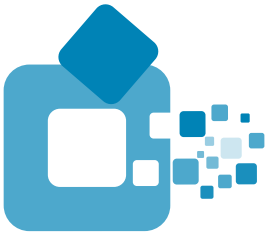
ATIF / CITE as

Ersoy, Ö., Özbay, M. (2023) "Marmara Bölgesinde Bulunan Organize Sanayi Bölgelerinin Atık Su Arıtma Tesislerinde Oluşan Arıtma Çamurlarının Enerji Kaynağı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi"/"Evaluation of the Use of Treatment Sludge Generated in Waste Water Treatment Facilities of Organized Industrial Zones in Marmara Region as Energy Source" bilar: Bilim Armoni Dergisi, 6 (1): 64-81. DOI: 10.37215/bilar.1246638

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/bilar>

Copyright © Published by Antalya İl Millî Eğitim Müdürlüğü Since 2018, Antalya, 07100 Turkey. All rights reserved.





Marmara Bölgesinde Bulunan Organize Sanayi Bölgelerinin Atık Su Arıtma Tesislerinde Oluşan Arıtma Çamurlarının Enerji Kaynağı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi

EVALUATION OF THE USE OF TREATMENT SLUDGE GENERATED IN WASTE
WATER TREATMENT FACILITIES OF ORGANIZED INDUSTRIAL ZONES IN
MARMARA REGION AS ENERGY SOURCE



ANTALYA
İL MİLLÎ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı Marmara Bölgesinde bulunan organize sanayi bölgelerinin atıksu arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurlarının karakterini ve miktarını tespit ederek, çamurun en uygun bertarafının yanında kalorifik değerine göre üretilebilecek enerji miktarının tespit edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda Marmara Bölgesindeki endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının miktar ve özellikleri belirlenerek çamurdan üretilebilecek enerji miktarı tespiti için öncelikle Marmara Bölgesinde bulunan organize sanayi bölgelerinin atık su arıtma tesislerinin kapasitesi, mevcutta arıtılan atık su miktarı ile arıtma faaliyetleri sonucunda açığa çıkan arıtma çamurlarının miktarı tespit edilmiştir. Arıtma çamuru, analiz sonuçları dikkate alınarak tehlikelilik özelliği ve üst ısıl değerine göre sınıflandırılmıştır. Analiz sonucu olmayan arıtma çamurlarının özellikleri ise ağırlıklı sektör grubuna göre diğer arıtma çamurlarına benzetme yapılarak belirlenmiştir. Çamurun biyokatı kütle olarak enerji kaynağı şeklinde kullanılması durumunda, Marmara Bölgesinde atık su arıtma tesisi bulunan 45 OSB'den açığa çıkan arıtma çamurundan yıllık yaklaşık 665 MW enerji üretilebileceği değerlendirilmiştir. Bunun yanında çamurun çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılabilirliği ve bu şekilde kullanılması durumunda çevreci bir bertaraf yöntemi olarak değerlendirileceği düşünülmektedir. Ülkemizdeki endüstriyel nitelikli arıtma çamurları konusunda bilgiler sınırlı olmakla birlikte çalışmanın bu alanda literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Çamur Yönetimi, Endüstriyel Arıtma Çamuru, Geri Kazanım Yenilenebilir Enerji, Yeniden Kullanım

JEL Kodları: Q5

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the content and amount of treatment sludge that is emitted by wastewater treatment plants in the Organized Industrial Zones (OIZ) in the Marmara Region. After this has been determined the most appropriate disposal of the sludge and the amount of energy to be produced according to calorific value will be established. In order to determine the amount of energy that can be produced from the sludge after the amount and content of industrial treatment sludge in the Marmara Region have been established, it was necessary to determine the capacity of wastewater treatment plants in the OIZ in the Marmara Region, the amount of wastewater that was currently being treated and the amount of treatment sludge released as a result of these treatment activities. By taking into account the analysis results, the sewage sludge was classified according to its toxicity and upper calorific value. The properties of the treatment sludge, which are not included in the analysis, were determined by analogy with other treatment sludges according to the weighted sector group. If the sludge is used as a biosolid mass energy source, it was calculated that approximately 665 MW of energy can be produced annually from the treatment sludge released from 45 OIZs that have wastewater treatment plants in the Marmara Region. In addition, it is thought that the sludge can be used as an additional fuel in cement factories; this method can be considered to be an environmentally friendly disposal method. Although the information about industrial treatment sludge in our country is limited, it is thought that the study will make important contributions to the literature in this field.

Keywords: Sludge Management, Industrial Sewage Sludge, Recovery, Reuse, Renewable Energy

JEL Codes: Q5

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler sonucunda insanların enerji ihtiyacının yanında çevre üzerindeki baskıları giderek artmaktadır. Aynı zamanda hızlı kentleşme de bu baskıların artmasına neden olmaktadır. Doğal çevre üzerine etki eden bu olumsuz gelişmeler yaşanabilir bir çevre oluşturulması için önlemler alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. Çevreye karşı oluşan farkındalık ve çevrenin korunması, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de temel politika öncelikleri arasına girmiştir. Kalkınma politikalarının belirlenmesinde, sürdürülebilir bir kalkınma ve yaşanabilir bir çevre oluşturmak amacıyla ekolojik dengenin korunması, doğal kaynakların hızla tüketilmesinin önüne geçilmesi, üretilen atıkların çevre ve insan sağlığı için bir tehdit olmaktan çıkarılarak bir girdiye dönüştürülmesi için atık yönetim stratejileri hayata geçirilmiştir. Atık yönetim stratejileri içerisinde yer alan alt başlıklardan biri de atık su arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurlarının bertarafı ve yeniden değerlendirilmesidir (Soysal 2008).

İnsanlar enerji ihtiyaçlarını doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Enerji üretiminden iletimine, verimli kullanılmasından tüketimine kadar enerjinin çevre ile birçok bağı vardır. Özellikle son yıllarda enerji ihtiyacı ve enerji ihtiyacının karşılanmasında üretim süreçlerindeki çevre sorunları ve çevre kirliliğine etkilerinin somut bir şekilde görünür hale gelmesiyle, enerji üretimi konusunda çevre faktörlerinin dikkate alınması gerekliliği ortaya konulmuştur (Bozkurt 2008).

Mikroorganizmalardan üretilen, temelinde karbonhidrat bileşiklerinin oluşturduğu, bitkisel ve hayvansal kökenli, aynı zamanda yenilenebilen özelliğe sahip tüm maddeler biyokütle olarak tanımlanabilir. Biyokütle kaynakları doğrudan veya biyokütleyi bazı süreçlerden geçirerek dönüşümü sağlandıktan sonra enerji üretmek amacıyla enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu süreçlerde katı, sıvı ve gaz formlar elde edilip enerji üretimi için biyokütle kullanılmaktadır (Eroğlu 2011).

Daha ekonomik ve daha az emisyonu sebep olan yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara

göre tercih edilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Bu husus dikkate alındığında Dünya Enerji Konseyine göre yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir payı biyokütle almaktadır (Soysal, 2008). Arıtma çamurları, tarımsal atıklar, gübreler ve orman atıkları da uygun şartlarda ve gelişen teknolojiyle uygun proseslerde biyokütle olarak kullanılması durumunda yüksek bir enerji potansiyeline sahiptir (Yamak 2006).

Atık üretiminde en önemli konu, atığı öncelikle kaynağında azaltmadır. Daha sonra sırasıyla atığın yeniden kullanılması, geri dönüşümü veya geri kazanımı şeklinde hedefler belirlenmektedir. Burada geri kazanım ve geri dönüşüm kavramları birbirinden ayrılmaktadır. Geri dönüşüm atığın yeniden kullanılmasını sağlayan yani atıktan bir ürün üretilmesidir. Bu ürün atıkların özelliklerinden faydalanılarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle bir ürüne veya enerjiye dönüştürülmesidir.

Arıtma çamurlarının öncelikli yaklaşımı günümüzde atık olarak değil, geri dönüşümü ya da yeniden kullanımı mümkün olan bir hammadde olarak değerlendirilmesidir. (Pietzsch vd. 2017). Gelişen teknoloji ve son yıllarda yapılan çalışmalar neticesinde, üretilen atıkların çevreye verdiği zararı ve öncelikle üretilen atık miktarını azaltmak amacıyla, atık yönetim stratejileri değiştirilmiş, bu değişim sonucunda atıklarla ilgili atık minimasyonu ve geri dönüşümü veya yeniden kullanım politikaları uygulamaya konulmuştur (Minelgaite ve Liobikiene 2019).

Arıtma çamurlarının kirletici olması nedeniyle, bu kirleticinin arıtılması ve bertarafı için ekonomik ve sürdürülebilir çözüm yollarının arayışı başlatılmıştır. Çamur içeriğinde bulunan zengin besin maddeleri veya içeriğin zenginleştirilmesi ile çamurun toprakta kullanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ancak çamurdan uzaklaştırılamayan ve insan sağlığına zararlı olacak maddelerin varlığı çamurun toprakta kullanımından başka farklı yöntemlerin araştırılmasına neden olmuştur. Bu yönde yapılan çalışmalar sonucunda çamurun dolgu malzemesi olarak kullanılması, alternatif ya da ek yakıt olarak kullanımı ile enerji kaynağı olarak kullanımın tespitinden sonra arıtma çamurunun

zararlı bir atıktan çıkararak bir hammaddeye dönüştürülmesi yönünde ilerleyiş olmuştur.

Arıtma çamurları muhteviyatı bakımından, bünyesinde insan ve çevre sağlığı açısından zararlı bileşikler barındırır. Su miktarının çok olmasından dolayı büyük hacim kaplar. Arıtma çamurunun bu olumsuz özellikleri ve günden güne miktarının artmasından dolayı bertarafı veya değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Gelişmiş ülkelerde bertaraf ve yeniden değerlendirme konularında çalışmalar yapılmış, son yıllarda ülkemizde de arıtma çamuru konusunda büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. Ancak yapılan çalışmalar genel olarak evsel nitelikli arıtma çamurlarına yönelik olmuştur.

Arıtma çamurları özellikleri nedeniyle, hammadde, malzeme veya enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Sahip olduğu bu potansiyel ile üretim tesislerinde hammadde veya arazide toprak düzenleyici ya da gübre görevi yapar (Topaç ve Uçaroğlu 2020). Bunun yanında çamurların kimyasal özelliklerinden olan ısı değeri düşünüldüğünde yakma tesislerinde enerji üretim amaçlı ya da farklı bir üretim tesisinde ek yakıt olarak kullanılabilir. Arıtma çamuru, kalorifik potansiyeli nedeniyle çimento üretiminde ikincil yakıt olarak kullanılması uygundur (Valderrama vd. 2013).

Arıtma çamurları, enerji açısından zengin biyokütle kaynağı olduğundan, biyodizel yakıt üretimi, gazlaştırma, piroliz, anaerobik prosesler ve yakma prosesleri gibi atıktan enerji üreten, atığı enerjiye dönüştüren sistemlerde yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Milbrant vd. 2018). Bu sistemler ile H₂ ve CH₄ içeren biyogaz, katı ve sıvı biyoyakıt şeklinde çeşitli enerji ürünleri elde edilmektedir (Choi vd. 2019). Uygulanan bu sistemlerle sadece enerji üretimi değil aynı zamanda kötü kokunun giderilmesi, patojenlerin ve zararlı içeriklerin yok edilmesi, kütle ve hacim azaltılması ile uçucu katı maddelerin stabilize edilmesi sağlanmaktadır (Zhang vd. 2014). Bu yönüyle bakıldığında kullanılan sistemlerde çevre dostu yakıt kullanma yanında kirletici olarak görülen arıtma çamurlarının da etkili bir şekilde bertarafı sağlanmaktadır. Arıtma çamurları sürdürülebilir alternatif yakıt olarak tanımlanırsa, fosil yakıtlara

göre düşük maliyetli, yenilenebilir, verimli ve çevre dostu bir yakıt kaynağıdır (Bora vd. 2020).

Ülkemizin kalkınma politikaları doğrultusunda, çevreye duyarlı ve planlı sanayi alanları oluşturulması amacıyla organize sanayi bölgeleri (OSB) kurulmuştur. Organize sanayi bölgesi; sanayinin etkinliğini ve kentte düzenli yerleşmeyi sağlamak, sanayi tesislerini bir araya toplayarak sanayi kuruluşlarının ulaşım, kentsel toprak, enerji, yakıt, su, endüstriyel atık su arıtma tesisi, hammadde gibi altyapı ve gereksinimleriyle ilgili kolaylıkları bir arada bulunduran, bunun yanı sıra sanayinin çevreye olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla atık yönetim politikaları uygulayan, özel olarak planlanan ve imar planlarında da yer verilen bölge türü olarak tanımlanmaktadır.

Ülkemizde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının 2020 yılı ilk yarısı verilerine göre 314 adet OSB bulunmaktadır. OSB'lerin doğal çevrenin korunmasına yönelik en önemli avantajlarından biri oluşan kirliliğin tek noktadan kontrol edilebilir olmasıdır. OSB'lerde faaliyet gösteren binlerce sanayi tesisinin atık suları merkezi endüstriyel atık su arıtma tesislerinde ileri arıtma yöntemleriyle arıtıldıktan sonra doğaya deşarj edilmektedir.

Bu çalışmada; Marmara Bölgesinde bulunan OSB'lerin atık su arıtma tesislerinde oluşan endüstriyel arıtma çamurlarının miktar ve özelliklerine göre sınıflandırılması, bölgesel bertaraf yöntemlerinin değerlendirilmesi ile çamurun sahip olduğu potansiyel ısı değerine göre termal yöntemlerle işletilmesi sonucunda kazanılabilecek enerji miktarının tespiti amaçlanmaktadır.

1.1. Arıtma Çamuru

Arıtma çamuru; evsel ve endüstriyel atık su arıtma tesislerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma sürecinde, atık su içerisinden flokleştirilerek veya yüzdürülerek uzaklaştırılan, biyolojik arıtma sonucunda çözünmüş haldeki katıların mikroorganizma bünyesine geçirilmesi ile sistemden alınması sonucu açığa çıkan %95-99,5 su ihtiva eden akışkan olarak tanımlanabilir (Flytili ve Zabaniotou 2008). Başka bir ifadeyle; evsel ve endüstriyel atık suların arıtılmasında uygulanan süreçlerde, çeşitli arıtma kademelerinde yan ürün

olarak açığa çıkan büyük oranda su ihtiva eden atık maddeler olarak da tanımlanabilir (Kumar vd. 2017). Atık sular, belirli bir limit değerinin altına kadar çevreye zarar vermeyecek hale getirilirken yani arıtılırken, arıtma çamurlarının oluşmasına sebep olur. Arıtma çamuru oluşumunun her evresinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik evrelerinde farklı özellik ve sınıfta arıtma çamuru oluşmaktadır (Orhon 1991). Bu evrelerde oluşan çamurun askıda ve çözünmüş madde miktarına eşit olan katı madde miktarı %1 ile %5 arasında değişmektedir. %80 ve üzerinde katı madde içeren çamur kuru çamur, %30-55 katı madde içeren çamur ön kurutma çamuru ve %30'dan daha az katı madde içeren çamur ise yaş çamur olarak gruplandırılabilir (Sanger vd. 2001). Gelişen sanayi ve artan nüfus artışıyla arıtma çamuru miktarında büyük oranda artış görülmektedir. Çamur üretiminin kişi başına günde 40-60 gr kuru madde olduğu belirtilmektedir (Caballera 1997). Mevcut ve gelecekteki atık su arıtma tesislerinden açığa çıkacak çamur miktarı dikkate alındığında uygun bir çamur bertaraf stratejisi belirlemek oldukça önemlidir (Otero vd. 2003).

Arıtma çamurları evsel ve endüstriyel nitelikli atık su arıtma tesisleri ile içme suyu arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamurları olarak üç grupta sınıflandırılabilir. Arıtma çamurlarının bozunma ve kokuşma eğiliminde olması, büyük bir kısmının sudan oluşması, bu sebeple büyük hacimler işgal etmesi ve patojen mikroorganizmalar içermesinden dolayı mutlaka bertaraf edilmesi veya uygun özellikte olanların yeniden kullanılması gerekmektedir. Arıtma çamurları içeriğinde, organik madde, kalsiyum, fosfor ve potasyum gibi yararlı bileşiklerin yanında patojen, ağır metal, zararlı maddeler ve organik kirleticiler bulundurulabilir (Göçmez 2006). Sürdürülebilir çamur yönetimi, insanlara ve çevreye zarar vermeden kaynakların geri dönüşümü gerekliliklerini karşılayan bir yöntem olarak tanımlanabilir (Hasanbeigi vd. 2012). Arıtma çamurlarının bertarafı için yapılması gereken harcama arıtma tesisi işletme maliyetinin %50'den fazlasını oluşturmaktadır (Appels vd. 2008). Evsel ve endüstriyel arıtma çamurlarında bitkiler için faydalı besin maddesi (gübre) elementleri olduğu gibi aynı zamanda arıtma süreçlerinde kullanılan

kimyasallardan dolayı içeriğinde pek çok zararlı, toksik içerebilmektedir. Bu yüzden arıtma çamurlarının doğada kullanılmasında çevresel kaygılar oluşmaktadır (Lasaridi vd. 2018).

Arıtma çamurlarının bertarafı için uygulanan en yaygın yöntem özel alanlarda ya da belediyelere ait katı atık imha alanlarında düzenli depolamadır. Ülkemizde arıtma çamurları için uygulanan en yaygın yöntem düzenli depolamadır. Ayrıca büyük yakma tesislerinde yakma, araziye serme, tarımsal alanda kullanım gibi yöntemler uygulanmaktadır (Uzun ve Bilgili 2011). Ülkemizde 2010 yılında endüstriyel atık su arıtma tesislerinde açığa çıkan ve tehlikeli sınıfta değerlendirilen yaklaşık 200 ton arıtma çamuru ile tehlikesiz sınıfta değerlendirilen yaklaşık 53 000 ton arıtma çamuru düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmiştir (Salan 2014).

1.2. Ülkemizde Arıtma Çamurlarının Durumu

TÜİK'in evsel nitelikteki atık su arıtma tesislerine yönelik yaptığı 2016 yılı Belediye Atık Su İstatistikleri anketi sonucuna göre, 2016 yılında arıtma tesislerinden yaklaşık 300 000 ton evsel nitelikli arıtma çamurları oluştuğu raporlanmıştır (TÜİK 2017). Ülkemizde belediyelerde arıtılan atık su miktarı hakkında yeterli bilgi olmasına karşın, arıtma sonucu üretilen arıtma çamuru miktarı hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Evsel nitelikli atık su arıtma tesislerine yönelik yapılan bir diğer çalışmada ise 2002 verilerine göre, ülke genelinde 145 atık su arıtma tesisi varken 2016 yılı ortalarında bu sayının 1 125'e ulaştığı belirtilmektedir (Saygılı 2019).

Yapılan literatür taramasında Çevre kirliliği ve atık yönetimi açısından önemli bir konuma sahip endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının miktar ve özelliklerinin belirlenmesi ya da uygun bertaraf yöntemlerinin tespit edilmesine yönelik detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.3. Dünyada Arıtma Çamurlarının Durumu

Avrupa Birliği ülkelerinde arıtma işlemlerinden kaynaklanan kişi başına düşen kuru katı atık çamur üretimi günde ortalama 90 gramdır (Davis 1996). Avrupa Birliği eski üye devletlerde (AB-15) 2010 yılında yıllık yaklaşık 8,7 milyon ton kuru

katı madde, yeni üye devletlerde ise (AB-12) yıllık yaklaşık 1,2 milyon ton kuru katı madde olmak üzere (AB-27'de) yaklaşık 10 milyon ton kuru katı madde arıtma çamuru üretilmiştir. Ayrıca Arıtma Çamurunun Tarımda Kullanılması Halinde Çevrenin ve Özellikle Toprağın Korunması Direktifi (86/278/EEC) ile çamurun tarımsal alanlarda kullanılması teşvik edilmekle birlikte canlılar ile toprağa verebileceği zararlarının önlenmesi ana hedef olarak ortaya konmuştur (Kaya 2012). Kentsel atık su direktifinde ise, atık sular için katı kalite standartları belirlenmiş, ayrıca atık su arıtımından kaynaklanan çamurun uygun olduğu durumlarda tekrar kullanılabilirliği belirtilmiştir (Alexandros ve Athanasios 2012).

Avrupa Birliği'nin eski ve yeni üye ülkeleri arasında çamur arıtımı, bertarafı ve değerlendirilmesi ile ilgili ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Avrupa Birliğine eski üye 15 ülke ve yeni üye 12 ülkenin atık su çamur yönetimi ve mevzuatları karşılaştırıldığında eski ve yeni ülkeler arasında büyük farklılıklar olduğu, mevcut durumun iyileştirilmesi ve ana hatlarının belirlenmesi gerektiği kararlaştırılmıştır. AB ülkelerinde çamur stabilizasyon yönteminde genel olarak anaerobik ve aerobik çamur çürütme yöntemleri kullanılmaktadır. Çamurun termal olarak kurutulması ise gelişmiş olan AB 15 ülkelerinde, özellikle Almanya, İtalya, Fransa ve İngiltere gibi ülkelerde yaygındır.

Wisniowska ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada; dünyanın büyük ülkeleri ile AB üyesi ülkelerin çamur mevzuatları karşılaştırılmış ve nüfus yoğunluğu, arazi alanları, bertaraf maliyetleri ve sosyal kabullerin çamur yönetimini etkileyen faktörler arasında olduğu tespit edilmiştir. Gelişmiş ülkelerde çamur yönetimi ile ilgili mevzuatların daha kapsamlı olduğu ve mevzuatlarda atık üretiminin minimize edilmesi veya çamurun yeniden kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Gelişmiş ülkelerde düzenli depolamanın daha az tercih edildiği, gelişmekte olan ülkelerde ise büyük oranda düzenli depolama ve tarımsal alanda kullanımın tercih edildiği ifade edilmiştir.

AB 15 ülkelerinde arıtma çamurunun tarımda kullanılması ve kompostlaştırma en yüksek bertaraf yöntemidir. AB 12 ülkelerinde ise en yüksek bertaraf yönteminin düzenli depolama olduğu tespit edilmiştir. AB ülkeleri arasında çamurun bertaraf yöntemleri, %32 tarımsal alanda kullanım, %25 düzenli depolama, %13 kompostlaştırma ve %13 yakmadır (Kelessidis ve Stasinakis 2012).

Avrupa Birliği ülkelerinde belediye ve sanayi kaynaklı atık suların arıtılmasını düzenleyen Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi (UWWTD) 91/271/EEC ile, nüfusu 2 000'den fazla olan yerleşim yerlerinde atık suların toplanması ve arıtılması için arıtma sistemlerinin kurulması zorunluluğu getirilmiştir (commission of European Communities 1998). Bu direktifin yürürlüğe girmesiyle birlikte çamur üretim miktarlarında büyük bir artış olmuştur (Bianchini vd. 2016).

Avrupa Birliği ülkelerinde 1984'ten 2015'e kadar çamur miktarında ciddi bir artış gözlenmiş, bu durum ise yıllar içerisinde çamurun bertaraf yöntemi ve stratejisinin değişmesine yol açmıştır. Daha az tercih edilen yakma ve birlikte yakma yöntemlerinde ciddi bir artış olmuş, tersine düzenli depolama yönteminde azalma olmuştur.

ABD'de 2011 yılında yaklaşık 16 600 atık su arıtma tesisinden yaklaşık 9,5 milyon ton kuru arıtma çamuru açığa çıkmıştır (Hasanbeigi vd. 2012).

Yang ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada; dünyanın en kalabalık nüfusuna sahip olan Çin'de, çamur üretiminin 2007 yılından 2013 yılına kadar % 13 artarak yaklaşık 6,25 milyon tona ulaştığı, ancak diğer gelişmiş ülkelere göre bu miktarın az olduğu, bunun yanında çamurun bertaraf yöntemi olarak da susuzlaştırmadan sonra düzenli depolama olduğu tespit edilmiştir.

1.4. Arıtma Çamuru Bertarafında Yaklaşımlar

Getirilen yasal sınırlamalar ve alan yetersizliğinden dolayı arıtma çamurlarının bertarafında yeni yöntemler ve teknolojilerin uygulanması zorunlu hale gelmiştir. Bu yöntemlerden biri gazlaştırmadır. Bu yöntem ile; karbon içeren bileşikler buhar, hidrojen, karbon dioksit, oksijen veya bu bileşiklerin karışımı ile reaksiyona girer

ve sonucunda tümüyle gaz halindeki ürünler elde edilir (Uzun ve Bilgili 2011). Gazlaştırma prosesi, içeriğinde karbon ihtiva eden gaz halindeki bir maddeyi termokimyasal olarak yüksek enerjili gaz ürüne dönüştüren bir sistemdir (Ahmad vd.2016). Metandan hidrojen ve metanol üretilir daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülebilir. İlave yakıt ihtiyacı olmadığı için yakma ile karşılaştırıldığında kükürt, azot emisyonları, ağır metaller ve uçucu kül ile klorin oluşumu olmadığı için daha çevreci bir sistemdir (Fytli ve Zabaniotou 2008). Yüksek enerji verimliliği ve ısı üretimi sağladığı için tercih edilen bir sistemdir (Gadsboll vd. 2017). Arıtma çamurları ile kağıt, talaş vb. biyokütle yakıtları bu sistemlerde singaza dönüşmektedir (Shayana vd. 2018). Singazdan elde edilen enerji ile arıtma çamurlarının termal olarak kurutulması da sağlanmaktadır (Ledakowick vd. 2019). Ayrıca çıkan malzemeler dolgu malzemesi ya da farklı amaçlarla yeniden kullanılabilir (Tezcar ve Can 2010).

Diğer yöntem ise; fermantasyonla biyogaz eldesidir. Organik katılar havasız ortamda çeşitli mikroorganizmalar tarafından parçalanır (Marrero vd. 2003). Birinci aşamada organik asitler, karbondioksit ve H₂S oluşur. İkinci aşamada organik asitler ve azotlu bileşikler daha yavaş bir hızla çözünmeye devam eder. Son aşamada ürün gazın ana bileşeni metan oluşur. Sıcaklık, nem ve baziklik belli sınırlar içinde olmalıdır ve atıklar mikroorganizmaların ihtiyacı olan maddeleri içermelidir. Fermantasyon ürünü gaz %70 metan ve %30 yanma gazlarıdır (Kempkens 1993).

Piroliz yönteminde ise; organik maddelerin oksijensiz bir ortamda 300 ila 900°C aralığında belirli bir bekleme süresinde termal olarak ayrıştırıldığı işlemdir (Kempkens 1993). Atığın organik içeriğine göre hidrojen, metan, karbonmoksit, karbondioksitten oluşan gaz ürün elde edilir. Elde edilen gaz üründen katran veya sıvı bir ürün oluşur. Ayrıca saf karbon ve atığın içeriğinde bulunan sert maddelerden kömürleşmiş bir katı elde edilir (Akpınar, 2006). İlk aşamada atık 750°C'de gazlaştırılır ve oluşan gaz piroliz ünitesinde zararlı maddelerin indirgenmesi amacıyla 900°C'de yakılır (Ayvaz 2000). Gazın yanması sonucunda ısı ya da elektrik enerjisi üretilir.

Piroliz, yakma ve gazifikasyon sistemlerine alternatif olarak geliştirilmiş bir sistemdir. Piroliz sistemi çalışma prensipleri ve emisyon sonuçlarına göre değerlendirildiğinde diğer sistemlerle karşılaştırıldığında kabul edilebilir emisyon değerlerinden dolayı en optimum sistem olarak abaniotou 2014). Piroliz sonucunda elde edilen biyokömürün içeriği ve özellikleri dikkate alındığında toprak iyileştirici olarak kullanılabilir (Syed-Hassan vd. 2017).

Bunlarında dışında teknik ve pilot ölçeklerde çamur bertarafı için yapılan yaş oksidasyon, hidroliz, hidrotermal oksidasyon ve mikrodalga-yüksek basınç işlemleri gibi alternatif yöntemler de geliştirilmiştir. Düzenli depolama ve tarımsal yeniden kullanımla kullanılmayan arıtma çamurlarının bertarafı için yakma sistemleri geliştirilmiştir. Atık çamurun yakılmasında birkaç tip fırın kullanılır. Bunlar döner boru fırınlar, katlı fırınlar, akışkan yataklı fırınlar, siklonik fırınlar ve elektrikli fırınlardır (Ayvaz 2000).

Arıtma çamurunda tam yanmanın sağlanması, ısı değerinin artırılması, taşımanın kolaylaştırılması ve taşıma maliyetinin azaltılması için çamura ön işlemler yapılması gerekmektedir (Lu vd. 2013). Arıtma çamurundaki kötü kokuların giderilmesi, organik maddelerin bozulmasının azaltılması, engellenmesi, patojenlerin azaltılması veya yok edilmesi amacıyla stabilize edilir (Akyarlı ve Şahin 2005). Stabilize olmuş bir arıtma çamuru çevre ve halk sağlığına zarar vermeden kullanılabilen ve artırılabilen çamurdur (Vesilind vd. 1988).

Arıtma çamurunun kurutulması, çamurun içerisindeki nemin termal ısı işlemi ile buharlaştırılması ve nispeten kokusuz hale getirilerek %5 ila %10 oranında düşük nemli bir ürün elde edilmesi işlemdir (Vesilind vd. 1988).

Kurutulmuş çamur, daha az taşıma maliyeti, iyi depolama ve patojenlerin azaltılmasıyla gübre veya toprak iyileştirici olarak kolayca pazarlanabilir, depolanabilir veya yakma tesislerine doğrudan kabul edilebilir. Çamur susuzlaştırma yapılması durumunda kapladığı hacim azalacaktır. Mekanik su giderimi yapılmamış ham çamurun katı madde oranı %2 iken mekanik susuzlaştırma yapılırsa bu

oran %25'e kadar çıkmaktadır. Termal kurutma yapılması durumunda ise bu oran %95'e kadar ulaşmaktadır (Topaç ve Uçaroğlu 2020).

Termal kurutma işleminin amacı, çamura kısa zaman aralıklarında yüksek basınç ve sıcaklık uygulamak sureti ile madde ilavesi olmaksızın katı maddenin suyunu verme özelliğinden faydalanılarak çamurun sudan uzaklaştırılması ve kararlı hale getirilerek hacminin azaltılmasıdır. Çamura fiziksel işlem dışında herhangi bir işlem uygulanmamaktadır. Çamurun uzaklaştırılmasında ve bertarafında hangi yöntemin kullanılacağına belirlenmesi için çamurun nem içeriğinin bilinmesi gerekmektedir (Öztürk 2017).

Atıklara uygulanan termal yöntemler, atıkları yüksek sıcaklıkta enerjiye ve diğer yan ürünlere dönüştürür. Burada temel amaç, atığın hacminin ve miktarının azaltılmasıdır. Yöntem sayesinde, atıkların depolanması için ihtiyaç duyulan alan azaltılırken, malzemenin işlem görmesi sonucu ortaya çıkan ısı kullanılarak, enerji geri kazanımı sağlanmaktadır.

Nem içeriği arıtma çamurunun bir kalite göstergesi olup kuru madde ağırlık bazında konsantrasyonudur. Çamurun nem yüzdesine göre; % 8-22 arasında olanlar kötü kalite, % 22-26 olanlar orta kalite ve % 26-30 iyi kalite çamur olarak sınıflandırılabilir (Vigneswaran ve Kandasamy 2009).

Çamurda nem, santrifüjlü dekantörler, plakalı filtre presler, belt presler ve döner tambur vakum filtreler ile çamurdan uzaklaştırılır. Arıtma tesislerinde çamur üretiminin az olduğu durumlarda ise çamur bekletme alanları oluşturularak uzun sürelerde çamurun nemini kaybetmesi beklenmektedir. Ancak bu yöntem günlük çamur üretimi fazla olan tesislerde tercih edilemeyecek bir yöntemdir.

Nem içeriği arıtma çamurunun bir kalite göstergesi olup çamurun nem miktarı %10 ve daha aşağısı, kuru madde miktarı %90 ve daha yukarısına çıkarılarak elde edilen çamur doğrudan veya yanma odasında yakıt ile birlikte yakılabilir. Doğrudan yakılması durumu genellikle enerji üretimi, birlikte yakma ise genellikle bertaraf yöntemi

olarak değerlendirilmektedir (Hall 1995). Arıtma çamurları çimento fabrikaları ve kömürlü elektrik santrallerinde birlikte yakılabilir. Bu sistemler tek başına kurulan yakma tesislerinden daha ekonomik ve çevre dostu sistemler olarak değerlendirilebilir.

Arıtma çamurlarının içerisinde bulunan toksik ve zararlı maddelerden dolayı tarımsal alanda kullanılmasında besin zincirine yapacağı etki nedeniyle toprakta kullanılması uygun olmayan çamurların farklı alanlarda kullanılması araştırılmıştır (Lin vd. 2012). Alüminyum, silika, demir, kalsiyum vb. elementler çimento içerisindeki kilde bulunmaktadır. Arıtma çamurlarının içeriğinde bulunan inorganik maddelerinde çimento fabrikalarında yakılarak bertarafı çalışmalarında, çamurların kurutulup yakıldıktan sonra çıkan külün çimento katkı maddesi, ince agrega, kiremit, tuğla, seramik, kil boru ve yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilir (Chang vd. 2020). Susuzlaştırılmış organik ve inorganik madde içeren arıtma çamurlarının çimento bileşeni olarak kullanılması mümkündür (Zabanioto ve Theofilou 2008). Hacmi azaltılarak çimento ve inşaat sektörlerinde kullanılan arıtma çamurları güvenli bir şekilde uzaklaştırılmakta aynı zamanda bu sektörlerin üretim girdi maliyetleri azalmaktadır (Valderrama vd. 2013).

1.5. Arıtma Çamurunun Çimento Fabrikalarında Kullanımı

Yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle çimento fabrikalarında arıtma çamurlarının birlikte yakılması, hem çamur bertarafı hem de kullanımı açısından çamur işlemede uygun bir teknoloji olarak kabul edilebilir (Sponar 2002). Bunun için taşımada da kolaylık sağlanması amacıyla arıtma çamurunun kaynağında kurutulması önerilmektedir. Arıtma çamurları yüksek su içeriğine sahip olduğu için hammadde olarak kullanılmadan önce kurutulmalıdır. Çamurun nem oranının fazla olması durumunda işletme sorunları meydana gelmektedir. Eğer hammadde olarak kullanılan çamurun su içeriği fazla olursa bunkere yapışarak çıkan ürünün verimini düşürdüğü gibi işletme sorunu, ürünün kalitesinde bozulma ve temizleme için üretime ara verilmesi gibi ekonomik

sonuçlara neden olmaktadır. Kurutma işlemi için çimento fırınındaki atık ısı kullanılır (Theulen ve Szabo 2010). Çimento üretiminde klinker 1 450 °C'de üretilir. Döner fırında bu yüksek sıcaklıkta, yakıtta arıtma çamurunun karıştırılması ile çamurun bertarafı sağlanır (Wether ve Ogada 1999). Ancak kural olarak azami atık çamur besleme oranı çimento tesisinin klinker üretim kapasitesinin %5'inden fazla olmaması önerilmektedir. Örneğin; 2000 ton/gün klinker üretim kapasiteli bir tesis için maksimum 100 ton/gün arıtma çamuru kullanılabilir (Kaantee vd. 2004).

Çimento sektöründe enerji verimliliği konusunda önemli bir alan atık ısı geri kazanımıdır. Çimento üretim süreçlerinde oluşan ve fabrika ana bacasından atmosfere atılan sıcak gazların enerjisi, atık ısı geri kazanımı tesisleri sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Hali hazırda 16 fabrikadaki 25 hatta 141,5 MW elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu sayede yaklaşık 500 bin konutun günlük tüketimine denk gelen elektrik ihtiyacı, sadece üretim işleminden çıkan atık ısı ile karşılanmaktadır. Türk çimento sektörü 2020 yılında yaklaşık 1,2 milyon ton atıktan toplam enerjisinin %8,5'ini üretmiş ve yaklaşık 500 bin ton ithal petrokok tasarrufu sağlamıştır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2022).

Punmantharith ve diğeri (2010) tarafından yapılan çalışmada, arıtma çamurunun klinker çimento üretiminde alternatif hammadde olarak kullanılmasının çimento içeriğini ve oluşumunu olumsuz yönde etkilemediği ve çamurun alternatif hammadde olarak kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tsiligiannis ve Tsiligiannis (2020) tarafından yapılan çalışmada; çimento fırınlarında petrol türevli arıtma çamurları ile biyogenik atıkların (kağıt, talaş, tahta atıkları, düşük kalite kompost) kullanım potansiyeli araştırılmış, sonucunda alternatif enerji kaynaklarının Cl, NO_x, CO₂ ve Hg emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağladığı, yakıt maliyetlerini azalttığı, bu yönleri ile sadece ekonomik olarak değil aynı zamanda ekipmanların korozyon risklerine sebep olmadığı sonucuna da varılmıştır.

Ewais ve diğeri (2017) tarafından yapılan çalışmada; arıtma çamurları ile pirinç kabuklarının yakılması sonucu açığa çıkan külün yalıtım amaçlı iyi kaliteli tuğla üretiminde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Gonzales-Corrochano ve diğeri (2017) tarafından yapılan çalışmada; arıtma çamurlarının hafif agrega üretiminde kullanılabileceği ve bu işlem esnasında uygulanan termal işlemin ağır metallerin büyük bir bölümünün tutulmasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Areias ve diğeri (2020) tarafından yapılan çalışmada; kentsel arıtma çamurlarının doğrudan inşaat malzemeleri ve kil tuğlalarda kullanılabileceği belirtilmiş, bu yöntemle üretilen kil tuğlaların yaklaşık %16 daha uygun maliyetle üretilebileceği belirtilmiştir.

Dahhou ve diğeri (2018) tarafından yapılan çalışmada; porland çimento klinkerine içme suyu arıtma tesisinde oluşan arıtma çamuru karıştırılmış ve bu karışımın tuğla üretiminde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Cremades ve diğeri (2018) tarafından yapılan çalışmada; içme suyu arıtma tesisinden çıkan çamurun fayans üretiminde değişik oranlarda kullanımı araştırılmış ve sırlı fayans üretiminde kullanılabileceği, aynı zamanda çamur ilavesiyle üretilen seramik malzemenin çevreye zarar verici bir etkisinin olmadığı da ifade edilmiştir.

Fang ve diğeri (2015) tarafından yapılan çalışmada; kentsel arıtma çamuru, çimento klinker üretiminde alternatif yakıt olarak kullanılmış, ikincil yakıt olarak kullanılan arıtma çamurunun çimento üretimi sonucunda açığa çıkan NO_x emisyonunu büyük oranda azalttığı, klinker kalitesinde ise bir bozulmaya neden olmadığı sonucuna varılmıştır.

Lam ve diğeri (2020) tarafından, değişik arıtma çamurlarından enerji elde etme sistemlerinin araştırıldığı çalışmada, kimyasal kullanımı, enerji geri kazanımı ve kullanımı ile emisyon verimlilik sonuçları araştırılmış, sonucunda arıtma çamurundan enerji eldesinin verimli bir proses olduğu sonucunda ulaşılmıştır.

Petersen ve Werther (2005) tarafından, pilot ölçekli dolaşimli akışkan yataklı bir reaktörde arıtma çamurlarının gazlaştırılması için en uygun şartları belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada; sıcaklık, hava oranı ve besleme yüksekliğiyle ilgili deneysel inceleme sonucunda, 0,3 hava fazlalık oranının gazlaştırma için en uygun oran olduğu sonucuna varılmıştır.

Mountouris ve diğerleri (2006) tarafından yapılan çalışmada; katı atıkların bertarafı ve geri kazanımında plazma teknolojinin bilgisayar programında oluşturulan denge modeli ile uygulanabilirliği incelemiş, sonucunda katı atık bertarafı ve enerji geri kazanımında plazma teknolojisinin uygulanabilir bir yöntem ve çevresel olarak da birçok üstünlüklerinin olduğu sonuca varılmıştır.

Mountouris ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmada; plazma gazlaştırma teknoloji ile arıtma çamurlarının bertarafı ve üretilen enerjinin kullanılabilirliği bilgisayar programıyla araştırılmıştır. Programda gazlaştırma ve arıtma çamurunun kurutma proseslerinin birlikte işletildiği entegre bir sistemin modellemesi yapılmış, bu modelin arıtma çamurunun bertarafı ve enerji kazanımı sağlayacağı yanı sıra hem çevresel açıdan uygun bir yöntem olduğu hem de günlük 250 ton kapasiteli ve %68 nem içeriğine sahip olan arıtma çamurunun entegre sistemde kurutulduktan sonra 2,85 MW'lık elektrik enerjisi elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Nipattumakul ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada; arıtma çamurlarının 700-800-900 ve 1 000 °C'de buharla gazlaştırılırken, gazlaştırma sıcaklığı ve buhar kullanımının gazlaştırmaya, gaz üretimine ve enerji kazanımına olan etkileri incelenmiş, sonucunda arıtma çamurlarının buhar ile gazlaştırılmasında H₂ miktarının hava ile gazlaştırmaya kıyasla yaklaşık üç kat fazla olduğu ve arıtma çamurlarının 800 °C ve üzerinde sıcaklıklarda gazlaştırılmasının daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

Li-ping ve diğeri (2015) tarafından yapılan çalışmada; çürütülmüş ve çürütülmemiş arıtma çamurlarının nem içeriğinin, 800 °C'de

hava gazlaştırma prosesi üzerinde etkilerini incelenmiş, sonucunda yüksek oranda nemin katran oluşumu ve gaz kalitesini artırdığı, bunun yanında karbondioksit, metan ve hidrojen konsantrasyonlarını da fazlalaştırdığı sonucuna varılmıştır.

Werle (2012) tarafından yapılan çalışmada; arıtma çamuru ile elde edilen sentez gazın çamur bertarafı ve enerji üretim potansiyeli incelenmiş, sonucunda sentez gaz elde edilen gazlaştırma prosesinin gelecekte uygulanabilir ve maliyet avantajı olan bir proses olduğu bunun yanında, sentez gaz kullanımı ile %90 oranında NO emisyonlarının azaltılabileceği, uygun yanma sıcaklığının da 1 200 K olduğu sonucuna varılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT

Organize Sanayi Bölgesi (OSB) 4562 sayılı OSB Kanununda; sanayinin uygun görülen alanlarda yapılaşmasını sağlamak, çarpık sanayileşme ve çevre sorunlarını önlemek, kentleşmeyi yönlendirmek, kaynakları rasyonel kullanmak, bilgi ve bilişim teknolojilerinden yararlanmak, sanayi türlerinin belirli bir plan dahilinde yerleşmesi ve gelişmesi amacıyla; sınırları tasdik edilmiş arazi parçalarının imar planlarındaki oranlar dahilinde gerekli idari, sosyal ve teknik altyapı alanları ile küçük imalat ve tamirat, ticaret, eğitim ve sağlık alanları, teknoloji geliştirme bölgeleri ile donatılıp planlı bir şekilde ve belirli sistemler dahilinde sanayi için tahsis edilmesiyle oluşturulan mal hizmet üretim bölgeleri olarak tanımlanmıştır.

Başka bir deyişle OSB; sanayinin etkinliğini ve kentte düzenli yerleşmeyi sağlamak, sanayi tesislerini bir araya toplayarak sanayi kuruluşlarının ulaşım, kentsel toprak, enerji, yakıt, su, endüstriyel atık su arıtma tesisi, hammadde gibi altyapı ve gereksinimleriyle ilgili kolaylıkları bir arada bulunduran, bunun yanı sıra sanayinin çevreye olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla atık yönetim politikaları uygulayan, özel olarak planlanan ve imar planlarında da yer verilen bölge türü olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmada kullanılan; endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının miktar, özellik ve analiz

sonuçlarına ait veriler, yapılan başvuru sonucunda T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığında alınmıştır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2020).

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının 2020 yılı ilk yarısı verilerine göre ülkemizde tüzel kişilik kazandırılmış toplam 314 organize sanayi bölgesi bulunmaktadır. Faaliyette olan 235 OSB'nin 106'sında atık su arıtma tesisi (AAT) aktif olarak işletilmekte, 51'nin atık suları bulunduğu bölgenin belediye kanalizasyonuna deşarj edilmekte, 72'sinin ise atık su arıtma tesisi inşaat veya proje çalışmalarına devam edilmektedir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2020).

OSB'lerde faaliyet gösteren sanayi tesisleri ülkemiz sanayisinin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır.

Çalışmada Marmara Bölgesindeki atık su arıtma tesisi bulunan; Balıkesir, Bandırma, Bilecik Bozüyük, Bilecik 1, Bilecik 2, Barakfakih, Bursa, Bursa Deri İhtisas, Demirtaş, Hasanağa, İnegöl, Kestel, Mustafakemalpaşa, Nilüfer, Uludağ, Yenişehir, Biga, Edirne, Beylikdüzü, İstanbul Deri, İstanbul Tuzla, Kırklareli, Asım Kibar, Gebze, Gebze Dilovası, Gebze Güzeller, Gebze Plastikçiler İhtisas, Gebze Kimya İhtisas, Gebze VI (İMES) Makine İhtisas, Gebze Kömürçüler İhtisas, Kocaeli Makine İhtisas, Kocaeli Otomotiv Yan Sanayi İhtisas, Karasu, Sakarya 3, Çerkezköy, Çorlu Deri İhtisas, Türkgücü, Ergene 2, Muratlı, Yalova Kompozit ve Kimya İhtisas OSB'ler incelenmiştir. Bu OSB'lerde oluşan endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının miktar ve özellikleri ile sahip olduğu ısı değerine ilişkin bilgiler Sanayi ve Teknoloji Bakanlığında alınan verilerle belirlenmiş ve çamurun ek yakıt veya doğrudan yakıt olarak kullanılarak sürdürülebilir bir şekilde üretilebilecek enerji miktarının tespiti amaçlanmıştır.

İncelenen OSB'lerde açığa çıkan arıtma çamuru özelliklerine ilişkin veriler Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik kapsamında yapılan analiz sonuçlarına dayanmaktadır. Veri elde edilemeyen veya yetersiz veri bulunan OSB'lerin arıtma çamuru karakterini belirlemek için analiz sonuçları bilinen diğer arıtma çamurları ile benzetme

yapılmıştır. Benzetme yapılan OSB'nin mevcut atık su durumu, OSB içerisindeki ağırlıklı imalat sektörleri ve sektörlerin tesis sayıları, tesislerin atık su miktarları vb. bilgilerden faydalanılmıştır. Bu yöntemle arıtma çamurlarının nem ve organik madde içeriği de dikkate alınarak kalorifik üst ısı değerinin yanı sıra aynı kriterlere göre ağır metal, akut ve eko toksisite, organik ve inorganik madde içeriklerinin karşılaştırılması ile tehlikeli atık olup olmadığı hakkında yorum yapılmıştır.

OSB içerisinde ağırlıklı bir sektörden açığa çıkan ağır metal veya inorganik madde içeriği yüksek olan arıtma çamurunun, benzetme yapılan arıtma çamurunun aynı ağırlıklı sektör olması durumunda, tesis sayısı ve tesis atık su miktarı dikkate alınarak tehlikeli atık olup olmadığına yönelik yorum yapılmıştır.

Örneğin; deri ihtisas OSB'lerde ağırlıklı sektör deri ile ilgili ürünlerin imalatı olduğu dikkate alındığında, aynı sektör yoğunluğuna sahip diğer deri ihtisas OSB'lerin arıtma çamuru için üst ısı değeri ve tehlikeli veya tehlikesiz atık olduğu değerlendirilmiştir.

Aynı şekilde tekstil sektörünün ağırlıklı olduğu OSB'lerin arıtma çamuru özelliklerine göre, aynı şekilde ağırlıklı sektörü tekstil olan diğer OSB'lerin arıtma çamuru üst ısı değeri ve tehlikeli veya tehlikesiz atık olup olmadığı hakkında yorum getirilmiştir.

Ayrıca arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılıp kullanılmayacağı ve kullanılması durumunda sağlanan avantaj ve dezavantajlar değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR

Çimento fabrikalarında genellikle ek maliyetler ve taşımadaki zorluklardan dolayı kurutulmuş çamurun değerlendirilmesi istenmektedir. Arıtma çamurunu kabul eden çimento fabrikalarının yaş çamur alması durumunda, alınan çamuru kurutma tesisinde kurutması gerekmektedir. Öte yandan her atık yanma odasında yakılamaz. Örneğin yapışkan, parlayıcı, patlayıcı vb. özellikte olan atıkların yakılması prosese zarar vereceği için kabul edilmemektedir. Bunun yanında; yakmada kabul

edilmeyecek atıkların yeniden değerlendirilebilmesi için yanma standartlarına uygun ek yakıtların hazırlanması söz konusudur. Bu durumda yanma kabul standartlarına uygun halde atıktan türetilmiş yakıtlar hazırlanmaktadır. Yanma için yapılan analiz sonuçlarına göre yakmaya uygun olmayan atıklar, diğer atıklarla karıştırılarak yakma standartlarına uygun bir şekilde ek yakıt haline getirilmektedir. Böylece atıktan türetilmiş yakıtlar ek yakıt olarak kullanılabilir.

Büyük yakma tesislerinde yanma verimi oldukça önemli bir konudur. Yanma verimi ne kadar yüksek olursa yanma sonucu ortaya çıkan emisyonları kontrol altına almak kolaylaşır ve mevzuat hükümlerine göre tesislerin işletilmesi sağlanır. Çimento üretim tesislerinde yanma gazları CO, CO₂, TOC, NO_x, SO₂, HF ve HCl gazlarıdır. Bu gazlar yanma verimi ve prosesin işletilmesi konularında önemli bilgiler sağlar.

Yanma verimini etkileyen diğer bir konu mevcutta kullanılan ana yakıtta ek yakıt eklenmesidir. Çimento tesislerinde yakma ünitesine hem ana yakıt hem de ek yakıt hazırlanırken en son aşamada değirmenden geçirilerek yaklaşık 0.3 mm boyutlarına getirilir ve hava ile yanma ünitesine verilir. Bu durumda yanma odasına ek yakıt eklenirken fazladan hava verildiği için yanma rejiminde değişiklik olacak ve bu durumda da yanma veriminde azalma olacaktır. İşletme açısından istenmeyen bir durum olsa da genel olarak emisyon ve sera gazı gibi diğer çıktılar düşünülürse ek yakıt kullanımı hem çevreci hem de var olan atıkların değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Yakma ünitesinde tam yanmanın olup olmadığı bacadan atmosfere bırakılan duman gazlarındaki O₂, CO₂ ve CO değerlerinin ölçülmesi ile tespit edilir. Baca gazında yüksek oranda CO₂ bulunması tam yanmanın gerçekleştiğini gösterir. Baca gazında CO bulunması eksik ya da yetersiz yanma olduğunun göstergesidir. Yani yakma ünitesinde yanma sonucu ortaya çıkan CO ve TOC miktarı düşük ise yanma veriminin yüksek olduğuna, NO_x miktarı yüksek ise de tam aksine yanma veriminin düşük olduğuna işaret eder. Enerji kaybı ve kirletme etkisi nedeniyle, baca gazları içerisinde CO olması istenilmez. Büyük yakma tesislerinde bu gazların

çıkış emisyonları sürekli takip edilir ve üretim sürecine çıkan emisyon değerlerine göre gerekli müdahaleler yapılır (Savaş ve Kocabaş 2019)

Atık yakmanın avantaj ve dezavantajlarını incelersek; avantaj olarak NO_x indirgenecek ve yanma verimi artacaktır. Yakıtta ek yakıt olarak atık kullanılması durumunda toz emisyonu azalacaktır. Çimento tesislerinin yakma tesislerine göre en önemli avantajlarından biri de, bakiye atık oluşmamasıdır. Oluşan kül, çimento ara ürününün içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Dezavantaj olarak atık içerisinde olabilecek diğer katkılardan dolayı HF ve HCl kontrolü gerekecektir. Diğer bir dezavantaj ise TOC ve CO emisyonlarıdır. Yanma odasına ek yakıt eklenmesi durumunda TOC ve CO artacağı için proses kontrolü zorlaşabilir.

Yakmaya kabul edilecek atıkların öncelikle alt ve üst ısıl değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Çünkü yanma odasında belirli sıcaklığı sağlayacak nitelikte yakıtın yakılması esastır. Aynı durum arıtma çamurlarının yakılması içinde geçerli bir kuraldır. Arıtma çamurları yanma odasına alınmadan önce gerekli analizleri yapılır. Öncelikle çamurun nemi alınarak %90-95 kuruluğa getirilmektedir. Yanma esnasında buharlaşmaya enerji harcanmaması gereklidir. Nemi alınmış yakıt kalorimetre cihazında yakılarak ısıl değeri tespit edilir. Son aşama olarak çıkan külden kimyasal içeriği tespit edilir. Yakmaya kabul edilecek yakıtın elementel analiz sonuçlarına göre karar verilir. Elementel analiz XRF cihazlarında yapılır. Çıkan sonuca göre proses ve yanma verimi göz önüne alınarak değerlendirilir ve karar verilir.

Atıktan türetilmiş yakıtların ek yakıt olarak kullanılabilmesi için kalori değerinin 2 500 kcal/kg üzerinde, Cl değerinin %1'in, nemin %25'in ve boyutunun ise 50 mm'nin altında olması gerekmektedir. Bu durum kuru arıtma çamurunda ise kalori değeri 2 000 kcal/kg üzerinde, Cl elementinin yine %1'in, nemin %10 ve boyutunun ise yine 50 mm altında olması istenir. Bunların yanında analizlerde dikkat edilen diğer husus ise SO₃ bileşiği ile Cr elementidir. Cr elementinin yüksek olması durumunda üründe tahriş edici bir durum oluşturduğu için yüksek Cr içeriği olan yakıtlar yanmada tercih edilmemektedir. SO₃ ile Cl

ise proseste meydana getirdiği olumsuz etkilerden dolayı yine yakıt içeriğinde olması durumunda istenmeyen yakıt cinsine girmektedir.

Yapılan analiz sonucu arıtma çamurunun kalori değerinin 2 000 kcal/kg altında olduğu tespit edilirse, diğer atıklarla karıştırılmak suretiyle kalori değerinin arttırılarak yine uygun yakıt haline dönüştürülebilmektedir. Atıktan türetilmiş yakıtların standartları ilgili mevzuatta belirlenmişken, kuru çamurun yakıt olarak kullanılması çimento fabrikalarının kendi kabul değerlerine bırakılmıştır. Her iki durum karşılaştırıldığında kuru arıtma çamuru kabul değerlerinin mevzuat hükümlerini karşıladığı görülmektedir.

Çimento sektöründe emisyon konusu oldukça önemlidir. Bu tesisler büyük yakma tesisleri sınıfında olduğu için emisyonları hem yanma emisyonu hem de sera gazı emisyonları olarak değerlendirilmektedir.

Yanma emisyonları, ilgili mevzuatlarla sınır değerleri belirlenmiş olan emisyonlardır. Büyük yakma tesislerinde yanma emisyonları online olarak izlenmekte ve ayrıca iki yılda bir kaynaktan emisyon ölçümleri yapılarak takip edilmektedir. Ayrıca çimento fabrikalarında atıkların yakılması durumunda da üç ayda bir periyodik ölçümlerle PAH, ağır metal ve yanma gazları sürekli takiple kontrol edilmektedir.

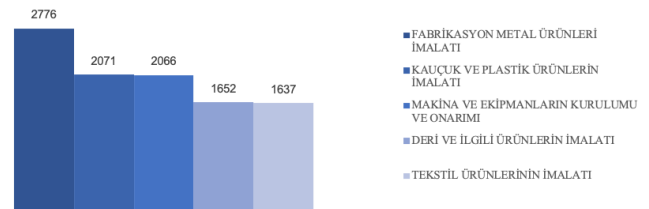
Diğer emisyon konusu olan sera gazı emisyonları yıllık olarak hesaplanmakta ve raporlanmaktadır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması hem çevreci bir üretim hem de ileri zamanlarda vergi muafiyeti sağlayacak bir konudur. Atıkların yakılarak sera gazı emisyonlarının düşürülmesi konusunda en önemli konu atığın biyokütle oranıdır. Biyokütle oranı ne kadar yüksek olursa sera gazı emisyonunun azaltılmasına ciddi katkı sağlayacaktır. Bu yüzden biyokütle oranı yüksek olan arıtma çamurunun yakılması çimento fabrikalarına önemli bir kazanç sağlamakta, aynı zamanda atıkların yakılarak bertarafıyla çevre kirliliğinin azaltılmasına destek olmaktadır.

Türkiye genelinde 2020 yılı ilk yarısı verilerine göre atık su arıtma tesisi bulunan 106 OSB'nin

toplam atık su arıtma tesisi kapasitesinin 1 518 000 m³/gün, arıtılan atık su miktarının yaklaşık 988 000 m³/gün, arıtma sonucu oluşan arıtma çamuru miktarının yıllık yaklaşık 520 000 ton olduğu tespit edilmiştir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2020).

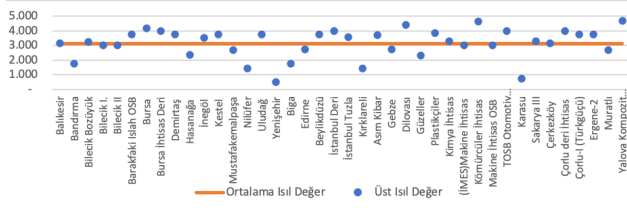
Marmara Bölgesinde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığından tüzel kişilik kazanmış toplam 88 OSB vardır. Bunlardan faaliyette olan 70 OSB'nin 45'inin atık su arıtma tesisi bulunmaktadır. Marmara Bölgesinde bulunan 12 OSB'nin atık suları bulunduğu bölgenin belediye kanalizasyonuna deşarj edilmekte, 13'ünün ise atık su arıtma tesisi inşaat veya proje çalışmalarına devam edilmektedir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2020).

Arıtma çamurlarının sınıflandırılması ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Marmara Bölgesinde bulunan OSB'lerde faaliyet gösteren imalat sanayi sektörleri incelenmiştir. Bölgedeki OSB'lerde faaliyette olan toplam 29 495 sanayi parseli bulunmaktadır. Henüz faaliyet başlanmamış 5 094 adet boş sanayi parseli vardır. OSB'lerde üretim yapan ilk 5 imalat sektörü 2 776 tesis ile fabrikasyon metal ürünleri imalatı, 2 071 tesis ile kauçuk ve plastik ürünlerin imalatı, 2 066 tesis ile makine ve ekipmanların kurulumu ve onarımı, 1 652 tesis ile deri ve ilgili ürünlerin imalatı ve 1 637 tesis ile tekstil ürünlerinin imalatıdır. İlk 5 sektöre ait bilgiler Şekil 1'de gösterilmiştir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2020).



Şekil 1. Marmara Bölgesindeki OSB'lerde imalat sanayinin ilk 5 sektör dağılımı

Marmara Bölgesinde; atık su arıtma tesisi bulunan 40 OSB'nin atık su arıtma kapasitesi toplam 942 515 m³/gün, arıtılan atık su miktarı yaklaşık 545 000 m³/gün, arıtma sonucu oluşan arıtma çamuru miktarı yıllık yaklaşık 181 600 ton, arıtma çamurlarının ortalama üst ısıl değeri ise ortalama 3 250 kcal/kg'dır. Şekil 2'de Marmara Bölgesinde atık su arıtma tesisi bulunan OSB'lerden oluşan endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının üst ısıl değeri ve ortalama ısıl değeri gösterilmektedir.



Şekil 2. Marmara Bölgesindeki OSB’lerde oluşan endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının üst ısıl ve ortalama üst ısıl değeri

Analiz sonuçları bilinen 25 OSB’nin arıtma çamuru, sektörel yoğunluk, mevcut atık su durumu, sektörlere ait tesis sayıları gibi bilgiler dikkate alınarak diğer 15 OSB ile benzetme yapılmıştır. Benzetme sonucunda; 17 OSB’nin arıtma çamuru tehlikeli atık sınıfında iken 23 OSB’nin tehlikesiz sınıfta olduğu değerlendirilmiştir. Çizelge 1’de Marmara Bölgesinde bulunan OSB’lerin atık su arıtma tesislerinin toplam kapasitesi, arıtılan yaklaşık atık su miktarı, yıllık yaklaşık oluşan çamur miktarı, arıtma çamurunun ortalama üst ısıl değeri ile tehlikeli/tehlikesiz atık bilgileri verilmektedir.

Çizelge 1. Marmara Bölgesindeki OSB’lerde oluşan arıtma çamuru genel bilgisi						
Bölge Adı	Toplam AAT Kapasitesi (m ³ /gün)	Arıtılan Atık Su Miktarı (m ³ /gün)	Arıtma Çamuru Miktarı (ton/yıl)	Ortalama Üst Isıl Değer (kcal/kg)	Tehlikeli (OSB Sayısı)	Tehlikesiz (OSB Sayısı)
Marmara Bölgesi	942 515	545 000	181 600	3 250	17	23

Arıtma çamurlarının organik madde içeriğinden dolayı ihtiva ettiği ısıl değer, termal yollarla işletilmesi durumunda yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Kuru bazda arıtma çamurları ısıl değere sahip olduğu için aynı zamanda alternatif bir enerji kaynağıdır. Arıtma çamuru kuru halde ısıl değeri 9 ile 29 MJ/kg arasında değişen bir çeşit biyokütle kaynağıdır (Doğru vd. 2002). Yanma odasına alınan arıtma çamurunun kalorifik değeri 8 000 kJ/kg alındığında 1,67 kWh/kg enerji kazanımı sağlanmaktadır (Nurbay ve Kılıçaslan 2012). Arıtma çamurları, toplam organik karbon ve katı madde içeriğine göre ısıl değeri değişiklik gösterir. Çürütülmüş arıtma çamurunun ısıl değeri düşük kaliteli linyite eş değer 2 500 kcal/kg iken ham çamurun ısıl değeri 4 180 kcal/kg’dır. Yağ ve gres içeren arıtma çamurlarının ısıl değeri çok daha yüksektir. Arıtma çamurlarının ısıl değeri çamurun

uçucu madde içeriği ve tipine bağlıdır. Anaerobik çürütülmüş çamurun ısıl değeri 2 750 - 3 000 cal/g’dır (Filibeli 1997). Termal işlem uygulanacak çamurun nemi alınarak ısıl değeri arttırılmalıdır. Arıtma çamurunun kalorifik değerine göre üretilebilecek enerji miktarı aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir.

$$1 \text{ kJ/kg} \longrightarrow 0,238846 \text{ kcal/kg} \quad (1)$$

$$1 \text{ kJ/kg} \longrightarrow 0,000278 \text{ kWh/kg} \quad (2)$$

$$1 \text{ kW} \longrightarrow 0,001 \text{ MW} \quad (3)$$

Marmara Bölgesinde bulunan OSB’lerin atık su arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurunun ortalama üst ısıl değerine göre; 1 kg arıtma çamurundan 3,6634 kWh elektrik enerjisi üretilebileceği değerlendirilmiştir. Marmara Bölgesi genelinde oluşan yıllık arıtma çamuru miktarı dikkate alındığında üretilebilecek enerji miktarı yıllık yaklaşık 665 MW olarak hesaplanabilir. Bir evin ortalama aylık elektrik tüketimi 238 kWh düşünülürse, arıtma çamurlarından üretilen enerji ile aylık 233 evin elektrik ihtiyacının karşılanabileceği değerlendirilmektedir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Dünyada ve ülkemizde hızla artan nüfus ve sanayileşme atıkların artmasına sebep olmaktadır. Bu atıkların en önemlilerinden biri de uygun yöntemlerle bertaraf edilmemesi durumunda çevre ve insan sağlığına tehlike oluşturan arıtma çamurlarıdır. Arıtma çamurlarının bertarafında etkili yöntem olan termal işlemler hem atığın geri kazanımı hem de enerji elde edilmesi ve çevreye olan etkisinin en aza indirilmesiyle günümüzde yaygınlaşan çevre dostu bir bertaraf yöntemidir.

Ülkemizde evsel ve endüstriyel arıtma tesislerinin kapasiteleri bilinmesine rağmen oluşan arıtma çamuru hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Özellikle endüstriyel arıtma çamurlarının özellikleri hakkında bilgiler oldukça sınırlıdır. Çamurun ekonomiyeye kazandırılması amacıyla özelliğinin tespit edilmesi hem bertaraf yönteminin belirlenmesi hem de başka bir ürün için hammadde olarak veya enerji kazanımı için kullanılması açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada; Marmara Bölgesinde bulunan organize sanayi bölgelerinde oluşan yıllık arıtma çamurlarının kuru bazda yakıt olarak geri

kazanılması durumunda günlük yaklaşık 1,85 MW elektrik enerjisi üretilbileceği, üretilen bu enerji ile de aylık 233 evin elektrik ihtiyacının karşılanabileceği değerlendirilmektedir. Ancak üretilebilecek bu enerji miktarı tespitinde arıtma çamurunun nemi alınmış ve kuru halde olduğu kabul edilmiştir. Arıtma çamurunun kurutulması için gerekli enerji miktarının ayrıca hesaplanması gerekmektedir.

Arıtma çamurları tek başına enerji üretimi için yakıt olarak kullanılabilirliği gibi aynı zamanda büyük yakma tesislerinden olan çimento fabrikalarında ek yakıt olarak da kullanılabilir. Çimento fabrikalarında kullanılan enerji en büyük maliyet bileşenleri arasında yer almaktadır.

Çimento fabrikalarının üretim prosesi gereği yüksek sıcaklıkta üretim olduğu için çamurun ek yakıt olarak kullanılması, enerji maliyetlerine katkısının yanı sıra yakmadan kaynaklı emisyonlarda azalma, kalıntı madde kalmaması gibi durumlardan dolayı çevreci bir bertaraf yöntemi olarak kabul edilmektedir.

KAYNAKLAR

Ahmad, A. A., Zawawi, N. A., Kasim, F. H., Inayat, A., Khasri, A. (2016). "Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 1333–1347.

Savaş, A. F., Kocabaş, C. (2019) "Endüstriyel Kazanlarda Yanma Veriminin Süreç Geliştirme Teknikleri Kullanılarak İyileştirilmesi". *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 357-368.

Akyarlı, A., Şahin, H. (2005). "Arıtma Çamurlarının Bertarafında Kireç Kullanımı." *I. Ulusal Arıtma Çamurları Sempozyumu*, Antalya.

Akpınar, N., (2006). "Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi". *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul-Türkiye.

Alexandros, K., Athanasios, S.S. (2012). "Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries". *International journal of integrated waste management*, (32)6, 1192.

Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., Dewil, R. (2008). "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste- activated sludge". *Progress in Energy and Combustion Science*, 34:755–781.

Yakma yöntemi, biyokütleden yakıt üretimi, düşük SO₂ ve NO_x emisyonu, yüksek yanma verimi, çıkan külün başka ürünlerin üretiminde hammadde olarak kullanılması, ekolojik olarak çevreye katkısı gibi birçok avantajından dolayı tüm dünyada giderek artan bir bertaraf yöntemi olarak uygulanmaktadır. Yakma yönteminin belirli plan ve politikalarla sürdürülebilir bir şekilde ülkemizde de yaygınlaşması büyük önem arz etmektedir. Bu yönüyle endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının kaynakların rasyonel kullanılmasının yanı sıra enerji ihtiyacına sağlayacağı katıdan dolayı bölgesel yakma tesisleri kurulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Areias, I. O. R., Vieira, C. M. F., Colorado, H. A., Delaqua, G. C. G., Monteiro, S. N., Azevedo, A. R. G. (2020). "Could city sewage sludge be directly used into clay bricks for building construction A comprehensive case study from Brazil". *Journal of Building Engineering*, 31, Article 101374.

Ayvaz, Z., (2000). "Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi". *Çev-Kor Dergisi*, 9(35): 3-12.

Bianchini, A., Bonfiglioli, L., Pellegrini, M., Saccani, C. (2016). "Sewage sludge management in Europe: a critical analysis of data quality". *International Journal of environment and waste management*, 18(3): 227.

Bora, A. P., Gupta, D. P., Durbha, K. S. (2020). "Sewage sludge to bio-fuel: A review on the sustainable approach of transforming sewage waste to alternative fuel". *Fuel*, 259, Article 116262.

Bozkurt, A.U., (2008). "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirilmesi". *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir-Türkiye.

Chang, Z., Long, G., Zhou, J. L., Ma, C. (2020). "Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review". *Resources, Conservation & Recycling*, 154, Article 104606.

- Choi, O. K., Park, J. Y., Kim, J. K., Lee, J. W. (2019). "Bench- scale production of sewage sludge derived-biodiesel (SSD- BD) and upgrade of its quality". *Renewable Energy*, 141: 914- 921.
- Cremades, L. V., Cusido, J. A., Arteaga, F. (2018). "Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles". *Journal of Cleaner Production*, 201: 1071-1080.
- Commission of European Communities. (1998). "Council Directive 91/271/EEC 21 March 1991 concerning urban waste-water treatment". (amended by the 98/15/EC of 27 February 1998).
- Dahhou, M., El Moussaouiti, M., Arshad, M. A., Moustahsine, S., Assafi, M. (2018). "Synthesis and characterization of drinking water treatment plant sludge-incorporated Portland cement". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20: 891-901.
- Davis, R. (1996). "The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal". 65: 9.
- Doğru, M., Midilli, A., Howarth, C.R., (2002). "Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis". *Fuel Processing Technology*, 75(1): 55-82.
- Eroğlu, M., (2011). "Enerji Çeşitliliği ve Gümüşhane İli Su Potansiyelinin Hidroelektrik Enerji Üretimi Yönünden İncelenmesi". Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi. Gümüşhane-Türkiye.
- Ewais, E., Elsaadany, R., Ahmed, A., Shalaby, N., Al-Anadouli, B. (2017). "Insulating refractory bricks from water treatment sludge and rice husk ash". *Refractories and Industrial Ceramics*, 58: 136-144.
- Fang, P., Tang, Z. J., Huang, J. H., Cen, C. P., Tang, Z. X., Chen, X. B. (2015). "Using sewage sludge as a denitration agent and secondary fuel in a cement plant: A case study". *Fuel Processing Technology*, 137: 1-7.
- Filibeli A., (1997). "Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri, İşleme ve Bertaraf Yöntemleri". DEÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi, 19, İzmir.
- Fytli, D., Zabaniotou, A. (2008). "Unutilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review". *Renewable and sustainable energy reviews*, Science Direct, 12: 116-140.
- Gadsboll, R. O., Thomsen, J., Bang-Moller, C., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. (2017). "Solid oxide fuel cells powered by biomass gasification for high efficiency power generation". *Energy*, 131: 198-206.
- Godfree, A. (2003). "Health constraints on the agricultural recycling of wastewater sludges". *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*, 281: 98.
- Gonzalez-Corrochano, B., Alonso-Azcarate, J., Rodriguez, L., Lorenzo, A. P., Torio, M. F., Ramos, J. J. T., Corvinos, M. D., Muro, C. (2017). "Effect heating dwell time has on the retention of heavy metals in the structure of lightweight aggregates manufactured from wastes". *Environmental Technology*, 39: 2511-2523.
- Göçmez, S., (2006). "Menemen Ovası Topraklarında İzsu Kentsel arıtma Çamuru Uygulamalarının Mikrobiyal Aktivite ve Biyomas ile Bazı Fiziksel ve Kimyasal Toprak Özellikleri Üzerine Etkisi". Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ege Üniversitesi. İzmir-Türkiye.
- Hall, J.E., (1995). "Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union". *Water and Environment Journal*, 9(4): 335-343.
- Hasanbeigi, A., Lu, H., Williams, C., Price, L., (2012). "International best practices for pre-processing and co-processing municipal solid waste and sewage sludge in the cement industry". Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 3.
- Kaya, A. (2012). "An inventory study for municipal sludge production in aegean region". *Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Natural and Applied Sciences*, 10-13.
- Kaantee, U., Zevenhoven, R., Baxkman, R., Hupa, M. (2004). "Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 85, 293-301.
- Kelessidis, A., Stasinakis, A. S. (2012). "Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European Countries". *Waste management*, 32(6): 1186-1195.
- Kempkens, W. (1993) "Alkohol and biogas aus abwaser". *Bild der wissenschaft*, (12)83: 34.
- Kumar, V., Chopra, A. K., Kumar, A. (2017). "A review on sewage sludge (Biosolids) a resource for sustainable agriculture". *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 2(4): 340-347.
- Lam, C. M., Hsu, S. C., Alvarado, V., Li, W. M. (2020). "Integrated life-cycle data envelopment analysis for techno- environmental performance evaluation on sludge to energy systems". *Applied Energy*, 266, Article 114867.
- Lasaridi, K. E., Manios, T., Stamatiadis, S., Chroni, C., Kyriacou, A. (2018). "The evaluation of hazards to man and the environment during the composting of sewage sludge". *Sustainability*, 10, Article 2618.
- Ledakowicz, S., Stolarek, P., Malinowski, A., Lepez, O. (2019). "Thermochemical treatment of sewage sludge by integration of drying and pyrolysis/autogasification". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104: 319-327.

- Lin, Y. M., Zhou, S. Q., Li, F. Z., Lin, Y. X. (2012). "Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement". *Journal of Hazardous Materials*, 213-214: 457-465.
- Li-ping, X., Tao, L., Jian-dong, G., Xue-ning, F., Xia, W., Yuan-guang, J., (2015). "Effect of moisture content in sewage sludge on air gasification". *J Fuel Chemical Technology*, 38(5), 615-620.
- Lu, S., Yang L., Zhou F., Wang F., Yan J., Li X., Chi Y., Cen K. (2013). "Atmospheric emission characterization of a novel sludge dryin gand co-combustion system". *Journal of Environmental Sciences*, 25(10): 2088-2092.
- Marrero, T., McAuley, B., Sutterlin, W., Morris, S., Manahan, S. (2003). "Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge". *Waste Manage*, 24 (193): 8.
- Milbrandt, A., Seiple T., Heimiller, D., Skaggs, R., Coleman, A. (2018). "Wet waste-to-energy resources in the United States". *Resources, Conservation & Recycling*, 137: 32-47.
- Minelgaite, A., Liobikiene, G. (2019). "Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours". *Science of The Total Environment*, 667: 86-93.
- Mountouris, A., Voutsas, E., Tassios, D., (2006). "Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis". *Energy Conversion and Management*, 47: 1723-1737.
- Mountouris, A., Voutsas, E., Tassios, D., (2008). "Plasma gasification of sewage sludge: process development and energy optimization". *Energy Conversion and Management*, 49: 2264-2271.
- Murray, A., Price, L. (2008). "Use of alternatice fuels in cement manufacture: Analysis of fuel characteristics and feasibility for use in Chinese cement sector". Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 5.
- Nipattummakul, N., Ahmed, I., Kerdsuwan, S., Gupta, A., (2010). "Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification". *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 11738-11745.
- Orhon, D. (1991). "Ön Arıtmanın Projelendirilmesi. Endüstriyel Atıksuların Ön arıtılması". *Teknoloji İletimi Semineri*, 131-173.
- Otero, M., Rozada, F., Calvo, L.F., Garcia, A.I., Moran A., (2003) "Elimination of organic water pollutants using adsorbents obtained from sewage sludge". *Water Sci Technology*, 57: 55-65.
- Öztürk, İ. (2017). "Atıksu Mühendisliği". İstanbul: İSKİ Genel Müdürlüğü.
- Petersen, I., Werther, J., (2005). "Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed". *Chemical Engineering and Processing*, 44: 717-736.
- Pietzsch, N., Ribeiro, J.L.D., De Medeiros, J.F. (2017). "Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review". *Waste Management*, 67: 324- 353.
- Punmatharith, T., Rachakornkij, M., Imyim, A., Wecharatana, M. (2010). "Co-processing of grinding sludge as alternative raw material in portland cement clinker production". *Journal of Applied Sciences*, 10 (15): 1525-1535
- Shayana, E., Zareb, V., Mirzaee, I. (2018). "Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents". *Energy Conversion and Management*, 159: 30-41.
- Salan, T. (2014). "Atıksu arıtma çamurlarının Türkiye'deki durumu ve enerji üretiminde değerlendirilme olanakları". 20. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, 191.
- Samolada, M. C., Zabaniotou, A. A. (2014). "Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece". *Waste Management*, 34: 411-420.
- Sanger, M., Werther, J., Ogada, T. (2001). "NOx and N2O Emission Characteristics from Fluidized Bed Combustion of Semi-Dried Municipal Sewage Sludge". *Energy Conversion and Management*, 167-177.
- Saygılı, G. (2019, Ekim). "Türkiye'de Arıtma Çamuru Yönetimi ve Toprakta Kullanım". Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanımı Sempozyumu, Sakarya.
- Soysal, C., (2008). "Dizel Motorlarında Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Kullanılmasının Motor Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi". Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi. Trabzon-Türkiye.
- Sponar, J. (2002). "Possibilities of using sludge from water treatment plants and sewage disposal plants in silicate Technologies". Ph.D.Thesis, Brno University, Czech Republic.
- Syed-Hassan, S. S. A., Wang, Y., Hu S., Su, S., Xiang J. (2017). "Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: fundamentals, challenges and considerations". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 888-913.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, (2020). Sanayi Bölgeleri Genel Müdürlüğü Kayıtları, Ankara.

- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, (2022). "Çimento Sektör Raporu". Erişim adresi: <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sektor-raporlari/mu0102011404> , Son Erişim Tarihi: 29.12.2022.
- Tezcanar, M., Can, O., (2010, 4-5 Kasım). "Atıktan enerji eldesinde termal bertaraf teknolojileri ve atıksu arıtma çamurlarının susuzlaştırılması". 2. Atık teknolojileri sempozyumu ve sergisi, 151-155, İstanbul.
- Theulen, J., Szabo, L. (2010). "CO2 beneficial sewage sludge recovery by cement kilns". 2nd European conference on sludge management.
- Türkiye İstatistik Kurumu (2017). "Belediye Atıksu İstatistikleri 2016". Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni, Sayı: 24875.
- Topaç, F. O., Uçaroğlu, S. (2020). "Atıksu Arıtma Çamurlarının Sürdürülebilir Kullanım Alternatifleri: Öncelikli Yaklaşımlar". Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 20: 728-739.
- Tsiligiannis, A., Tsiliyannis, C. (2020). "Oil refinery sludge and renewable fuel blends as energy sources for the cement industry". Renewable Energy, 157: 55-70.
- Uzun, P., Bilgili, U., (2011). "Arıtma Çamurlarının Tarımda Kullanılma Olanakları". Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi, 25(2): 135-146.
- Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L. (2013). "Stabilisation of dewatered domestic sewage sludge by lime addition as raw material for the cement industry: Understanding process and reactor performance". Chemical Engineering Journal, 232: 458-467.
- Vesilind, P. A., Hartman, G. C., Skene, E. T. (1988). "Sludge management and disposal: for the practicing engineer. In Sludge management and disposal: for the practicing engineer". Lewis Publishers.
- Vigneswaran, S., Kandasamy, J. (2009). "Sludge Treatment Technologies". Waste Water Treatment Technologies - Volume II: 99.
- Yamak, T., (2006). "Türkiye'nin Alternatif Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Ekonomik Analizleri". Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi. İstanbul- Türkiye.
- Yaman, K., (2009). "Arıtma Tesisi Çamurunun Tarımsal Amaçlı Kullanımında AB-Türkiye Politikalarının Karşılaştırılması". Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi. Ankara-Türkiye.
- Yang, G., Zhang, G., & Wang, H. (2015). "Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China". Water research, 78, 60-73.
- Werle, S., (2012). "Modeling of the reburning process using sewage sludge- derived syngas". Waste Management, 32: 753-758.
- Wether, J., Ogada, T., (1999). "Sewage sludge combustion". Progress in energy and combustion science, 25: 55-116.
- Wisniowska, E., Grobelak, A., Kokot, P., Kacprzak, M. (2019). "Sludge legislation-comparison between different countries". In Industrial and Municipal Sludge, 201-224.
- Zabaniotou, A., Theofilou, C. (2008). "Green energy at cement kiln in Cyprus — Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute". Renew. Sustain. Energy Rev., 12: 531-541.
- Zhang, L., Xu, C. C., Champagne, P., Mabee, W. (2014). "Overview of current biological and thermochemical treatment Technologies for sustainable sludge management". Waste Management&Research, 32(7): 586-600.