

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**KASTAMONU ATIKSU ARITMA TESİSİ SOLAR ÇAMUR  
KURUTMA SİSTEMİNİN İNCELENMESİ VE BERTARAF  
ÖNERİLERİ**

**ALPER ÖZEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOÇ. DR. NEJDET DEĞERMENCİ**

**TEMMUZ - 2023**

**KASTAMONU**

## TEZ ONAYI

ALPER ÖZEN tarafından hazırlanan “KASTAMONU ATIKSU ARITMA TESİSİ SOLAR ÇAMUR KURUTMA SİSTEMİNİN İNCELENMESİ VE BERTARAF ÖNERİLERİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **13.07.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

<b>Danışman</b>	Doç. Dr. Nejdet DEĞERMENCİ Kastamonu Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	Doç. Dr. Sinan KUL Bayburt Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	Dr. Öğr. Üyesi Gökçe Didar DEĞERMENCİ Kastamonu Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V. Doç. Dr. Osman ÇİÇEK .....

## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*

**Alper ÖZEN**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### KASTAMONU ATIKSU ARITMA TESİSİ SOLAR ÇAMUR SİSTEMİNİN İNCELENMESİ VE BERTARAF ÖNERİLERİ

ALPER ÖZEN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. NEJDET DEĞERMENCİ

Bu çalışmada Kastamonu ili merkezinde yer alan evsel nitelikli atıksu arıtma tesisinden çıkan atık ham çamurun solar kurutma ünitesindeki kuruma verimliliği değerlendirilmiş ve kurutulan çamurun bertarafı ile ilgili çözüm önerileri ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmalarda solar çamur kurutma ünitesinin devreye alınması ile başlayan 9 aylık işletme süresi boyunca, solar çamur kurutma ünitesinin performansı incelenmiştir. Bu süreç boyunca hava sıcaklıkları, güneş radyasyon miktarları, çamur örtü yükseklikleri, biyogaz motorlarında elde edilen atık ısının solar ünite ve hollerde değerlendirilmesi ile ilgili veriler ve kurutulan çamurun laboratuvar analiz değerleri incelenmiştir. Özellikle yaz aylarında atık ısı kullanımı olmadan da %90 kuruluk oranlarının sağlandığı fakat kış aylarında ortalama kuruluk oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Kastamonu ili ve tesis yerleşim yeri göz önüne alınarak çıkan kuru çamurun bertarafı ile ilgili çözüm önerileri açıklanmış ve kısa, orta, uzun vadeli çözüm seçenekleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucu en uygun seçeneğin çamurun kompostlaştırılması ve son ürün olarak çıkan çamurun tarımda kullanılması olduğu ortaya konmuştur.

**ANAHTAR KELİMELEER:**Atıksu arıtma çamuru, Solar kurutma, Çamur bertarafı

Temmuz 2023, 91 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **MSC THESIS**

#### **INVESTIGATION OF KASTAMONU WASTEWATER TREATMENT PLANT SOLAR SLUDGE DRYING SYSTEM AND DISPOSAL RECOMMENDATIONS**

**ALPER ÖZEN**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. NEJDET DEĞERMENÇİ**

In this study, the drying efficiency of the waste water sludge coming out of the domestic wastewater treatment plant in the center district of Kastamonu province was evaluated in the solar drying unit and solution suggestions were put forward for the disposal of the dried sludge. In the studies, the performance of the solar sludge drying unit was examined during the 9-month operating period, which started with the commissioning of the solar sludge drying unit. During this process, air temperatures, solar radiation values, sludge cover heights, data on the evaluation of waste heat from biogas engines in the solar unit and halls, and laboratory analysis values of the dried sludge were examined. It has been observed that 90% dry matter rates are achieved without the use of waste heat, especially in summer, but the average dry matter rate decreases in winter months. Considering Kastamonu province and facility location, solution suggestions for the disposal of dry sludge were explained and short, medium and long-term solution options were evaluated. As a result of the study, it was revealed that the most suitable option is composting the sludge and using the sludge as the final product in agriculture.

**KEYWORDS:** Wastewater sludge, Solar drying, Sludge disposal

July 2023, 91 Page

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında bana yol gösteren ve cesaretlendiren danışman hocam Doç. Dr. Nejdet Değermenci'ye özellikle teşekkür etmek istiyorum.

Tez çalışmalarımın yürütülmesi sırasında ihtiyaç duyduğum verileri temin etmemde ve kullanmamda yardımcı olan Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi süpervizörü Çev. Müh. Ahmet Çanga (Gezer-Mass İş Ortaklığı) başta olmak üzere proje boyunca beraber çalıştığımız tüm mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Solar Ünitesi dizaynı ve yapımını üstlenen Redco firmasına ve özellikle yardımlarından dolayı Çev. Müh. Melis Çetinkaya'ya teşekkür ediyorum.

Çevre mühendisliği alanındaki bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan ve yüksek lisans yapmam için beni teşvik eden Dr. Gıyasettin Güneş'e değerli çabalarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan çalışma arkadaşım Çev. Yük. Müh. Samet Vatansever'e ve çalışmalarım sırasında beni yalnız bırakmayan aileme teşekkür etmek istiyorum.

ALPER ÖZEN

Kastamonu, 2023

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>ii</b>
<b>TAAHHÜTNAME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>3</b>
2.1 Arıtma Çamuru ile İlgili Genel Bilgiler .....	3
2.1.1 Arıtma Çamuru Tanımı ve Genel Özellikleri .....	3
2.1.2 Arıtma Çamuru Kaynakları .....	4
2.1.3 Arıtma Çamuru Karakterizasyonu için Önemli Parametreler.....	6
2.1.4 Türkiye’de ve Dünyada Arıtma Çamuru .....	8
2.2 Arıtma Çamuru Bertaraf Yöntemleri .....	10
2.2.1 Ön Arıtma .....	11
2.2.2 Yoğunlaştırma.....	11
2.2.3 Stabilizasyon.....	12
2.2.4 Şartlandırma.....	14
2.2.5 Susuzlaştırma .....	14
2.2.6 Kurutma .....	15
2.2.7 Yakma .....	15
2.2.8 Düzenli Depolama .....	16
2.3 Arıtma Çamuru Kurutma Yöntemleri .....	17
2.3.1 Termal Kurutma.....	17
2.3.2 İnce Tabaka Kurutma.....	19
2.3.3 Biyo-kurutma .....	20
2.3.4 Mikrodalga ile Kurutma.....	21
2.3.5 Solar Kurutma.....	22
2.3.5.1 Solar kurutmanın avantajları .....	24
2.3.5.2 Açık solar kurutma .....	25
2.3.5.3 Kapalı solar kurutma .....	26
2.3.6 Solar Kurutma Yöntemi ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	27
2.4 Çalışma Yapılan Tesis Hakkında Genel Bilgiler .....	31
2.4.1 Proje Alanı .....	31
2.4.2 İklim ve Meteoroloji .....	32
2.4.3 Atıksu Arıtma Tesisi Sahası .....	33
2.4.4 Alıcı Ortam .....	34
2.4.5 Kirletici Yükler .....	35
2.4.6 Deşarj Kalitesi ve Kontrolü .....	36
2.4.7 Yasal Çerçeve .....	37
2.4.7.1 AB mevzuatı.....	37

2.4.7.1.1	Kentsel atıksu arıtma direktifi 91/271/EEC .....	37
2.4.7.1.2	Arıtma çamuru direktifi 86/278/EEC .....	38
2.4.7.1.3	Düzenli depolama direktifi 99/31/EC.....	39
2.4.7.2	Türk Mevzuatı .....	39
2.4.7.2.1	Kentsel atıksu arıtma yönetmeliği .....	39
2.4.7.2.2	Atıkların düzenli depolanmasına ilişkin yönetmelik.....	39
2.4.7.2.3	Atık yönetimi yönetmeliği.....	40
2.4.7.2.4	Evsel ve kentsel çamurun toprakta kullanımına dair yönetmelik .....	40
2.4.7.2.5	Atıksu arıtma tesisleri teknik usuller tebliği.....	41
2.4.8	Proses Hakkında Bilgiler .....	42
<b>3.</b>	<b>MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>46</b>
3.1	Solar Çamur Kurutma .....	46
3.1.1	Solar Kurutma Isı Değeri Hesaplamalarına Dair Açıklamalar .....	48
3.1.2	Solar Kurutma Hesaplama Adımları.....	48
3.1.3	Kastamonu AAT Solar Kurutma Hesaplamaları .....	52
3.1.4	Yerden Isıtma Sistemi.....	56
3.2	Ekipman Bilgileri.....	58
3.2.1	Çamur Karıştırma Makinesi.....	58
3.2.2	Havalandırma Sistemi - Fanlar .....	59
3.3	Analizler.....	61
<b>4.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>63</b>
4.1	Solar Kurutma Ünitesinin Performans Değerlendirmesi .....	68
<b>5.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>70</b>
5.1	Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamuru Bertarafında Kullanılacak İlave Proses Önerileri .....	70
5.1.1	Gazlaştırma .....	70
5.1.2	Kompostlaştırma.....	72
5.2	Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi Çamur Bertarafı Değerlendirmeleri .....	73
5.3	Çamurun Yeniden Kullanımı ve Bertaraf Seçenekleri .....	75
5.3.1	Tarımda Toprak Düzenleyici Olarak Kullanım .....	75
5.3.2	Yeşil Alanlarda Toprak İyileştirici Olarak Kullanım .....	75
5.3.3	Yakıt İkamesi Olarak Kullanım .....	76
5.3.4	Enerji Geri Kazanımı İçin Yakma .....	76
5.3.5	Düzenli Depolama .....	77
5.4	Çamur Yönetim Stratejisi .....	79
5.4.1	Karar Verme Süreci .....	79
5.4.2	Çamur Depolama ve Taşıma.....	79
5.4.3	Çamur Bertarafı için Acil Durum Planı .....	80
5.4.4	Kısa Vadeli Strateji .....	81
5.4.5	Orta Vadeli Strateji .....	81
5.4.6	Uzun Vadeli Strateji.....	82
5.5	Kamu Bilinçlendirme Stratejisi.....	82
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>83</b>	
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>91</b>	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Solar kurutma sistemi .....	24
Şekil 2.2 Solar kurutma sisteminde serilmiş çamur .....	24
Şekil 2.3 Kapalı ve açık pilot tesislerin şematik gösterimi .....	27
Şekil 2.4 Kastamonu ilini gösteren harita .....	32
Şekil 2.5 Kastamonu AAT konumu .....	33
Şekil 2.6 Kastamonu AAT'nin 1. kademe genel yerleşim planı.....	45
Şekil 3.1 Solar çamur kurutma ünitesi, çamur örtüsü .....	46
Şekil 3.2 Solar çamur kurutma üniteleri .....	47
Şekil 3.3 Solar çamur kurutma üniteleri .....	47
Şekil 3.4 Solar çamur kurutma üniteleri .....	48
Şekil 3.5 Solar kurutmaya ait ekipman ve zemin ısıtma sistemini gösteren plan .....	57
Şekil 3.6 Solar çamur kurutma ünitesi yerden ısıtma sistemi .....	57
Şekil 3.7 Solar çamur kurutma ünitesinde bulunan çamur karıştırma makinesi .....	58
Şekil 3.8 Solar çamur kurutma üniteleri havalandırma sistemi - fanlar .....	59
Şekil 3.9 Solar çamur kurutma üniteleri - sirkülasyon fanları .....	60
Şekil 3.10 Etüv ve kül fırını ile laboratuvar analizlerine dair çalışma .....	62
Şekil 3.11 Kurutulmuş solar çamura ait numune .....	62
Şekil 5.1 Çamur gazlaştırma prosesi.....	71
Şekil 5.2 Çamur kompostlaştırma akış şeması.....	72

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa

Tablo 2.1 Farklı kurutma sistemlerine ait enerji gereksinimleri .....	25
Tablo 2.2 Kastamonu sıcaklıkları ve yağış miktarları .....	32
Tablo 2.3 Kirletici yükleri .....	35
Tablo 2.4 Tasarım parametreleri .....	35
Tablo 2.5 1.Kademe (2032) için tasarım kriterleri ve gerekli giderim verimliliği ....	36
Tablo 2.6 Biyokatı maddeler, yayılan arazi toprağı ve tarımsal kullanıma yönelik toprağın sınır değerleri.....	41
Tablo 3.1 Solar sistemin teknik tasarım değerlerinin açıklanması ve hesap detayları .....	50
Tablo 3.2 Solar sistemin teknik tasarım değerlerinin açıklanması ve hesap detayları .....	51
Tablo 3.3 AAT giriş çamuru verilerine göre solar sistemin teknik tasarım değerleri .....	52
Tablo 3.4 Radyasyon ve atık ısı değerlerine göre solar kurutma buharlaşma değerleri.....	53
Tablo 3.5 Aylara göre radyasyon değerleri ve solar hollerde bertaraf edilen ortalama çamur miktarları .....	54
Tablo 3.6 Aylara göre, buharlaşma miktarları ve atık ısı değerleri .....	55
Tablo 3.7 Solar çamur yüksekliği miktarı.....	56
Tablo 3.8 Çamur karıştırma makinesi teknik özellikleri.....	58
Tablo 3.9 Fanlara ait teknik özellikler .....	59
Tablo 3.10 Solar kurutma izleme tablosu .....	62
Tablo 4.1 2022 Haziran dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri .....	64
Tablo 4.2 2022 Temmuz dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri.....	64
Tablo 4.3 2022 Ağustos dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri .....	64
Tablo 4.4 2022 Eylül dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri .....	64
Tablo 4.5 2022 Ekim dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri .....	65
Tablo 4.6 2022 Kasım dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri.....	65
Tablo 4.7 2022 Aralık dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri.....	65
Tablo 4.8 2023 Ocak dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri.....	65
Tablo 4.9 2023 Şubat dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri.....	66
Tablo 4.10 Solar çamur kurutma ünitesi 9 aylık analiz ve izleme verilerinin karşılaştırılması .....	67
Tablo 5.1 Diğer çamur işleme yöntemlerinin ve etkilerinin özeti .....	74
Tablo 5.2 Kurutulmuş ve stabilize çamur için bertaraf önerileri .....	78
Tablo 5.3 Kurutulmuş ve stabilize çamur için bertaraf önerileri .....	79

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$q_{\ddot{u}}$	: Borudan üst kata yayılan ısı
$Z_{\ddot{u}}$	: Üst kata olan mesafe
$S_{\ddot{u}}$	: Katsayı sabiti
$R_{\ddot{u}}$	: Üst ısı (termal) direnç
$W$	: Boru aralığı
$L$	: Boru uzunluğu
$T_{sm}$	: Boru eksenindeki ortalama sıcaklık
$T_{y\ddot{u}}$	: Zeminin üst yüzeyi sıcaklığı
$h_i$	: Isı transfer katsayısı
$l_i$	: Tabakadaki yapının kalınlığı
$k$	: Tabakadaki yapıların ısı iletim katsayıları

### Kısaltmalar

<b>BOİ</b>	: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
<b>KOİ</b>	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
<b>AKM</b>	: Askıda katı madde
<b>KAMAG</b>	: Kamu araştırmaları destek grubu
<b>KM</b>	: Katı madde
<b>UKM</b>	: Uçucu katı madde miktarı
<b>GRNN</b>	: Genelleştirilmiş regresyon sinir ağı modelleri
<b>BP</b>	: Geri yayılım
<b>MW</b>	: Mikrodalga
<b>AAT</b>	: Atıksu arıtma tesisi
<b>PSA</b>	: Pressure swing adsorption (Basınç salınımlı adsorpsiyon)
<b>AAT</b>	: Atıksu arıtma tesisi
<b>CHP</b>	: Kojenerasyon ünitesi (enerji üretim tesisi)
<b>ÇŞİDB</b>	: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

## 1. GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışı nedeniyle doğaya atılan atıklarda büyük artış görülmekte, bu da aşırı kirliliğe sebebiyet vermektedir. İnsanoğlu, oluşan bu kirliliği önleyebilmek adına çeşitli önlemler almaktadır. Atıksu arıtma tesisleri de bu önlemlerden biridir. Atıksu arıtma tesisleri sayesinde, atık sular birtakım işlemlerden geçirilerek çevreye zararsız hale getirilmekte ve doğaya geri verilmektedir. Bu arıtma prosesinden sonra bakiye atık olarak çamur oluşmakta ve bu madde arıtma çamuru olarak adlandırılmaktadır (Ekici, 2020).

Nüfus artışıyla beraber atık su arıtma tesisleri sayısı da artış göstermektedir. Bu durum arıtma çamuru miktarlarında da büyük oranda artışa sebebiyet vermektedir. Arıtma çamurlarının içeriğine bakıldığında; patojen bakteriler, ağır metaller, virüsler ve toksik kimyasallar bakımından zengin olduğu görülmektedir. Her yıl tonlarca üretilmekte olan arıtma çamurlarını insanoğluna ve çevreye zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırmak için çeşitli arıtma metotları bulunmaktadır (Ekici, 2020). Arıtma çamuru bertarafından önce, su içeriğinin azaltılması ilk adımdır. Susuzlaştırma işlemi, çamurun su muhtevasını %5 kuru katının altına düşürerek atığın kütle ve hacminin azalmasına yardımcı olmakta ve böylelikle depolama ve taşıma kolaylığı sağlamaktadır (Bennamoun, 2012; Leonard vd. 2008).

Çamur kurutma işlemleri, çamurun kompozisyonu ve çamurdaki suyun dağılımı sebebiyle değişiklik göstermektedir. Çamura uygulanacak bertaraf metoduna göre çeşitli nem içeriklerine sahip çamurların kurutma prosesi için doğal ve mekanik susuzlaştırma ve kurutma metotları geliştirilmiştir. Doğal kurutma, mekanik kurutmaya nazaran daha az karmaşıktır. Doğal kurutma prosesinin işletimi kolay ve enerji gereksinimi daha düşüktür. Mekanik kurutma proseslerinin ise yatırım, işletme ve enerji maliyetlerinin yüksek olduğu görülmüştür (Ritterbusch ve Bux, 2012).

Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurun verimli bir şekilde bertarafını sağlamak için yeni metotlar geliştirilmeye başlanmıştır. Uygulanmakta olan yöntemlerin sürdürülebilir olmaması, maliyetinin ve enerji ihtiyacının fazla olması sebebiyle çevre dostu alternatifler araştırılmıştır. Bu bağlamda çamur kurutma yöntemleri öne

çıkılmaktadır. Termal kurutma yöntemi sıklıkla tercih edilmesine rağmen son yıllarda maliyetinin daha düşük olması ve çevre dostu olması nedeniyle solar (güneşle) kurutma yöntemi ön plana çıkmıştır. Ülkemiz, yılın büyük bir kısmında güneş enerjisinden faydalanabildiği için yenilenebilir enerjinin kullanılması gelecek vadede bir proses olarak görülmektedir (Ünlü, 2020).

Bu tez çalışması kapsamında Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi'nde Solar Sistem kullanılarak kurutma yapılan Çamur Kurutma Ünitesi'nin verimliliği incelenerek, buradan çıkan çamurun bertarafı ile ilgili öneriler sunulmuştur.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Arıtma Çamuru ile İlgili Genel Bilgiler

#### 2.1.1 Arıtma Çamuru Tanımı ve Genel Özellikleri

Arıtma çamuru, Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde “Evsel ve evsel nitelikli endüstriyel atıksuların, fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemleri sonucunda ortaya çıkan, suyu alınmış, kurutulmuş çamur” olarak tanımlanmış ve 5 Nisan 2005 tarihli ve 25777 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanmıştır. Diğer bir deyişle, atıksu arıtımı sonucu ortaya çıkan sıvı ya da yarı katı halde, kokulu, uygulanan arıtma yöntemine bağlı olarak ağırlıkça %0,25-12 katı madde içeren atıklar “ham arıtma çamuru” olarak adlandırılmaktadır. Ham arıtma çamurları ekolojik yönden kullanıma uygun olması için stabilize edildikten sonra “işlenmiş arıtma çamuru” veya kısaca “arıtma çamuru” olarak isimlendirilmektedir. Amerika, İngiltere ve bazı Avrupa Birliği ülkeleri “biyokatı” terimini “işlenmiş arıtma çamuru” ile eş anlamlı olarak kullanmaktadır (Angın, 2008; Filibeli, 2013).

Arıtma tesislerinde yapılan su ve atıksu arıtma işlemleri neticesinde çok miktarda arıtma çamuru meydana gelmektedir. Kentleşme ve endüstriyel gelişmenin yanı sıra çevresel talepler ve daha iyi atık su arıtma standartlarına ulaşmak için getirilen yasal düzenlemeler nedeniyle arıtma çamuru miktarı hızla artmaktadır (Salan, 2014). Bir atıksu arıtma tesisi tarafından üretilen çamurun miktarı ve özellikleri, atıksuyun bileşimine, kullanılan atıksu arıtma tipine ve çamurun arıtılmasında kullanılan yöntemlere bağlıdır. Aynı tesis içinde bile, tesise giren atıksuyun bileşimindeki değişiklikler ve arıtma prosesindeki değişiklikler nedeniyle üretilen çamurun özellikleri yıldan yıla, mevsimsel ve hatta günlük olarak değişebilmektedir. Çamur arıtma işlemi farklı aşamalardan oluşmaktadır. Birincil çamur, ikincil çamur ve kimyasal çamur olarak sınıflandırılmaktadır. İkincil çamur, aktif çamur sistemi ve bağlı büyüme sistemi de dahil olan ikinci aşama biyolojik arıtma prosesi ile üretilmektedir. Bu düşük katı maddeli (%0,5-2) çamurların yoğunlaştırılması ve susuzlaştırılması ilk çamura göre daha zordur (Ünlü ve Tunç, 2007).

Aritma çamuru bertarafı sonucu ortaya çıkan yoğun kirletici içerik ve hacim, gün geçtikçe dünya çapında artan çevresel bir sorun haline gelmiştir. Aritma çamuru içerisinde azot, fosfor ve organik maddeler mevcuttur. Bu sayede içerdiği azot ve fosfor ile birçok bitki için gerekli ihtiyacın büyük bir kısmını sağlayabilmektedir. Aritma çamurunun içindeki bileşenler toprak ve bitkiler için faydalı olmasına rağmen içeriğindeki ağır metal ve toksik maddeler nedeniyle de zararlı olabilmektedir. Aritma çamurunda mevcut olan yüksek konsantrasyondaki ağır metaller ve toksik maddeler, virüsler, bakteriler ve diğer hastalık yapıcı organizmalar canlılar ve çevre için sorun olabilmektedir. Ayrıca arıtma çamurunun nem içeriğinin yüksek olması sebebiyle tarım alanında kullanılması uygun görülmemektedir (Solmaz ve Okaygün, 2018).

Geçtiğimiz yıllarda tesislerde oluşan çamurlar için araziye depolama yöntemi sıklıkla tercih edilirken, günümüzde çevresel yaptırımlar ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle tercih edilmemektedir. Aritma çamurunun bertarafında ilk hedef çamur miktarı ve hacmini azaltarak alan ve transfer maliyetlerini düşürmektir. Bunun yanı sıra arıtma çamurunun kullanılabilir, değerli bir kaynak olarak değerlendirilmesi, canlılar ve çevre için olması gereken element ve patojen sınır değerlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Youssef ve Kahil, 2016).

### **2.1.2 Aritma Çamuru Kaynakları**

Aritma çamurları; arıtmanın tipine ve amacına göre çökebilen katı maddelerin oluşturduğu ön çöktürme çamurları, kimyasal arıtma ve koagülasyon sonucu meydana gelen kimyasal çamurlar, biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar ve içme suyu arıtma işlemleri sonucu meydana gelen inorganik çamurlar olarak sınıflandırılmaktadır (Yıldız vd. 2009).

Klasik atıksu arıtma tesislerinde üretilen arıtma çamurları, birincil, ikincil ve ileri arıtma proseslerinden çekilmektedir. Bu proseslerden her biri atıksu kirlilik yükü bakımından farklı etkilere sebep olmaktadır. Bu nedenle oluşan çamurların yapısı da farklı olmaktadır. Atıksu arıtma prosesinde genellikle üç temel arıtım aşaması bulunmaktadır (Bilgin vd. 2002; Filibeli, 2013). Bu aşamalar, birincil arıtım, ikincil arıtım ve üçüncül arıtımdır.

Ön arıtma adıyla da bilinen birincil arıtım, çoğunlukla fiziksel işlemleri içermektedir. Birincil arıtmanın temel prensibi, çökebilir katıların atıksudan uzaklaştırılmasıdır. Aerobik türlerin bir ön arıtma sistemi ile uzaklaştırılması gerekli değildir, ancak çöken katılarla birlikte bir miktar biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) uzaklaştırılmaktadır. Ön çökeltme havuzu kendiliğinden çökebilecek katı maddelerin tabanda toplanmasını sağlarken, yüzebilen maddelerin ise yüzeyde birikmesini sağlamaktadır. Yüzebilen katı maddelerin miktarı mühim değildir. Köpük olarak adlandırılan bu maddeler ya çökebilir katı maddeler ile beraber uzaklaştırılır ya da herhangi bir arıtma işlemine tabi tutulmadan en yakın giderilme sahasına gönderilir (Olabi, 2020). Çökeltme havuzunun dibinde biriken maddeler “ham ön çökeltim çamuru” olarak isimlendirilir. Bu çamurun içerdiği su miktarı oldukça fazla olup, stabilizasyonunda çoğunlukla anaerobik çürütme metodu tercih edilmektedir (Bilgin vd. 2002; Epstein, 2002).

İkincil arıtmanın temel prensibi, çözünür biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOİ) uzaklaştırmaktır. BOİ biyokimyasal olarak uzaklaştırılır ancak bu amaçla fiziksel ve kimyasal arıtma işlemleri de kullanılmaktadır. Biyolojik sistemlerdeki aktif ajanlar mikroorganizmalardır. Bu ajanlar lagünlerde, aktif çamur sistemlerinde ve damlatmalı filtreler veya biyolojik filtrasyon işlemleri gibi çeşitli yöntemlerde kullanılmaktadır (Aydın, 2004). Aktif çamur; süspansiyon bir yapıya yerleştirilmiş çeşitli bakteri türleri ve aynı yapı içinde yer alan protozoalardan oluşur. Bu sistemde, son çökeltme havuzunda toplanan kullanılmış aktif çamurun sadece bir kısmı stabilizasyon için sistemden uzaklaştırılmakta, diğer kısmı ise geri dönüş çamuru olarak sisteme beslenmektedir (Bilgin vd. 2002). Damlatmalı filtre sisteminde gerçekleşen biyolojik süreçler mekanik bir filtre olarak işlev görmezler. Filtre yataklarından ayrıştırılan katı parçacıklar son çökeltme havuzunda arıtılmış sudan uzaklaştırılmaktadır ancak miktarı çok azdır. Bu çamur, filtre humusu olarak isimlendirilmektedir. Filtre humusu, çoğunlukla ham ön çökeltim çamuru ile karıştırılarak anaerobik olarak çürütülmesi sağlanmaktadır (Bilgin vd. 2002).

İleri arıtım aşaması ikincil arıtmadan daha verimli bir arıtım gerçekleştirmek için kullanılmakta; üçüncül arıtım veya fiziksel-kimyasal arıtım olarak isimlendirilmektedir. Üçüncül arıtım, atıksudan azot ve fosfor uzaklaştırılması ile dezenfeksiyon proseslerini içermektedir (Ata, 2014). Üçüncül arıtım, alıcı ortam

deşarj standartlarının sağlanması için gerekmektedir. Ortamda amonyak ve nitratın oluşması toksik özelliktedir ve azot giderimi, azot oluşumu ile gelişen biyolojik bir işlemdir. Her aşama kendine özgü bakteriler ile yürütülmekte ve o bakterilerin gelişmesi için farklı koşullara gereksinim duyulmaktadır. Fosfor giderimi ise, biyolojik ve kimyasal prosesler birlikte kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Fosforun fiziksel-kimyasal olarak uzaklaştırılması ile aktif çamur tesislerinde üretilen çamur oranında %30 artış görülmektedir. Arıtma sırasında bakteride fosfor birikmekte, bu da atılan çamurun arıtılmasını zorlaştırmaktadır (Aydın, 2004).

### 2.1.3 Arıtma Çamuru Karakterizasyonu için Önemli Parametreler

Çamurun özgül ağırlığı, çamurun yoğunluğunu gösteren bir parametredir. Özgül ağırlık, birim hacimdeki maddenin ağırlığının, birim hacimdeki sıvı ağırlığına bölünmesiyle hesaplanır. Bu oran yaklaşık 1 civarındadır. Çamurdaki katı madde miktarı, kaynağına ve içeriğine bağlı olarak değişmekte ve farklı analiz yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Çamur içeriğindeki kuruluk KM ile gösterilmekte ve % ile ifade edilmektedir (Filibeli, 2013).

$$KM (\%) = 100 - \% \text{ Sıvı Oranı} \quad (2.1)$$

Çamur içindeki katı madde muhtevası arıtma tesisindeki çıkış noktasına göre farklılık göstermektedir. Örneğin; ilk çöktürme haznesinde oluşan çamurun kuruluk miktarı ortalama %2-2,5 aralığında, havalandırma havuzundan sonra geri devirden çıkan çamurun kuruluk miktarı ise %0,5-2 civarındadır (Ekinci, 2019).

Çamurun uçucu katı madde miktarı (UKM) belirlendikten sonra, çamur yüksek sıcaklıkta bir fırın içerisine koyularak kurutulur. Çamur kurduktan sonra geriye kalan kuru çamur miktarı tespit edilir. Uçucu katı madde miktarı, atıksu arıtma çamurundaki organik madde içeriğini belirlemede önem taşımaktadır (Ekinci, 2019).

Partikül boyutu, çamurun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Çamur içerisindeki parçacıkların boyutu eşit olmamakla birlikte, zamana ve ortam şartlarına göre değişiklik göstermektedir (Ongan, 2001). Parçacık boyutunun küçülmesi, parçacık hacmindeki azalmayla bağlantılı olarak yüzey alanındaki artış

nedeniyle genellikle çamurdaki katıların hidrolizini kolaylaştırmaktadır (Müller vd., 2004).

Arıtma çamuru karakterizasyonunda bir diğer önemli parametre çamurun ısı değeridir. Atıksu arıtma çamurunun ısı değeri UKM içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Arıtılmamış birincil çöktürme çamurundaki ısı değeri, çamurdaki yağlı ve akışkan maddelerin oranına bağlıdır. İşlenmemiş çamurlarda ısı değeri daha yüksektir. Arıtma çamurlarının ısı değeri düşük kaliteli kömürlerin ısı değerine eşdeğerdir (Filibeli, 2013).

Arıtma çamuru karakterizasyonunda kullanılan parametrelerden biri de zeta potansiyelidir. Zeta potansiyeli, çamurun davranışını ve işlenmesini etkileyen önemli bir ölçüttür. Yüksek partikül yükleri flokülasyonu önlemekte, bu nedenle çamurun suyunu vermesi zorlaşmaktadır (Filibeli, 2013).

Çamurun akışkanlık özelliği de çamur karakterizasyonu ile ilgili bilinmesi gereken özelliklerdendir. Çamurun akışkanlığının incelenmesi, malzemenin hareket özelliğini ve deformasyonunu araştıran bir ilim olan “reoloji bilimi” olarak da bilinmektedir. Çamurun hareketliliğini etkileyen özellik viskozitedir. Viskozite, akışkanlığa karşı gösterilen dirençtir (Filibeli, 2013).

Gübre değeri açısından incelendiğinde; su içerisinde hemen eriyebilen azot, fosfor ve potasyum bitkilerin gelişimi açısından son derece önemlidir. Arıtma çamurunun gübresel önemi N, P ve K içeriğine göre değerlendirilmekte ve kazanmaktadır. Kimyasal gübrelere kıyasla arıtma çamurlarında; azot, fosfor ve potasyum daha az bulunmaktadır. Sanayi olmayan yerleşimlerden kaynaklanan atıksuların arıtımı sonucu meydana gelen arıtma çamurları genellikle tarımsal gübre olarak daha kullanışlıdır. Çünkü bu atıksulardan meydana gelen çamur içerisinde ağır metal bulunma olasılığı daha az olduğundan, bunun sonucunda oluşan çamur içerisinde ağır metal olmayacağı için, tarımda gübre olarak kullanılması daha az risk taşımaktadır (Filibeli, 2013).

#### 2.1.4 Türkiye’de ve Dünyada Arıtma Çamuru

Toplam nüfusu yaklaşık 500 milyon olan Avrupa Birliği ülkelerinde çamur üretimi 13 Mt/yıl’ın üzerindedir ve kuru madde olarak yılda kişi başı 10 ila 15 kg (27-41 g KM/kişi/gün) arıtma çamuru üretilmektedir (Grobelaç vd. 2019). TÜİK Atık İstatistikleri, kentsel atıksu arıtma tesislerinde 2020 yılında bertaraf ve geri dönüşüm yöntemlerine göre 314.325,4 ton arıtma çamuru üretildiğini belirtmektedir (URL-1, 2023).

Santrifüj, filtre presler ve özellikle belt presler Türkiye’de en yaygın olarak kullanılan çamur susuzlaştırma yöntemleridir. Çamurun tarımda gübre olarak kullanımı çok sınırlıdır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı; Türkiye’de çamur da dahil olmak üzere atıkların kullanımı ve uygulamalarına ilişkin yasal düzenlemeyi yayınlamaktadır. Bakanlık, arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında yakılmasına izin veren bir genelge yayınlamıştır. Oluşabilecek emisyon sorunu ve diğer çevresel faktörler göz önünde bulundurularak endüstriyel çamurlar için test amaçlı sınırlı yakma çalışmaları yapılmıştır. Sadece belirli sayıda çimento fabrikasının çamur yakma ruhsatı bulunmaktadır. Çamurun çimento fırını yakıtına katılması çimento kalitesini etkileyebileceğinden bu alanda dikkatli adımlar atılmaktadır (Salihoglu vd. 2007).

Kurulan yeni tesisler ve tesislerin geliştirilmesinden ötürü arıtma çamuru yönetimi önemli bir konu haline gelmiştir. Çamurun dünyada yönetimi farklıdır. Arıtma çamuru bertarafı sırasında uygulanan işlemler, ülkelerin yönetmelikleri ve politikaları doğrultusunda belirlenmektedir. Dünyada her geçen yıl arıtma çamuru miktarında artış görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda, arıtma çamurunun Çin başta olmak üzere AB ve ABD’de fazla miktarda olduğu görülmüştür. Çin’de 2009 yılında 9,18 milyon ton arıtma çamuru, 2010 yılında AB ülkelerinde 1,17 milyon ton, ABD’de ise 8 milyon ton arıtma çamuru meydana gelmiştir (An ve Liu, 2017; Arlabosse vd. 2012; Bennamoun, 2012). AB’de çamur üretimi nüfus başına 0,1-30,8 kg/yıl aralığında değişkenlik göstermektedir (Kelessidis ve Stasinakis, 2012; Solmaz ve Okaygün, 2018).

Amerika kıtasında Brezilya, Arjantin, Peru ve Kolombiya kıtada en geniş atıksu arıtma kapsamına sahiptir ve çamur yönetiminin ilk kez gerçekleştirildiği ülkeler arasında yer almaktadır. Brezilya'da çamur yönetimi biraz daha karmaşıktır. Brezilya çamur yönetimi uygulayan ilk ülkelerden biri olmasına karşın, kanalizasyonun sadece %27,2'sinin arıtımı düzgün olarak çalışmaktadır. Arjantin, Peru ve Kolombiya'da çamur yönetimi benzerdir. Bu bağlamda, Güney Amerika ülkeleri atıksu arıtımına önem vermiş olsa da arıtma çamurunun yönetimi fazla ilgi görmemiştir (Xu, 2014).

Norveç'te çamurun %90'ından fazlasının arazi uygulamaları için kullanıldığı görülmektedir. Bu çamurun üçte biri parklar, spor sahaları, yol kenarları, çöplükler için, üçte ikisi ise ekilebilir arazi için kullanılmaktadır. Norveç arıtma çamurunun büyük çoğunluğunu tarım için kullanmasına rağmen, çevre sağlığını sağlamak amacıyla çamur ürünlerinde bulunan ağır metaller için katı sınırlamalar getirmiştir (Xu, 2014).

Arıtma çamurunun tarımda kullanımı Belçika, İsviçre ve Hollanda'da yasaklanmıştır. Bu nedenle Avrupa ülkelerinde çamurun yakma işlemi öncelikli olarak yapılmaktadır. Malta, Yunanistan ve İzlanda'da ise arıtma çamuru bertarafı için düzenli depolama yöntemi tercih edilmektedir. Finlandiya, Estonya gibi ülkelerde ise arıtma çamuru, kompostlaştırma işlemi sonrasında yeşil alanlara serilmektedir. Japonya'da %75 oranında yakma veya kurutma işlemleri tercih edilmektedir (Bennamoun, 2012).

Avrupa Birliği ülkelerinde arıtma çamurlarının %45'i tarımda, %23'ü yakma ise yakma proseslerinde kullanılmaktadır (Öztürk vd. 2015). AB, arıtılan çamurun sahada tekrar kullanımını uygun görmektedir. Avrupa Birliği ile uyum sürecinde katı atıkların daha çevresel bir şekilde arıtılması gerekmektedir. Bu bağlamda düzenli depolama, AB üyesi ülkeler tarafından kabul gören en düşük organik atık arıtma standardıdır. Diğer taraftan, Avrupa Birliği 1999/31/EC nolu katı atık düzenli depolama direktifine göre 2013 yılından sonra atıkların %50'den, 2020 yılından sonra da %35'ten fazlasını düzenli depolama yaparak bertarafına yönelik sınırlamalar getirilmiştir (Aksu, 2008).

## 2.2 Arıtma Çamuru Bertaraf Yöntemleri

Arıtma işleminin ilk aşamalarında prosesin tipine bağlı olarak her bir işlem türünde farklı özelliklerde çamur oluşumu görülmektedir. Oluşan çamur arıtma tesisinden alınıp işlenerek bertarafı gerçekleştirilmelidir. Etkili bir çamur yönetimi yapılması için atıksu arıtma tesisinin önceden projelendirilmesi gerekmektedir. Arıtma tesislerinden çıkan çamurlar için en etkili bertaraf yöntemlerinin seçilmesi arıtılan suyun özelliklerine, uygulanan arıtma metotlarına, içerdiği kimyasallara, yönetmeliklere vb. unsurlara bağlıdır. Arıtma çamurlarının yönetimi oldukça maliyetli bir işlemdir. Bu maliyet toplam atıksu arıtma maliyetinin %50-60'ı kadardır (Chen vd. 2014).

Çamurların bertarafı konusunda uzun yıllar boyunca birçok bilimsel çalışma ve araştırma yapılmıştır (Özyazıcı ve Özyazıcı, 2012). Fakat bu çalışmaların birçoğunda enerjiden elde edilecek verim göz ardı edilmiş, bu konuda verim artırmaya yönelik bir tesis planı öne sürülmemiştir (Rojas ve Zhelev, 2012). Atıksu arıtma tesislerinde enerji üretimi geri kazanım ile sağlanmaktadır. Ancak verimin %100 olduğu bir tesis neredeyse bulunmamaktadır (Yüksekdağ vd. 2020).

Bazı gelişmiş ülkelerde, çevre yönetmelikleri açısından, atıksu arıtma tesislerinin oluşturduğu arıtma çamurlarının düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmesi uygun görülmemektedir. Yeni yönetmeliklerde çıkan çamurun ilk olarak kurutulması, daha sonra yakılmasından sonra oluşan küllerin sızıntı yapmadığından emin olunan uygun depolarda saklanması gerektiği belirtilmektedir. Literatürde atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurun değerlendirilmesi ve çeşitli sektörlerde kullanılmasına dair çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin; çamurun gübre olarak veya bir ısıl enerji kaynağı olarak değerlendirilebileceği de görülmüştür (Garcia-Gomez vd. 2002; Logan, 2005).

Çamur bertaraf prosesi, arıtma tesislerindeki önde gelen maliyet sebeplerinden biridir. Çünkü bir arıtma tesisinde tesisin toplam yapım maliyetinin %20-%30'unu, işletme maliyetinin ise %50-%70'lik bir kısmı çamur bertaraf prosesine harcanmaktadır (İrdemez vd. 2016). Yapılan çalışmaların büyük bir kısmı bu maliyeti azaltmaya ve en etkili biçimde kullanmaya yöneliktir. Bertaraf işlemi maliyetinin yüksek olmasına

rağmen, daha ekonomik bertaraf metotları da bilinmektedir (Lee vd. 1987). Arıtma çamuru bertaraf yöntemleri ön arıtma, yoğunlaştırma, stabilizasyon, şartlandırma, susuzlaştırma, kurutma, yakma ve düzenli depolama olarak sıralanmaktadır.

### **2.2.1 Ön Arıtma**

Ön arıtma işlemi öğütme, kum ayırma ve karıştırma gibi işlemlerden oluşur. Çamurdaki büyük parçacıklar, tıkanmayı ve ekipmanlara zarar gelmesini önlemek için daha küçük parçalara ayrılmalıdır. Kum tutucuların yetersiz kaldığı durumlarda çamur içerisindeki kumu ayırtırmak için kum ayırma işlemi uygulanmaktadır (Öztürk vd. 2015).

Öğütme işlemi, çamurun içindeki büyük parçaların daha küçük hale getirilip, işlem esnasında tıkanmaların önlenmesi amacıyla yapılır. Ancak öğütücüler, yapılan işlemin karmaşık olmasından ötürü özen gösterilmesi gereken makinalardır. Başlıca öğütme gerektiren prosesler; santrifüj ile ayırma, bant filtre ile susuzlaştırma, mono pompayla ayırma, ısı arıtma ve klorla oksidasyon işlemleridir (Tchobanoglous vd. 2004).

Kum tutucuların çalışmadığı veya yeterli gelmediği durumlarda kum ayırma işlemleri uygulanmaktadır. En iyi kum ayırma yöntemi santrifüjdür ve etkili bir kum ayırma işlemi gerçekleşmesi için çamurun sulu olması gerekmektedir (Ekici, 2020).

Karıştırma işlemi birincil, ikincil ve üçüncül atıksu arıtma proseslerinde yapılmaktadır. Karıştırma işlemi ile çamurun homojen bir hale gelmesi susuzlaştırma, ısı arıtma ve yakma işlemleri için oldukça önemlidir. Bu, verimin artmasını sağlamaktadır. Çamur, ön çökeltim tankında borularda, bekletme süresi uzun olan çamur işleme sistemlerinde ise ayrı karıştırma tanklarında karıştırılmaktadır (Ekici, 2020).

### **2.2.2 Yoğunlaştırma**

Çamuru daha kıvamlı hale dönüştürerek işleme daha az miktarda çamurla devam edebilmek amacıyla çamur yoğunlaştırma sistemleri kullanılmaktadır. Yoğunlaştırma işlemi katı madde derişimini 25 kat artırabilmektedir. Yoğunlaştırma işlemi çöktürme

ve yüzdürme gibi yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu sayede yoğunlaşan çamurun hacmi küçültülerek susuzlaştırma işleminin masrafı azaltılabilmektedir. Yoğunlaştırma işleminde ağırlıklı çökeltme metodunun güzel sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Kimyasal koagülantlar eklenerek çökeltimin hızlandırılması mümkündür. Gözenekler arasında mevcut olan su bu metotlarla giderilebilmektedir (Sıkı, 2017).

### 2.2.3 Stabilizasyon

Çamur stabilizasyonu, atıkları kararlı ürünlere dönüştürme, organik madde ve patojenleri azaltma ve çeşitli teknikler kullanarak kokuları giderme işlemi olarak tanımlanır. Stabilizasyon işleminde, uçucu maddelerin biyolojik indirgenmesi ve kimyasal oksidasyonu, mikrobiyal büyümeyi önlemek için çamura kimyasal madde eklenmesi, çamurun sterilizasyon veya dezenfeksiyon süreçlerine tabi tutulması için ısı işlem uygulanabilir (Filibeli, 2013). Bu bağlamda, çamur stabilizasyonunda kullanılan başlıca işlemler; kireç stabilizasyonu, ısı işlem ile stabilizasyon, kompostlaştırma, anaerobik ve aerobik stabilizasyon olarak sıralanabilir (Aydın, 2020).

Kireçle stabilizasyon işleminde iki metot kullanılır. Bu metotlar; sıvı çamura kireç eklenmesi ve susuzlaştırılmış çamura kireç eklenmesidir. Sıvı çamura kireç ilavesi yönteminde, sıvı formdaki çamura sönmüş kireç  $[Ca(OH)_2]$  ilave edilerek karıştırılır. Böylelikle çamurun pH değeri ve katı madde içeriğinde artış görülmektedir. Susuzlaştırılmış çamura kireç ekleme yönteminde ise suyu alınmış çamura sönmemiş kireç (CaO) eklendiğinde ortam sıcaklığının yükseldiği gözlemlenmektedir (Bilgin vd. 2002).

Çamurun susuzlaştırılma seviyesinde ve biyo-bozunurluğunda artış olması isteniyorsa ısı işlem tercih edilmektedir. Bu işlemde ilk olarak belirli bir boyuta getirilen çamur yüksek basınca maruz bırakılarak pompalanır (Öztürk vd. 2015). Çamurun sıcaklığı  $170^{\circ}C$ 'ye ulaştıktan sonra çamur büyük pişirme kaplarına alınır ve buhar enjeksiyonu ile sıcaklığı  $180^{\circ}C$ 'ye yükselttilerek 30 dakika pişirilir. Sonra soğuması için taze çamur ilave edilerek karıştırılır. İşlem sırasında oluşan gazların uzaklaştırılması yakılarak,

filtrelenerek veya bazı durumlarda havalandırma havuzlarının tabanındaki difüzörler ile sağlanır. Islak hava oksidasyonu işlemi de ısı işlem prosesine benzer şekilde yürümektedir. Fakat, ıslak hava oksidasyonunda daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir.

Bir aerobik biyolojik çamur stabilizasyon metodu olan kompostlaştırma yönteminde, prosesin güvenli olması ve kullanıma uygun bir yapıya sahip olması ile nihai ürün elde edilebilmektedir. Kompostlaştırma işlemi sonunda uçucu katı maddelerin yaklaşık %20-30'u karbondioksit ve suya dönüştürülür. Bu işlemde 50-70°C'lere ulaşan sıcaklık sayesinde patojenlerin iyi bir şekilde uzaklaştırılması sağlanır. Doğru bir şekilde kompostlaştırılan arıtma çamurlarının bahçe düzenlemeleri veya tarım alanında kullanımı mümkündür (Tchobanoglous vd. 2004).

En eski çamur stabilizasyon yöntemlerinden biri olan anaerobik çürütme, organik ve inorganik maddelerin oksijensiz ortamda parçalanması olarak bilinmektedir. Anaerobik çürütme, evsel ve endüstriyel atıksu arıtımından kaynaklanan çamuru stabilize etmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Anaerobik çürütme hala en yaygın çamur stabilizasyon prosesi olarak kabul edilmekte olup, arıtma çamurunun faydalı kullanımının yanı sıra enerji tasarrufu ve geri kazanımı sağlamaktadır. Evsel atıksu arıtımı sonucu oluşan kanalizasyon çamurunun anaerobik çürütülmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkan biyogaz, tesis işletimi için gerekli olan enerjinin çoğunu sağlayabilmektedir (Tchobanoglous vd. 2004). Stabilizasyon sırasında birçok patojenik mikroorganizma zararsız hale dönüştürülmektedir. Anaerobik stabilizasyon işleminin son ürünü toprak şartlandırıcısı veya gübre olarak değerlendirilmesi mümkün olan stabilize çamurdur (Öztürk, 2006).

Aerobik stabilizasyon, çeşitli arıtma işlemleri sonucunda meydana gelen çamurların, oksijen varlığında biyolojik stabilizasyonu için tercih edilen bir işlemdir. Bu işlemle oluşan arıtma çamurundaki inorganik azot daha çok nitrat formunda bulunduğu için gübreleme değeri fazladır. Fakat işlem sonunda biyogaz gibi bir ürün oluşmaması bu metodun en büyük dezavantajıdır (Bilgin vd. 2002).

#### 2.2.4 Şartlandırma

Şartlandırma işlemi, çamur susuzlaştırma işleminden önce çamurun su verme özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal şartlandırma, elutrasyon, termal şartlandırma, dondurma-çözme gibi şartlandırma yöntemleri bulunmaktadır. Kimyasal şartlandırma, bu amaçla en sık kullanılan yöntemlerdendir (Filibeli, 2013).

Arıtma çamurlarının, oluştuğu kaynağa göre değişen, kendine özgü karakteristikleri vardır (su içeriği, yüzey kimyası vb.). Dolayısıyla şartlandırma işlemi, değişen bu özellikler sebebiyle etkilenmektedir. Şartlandırmaya etki eden unsurlar; çamur pH ve alkalitesi, parçacık boyutu ve dağılımı, yüzey yükü ve hidrasyon derecesi, katı madde derişimi, çamurun kaynağı ve diğer fiziksel unsurlardır (Ekici, 2020).

#### 2.2.5 Susuzlaştırma

Susuzlaştırma, çamurun su içeriğini azaltmak için tercih edilen fiziksel bir yöntemdir. Bu işlemde genelde önce yoğunlaştırma sonra susuzlaştırma yapılmaktadır. Susuzlaştırma işlemi esnasında yoğunlaşan çamurdan biraz daha su çekilerek çamur katı madde oranının %25'e kadar yükselmesi sağlanmaktadır (Filibeli, 2013).

Süzme ve buharlaşma, başlıca doğal susuzlaştırma metotlarındandır. Mekanik susuzlaştırma yöntemi hızlı gelişen bir süreçtir. Kapiler hareket, filtrasyon, santrifüj, sıkma, sıkıştırma ile ayırma en çok tercih edilen mekanik susuzlaştırma işlemlerindendir. Susuzlaştırma prosesinde çamurun karakteristiği, alan ihtiyacı ve susuzlaştırma sonrası gerçekleşecek kek özelliği göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Örneğin; yer bulma sorun teşkil etmiyorsa kurutma yatakları ve lagünler, yer bulmak bir problem ise mekanik susuzlaştırma yöntemi tercih edilmelidir. Bütün çamur susuzlaştırma işlemleri gerçekleştirilirken koku oluşumu kontrol edilmelidir. Koku, ayrıştırılmış çamurun havasız bir ortamda susuzlaştırılması sırasında özel dikkat gösterilmesi gereken bir faktördür. Fakat çürütme işlemi esnasında küçülen parçacıklar mekanik susuzlaştırma işlemi daha zor hale getirdiği için aerobik çamur çürütme yöntemi uygulanan yerlerde mekanik susuzlaştırma yapılmamalıdır. Aerobik çürütme yapılmış olan çamurlarda kum yatakları vb. doğal

susuzlaştırma metotları kullanmak daha etkilidir. Pres filtre, kurutma yatakları, bant filtre ve lagünler öncelikli olarak tercih edilen doğal susuzlaştırma yöntemleri olmasının yanı sıra, susuzlaştırma yöntemi olarak sazlık gibi bitki örtüsü ile sarılmış ve altı geçirimsiz malzeme ile kaplanmış çamur kurutma yatakları da kullanılabilir. Geçtiğimiz yıllarda vakum filtreleri de tercih edilen yöntemlerden olmasına rağmen daha etkili yöntemlerin geliştirilmesiyle çok daha az kullanılmaya başlanmıştır (Ekici, 2020).

### **2.2.6 Kurutma**

Arıtma çamurunun kurutulması işlemi çamurun içeriğinde mevcut olan suyun çekilmesiyle yapılmakta ve bu sayede çamur hacminde küçülme sağlanmaktadır. Kurutma işlemi, bir ısı arıtma işlemidir. Isı çamura direkt olarak veya dolaylı olarak aktarılabilir. Yüksek sıcaklıktaki gazla çamurun temasının sağlanması doğrudan kurutma yönteminde yapılmaktadır. Bu yöntemde dönen tamburlu ve akışkan yataklı kurutucular sıklıkla tercih edilmektedir. Dolaylı kurutmada ise ısıtılmış bir maddeyle çamurun temas etmesi sağlanarak iletim yoluyla kuruma gerçekleştirilir. Kurutma, farklı sıcaklıklarda yapılabilen bir işlemdir fakat 300°C'yi aşan sıcaklıklarda dioksin/furan oluşumunun önlenmesi ve proses kontrolünün iyi yapılması gerekmektedir (KAMAG, 2015).

Arıtma çamurunun suyunu azaltmak için tercih edilen en eski metotlardan biri kurutma yataklarıdır. Çamurlar, stabilizasyondan sonra çamur kurutma yataklarına aktarılırlar. Kurutma işleminden yapıldıktan sonra nihai bertaraf için düzenli depolama sahalarına iletilirler ya da gübre olarak tarımda kullanılırlar. Çamur kurutma yataklarının düşük maliyetli olması, yönetilmeleri için özel bir ilgi gerektirmemesi ve oluşan çamur kekinin katı madde oranının yüksek olması avantaj sağlamaktadır (KAMAG, 2015). Kurutma yöntemlerine başlık 2.3'te detaylıca değinilecektir.

### **2.2.7 Yakma**

Çamurun içindeki yanabilen maddelerin ekzotermik biçimde oksidasyonu yanma olarak adlandırılmaktadır. İçindeki su miktarı azaltılan çamur, oksijen varlığında 420-500°C aralığında tutuşabilmektedir. Organik katıların tümünün yanması için ise en az

760-820°C sıcaklık gerekmektedir. Yakma işleminin sonunda katı atıklar kütlece %75, hacimce %90 azalmaktadır (Palabıyık, 1998). Yakma işleminin birçok avantajı bulunmaktadır. Çamurun yakılmasıyla çamur hacmi azalmakta, dolayısıyla bertaraf edilmesi gereken çamur miktarı da azalmaktadır. Çamurdaki toksik maddeler ve patojenler giderilmektedir. Ayrıca yakma işleminde enerji geri kazanımı mümkün olduğundan maddi kazanç da sağlanmaktadır (Karabacak, 2021).

Yakma işleminin birkaç dezavantajı da bulunmaktadır. Bunlar; reaksiyon sonucu oluşan zararlı gazlar, uçucu küllerin etkili bir filtrasyon işleminden geçirilememesi, organik madde içeriği yüksek olan çamurlar yakıldığında organik maddelerin boşa gitmesi gibi durumlardır. Yakma sonucu meydana gelen katı atıkların içeriğinde tehlikeli maddeler bulunması durumunda özel bertaraf işlemleri tercih edilmelidir (Öztürk vd. 2015).

### **2.2.8 Düzenli Depolama**

Düzenli depolama, belirli bir alanda sadece arıtma çamurlarının kabul edildiği (monolitik) veya kentsel katı atıklarla birlikte depolandığı işlemlerdir. Bu depolama yönteminde toprak kirliliği oluşmaması için depolamanın gerçekleştirileceği alan önemlidir. Buna ek olarak, çamurun suyunun doğal veya mekanik yöntemlerle uzaklaştırıldıktan sonra depolanması en mühim husustur. Böylelikle çevreye vereceği zarar en aza indirilmiş olur. Düzenli depolama işlemi, uygulanabilirlik ve maliyet açısından uygun bir işlemdir (Yüksekdağ vd. 2020).

Arıtma çamurlarının düzenli depolanması için kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki sadece arıtma çamurlarının depolanması işlemidir. İkincisi ise düzenli depolama sahasında diğer atıklarla birlikte depolanmasıdır. Çamurların diğer atıklardan bağımsız olarak depolanmasında tercih edilen iki metot vardır. Bu metotlardan birincisi olan hendek metodunda atığın katı madde içeriğine bağlı olarak, atığın katı madde muhtevası düşük ise dar; yüksek ise geniş hendekler açılarak başlangıç kotuna kadar doldurulmasıdır. Böylelikle alandan sağlanan yarar en üst düzeye çıkarılmaktadır. Çamurun içeriğinde birtakım tehlikeli maddeler yoğun halde bulunuyor ise hendek ve alan tipi depolamada geçirimsiz taban uygulaması ve sızıntı

suyu toplama sistemi de kullanılmaktadır. Bunların dışında bir diğere yöntem ise alan tipi depolamadır.

### **2.3 Arıtma Çamuru Kurutma Yöntemleri**

Çamurdan suyun uzaklaştırılmasına çamur kurutma işlemi denilmektedir. Çoğunlukla susuzlaştırma işlemlerinde su muhtevası azaltılırken; katı madde derişiminin %25'ten fazla olması sağlanmaktadır. %25 katı madde, %75 su içeren susuzlaştırılmış bir çamurda enerji muhtevasının denge halinde olduğu söylenebilir. Bu içeriğere sahip bir çamura yakma işlemi uygulandığında organik bileşenlerin yanmasından dolayı açığere çıkan enerji, neredeyse çamurda mevcut olan suyun buharlaştırılması için gerekli olan enerjiye denktir. Su içeriğere daha da azaltılmak isteniyorsa çamur kurutma yöntemi tercih edilmelidir (Ünlü, 2020).

Çamur kurutma yönteminin iyi yanı, kuru madde oranının %90 civarına getirilmesi ve kütle azaltılmasının yanında, çamurun ısıl değereinin de 12,5 MJ/kg civarına yükseltilmesidir. Başka enerji kaynakları ile kıyaslandığında, %90 kuruluk oranına ulaşan arıtma çamuru enerji kaynağı bakımından da farklı bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. %85-92 aralığında kurutulmuş arıtma çamurunun ısıl değere 8,0-15,8 MJ/kg, kuru odunun ısıl değere 15,5-19 MJ/kg, mineral kömürün ısıl değere yaklaşık 29 MJ/kg ve kahverengi kömürün ısıl değere 8,4-16,8 MJ/kg civarındadır (Garanto, 2016).

03.08.2010 tarihinde yürürlüğe giren “Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik” gereğince arıtma tesisi bir milyonun üzerinde nüfusa hizmet ediyorsa üretilen çamurların %90 kuruluk değereinde olana kadar kurutulması şart koşulmuştur. Fakat tekniğere doğru olduğu ve maddi açıdan uygun olduğu belgelenmesi koşulunda çamurlar %90 katı madde sınırının altında kullanılabilir (Çevik, 2017).

#### **2.3.1 Termal Kurutma**

Arıtma çamuruna uygulanan termal yöntemler; termal kurutma, yakma prosesleri ve termal şartlandırma işlemleridir. Termal şartlandırma işleminde ek olarak kimyasal

kullanılmasına gerek yoktur. Bu yöntem çamurdaki bağlı suyun açığa çıkmasını, uygulanan basınç ve ısı değişimleriyle sağlamaktadır. Termal kurutma yönteminde çamurdaki su içeriği ısı vasıtasıyla buharlaştırılmakta ve yakma işleminde çamur içeriğindeki organik katıların ısıyla bertarafı gerçekleştirilmektedir. Son zamanlarda arıtma çamuru miktarındaki artışa rağmen bertaraf için gereken alanın sağlanamaması nedeniyle ve birtakım ekonomik sebeplerle termal kurutma yöntemleri en etkili bertaraf yöntemlerindedir. Isıl işlem sonrası oluşan çamur, tarımda çimento katkısı olarak kullanılabilirdiğinden az da olsa gelir getirici bir faaliyettir. İşletme aşaması maliyetlidir ve aynı zamanda çalışanların iyi bir eğitime tabi tutulması gerekmektedir. (Ekici, 2020).

Termal kurutma yöntemleri, doğrudan ve dolaylı kurutma şeklinde ikiye ayrılabilir. Doğrudan kurutma yapan sistemlerde ek yakıt veya çamurun kurutulmasıyla meydana gelen sıcak gazların çamurla teması sağlanmakta bu şekilde çamurdaki suyun buharlaştırılması sağlanmaktadır (Fonda vd. 2009). Bu tip kurutucu örnekleri; döner tamburlu, akışkan yataklı ve bant kurutuculardır.

Dolaylı kurutmada, arıtma çamuru sıcak bir sıvı ile temas etmez ve sıcak yağ veya buhar kapalı bir sistemde dolaşır. Kurutulması için ısı iletimi ile çamura ısı transfer edilir. Katıların sıcaklığı, çamur ve ısıtıcı akışkan arasındaki sıcak metal yüzeye temas ettirilerek arttırılır. En sık kullanılan dolaylı kurutucu türleri, dikey tepsi tipi, paletli, disk tipi ve ince filmlü kurutuculardır (Çevik, 2017; Peregrina vd. 2008).

Sabit kurutma esnasında çamurdan serbest su alınmaktadır. Su, çamurun içinde tutulan son nem içeriğidir ve miktarı çamur tipi ve kurutma koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Nem muhtevastaki ve kurutma oranlarındaki değişimlerin yanında, katı içeriğe bağlı olarak granülasyondan önce çamurun fiziksel durumu ıslak zondan yapışkan zona değişecektir (Chen vd. 2006; Grüter vd. 1990).

Termal yolla çamur kurutma işleminin başlıca avantajları şunlardır (Sıkı, 2017):

- Çamurun ihtiva ettiği suyu uzaklaştırmak için hacmi yaklaşık olarak 4-5 katı civarında küçültülmektedir. Bu sayede iletilmesi ve depolanmasına kolaylık sağlanmaktadır.

- Kurutma işleminde sonunda çamurun ısı değeri artmakta, yakıt ısı değeri uygun görüldüyse başka bir yakıt ilavesi olmaksızın yakılabilmektedir.
- Çamur içeriğindeki patojenlerin yok olması nedeniyle çamur daha hijyenik hale gelmektedir.
- Çamurdaki toplam katı madde içeriğinin KM > %90 olması durumunda çamur stabil hale gelmektedir.
- Tarım alanında kullanılırken çamurun yapısı düzeltilmektedir.
- Çamur değerli hale gelmekte ve böylelikle tarımda gübre toprak düzenleme amacıyla kullanılabilir.

### 2.3.2 İnce Tabaka Kurutma

İnce tabaka kurutma, nemli ve gözenekli ortamlarda termal davranışı incelemek için önemli ve genel bir yöntemdir. İnce tabakalı kurutmada, arıtma çamurunun su içeriği ve ortalama sıcaklığı, arıtma çamurunun ısı ve kütle transfer davranışını yöneten termal iletkenliği, özgül ısı kapasitesini, yoğunluğu ve difüzyon katsayısını etkiler (Deng vd. 2013). Tek bir deneysel çalışmada çamur tabakasının nem içeriğini ve ortalama sıcaklığını belirlemek için farklı çalışma koşulları altında birkaç deney gerekmektedir. Çamur içeriğinin karmaşık olması, doğrusal olmayan ve zamanla değişen kurutma prosesinden ötürü, transfer modellerinin uygulanabilirliği, arıtma çamurunda ısı ve kütle transferinin yakınsama ve tahmin doğruluğu üzerinde bazı sınırlamalar getirmektedir (Huang ve Chen, 2015).

Sun vd. (2017), evsel atıksu çamurunun, havadan ultrasonla desteklenen, 70 ila 130°C arasındaki hava sıcaklıklarında laboratuvar ölçekli bir konveksiyonlu kurutucuda ince tabaka kurutma davranışını araştırmıştır. Üç ultrasonik güç seviyesinde (30, 90 ve 150 W) sadece konvektif işlemin kuruma hızı ultrasonik işlemlerle karşılaştırmıştır. 30, 90 ve 150 W ultrasonik güçteki ortalama kurutma hızları, saf konveksiyonla kurutmaya (ultrasonik olmayan) kıyasla kurutma sıcaklığı aralığında yaklaşık %22,6; %27,8 ve %32,2 artmıştır.

Huang ve Chen (2015), belediye atıksu çamurunun konvektif kurutma sırasında ince tabaka kuruma davranışını tahmin etmek için geri yayılım (BP) ve genelleştirilmiş

regresyon sinir ağı modellerini (GRNN) araştırmışlardır. BP modelinin, sıcak hava basınçlı konvektif kurutma sırasında kanalizasyon çamuru ince tabakasının nem muhtevasını belirleme doğruluğunun, GRNN modelininkinden yüksek olduğu gösterilmiştir.

### 2.3.3 Biyo-kurutma

Biyolojik olarak kurutulan çamur yığınlarından su kaybı, öncelikle serbest suyun buharlaşmasıyla elde edilir ve hava konveksiyonu ile uzaklaştırılır (Navaee-Ardeh vd. 2010; Zhao vd. 2010). Arıtma çamuru, biyo-kurutma esnasında, suyun uzaklaştırılmasının ana mekanizması konvektif buharlaşmadır ve esas su kaybı yığından buharlaşan sudur (Cai vd. 2012; Velis vd. 2009).

Yakma amacıyla yapılan bir diğer ön arıtma yöntemi olan biyo-kurutma, son zamanlarda fazla miktarda su barındıran biyolojik atıklardan suyun uzaklaştırılmasını hedeflemektedir (Zhang vd. 2016). Kompostlamadan türetilen, biyo-kurutmanın temel mekanizması, organik maddelerin aerobik parçalanması esnasında oluşan ısının suyu buharlaştırma amacıyla kullanılmasıdır (Velis vd. 2009). Biyo-kurutma yöntemi genellikle belediye katı atıkları için kullanılmıştır (Zhang vd. 2016; Zhao vd. 2010).

Uygun çalışma ile daha kısa sürede daha fazla su elde etmek için biyolojik olarak üretilen enerjinin nasıl etkin ve ekonomik bir şekilde kullanılacağı biyolojik kurutma için kilit bir konudur (Velis vd. 2009; Zhao vd. 2010).

Cai vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, basınçlı hava hacminin bir atık çamur biyo-kurutma kümesinden su buharlaşması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Susuzlaştırılan arıtma çamuru, kontrol teknolojisi kullanılarak biyo-kurutma yapılmış, bu esnada sıcaklık, yüzeysel hava hızı ve su buharlaşması belirlenerek hesaplanmıştır. Sonuçlar, en yüksek hava hızının ve suyun buharlaşmasının, termofilik faz ve ikinci sıcaklık arttırma fazında meydana geldiğini, sırasıyla en yüksek  $0,063 \pm 0,027 \text{ ms}^{-1}$  ve  $28,9 \text{ kg ton}^{-1}$  matris değerinin gözlemlendiğini göstermiştir.

Cai vd. (2012), biyolojik kurutma sırasında arıtma çamurunun nem içeriğindeki değişiklikleri araştırmıştır. Kütle nemi ve su buharını izlemek için yerinde yapılan

ölçümlere ek olarak, bu çalışma biyolojik kuru maddenin nem içeriğini, su oluşumunu, su buharlaşmasını ve su kütlesi dengesine göre havalandırılmış su girişini hesapladı. Arıtma çamuru biyo-kurutma malzemesinin nem içeriği, biyo-kurutma kontrol teknolojisi ile %66'dan %54'e düşürülmüştür. Biyo-kurutma ve büyüyen çamurun termofilik aşamalarındaki sıcaklık artışı sırasında, kütle su içeriği, su oluşumu ve su buharlaşması önce artmış, sonra azalmıştır. En yüksek su üretimi ve buharlaşmanın termofilik evrede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Biyolojik kurutma sırasında, su buharlaşmasının su oluşumundan çok daha fazla olduğu görülmüş ve havalandırmanın su buharlaşmasını desteklediği görülmüştür.

#### **2.3.4 Mikrodalga ile Kurutma**

Mikrodalga teknolojisi, dalga boyu 1 mm ile 1 m arasında olan ve 300 MHz ile 300 GHz arasındaki frekansları olan iyonlaştırıcı olmayan bir elektromanyetik radyasyon olan mikrodalga enerjisini kullanır (Karabacak vd. 2015).

Chen vd. (2014) mikrodalga gücünün ve numune kütlesinin arıtma çamurunun kurutma özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yürütmüşlerdir. Kurutma testleri, bir proses kontrol sistemi ile donatılmış modifiye edilmiş bir ev tipi mikrodalga ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kurutma hızının mikrodalga gücüyle doğru orantılı olduğunu, fakat numune kütlesi ile ters orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan çalışmada, daha yüksek güç uygulanarak istenilen sıcaklığa daha kısa sürede erişilebildiği görülmüştür. Mikrodalga kurutma, arıtma çamuru ısı değerinde (5,65 MJ/kg'dan 18,75 MJ/kg'a) önemli bir artış göstermiştir.

Mawioo vd. (2017) yaptıkları çalışmada, çamurun hızlı arıtılması için alternatif olarak pilot ölçekli bir mikrodalga (MW) bazlı reaktörü incelemişlerdir. Araştırma sonucunda MW reaktörünün, gecekondular ve acil durum yerleşimleri gibi alanlarda hızlı çamur arıtımı için kullanıma uygun olduğu ortaya konulmuştur.

Idris vd. (2004) yapmış oldukları çalışmada, 1 kW, 2.45 GHz mikrodalga kaynaklı çok modlu bir mikrodalga aplikatöründe ıslak silika çamurunun mikrodalga ısıtma ve kurutma kabiliyetlerini incelemişlerdir. Deneyde, çeşitli çamur kütleleri (10-1000 g)

kullanılarak, farklı güç altında (400-1000 W) çalışılmıştır. Isınma ve sabit kurutma süresi boyunca teori ve deney arasında iyi bir ilişki kurulmuştur. Daha hızlı kuruma ve daha kısa kuruma süresi için elde edilebilecek en büyük malzeme ve en düşük güç girişi değerleri sırasıyla 1000 g ve 800 W olarak bulunmuştur.

### 2.3.5 Solar Kurutma

Çamur içerisindeki su miktarını azaltmak amacıyla kullanılan teknikler çamurun doğal veya mekanik kurutulması işlemleridir. Fosil yakıt maliyetinin yüksek olmasından ve yanma reaksiyonu sırasında zararlı gazlar açığa çıkabileceğinden dolayı, maliyet oluşturmaması veya belirli miktarda maliyet oluşturmaması ve doğa dostu olması nedeniyle solar enerji tercih nedenidir (Fudholi vd. 2018). 1970'li yıllardaki enerji krizinin ardından çamur kurutma ve diğer birçok alanda kurutma proseslerinde solar enerjiden yararlanılmaya başlanmıştır (Youssef ve Kahil, 2016).

Stabilizasyon işlemine tabi tutulmuş arıtma çamurunun solar kurutulması işlemi, uygulaması ve kullanımı zor olmayan bir yöntemdir. Enerji bakımından maliyetleri daha azdır. Ayrıca, arıtma çamurunda var olan patojen miktarı, solar UV ışınımı ve su muhtevasının büyük oranda azalması ile kontrol altına alınabilmektedir. Bu nedenle, solar kurutma prosesi ile tarım alanında tekrar tekrar kullanılması amacıyla nitelikli çamurlar üretilebilir. Dünyada, çok sayıda solar çamur kurutma tesisi işlev görmektedir. Bu tesislerin inşası ve yönetimi ile alakalı tecrübeler bulunmakla beraber değişik iklim özellikleri gösteren bölgeler için tasarım kuralları bulunmamaktadır ve bu nedenle farklı bölgeler farklı çalışmalar gerektirmektedir (Bauerfeld vd. 2015).

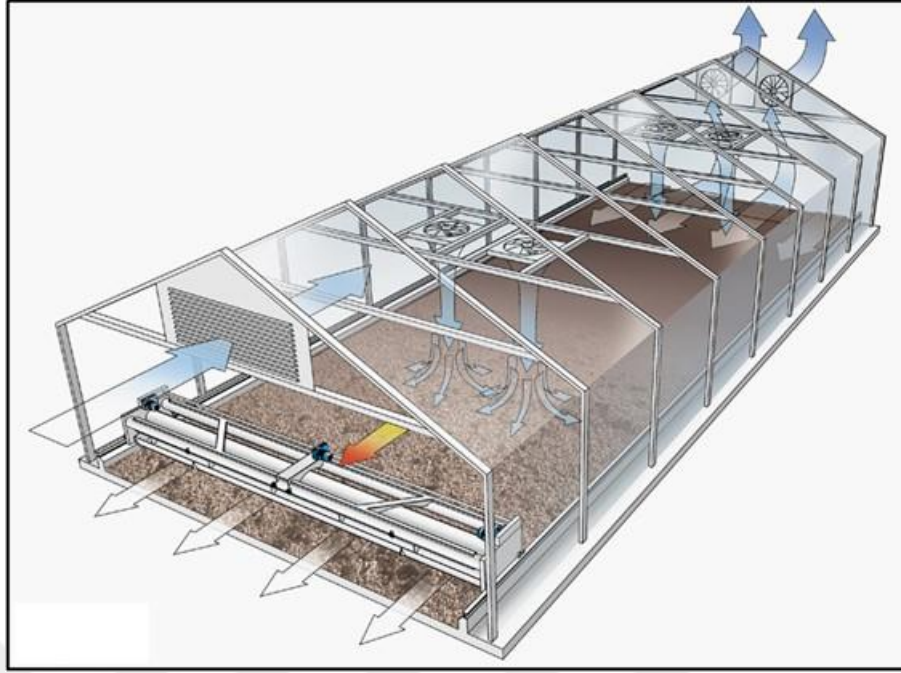
Solar kurutma yönteminin tercih edilmesinin birtakım nedenleri vardır. Örneğin, solar enerjiyle kurutulması sağlanan çamurun depolama sahalarında üst ve ara örtü malzemesi amacıyla kullanımına rastlanmaktadır. Depolama sahalarında gerçekleştirilen çamur bertarafıyla, üst ve ara örtü malzemesi olarak kullanımı arasında mühim farklılıklar vardır. Eğer depolamanın nihai bertaraf şekli gibi kullanımı sağlanırsa arıtma çamurlarının organik madde ve su içeriği, depolama sahası stabilitesine etkilerinde önemli unsurlar olmaktadır. Ara örtü ve nihai örtü olarak kullanıldığında ise kurumuş çamur sahanın örtülmesi, kokunun önlenmesi ve nihai

örtüde toprağı düzenleyici madde olarak daha az miktarda alınarak depolama sahalarına aktarılmaktadır. Bazı bilimsel araştırmalarda arıtma çamurlarının depolama sahası örtü malzemesi olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir (Chen vd. 2006).

Solar kurutma sistemleri, doğal susuzlaştırma ve kurutma sürecinde birincil enerji kaynağı olarak güneşten faydalanır (Kürklü vd. 2003; Salihoglu vd. 2007). Güneş enerjisini kullanarak güneş enerjisiyle kurutma, buhar veya diğer ısı girdilerini kullanan geleneksel termal kurutma sistemlerine nazaran daha fazla enerji tasarrufu sağlar ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltır (Lei vd. 2009).

Kurutma prosesi, yüksek ışık geçirgenliğine sahip bir polikarbonat serada gerçekleştirilir. Zemine serilen çamur karıştırılarak kuruma hızı arttırılır. Nemli havayı seradan uzaklaştırmak için cebri havalandırma sağlanır. Nemli hava dahili sensörler kullanılarak kontrol edilir ve gerekirse bir fan yardımıyla dışarı verilir. Kurutma verimliliği, güneşlenme süresine ve güneş radyasyonu miktarına bağlıdır. Havalandırma ve karıştırma için gereken enerji ortalama 30 kWh/ton'dur (20-40 kWh/ton). Kuru içeriği %85 veya daha fazla olan çamur güneşte kurutma ile elde edilebilir. Satın alma ve işletme maliyetleri termal kurutmada daha düşüktür. Ilıman bölgelerde uygun şartlar ve koşullarda verimlidir (Çevik, 2017; Ritterbusch ve Bux, 2012).

Güneşte kurutma sisteminin halihazırda bir drenaj sistemi vardır, bu nedenle mekanik bir ön drenaja gerek yoktur. Güneş enerjisiyle kurutmada dikkate alınması gereken parametreler iklim koşulları, çamur kurutma özellikleri ve kurutma sistemi tasarımıdır. Ayrıca çamur özellikleri, yağış, bağıl nem ve sıcaklık gibi atmosferik koşullar da dikkate alınmalıdır (Ayvaz, 2000). Solar kurutma sistemine ait bir şematik görünüm ve solar kurutma sisteminde serilmiş çamur sırasıyla şekil 2.1 ve şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Solar kurutma sistemi (URL-2, 2023)



Şekil 2.2 Solar kurutma sisteminde serilmiş çamur (Ekinci, 2019)

### 2.3.5.1 Solar kurutmanın avantajları

Solar kurutma, sera etkisiyle kullanıcı kontrolü sağlanarak yapılan kurutma prosesidir. Bu proses ısıtılan kapalı alanlarda, teknolojik ekipmanlarla birlikte çamura ısı aktarılarak kurutulması işlemidir (Ekinci, 2019). Solar çamur kurutma prosesinde güneş enerjisi kullanıldığından enerji tasarrufu sağlanabilmekte ve diğer çamur kurutma işlemlerine nazaran işlem maliyeti düşük olmaktadır (Lei vd. 2009).

Birincil yakıt harcayan kurutma proseslerinde, buharlaştırılan her bir ton su için en az 800 kWh enerji gerekirken, güneş enerjisiyle çalışan solar kurutma sisteminde ise, 20-30 kWh gibi çok az miktarda enerji yeterli gelmektedir. Bu bağlamda solar enerjiyle çalışmanın maliyeti büyük oranda azaltacağı görülmektedir. Bu sebeple bu düşük maliyetli enerji potansiyellerinin kullanılması öncelikli olmalıdır (URL-3, 2023).

Tablo 2.1 Farklı kurutma sistemlerine ait enerji gereksinimleri (URL-3, 2023)

<b>İşlem Tekniği</b>	<b>Buharlaştırılan 1 ton su için gerekli enerji</b>	<b>Enerji tipi</b>
Santrifüj dekantör ve yakıt ile termal kurutma	1230 kWh/t	Yakıt + Elektrik enerjisi
Isıtılmış kuru hava içinde termal kurutma	970 kWh/t	Yakıt + Elektrik enerjisi
Yüksek basınç ile presleme ve ortamdaki veya ısıtılmış hava ile termal kurutma	735 kWh/t	Yakıt + Elektrik enerjisi
Isıtılmamış ortam havası ile termal kurutma	250 - 330 kWh/t	Elektrik enerjisi
Güneş enerjisi, sera ve aktarma makinesi ile solar kurutma	20 - 30 kWh/t	Elektrik enerjisi

Solar enerjiyle gerçekleştirilen kurutma prosesinde işletmeler enerjiden, bakımdan, nakliye veya bertaraf işlemlerinden kar etmektedir. Böylelikle masrafların azaltılması sağlanmakta ve bu durum işletme sahibine kazanç getirmektedir. Güneşle çamur kurutma yöntemi, kapalı mekânlarda küçük bir alanda da uygulanabilir. Ayrıca kurutulmuş çamurun satıldığı durumlar da görülmektedir (Ekinci, 2019).

### 2.3.5.2 Açık solar kurutma

Oldukça eski yöntemlerden biri olan açık sistem kullanılarak güneş enerjisiyle arıtma çamuru kurutulması yönteminde, sistemin üst kısmı açık olduğu için iklim koşullarından etkilenmektedir. Bu nedenle sera örtüsüyle üzeri kapatılarak mevsimsel durumlardan etkilenmemesi sağlanmıştır (İnal ve Argun, 2019; Öztürk vd. 2015). Açık solar kurutma işleminin yapıldığı bölgede görüntü kirliliği, yakın çevreye koku yayılması ve büyük alan gereksinimi açık solar kurutma yönteminin diğer dezavantajları arasında yer almaktadır (Youssef ve Kahil, 2016).

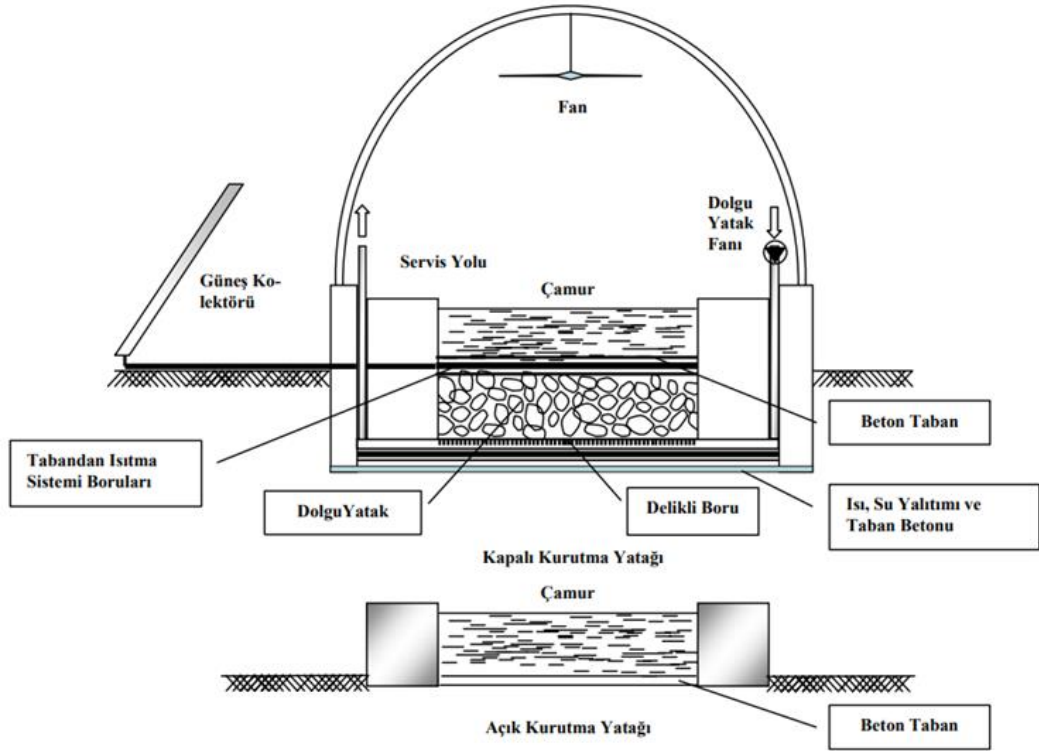
Sera örtülü ve örtüsüz açık sistem kurutma tesislerinin karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda, sera örtülü sistemden daha çok verim alındığı belirtilmiştir (Salihoglu vd. 2007).

### **2.3.5.3 Kapalı solar kurutma**

Solar çamur kurutmada kullanılan kapalı alanlar seralara benzemektedir. Fakat bu alanlar seralara kıyasla yapısal birtakım farklılıklar barındırmaktadır. Kürklü vd. (2003) tünel tip seralarla yaptıkları çalışmalarda taban altında oluşturulan taş dolgu yatak ile iç ve dış ortam arasında 10°C'lik bir fark gözlemlemişlerdir.

Son zamanlarda solar enerjiyle kapalı kurutma yataklarında çamur kurutma açısından ilerleme kaydedilmektedir. Güneş enerjisinden doğrudan veya dolaylı olarak kurutma sistemlerinde faydalanılabilmektedir (Ekechukwu ve Norton, 1999). Bu verilerden yola çıkarak bir pilot tesis tasarlanmıştır. Tasarımda;

- Güneş enerjisinden faydalanılarak kurutma maliyetlerinin en aza indirgenmesi,
- Kurutma esnasında dış ortamdaki gelebilecek etkilerin azaltılması,
- Kurulan alanda sinek, koku ve uçucu bileşiklerin kontrollerinin yapılması,
- Taşınabilir, depolanabilir ve farklı amaçlarla kullanılacak ürün elde edilmesi,
- Gerektiğinde bir kompost tesisine de dönüştürülebilen ve yine gerekli durumlarda geçici depolama da yapılabilecek bir alan oluşturulması,
- Çamur şartlandırma işleminde kullanılan kimyasalların azaltılması
- Sistemdeki ısının korunumunu ve ek enerji kaynağı kullanılmasını mümkün kılan ve çamur stabilizasyonunu da amaçlayan bir proje tasarlanmıştır (Şekil 2.3) (Salihoglu vd. 2007).



Şekil 2.3 Kapalı ve açık pilot tesislerin şematik gösterimi (Salihoglu vd. 2007)

### 2.3.6 Solar Kurutma Yöntemi ile İlgili Literatür Çalışmaları

Arıtma çamurunun solar kurutma yöntemi uygulanarak değerlendirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Scharenberg ve Pöppke (2010) yürüttükleri çalışmada Orta Amerika ülkesi Nikaragua'nın başkentinde gerçekleştirilen güneşle kurutma işlemiyle 30 günlük süre sonucunda 20 kWh enerji harcanarak 1000 ton suyun %87'si uzaklaştırılmıştır. Termal kurutmada ise gereken enerji 800-1000 kWh civarındadır. Bu iki sistem kıyaslandığında güneşle kurutmanın daha doğa dostu olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra yönetim kolaylığı ve kurutma işleminin düşük sıcaklıklarda da gerçekleşmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Çamur yükleme ve taşıma aşamaları dışında herhangi bir çalışana gereksinim duyulmamıştır. Basit ekipman kullanılması ve tesiste çıkan sorunlarda anında müdahale gerektirmemesi de avantajlar arasındadır. Kurutmaya ilaveten ısı sağlamak için güneş paneliyle ısıtılan su, seranın tabanından geçirilmiş ve ısıtılmıştır. Bu proses ile yaz mevsiminde kuru madde muhtevası %15 olan çamur 7-12 gün arasında %94 kuru madde miktarına yükselmiştir. Sonbahar aylarında ise 9-33

gün arasında %90 kuruluk gözlemlenmiştir. Buna ek olarak kurutma esnasında patojenlerin de %99 oranında azaldığı görülmüştür.

Sypula vd. (2013) laboratuvar ortamında yapmış oldukları solar kurutma işleminde, düşük sanitasyon etkisi gözlemlenmiştir. İndikatör bakteriler *E. coli*, fekal streptokoklar ve *Salmonella Senftenberg* W775'in yanı sıra bağırsak paraziti *Ascaris suum*'un yumurtalarının hayatta kalma oranları kurutulmuş çamurda değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çalışılan döngüde güneşte kurutma işleminin etkili olmadığını ve mikroorganizmaları yeterli derecede ortadan kaldırmadığını göstermektedir. Bu nedenle, toprak düzenleyici ve iyileştirici olarak kullanımının yeterli gelmeyeceğini, daha güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için kireçleme, kompostlama gibi ek çamur sanitasyonuna ihtiyaç olacağını belirtmişlerdir.

Ekinci (2019) yapmış olduğu çalışmada çamurun solar kurutma yöntemiyle istenilen kuruluk oranına ulaşma süresini incelemiştir. Solar kurutma yapılmış çamurun kuruluk oranı ocak ayında sekiz günde %50,45 oranında olup, haziran ayında yine sekiz günde bu oranın %90'a yükseldiği görülmektedir. Bu kuruluk oranına gelen çamura anaerobik çürütme yapıldığı için stabildir ve hacmi düşüktür. Böylelikle çamurun taşıma maliyeti de azalmaktadır. Haziran ayında solar kurutma yataklarına 822,4 ton çamur serilmiş ve kuruma işlemi sonrasında 205,6 tona kadar azaldığı ortaya konulmuştur.

Salihoğlu (2018) yürüttüğü çalışmada atıksu arıtma çamurlarının kurutulması için tasarlanmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemin çamur kurutma verimi incelenmiştir. Çamurun kurutulması için otomatik olarak yükleme ve boşaltma sağlayan sistemlere sahip, 5 kat kurutma bandı mevcut olan sera modelinde portatif bir sistem hedeflenmiştir. Otomasyon kontrolü altında işletilen bu sistem, nem alma ve kurutma sistemi (NKS) olarak isimlendirilmiştir. Sisteme her gün en üstteki bandın üzerini 5 cm kalınlıkta kaplayacak şekilde çamur serilmekte ve bir alt kattaki banda iletilerek solar enerji ile kurutma gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda sisteme %14-19 kuru madde içeren 1600 kg arıtma çamuru, 4 gün boyunca her gün 400 kg yüklenmiştir. Çalışmada, yüklenen çamurun 4. günün sonunda %93-98 kuru madde değerine eriştiği belirtilmiştir. İncelenen sistemin konvansiyonel solar çamur kurutma

sistemlerine nazaran daha az alana gereksinim duyduğu ve mekanik çamur kurutma yöntemine göre daha az enerjiyle gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

Mathioudakis vd. (2009), solar kurutma yöntemiyle arıtma çamurundan suyun uzaklaştırılmasını incelemiştir. Yürütülen çalışma sonunda çamur nem içeriğinin %10'un altına düştüğünü, hacim küçülmesinin ise %85'in üzerine çıktığını görmüşlerdir. Arıtma çamuru yaz ayları süresince 7-12 gün gibi bir sürede kurumuş, sonbahar aylarında ise bu süre 32 güne yükselmiştir. Solar kurutma ile arıtma çamurun organik madde içeriğinde çok az değişim görülmüştür.

Al-Otoom vd. (2015), atıksu arıtma tesisi çamurunun yarı sürekli solar kurutulması ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Su içeriği fazla olan çamurlardan organik madde geri kazanımının kolay olmadığını belirtmişlerdir. Optimum işletme koşullarının düşük motor hızında verilebilecek hava ile sağlanabildiğini bulmuşlardır.

Bennamoun (2012), çalışmasında güneş enerjisiyle kurutma işleminin maliyetinin azaltılabileceğini, güneş enerjisi kullanımından fayda sağlanacağını göstermiştir. Kullanılan güneş kurutucularının genel tasarımı, şeffaf malzemedan yapılmış bir sera ve ürünün kalın tabakalar halinde serildiği bir zeminden oluşmaktaydı. Ayrıca, nemlendirilmiş havanın taze hava ile değiştirilmesi ve sera içindeki havanın homojen dağılımını sağlamak için fanlar ve havalandırmalar kullanılmaktaydı. Kurutma sisteminin performansını artırmak için güneş enerjili su ısıtıcısı ve kızılötesi lambalar kullanarak zemini ısıtmak, ısı pompaları kullanmak veya termal enerji depolama sistemleri eklemek gibi diğer yöntemler de denenmiştir. Solar kurutma, açık sistem solar kurutmada daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak atıksu çamurunun kökeni, elde edilen sonuçları etkilemiştir. Alternatif olarak, kurutma sistemlerinin modellenmiş, hava ve kurutulmuş ürün için uygulanan ısı ve kütle dengeleri kullanılmıştır. Atıksu çamurunun güneş enerjisiyle kurutulması tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Kurt (2016), çalışmasında güneş panelleriyle desteklenen sera tipi kurutucuların termal kurutuculara alternatif olup olamayacaklarını maliyet ve gerekli alan kapsamında incelemiştir. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı iklim özellikleri gösteren bölgelerinde farklı çamur üretim miktarlarına sahip yedi atıksu arıtma tesisi

değerlendirilmiştir. Bu tesisler için hem sera tipi kurutucuların hem de güneş paneli sisteminin yatırım ve işletme maliyetleri belirlenmiştir. Sera tipi kurutucuların tesisin çamur miktarı ve bulunduğu yerdeki buharlaşma oranına bakılarak maliyetleri hesaplanmıştır. Bu kurutucular için gerekli alan güneşlenme ve çamurun ilk kuruluk oranlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Sera tipi kurutucularda %70 kuruluğa ulaşılacağı bulunmuştur. Güneş paneli kullanılan alanı ise %70'ten %90 kuruluğa erişmek için gerekli olacak enerji değerleri hesaplanmıştır. Kullanılan güneş panellerinin özel şeklinden dolayı kurutma işlemi maliyetlerini büyük ölçüde etkilediğini, bununla birlikte, sera tipi kurutucunun ve güneş panellerinin yerleştirilmesi için atıksu arıtma tesislerinin yeterli alana sahip olması gerektiği ortaya konmuştur. Büyük atıksu arıtma tesisleri için kullanılan güneş paneliyle desteklenen sera tipi çamur kurutma ünitelerinin ilk maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, düşük enerji giderleri sebebi ile uzun vadede ekonomik olabileceği belirtilmiştir.

Khanlari vd. (2020), yaptıkları çalışmada arıtma çamurunun kurutulması sürecinde şeffaf kapaklı bir kurutma odası tasarlamış, deneysel ve sayısal olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, geleneksel bir kurutma odasıyla, değiştirilmiş kurutma odasının performansları kıyaslanmıştır. Kurutma odasını şeffaf kapak kullanarak değiştirmenin asıl nedeni, daha çok güneş enerjisi toplamak ve böylelikle kuruma süresini azaltmaktır. Ayrıca, kurutma testlerinde, kurutma odası ile tek geçişli geleneksel camsız güneş hava kolektörü birleştirilmiştir. Kurutma sistemlerinin performans testleri 0,010 ve 0,014 kg/s olmak üzere iki farklı akış hızında yapılmıştır. Deneysel ve sayısal bulgulara göre, kurutma odasının şeffaf kapağı kuruma süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Elde edilen ortalama özgül enerji tüketimi ve özgül nem ekstraksiyon hızı değerleri sırasıyla 1,77–2,86 kWh/kg ve 0,77–1,34 kg/kWh aralığındadır. Ayrıca şeffaf kapaklı kurutma odası kullanan sistem için seviyelendirilmiş ısıtma maliyeti değerleri 1,7 ile 2,0 \$-ct/kWh arasında bulunmuştur.

Tuncer vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada belediye arıtma çamurunun kurutulması için yeni bir dışbükey tip güneş emici destekli kurutucu tasarlanmıştır. Deneysel düzeneğinde ana hava ısıtıcısı olarak camsız tek geçişli güneş hava kolektörü kullanılmış ve kurutma, konvansiyonel ve modifiye kurutma odalarında yapılmıştır. Fabrikasyon güneş enerjisi destekli kurutucuların performansını araştırmak için

deneysel ve CFD simülasyonu kullanılmıştır. Ayrıca, fabrikasyon kurutucuların potansiyelini netleştirmek için geliştirilen sistemin etkinliği farklı koşullarda değerlendirilmiştir. Dışbükey solar emici kullanımında, kurutma odası içerisinde yüksek sıcaklık ile yüksek hava debisi sağlandığı ve böylelikle kuruma süresinin kısaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Modifiye edilmiş ve konvansiyonel dolaylı güneş enerjisi kurutma sisteminin deneysel olarak elde edilen ortalama enerji verimi sırasıyla %32,85-47,09 ve %21,32-30,45 aralığındadır.

Wang vd. (2019) yaptıkları çalışmada ince tabakalı sandviç benzeri bir oda kullanılarak yeni bir güneş enerjisi kurutma yöntemi geliştirilmiştir. Çamur yatağının kalınlığı ve güneş ışınımı yoğunluğu gibi işletme değişkenleri ayarlanarak kurutma hızı optimize edilmiştir. Arıtma çamuru yatağının daha düşük yüksekliği, güneş ışığı altında hızlı kurutma (ortalama kurutma hızı 6.72 g/saat) için en uygun arıtma çamuru tabakası kalınlığı 0,5 cm olarak bulunmuştur. 500 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımı şiddeti altında 0,5 cm kalınlığında 11 saat kurutmada arıtma çamurundaki su içeriği %79'dan %5'e düşürülmüştür. Güneş radyasyonunun kurutma sürecini önemli ölçüde etkilediği, güneş radyasyonu 300 W/m<sup>2</sup>'den arttırıldığı için kuruma süresinin 18 saatten 9 saate düştüğü gözlemlenmiştir. Arıtma çamurunun ince tabakalı sandviç benzeri kurutma odasında güneş enerjisiyle kurutulması için elde edilen sonuçlara dayanarak, arıtma çamurunun etkin bir şekilde kurutulması için ince tabaka güneş enerjisi kurutucusunun iyi bir seçim olabileceği öne sürülmüştür.

## **2.4 Çalışma Yapılan Tesis Hakkında Genel Bilgiler**

### **2.4.1 Proje Alanı**

Proje alanı Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer almakta olup doğuda Sinop, batıda Bartın ve Karabük, güneyde Çankırı ve güneydoğuda Çorum illeri ile çevrilidir. Kuzey tarafı Karadeniz ile çevrilidir. Kastamonu İlinin yüzölçümü 13108 km<sup>2</sup> olup, Türkiye yüzölçümünün %1,7'sini oluşturmaktadır. İlin Karadeniz ile 170 km'lik kıyı şeridi bulunmaktadır. İle bağlı 19 ilçe var olup, ilin deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 799 m, merkez ilçenin deniz seviyesinden yüksekliği ise 780 m'dir. İl 32°43'-34°37' doğu boylamları ile 40°48'- 42°02' kuzey enlemleri arasında yer almaktadır.



Kastamonu’da yıllık ortalama yağış miktarı 480 mm’dir. En yüksek yağış mevsimi ile en yüksek yağış ise 74,5 mm ile Mayıs ayında görülmüştür. Kasım ayında ise 29,3 mm olarak gözlemlenmiştir. Yaz mevsiminde yağışlı gün sayısı Nisan ve Mayıs aylarında 13-14,6’dır. Kış sıcaklıkları oldukça düşüktür, İlde kar yağışı olağandır. Kış aylarının soğuk ve karlı geçmesi don olaylarının fazla olmasına neden olmaktadır. İlçede ortalama buzlu gün sayısı 105, ortalama karlı gün sayısı ise 96’dır. İlde hakim rüzgar güney-güneybatı yönünden gelmekte olup hızı 1,3 m/sn’dir. En yüksek rüzgar hızı 27,6 m/sn’dir ve rüzgarın yönü güneydendir. Proje alanında uzun yıllardır menzil rüzgarları 6 m/sn “hafif rüzgarlar” aralığındadır.

### 2.4.3 Atıksu Arıtma Tesisi Sahası

Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi yapımının gerçekleştiği yer belediye mülkü olan Dereköy, Gazoğlu Mevkiileri içerisinde olup, şehir merkezine yaklaşık 4 km uzaklıktadır. Bu bölge Karaçomak Deresi yakınındadır. Atıksu arıtma tesisi (AAT) arazisi mevcut yüzey alanı yaklaşık 4,5 hektardır. En yüksek ve en alçak kotlar sırasıyla 712 m ve 714 m’dir.



Şekil 2.5 Kastamonu AAT konumu

#### 2.4.4 Alıcı Ortam

Atıksu arıtma tesisinden çıkan arıtılmış atıksu Karaçomak Deresi'ne deşarj edilmektedir. Kastamonu'nun arıtılmış atıksularının deşarj edildiği Karaçomak Deresi üzerinde sulama amaçlı yapılan Hasköy Regülatörüne yönlendirilmektedir. Atıksu arıtma tesisi yapılmadan önce, Kastamonu şehir merkezinden toplanan evsel ve endüstriyel atıksular, sulama amaçlı kullanılan su kaynaklarının kalitesini olumsuz etkilemekteydi. Karaçomak Deresi, Kızılırmak Havzası içerisinde yer alan, Kızılırmak Havzası Koruma Eylem Planı'na göre Kastamonu ili hassas alanda yer almaktadır.

Kızılırmak Havzasındaki Karaçomak Deresi, 23.12.2016 tarih ve 29927 Sayılı Resmi Gazete ile yayımlanarak yürürlüğe giren "Hassas Su Kütlelerinin ve Bu Oluşumları Etkileyen Alanların Belirlenmesi ve Su Kalitesinin İyileştirilmesine İlişkin Yönetmelik"teki Ek-2 ve Tablo-2 kapsamında "Hassas Nehir Suyu Bölgesi" olarak tanımlanmaktadır. Aynı Yönetmelikte Karaçomak Deresi de Ek-5 ve Tablo-7'de "Nitrata Duyarlı Alan" olarak tanımlanmaktadır.

Atıksu Arıtma Tesisi, AB Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi (91/271/EEC), Türkiye Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (31 Aralık 2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete), Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği (8 Ocak 2006 tarihli ve 26047 sayılı Resmi Gazete) ve Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği, Hassas ve Az Hassas Su Alanları Tebliği (27 Haziran 2009 tarihli ve 27271 sayılı Resmi Gazete), Hassas su Kütleleri ile Bu Kütleleri Etkileyen Alanların Belirlenmesi ve Su Kalitesinin İyileştirilmesi Hakkında Yönetmelik (23.12.2016 tarih ve 29927 sayılı Resmi Gazete) ile yayımlanarak yürürlüğe giren yönetmeliklerde belirtilen atıksu deşarj kriterlerine uygun olarak tasarlanmış ve inşa edilmiştir.

Arıtılan dezenfekte edilmiş atıksu, Atıksu Arıtma Tesislerinin Teknik Usuller Tebliğ'inde (20 Mart 2010 tarih ve 27527 sayılı Resmi Gazete) belirtilen sulama suyu kriterleri olan B Sınıfına uygun dizayn edilmiştir.

#### 2.4.5 Kirletici Yükler

Atıksu arıtma tesisi girişindeki atıksu için kirletici yükler Tablo 2.3'te verilmektedir. Burada verilen etkin yükler ortalama değerler olarak hesaplanmış verilerden oluşmaktadır. Veriler, kollektör hatlarından gelen ham atıksu giriş konsantrasyonları içindir ve tesis içi geri devir debisinden gelen ilave hidrolik ve/veya organik yükleri içermez. Arıtma tesisinin tasarımı, susuzlaştırma tesislerinden gelen geri devir debi değeri dahil olmak üzere gerçek yüklere dayanmaktadır.

Tablo 2.3 Kirletici yükleri (ÇŞİDB, 2019)

Parametre	Birim	2021 sonrası	2032 (1. Kademe)	2047 (2. Kademe)
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	kg/gün	11793	16615	20322
Biyolojik Oksijen İhtiyacı	kg/gün	5908	8322	10177
Toplam Askıda Katı Madde	kg/gün	6627	9285	11243
Toplam Azot	kg/gün	1100	1494	1808
Toplam Fosfor	kg/gün	237	346	421

AAT tasarım parametreleri ise Tablo 2.4'te verilmiştir (ÇŞİDB, 2019).

Tablo 2.4 Tasarım parametreleri (ÇŞİDB, 2019)

Parametre	Birim	2021 sonrası	2032 (1. Kademe)	2047 (2. Kademe)
Eşdeğer Kirlilik	kişi	98469	138694	169614
Ortalama Günlük Debi	m <sup>3</sup> /gün	23231	31978	38267
KOİ	mg/L	507,62	519,58	531,05
BOİ <sub>5</sub>	mg/L	254,32	260,23	265,94
AKM	mg/L	285,26	290,35	293,80
TN	mg/L	47,34	46,71	47,24
TP	mg/L	10,19	10,81	11,00

AAT ünitelerinin ve ekipmanlarının tasarımında ön arıtma ünitelerinde (yani fiziksel arıtma yapılan; kaba ve ince ızgaralar, kum ve yağ tutucu havuzlar, kum ayırıcılar, yağ tutucu tambur elekler vb.) kirleticilerin uzaklaştırılması dikkate alınmamıştır.

#### 2.4.6 Deşarj Kalitesi ve Kontrolü

Atıksu arıtma tesisi, AB Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi (91/271/EEC) <sup>(1)</sup>, Türkiye Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği <sup>(2)</sup>, Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği <sup>(3)</sup> ve Hassas Su Kütleleri ve Alanlarının Belirlenmesine İlişkin Yönetmelikte <sup>(4)</sup> belirtilen deşarj kriterlerine uygun olarak tasarlanarak inşa edilmiştir. Arıtılmış dezenfekte edilmiş atıksu, Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usulleri Hakkında Tebliğ’inde <sup>(5)</sup> belirtilen sulama suyu kriterleri olan B Sınıfı’na uygun olarak tasarlanmıştır. Atıksu arıtma tesisinden gelen çamur, AB Kanalizasyon Çamuru Direktifine (1986/278/EEC) uygun olarak bertaraf edilmektedir. Tablo 2.5’te yer alan arıtılmış atıksu kalite standartları tesis tarafından karşılanmaktadır (ÇŞİDB, 2019).

Tablo 2.5 1.Kademe (2032) için tasarım kriterleri ve gerekli giderim verimliliği (ÇŞİDB, 2019)

Parametre	Tasarım kriterleri (giriş)	Deşarj kriterleri (çıkış) <sup>(6)</sup>	Minimum Giderim Verimliliği <sup>(9)</sup> (tamamlama deneme işletiminde test sırasında gözlemlenecek), %
BOİ <sub>5</sub> , mg/L	260	25	90
KOİ, mg/L	520	125	76
AKM, mg/L	290	35 <sup>(7)</sup>	88
Toplam N, mg/L	47	10 <sup>(8)</sup>	79
Toplam P, mg/L	11	1	91
Toplam koliform bakteri (EMS/100 mL)	-	200	≥ 99 (2 log10)

- (1) Toplam Koliform Bakteri Limiti hariç tüm deşarj kriterleri filtrasyondan önce karşılanmalıdır.
- (2) 31 Aralık 2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.
- (3) 8 Ocak 2006 tarih ve 26047 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.
- (4) 23.12.2016 tarih ve 29927 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.
- (5) 20 Mart 2010 tarih ve 27527 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

- (6) Filtrasyondan önce toplam koliform bakteri dışındaki tüm deşarj kriterleri karşılanacaktır.
- (7) AKM konsantrasyonu son durultucu çıkışında 35 mg/l, filtrasyon ve UV dezenfeksiyon ünitesi çıkışında 5 mg/l olacaktır.
- (8) Bu kriter atıksuyun sıcaklıkları  $\geq 12^{\circ}\text{C}$  için geçerli olacaktır.
- (9) Giriş kirletici konsantrasyonlarının giriş tasarım kriterlerinden daha düşük olması durumunda, bu giderim verimlilikleri, deneme işletimi sırasında ve testler tamamlandıktan sonra yerine getirilecektir. Giriş konsantrasyonları çok düşükse, minimum giderim verimliliği oranlarının karşılanması gerekli değildir.

## **2.4.7 Yasal Çerçeve**

Çeşitli Direktiflerin çamur yönetimi üzerinde etkisi vardır, bunlar AB ve ulusal mevzuatlar kapsamında çamur bertarafına ilişkin yasal yükümlülükler çamur yönetimi bağlamında aşağıda kısaca açıklanmıştır: bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

### **2.4.7.1 AB mevzuatı**

#### **2.4.7.1.1 Kentsel atıksu arıtma direktifi 91/271/EEC**

Su çerçeve direktifi (2000/60/EC), kentsel atıksularda su ortamına kirletici deşarjların uzun vadede kademeli olarak azaltılmasını hedeflerken, 1991’de kabul edilen 91/271/EEC sayılı konsey direktifi, kent su ortamının kentsel atıksu deşarjlarının ve bazı endüstriyel deşarjların olumsuz etkilerinden korunması amaçlı su arıtımı ile ilgilidir. 91/271/EEC sayılı direktif, arıtma çamurunun tarımda kullanımını teşvik etmeyi ve kullanımının toprak, bitki örtüsü, hayvanlar ve insanlar üzerindeki zararlı etkilerini önleyecek şekilde düzenlemeyi amaçlamaktadır. Kentsel atıksu arıtma direktifi, uygun olduğunda arıtma çamurunun kullanımını teşvik eder. Özellikle, direktifin 14. Maddesi, “Atıksu arıtımından kaynaklanan çamur, uygun olduğunda yeniden kullanılacaktır. Bertaraf yolları, çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirecektir.” demektedir.

#### 2.4.7.1.2 Arıtma çamuru direktifi 86/278/EEC

Arıtma çamuru direktifi, yaklaşık 30 yıl önce, arıtma çamurunun tarımda kullanılmasını teşvik etmek ve toprak, bitki örtüsü, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkiler oluşturacak şekilde kullanımını düzenlemek amacıyla kabul edilmiştir. Bu amaçla, arıtılmamış çamuru toprağa enjekte edilmedikçe veya karıştırılmadıkça tarım arazilerinde kullanılmasını yasaklar. Arıtılmış çamur, “fermente edilebilirliğini ve kullanımından kaynaklanan sağlık tehlikelerini önemli ölçüde azaltmak için biyolojik, kimyasal veya ısıl işlem, uzun süreli depolama veya diğer uygun işlemlerden geçmiş” olarak tanımlanır.

Kalıntı patojenlerden kaynaklanan potansiyel sağlık risklerine karşı koruma sağlamak için, meyve ve sebze mahsullerinin yetiştiği veya yetiştirildiği toprağa veya meyve-sebze mahsullerinin hasat edilmesinden on aydan daha kısa bir süre önce çamur uygulanmamalıdır. Çamur uygulamasından sonra üç haftadan daha kısa bir süre içinde otlayan hayvanların otlaklara veya yem alanlarına girmesine izin verilmemelidir. Direktif ayrıca, çamurun, bitkilerin besin gereksinimleri dikkate alınacak ve toprağın, yüzey ve yeraltı sularının kalitesinin bozulmayacak şekilde kullanılmasını şart koşturmaktadır.

Direktif, çamur ve topraklardan numune alma ve analiz etme kurallarını belirler. Üretilen çamur miktarları, tarımda kullanılan miktarlar, çamurun bileşimi ve özellikleri, yapılan arıtma türü ve çamur alıcılarının isim ve adreslerinin ayrıntılı kayıtlarının tutulması için gereklilikleri ve çamurun kullanıldığı yerleri belirler.

Tarımsal kullanıma yönelik arıtma çamurundaki ve çamurla işlenmiş topraklardaki ağır metal konsantrasyonları için sınır değerler direktifin Ek I A (toprak), Ek I B (çamur) ve Ek I C (toprağa verilebilecek ağır metallerin yıllık maksimum miktarları) bölümlerinde verilmiştir.

86/278/EEC sayılı direktif, yedi ağır metal için sınır değerler belirlemektedir. Kabul edilmesinden bu yana, bazı üye devletler diğer kirletici maddeler için gereklilikler belirlemiş, ağır metaller için daha katı sınır değerler kabul etmiştir.

### **2.4.7.1.3 Düzenli depolama direktifi 99/31/EC**

Atıkların düzenli depolamasına ilişkin 99/31/EC sayılı direktifin, özellikle biyolojik olarak parçalanabilen atıkların düzenli depolaması açısından arıtma çamurunun bertarafı ile ilgili etkileri vardır. Biyobozunur atık, düzenli depolama direktifi madde 2(m)'de "gıda ve bahçe atıkları, kağıt ve mukavva gibi anaerobik veya aerobik bozunmaya uğrayabilen atık" olarak tanımlanmaktadır. Direktif, biyobozunur atıkların depolama alanlarına indirilmesi için özellikle 2016 yılına kadar %35'e kadar kademeli bir azalma ve çamurun depolama alanlarına atılmasını sınırlayan belirli koşullar ile zorunlu hedefler belirlemiştir. Ülkemizde de direktife uygun olarak atıkların düzenli depolama sahalarına kabul kriterleri ve prosedürlerini belirleyen 19 Aralık 2002 tarihli Konsey Kararı'nı uygulamaktadır.

### **2.4.7.2 Türk Mevzuatı**

#### **2.4.7.2.1 Kentsel atıksu arıtma yönetmeliği**

Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği'nin (08 Ocak 2006 tarih ve 26047 sayılı Resmi Gazete) 5(f) maddesi arıtma çamurlarının alıcı ortamlara deşarjını yasaklamakta, 5(g) maddesi ise yeterli özelliklere sahip arıtma çamurlarının yeniden kullanımını teşvik etmektedir.

#### **2.4.7.2.2 Atıkların düzenli depolanmasına ilişkin yönetmelik**

Atıkların Düzenli Depolama Yönetmeliği (11 Mart 2016 tarihli Resmi Gazete; Sayı: 29292), tehlikesiz çamurun 2. Sınıf düzenli depolama sahalarının ayrı bir bölümüne kabul edilmesini öngören Geçici 4. Maddesi ile eski Yönetmelikte değişiklik yapmaktadır. Yönetmelik Ek-2'deki tüm parametrelere uygunluk, çamurda minimum %30 kuru katı madde içeriği ve kötü kokunun giderilmesi sağlanmaktadır. Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek-4'e göre tehlikesiz çamur karakterizasyonu yapılabilmektedir (Resmi Gazete Tarih: 26 Aralık 2019; Sayı: 30990) Değiştirilen Yönetmelik ile 2. Sınıf depolama sahaları için Çözünmüş Organik Karbon limitlerinin sağlanması zorunluluğu 01 Ocak 2025'e uzatılmıştır.

### **2.4.7.2.3 Atık yönetimi yönetmeliği**

Atık Yönetimi Yönetmeliği (Resmi Gazete Tarih: 02 Nisan 2015; Sayı: 29314), Ek-3B'deki kriterlere göre arıtma çamurunun tehlikeliliğinin belirlenmesi açısından analiz yapılmasını gerektirmektedir. Arıtma çamurunun Ek-3B analizine göre tehlikeli bulunması durumunda, bu atıkların Atık Yönetimi Yönetmeliği'nin ilgili hükümlerine göre Bakanlık tarafından tehlikeli atık konusunda lisans yetkisi almış tesislerde geri kazanımı/bertarafı sağlanmalıdır.

### **2.4.7.2.4 Evsel ve kentsel çamurun toprakta kullanımına dair yönetmelik**

Evsel ve Kentsel Çamurların Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmeliğin 5. Maddesi (03 Ağustos 2010 tarihli Resmi Gazete; Sayı: 27661) ham çamurun araziye dökülmesini yasaklamaktadır. 6. maddeye göre stabilize çamur, toprakta ve çamurdaki ağır metal konsantrasyonu, çamurdaki organik bileşikler ve dioksinler ile ilgili olarak yönetmeliğin Ek I-B, I-C ve I-D'sinde listelenen belirli kısıtlamalar ile toprak üzerine uygulanabilir. Yönetmelik ayrıca toprak üzeri uygulaması için stabilize arıtma çamurunun minimum %40 organik içeriğe sahip olmasını şart koşmaktadır.

Tarımda çamur kullanımına ilişkin sınır değerler olarak kısıtlamalar ve yasaklar, aşağıdaki Tablo 2.6'da biyokatı, yayılma alanı toprağı ve toprak için ayrı ayrı gösterilmiştir. Biyokatı stabilize çamur için kullanılan bir terimdir.

Tablo 2.6 Biyokatı maddeler, yayılan arazi toprağı ve tarımsal kullanıma yönelik toprağın sınır değerleri

Parametre	Birim	Biyokatı	Yayılmış toprak	Toprak
pH		-	-	6 – 7
Kurşun (Pb)	mg/kgTS	750	-	70 – 100
Kadmiyum (Cd)	mg/kgTS	10	-	1,0 – 1,5
Krom (Cr)	mg/kgTS	1000	-	60 – 100
Bakır (Cu)	mg/kgTS	1000	-	50 – 100
Nikel (Ni)	mg/kgTS	300	-	50 – 70
Çinko (Zn)	mg/kgTS	2500	-	150 – 200
Civa (Hg)	mg/kgTS	10	-	0,5 – 1,0
AOX (Adsorblanabilen organik halojenler)	mg/kgTS	-	500	-
LAS (Lineer alkilbenzin sülfonat)	mg/kgTS	-	2600	-
DEHP (Diftalat(2-ethylhexyl))	mg/kgTS	-	100	-
NPE (Nonil fenol ile 1 ve 2 etoksi grubu olan nonil fenol etoksilatların toplamını içerir)	mg/kgTS	-	50	-
PAH (Polisiklik aromatik hidrokarbon veya poliaromatik hidrokarbonların toplamı)	mg/kgTS	-	6	-
PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180 sayılı poliklorlu bifenil bileşiklerinin toplamı)	mg/kgTS	-	0,8	-
PCDD/F Poliklorlu dibenzodioksin / dibenzofuranlar	mg/kgTS	-	100	-

#### 2.4.7.2.5 Atıksu arıtma tesisleri teknik usuller tebliğı

AAT'leri Teknik Usuller Tebliğı (20 Mart 2010 tarihli Resmi Gazete; Sayı: 27527) 4. Kısmı, arıtma çamurunun arıtılması, geri kazanılması ve bertarafına ilişkin ilkeleri düzenlemektedir. Kararname, en yaygın olarak kabul edilen nihai bertaraf yöntemlerinin, çamurun gazlaştırılmasından veya birlikte yakılmasından enerji geri kazanımı ve kurutma işlemlerinden sonra toprak iyileştirme malzemesi olarak kullanılması olduğunu ileri sürmektedir.

Ayrıca, biyokatıların tarımda kullanılabilmesi için stabilize çamurun kendisinde ve uygulanacağı toprakta ağır metaller için gerekli limitleri aşmamalıdır. Meyve ağaçları dışında çiğ olarak yenilen meyve ve sebze ürünlerinin yetiştirilmesinde kullanılmamalıdır. Toprağın pH değeri 6'dan büyük olmalı ve stabilize arıtma çamurunun pH değeri 6,0-8,5 aralığında olmalıdır. Doğal ormanlarda ve içme suyu kaynaklarının yakında olması kesinlikle yasaklanmıştır.

#### **2.4.8 Proses Hakkında Bilgiler**

Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi prosesi, aktif çamur tanklarında oluşan çamurun anaerobik çürütülmesi ile eş zamanlı denitrifikasyon prosesisidir. Bu işlem karbon ve azot giderimine dayanır. Ek olarak, biyolojik fosfor giderimi için anaerobik tanklar inşa edilmiştir.

Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi tasarımına ilişkin bilgiler aşağıda özetlenmiştir:

Ön Arıtma Üniteleri:

- Mevcut kollektörden atıksu arıtma tesisine bağlanan giriş yapısı ve hattı
- Taş kapanı ve konteyner sistemini içeren giriş yapısı
- Kaba ızgaralar, konveyörler ve bant sistemi
- İnce ızgaralar, konveyörler ve bant sistemi
- Kum ve yağ tutucu tanklar
- Giriş debi ölçüm istasyonu ve numune alma ünitesi
- Giriş pompa istasyonu
- Kum ve yağ tutucu üniteler için blower ve binası
- Ön çöktürme havuzları dağıtım yapısı
- Ön çöktürme havuzları, sıyırıcılar ve pompa istasyonları

Biyolojik Arıtma Üniteleri:

- Anaerobik bio-P havuzları dağıtım yapısı
- Anaerobik bio-P havuzları, karıştırıcılar

- Havalandırma havuzları dağıtım yapısı
- Havalandırma havuzları, karıştırıcıları ve difüzörleri
- Havalandırma havuzları için blower ve binası
- Son çöktürme havuzları dağıtım yapısı
- Son çöktürme havuzları, sıyrıcılar ve pompa istasyonları
- UV dezenfeksiyon sistemi ve mikrofiltrasyon üniteleri
- Arıtılmış atıksu tahliye hattı/kanalı, atıksu deşarjı debi ölçüm istasyonu, tahliye ve by-pass yapıları
- Süzüntü suyu pompa istasyonu
- Gaz depo tankları (gaz balonu)
- Desülfürizasyon ünitesi
- Biyogaz filtre sistemleri,
- Biyogaz kullanım tesisleri ve enerji geri kazanım tesisleri
- Arıtılmış atıksu depo tankı ve tesis geri kullanımı sistemi
- İçme suyu ve kullanım suyu depo tankı, sistemleri
- Yangın suyu depo tankı ve sistemleri

#### Çamur Üniteleri:

- Çamur geri devir pompa istasyonu
- Fazla çamur pompa istasyonu
- Çamur geri devir ve fazla çamur hattı debi ölçüm istasyonları
- Çamur depolama tankı
- Çamur yoğunlaştırma tankı (Anaerobik çürütücü, primer çamur için)
- Anaerobik çamur çürütücüleri

#### Çamur Susuzlaştırma Üniteleri:

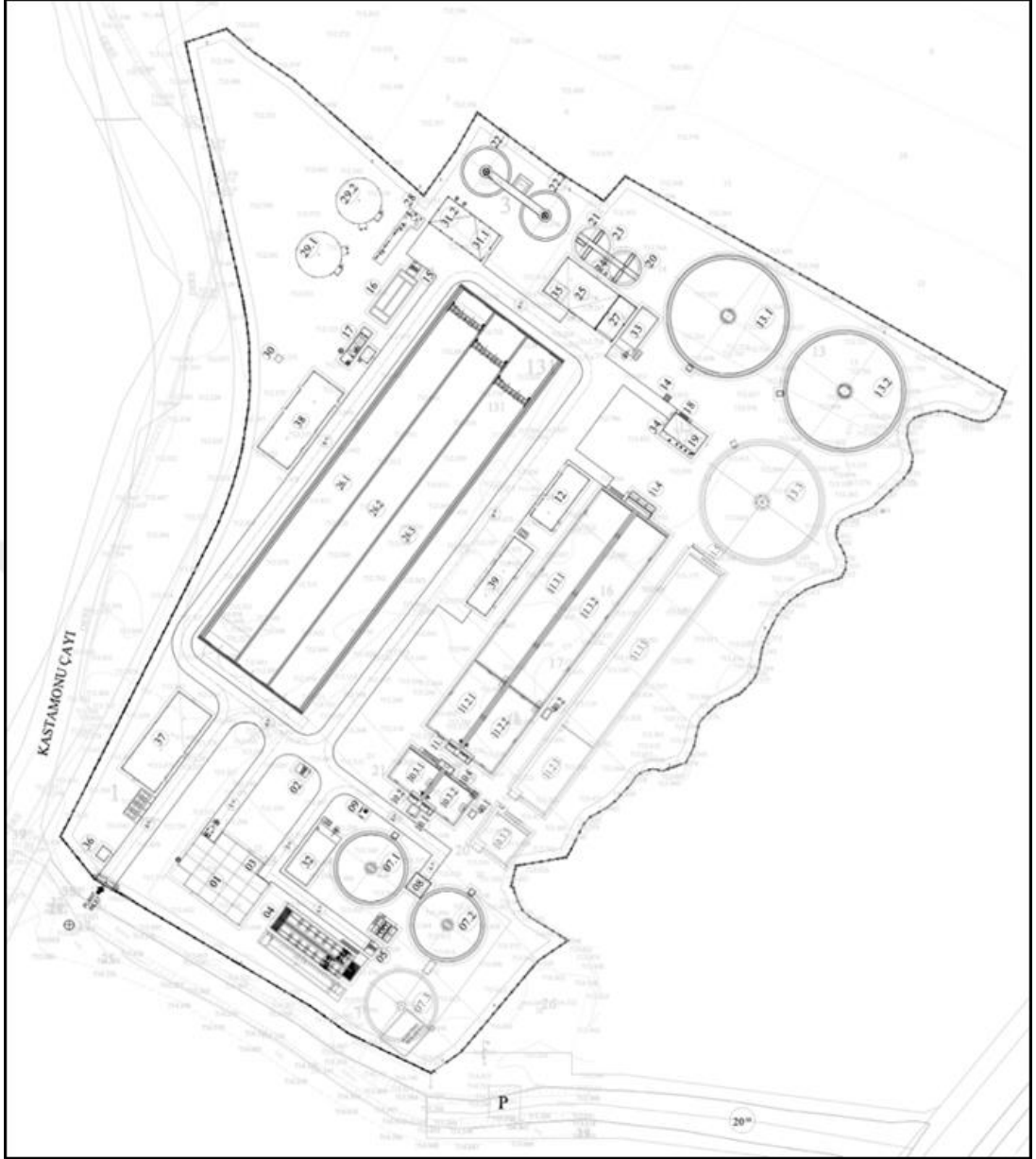
- Katyonik polielektrolit depolama ve dozlama tesisleri
- Çamur yoğunlaştırma ve susuzlaştırma üniteleri
- Solar çamur kurutma üniteleri
- Çamur kek sahası ve depolama alanı

Yardımcı Üniteler:

- İdari bina,
- Atölye binası (Elektrik atölyesi ve mekanik atölye)
- Bekçi binası (güvenlik)
- Acil durum dizel jeneratör seti ve enerji kontrol tesisi
- Koku giderme ünitesi ve kimyasal dozlama istasyonu
- Trafo binaları
- Ana dağıtım panoları ve SCADA sistemi,
- Laboratuvar
- Otopark

tesislerini içermektedir.

Kastamonu atıksu arıtma tesisi ve 1.kademe üniteleri için genel yerleşim planı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Kastamonu AAT'nin 1. kademe genel yerleşim planı

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Solar Çamur Kurutma

Kastamonu AAT solar kurutma ünitesine kurutma işlemi için güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanmayı sağlayan polikarbonat levha ile çevrelenmiş bir seranın zeminine serilen çamur, direkt güneş ışınımının etkisine bırakılır. Zemine serilen maksimum 50 cm kalınlığındaki çamur, tambur tahrikli karıştırıcı makineler vasıtasıyla karıştırılır. Böylece, serilen çamurun nemli alt kısmı yukarı, kurutulan üst kısmı ise alt kısma alınmaktadır.



Şekil 3.1 Solar çamur kurutma ünitesi, çamur örtüsü (fotoğraf yazar tarafından çekilmiştir)

Çamur içerisindeki su güneş enerjisinin etkisiyle buharlaşmakta ve sera tavanına belirli aralıklarla yerleştirilen sirkülasyon fanları aracılığıyla çamur yüzeyinde gerçekleşen buharlaşmanın oluşturduğu nem tabakası buradan uzaklaştırılarak sera içerisine yayılmaktadır. Sera giriş ve çıkışlarında bulunan egzoz fanları yardımıyla suya doymuş buharlar sistemden uzaklaştırılarak hava sirkülasyonu sağlanmakta ve böylece taze havanın sisteme girişi gerçekleşmektedir. İstenilen kuruluğa ulaşan çamur operatör tarafından sistemden uzaklaştırılır. Sistem sürekli olarak uzaktan iletişim ile kontrol edilmektedir.



Şekil 3.2 Solar çamur kurutma üniteleri (fotoğraf yazar tarafından çekilmiştir)



Şekil 3.3 Solar çamur kurutma üniteleri (fotoğraf yazar tarafından çekilmiştir)



Şekil 3.4 Solar çamur kurutma üniteleri (fotoğraf yazar tarafından çekilmiştir)

### 3.1.1 Solar Kurutma Isı Değeri Hesaplamalarına Dair Açıklamalar

Alman ATV-DVWK kural ve standartlarına (ATV-DVWK-M 379E Kanalizasyon Çamurunun Kurutulması) göre 1 ton suyu buharlaştırmak için gereken ısı 720 kWh'dir. Polikarbonat ışık geçirgenliği (%90) nedeniyle kaybedilen %10'luk değer, buharlaşma için gerekli ısıyı 800 kWh'ye çıkarmaktadır. Dizaynı gerçekleştiren Redco'nun Türkiye'de yapılan solar çamur kurutma ünitelerindeki tasarım ve işletme tecrübelerine göre; sistemdeki yüzey alanı, devir daim ve egzoz kayıpları nedeniyle %20'ye yakın enerji kaybı yaşanmaktadır. Dolayısıyla 1 ton çamurun buharlaşması için gerekli enerji 800kWh'den 1000 kWh'e çıkmaktadır. CHP ünitesinden gelen enerji, dağıtım ve iletim kayıpları nedeniyle ancak %75 oranında kullanılabilir. Güneş sisteminde 1 ton suyu buharlaştırmak için 1000 kWh enerji kullanılırken, CHP ünitesinden gelen ısı ile 1 ton suyu buharlaştırmak için 1250 kWh/ton enerji kullanılmaktadır.

### 3.1.2 Solar Kurutma Hesaplama Adımları

Kastamonu AAT giriş çamuru verilerine göre solar sistemin teknik tasarım hesap detayları Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 'de açıklanmıştır.

**Birinci Adım:** AAT giriş çamuru verileri, Tablo 3.1’de belirtilen hesaplamalar doğrultusunda solar sistemin teknik tasarım değerleri Tablo 3.3’de hesaplanmıştır.

**İkinci Adım:** Tesisin bulunduğu bölge için global radyasyon verileri “NASA ArcGIS Web Uygulaması” programı kullanılarak dizayn edilen Solar çamur kurutma tesisi, elde edilen veriler ışığında bölgesel radyasyon miktarları göz önüne alınarak Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de belirtilen hesap tabloları kullanılarak, radyasyon ve atık ısı (fazla ısı) değerleri Tablo 3.4’de hesaplanmıştır.

**Üçüncü Adım:** Gerekli kurutma alanı, risksiz buharlaşması gereken su miktarı ve enerji değerleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de belirtilen hesap tabloları kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 3.4’de belirtilen yüzey alanı ve buharlaşma miktarları ile toplam buharlaşma miktarının, risksiz buharlaşması gereken su miktarından daha yüksek olması gerekmektedir.

**Dördüncü Adım:** Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de belirtilen hesap tabloları kullanılarak Tablo 3.5’de açıklanan radyasyon etkisi ile kurutulacak çamur miktarı hesaplanmıştır.

**Beşinci Adım:** Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de belirtilen hesap tabloları kullanılarak CHP ünitesinden gelen atık ısı verileri Tablo 3.6’da hesaplanmıştır.

**Altıncı Adım:** Sistemdeki toplam buharlaşma miktarı, CHP ünitesi atık ısı tarafından buharlaştırma ve güneş enerjisi ısı ile buharlaştırma değerleri Tablo 3.6’da hesaplanmıştır.

**Yedinci Adım:** Kalan çamur miktarı, aylık olarak giren çamur miktarından bertaraf edilen çamurdan buharlaştırılan su miktarının çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır. Tablo 3.7’de solar ünite çamur sergi yüksekliği hesaplanırken, seradaki çamurun maksimum sergi yüksekliği 50 cm olarak ayarlanmıştır.

Tablo 3.1 Solar sistemin teknik tasarım değerlerinin açıklanması ve hesap detayları

Aylar	Günlük ortalama kuru çamur miktarı, %100 KM	Ortalama aylık çamur miktarı, %100 KM	Ortalama günlük çamur miktarı, %25 KM	Ortalama aylık çamur miktarı, %25 KM	Ortalama kuru çamur miktarı, %90 KM	Ortalama buharlaştırılan su miktarı	Hollerden uzaklaştırılan ortalama çamur miktarı	Radyasyon	Radyasyonla buharlaşma oranı <sup>1</sup>	Radyasyonla buharlaşma oranı <sup>2</sup>	Radyasyonla kurutarak buharlaştırma oranı <sup>3</sup>
	kg/gün	ton/ay	kg/gün	ton/ay	ton/ay	ton/ay	ton/ay	kWh/m <sup>2</sup> .ay	kWh/ton	kWh/ton	kWh/ton
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
Ocak	Proses dizayn değeridir.	$B = \frac{A \times \text{Aylık gün toplamı}}{1000}$	$C = \frac{A}{0,25}$	$D = \frac{B}{0,25}$	$E = \frac{B}{0,90}$	$F = D - E$	$G = \left[ \frac{H}{TH} \right] \times TE$	H = Tesisin bulunduğu bölge için global radyasyon verileri " NASA ArcGIS Web Uygulaması" programı kullanılarak elde edilmiştir.	J = Literatür verisidir. Dipnot 1 ile açıklanmıştır.	K = Literatür verisidir. Dipnot 2 ile açıklanmıştır.	L = Literatür verisidir. Dipnot 3 ile açıklanmıştır.
Şubat											
Mart											
Nisan											
Mayıs											
Haziran											
Temmuz											
Ağustos											
Eylül											
Ekim											
Kasım											
Aralık											
Toplam					TE			TH			

<sup>1</sup> Alman ATV-DVWK- Kural ve Standartları ATV-DVWK-M379E tarafından buharlaşma enerjisi için kullanılan referans

<sup>2</sup> Fazla ısı ile buharlaşma enerjisi gereksinimi

<sup>3</sup> Redco üreticisi tarafından verilen dizayn ve işletme verilerine dayalı Türkiye koşulları için UV geçirgenliği verimlilik oranı

Tablo 3.2 Solar sistemin teknik tasarım değerlerinin açıklanması ve hesap detayları

Aylar	Yüzey alanı	Radyasyonla buharlaşan su miktarı	CHP'den gelen fazla ısı	Fazla ısı (atık ısı) ile buharlaşan su miktarı	Toplam buharlaşan su	Çamur yüksekliği
	m <sup>2</sup>	ton/ay	kWh	ton/ay	ton/ay	cm
	M	N	O	P	R	S
Ocak	<p><math>M = \text{Solar kurutma holti için net kurutma alanını ifade eder. Brüt değerdir. Solar köprü çalışması ve performansı gibi vb. pek çok veri üretici tarafından dikkate alınarak projelendirilmesi tavsiye edilir.}</math></p>	$N = \left[ \frac{M}{L} \right] \times H$	<p><math>L = \text{Radyasyonla kurutmanın yetersiz kalacağı spesifik koşullar için CHP/proses hesabına göre mevsimsel/aylık ihtiyaç fazlası atık ısı (fazla ısı) değerleridir. Optimun verim için verilen proses değerlerinin max. \%80i yazılmıştır.}</math></p>	$P = \left[ \frac{O}{K} \right] \times 24 \times 31$	$R = N + P$	$S_{\text{Ocak}} = \frac{1.156,13 + D - R - G/2}{M} \times 100$ $S_{\text{Şubat vd.}} = \frac{HK_{\text{Çbir önceki ay}} + D - R - G/2}{M} \times 100$ $S_{\text{Haz.Tem.ġus}} = \frac{HK_{\text{Çbir önceki ay}} + D - R - G}{M} \times 100$
Şubat						
Mart						
Nisan						
Mayıs						
Haziran						
Temmuz						
Ağustos						
Eylül						
Ekim						
Kasım						
Aralık						

### 3.1.3 Kastamonu AAT Solar Kurutma Hesaplamaları

Tablo 3.3 AAT giriş çamuru verilerine göre solar sistemin teknik tasarım değerleri

Aylar	Günlük ortalama kuru çamur miktarı, %100 KM	Ortalama aylık çamur miktarı, %100 KM	Ortalama günlük çamur miktarı, %25 KM	Ortalama aylık çamur miktarı, %25 KM	Ortalama kuru çamur miktarı, %90 KM	Ortalama buharlaştırılan su miktarı
	kg/gün	ton/ay	kg/gün	ton/ay	ton/ay	ton/ay
Ocak	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,09
Şubat	7560,24	211,69	30240,96	846,75	235,21	611,54
Mart	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,06
Nisan	7560,24	226,81	30240,96	907,23	252,01	655,22
Mayıs	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,06
Haziran	7560,24	226,81	30240,96	907,23	252,01	655,22
Temmuz	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,06
Ağustos	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,06
Eylül	7560,24	226,81	30240,96	907,23	252,01	655,22
Ekim	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,06
Kasım	7560,24	226,81	30240,96	907,23	252,01	655,22
Aralık	7560,24	234,37	30240,96	937,47	260,41	677,06
Toplam		2759,49		11037,95	3.066,10	7971,85

Tablo 3.4 Radyasyon ve atık ısı değerlerine göre solar kurutma buharlaşma değerleri

Aylar	Radyasyonla buharlaşma oranı <sup>1</sup>	Radyasyonla buharlaşma oranı <sup>2</sup>	Radyasyonla kurularak buharlaştırma oranı <sup>3</sup>	Yüzey alanı	Radyasyonla buharlaşan su miktarı	CHP'den gelen fazla ısı (atık ısı)	Fazla ısı ile buharlaşan su miktarı	Toplam buharlaşan su
	kWh/ton	kWh/ton	kWh/ton	m <sup>2</sup>	ton/ay	kWh	ton/ay	ton/ay
Ocak	720,00	1250,00	1000,00	4860	218,46	179,83	107,03	325,49
Şubat	720,00	1250,00	1000,00	4860	339,67	181,93	97,81	437,47
Mart	720,00	1250,00	1000,00	4860	504,71	235,76	140,32	645,04
Nisan	720,00	1250,00	1000,00	4860	634,23	242,47	139,66	773,89
Mayıs	720,00	1250,00	1000,00	4860	873,83	248,39	147,84	1021,67
Haziran	720,00	1250,00	1000,00	4860	890,84	311,45	179,40	1070,23
Temmuz	720,00	1250,00	1000,00	4860	920,53	315,13	187,57	1108,10
Ağustos	720,00	1250,00	1000,00	4860	804,52	314,47	187,17	991,70
Eylül	720,00	1250,00	1000,00	4860	621,11	250,49	144,28	765,39
Ekim	720,00	1250,00	1000,00	4860	415,82	243,91	145,18	561,00
Kasım	720,00	1250,00	1000,00	4860	243,49	236,55	136,25	379,74
Aralık	720,00	1250,00	1000,00	4860	186,82	182,46	108,60	295,42
Toplam					6654,02		1721,11	8375,13

Hollerden uzaklaştırılan aylık çamur miktarını hesaplamak için tesisin bulunduğu bölgeye ait global radyasyon verileri, toplam yıllık radyasyon miktarı ve %90 kurulukta uzaklaştırılan toplam kuru çamur miktarı değerleri kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5 Aylara göre radyasyon değerleri ve solar hollerde bertaraf edilen ortalama çamur miktarları

Aylar	Radyasyon	Hollerden uzaklaştırılan ortalama çamur miktarı
	kWh/m <sup>2</sup> .ay	ton/ay
Ocak	44,95	100,66
Şubat	69,89	156,51
Mart	103,85	232,57
Nisan	130,50	292,25
Mayıs	179,80	402,65
Haziran	183,30	410,49
Temmuz	189,41	424,17
Ağustos	165,54	370,72
Eylül	127,80	286,20
Ekim	85,56	191,61
Kasım	50,10	112,20
Aralık	38,44	86,08
Toplam	1369,14	3066,10

Radyasyon ile buharlaşan su miktarının hesabında solar sistemin yüzey alanı, Redco üreticisi tarafından verilen dizayn ve işletme verilerine dayalı Türkiye koşulları için UV geçirgenliği verimlilik oranı (1000 kWh/ton) ve tesisin bulunduğu bölgeye ait global radyasyon verileri kullanılmıştır. Radyasyonla kurutmanın yetersiz kalacağı spesifik koşullar için CHP ünitesi ısı hesabına göre aylık ihtiyaç fazlası atık ısı (fazla ısı) proses değerlerinin %80’i olarak kabul edilmiş ve Tablo 3.6’da verilmiştir. Fazla ısı ile buharlaşan su miktarları ise CHP’den gelen fazla ısının tasarım ve işletme bilgilerine göre 1 ton suyu buharlaştırmak için gereken enerjiye (1250 kWh/ton) bölünmesiyle hesaplanmıştır.

Tablo 3.6 Aylara göre, buharlaşma miktarları ve atık ısı değerleri

Aylar	Radyasyonla buharlaşan su miktarı	CHP'den gelen fazla ısı (atık ısı)	Fazla ısı ile buharlaşan su miktarı	Toplam buharlaşan su
	ton/ay	kWh	ton/ay	ton/ay
Ocak	218,46	179,84	107,04	325,50
Şubat	339,67	181,95	97,82	437,48
Mart	504,71	235,77	140,33	645,04
Nisan	634,23	242,48	139,67	773,90
Mayıs	873,83	248,40	147,85	1021,68
Haziran	890,84	311,46	179,40	1070,24
Temmuz	920,53	315,14	187,57	1108,10
Ağustos	804,52	314,49	187,18	991,71
Eylül	621,11	250,50	144,29	765,40
Ekim	415,82	243,93	145,19	561,01
Kasım	243,49	236,56	136,26	379,74
Aralık	186,82	182,47	108,61	295,42
Toplam	6654,02	2942,99	1721,20	8375,22

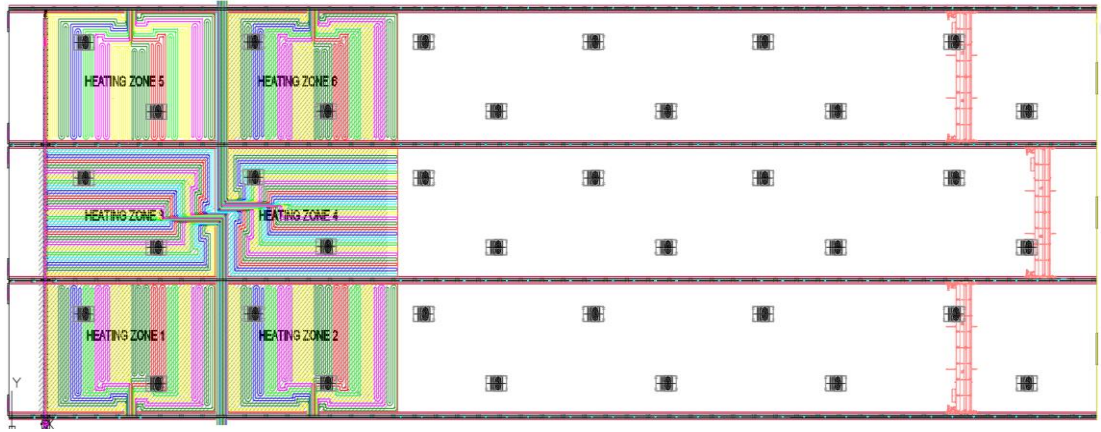
Solar sistemdeki çamur yüksekliği ise holde kalan çamur miktarı, kuru çamur miktarı (%25 KM), buharlaşan su miktarı, holden uzaklaştırılan çamur miktarı ve yüzey alanı kullanılarak hesaplanmıştır. Holde kalan çamur miktarı ilk ay (Ocak) için önceki üç ayın (Ekim, Kasım ve Aralık) toplamından (Ekim için bu değer  $937,47-561,01-191,61=184,87$ ) elde edilir. Sonraki aylar için bir önceki ayda holde kalan çamur miktarları kullanılır. Ancak Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında hole giren çamurun tamamı uzaklaştırıldığı kabul edildiğinden bu aylarda hollerden uzaklaştırılan çamur miktarları 2'ye bölünmemiştir.

Tablo 3.7 Solar çamur yüksekliği miktarı

Aylar	Çamur miktarı, ton/ay	Holde kalan çamur miktarı	Çamur yüksekliği miktarı, cm
Ocak	511,32	1717,78	35,35
Şubat	252,76	2048,79	42,16
Mart	59,87	2224,95	45,78
Nisan	-158,91	2212,16	45,52
Mayıs	-486,85	1926,63	39,64
Haziran	-573,49	1353,14	27,84
Temmuz	-594,80	758,34	15,60
Ağustos	-424,94	333,40	6,86
Eylül	-144,36	332,14	6,83
Ekim	184,87	612,81	12,61
Kasım	415,29	1084,20	22,31
Aralık	555,97	1683,21	34,63

#### 3.1.4 Yerden Isıtma Sistemi

Solar enerjinin yetersiz olduğu durumlarda yerden ısıtma sistemi kullanılacaktır. Kastamonu AAT solar kurutmaya ait ekipman ve yerden ısıtma sistemini gösteren plan Şekil 3.5'te gösterilirken yerden ısıtma sisteminde döşenen borulara ait bir fotoğraf ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Solar çamur kurutma holleri içerisindeki yeraltı ısıtma sistemi üzerine 10 cm kalınlığında şap betonu uygulanmış ve bu şap betonu üzerine ıslak çamur serilmektedir. Tesiste maksimum 50 cm çamur sergi tabakası (kalınlığı) oluşacağı kabul edilmiştir.



Şekil 3.5 Solar kurutmaya ait ekipman ve zemin ısıtma sistemini gösteren plan



Şekil 3.6 Solar çamur kurutma ünitesi yerden ısıtma sistemi (Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2021)

Kastamonu AAT için sistem maliyetlerini karşılayabilecek, zemine döşenen borular arasındaki optimum boru arası mesafe 0,24 m olarak seçilmiştir. Buna göre borudan üst kata yayılan ısı ( $q_{\dot{u}}$ , W/m<sup>2</sup>) değeri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanabilir (Doğan ve Çalışır, 2012).

$$q_{\dot{u}} = \frac{Z_{\dot{u}} S_{\dot{u}}}{R_{\dot{u}} w L} (T_{sm} - T_{y\dot{u}}) \quad (3.1)$$

$Z_{\dot{u}}$ : üst kata olan mesafe, (0,6 m)

$S_{\dot{u}}$ : ısı iletimi şekil faktörü

$R_{\dot{u}}$ : üst ısıl (termal) direnç (m<sup>2</sup> °C/W)

$w$ : borular arası uzaklık, (0,24 m)

$L$ : boru uzunluğu, (1 m<sup>2</sup> alan içerisine 4,33 m)

$T_{sm}$ : boru eksenindeki ortalama sıcaklık

$T_{yü}$ : zeminin üst yüzey sıcaklığı

### 3.2 Ekipman Bilgileri

#### 3.2.1 Çamur Karıştırma Makinesi

Solar amur kurutma ünitesinde bulunan çamur karıştırma makinesine ait fotoğraf ve teknik özellikler sırasıyla Şekil 3.7 ve Tablo 3.8’de verilmiştir.



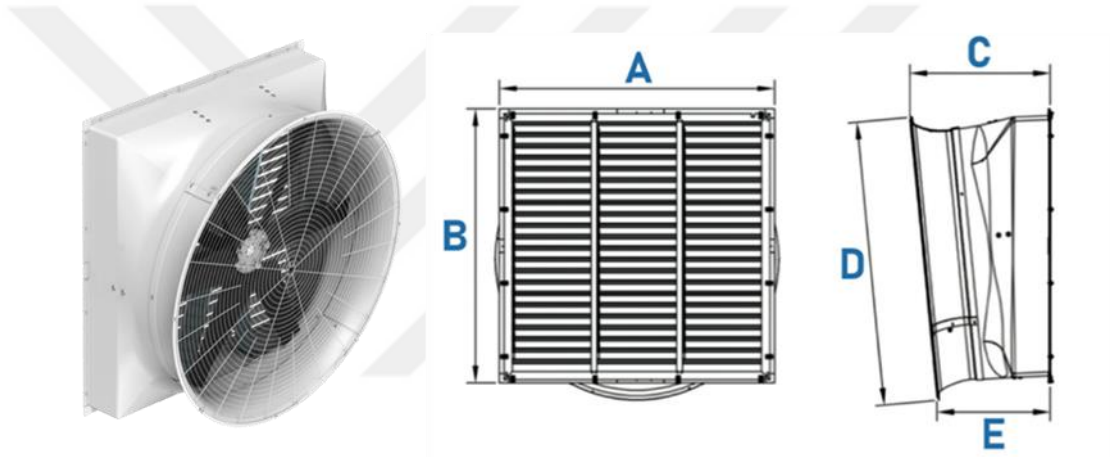
Şekil 3.7 Solar amur kurutma ünitesinde bulunan çamur karıştırma makinesi (Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2022)

Tablo 3.8 amur karıştırma makinesi teknik özellikleri

Toplam Kurulu Güç	kW	16,50
Tambur Dönüş Hızı	devir/dk.	45
Tahrik	m/dk.	0,4 - 8,0
Toplam Ağırlık	kg	~ 4000
Tambur Ağırlığı	kg	~ 1000
Köprü Ölçüsü (En x Boy)	(m x m)	2 x 12
Personel gereksinimi	dk./günlük	20 - 30
Sıyırma/Kazıma Malzeme Özelliği	–	AISI 316L
Döner Tambur & Köprü Malzemesi	–	Korozyon önleyici epoksi kaplı karbon Çelik / S235JR

### 3.2.2 Havalandırma Sistemi - Fanlar

Seradaki çamurun kurutulmasında iyi sonuçların alınabilmesi için üniteye optimum sıcaklık-nem koşullarında ve yüksek esneklikte bir havalandırma sistemi olmalıdır. Havalandırma sisteminde kullanılan fanlar (Şekil 3.8) yüksek verimli ve düşük enerji tüketimine sahiptir. Fiberglas malzemeden imal edilmiştir; ısıya, korozyona ve aside dayanıklıdır. Alüminyum alaşımlı gövde motoruna sahiptir ve yüksek verimle çalışmaktadır. Egzoz fanlarının sirkülasyon fanlarından farkı su girişini önlemek için özel tasarım panjurlara sahiptir. Bu fanlara ait teknik özellikler sırasıyla Tablo 3.9’da verilmiştir.



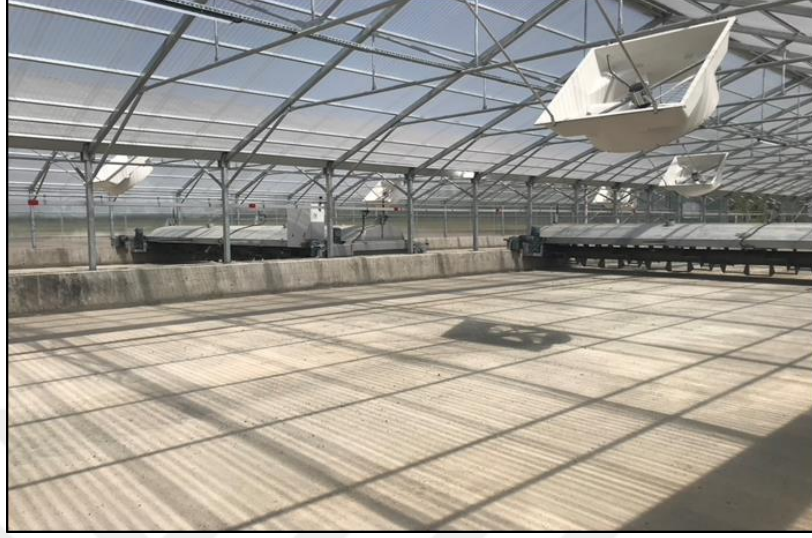
Şekil 3.8 Solar çamur kurutma üniteleri havalandırma sistemi - fanlar (Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2022)

Tablo 3.9 Fanlara ait teknik özellikler

Boyutları	mm	1460 x 1460 x 580
Döndürme Hızı	devir/dk.	480
Hava Debisi	m <sup>3</sup> /saat	48000
Ses Basınç Seviyesi	dB	70
Güç	kW – p	0,75 - 12
Voltaj	V	380
Motor Tipi	-	Direk Tip
Ağırlık	kg	58

**Sirkülasyon Fanları:** Fan yerleşimi 1 adet/10 metre olarak yapılmıştır. Çamur yüzeyinde biriken nemin sürekli dağılımını ve sirkülasyonunu sağlamak için kurutma

hollerinin uzunluklarına göre hesaplanmış 13 adet sirkülasyon fanı bulunmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Solar çamur kurutma üniteleri - sirkülasyon fanları (Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2022)

**Egzoz Fanları:** Her kurutma yatağının giriş ve çıkış bölümlerinde kurutma hollerindeki sıcak ve nemli havayı uzaklaştırmak için 2 adet egzoz fanı bulunmaktadır (Şekil 3.2).

Sera içerisindeki fanların çalışma saatleri ve havalandırma hacim hesapları;

Solar kurutma sisteminde fanlar günlük 8 saat çalıştırılmaktadır ve 13 adet sirkülasyon fanı bulunmaktadır.

$$\text{Hol başına hava miktarı} = 48000 \text{ m}^3 \times 13 = 624000 \text{ m}^3$$

Solar kurutmada çamurun kurutulduğu alan 1620 m<sup>2</sup> iken toplam alan (boşluk ve duvar kalınlığı dahil) 1704 m<sup>2</sup>'dir.

$$\text{Holde ki m}^2 \text{ başına hava miktarı} = (624000 \text{ m}^3)/1704 \text{ m}^2 = 366 \text{ m}^3 \text{ hava/m}^2$$

hesaplanmaktadır. Tavan yüksekliği 2,5 m olduğuna göre,

$$\text{Havalandırma oranı} = 366/2,5 = 146 \text{ m}^3 \text{ hava/m}^3$$

olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan havalandırma hacmi değeri  $1 \text{ m}^3$  sera hacmi için bulunmuştur. Havalandırma miktarı ne kadar yüksek olursa, çamur yüzeyinde biriken suyun çamurdan uzaklaştırılması, uzaklaştırma oranı o kadar güçlü ve kısa sürede olur.

Çıkışta bulunan 2 adet egzoz fanı, havada asılı halde bulunan suya doymun havayı tahliye etmek içindir.

$$\text{Hol başına egzoz fanlarından emilen hava miktarı} = 48000 \frac{\text{m}^3}{\text{saat}} \times 8 \text{ saat} \times 2 = 768000 \text{ m}^3$$

$$\text{Hol başına emilen hava miktarı} = 768000 \text{ m}^3 / 1704 \text{ m}^2 = 450,7 \text{ m}^3 \text{ hava/m}^2$$

hesaplanmaktadır. Tavan yüksekliği 2,5 m olduğuna göre,

$$\text{Havalandırma oranı} = 450,7 / 2,5 = 180,3 \text{ m}^3 \text{ hava/m}^3$$

olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, solar kurutma sisteminde iç ortam havasının yenilenmesi için kullanılan sirkülasyon ve egzoz fanları ( $180,3 > 146$ ) yeterlidir.

### 3.3 Analizler

Toplam katı madde; solar kurutmada analiz için alınan numune içerisindeki çökebilene ve çökemeyen katı maddelerin toplamıdır. Bir miktar numune alınarak sabit tartıma getirilmiş bir kap içinde  $105^\circ\text{C}$ 'de içeriğindeki su buharlaşana kadar (sabit bir ağırlık elde edilene kadar) kurutulur. Kurutma işleminden sonra tekrar tartılır ve aradaki fark giderilen nem miktarı olarak kaydedilir. Katı madde (KM) konsantrasyonu %KM olarak aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$\%KM = 100 - \%Nem \text{ miktarı} \quad (3.8)$$

Uçucu katı madde analizleri (UKM) ise  $105^\circ\text{C}$ 'de elde edilen KM kalıntısının yaklaşık  $600^\circ\text{C}$ 'de kül fırınında yakılmasıyla elde edilir. Deneylerde kullanılan etüv, kül fırını ve kurutulmuş solar çamura ait resimler sırasıyla Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10 Etüv ve kül fırını ile laboratuvar analizlerine dair çalışma (Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2023)



Şekil 3.11 Kurutulmuş solar çamura ait numune (Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2023)

Solar kurutmada ölçülen katı madde, uçucu katı madde ve çamur yüksekliği verilerine ait izleme tablosu aşağıda verilmiştir (Tablo 3.10).

Tablo 3.10 Solar kurutma izleme tablosu

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	
= %KM		-	= %UKM
Deney sonucudur.		İşletme kayıtlarına dair veriler kullanılmıştır	Deney sonucudur.

#### 4. BULGULAR

Kastamonu AAT laboratuvarında yapılan analizler, işletme kayıtları derlenerek çamur verileri her ayı temsilen ayda dört hafta olmak üzere, her hafta için haftalık ortalamalar alınarak yapılmıştır. 2022 yılı Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ve 2023 yılı Ocak, Şubat verileri sırasıyla Tablo 4.1-4.9'da verilmiştir.

2022 Haziran döneminde işletmeye alınan solar kurutma tesisi çamur katı madde konsantrasyonu değeri ortalama %23 olup solar kurutma çıkışında artarak ortalama %84,7'ye çıkmıştır. Uçucu katı madde konsantrasyonu ise ortalama %52,25'tir. Çamur yüksekliği ise ay sonunda 8,8 cm olmuştur.

Mekanik susuzlaştırma, çamur içindeki suyu yalnızca belirli bir dereceye kadar giderebilir, bu genellikle %20-25 katı madde aralığındadır. Solar kurutma girişi yani mekanik susuzlaştırma çıkışı değerleri incelendiğinde 9 ay için en düşük değer Şubat 2023 döneminde elde edilmiştir. Solar kurutma çıkış kuruluğunun en düşük değeri ise %62,5 ile 2022 Aralık döneminde elde edilmiştir. Bu dönemde tesisin biyogaz üretimi, prosesinin başlangıç aşamasında olması ve CHP ünitelerinden kullanılacak olan biyogazın atık ısı ihtiyacını sağlayacak kadar üretilmemesi nedeniyle işletme için ihtiyaç duyulan ideal çamur kuruluğu sağlanamamıştır. Solar kurutma ünitesinde çamur yüksekliğindeki beklenmeyen artış nedeniyle bir miktar çamur katı atık düzenli depolama tesisine gönderilmiştir.

Giriş çamur katı madde konsantrasyonu değerlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Tesisin ilk devreye alınmasıyla çamur yüksekliği artmış ve 2022 Ekim döneminde 50 cm'ye yükselmiştir. 2022 Aralık döneminde çamur yüksekliği katı atık düzenli depolama tesisine gönderildiğinden dolayı azalmıştır.

Tablo 4.1 2022 Haziran dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
23,0	86,4	6,12	48,70
22,5	89,6	7,20	52,44
23,4	80,6	8,25	54,24
23,1	82,2	8,80	53,61

Tablo 4.2 2022 Temmuz dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
21,3	88,9	14,4	48,43
20,7	89,3	17,6	50,56
22,0	90,1	19,5	49,67
22,5	88,7	20,20	51,67

Tablo 4.3 2022 Ağustos dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
21,9	90,3	32,4	52,37
22,2	90,5	35,3	50,33
20,1	89,4	38,1	50,05
19,8	91,0	40,0	52,01

Tablo 4.4 2022 Eylül dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
21,4	92,4	38,8	48,22
22,6	94,0	42,5	47,64
23,2	90,8	46,0	47,00
22,0	93,1	48,2	47,86

Tablo 4.5 2022 Ekim dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
21,0	82,3	50,0	49,87
22,7	79,7	48,5	50,00
22,2	81,0	49,5	50,99
23,5	82,1	50,0	51,37

Tablo 4.6 2022 Kasım dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
21,9	78,5	48,9	51,47
22,0	77,6	49,0	54,25
22,3	75,3	50,2	52,67
22,8	72,9	50,8	55,03

Tablo 4.7 2022 Aralık dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
19,4	65,8	28,7	53,65
20,3	62,5	29,2	54,12
21,5	67,1	30,6	52,10
20,2	61,4	31,0	55,35

Tablo 4.8 2023 Ocak dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
19,3	73,6	51,3	54,65
19,4	70,8	49,8	55,99
18,7	71,2	50,4	56,32
18,9	73,0	50,8	56,90

Tablo 4.9 2023 Şubat dönemi solar kurutma ünitesi çamur verileri

Çamur giriş kuruluğu	Çamur çıkış kuruluğu	Çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
%	%	cm	%
18,2	79,4	50,6	54,63
17,5	80,8	50,7	56,15
17,8	79,9	51,4	55,43
19,3	81,3	51,9	56,55

Tablo 4.10’da solar çamur kurutma ünitesine ait 9 aylık analiz ve izleme verilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu tabloda verilen radyasyon değerleri ve ortalama gün ışığı faydalanma süreleri NASA iklim simülasyon merkezi web sayfasından alınmıştır (URL-4, 2020).

Tablo 4.10 Solar çamur kurutma ünitesi 9 aylık analiz ve izleme verilerinin karşılaştırılması

Dönem	Radyasyon	Ort. gün ışığı faydalanma süresi	Ort. çamur giriş kuruluğu	Ort. çamur çıkış kuruluğu	Ort. çamur yüksekliği	Uçucu katı madde (UKM, organik madde içeriği)
Ay	kWh/m <sup>2</sup> .ay	–	%	%	cm	%
2022 Haziran	227,82	14 saat 58 dakika	23,0	84,7	7,6	52,25
2022 Temmuz	205,90	14 saat 25 dakika	21,6	89,3	17,9	50,08
2022 Ağustos	185,73	13 saat 11 dakika	21,0	90,3	36,5	51,19
2022 Eylül	156,25	12 saat 11 dakika	22,3	92,6	43,9	47,68
2022 Ekim	98,04	10 saat 21 dakika	22,3	81,3	49,5	50,56
2022 Kasım	71,74	9 saat 27 dakika	22,2	76,1	49,7	53,36
2022 Aralık	50,75	9 saat 11 dakika	20,3	64,2	29,9	53,81
2023 Ocak	56,81	9 saat 33 dakika	19,1	72,2	50,6	55,97
2023 Şubat	88,17	10 saat 4 dakika	18,2	80,4	51,2	55,69

#### 4.1 Solar Kurutma Ünitesinin Performans Değerlendirmesi

Seraya yıllık 362891,52 kg %25 yaş çamur verildiğinde; %90 KM hesabına göre 3066,19 ton/yıl kuru çamur çıkışı olması hedeflenmektedir. 2022 yılı Haziran ayından 2023 yılı Şubat ayına kadar geçen 9 aylık periyot hesap verileri ile tesis verileri üzerinden karşılaştırıldığında geçen 9 aylık süre boyunca toplam 272168,64 kg (%25 KM) ile solar üniteye %90 KM verim hedeflenerek beslenen çamurun 2293,29 ton kurutulması beklenmekteyken; işletmeden alınan veriler değerlendirildiğinde 211546 kg (%25 KM) çamur beslenen solar üniteye aylık ortalama 1849 ton (%81,21 KM) verim alındığı görülmüştür.

Tablo 3.3'te risksiz buharlaşabilecek su miktarı yıl içerisinde 7971,85 ton olarak hesaplanmıştır. 2022 Haziran ayı ile 2023 yılı Şubat ayına kadar geçen 9 aylık periyottaki toplam buharlaşma miktarı 5962,53 kg olması hedeflenirken, işletme verilerine bakıldığında 4639,58 kg olduğu görülmüştür. En düşük buharlaşmanın ise Aralık ayında olması beklenirken işletme verilerine göre 396,36 kg olarak 2023 Şubat ayında gözlemlenmiştir.

Projede hesaplanan çamur kuruluk değerleri incelendiğinde, yaz aylarında buharlaşma fazla olduğu için sera içerisindeki çamur örtü seviyesinin yüksekliğinde azalma beklenmektedir. Seradaki çamur miktarı Ekim ayından itibaren artarken, Mart ayından sonra azalması öngörülmektedir. Bu değer yıllık bazda küresel radyasyon değerlerinin aylık ortalamaları ile ilişkili olduğundan dolayı, sera içerisine serilen çamur yaz aylarında daha çabuk kurduğu için seradan çamur çıkışı da aynı oranda artmaktadır. Yaz aylarındaki yüksek radyasyon değeri, Ekim ayına kadar düşme eğilimi gösterdiğinden dolayı çamur miktarı, serada azalan radyasyonun da etkisiyle sera içerisinde biriken çamur miktarının yaz aylarına oranla nispeten kış aylarında daha fazla birikmesine neden olmuştur. Yaz ve kış aylarında farklı seviyelerde seyreden radyasyon değerleri her yıl tekrar eden bir döngü ile azalan ya da artan şekilde sürekli olarak devam etmektedir.

Genel hesaplama formülü; Çamur miktarı = (önceki döneme ait çamur + mevcut aya ait çamur - mevcut aya ait buharlaşma miktarı - mevcut aya ait kuru çamur çıkışı)

şeklindedir. Solar kurutma ünitelerinde kurutulan çamurun uzaklaştırma işlemi belediye bünyesinde var olan kamyonlar ile sağlanmakta ve çıkan çamur miktarı kantar tutanakları ile günlük işletme defterinde kayıt altına alınmaktadır. Hesaplamalara göre izlenen 9 aylık periyotta hollerden uzaklaştırılması gereken çamur miktarı toplamı 2138,64 ton iken 4547,69 ton çamur çıkışı gözlemlenmiştir. Farkın nedeni de belli bir süre için dizayn edilen ideal kurutma değeri elde edilmeden çamurun hollerden uzaklaştırılmasıdır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yaz aylarındaki yüksek radyasyon değeri, Ekim ayına kadar düşme eğilimi gösterdiğinden dolayı çamur miktarı, serada azalan radyasyonun da etkisiyle sera içerisinde biriken çamur miktarının yaz aylarına oranla nispeten kış aylarında daha fazla birikmesine neden olmuştur. Ancak solar kurutma sistemindeki ortalama çamur yükseklik değerleri incelendiğinde yaz aylarında da maksimum işletme seviyesinde seyrettiği belirlenmiştir. Bu durum CHP ünitesinden fazla ısının solar kurutmada bulunan yerden ısıtma sistemine gönderilmemesi ile açıklanabilir. CHP ünitesinden atık ısının solar kurutmaya gönderilmesi ile hesaplanan kuruluk değerlerine ulaşılabilir. Solar kurutmadan çıkan kurumuş çamur nihai çamur yönetim stratejisi kapsamında bertaraf edilebilir.

Nihai çamur yönetim stratejisi, AAT'de arıtma sonrası çıkacak çamur üzerinde yapılacak uzun süreli analizlerin sonuçlarına dayalı olarak belediye tarafından karar verilmelidir.

Bu çalışmada uygun maliyetli, pratik ve uygulanabilir çözümler sunan çamur yönetimi seçeneklerinin, tesiste ideal çamur kuruluğu elde edilmesi sonrası uygulanacağı göz önüne alarak seçenekler ortaya konarak açıklanmış ve bu seçeneklerin değerlendirmeleri yapılmıştır. Alternatifleri karşılaştırmak için avantajlar ve dezavantajlar da buna göre ortaya konmaktadır.

### 5.1 Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamuru Bertarafında Kullanılacak İlave Proses Önerileri

#### 5.1.1 Gazlaştırma

Gazlaştırma, belediye çamurunu arıtmak için diğer biyoatıklar arasında basit, güvenli ve verimli bir endüstriyel süreçtir. Önceden işlenmiş çamurun ağırlıklı hacmini önemli ölçüde azaltır (artan çamur kuru içeriği minimum %20). Atıksudaki tüm tehlikeli atıkları yok eder ve çok düşük emisyonlara sahiptir.

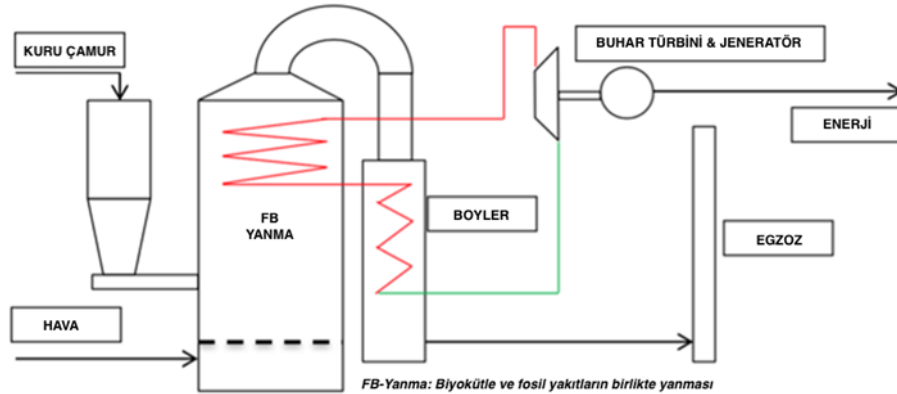
Çamurun gazlaştırılmasından ve ortaya çıkan gazın yakılmasından elde edilen güç, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Gazlaştırmanın nihai yan ürünü inert, süzilemeyen, grenli ve kurudur. Granül haline getirilmiş yan ürün, yüksek oranda potasyum ve fosfor içerdiğinden değerli bir gübredir.

Çürütülmüş çamurun ısı değeri gazlaştırma için kritik seviyede olabilir. Bu ileri arıtma alternatifi, yalnızca AAT'nin normal çalışmasından sonra susuzlaştırılmış çamurun kalorifik değeri analiz edildikten sonra dikkatlice incelenmelidir.

Sabit yataklı, toz haline getirilmiş, döner ve akışkan yataklı gibi çeşitli çamur gazlaştırıcı yöntemleri vardır. Çamur en iyi şekilde akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yakılabilir (Şekil 5.1). Üretilen gaz şu şekilde kullanılabilir:

- Küçük sanayide yakıt gazı olarak kullanılabilir,
- Bir yakıcıda yakılır ve çıkan ürün buharı, güç üretimi için bir buhar türbini-jeneratör sistemine gönderilebilir ve
- Güç üretmek için enerji motorlarında kullanılabilir.

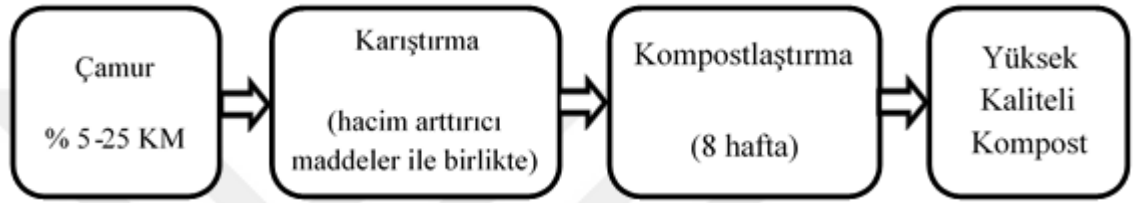
İndirgeyici ortam olarak hava kullanılıyorsa, gaz ısıtma değeri 1250 kcal/kg olacaktır. Oksijen kullanılırsa, gaz ısıtma değeri 2000-2500 kcal/kg'a ulaşacaktır. Oksijen, PSA (basınç salınımlı absorpsiyon) ekipmanında daha iyi üretilir. 50 ton/gün kuru çamur kapasiteli elektrik üretecek bir gazlaştırma tesisinin maliyeti 2-2,5 Milyon Avro aralığındadır.



Şekil 5.1 Çamur gazlaştırma prosesi

### 5.1.2 Kompostlaştırma

Çamur kompostlaştırma, çamurun besleyici veya organik değerinden yararlanan tarım veya diğer son kullanım satış noktalarını geliştirmek için kirlilik risklerini kontrol ederken çamuru biyolojik olarak stabilize etmeyi amaçlar. Çürütülmemiş çamura ya da çürütülmüş çamura uygulanabilir (Şekil 5.2). Kompostlaştırma, organik maddenin aerobik bozunmasını ve aynı zamanda verimliliği kompostlaştırma sürecine bağlı olan çamur su içeriğinde potansiyel bir azalmayı içerir.



Şekil 5.2 Çamur kompostlaştırma akış şeması

Proses performansı, hem biyolojik dönüşüm hem de hijyenleştirme (patojenlerin azaltılması) açısından kesinlikle sıcaklığa, kuru maddeye ve uçucu katılara bağlıdır. Özellikle, %40-60'luk bir katı konsantrasyonu ve 60°C civarında bir sıcaklık gereklidir. C/N oranı, uygun bir süreç gelişimi ve iyi bir nihai ürün sağlamak için çok önemlidir. C/N oranı genellikle 25-30 değerleri arasında korunmalıdır.

Kompostlama, diğer çamur arıtma yöntemlerine kıyasla çeşitli avantajlar sunar. Örneğin tarımda kompostlaştırılmamış çamurların doğrudan uygulanmasıyla karşılaştırıldığında, kompostlaştırma, tarım alanlarında dağıtım için taşınacak malzemelerin hacminde bir azalma sağlar. Kompost malzemesi spesifikasyonlarının ve besin içeriğinin kontrolü, toprak humus tabakasını ve besin seviyelerini iyileştirme potansiyeline sahip, iyi tanımlanmış, kararlı bir son ürün bileşimi ile sonuçlanır. Kompostlama aynı zamanda tarımsal uygulama öncesi ürünün hijyen kontrolünü sağlar. Ancak arıtma maliyeti doğrudan ham çamurun toprak üzerine uygulanmasına göre daha yüksektir ve havalandırma işlemi enerji tüketir. Rekabetçi gübreler piyasada mevcut olduğundan, kompost son ürünü için bir pazara da ihtiyaç vardır.

AAT'den kaynaklanan çamurun işlenmesi ve bertaraf edilmesi amacıyla kurulan yoğunlaştırma, susuzlaştırma ve stabilizasyon üniteleri gibi, Atıksu Arıtma/Derin

Deniz Deşarjı Proje Onayı Hakkında Genelge de (no.2014/7) belirtildiği üzere, söz konusu anaerobik çürütme ünitesi AAT tasarımının ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu ünitelerin sadece AAT çamuru için değil, farklı ürün, hammadde veya atıklar için de kullanılması durumunda bu üniteler, Fermente Ürün Yönetimi Tebliği kapsamında mekanik ayırma, bio-kurutma ve bio-mekanizasyon tesisleri ile birlikte değerlendirilir. Bu şekilde atık dışarıdan temin edilecek ise ilgili tebliğ kapsamında gerekli ilerlemeler sağlanacaktır.

## **5.2 Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi Çamur Bertarafı Değerlendirmeleri**

Atık su çamurunun kurutulması için güneş enerjisinin kullanılması, enerji tüketimi ve dolayısıyla kurutma sisteminin maliyeti açısından fayda sağlar. Literatürden elde edilen sonuçlara göre, bedava güneş enerjisi yanında ikinci bir enerji kaynağı kullanmak her durumda fayda sağlayabilir. Kurutma sistemlerinin performansları kullanım süresine, deneysel çalışmanın yapıldığı yerin coğrafi durumuna ve ayrıca atıksu çamurunun kaynağına göre değişir (Bennamoun, 2012).

Güneş enerjisiyle kurutmanın Kastamonu AAT'nin bir bileşeni olduğu göz önüne alındığında, enerji/materyal geri kazanımı amacıyla daha fazla işlem yapmak için iki olası seçenek bulunmaktadır. Yukarıdaki seçenekler, enerji gereksinimleri, zaman ve alan gereksinimleri ve maliyetler açısından Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Çamurun bertarafı için en son seçenek düzenli depolama olmalıdır. Bu nedenle, susuzlaştırılan çamurun dekantörden solar kurutma ile daha fazla kurutulması, nihai bertaraf mekanizmasının sürdürülebilirliğine büyük katkı sağlayacaktır. Çamur yönetimi stratejisinin, tek bir teknolojinin seçiminden ziyade seçeneklerin bir kombinasyonundan oluşması önerilir.

Geleneksel gübrelerin kullanımına seçenek olarak kompost tercih edilebilir. Avantajlar ve dezavantajlar, çevresel etkiler, maliyetler ve çiftçiler tarafından kabul edilebilirlik açısından daha detaylı değerlendirilmelidir. Çamurun pratik nihai kullanımının en iyi sonuçları için güneşte kurutma ve gazlaştırma kombinasyonu için pilot ölçekli testlerin yapılması tavsiye edilir.

Tablo 5.1 Diğer çamur işleme yöntemlerinin ve etkilerinin özeti

Çamur işleme prosesi	Nihai kullanım	Enerji gereksinimi	Zaman ve yer gereksinimi	Maliyet
<b>Kompostlaştırma</b>	Tarım, Ağaçlandırma, Peyzaj, Arazi ıslahı/yeniden ekim	Motorin kullanan mobil ekipmanlarla çalıştırıldığından elektrik gücü veya kimyasal madde gerektirmez.  Atıksu arıtma tesisinin normal çalışmasının ötesinde ek insan gücüne veya özel yeterliliklere ihtiyaç duymaz.	Belirli çevresel endişeler yoktur. Sadece malzemenin yetersiz yayılması veya nemlendirilmesi durumunda çamur yığınları anaerobik koşullarda çürümeye başlayabilir ve hidrojen sülfat içeren kötü kokulu gazların havaya emisyonlarına neden olabilir.	Yatırım maliyetleri, kullanılan makinelerinin kapasitesine ve kompostlama alanının boyutuna ve malzemelerine bağlı olarak genellikle 500.000 Euro ile 3 milyon Euro arasında değişmektedir. Ekipmanın teknik ömrü genellikle 10-15 yıldır.
<b>Yakma</b>	Enerji geri kazanımı	Enerji geri kazanımı açısından çok verimli.	Arıtma çamurunun pirolitik gazlaştırılmasından elde edilen biyogaz, arıtma çamurundaki nitrojen bileşenlerinden kaynaklanan birkaç bin ppm konsantrasyonda, hidrojen siyanür gibi oldukça toksik maddeler içermektedir.	Mevcut teknoloji, uzun süreli deneyimler sonunda belirli sorunlar ve yüksek toplam maliyetlerin varlığı göz önüne alındığında henüz daha verimli bir uygulama yöntemi bulamamıştır.

### **5.3 Çamurun Yeniden Kullanımı ve Bertaraf Seçenekleri**

Bertaraf alternatifleri, ulusal düzenlemelerin sınırlamaları dahilinde aşağıda sunulmuştur. Bu bağlamda, her türlü arıtma çamurunun su ortamlarına deşarjının yasak olduğu yasal çerçeveden hatırlanmalıdır. Ancak stabilize çamur uygun koşullarda yeniden kullanılabilir. Atık Yönetimi Yönetmeliği (Resmi Gazete Tarih: 02.04.2015; Sayı: 29314) Ek-3'te belirtilen çamur özelliklerinin tehlikeli olup olmadığının analiz edilmesi özellikle önemlidir. Stabilize çamurun yeniden kullanımı, son seçenek olan bertaraftan daha önceliklidir.

#### **5.3.1 Tarımda Toprak Düzenleyici Olarak Kullanım**

“Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik”e göre, arıtılmış çamurun bileşimi ve kalitesi, aşağıdakiler gibi ulusal mevzuatta belirtilen tüm kriterleri karşılamalıdır:

- Ağır metal konsantrasyonları sınır değerlerin altındadır
- Bazı organik maddelerin konsantrasyonları sınır değerlerin altındadır
- pH 6,0 – 8,5
- Organik içerik %40'ın üzerindedir

Kastamonu AAT'nin atıksu girdisinde evsel, mezbaha ve süt ürünleri üretimi gibi bazı gıda sanayi bileşenleri olduğu göz önüne alındığında, arıtılmış çamurun ağır metal içermesi muhtemel değildir.

#### **5.3.2 Yeşil Alanlarda Toprak İyileştirici Olarak Kullanım**

Arıtılmış arıtma çamurunun yeşil alanlarda (parklar, peyzaj alanları vb.) yeniden kullanılması kokusuz olması gibi daha yüksek gereksinimler gerektirmektedir. Bu, arıtma çamuru için termal ısıtma gerektirebilir. Arıtma yöntemi ne olursa olsun, arıtma çamurunun doğal ormanlara atılması yasaktır.

### 5.3.3 Yakıt İkamesi Olarak Kullanım

Arıtma çamuru için öncelikli bir bertaraf yöntemi, çimento fabrikalarında, demir-çelik fabrikalarında ve termik santrallerde alternatif yakıt kaynağı olarak kullanılmasıdır. Almanya ve İsviçre gibi birçok Avrupa ülkesi, arıtma çamuru yönetimi için bu uygulamayı benimsemeye başlamıştır. Arıtma çamuru, çimento fırınında işlendiğinde kömüre kıyasla nispeten yüksek net kalorifik değere (10-20 MJ/kg) ve daha düşük karbondioksit emisyon faktörüne sahiptir. Kastamonu'da çimento yakma fırını bulunmamasıyla birlikte Bartın ya da Çorum'da bulunan çimento fabrikalarında kuru çamurun yakıt ikamesi olarak kullanılması taşıma problem çözülmesi halinde iyi bir alternatif olabilir.

Çamurun yakıt yerine kullanılması, arıtma çamurunun güvenli ve çevre dostu bir şekilde bertaraf edilmesi sorununu da çözebilir. Fosil yakıtların, kurutma yöntemine bağlı olarak çamurun ısı değeri çok yüksek olan çamur kullanımı ile değiştirilmesi minimum taşıma mesafesinde en etkili çözüm olacaktır.

### 5.3.4 Enerji Geri Kazanımı İçin Yakma

Çamurun yakıldığı ve enerji geri kazanımının olduğu durumlarda faydası, yakılacak olan fosil yakıt miktarındaki azalma ve buna karşılık gelen CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki net artıştır. Her iki yakma işleminde de CO<sub>2</sub> çıkacağından bu değer nötrdür, bu nedenle enerji geri kazanıldığında CO<sub>2</sub> azaltımına katkıda bulunabilir, ancak bunun olumsuz bir yönü besinlerin tarımda kullanılmamasıdır ve bu nedenle ticari gübre kazanmak ve üretmek için kullanılan fosil yakıtta tasarruf kaybı vardır.

Genellikle gözden kaçan diğer enerji ve kaynakla ilgili faydalar, yakma işlemi genellikle AAT'de gerçekleştirildiğinden, yakma işlemi diğer satış yerleri ile karşılaştırıldığında çamur için taşıma etkilerinin genellikle sıfır veya küçük olmasıdır. Kül inşaat malzemeleri için de kullanılabilir: bu sadece taş ocaklarına olan ihtiyacı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çamurdaki kirleticileri çevreden izole ederek tehlikeli atık düzenli depolama alanlarında bertaraf etme ihtiyacını ortadan kaldırır.

### 5.3.5 Düzenli Depolama

Çamurun toprağa gömülecek kadar tutarlı olup olmadığını bilmek önemlidir. Ek olarak, çamur taşıma kapasitesi ile ilgili olarak reolojik özellikler önemlidir. Ağır metaller, biyolojik sürecin gelişimini ve sızıntı suyunun kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Düzenli depolama alanlarının kullanımı, çamur yönetimi hiyerarşisinde en düşük önceliğe sahiptir ve çamuru bertaraf etmek için başka yol olmadığında seçilebilir. Özellikle diğer bertaraf yöntemlerindeki arızaların ortaya çıktığı aşamalarda, son çare olarak düzenli depolama sağlanmalıdır.

Atıksu çamuru, ham (giriş) atıksuyun içerdiği tüm kirleticileri içerebilir ve organik madde içeriği, endüstriyel atıksuyun oranına bağlı olarak değişir, ancak genellikle %60-70 aralığına düşer.

Kastamonu AAT için, düzenli depolama yönetmeliğinin gerektirdiği katı madde yüzdesi korunurken, mevcut olan katı atık yönetim projesi kapsamında yapılan düzenli depolama sahasında kurutulmuş çamurun bertaraf edilebileceği ayrı bir lot bulunmamaktadır. Bu nedenle, yukarıda belirtilen seçeneklere duyulan ihtiyaç özellikle önemlidir.

Tablo 5.2 Kurutulmuş ve stabilize çamur için bertaraf önerileri

Nihai Satış Noktaları	Koşul	Gereksinimler	İlişkili Maliyetler	Çevresel etkiler
<b>Toprak iyileştirici (tarım, ağaç tarlaları, çevre düzenlemesi ve arazi ıslahı/yeniden işleme faaliyetleri)</b>	Mevzuatta belirtilen kirleticiler için karşılanması gereken sınır değerler.	Arazide çamur kullanımı, kalite güvencesi için sıkı bir izleme ve uygun mekanizmalar gerektirir. Çamur ve çamurdan türetilmiş malzemenin analizleri şunları gerektirir: spektroskopi ve spektrometri; elektroskopi; termal ve gravimetri; kromatografi ve elektromigrasyon.	Tarımsal bir kullanım, yalnızca çamur üretimi yerine yakın kullanıldığında uygun maliyetlidir. Aksi takdirde, nakliye önemli bir maliyettir.  Stabilizasyon/hijyenizasyon gereklidir.  Sık yapılan laboratuvar analizlerinin maliyeti yüksektir.	Kirleticilerden ve patojenlerden kaynaklanan riskler bilinmemektedir ve tamamen ortadan kaldırılamaz, kapsamlı analizler gereklidir.
<b>Yakıt katkı maddesi (Çimento fabrikaları, termik santraller)</b>	% 90–95 KM içeriğine sahip kurutulmuş çamur malzemesi, yakma fırını için bu kurutma derecesi verimli olduğundan, yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilir.	Termal kurutma, enerji üretiminde daha etkin bir şekilde kullanılabilen çamurun kalorifik değerini iyileştirir.	Endüstri, bertaraf ücretinin ödenmesi karşılığında çamuru ilave yakıt olarak kabul etmektedir.	CO <sub>2</sub> nötr bir yakıt sağlar ve ikame etkilerine izin verir (geleneksel yakıt ve ham maddeleri değiştirerek).
<b>Nihai kaplama malzemesi (orman yangınlarından kalan çöplükler, madenler, çorak arazilerin kapatılması, çevre düzenlemesi ve iyileştirilmesi için alt tabaka katmanları olarak)</b>	Biyobozunur malzemelerin düzenli depolama alanlarına atılmasına ilişkin sınırlamalar veya yasaklar, çamurun düzenli depolama alanlarına atılmasını ve kompost çamurunun uzun vadede peyzaj malzemesi olarak kullanılmasını da sınırlar.	Toprak ve yeraltı suyunun izlenmesi gereklidir.	AAT yakınında uygulandığında uygun maliyetlidir.  Laboratuvar analizleri maliyetlidir.	Çamur içeriğine bağlı olarak toprak ve yeraltı suyunun olası kirlenmesi.
<b>Düzenli depolama</b>	Başka bir kullanım veya bertaraf seçeneği bulunmayan çamur bertarafı için son çözüm.	Gereksinimler ulusal mevzuat tarafından düzenlenir: su içeriği, kirletici içeriği.	Uygun standarttaki mevcut düzenli depolama alanlarında nispeten düşük maliyetli bir yöntem.	Çamur kullanımından elde edilen tüm faydaların kaybı, çamurdaki besin maddelerinin kaybı ve çevresel bir yük oluşturma.

## 5.4 Çamur Yönetim Stratejisi

### 5.4.1 Karar Verme Süreci

Kastamonu AAT için aşağıdaki karar verme tablosu kullanılabilir. Karar verme süreci aşağıdaki senaryolarda açıklanmıştır. Tüm senaryolar, dekantörde susuzlaştırıldıktan sonraki stabilize çamur için değerlendirilmiştir.

Tablo 5.3 Kurutulmuş ve stabilize çamur için bertaraf önerileri

Senaryolar	Uygulamalar	Riskler
<b>Senaryo 1:</b> <b>Daha fazla kurutma yok</b>	Çamur fırında yakılmaz veya kompostlaştırılmaz.	Uzun nakliye mesafesi kaza risklerini tetikleyebilir ve çevre kirliliğine neden olabilir.
<b>Senaryo 2:</b> <b>Güneş enerjisiyle kurutulmuş çamur kompostlanıyor</b>	Ortaya çıkan çamur kompostu, çiftçilere pazarlanabilir veya çevre düzenlemesi ve ağaçlandırma için yakın çevrede toprak düzenleyici olarak kullanılabilir. Dikkate alınacak toprak ve yeraltı suyu izleme ve çamur özellikleri için laboratuvar analizlerinin maliyetleri.	Çiftçilere pazarlamanın kabul edilme riskleri vardır.
<b>Senaryo 3:</b> <b>Çamur yakılır</b>	Güneş enerjili kurutucuda devamlı olarak %90 KM elde edilirse, çamur kabul edilebilir ve bir termik santralde yakıt ikamesi olarak yakılabilir.	Yakma tesisi zaman içinde kapanabilir veya çamur alımını durdurabilir.
<b>Senaryo 4:</b> <b>Çamur gazlaştırılır</b>	Solar kurutucudan çıkan kurutulmuş çamur, çamur yönetimi amacıyla özel olarak kurulmuş bir gazlaştırma tesisinde gazlaştırılabilir. Üretilen gaz, küçük sanayide yakıt gazı olarak kullanılabilir; bir yanma odasında yakılır ve üretilen buhar, güç üretimi için bir buhar türbini-jeneratör sistemine gönderilir veya güç üretmek için enerji motorlarında kullanılabilir.	Önemli risk yok.

### 5.4.2 Çamur Depolama ve Taşıma

En uygun depolama yönteminin seçimi temel olarak kuru madde içeriğine bağlıdır. Susuzlaştırılmış çamurun depolanması genellikle su ve gazlar için drenaj kontrolü ve

yoğun yağış alan bölgelerde kaplama ve sızdırmazlık sistemleri gerektirir. Doldurma/boşaltma işlemleri, bantlı, vidalı, pnömatik ve pozitif yer değiştirmeli tip konveyörler, oluklar ve eğimli düzlemler, kovalı elevatörler, kıskaçlı kepçeler vb. dahil olmak üzere çok çeşitli ekipmanlarla gerçekleştirilebilir. Ekipmanın çalışma sırasında bloke olmasını önlemek için bazen özel bir aparat ile kullanılması gerekir.

Çamur; boru hattı, mavna, demiryolu veya kamyonla taşınabilir. Kamyonla taşıma en yaygın kullanılan yöntemdir. En önemli avantajlar, nispeten düşük yatırım maliyetleri ve yüksek derecede esnekliktir. Toplama noktalarının yeniden yönlendirilmesi ve değiştirilmesi de kolayca düzenlenir. Dezavantajları olası sızıntı ve koku/toz emisyonudur.

Susuzlaştırılmış çamurun taşınmasına yönelik kamyonlar, yükleme/boşaltma işlemleri için alışılmadık derecede büyük su geçirmez kapaklarla donatılmıştır. Çeşitli yükleme ekipmanı türlerinden en iyi şekilde yararlanmak için, bu tür tankerler, büyük yükleme ambarları ve kokuların kaçmasını önlemek için bir conta ile donatılmıştır. Tankın içi, hızlanma ve frenleme sırasında çamurun hareketine karşı koymak için bölme plakaları ile donatılmıştır. Hızlı boşaltma, tankın maksimum yaklaşık 30° yatırılmasıyla sağlanır, böylece çamur, döndürülerek açılabilen arka kapaktan düşer. Bu kapı kapatıldığında conta ve döner kilitlerle sızdırmaz hale getirilir. Katı madde konsantrasyonu %30'u aşan susuzlaştırılmış çamurun taşınması için tasarlanmış tankerlerde, çamur viskozitesine uyum sağlamak için iç bölme plakaları uzatılabilir ve geri çekilebilir. Aracın üst kısmındaki sürgülü kapılar yükleme işlemini kolaylaştırabilir. Kamyonların tüm ekipmanı ve donanımları, çeşitli taşıma prosedürleri sırasında herhangi bir çamur sızıntısı olasılığını ortadan kaldıracak şekilde tasarlanmalıdır. Kastamonu AAT'de de taşıma işleri için bu tip kamyonlar kullanılmalıdır.

### **5.4.3 Çamur Bertarafı için Acil Durum Planı**

Çamur arıtımı için acil durum planı, planlanan yönetim sisteminin faaliyette başarısız olduğu durumlar için bir dizi müdahale önlemi sağlar. Bu nedenle, AAT sahası geçici

depolama ve belediye depolama sahasına kabul, sıvı çamurun taşınması için acil durum prosedürleri vb. gibi seçeneklerle donatılmalıdır.

#### **5.4.4 Kısa Vadeli Strateji**

Kısa süreli strateji dönemi, genel olarak sistemin uygulanabilirliği açısından çamur arıtma ve bertaraf zincirinin kritik noktalarının izlenmesi gereken ilk 1-2 yıl olarak kabul edilebilir. Kastamonu AAT'de bu aşamadır. Dikkate alınması gereken başlıca konular, AAT'deki depolama kapasitesi ve nihai bertaraf alanına taşıma kapasitesidir.

Susuzlaştırılan çamurun hacmi, biyolojik olarak arıtılan atıksu ile (by-pass'ların azalmasıyla) yıllık olarak artacaktır. Çamur depolama kapasitelerinin yetersiz bulunması durumunda depolama kapasitesi artırılmalı ve buna göre taşıma sistemi revize edilmelidir.

Nihai imha seçenekleri, olası izin prosedürleri, lisanslar ve anlaşmalar sağlanarak önceden belirlenmelidir. Depolama kısa vadede bir seçenek olarak sağlanmalıdır, bu nedenle ön anlaşmaların ve izinlerin alınması önemli bir önceliktir.

Tarımda yeniden kullanım, atıktan enerjiye dönüştürme seçeneği gibi uzun vadeli bir önlem geçerli ve hazır olana kadar kısa ve orta ölçekli bir strateji kullanılabilir.

#### **5.4.5 Orta Vadeli Strateji**

Orta vadeli strateji için başlangıç süresi 5-7 yıl olarak kabul edilebilir ve odak noktası uzun vadeli ileri çamur işleme teknolojisi ve bunun için depolama yeri olmalıdır. Bunun için fiili tasarım ve inşaat çalışmaları başlatılabilir.

Çamurun çimento fırınlarında birlikte yakılması, kısa ve orta vadede geçerli bir potansiyel çıkış noktasıdır. Ancak, sözleşmelerin ve emisyonların güvenliği ile ilgili uzun vadede belirsizliğe tabidir ve bu nedenle uzun vadeli bir bertaraf stratejisi oluşturması muhtemel değildir.

#### 5.4.6 Uzun Vadeli Strateji

Genel çamur yönetimi stratejisi, sürdürülebilir seçenekler sağlayan uzun vadeli bir perspektife sahiptir. Yakın geçmişte benzer uygulamalarda çiftçiler tarafından düşük kabul düzeyi göz önüne alındığında, şu anda tarımsal geri dönüşüm seçeneği pek olası görünmemektedir. Bu bilinçle, bir çiftçinin arıtılmış çamuru uzun vadede toprak düzenleyici olarak kullanma tutumunu geliştirmeye çalışılmalıdır.

Çamurun termal olarak yok edilmesi ve buna eşlik eden enerji geri kazanımı, çamur için en güvenli uzun vadeli bertarafı sağlayabilir. Kastamonu AAT'de de bu yönde çalışmaların biran önce başlatılması önerilmektedir.

#### 5.5 Kamu Bilinçlendirme Stratejisi

Kompost çamurunun tarımda olası kullanımını için bir kamuoyu bilinçlendirme stratejisi gereklidir. Çamurun daha fazla arıtılması için kompostlaştırma seçeneği kullanıldığında dikkate alınması gereken konular aşağıdadır.

Kastamonu AAT çevresinde bulunan kamuoyunu bilinçlendirmek için aşağıdaki adımlar izlenebilir:

- Arıtma çamurundan elde edilen kompost malzemesinin kalitesi ve uygulaması konusunda çiftçilerin eğitimi için Gıda, Tarım ve Hayvancılık İl Müdürlüğü ile iş birliği yapılmalıdır.
- Eğitimler broşür, kitapçık vb. ile desteklenmelidir.
- Kompost kullanımı hakkında bilgilendirmek ve katılımcılar tarafından ortaya atılabilecek soru ve endişeleri yanıtlamak için çoğunlukla çiftçileri ve yerel halkı bilgilendirmek için katılımcı bir sürecin organize edilmesi planlanmalıdır.
- Eğitimler, kompostun etkili bir şekilde kullanıldığı diğer yerlere tarım uzmanları tarafından yönlendirilen çalışma ziyaretleriyle desteklenmelidir.
- Mahsul üretimi üzerindeki etkiler açısından kompost kullanımı izlenmelidir.
- Düzenli olarak ölçülmesi gereken toprak kalitesinin raporlanması ve kamuoyuna açıklanması yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Aksu, T. (2008). Isparta Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisinde Oluşan Çamurun Bertaraf Stratejilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Al-Otoom, A., Al-Rub, F.A, Mousa, H., & Shadeed, M. (2015). Semicontinuous solar drying of sludge from a waste water treatment plant. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7, 043137. doi: 10.1063/1.4928860.
- An X., & Liu W. (2017). Review on sludge drying process and dryer in solar energy. *American Journal of Energy Engineering*, 5(5), 34-38. doi: 10.11648/j.ajee.20170505.12.
- Angın, İ. (2008). Arıtma Çamurlarının Fiziksel ve Kimyasal Toprak Düzenleyicisi Olarak Kullanımı. Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Arlabosse, P., Ferrasse, J-H., Lecompte, D., Crine, M., Dumont, Y., & Léonard, A. (2012). Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorization. Tsotsas, E., & Mujumdar, A.S. (Eds.), *Modern Drying Technology* (pp. 295-329), Wiley: Darmstadt.
- Ata, S. (2014). Arıtma Çamuru Uygulamalarının Erzurum Ovası Bazı Büyük Toprak Gruplarında Yetiştirilen Buğday Bitkisinin Besin Elementi ve Ağır Metal İçerikleri ile Toprakların Ağır Metal Adsorpsiyonu ve Desorpsiyonu Üzerine Etkisi. Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Aydın, S. (2004). Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması. Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Aydın, S. (2020). Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamuru Yönetiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Ayvaz, Z. (2000). Atıksu Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi, *Ekoloji Çevre Dergisi*, 9(35), 3-12.
- Bauerfeld, K., Dellbrügge, R., Dichtl N, Großer A., & Paris S. (2015). “Technology transfer-oriented research and development in the wastewater sector validation at industrial-scale plants” (EXPOVAL) - Subgroup 6: Solar sewage sludge drying, First results from investigations with a pilot plant, *Water Practice and Technology*, 10(2), 371-380. doi: 10.2166/wpt.2015.045.
- Bennamoun, L. (2012). Solar drying of wastewater sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1061-1073. doi: 10.1016/j.rser.2011.10.005.

- Bilgin, N., Eyüpoğlu, H. & Üstün, H., (2002). Biyokatıların (Aritma Çamurlarının) Arazide Kullanımı. *Aski-Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Ankara Araştırma Enstitüsü*,
- Cai, L., Chen, T-B., Gao, D., Zheng, G-D., Liu, H-T., & Pan, T-H. (2013). Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying. *Water Research*, 47(13), 4767-4773. doi: 10.1016/j.watres.2013.03.048.
- Cai, L., Gao, T-B., Liu, H-T., Zheng, G-D., & Yang Q-W. (2012). Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying. *Bioresource Technology*, 117, 13–19. doi: 10.1016/j.biortech.2012.03.092.
- Chen, G., Yue, P.L., & Mujumdar, A.S. (2006). Dewatering and Drying of Wastewater Treatment Sludge. Mujumdar, A.S (Ed.) *Handbook of Industrial Drying*, 3rd Edition, (pp. 906-922). Boca Raton: CRC Press.
- Chen, Z., Afzal, M.T., & Salema, A.A. (2014). Microwave drying of wastewater sewage sludge. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(3), 282-286.
- Çevik A. (2017). Atıksu Arıtma Çamuru Susuzlaştırma Kurutma ve Yakmada Kullanılan Yöntem ve Ekipmanlar. Uzmanlık Tezi) *İller Bankası Anonim Şirketi*. Ankara.
- ÇŞİDB, (2019). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Kastamonu Atıksu Arıtma Tesisi Projesi İhale Dökümanı.
- Deng, W., Su, Y., & Yu, W. (2013). Theoretical calculation of heat transfer coefficient when sludge drying in a nara-type paddle dryer using different heat carriers. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 709-715. doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.096.
- Doğan, V., & Çalışır, O. (2012). Döşemeden (Yerden) Isıtma Sistemlerinde Hesap Yöntemi. *Tesisat Mühendisliği*, 130, 41-50.
- Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 657-667. doi:10.1016/S0196-8904(98)00094-6.
- Ekici, T. (2020). Eysel Atıksu Arıtma Çamurunun Kurutma Parametrelerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ.
- Ekinci, M.Ş. (2019). Atıksu Arıtma Çamurlarının Bertarafında Solar Kurutma Sisteminin Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa.
- Epstein, E., (2002). *Land Application of Sewage Sludge and Biosolids*. Florida: CRC Press.

- Filibeli, A. (2013). Arıtma Çamurlarının İşlenmesi (7. Baskı). *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları* (No:255), İzmir.
- Fonda K.D., & Lynch E. (2009). Going for the Green in Thermal Drying: Evaluation of Innovative New Technologies and Industry Trends *Residuals and Biosolids Conference*, 1019-1043, Water Environment Federation.
- Fudholi, A., Ridwan, A., Yendra, R., Desvina, A.P., Hartono, H., MAjaha, M.K.B., Suyono, T., & Sopian K. (2018). Solar Drying Technology in Indonesia: an Overview, *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* 9(4), 1804-1813. doi: 10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1804-1813.
- Garanto, O. (2016). Solar Sludge Drying Technology and Dried Sludge as Renewable Energy—Closing the Loop. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4, 221-229. doi: 10.17265/2328-2142/2016.04.005.
- Garcia-Gomez, A., Bernal, M.P. & Roig, A. (2002). Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology*, 83(2), 81-87. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00211-5.
- Grobelak, A., Czerwińska, K., & Murtaś, A. (2019). General considerations on sludge disposal, industrial and municipal sludge. Prasad, M.N.V., de Campos Favas, P.J., Vithanage, M., & Mohan, S.V. (Eds.), *Industrial and Municipal Sludge Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery*, (pp. 135-153). United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Grüter, H., Matter, M., Oehlmann, K.H., & Hicks, M.D. (1990). Drying of sewage sludge - An important step in waste disposal. *Water Science and Technology*, 22(12), 57-63. doi: 10.2166/wst.1990.0100.
- Huang, Y.W., & Chen, M.Q. (2015). Artificial neural network modeling of thin layer drying behavior of municipal sewage sludge. *Measurement*, 73, 640-648. doi: 10.1016/j.measurement.2015.06.014.
- Idris, A., Khalid, K., & Omar, W. (2004). Drying of silica sludge using microwave heating. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6), 905-918. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.10.001.
- İnal, M., & Argun, M.E. (2019). Arıtma Çamurlarının Güz Mevsimi Şartlarında Parabolik Solar Kurutucu ile Kurutulması. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(4), 151-158.
- İrdemez, Ş., Yılmaz, A.E., & Anlatıcı, E. (2016). Evsel Atıksu Arıtma Çamurlarının Termal Kurutma-Yakma Prosesi ile Uzaklaştırılmasında Arıtma Verimi–Enerji İlişkisinin İncelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(4), 65-73.
- KAMAG, (2015). *Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi Projesi*, Final Raporu (TÜBİTAK-KAMAG 108G167). Çevre Şehircilik ve Bakanlığı, Ankara.

- Karabacak, A.Ö., Sinir, G.Ö., & Senem, S. (2015). Mikrodalga ve mikrodalga destekli kurutmanın çeşitli meyve ve sebzelerin kalite parametreleri üzerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2), 125-135.
- Karabacak, E., (2021). Arıtma Çamuru Yakma Fırını Küllerinden Fosfor Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Kelessidis, A., & Stasinakis, 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. doi: 10.1016/j.wasman.2012.01.012.
- Khanlari, A., Tuncer, A.D., Sözen, A., Şirin, C., & Gungor, A. (2020). Energetic, environmental and economic analysis of drying municipal sewage sludge with a modified sustainable solar drying system. *Solar Energy*, 208, 787-799. doi: 10.1016/j.solener.2020.08.039.
- Kurt, M. (2016). Çamurun Güneşle Kurutma Tekniklerinin Maliyet ve Alan İhtiyacı Üzerinden Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kürklü, A., Bilgin, S., & Özkan, B. (2003). A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renewable Energy*, 28(5), 683-697. doi: 10.1016/S0960-1481(02)00109-X.
- Lee, K.M., Griffith, P., Farrell, J.B., & Eralp, A.E. (1987). Conversion of municipal sludge to oil. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 59(10), 884-889.
- Lei, Z., Dezhen, C., & Jinlong, X. (2009). Sewage sludge solar drying practise and characteristics study. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1-5, Wuhan. doi: 10.1109/appeec.2009.4918741.
- Leonard, A., Meneses, E., Trong, E.L., Salmon, T., Marchot, P., Toye, D., & Crine, M. (2008). Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed. *Water Research.*, 42(10-11), 2671-2677. doi: 10.1016/j.watres.2008.01.020.
- Logan, B.E. (2005). Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation. *Water Science and Technology*, 52(1-2), 31-37. doi: 10.2166/wst.2005.0495.
- Mathioudakis, V.L., Kapagiannidis, A.G., Athanasoulia, E., Diamantis, V.I., Melidis, P., & Aivasidis, A. (2009). Extended dewatering of sewage sludge in solar drying plants, *Desalination*. 248(1-3),733–739. doi: 10.1016/j.desal.2009.01.011.
- Mawioo P.M., Garcia, H. A., Hooijmans, C. M., Velkushanova, K., Simonič, M., Mijatović, I., & Brdjanovic, D. (2017). A pilot-scale microwave technology for

- sludge sanitization and drying. *Science of the Total Environment*, 601/602, 1437–1448. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.004.
- Müller, J.A., Winter, A., & Strükmann, G. (2004). Investigation and assessment of sludge pretreatment processes, *Water Science and Technology*, 49, 10, 97-104. doi: 10.2166/wst.2004.0618.
- Navaee-Ardeh, S., Bertrand, F., & Stuart, P.R. (2010). Key variables analysis of a novel continuous biodry mixed sludge. *Bioresource Technology*, 101(10), 3379-3387. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.037.
- Olabi, A. (2020). Arıtma Çamurunun Dezentegrasyonu Üzerine Sono Foto Fenton ve Sono Foto Katalitik Yöntemlerin Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas.
- Ongan, P. (2001). Biyolojik Arıtma Çamurlarının Alkali Hidrolizi ve Hidrolizin Çamur Susuzlaştırma Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Öztürk İ., Çallı B., Arıkan O., & Altınbaş M. (2015). Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı El Kitabı. *Türkiye Belediyeler Birliği*, Ankara.
- Öztürk, M. (2006). Magnezyum Amonyum Fosfat (MAP) Çöktürmesi ile Atıksulardan Azot ve Fosfor Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas.
- Özyazıcı, M.A., & Özyazıcı, G. (2012). Arıtma çamurunun toprağın bazı temel verimlilik parametreleri üzerine etkileri. *Anadolu Tarım Bilim Dergisi*, 27(2), 101-109. doi: 10.7161/anajas.2012.272.101.
- Palabıyık, H. (1998). Çevre sorunu olarak kentsel katı atıklar (çöpler) ve entegre katı atık yönetimi, *Türk İdare Dergisi*, 70(420), 45-64.
- Peregrina, C., Rudolph, V., Lecomte, D., & Arlabosse, P. (2008). Immersion frying for the thermal drying of sewage sludge, An economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 246–261. doi: 10.1016/j.jenvman.2006.12.035.
- Ritterbusch, S., & Bux, M. (2012). Solar Drying of Sludge Recent Experiences in Large Installations. 3. *European Conference on Sludge Management*, September 6-7, Leon, İspanya.
- Rojas, J., & Zhelev, T. (2012). Energy efficiency optimisation of wastewater treatment: Study of ATAD. *Computers and Chemical Engineering*, 38, 52-63. doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.11.016.

- Salan, T. (2014). Atıksu Arıtma Çamurlarının Türkiye'deki Durumu ve Enerji Üretiminde Değerlendirilme Olanakları. ICCI Conference, Proceeding Book, 190-195.
- Salihoglu, N.K., Pinarli, V., & Salihoglu, G. (2007). Solar drying in sludge management in Turkey. *Renew Energy*, 32(10), 1661-1675. doi: 10.1016/j.renene.2006.08.001.
- Salihoğlu, N.K. (2018). Yenilenebilir Enerji ile Arıtma Çamuru Kurutma Sistemi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Dergisi*, 23(1), 41-50. doi: 10.17482/uumfd.315164.
- Scharenberg, U.M., & Pöppke, M. (2010). Large-scale Solar Sludge Drying in Managua/Nicaragua. *Water and Waste*. 26-27.
- Sıkı, R. (2017). Arıtma Çamurunun Kurutulmasının Termodinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Solmaz, S., & Okaygün, M. (2018). A novel technology for dewatering and pasteurization of digested water sewage sludge utilizing concentrated solar energy. *International Conference on Clean Energy (ICCE-2018)*, 1-9, Famagusta, N.Cyprus.
- Sun G.Y., Chen M.Q., & Huang Y.W. (2017). Evaluation on the air-borne ultrasound-assisted hot air convection thin-layer drying performance of municipal sewage sludge. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 588-599. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.036.
- Sypula, M., Paluszak, Z., & Szala, B. (2013). Effect of Sewage Sludge Solar Drying Technology on Inactivation of Select Indicator Microorganisms. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(2), 533-540.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H.D. (2004). *Wastewater engineering: Treatment and Reuse*. Singapore: McGraw-Hill.
- Tuncer, A.D., Sözen, A., Afshari, F., Khanlari, A., Şirin, C., & Gungor, A. (2020). Testing of a novel convex-type solar absorber drying chamber in dehumidification process of municipal sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122862. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122862.
- URL-1. Türkiye İstatistik Kurumu, Atıksu Arıtma Çamuru Atık İstatistikleri 2020, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>. Erişim tarihi: 28/05/2023.
- URL-2. HUBER Solar ve Rejeneratif Kurutma Sistemi SRT. <https://www.arasya.com.tr/HUBER-Solar-Ve-Rejeneratif-Kurutma-Sistemi-SRT-i6>. Erişim tarihi: 01/07/2023.

- URL-3. Alyanak, İ., 4. Türk - Alman Su İş birliği Günleri. <https://docplayer.biz.tr/68004669-Atiksu-camurlarinin-degerlendirilmesiyle-ilgili-turkiye-deki-uygulamalar-fallbeispiele-von-abwasserklarschlammverwertung-in-der-turkei.html>. Erişim tarihi: 01/07/2023.
- URL-4. Tesisin bulunduğu bölge için global radyasyon verileri <https://maps.nccs.nasa.gov/arcgis/home/>. Erişim tarihi: 01/10/2020.
- Ünlü A., & Tunç S. (2007). Elazığ kenti atıksu arıtma tesisi çamur işleme birimlerinin işletiminin değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 53-60.
- Ünlü, H.I. (2020). Evsel Atıksu Arıtma Çamurlarının Açık ve Kapalı Solar Kurutma Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Velis, C.A., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R., & Pollard, S.J.T. (2009). Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technology*, 100(11), 2747-2761. doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.026.
- Wang, P., Mohammed, D., Zhou, P., Lou, Z., Qian, P., & Zhou, Q. (2019). Roof solar drying processes for sewage sludge within sandwich-like chamber bed. *Renewable Energy*, 136, 1071-1081. doi: 10.1016/j.renene.2018.09.081.
- Xu, G. (2014). Analysis of Sewage Sludge Recovery System in EU - in Perspectives of Nutrientes and Energy Recovery Efficiency, and Environmental Impacts. Master Thesis, *Norwegian University of Science and Technology*. Trondheim.
- Yıldız, Ş., Yılmaz, E., & Ölmez, E. (2009). Evsel nitelikli arıtma çamurlarının stabilizasyonla bertaraf alternatifleri: İstanbul örneği. *TÜRKAY 2009 Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu*, 1-8, İstanbul.
- Youssef A.S., & Kahil M.A. (2016). Solar Sludge Drying for Medina Al-Munawarah Sewage Treatment Plant in the Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Environmental Engineering*, 142(12), 05016006. doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001152.
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., & Yelmen, B. (2020). Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 895-904. doi:10.31590/ejosat.699952.
- Zhang, J., Sui, Q., Tong, J., Buhe, C., Wang, R., Chen, M., & Wei, Y. (2016). Sludge bio-drying: Effective to reduce both antibiotic resistance genes and mobile genetic elements. *Water Research*, 106, 62-70. doi: 10.1016/j.watres.2016.09.055.

Zhao, L., Gu, W-M., He, P-J., & Shao, L-M. (2010). Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. *Water Research*, 44(20), 6144-6152. doi: 10.1016/j.watres.2010.07.002.

