








Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Avrupa Ülkelerinde Çamur Bertaraf Stratejilerine Etki Eden Faktörler

 Ayşe Elif ATEŞ^a,  Sinan ATEŞ^a,  M.İberya AYDIN^b,  Serdar AYDIN^a,  Hüseyin SELÇUK^a

^a Çevre mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İstanbul, TÜRKİYE

^b Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü, Hidrojen Araştırma Merkezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ayseelif.ates@iuc.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1246644

ÖZ

Bu çalışmada Avrupa ülkelerinde üretilen toplam arıtma çamuru miktarları ve çeşitli faktörlere göre çamur bertaraf stratejilerinin tercih nedenleri araştırılmıştır. Çalışmada Avrupa İstatistik Kurumu ve literatürden alınan veriler seçilirken küresel şartlar göz önünde bulundurulmuştur ve en doğru veri setleri seçilerek değerlendirme yapılmıştır. Avrupa ülkelerinde birincil, ikincil ve üçüncül arıtmadan kaynaklanan arıtma çamuru üretimi kişi başına kuru ağırlık ortalama 42 g/kişi.gün ya da 15,26 kg/kişi.yıl olarak hesaplanmıştır. Arıtma çamuru bertaraf yöntemlerinin maliyetleri, ülkelerin yüzey alanları, milli gelirleri ve enerji ihtiyaçlarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Yüzey alanı düşük olan ve çamur miktarı yüksek olan ülkelerin arıtma çamuru bertaraf yöntemi olarak yakmayı tercih ettikleri görülmesine rağmen bertaraf seçiminde ülkenin milli geliri ve enerji ihtiyacının da yöntem seçiminde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışma bütünüyle incelendiğinde arıtma çamurunun bertaraf yöntemi seçiminde faktörlerin tek başına önemli oranda benzer sonuç verdiği bulunmuştur ancak daha doğru bağlantılar kurulabilmesi için bütün olarak hepsinin ele alınması gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Arıtma çamuru, Avrupa ülkeleri, Bertaraf stratejileri

Factors Affecting Sludge Disposal Strategies in European Countries

ABSTRACT

In this study, the total amount of sewage sludge produced in European countries and the reasons for choosing sludge disposal strategies according to various factors were investigated. In the study, global conditions were taken into consideration while selecting the data taken from the European Statistical Institute and the literature, and the most accurate data sets were selected and evaluated. Sewage sludge production from primary, secondary and tertiary treatment in European countries is calculated as an average of 42 g/person.day per capita dry weight or 15.26 kg/person.year. The disposal methods were compared according to the costs, surface areas, national incomes and energy needs of the countries. Although it is seen that countries with low surface area and high amount of sludge prefer incineration as treatment sludge disposal method, it has been determined that the national income and energy needs of the country are also very effective in the selection of the method. When the study was examined in its entirety, it was found that the factors in the selection of the treatment sludge disposal method alone gave significantly similar results, but it was seen that all of them should be considered as a whole in order to establish more accurate connections.

Keywords: Sewage sludge, European countries, Disposal strategies

I. GİRİŞ

Küresel nüfus artışının giderek hızlanmasıyla kentsel atıksu arıtma tesislerine gelen atıksu yükü artmaktadır. Evsel ve endüstriyel atıksu arıtımı sonucunda arıtma tesislerinde yan ürün olarak arıtma çamuru oluşmaktadır [1]. Literatürde kentsel atıksu arıtımı sonucunda oluşan çamur, kentsel arıtma çamuru olarak tanımlanmaktadır. Çamur bertarafı yöntemi seçimi toprak ve su kirliliğinin önlenmesi, halk sağlığının korunması gibi çevresel sorunların çözümünde kritiktir. Arıtma prosesleri sonucunda oluşan arıtma çamuru yüksek organik madde ve konsantre inert madde içeriğine sahip olup arıtma çamurunun bertaraf yerlerinin kısıtlı olmasıyla birlikte dünya çapında yönetilmesi gereken problem haline gelmektedir. Kentsel arıtma çamuru yönetimi olarak yeniden kullanım veya nihai bertarafı olarak iki ana strateji belirlenmiştir. Bu stratejilerde çamurun karakterizasyonu, maliyet, bertaraf alanının özellikleri gibi parametreler çevresel kalite standartlarının bozulmaması için dikkate alınması gereken konulardır. Arıtma çamurunun yeniden kullanılması için birçok proses vardır ancak bunların uygulanabilirliğine ilişkin dezavantajları mevcuttur [2]. Örneğin arıtma çamurunun düzenli depolanma alanlarında depolanması sonrasında metan üretiminin sağlanabilmesi avantaj oluştururken mevcut depolama alanlarının kapasitelerinin sınırlı olması bu durumu dezavantaja dönüştürmektedir. Evsel atıksu arıtma tesisi sonucunda oluşan çamurun besin bileşenlerinin toprak şartlandırıcısı ve gübre olarak kullanılmasına uygun olması sonucunda çamurun faydalı kullanımına olanak sağlamaktadır. Atıksu arıtımından sonra oluşan arıtma çamurunun üretim prosesleri farklılıklar gösterdiği için, yeniden kullanılabilmesi için bazı özel işlemler uygulanmalıdır. Arıtma çamuru yüksek oranda çakıl veya kum gibi büyük taneli katı maddelerden, organik ve inorganik maddelerden oluştuğu gibi atıksu arıtım prosesine bağlı olarak patojenik mikroorganizmalar, ağır metaller ve toksik veya toksik olmayan kirlenimler içerebilir [3]. Atık suyun arıtma proseslerine bağlı olarak, birincil (fiziksel ve/veya kimyasal), ikincil (biyolojik) ve üçüncül (ikincil arıtmaya ek olarak, genellikle besin giderimi) çamur olarak oluşmaktadır. Arıtma tesislerinde oluşan çamurun verimli bir şekilde stabilizasyonu ve bertarafı için, çamurun özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 1’ de birincil çamur, biyolojik çamur, karışık çamur ve çürütülmüş çamurun kimyasal bileşimi ve özellikleri verilmiştir [4], [5], [6].

Genel olarak, stabilizasyonu sağlanmış kentsel atıksu arıtma tesisinde oluşan çamurda %30–%55 organik madde, %3’e kadar toplam azot, %0,7–%1,5 toplam fosfor, %0,7 toplam potasyum içeriği, %10–%20 C/N oranı ve çeşitli seviyelerde ağır metal iyonları bulunur ayrıca pH’ı 6,5–7,5 aralığındadır. Susuzlaştırma işlemi uygulanmış çamurun ısı değeri yaklaşık 12.000–15.000 kJ/kg’dır [7].

Tablo 1. Atıksu arıtma tesislerinde farklı proseslerde oluşan çamurların karakterizasyonu [4], [5], [6].

Parametre	Birincil Çamur ^a	Biyolojik Çamur ^b	Biyolojik Çamur ^c	Karışık Çamur ^d	Çürütülmüş Çamur
Kuru Katı (KK), (% g/L)	12	9	7	10	30
Uçucu katı (UK), (%KK)	65	67	77	72	50
C, %UK	51.5	52.5	53	51	49
H, %UK	7	6	6.7	7.4	7.7
O, %UK	35.5	33	33	33	35
N, %UK	4.5	7.5	6.3	7.1	6.2
S, %UK	1.5	1	1	1.5	2.1
C/N	11.4	7	8.7	7.2	7.9
P, %KK	2	2	2	2	2
Cl, %KK	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
K, %KK	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Al, %KK	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ca, %KK	10	10	10	10	10
Fe, %KK	2	2	2	2	2
Mg, %KK	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Yağ, %KK	18	8	10	14	10

Protein, %KK	24	36	34	30	18
Lif, % KK	16	17	10	13	10
Isıl deęer, kW h/t KK	4200	4100	4800	4600	3000

^aBirincil çamur; fiziksel/kimyasal arıtım sonrasında yüksek kirliliğe sahip çamur

^bBiyolojik çamur

^cÇöktürme tankından gelen biyolojik çamur

^dKarışık çamur (a+c)

Küresel olarak artan enerji ihtiyacı yenilenebilir enerji kaynaklarına talebi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak organik atıklar kolay ulaşılabilmesi ve enerji eldesinde kullanılacak teknolojilerin çeşitliliğinin olması nedeniyle birçok ülkede tercih edilmektedir. Arıtma çamurları yüksek organik içerik ve enerji potansiyeli nedeniyle sürdürülebilir bir kaynak olarak kabul edilmektedir [8]. Ancak arıtma çamurunun bir ürün olarak görülmesi hususunda tartışmalar halen devam etmektedir. Yönetimlerin benimsediğı genel algı arıtma çamurlarının problem olmasıdır. Buna rağmen yapılan akademik çalışmalarda artıma çamuru yanlış yönetilerek israf edilen bir kaynak olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmaların detaylandırılması ve uygulanabilirliğinin artmasıyla artıma çamuru problem olmaktan çıkıp değerli bir ürün olarak kabul görebilir ve doğru stratejilerle hem çevresel hem de enerji eldesinde kullanılabilir [9]. Sürdürülebilir kentsel arıtma çamuru yönetiminin sağlanması için mevcut teknolojilerle birlikte politika düzenlemeleri, coğrafi konum ve sosyo-ekonomik konular gibi diğer parametreler de dikkate alınmalıdır. Bu parametrelere ek olarak doğru yönetim stratejilerine karar verebilmek için yönetimlerin belirlediğı standartlar ve teknik maliyetlerinde göz önüne alınması gerekmektedir [10], [11]. Çalışma kapsamında çamur stabilizasyon yöntemleri ve AB ülkelerinin çamur yönetim stratejileri değerlendirilmiştir.

II. ÇAMUR STABİLİZASYON YÖNTEMLERİ

Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda arıtma çamuru bertaraf yöntemlerinde önemli değişiklikler olmuştur. 1998'den önce kentsel arıtma çamurları deniz deşarjı, tarım arazilerinde gübre olarak kullanım, çamur yakma veya basitçe depolama yöntemleriyle bertaraf edilmiştir [12]. 1998'de yayınlanan Avrupa birliği mevzuatı kapsamında deniz ekosistemini korumak amacıyla arıtma çamurunun denize deşarjı yasaklanmıştır. Mevzuat kapsamında ayrıca arıtma çamurlarının düzenli depolama sahalarına gönderiminin aşamalı olarak azaltılması istenmektedir. Fakat yapılan çalışmalarda Avrupa'daki arıtma çamurunun %35-45'inin hala düzenli depolama sahalarına atıldığı görülmektedir. Arıtma çamurları yüksek organik madde içeriğı sayesinde, stabilizasyon işlemleri sonrasında genellikle tarım arazileri için gübre ve/veya toprak ıslahı olarak kullanılmaktadır [13]. Bununla birlikte çamur yönetimi daha detaylı incelendiğinde kentsel atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan artıma çamurunun %37'si tarımsal kullanımda, %11'i yakılarak, %40'ı düzenli depolamada, %12'si ise ormancılık, ağaçlandırma, arazi ıslahı vb. alanlarda kullanılarak bertaraf edilmektedir. Arıtma çamurunun kullanım oranlarına bakıldığında tarımsal kullanımı başlıca bertaraf yöntemi haline geldiğı söylenebilir. Son yıllarda ise çamur bertaraf stratejisinde ıslak oksidasyon, piroliz, gazlaştırma gibi enerji geri kazanımına yönelik yeni trendler uygulanmaya başlanmıştır [14].

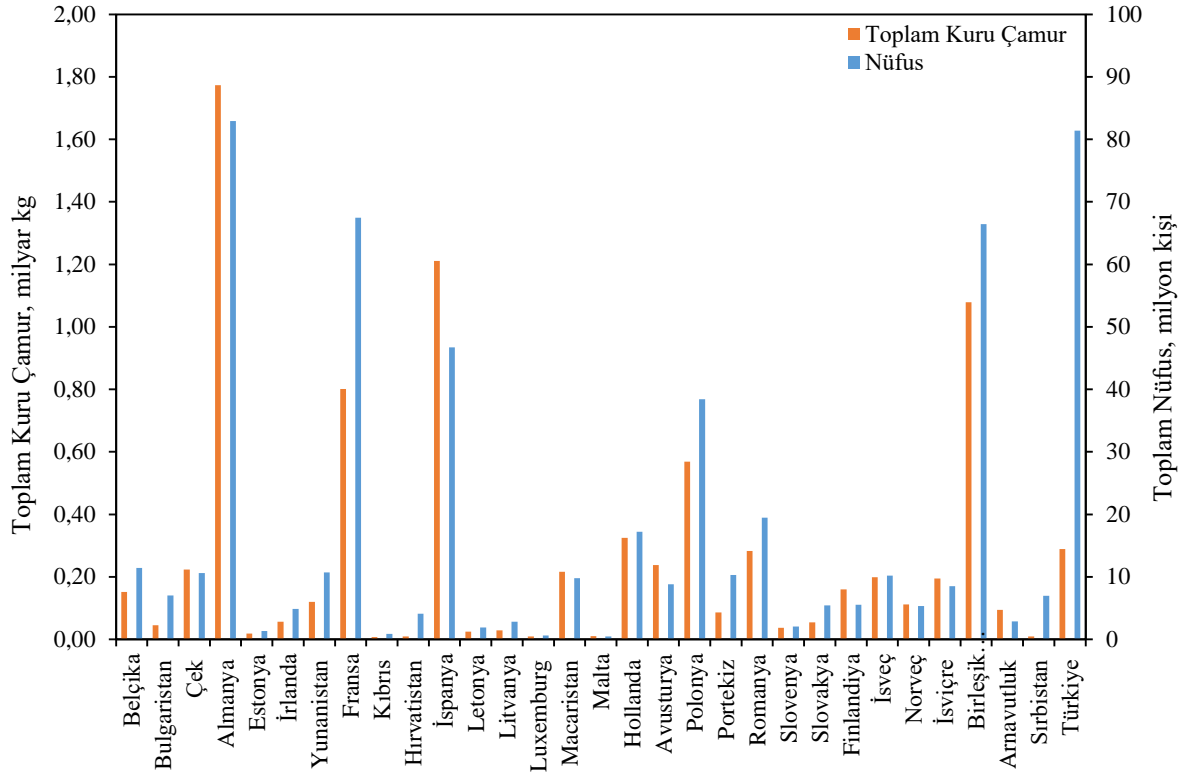
Arıtma çamurları nihai bertaraf işlemi yapılmadan önce stabilizasyonunun gerçekleşmesi gerekmektedir. Stabilizasyon çamurun depolanabilmesi veya tekrar kullanılabilmesi amacıyla çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre uygulanacak proseslerde değişkenlik gösteren bir süreçtir. Bunun için çamur çürütme, kireç stabilizasyonu ve ısı/ısıl işlem olmak üzere üç temel proses uygulanır. Büyük atıksu arıtma tesislerinde çamur içeriğindeki organik madde anaerobik çamur çürütme yöntemiyle bakteriler tarafından biyogaza dönüştürülür. Ayrıca proses çıkışında çamur stabilizasyonu da sağlanmış olur. Çamurun anaerobik çürütülmesi esas olarak mezofilik koşullarda (30-42°C) gerçekleşir. Bu koşullar stabilizasyon sağlayabilir fakat yeterli hijyen sağlayamaz. Stabilizasyon işlemi termofilik koşullarda (50-60°C) yapılması çürütme süresini kısaltır ve patojen seviyelerinin düşürülmesinde daha verimli sonuçlar elde edilir. Bununla birlikte termofilik çürütme işlemi mezofilik çürütmeye kıyasla daha yüksek sıcaklık sağlayabilmek için daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyar [1], [15].

Organik maddelerin mikroorganizmalar kullanılarak ayrıştırıldığı başka bir proses ise kompostlaştırmadır. Arıtma çamurlarının kompostlaştırılması belirli özelliklerde organik gübre elde etmeyi amaçlamaktadır. Doğru uygulanabilen kompostlaştırma işlemi çamur stabilizasyonunu, patojen miktarının azaltılmasını ve arıtma çamurunun kütlesinin ve hacminin azalmasını sağlar [16]. Çamurdaki oksijen varlığının korunması için hava verilmektedir ve süreç boyunca karıştırma yapılmaktadır. Ayrıca elde edilen ısı sayesinde patojenlerin yok edilmesi sağlanarak stabilizasyon işlemi yapılmış olur [17].

Arıtma çamurunu stabilizasyonunda uygulanan ısı işlemler iki adımda gerçekleşir. Birincisi 30–75°C arasında, ikincisi 75–190°C arasındadır ve yüksek basınçta (26 bar) gerçekleşir. Bu proses katıların pıhtılaşmasına ve çamurdaki katıların su tutma kapasitesinin azalmasına neden olur. Diğer bir termal işlem olan yakma prosesi, organik maddenin termal oksidasyonudur ve bu şekilde patojenlerin ve toksik organiklerin yok edilmesi sağlanır [18]. Önerilen yakma prosesi aşamaları sırasıyla ilk olarak mekanik susuzlaştırma, sonrasında çamurun termal kurutulması ve son olarak yakma prosesi olacak şekilde gerçekleşir. Mekanik susuzlaştırmada, çamurun nem oranını %99'dan %80'e düşürülür ve bu şekilde çamur hacminin %95 oranında azalması sağlanır. Ancak bu oran doğrudan yakmak için yeterli bir seviye değildir [19]. Mekanik susuzlaştırmayla %80'a düşürülen nem oranı, termal kurutma ile %40'a düşürülür [14], [19]. Uygulanan ön işlemler sonrasında yakma prosesine hazır hale gelen arıtma çamuru, 800-900°C sıcaklıkta yakılarak içeriğindeki organik madde ve patojenler giderilir [20]. Yakma prosesiyle oluşacak enerji elektrik üretmek, sahada çamur kurutma veya ısıtma/soğutma sistemleri için kullanılabilir.

III. AVRUPA BİRLİĞİ ÇAMUR ÜRETİMİ

Arıtma çamurları genellikle ağırlıkça %0,25-12 katı içeren sıvı veya yarı katı sıvıdır [4]. Katı madde miktarı atıksu arıtım prosesleri nedeniyle Tablo 1'deki sınırlar içerisinde değişmektedir. Avrupa Birliği (AB) Yeşil Mutabakat 2021 eylem planına göre, yenilenebilir enerjinin birincil enerji talebine katkısının en az %40'a çıkarılması planlanmaktadır. Belirlenen sürede hedeflere ulaşmak için arıtma çamurları, tarımsal yeniden kullanım, düzenli depolama ve yakma uygulamalarına kıyasla sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve birincil enerji talebindeki yenilenebilir enerji miktarına yardımcı olabilir. Şekil 1'de Avrupa istatistik ofisinin yayınladığı veriler sunulmuştur [21]. Şekil 1 incelendiğinde Avrupa ülkelerinde birincil, ikincil ve üçüncül arıtmadan kaynaklanan arıtma çamuru üretimi kişi başına kuru ağırlık ortalama 42 g/kişi.gün ya da 15,26 kg/kişi.yıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Avrupa'daki ülkelerin toplam üretilen kuru çamur miktarı ve nüfusları.

Avrupa ülkelerinin çamur bertaraf yöntemleri ve yıllık miktarları bin ton olarak Tablo 2'de verilmiştir. Tablolar oluşturulurken küresel şartlar göz önünde bulundurularak en doğru veri seti alınmaya çalışılmıştır.

Tablo 1. Ülkelerin çamur bertaraf yöntemleri ve ortalama miktarları (10^3 ton/yıl) [22].

Ülkeler	Toplam	Tarımsal kullanım	Kompost ve diğer metotlar	Düzenli Depolama	Yakma	Diğer
Belçika	151,65	30,62	0	0	120,71	1,94
Bulgaristan	45,3	22,5	3,8	6,8	0	12,2
Çek	223,27	102,94	73,06	22,28	24,99	0
Almanya	1773,186	423,497	200,503	0	1142,893	6,293
Estonya	18,34	0,1	15,44	2,8	0	0
İrlanda	56,018	45,344	9,61	0,102	0	0,962
Yunanistan	119,768	21,528	0	34,03	38,36	25,85
Fransa	801	351	287	6	136	21
Kıbrıs	7,408	1,613	0	0	0,608	5,187
Hırvatistan	9,245	0,872	1,05	7,28	0	0,043
İspanya	1210,4	1052,7	0	90,7	67	0
Letonya	25,187	4,249	7,713	0,145	0	13,08
Litvanya	28,956	9,702	13,629	5,624	0	0
Luxemburg	8,918	1,551	2,528	0	1,007	3,832

Ülkeler	Toplam	Tarımsal kullanım	Kompost ve diğer metotlar	Düzenli Depolama	Yakma	Diğer
Macaristan	216,59	25,91	127,78	2,37	60,53	0
Malta	10,77	0	0	10,77	0	0
Hollanda	325,133	0	4,184	1,103	319,846	0
Avusturya	237,938	48,313	47,94	0,063	127,248	14,37
Polonya	568,329	116,028	31,817	20,666	101,144	298,674
Portekiz	85,89	32,345	0	3,665	0	49,882
Romanya	283,34	35	1,76	168,45	0,02	78,09
Slovenya	36,6	0	0,4	0,3	12,4	23,5
Slovakya	54,52	0	24,62	7,86	12,24	9,8
Finlandiya	160,17	64,07	93,58	1,76	0,66	0,12
İsveç	198,9	82,3	54	2,3	2,8	57,4
Norveç	111,7	65,4	26,7	8,7	0,7	10,3
İsviçre	194,5	0	0	0	188,3	6,2
Birleşik krallık	1078,4	844,4	0	4,7	228,9	0,4
Arnavutluk	94,5	8,2	0	0	0	86,3
Sırbistan	9,5	0	0	9,5	0	0
Türkiye	288,91	11,36	0,02	132,69	142,86	1,98
Bosna Hersek	9,5	0	0	9,5	0	0

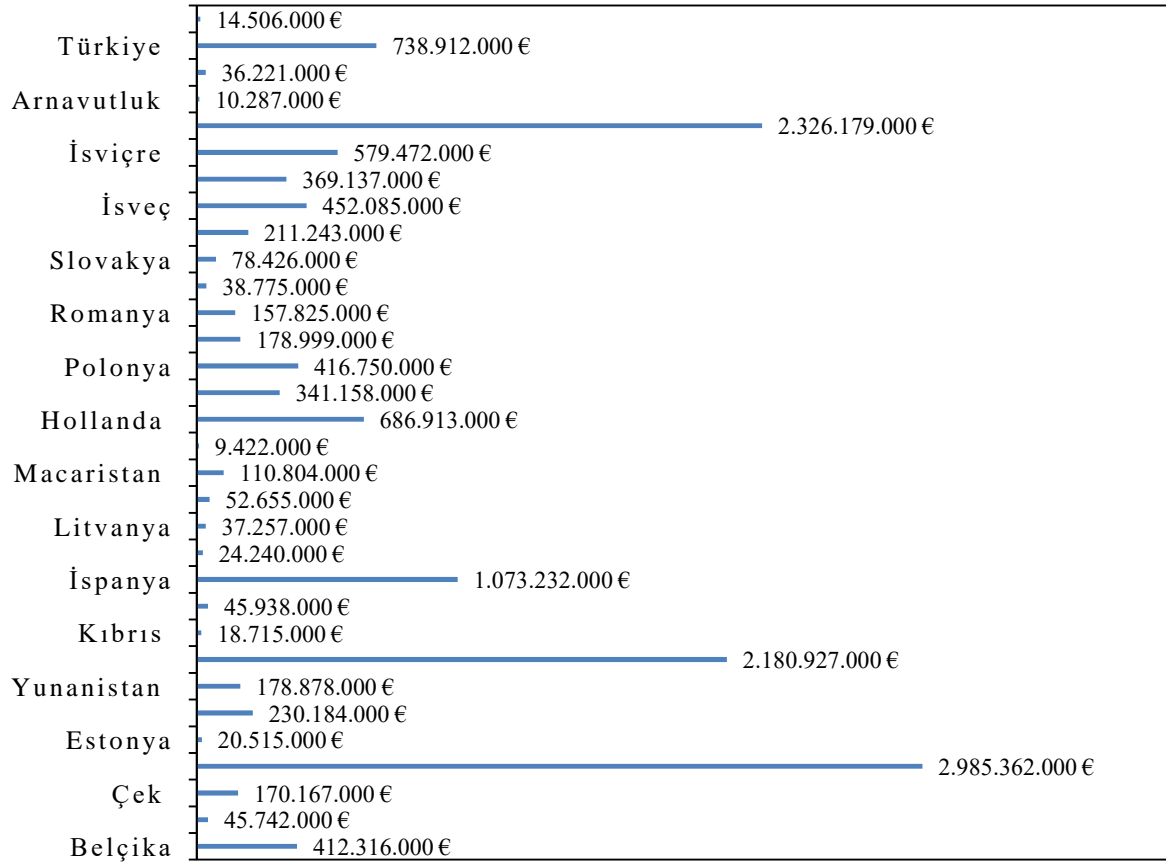
A. AB ÇAMUR BERTARAF MALİYETLERİ VE ÜLKELERİN MİLLİ GELİRLERİ

Maliyet, arıtma çamuru bertaraf stratejisi belirlemede önemli bir kriterdir. Literatürde bertaraf teknolojisi seçimi için sosyal, ekonomik ve çevresel olacak şekilde 3 farklı kriter belirlenmiştir. Kamu sağlığı ve güvenliği, arazi güvenliği sosyal kriterlerden olup teknoloji durumu ise ekonomik kriterlere örnek olarak verilebilmektedir. Çevresel kriterlere ise ikincil atık üretimi, yüksek enerji verimliliği örnek gösterilebilir [23]. Avrupa ülkelerinde çamur bertaraf yöntemlerinin maliyetleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablodan en yüksek maliyetlerin yakma ve kompostlama proseslerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Avrupa ülkelerinde arıtma çamurunun farklı yönetim stratejilerinin ortalama maliyeti [24].

Kullanım Yöntemleri		Maliyetler (€/ton kuru ağırlık)
Tarımsal Kullanım	Ham çamur	160
	Kısmen susuzlaştırılmış çamur (%15–25)	160
	Kuru çamur	210
	Ormancılık	240
	Kompostlama	310
	Yakma	315
	Depo sahası	255

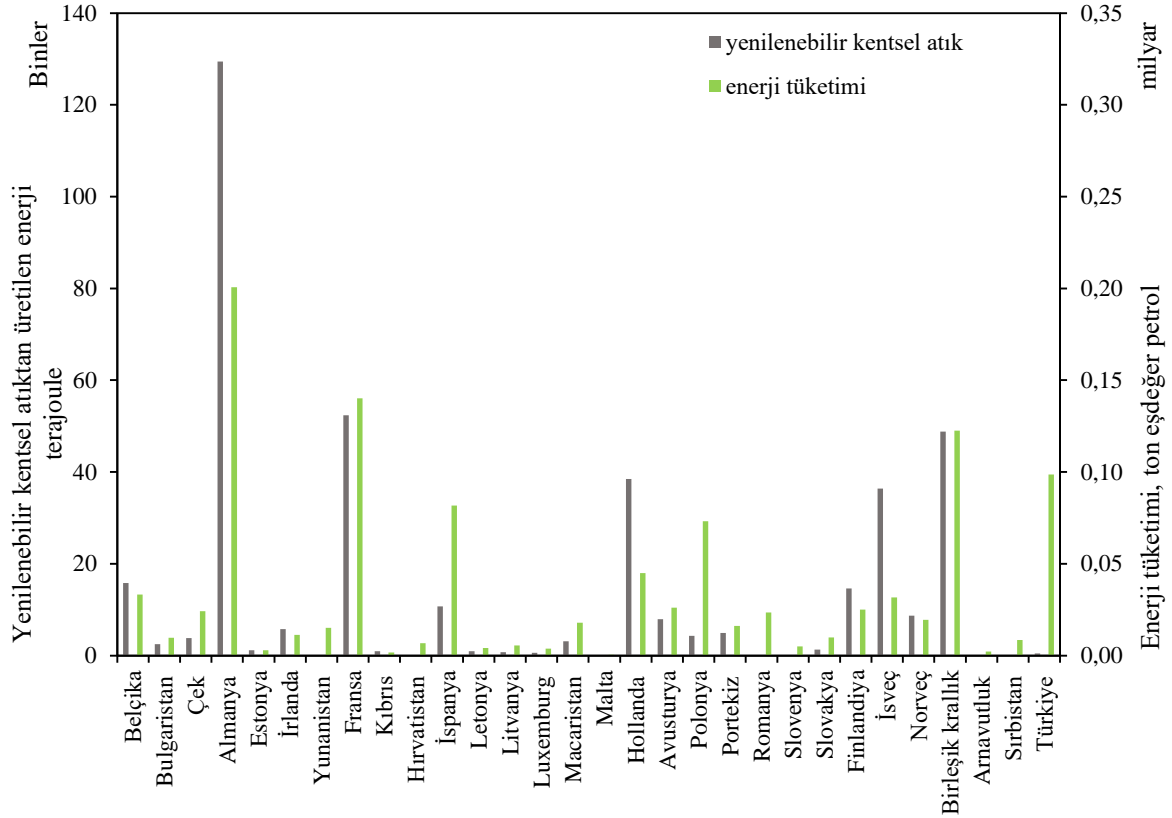
Şekil 2'de ki veriler Avrupa istatistik kurumunun düzenli olarak yayınladığı verilerden alınmıştır. Kovid 19 pandemisi nedeniyle 2017 yılına kadar olan veriler kullanılmıştır. Verilerin temsil oranını artırmak için 2012-2017 yıllarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. AB ülkelerinin milli gelirleri [25].

B. AB ÜLKELERİNİN ENERJİ İHTİYAÇLARI VE YENİLENEBİLİR KENTSEL ATIKLARDAN ENERJİ ÜRETİMİ

Yenilenebilir enerji kaynakları direktifi kapsamında üye ülkeler elektrik, ulaşım, ısıtma ve soğutma için sektörel hedefleri içeren ülkelerin yenilenebilir enerji eylem planlarını (NREAP) istemiştir (2009/28/EC). Bu eylem planları, ülkelerin taahhütlerini ve girişimlerini anlatmaktadır. Bu kapsamda yapılan uygulamaların sonuçları yılda 2 kez rapor edilmektedir ve Avrupa istatistik kurumuyla veriler paylaşılmaktadır. Avrupa istatistik kurumundan alınan verilerle Şekil 3 oluşturulmuştur. Literatürdeki çalışmada AB üyesi 28 ülkede 2014 yılında tüketilen enerjinin yenilenebilir kaynaklardan karşılanma oranının %16 olduğu belirtilmiştir [26].

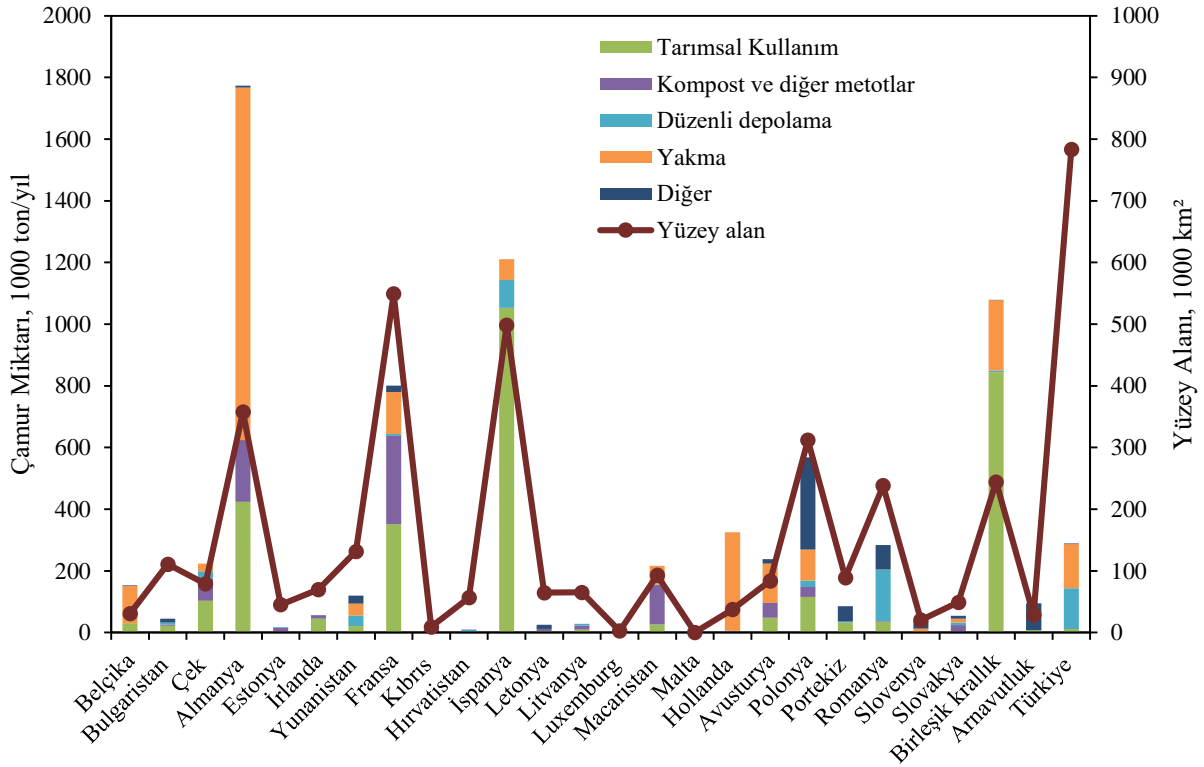


Şekil 3. Ülkelerin enerji tüketimleri ve kentsel atıklardan üretilen yenilenebilir enerji miktarları [27], [28].

IV. SONUÇ

A. YÜZEY ALANIN ÇAMUR BERTARAF STRATEJİSİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Ülkelerin arıtma çamuru üretimi, bertaraf stratejileri ve yüzey alanları Şekil 4’de verilmiştir. Finlandiya, İsveç, Norveç, Sırbistan gibi yüzey alanları çok büyük, nüfus miktarlarının az olduğu ülkeler, istatistiksel olarak anlamsız veriler üreteceği için değerlendirmeye alınmamıştır. Ülkelerdeki arıtma çamuru üretimi nüfusun artmasıyla beraber artış göstermiştir (Şekil 4) ancak yüzey alanlarının artmasının, çamur üretimi ya da bertaraf stratejisi üzerinde herhangi bir etkisi görülmemiştir.



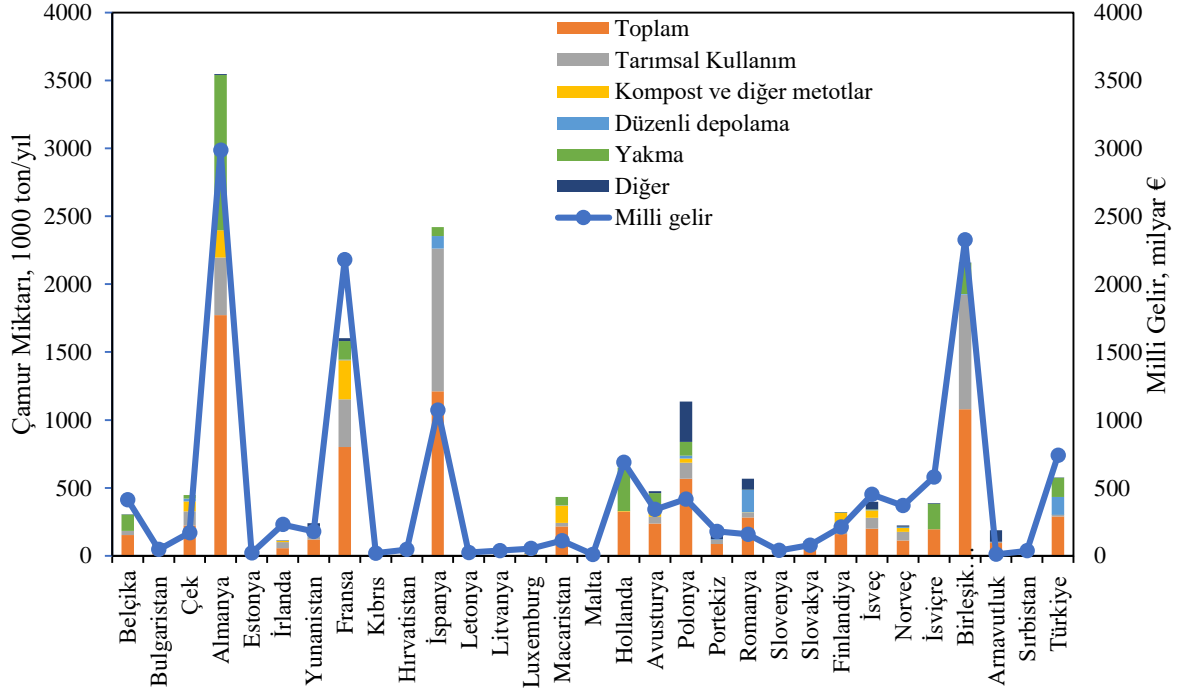
Şekil 4. Ülkelerin arıtma çamuru üretimi, bertaraf stratejileri ve yüzey alanları.

Arıtma çamuru bertaraf stratejisi belirlenirken düzenli depolamanın tercih edilmediği görülmüştür. Bu durum Avrupa Birliği ülkelerindeki yasal mevzuattan kaynaklanmaktadır. Yasal mevzuatlar incelendiğinde 12 Haziran 1986 tarihli Konsey Direktifi (çamur direktifi) kanalizasyon atıklarının bertarafına dair AB mevzuatına (86/278/EEC) eklenmiştir [29]. Kentsel atıksuların arıtılmasına ilişkin 91/271/EEC sayılı Direktif, atıksu arıtımını ve arıtma çamurlarının nihai bertarafını izlemeyi ve raporlamayı zorunlu kılmıştır [30]. 91/271/EEC sayılı Direktifinin 14. Maddesi, arıtma çamurlarının yeniden kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Atık depolama direktifi olarak tanımlanan, 26 Nisan 1999 tarihli ve 99/31/EC sayılı Direktif ile arıtma çamurlarının düzenli depolanarak bertarafına ilişkin sınırlar getirilmiştir [31]. Sonrasında Avrupa parlamentosu ve Avrupa konseyi tarafından 2000 yılında kabul edilen 2000/60/EC sayılı su çerçevesi direktifi ile su politikası alanında ortak eylemlerin sınırlarını belirlemiştir [32]. Mevzuat çerçevesinde atık olarak görülen çamur direktif sonrasında atıksu arıtma tesisinde çıkan artıma yan ürünü olarak tanımlanmaktadır. Atık Çerçeve Direktifi (19 Kasım 2008 tarihli Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi (2008) /98/EC) kapsamında atıkların geri dönüşümü düzenlenmiş olup kanalizasyon çamuru da dahil olmak üzere çamur yönetimini içermektedir [33]. Bu direktif incelendiğinde atığın yeniden kullanımı öncelikli olup geri dönüşüm/geri kazanım yöntemlerinin belirlenerek nihai bertarafı için yöntemler tanımlanmıştır. Arıtma çamurlarının önlenmesi mümkün olmadığı için yeniden kullanılmasına önem verilmiştir.

B. MİLLİ GELİRİN ÇAMUR BERTARAF STRATEJİSİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Avrupa ülkelerinde arıtma çamuru üretimi, bertaraf stratejileri ve ülkelerin milli geliri Şekil 5'de verilmiştir. Arıtma çamurlarına uygulanan nihai bertaraf yöntemlerinin ülke milli gelirleriyle bağlantılı olduğu belirlenmiştir. Milli geliri yüksek olan ülkelerde arıtma çamurlarının tarımsal kullanımı, yakma ve kompostlama metotlarının kullanım oranının yüksek olduğu sonucu bulunmuştur. Bu durum bertaraf maliyetlerine bakıldığında daha anlamlı olduğu görülmektedir. Literatüre bakıldığında (Tablo 3), yakma ve kompostlama ile bertaraf yöntemleri, tarımsal kullanıma göre iki kat daha maliyetli olduğu

belirlenmiştir. Milli gelir miktarı arttıkça inovasyon ve altyapı yatırımları da artmaktadır. Bunun sonucunda gerekli teknolojiye erişim ve hatta teknolojinin üretimi sağlanmış olmaktadır.

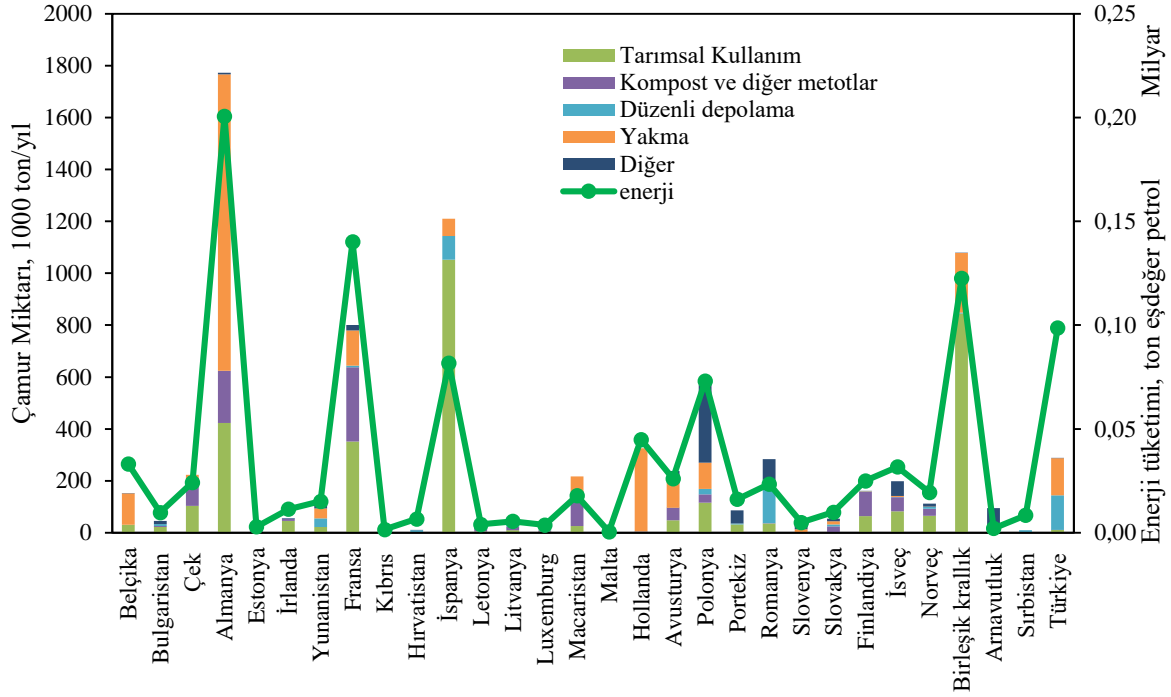


Şekil 5. Ülkelerin arıtma çamuru üretimi, bertaraf stratejileri ve ülke milli geliri.

Yine yasal mevzuata bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesine dair 28 Nisan 2009 tarihli ve 2009/28/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Yönergesi [34] yürürlüğe girmiştir. Diğer bir karar olarak, biyolojik arıtmaya tabi biyolojik olarak bozunabilen atıklara ilişkin, Atık Sonu Kriterleri Teknik Raporuna göre arıtma çamurunu pozitif atık listesine alarak arıtma çamurunun gübre olarak kullanılmasına izin verilmektedir [35]. Yasal düzenlemeler arıtma çamuru bertaraf stratejisi belirlemede etkili olmuştur ancak yöntem seçimleri için yine maddi olanaklar sınırlayıcı etki göstermektedir.

C. ENERJİ TÜKETİMİNİN ÇAMUR BERTARAF STRATEJİSİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Enerji tüketimleri ile çamur bertaraf stratejileri arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir (Şekil 6). Ülkelerin enerji ihtiyacı arttıkça yakmaya olan yönelim artmıştır. Bertaraf stratejisi belirlenirken, enerji ihtiyacı tek başına bir etken olmadığından yasal mevzuatlara da bakılmalıdır.



Şekil 6. Ülkelerin arıtma çamuru üretimi, bertaraf stratejileri ve ülke enerji ihtiyaçları.

Yenilenebilir enerji direktifi [34], AB ülkelerinde yenilenebilir enerjiyi teşvik etmek için politika çerçevesi oluşturarak, 2020 yılına kadar toplam enerji ihtiyacının %20'sini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasını hedeflemiştir. Ülkelerin yenilenebilir enerji potansiyellerine göre ayrı ayrı hedefler konulmuştur (madde 3). Bu hedefler Malta için %10 iken İsveç için %49 olarak verilmiş ve diğer ülkelerde bu aralık içerisinde belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji direktifinde (Madde 2'de) yenilenebilir enerji kaynaklarının tanımı yapılmıştır. Rüzgar, güneş, biyokütle, çöp gazı, kanalizasyon arıtma tesisi gazı ve biyogazlar örnek olarak verilmiştir.

V. TARTIŞMA

Şekil 4'de görüleceği üzere Almanya çamur bertarafında öncelikli olarak yakma prosesini kullanırken diğer tercih ettiği diğer bertaraf yöntemi kompostlama olmuştur. Almanyanın yüzölçümünün az çamur miktarının fazla olması nedeniyle çamur depolama alanlarının sınırlı olması yakma prosesinin yaygın olarak kullanımına neden olmuştur. Şekil 6'da görüldüğü gibi, oluşan arıtma çamuru miktarına göre yakma oranı en yüksek olan ülke Almanya'dır. Ayrıca enerji ihtiyacı çok fazla olması bertaraf metodu seçimini yakma yönünde etkilemiştir. İspanya ve Birleşik Krallık ise çamur bertarafı olarak tarımsal kullanımı diğer yöntemlere göre daha çok tercih etmiştir. Bu ülkelerde arıtma çamurlarının tarımsal kullanımı sırasıyla %87 ve %78 olarak hesaplanmıştır. Hem maliyet açısından en uygun hem de arazi miktarı yüksek olması bertaraf metodu seçimini bu yönde etkilemiştir. Fransa ise kompost, yakma ve tarımsal kullanımı orantılı olarak bertaraf yöntemleri olarak seçmiştir. Fransa yüzölçümünün fazla çamur miktarının bu alana göre daha az olduğu bir ülkedir. Bu durumu avantaja çevirerek ülkede çamur yönetim stratejisi oluşturulurken çamur karakterizasyonuna göre proses seçiminin yapıldığı söylenebilir. Türkiye ve Romanya yüzölçümü fazla çamur miktarı az olan ülkelere göre bu nedenle katı atık düzenli depolama alanlarında yer bulunması sayesinde çamur bertarafında düzenli depolama yöntemini seçmiştir. Türkiye'de yakma ve düzenli depolama oranları sırasıyla %49 ve %46 olarak hesaplanmıştır. Enerji ihtiyacının yüksek olması bertaraf metodu seçimini yakma yönünde etkilemiştir. Ayrıca hem arazi miktarı yüksek olduğu hem de maliyetler açısından uygun olduğu için yüksek oranda düzenli depolama da tercih edildiği görülmüştür. Hollanda da yüzölçümünün oldukça düşük olması çamur

bertarafının ağırlıklı olarak yakma yöntemiyle yapılmasına neden olmaktadır. Hollanda, İsviçre ve Belçika’da arazi miktarının kısıtlı olması nedeniyle, sırasıyla üretilen çamurun %98, %96 ve %79’unu yakarak bertaraf etmektedir. Norveç ve İsveç’te tarımsal kullanımı ve kompost ve diğer metotlarla bertaraf oranları sırasıyla %82, %69 olarak bulunmuştur. Bu durum arazi miktarının yüksek olması ve düşük enerji ihtiyaçları nedeniyle oluşmuştur.

Ülkelerin çamur bertarafı stratejileri incelendiğinde çamur miktarının fazla olduğu ve yüzey alanı az olan ülkeler düzenli depolama sahalarında alan sınırı bulunması nedeniyle genellikle yakma prosesine yönelmiştir. Yakma diğer yöntemlere göre yüksek maliyetli bir yöntem olduğundan yüzey alanı az olmasına rağmen milli geliri ve enerji ihtiyacı yüksek ülkeler tarafından tercih edilmiştir. Bu durum çamur bertaraf yönteminin seçiminde ülkelerin sosyo-ekonomik durumları, coğrafi durumları, teknolojik gelişmişlikleri gibi faktörlerin oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] A. Grosser, E. Neczaj, B. R. Singh, R. Almås, H. Brattebø, and M. Kacprzak, “Anaerobic digestion of sewage sludge with grease trap sludge and municipal solid waste as co-substrates,” *Environ Res*, vol. 155, pp. 249–260, May 2017, doi: 10.1016/J.ENVRES.2017.02.007.
- [2] M. Kacprzak et al., “Sewage sludge disposal strategies for sustainable development,” *Environ Res*, vol. 156, pp. 39–46, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.ENVRES.2017.03.010.
- [3] A. Khakbaz, D. Goi, M. De Nobili, and E. Aneggi, “Environmental and Energy Engineering Sciences,” 2020, Accessed: Mar. 20, 2023. [Online]. Available: <https://air.uniud.it/retrieve/handle/11390/1185610/482715/PhD%20thesis-Ali%20Khakbaz.pdf>
- [4] L. Metcalf, H. P. Eddy, and G. Tchobanoglous, “Wastewater energy: treatment and reuse,” McGraw-Hill, p. 1819, 2004.
- [5] P. Manara and A. Zabaniotou, “Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2566–2582, 2012.
- [6] M. C. Samolada and A. A. Zabaniotou, “Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece,” *Waste Management*, vol. 34, no. 2, pp. 411–420, 2014.
- [7] A. Kijo-kleczkowska, H. Otwinowski, and K. Środa, “Properties and production of sewage sludge in Poland with reference to the methods of neutralizing,” *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, vol. 14, no.4, pp. 59–78, 2012.
- [8] L. Spinosa et al., “Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management,” vol. 3, pp. 702–717, 2011.
- [9] M. Pradel, L. Aissani, J. Villot, J. C. Baudez, and V. Laforest, “From waste to added value product: towards a paradigm shift in life cycle assessment applied to wastewater sludge – a review,” *J Clean Prod*, vol. 131, pp. 60–75, 2016.
- [10] P. Arroyo and M. Molinos-Senante, “Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach,” *Science of The Total Environment*, vol. 625, pp. 819–827, 2018.

- [11] D. R. Marlow, M. Moglia, S. Cook, and D. J. Beale, "Towards sustainable urban water management: A critical reassessment," *Water Res*, vol. 47, no. 20, pp. 7150–7161, 2013.
- [12] H. Ødegaard, B. Paulsrud, and I. Karlsson, "Wastewater sludge as a resource: sludge disposal strategies and corresponding treatment technologies aimed at sustainable handling of wastewater sludge," *Water Science and Technology*, vol. 46, no. 10, pp. 295–303, 2002.
- [13] R. P. Singh and M. Agrawal, "Potential benefits and risks of land application of sewage sludge," *Waste Management*, vol. 28, no. 2, pp. 347–358, 2008..
- [14] D. Fytili and A. Zabaniotou, "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 116–140, 2008.
- [15] E. Neczaj and A. Grosser, "Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers," *Proceedings 2018, Vol. 2, Page 614*, vol. 2, no. 11, p. 614, 2018.
- [16] R. Cáceres, K. Malińska, and O. Marfà, "Nitrification within composting: A review," *Waste Management*, vol. 72, pp. 119–137, 2018.
- [17] M. Kacprzak, K. Fijalkowski, A. Grobelak, ... K. R.-Pol. J., and undefined 2015, "Escherichia coli and Salmonella spp. Early diagnosis and seasonal monitoring in the sewage treatment process by EMA-qPCR method," *pjmonline.org*, vol. 64, no. 2, pp. 143–148, 2015.
- [18] Bien, J., Neczaj, E., & Milczarek, M. "Co-composting of meat packing wastewater sludge and organic fraction of municipal solid waste", *Global Nest J*, vol.1, no.4, 513-521, 2013.
- [19] A. Abuşoğlu, E. Özahi, A. İ. Kutlar, and S. Demir, "Exergy analyses of green hydrogen production methods from biogas-based electricity and sewage sludge," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 16, pp. 10986–10996, 2017.
- [20] A. Abuşoğlu, E. Özahi, A. İhsan Kutlar, and H. Al-jaf, "Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production," *J Clean Prod*, vol. 142, pp. 1684–1692, 2017.
- [21] "Statistics | Eurostat." https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_pe/default/table?lang=en (accessed Mar. 20, 2023).
- [22] "Statistics | Eurostat." https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ww_spd/default/table?lang=en (accessed Mar. 20, 2023).
- [23] V. K. Tyagi and S. L. Lo, "Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 708–728, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.05.029.
- [24] Wójtowicz, A., Jędrzejewski, C., Bieniowski, M., & Darul, H. Modelowe rozwiązania w gospodarce osadowej. *Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie*, 2013.
- [25] "Statistics | Eurostat." https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEC00001/default/table?lang=en&category=na10.nam a10.nama_10_aux (accessed Mar. 20, 2023).

- [26] S. Braungardt, V. Bürger, J. Zieger, and L. Bosselaar, “How to include cooling in the EU Renewable Energy Directive? Strategies and policy implications,” *Energy Policy*, vol. 129, pp. 260–267, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ENPOL.2019.02.027.
- [27] “Statistics | Eurostat.” https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00123/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_bal (accessed Mar. 20, 2023).
- [28] “Statistics | Eurostat.” https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_CB_RW/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_cb (accessed Mar. 20, 2023).
- [29] Council of the European Communities. Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC). *Official Journal of the European Communities*, 181, 6-12, 1986.
- [30] E. D.-J. Eur. Commun and undefined 1991, “Council Directive of 21. May 1991 concerning urban waste water treatment (91/271/EEC),” tarimorman.gov.tr, Accessed: Mar. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/ab%20mevzuat%C4%B1/91-271-EEC.pdf>
- [31] “EUR-Lex - 31999L0031 - EN - EUR-Lex.” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031> (accessed Mar. 20, 2023).
- [32] H. Unnerstall, “The Principle of Full Cost Recovery in the EU-Water Framework Directive—Genesis and Content,” *Journal of Environmental Law*, vol. 19, no. 1, pp. 29–42, 2007.
- [33] “EUR-Lex - 32008L0098 - EN - EUR-Lex.” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098> (accessed Mar. 20, 2023).
- [34] “EUR-Lex - 32009L0028 - EN - EUR-Lex.” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028> (accessed Mar. 20, 2023).
- [35] S. Hans and E. Peter, “End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals,” 2013, doi: 10.2791/6295.