



**EVSEL ATIK SU ARITMA ÇAMURUNUN  
KURUTMA PARAMETRELERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Tuğçe EKİCİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE  
İkinci Danışman: Doç. Dr. Soner ÇELEN  
2020**

**T.C.**  
**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EVSEL ATIK SU ARITMA ÇAMURUNUN KURUTMA  
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tuğçe EKİCİ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE**  
**İkinci Danışman: Doç. Dr. Soner ÇELEN**

**TEKİRDAĞ-2020**

**Her hakkı saklıdır.**



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde eksiksiz biçimde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Tuğçe EKİCİ

İMZA

Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE danışmanlığında ve Doç. Dr. Soner ÇELEN ikinci danışmanlığında, Tuğçe EKİCİ tarafından hazırlanan “Evsel Atık Su Arıtma Çamurunun Kurutma Parametrelerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından 06/01/2020 tarihinde Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul/red edilmiştir.

Jüri Başkanı : Prof. Dr. İbrahim DEMİR

*İmza:*

Üye : Doç. Dr. Ali Rıza DİNÇER

*İmza:*

Üye : Doç. Dr. Gül KAYKIOĞLU

*İmza:*

Üye : Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE

*İmza:*

Üye : Doç. Dr. Soner ÇELEN (II. Danışman)

*İmza:*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ  
Enstitü Müdürü

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EVSEL ATIK SU ARITMA ÇAMURUNUN KURUTMA PARAMETRELERİNİN

ARAŞTIRILMASI

**Tuğçe EKİCİ**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE

Günümüzde nüfusun her geçen gün artması doğaya atılan atıkların artışına neden olmaktadır. Yeryüzünde görülen kirlilik seviyesindeki artışın önüne geçebilmek için insanoglu çeşitli önlemler almaktadır. Bu nedenle nüfus artışına paralel olarak atık su arıtma tesis sayısı hızla artmakta bu da arıtma çamuru miktarlarında büyük artış gözlenmesine sebep olmaktadır. Atık su arıtma tesisi çamurları, depolanmaları ve naklieleri aşamasında çeşitli sorunlara neden olabilecek yüksek nem içeriğine sahip çamurlardır. Bu nedenle, söz konusu çamurların kurutulması önemli bir işlemdir. Laboratuvar ölçekli bu çalışmada atık su arıtma tesisi çamurlarının kurutulması için mikrodalga ve konveyör kurutma yöntemleri, kuruma süreleri ve enerji tüketimleri bazında incelenmiştir. Kurutma deneylerinde cam kap içinde 20 g, 40 g ve 60 g ağırlıklarında çamur kullanılmıştır. Mikrodalga kurutma denemeleri denemeler 360 W, 600 W ve 800 W güç, 2450 MHz frekansta, konveyör kurutma denemeleri ise 1,8 m bant boyunda, 60±1 °C, 70±1 °C ve 90±1 °C sıcaklıklarda, 0,2 m/dak sabit bant hızında ve 1 m/s hava hızında yapılmıştır Mikrodalga gücünün artması ile enerji tüketimi artmıştır. En az enerji tüketimi 800 W ve 60 g değerlerinde 0,015 kWh olarak ölçülmüştür. Kuruma zamanları dikkate alındığında da aynı değerler söz konusudur. Kurutma sıcaklığının artması ile kuruma süresi azalmış, enerji tüketimi azalmıştır. En az enerji tüketimi 90 °C ve 20 g değerlerinde 4,1 kWh olarak ölçülmüştür. Her iki kurutma sisteminden en uygununun zaman ve enerji açısından 800 W değerinde belirlenmiştir. Ürün daha geniş kaba yerleştirilip yüzey alanı genişletildiğinde daha fazla miktarda kurutma yapılabilir. Çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde her iki kurutmanın kurutma mekanizmaları farklı olduğu için farklı kuruma süreleri gözlemlendiği ve mikrodalga kurutmanın hacimsel ısıtmadan dolayı konveyör kurutmaya göre daha hızlı gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Arıtma çamuru, Mikrodalga kurutma sistemi, Konveyör bantlı kurutma sistemi, Enerji tüketimi

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

### **INVESTIGATION OF DRYING PARAMETERS OF MUNICIPAL WASTEWATER SLUDGE**

**Tuğçe EKİCİ**

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Esra TINMAZ KÖSE

Today, the population is increased day by day and also the throw waste in to the nature. In order to prevent the increase in the level of pollution seen on earth, human beings take various measures. Therefore, the number of wastewater treatment plants increases rapidly in parallel with the population increase, which causes a significant increase in the amount of sludge. Wastewater treatment plant sludges have high moisture content which can cause various problems during storage and transportation stages. Therefore, drying of sludge is an important process. In this laboratory-scale study, microwave and conveyor drying methods for drying sludges of wastewater treatment plants were examined on the basis of drying times and energy consumption. In the drying experiments, sludge weighing 20 g, 40 g and 60 g was used in the glass container. Microwave drying trials experiments at 360 W, 600 W and 800 W power, 2450 MHz frequency, conveyor drying trials at 1,8 m belt length,  $60 \pm 1$  °C,  $70 \pm 1$  °C and  $90 \pm 1$  °C, 0.2 m / min fixed band speed and air velocity of 1 m / s. Energy consumption increased with the increase of microwave power. The minimum energy consumption was measured as 0.015 kWh at 800 W and 60 g. The same values are observed when drying times are taken into consideration. Drying time decreased and energy consumption decreased with increasing drying temperature. The minimum energy consumption was measured as 4.1 kWh at 90° C and 20 g. The both drying systems were determined at 800 W for optimum time and energy. When the product is placed in a larger container and the surface area is enlarged, more drying can be achieved. When the results of the study were evaluated, it was found that different drying times were observed because the drying mechanisms of both driers were different and microwave drying was realized faster than conveyor drying due to the volumetric heating.

**Keywords:** Sewage sludge, Microwave drying system, Conveyor belt drying system, Energy consumption

**2020, 110 Pages**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	vi
ŞEKİL DİZİNİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	x
TEŞEKKÜR.....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR BİLGİSİ .....</b>	<b>5</b>
2.1. Arıtma Çamuru .....	8
2.2. Arıtma Çamuru Kaynakları .....	11
2.3. Arıtma Çamuru Bertaraf Yöntemleri.....	12
2.3.1. Arıtma Çamuru Yönetim Stratejisi.....	15
2.4. Arıtma Çamurlarına Uygulanan Ön İşlemler.....	17
2.4.1. Ögütme .....	17
2.4.2. Kum Ayırma .....	17
2.4.3. Karıştırma .....	17
2.4.4. Disintegrasyon .....	18
2.5. Arıtma Çamuru Şartlandırma .....	18
2.6. Arıtma Çamuru Yoğunlaştırma .....	19
2.7. Arıtma Çamuru Stabilizasyonu.....	20
2.7.1. Kimyasal ile Stabilizasyon .....	21
2.7.2. Isıl İşlem .....	23
2.7.3. Aerobik Çamur Çürütme .....	23
2.7.4. Anaerobik Çamur Çürütme.....	24
2.8. Arıtma Çamuru Susuzlaştırma ve Kurutma.....	25
2.8.1. Çamur Kurutma Yatakları .....	25
2.8.2. Mekanik Susuzlaştırma.....	26
2.8.3. Güneş Enerjili Kurutma.....	27
2.8.4. Termal Kurutma.....	28
2.9. Arıtma Çamuru Bertaraf İşlemleri.....	31
2.9.1. Kompostlaştırma.....	32

2.9.2. Termal Bertaraf.....	34
2.9.3. Araziye Uygulama.....	36
2.9.4. Düzenli Depolama.....	36
2.9.5. Lagünlerde Depolama.....	39
2.10.Konveyör Bantlı Kurutucu Sistemi.....	39
2.11.Mikrodalga Kurutma Sistemi.....	40
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>44</b>
3.1. Arıtma Çamuru Numunesi Kaynağı.....	44
3.1.1. Atık su Arıtma Tesisi.....	44
3.1.2. Numune Alım Şekli.....	45
3.1.3. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu.....	46
3.2. Deney Sistemleri.....	47
3.2.1. Konveyör Bantlı Kurutma Sistemi.....	47
3.2.2. Mikrodalga Kurutma Sistemi.....	48
3.3. Ölçüm Aletleri.....	50
3.3.1. Hassas Terazı.....	50
3.3.2. Enerji Ölçüm Cihazı.....	53
3.3.3. Etüv.....	54
3.3.4. Termal Kamera.....	54
3.4. Yöntem.....	55
3.4.1. Örneklerin Hazırlanması ve Kurutulması.....	55
3.4.2. Nem Analizi.....	57
3.4.3. Matematiksel Modelleme.....	57
3.4.4. Termal Analiz.....	59
3.4.5. Kalorifik Değer Analizi.....	60
3.4.6. Enerji Analizi.....	60
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>61</b>
4.1. Nem Değişimi Bulguları.....	61
4.2. Matematiksel Modelleme Bulguları.....	67
4.3. Termal Analiz Bulguları.....	77
4.4. Kalorifik Değer Analiz Bulguları.....	85
4.5. Enerji Analizi Bulguları.....	85
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>90</b>



<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>92</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>98</b>



## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Literatürdeki kurutma deney ve sonuçları.....	5
Çizelge 2.2. Klasik atık su arıtma sistemi çamur kaynakları.....	12
Çizelge 2.3. Yoğunlaştırma yöntemleri avantaj-dezavantajları.....	19
Çizelge 2.4. Aerobik çamur çürütme avantaj ve dezavantajları .....	24
Çizelge 2.5. Anaerobik çamur çürütme avantaj ve dezavantajları .....	24
Çizelge 2.6. Çamur kurutma yatakları avantaj ve dezavantajları .....	26
Çizelge 2.7. Mekanik susuzlaştırma çeşitleri .....	27
Çizelge 2.8. Termal kurutucular ve özellikleri.....	31
Çizelge 2.9. Arıtma çamur ısı değerleri.....	35
Çizelge 3.1. Atık su arıtma tesisi arıtma çamuru karakterizasyonu .....	46
Çizelge 3.2. Deney sonuçlarını ifade etmede kullanılan modeller .....	59
Çizelge 4.1. Mikrodalga kurutma sisteminde 60 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri.....	68
Çizelge 4.2. Mikrodalga kurutma sisteminde 40 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri.....	69
Çizelge 4.3. Mikrodalga kurutma sisteminde 20 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri.....	70
Çizelge 4.4. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 60 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri.....	73
Çizelge 4.5. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 40 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri.....	74
Çizelge 4.6. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 20 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri.....	75

## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. İZSU arıtma çamuru örneği.....	9
Şekil 2.2. Çiğli Çamur Çürütme ve Kurutma Tesisi' nde üretilen çamur örneği .....	9
Şekil 2.3. AB atık yönetim hiyerarşisi.....	13
Şekil 2.4. Başlıca arıtma çamuru bertaraf yöntemleri .....	14
Şekil 2.5. Arıtma çamuru yönetim metotları .....	15
Şekil 2.6. 2015 yılı için Türkiye'deki kişi başına ortalama çamur miktarının diğer ülkelerle karşılaştırılması.....	16
Şekil 2.7. Kireçle stabilizasyonda ön kireçleme ve son kireçlenmenin olumlu yönleri .....	22
Şekil 2.8. Güneş enerji destekle kurutulma sera.....	28
Şekil 2.9. Termal kurutma yöntemleri.....	30
Şekil 2.10. Döner tambur tipi kompost sistemi .....	33
Şekil 2.11. Tekne kompost sistemi.....	33
Şekil 2.12. Karıştırmalı yığın kompost örneği .....	33
Şekil 2.13. Statik havalandırılmalı sistemi .....	34
Şekil 2.14. Araziye uygulama emsali .....	36
Şekil 2.15. Alan tipi çamur depolama örneği .....	37
Şekil 2.16. Hendek yöntemi a) dar hendek b) geniş hendek .....	38
Şekil 2.17. Arıtma çamurlarının düzenli depolanması yöntemi örneği.....	39
Şekil 2.18. Endüstriyel konveyör bantlı kurutucu .....	40
Şekil 2.19. Elektromanyetik spektrum. ....	41
Şekil 2.20. a) Düzensiz hareket eden polar moleküller, b) Elektromanyetik alan altındaki düzenlenmiş moleküller.....	42
Şekil 2.21. Mikrodalganın su molekülüne etkisi .....	43
Şekil 3.1. Arıtma tesisi genel görünüm .....	44
Şekil 3.2. Çıkış suyu görüntüleri .....	45
Şekil 3.3. Çamur susuzlaştırma ünitesi dekantör.....	45
Şekil 3.4. Atık su arıtma tesisi çamur römork sistemi.....	46
Şekil 3.5. Konveyör kurutma sistemi (1. Elektrik Motoru, 2. Kurutma odası, 3. Kontrol Paneli, 4. Fan, 5. Isıtıcı, 6. Havalandırma delikleri ).....	48
Şekil 3.6. Mikrodalga dıştan görünüm .....	49
Şekil 3.7. Mikrodalga deney düzeneğinin genel görünüşü.....	49
Şekil 3.8. Mikrodalga Kurutma Sistemi (1: Mikrodalga Fırın, 2: Havalandırma Boşluğu, 3: Cam Kap, 4: Zamanlayıcı, 5: Magnetron, 6: Fan, 7: Bilgisayar, 8: Güç Düğmesi, 9: Hassas Terazi).....	50
Şekil 3.9. Hassas terazi.....	51

Şekil 3.10. Nem Ölçer .....	51
Şekil 3.11. Konveyör bantlı kurutucu deney sistemi.....	52
Şekil 3.12. Konveyör bantlı kurutucu deney sistemi.....	52
Şekil 3.13. Elektrikli enerji ölçüm sayacı.....	53
Şekil 3.14. Kronometre.....	53
Şekil 3.15. Etüv .....	54
Şekil 3.16. Termal görüntüleme cihazı.....	54
Şekil 3.17. Yaş arıtma çamuru örnekleri (a) 20 g, (b) 40 g ve (c) 60 g.....	55
Şekil 4.1. 360 W mikrodalga gücünde kurutulan çamurun nem değişimi .....	61
Şekil 4.2. 600 W mikrodalga gücünde kurutulan çamurun nem değişimi .....	62
Şekil 4.3. 800 W mikrodalga gücünde kurutulan çamurun nem değişimi .....	63
Şekil 4.4. 60 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun nem değişimi .....	64
Şekil 4.5. 70 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun nem değişimi .....	65
Şekil 4.6. 90 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun nem değişimi .....	66
Şekil 4.7. Mikrodalga kurutma sistemi – Log modeli (60g) .....	71
Şekil 4.8. Mikrodalga kurutma sistemi – Log modeli (40g) .....	71
Şekil 4.9. Mikrodalga kurutma sistemi – Log modeli (20g) .....	72
Şekil 4.10. Konveyör bantlı kurutma sistemi – Henderson ve Pabis modeli (60g).....	76
Şekil 4.11. Konveyör bantlı kurutma sistemi – Henderson ve Pabis modeli (40g).....	76
Şekil 4.12. Konveyör bantlı kurutma sistemi – Henderson ve Pabis modeli (20g).....	77
Şekil 4.13. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 360W altındaki termal görüntüleri (KZ: Kuruma Zamanı, dakika.) .....	79
Şekil 4.14. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 600W altındaki termal görüntüleri (KZ: Kuruma Zamanı, dakika.) .....	80
Şekil 4.15. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 800W altındaki termal görüntüleri .....	81
Şekil 4.16. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun konveyör bantlı kurutma sisteminde 60 °C altındaki termal görüntüleri .....	82
Şekil 4.17. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun konveyör bantlı kurutma sisteminde 70 °C altındaki termal görüntüleri .....	83
Şekil 4.18. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun konveyör bantlı kurutma sisteminde 90 °C altındaki termal görüntüleri .....	84
Şekil 4.19. Mikrodalga kurutma sisteminde 20 g ağırlığındaki çamurun farklı güçlerdeki enerji tüketimi.....	85
Şekil 4.20. Mikrodalga kurutma sisteminde 40 g ağırlığındaki çamurun farklı güçlerdeki enerji tüketimi.....	86
Şekil 4.21. Mikrodalga kurutma sisteminde 60 g ağırlığındaki çamurun farklı güçlerdeki enerji tüketimi.....	86

Şekil 4.22. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 60 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun enerji tüketimi.....	87
Şekil 4.23. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 70 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun enerji tüketimi.....	87
Şekil 4.24. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 90 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun enerji tüketimi.....	88



## **SİMGELER VE KISALTMALAR**

ÇŞB	: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
İZSU	: İzmir Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
LOG	: Logaritmik
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
AKM	: Askıda Katı Madde
SCADA	: Merkezi Denetim ve Veri Toplama
DOC	: Çözülmüş Organik Karbon
TDS	: Toplam Çözünen Katı
BTEX	: Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen
LOI	: Kızdırma Kaybı
TOC	: Toplam Organik Karbon
PCBs	: Poliklorlubifeniller
y <sub>b</sub>	: Yaş Baz
W	: Watt
kW	: Kilowatt
Km/En-Gün	: Özgül Çamur Üretimi
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
PCBS	: Poliklorlanmış Bifeniller
PAHS	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar

## TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen baŐta babam olmak üzere tüm aileme, arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans çalışmalarım boyunca benden hiçbir şekilde bilgilerini ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE ve eş danışmanım Doç. Dr. Soner ÇELEN' e teşekkür ederim.

Aralık, 2019

Tuğçe EKİCİ  
Çevre Mühendisi



## 1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun her geçen gün artması doğaya atılan atıkların artışını doğurmaktadır. Yeryüzünde görülen kirlilik seviyesindeki artışın önüne geçebilmek için insanoğlu çeşitli önlemler almaktadır. Alınan bu önemlerden birisi de atık su arıtma tesisleridir. Bu tesisler sayesinde kirlenmiş sular çeşitli proseslerden geçirildikten sonra zararsız olarak doğaya deşarj edilmektedir. Ancak, söz konusu arıtmadan sonra bakiye atık olarak çamur oluşmakta ve bu madde arıtma çamuru olarak adlandırılmaktadır.

Nüfus artışına paralel olarak atık su arıtma tesis sayısı hızla artmakta bu da arıtma çamuru miktarlarında büyük artış gözlemlenmesine sebep olmaktadır. Arıtma çamurları içeriği bakımından ağır metaller, patojen bakteriler, virüsler ve toksik kimyasallarca zengindir. Her yıl tonlarca üretilen arıtma çamurlarını insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırmak amacıyla çeşitli arıtma yöntemleri uygulanmaktadır. Sürdürülebilir çevre yönetiminde, arıtma çamurlarının verimli ve faydalı bir şekilde kullanılabilmesi için yeni bertaraf yöntemleri geliştirme ihtiyacı doğmuştur.

Türkiye’de her yıl yaklaşık 1,38 milyon ton arıtma çamuru üretilmektedir (Uzun ve Bilgili, 2011). TÜİK 2018 yılı verilerine göre, 82.003.882 nüfuslu ülkemizde 16 Büyükşehir Belediyesi, 1399 Belediye bulunmaktadır. Bu yerleşimlerde kanalizasyon hizmeti verilen nüfus oranı %91’dir. 2018 yılı itibariyle şebekeden alıcı ortama deşarj edilen 4.795.130 bin m<sup>3</sup> atık suyun %88,35’i arıtılmıştır. 2018 yılı TÜİK verileri hesaba katılarak atık su arıtma tesisleri ile hizmet verilen nüfusun toplam nüfusa oranı %79’dur. Kişi başı 60 g katı madde/gün miktarı kabul edilerek, evsel/kentsel kaynaklı günlük 3.361.008 ton arıtma çamuru üretildiği yılda ise 1.226.767.920 milyar ton arıtma çamuru üretildiği tahmin edilmektedir. Söz konusu bu arıtma çamurlarının çoğu belediyelerin işlettiği katı atık depolama sahalarına bertarafı kolay, ucuz bir yöntem olarak görüldüğü için gönderilmektedir. Evsel arıtma çamurunda bulunan zengin içerikli besi maddeleri, ısıl değeri vb. hususiyetleri göz önünde bulundurulduğunda faydalı kullanım alternatifleri olan bir hammaddedir (Anonim, 2015). Arıtma çamurlarının depolama sahalarına gönderilmeleri, hem alternatif hammadde olarak kullanılmalarının önüne geçmekte hem de zaten kısıtlı yere sahip olan depolama sahalarının kapasitelerinin erken dolmasına yol açmaktadır. Isıl ve besi değeri olan bu maddeyi doğru ve düzgün şekilde kullanarak ülke ekonomisine maksimum faydayı vermek gerekmektedir.



Atık su arıtımında karşılaşılan en büyük maliyet kalemi arıtım sonucu oluşan çamurların yönetimidir. Arıtma prosesleri sonunda çıkan arıtma çamuru içinde %0,25-12 oranında katı madde bulunan kalanı ise sıvı içeriğe sahip bir maddedir (Uzun ve Bilgili, 2011). Çamurun hacminin ve ağırlığının azaltılması; söz konusu atıkların toplanması, biriktirilmesi, geçici ve ara depolanması, taşınması ve nihai bertarafında ekonomik ve teknik açıdan olumlu etkiler sunmanın yanı sıra çamurun kurutulması ile başlangıç aşamasındaki nem içeriği %70 civarında azalış göstermekte bu da nakliye ve bertaraf maliyetlerinde düşüş görülmesine neden olmaktadır (Mawioo ve diğ., 2016). Her geçen gün arıtma çamurlarını kurutmak amacıyla çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek aynı zamanda düşük ekonomik maliyet ile çalışacak yeni sistemler üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bulunan yöntemlerle, atıkların deponi sahalarında gereksiz yer işgal etmeleri ya da yakma tesislerinde emisyonla sebep olarak küresel iklim değişikliğine neden olmaları da amaçlanmaktadır.

Avrupa Birliği uyum süreci çerçevesinde çevre mevzuatında birtakım yeniliklere gidilmiş, kanun ve yönetmelikler Avrupa Birliği kriterlerine uygun olarak düzenlenmiştir. Özellikle arıtma çamurlarının yönetimi yapılan bu düzenlemelerde Çevre Kanunu, 2012 (a), (b), (c), (d) ciddi bir yere sahiptir.

Arıtma çamurunun hacimsel ve kütleli olarak azaltılması uygulanacak olan bertaraf sistemi çeşitliliği, maliyetlerde azalmaya sebep olması atığın doğru yönetimi bakımından kilit önem arz etmektedir. Arıtma çamurunun en etkin biçimde arıtılabilmesi için yönetim sistemi içinde değerlendirilip bütünsel bir yaklaşımla, düşük maliyetli alternatiflerle eş zamanlı olarak halk sağlığı ve çevre güvenliği unsurlarının da bir arada bulunduğu yeknesak bir yapının kurulması gerekmektedir. Arıtma çamuru arıtım sistemlerinin seçimi ya da nihai bertarafında tarımda kullanım, yakma ya da depolama alternatifleri değerlendirilirken konu bir bütün olarak ele alınmalı, çamur özellikleri, ülke koşulları, ülkenin ekonomisi, bunun yanında da söz konusu bölgeye has koşullar değerlendirilerek seçimler yapılmalıdır (Anonim, 2015). Kuru çamur içeriği (evsel) itibarıyla gübre olarak tarımda kullanılabilir. Ayrıca çamur kuruyunca kalorifik değeri artmaktadır bu nedenle iyi bir alternatif enerji kaynağı olarak da değerlendirilebilir.

Arıtma çamurlarının alıcı ortama deşarj edilebilmeleri için öncelikle stabilize olmaları; patojen ve organik madde içeriği azaltılmış kokusu giderilmiş hale getirilmeleri gerekmektedir. Başlıca çamur stabilizasyon yöntemleri; anaerobik çürütme, aerobik çürütme, kireç ile stabilizasyon, kompostlama ve kurutmadır. Arıtma çamuru içinde bulunan su

buharlaştırılarak çamurun hem hacimsel/ağırlıksal azalması sağlanmış olunmakta hem de içinde bulunan patojenlerin giderimi sağlanmaktadır. Kurutma esnasında iki ayrı işlem gerçekleşir; ilkinde yüzey nemi buharlaştırmak için çevre ortamdan enerji aktarılır. Burada su, katı yüzeyinden sıcaklık, hava nem akışı ve basınç koşullarına göre uzaklaşmaktadır. İkincisinde çamur içindeki nemin buharlaşmayı takiben yüzeye aktarılır. Nemin katı içinden uzaklaşması fiziksel yapıya, sıcaklığına ve ilk nem oranına bağlıdır. Kurutma işlemi fiziko-kimyasal dönüşümlerin bir arada yaşandığı eş zamanlı ısı ve kütle transferinin meydana geldiği karmaşık bir işlemdir. Mekanik kurutma, güneş enerjili kurutma ve termal kurutma uygulanan çamur kurutma tekniklerindedir. Ayrıca buharlaşma ve süzülme de kullanılan doğal kurutma yöntemlerindedir.

Genel itibariyle termal çamur kurutucu yöntemler ısının kurutulacak çamura aktarım yöntemine göre kategorize edilmiş olup konveksiyonu (direkt), kondüksiyonlu (endirekt) ve ışınlama (kızılötesi, radyal veya mikrodalga ısıtmalı) şeklindedir. Konveksiyonlu kurutma yönteminin başlıca örnekleri; döner kurutucu, akışkan yataklı kurutucu, flaş kurutuculardır. İşlem öncesinde çamur sıklıkla mekanik susuzlaştırma işlemine tabi tutulur. Ayrıca topaklaşmanın önüne geçebilmek için bir miktar ham çamur ile karıştırılır sonra termal kurutma yöntemlerine tabi tutulur. Çalışma prensipleri ise; sıcak gazın çamurun içine girip suyun buharlaşmasını sağlar. En direkt kurutma yönteminde ise çamurun sıcak yüzeylerle teması sonucunda içindeki suyun buharlaşması yoluyla kurutulması üzerinedir. Başlıca örnekleri; disk tipi, yatay paletli, burgulu, dikey kondüksiyonlu kurutuculardır. Işınlama kurutmada ise yapılan ısıtma metoduna göre ısı aktarımı; elektriksel direnç elemanları, gaz yakıtlı akkor refraktörler veya kızılötesi lambalar aracılığıyla gerçekleştirilir. En yaygın kullanım tipi çok hücreli yakma (Öztürk, Çallı, Arıkan ve Altınbaş, 2005).

Endüstriyel kurutucuların %85' i konveksiyon tiplidir. Fakat kondüksiyonlu kurutucular daha yüksek verimli daha ekonomik ve çevresel olarak daha avantajlıdır (Tınmaz Köse, 2019). Artan enerji maliyetleri, yerine getirilmesi gereken yasal standartlar ve güvenli çalışma koşulları oluşturulması gerekliliği yüzünden sadece kurutucu yöntem seçimi değil tesis tasarımı da önemli hale gelmektedir. Tercih edilecek çamur kurutma yöntemi; tesis büyüklüğüne, işlenen atığın muhteviyatına, sahip olunan fiziksel ve ekonomik kapasiteye bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada evsel atık su arıtma tesisinden alınan çamur üzerinde farklı termal kurutma yöntemleri (mikrodalga ve konveyör bantlı kurutucular) uygulanarak incelenmiştir.

Mikrodalga fırınlarda yapılan işlemlerde maddelerin içlerindeki su moleküllerini harekete geçirerek ısınmanın gerçekleşmesi ve bu esnada suyun kısa sürede buharlaşması fark edildiğinden beri mikrodalgalı kurutma üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Çelen, 2010). Bu yöntemin diğer sistemlerin üzerindeki avantajı söz konusu enerjinin direkt kurutulacak olan maddenin üzerinde olması sonucunda düşük enerji ihtiyacı oluşmasıdır (Çalışkan, 2002)

Çalışmada kullanılacak olan evsel atık su arıtma çamuru numune alma şartlarına göre alınıp ilk safhada, arıtma çamurunun karakterizasyonu belirlenmiş, sonraki safhalarda iki farklı termal kurutma yönetimi olan konveyör bantlı kurutma sistemi ve mikrodalga yöntemleri ile numunelerin ilk ve son nem içeriği ölçümlenerek, harcanan güç miktarı ve termal görüntüleme yöntemi ile numunelerin sıcaklık değişimleri ölçümlenmiş ayrıca arıtma çamurunun kalorifik değeri incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında kentsel atık su arıtma çamuru mikrodalga, konveyör bantlı sistem ile kurutulmuş ve elde edilen sonuçlar farklı modellere göre değerlendirilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde evsel atık su arıtma çamurunun kurutulması için mikrodalga ve konveyör bantlı kurutma yöntemlerinin pek çok araştırmacı tarafından çalışıldığı gözlemlenmiştir. Ancak, literatürde her iki kurutma yönteminin karşılaştırmalı olarak ele alındığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma her iki yöntemin karşılaştırmalı olarak ele alınabileceği tek çalışma olması nedeniyle özgün bir çalışmadır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Kurutma deneyleri ve sonuçlarına ilişkin literatür taramasındaki bilgiler Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1. Literatürdeki *kurutma deney ve sonuçları*

Materyal	Kullanım alanı	Yöntem	Sonuç/Değerlendirme	Kaynak
Asma Yaprağı	Uzun süreli saklama amaçlı	<p>% 75,35 (<math>\pm 0.02</math>) başlangıç nem oranına sahip farklı mikrodalga güç yoğunluk seviyelerinde % 9,13 (<math>\pm 0.12</math>) nem seviyesine kadar 210-270 s süreyle kurutulmuşlardır.</p> <p>Midilli et al eşitliğinden türetilmiş olan ve Alibas yaklaşımı en iyi model olarak seçilmiştir.</p>	<p>Kurutma işlemi sonucunda renk ve askorbit asit değeri bakımından taze yaprakla karşılaştırılmış ve en yakın değerin 15 W g-1 güç yoğunluğundaki mikrodalga kurutma işlemi olduğu tespit edilmiştir.</p>	Alibaş2012
Üzüm	Uzun süreli saklama amaçlı	<p>Etil oleat ve potasyum karbonat içeren çözelti kullanılarak, haşlanarak ön işlemden geçirilen üzümler, 25 W/g güç oranı ve 60°C sıcaklığında ortalama 1,8 m/s hızındaki hava ile mikrodalga yardımcı konvektif kurutucuda kurutulmuşlardır.</p>	<p>İnce tabaka modelleriyle hesaplanan nem kaybı modele dahil edilmiştir.</p> <p>Elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.</p>	Bingöl ve Devres, 2010
Mango	Uzun süreli saklama amaçlı	<p>İlk nem içeriği %89,23<math>\pm</math>0.45 olan 100 g mango dilimleri 1000, 750, 500 ve 90 W mikrodalga gücünde ve 50°C sıcaklığında sıcak havayla kurutma yöntemi ile nem içeriği %12,75<math>\pm</math>0.17 oluncaya dek kurutulmuştur. Kurutma işlemleri 7.5, 12, 18.5 ve 111 dakika; 50°C sıcaklık</p>	<p>Mikrodalga kurutma deney sonuçlarına göre en uygun modelin Jena &amp; Das olduğu belirlenmiştir.</p> <p>Her iki kurutma sisteminde 750 W ve 50 derece şartlarında en uygun modelin Alibas modeli olduğu bulunmuştur.</p>	Alibaş, 2015

		seviyesinde ise 255 dakika sürmüştür. 13 farklı ince tabaka kurutma modeli ile modellenmiştir	Tazeye en yakın renk değeri 500W ve 750 W altında mikrodalga sisteminde elde edilmiştir.	
Patates	Uzun süreli saklama amaçlı	5mm dilimindeki patatesin mikrodalga bantlı kurutucuda mikrodalga gücünün (1500W ve 2100W) ve bant hızının (0,175, 0,210 ve 0,245 m/dak) kurutma zamanı, renk değişimi ve enerji tüketimine etkisi ve en uygun model araştırıldı	Elde edilen sonuçlara göre mikrodalga gücünün artması ve bant hızının azalması ile enerji tüketimi azalmıştır.  Tüm kurutma şartları için Page modelin en uygun model olduğu belirlenmiştir. Kurutma süresince en az enerji 0,175 m/dak ve 2100W gücünde belirlenmiştir.	Çelen ve ark., 2015
Hidrokarbon kesme çamuru	Hidrokarbon kesme çamurunun kurutulması	Hidrokarbon sondaj çamurunun kurutma deneyleri; 50, 100 ve 150 g'lık numuneler mikrodalga kurutucu kullanılarak 120, 460 ve 600 W MW güç seviyelerinde ve konvansiyonel sistem kullanılarak 140 ° C ve 180 ° C sıcaklıklarında gerçekleştirildi.	Yapılan deney sonuçlarına göre; mikrodalga kurutma işlemi, daha hızlı, etkin ve az enerji kullanılarak gerçekleştirildiği bulunmuştur. En uygun kurutma modelinin Logaritmik ve Page modelleri olduğu tespit edilmiştir.	Köse, 2019
Evsel atık su arıtma çamuru	Çamur susuzlaştırma	Çamurun hangi seviyelerde suyunu kaybettiğini değerlendirmek amacıyla kılcal emme süresiyle filtrasyondaki spesifik direnç araştırılmıştır. Çamurun parçalanmasında gözlenen değişiklikler, çözünür kimyasal oksijen ihtiyacı, hücre dışı polimerik madde içeriği ve çamur parçacık büyüklüğü kullanılarak belirlendi.	Sonuçlar; kısa süreli mikrodalga kurutması ile çamur çürütülebilirliğini bir miktar artırabildiğini, uzun süreli uygulamayla ise çamurun önemli ölçüde bozulabildiğini göstermiştir.  Tespit edilen en uygun kurutma koşullarının 900 W ve 60 s olduğu, maksimum parçalanmanın %1,5-2 oranında, hücre dışı polimerik madde içeriğinin en uygun olduğu değerin 1500-2000 mg / l ve partikül	Yu, Lei, Yu, Feng, Li ve Wu, 2009

			büyükliklerinin 120 olduğu belirlenmiştir.	
Evsel atık su arıtma çamuru	Farklı kurutma koşullarında nem difüzyon hızının belirlenmesi	Farklı kurutma koşullarında nem difüzyon hızının belirlenmesi ile atık su çamurunun mikrodalgada kurutulmasının matematiksel olarak modellenmesini araştırmıştır.	Sonuçlarda kurutma hızının başlangıçtaki kütle artışı ile azaldığı görülmektedir. Kurutma hızına benzer şekilde, difüzyon katsayısı da güç seviyesi ile doğru orantılı ve başlangıç kütlesi ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.  Arrhenius ilişkisi, difüzyon katsayısı ile açıklanmıştır.	Bennamoun, Chen ve Afzal, 2016
Fosseptik çamuru	Çamur susuzlaştırma, patojen azaltılması	Fosseptik kullanılan tuvaletlerdeki çamuru işlemek için laboratuvar ölçekli bir mikrodalga ünitesi uygulanmıştır. Söz konusu çamur, farklı güç seviyelerinde ve çeşitli sürelerde mikrodalga kullanılarak kurutulmuştur. Çamur hacmi ve patojen azalması gibi değişkenler gözlemlendi.	Sonuç olarak mikrodalga sistemi ile kurutmanın çamur hacmini %70 oranının üzerinde azalmaya sebep olduğu, patojenik içeriklerin ise analitik saptama seviyesinin altına düştüğü görülmüştür.  Ayrıca hızlı arıtımın gerektiği durumlarda veya acil durum koşullarında söz konusu sistemin alternatif olarak değerlendirilebileceği ve üzerinde çalışılması gereken bir konu olduğu tespit edilmiştir.	Mawioo ve diğ., 2016
Silika çamuru	Çamur susuzlaştırma	Islak silika çamuru 1 kW, 2,45 GHz mikrodalgada 10-1000 g çamur kütleleri, 400-1000 W güç altında kurutulmuştur.	Yapılan deney sonucunda elde edilen sonuçlar ve teri arasında ciddi bir uyum tespit edilmiştir. Kuruma performansı olarak en uygun değer 1000 g ve 800 W olduğu sonucuna varılmıştır.	Idris, Khalid ve Omar, 2004

Hidroksit tortu çamuru	Hidroksit tortu çamurunun detoksifikasyonu	<p>Baskılı devre kartlarının (PCB) imalatında elektrokaplama ve dağlama işleminde kullanılan büyük miktarda yıkama suyu, yüksek düzeyde ağır metal iyonları (Cu, Zn, Ni, Cr, Pb) içerir. Potansiyel olarak bu toksik iyonlar, yıkama suyu atık suyundan bir polielektrolit flokülasyon ve hidroksit çökeltme işlemiyle çıkarılır; bu sırada metal iyonları ve polimerleri açısından zengin bir hidroksit tortu çamuru oluşur. Bu tortu çamuru, bileşim, ince parçacık boyutu dağılımı, yüksek spesifik yüzey alanı ve kuruduktan sonra topaklanma eğilimi bakımından bazı benzersiz özelliklere ve özelliklere sahiptir.</p> <p>Bu çalışma ile çökelti katıları içerisinde mikrodalga ısıtma, kurutma ve metal iyonu immobilizasyonu yoluyla tortu çamurunun detoksifikasyonu için mikrodalga radyasyonunu kullanan doğada keşif amaçlı deneysel bir araştırmayı açıklamaktadır. Sediman katıları içindeki metal iyonlarının mikrodalga destekli bağlanması ve hareketsizleştirilmesinin etkinliği, daha geleneksel konvektif ısıtma ve kurutma işlemlerine kıyasla mikrodalga enerji verimliliğinin bir değerlendirmesi ile birlikte incelenmiştir.</p>	<p>Yeterli miktarda mikrodalga radyasyonu göz önüne alındığında, Cu<sup>2+</sup> ve Pb<sup>2+</sup> giderimleri, 12 haftalık bir süre boyunca, sırasıyla % 2700 ve % 1080 azaltıldı. Deney ölçeğindeki geleneksel ısı konveksiyonuyla karşılaştırma, mikrodalga kurutmanın kurutma oranı ve enerji tüketimi açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.</p> <p>Mikrodalga ve sıcak hava ısı konveksiyonu kombinasyonu, daha yüksek enerji tüketimini gerektirse de en hızlı kurutma oranını verdi. Büyük ölçekli çalışmalarda enerji kullanımının, birleşik ısı konveksiyonu ve mikrodalga işlemi ile daha verimli olabileceğini göstermektedir.</p>	Quan, 2000
------------------------	--	--	--	------------

## 2.1. Arıtma Çamuru

Atık suyun arıtma tesislerinde temizlenmesi işleminin sonunda atık bir malzeme olan arıtma çamuru oluşmaktadır. Arıtma çamuru, atık su arıtımı sonucu oluşan sıvı ya da yarı katı halde, kokulu, uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça %0,25-12 katı madde içeren bir çeşit katı atıktır (Uzun ve Bilgili, 2011). Oluşacak olan arıtma çamurunun miktarı içinde bulunulan arıtma tesisinde uygulanan proses ve yöntemlere, tesisin içinde bulunduğu lokasyona ve hizmet verdiği kesime (kentsel, kırsal nüfus, endüstri veya sanayi vb.) bağlı olarak değişebilmekte hatta aynı tesise giren atık suyun karakterindeki değişimlerden ve uygulanan arıtma proseslerindeki değişikliklerden ötürü çamurun içeriğinde de günlük, haftalık veya mevsimsel farklılık göstermektedir (Ünlü ve Tunç, 2007).

Genel anlamda arıtma çamuru muhteviyatı %1-95 arasında değişen su, azot, toksik olmayan organik karbon bileşikleri, fosforlu bileşikler, toksik kirleticiler, patojenler ve diğer mikrobiyolojik kirleticiler; silikat, alüminat, kalsiyum gibi inorganik bileşikler ve magnezyumlu bileşiklerden oluşmaktadır (Rulkens, 2004). Arıtma çamuru içeriğinde sıklıkla rastlanan ağır metaller, toksik kirleticiler ve patojen ve diğer mikrobiyolojik kirleticiler; Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, Hg ve As gibi ağır metaller, PCBS (poliklorlanmış bifeniller), PAHS (polisiklik aromatik hidrokarbonlar), dioksin, pestisit, lineer alkali sülfonatlar, fenoller gibi kimyasallar, kriptosporidium, Giardia, helmint yumurtaları ve virüs gibi patojenleri şeklindedir (Wen-Hong ve diğ. 2011).

Arıtma çamurları içeriğindeki patojenik ve diğer mikrobiyolojik kirleticiler, organik kirletici maddeler yüzünden kokuşma ve hastalık yayma eğilimindedir. Bundan dolayı arıtma çamurlarının bertarafı oldukça önemli ve üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir konudur. Arıtma çamurlarının etkin bir şekilde işlenmesi halinde elde edilen maddeler toprak şartlandırıcısı olarak, ek yakıt olarak, peyzaj materyali olarak, biyogaz eldesinde ara malzeme olarak kullanılabilir.





Şekil 2.1. İZSU arıtma çamuru örneği Anonim, (2016)



Şekil 2.2. Çiğli Çamur Çürütme ve Kurutma Tesisi' nde üretilen çamur örneği Anonim, (2016a)

Halihazırda yürürlükte bulunan arıtma çamur yönetimi ile ilgili mevzuatlar; Kentsel Atık suların Arıtımı Yönetmeliği (ÇŞB, 2006), Atık Yönetimi Yönetmeliği (ÇŞB, 2015), Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (ÇŞB, 2010), Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ÇŞB, 2010), Atık Su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (ÇŞB, 2010) şeklindedir.

Atık Yönetimi Yönetmeliği (ÇŞB, 2015); 02.04.2015 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Atıkların ekolojik sisteme ve insan sağlığına menfi etkileri olmadan yönetilmesinin nasıl olması gerektiğine dair açıklamalar içermektedir. Bu kapsamda atıkların tehlikeliliklerinin bilinmesi için 20 grupta ayrıntılı bir atık listesi oluşturulmuştur.

Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmeliğine (ÇŞB, 2010) göre hiçbir işleme tabi tutulmamış arıtma çamurunun toprakta kesinlikle kullanılmamalıdır. Ayrıca stabilizasyon işlemi gibi bazı işlemlere tabi tutulması sonrasında da toprağa verilmesinde bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Stabilize arıtma çamurunun kullanımı doğal orman alanlarında, meyve ağaçlarında mümkün iken çiğ sebze meyve üretimini yapıldığı toprak alanlarında kesinlikle yasaktır. Buna ilaveten içme suyu havzaları ve kullanma sularının temin edildiği noktaların (yeraltı yüzeysel kaynaklar) en az 300 m uzağına yapılmalıdır. Hayvan otlama alanlarında ya da hayvan yeminin ekili olduğu alanlarda en az 4 hafta önce arıtma çamuru uygulmasının yapılmış olması gerekmektedir. Tüm bunlara ek olarak eğer uygulama yapılacak toprağın pH değeri 6'dan düşük olması, organik madde içeriğinin %5 'den fazla olması, taban su seviyesi 1 m' nin altında olması veya eğimi %12' yi geçmesi, toprağın kumlu tekstürlü olması durumlarında arıtma çamurunun kullanımı yasaktır.

1,000,000 ve üzeri nüfus kapasitesine sahip atık su arıtma tesislerinden çıkan çamurların en az %90 katı madde içeriğine sahip olması gerekmekte, fakat teknik ve ekonomik nedenlerle bunun imkansız olduğu ispatlanırsa bu koşulun sağlanması gerekmez.

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ÇŞB, 2010); kapsamına giren atıklar tehlikesiz atıklar kategorisine girmeli ve %30 oranında kuru madde ihtiva etmelidir.

Kentsel Atık suların Arıtımı Yönetmeliği (ÇŞB, 2006); evsel atık su arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamuru bu yönetmeliğe göre uygun koşullar altında yeniden kullanılabilir. Arıtma çamurlarının çeşitli aşamalardan geçirilip geri kazanılması ve

bertarafı ile ilgili Atık su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Madde 17' deki zikredilen unsurlar dikkate alınmalı, toprakta kullanımı içinse evsel ve kentsel Arıtma çamurlarını toprakta kullanılmasına dair yönetmelik hükümleri uygulanmalıdır.

Atık Su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (ÇŞB, 2010); evlerden çıkan atık suların arıtılması ile ilgili uygun arıtma metodu ve kullanılacak ekipmanların seçimi, arıtma sularının dezenfeksiyonu, tekrar sisteme verilmesi ve bu faaliyetler sonucu çıkan arıtma çamurunun yönetilmesi için gerekli bilgileri hesaplamaları içermektedir.

## **2.2. Arıtma Çamuru Kaynakları**

Arıtma çamurları atık su arıtma tesislerinin farklı arıtım proseslerinden kaynaklanmaktadır. Bu kaynaklarda arıtma yöntemine, atık suyun kaynağına ve işletme metoduna göre değişiklik göstermektedir. Genel itibariyle arıtma çamurlarının kaynakları Tablo 1'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Klasik atık su arıtma sistemi çamur kaynakları (Metcalf ve Eddy, 2003)

Temel İşlem ve Prosesler	Atık Çeşidi	Açıklama
•Elekt	•Kaba Katılar	•Kaba katılar mekanik olarak veya çubuk ızgaralardan elle toplanarak atılır.
•Kum Tutucu	•Kum ve Köpük	•Köpük giderme, işlemi kum tutucularda kum ile birlikte gerçekleştirilir.
•Ön Havalandırma	•Kum ve Köpük	•Bazı sistemlerde ön havalandırma tankında köpük giderici yoktur, kum tutucunun bulunmaması tankta kum birikimine sebep olabilir.
•Birincil (ön) Çökeltim	•Birincil Çamur ve Köpük	•Çamur ve köpük miktarı toplama sistemine ve giren atık suyun özelliklerine göre değişir.
•Biyolojik Arıtma	•Askıda Katı Maddeler	•Askıda katı madde biyolojik arıtma sonucu oluşur. Arıtma sisteminde oluşan fazla çamuru yoğunlaştırmak gerekebilir.
•İkincil (son) Çökeltim	•Biyolojik Çamur ve Köpük	•EPA'ya göre köpük sınırları şart koşulmuştur.
•Çamur İşleme Birimleri	•Çamur, Kompost ve Kül	•Son ürünün özelliği, kullanılan proses ve işletme ile çamur özelliklerine bağlıdır. Bu konudaki yasal düzenlemeler giderek ağırlaşmaktadır.

### 2.3. Arıtma Çamuru Bertaraf Yöntemleri

Arıtma prosesinin ilk aşamalarındaki işlemlerde prosesin cinsine bağlı olarak (kimyasal, biyolojik ve basit çöktürmede) her bir işlem cinsinde farklı nitelik ve nicelikte çamur oluşumu gerçekleşir. Bu çamur arıtma tesisinden alınıp işlenerek düzgün bir şekilde bertaraf edilmelidir. Atık su arıtma tesisi dizayn aşamasındayken etkin bir çamur yönetimi yapılabilmesi amacıyla gerekli projelendirmenin önceden yapılması gerekmektedir. Arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurların en uygun bertaraf yöntemleri seçilerek işlenmesi arıtılan suyun karakterizasyonuna, uygulanan arıtma yöntemlerine ve kimyasallara, yönetmeliklere vb. unsurlara endekslidir. Arıtma çamurlarının yönetimi oldukça maliyetlidir, öyle ki söz konusu maliyet toplam atık su arıtma bedelinin %50-60 kadarını oluşturmaktadır (Chen, Afzal ve Salema, 2014).

Bu nedenle atık yönetim hiyerarşisi atıktan olabildiğince az etkilenmek konusunda kilit görevdedir.



Şekil 2.3. AB atık yönetim hiyerarşisi

Atık su arıtma tesis projelerinde çamur bertarafının yönetim sistemi çerçevesinden ele alınması maliyet ve işletim verimliliği açısından ciddi önem arz etmekte olduğundan AB direktifleri ışığında olasılıklar en iyi biçimde değerlendirilmelidir.

Arıtma çamurları kaynaklarına göre üçe ayrılır. Arıtma çamuru birincil, ikincil veya ileri (üçüncül) düzeyde arıtım proseslerinden oluşmaktadır. Birincil arıtmadan çıkan çamur ham atık su içindeki yerçekimi ile çökebilir katıları, ikincil arıtmadan çıkan çamur yerçekimi ile çökebilir katılar ve biyolojik içerikli katıları ihtiva eder. İleri arıtmadan çıkan çamur biyolojik arıtmadan çıkmasına karşın içinde dirençli virüs, bakteri, patojenleri barındıran, ağır metaller, azot ve fosfor içeren bir yapıya sahiptir.

Başlıca çamur bertaraf yöntemleri Şekil 2.4' de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Başlıca arıtma çamuru bertaraf yöntemleri (Öztürk, Çallı, Arıkan ve Altınbaş, 2015)

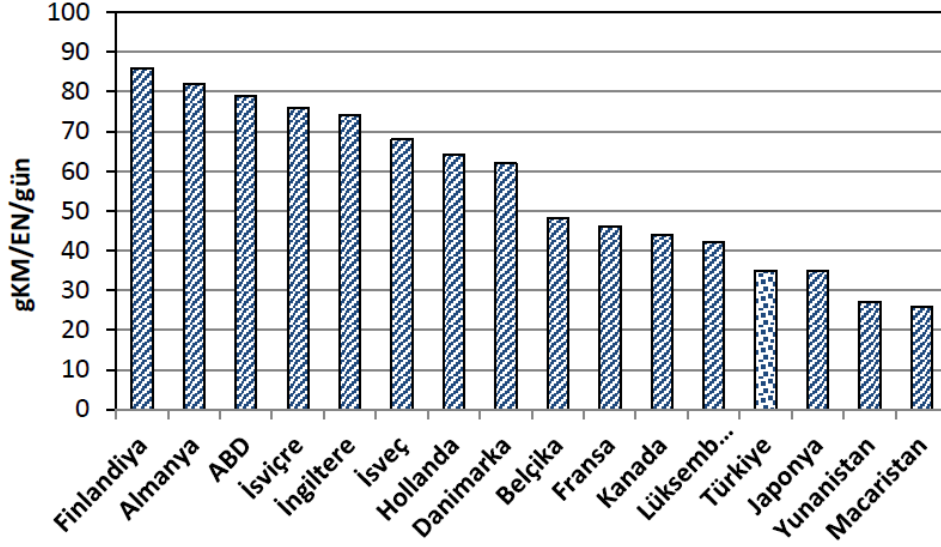


Şekil 2.5. Arıtma çamuru yönetim metotları (Öztürk vd., 2015)

### 2.3.1. Arıtma Çamuru Yönetim Stratejisi

Dünya genelinde üretilen arıtma çamurlarının miktarları ve bertaraf yöntemleri değişkenlik göstermekte olup, ülkelere göre değişkenlik gösteren arıtma çamuru miktarları Şekil 2.6' deki gibidir.





Şekil 2.6. 2015 yılı için Türkiye’deki kişi başına ortalama çamur miktarının diğer ülkelerle karşılaştırılması (Anonim, 2015)

Türkiye genelinde son yıllarda yapılan anket sonuçlarına bir kişinin günlük ortalama çamur üretme kapasitesi Şekil 2.6’ da görüldüğü üzere 35 g KM/EN-gün’ dür. Diğer ülkelerle karşılaştırıldığında ülkemiz Macaristan, Yunanistan ve Japonya’dan sonra en az arıtma çamuru üreten ülkeler arasındadır. Ayrıca Finlandiya en çok arıtma çamuru üreten ülkedir.

Arıtma çamurları etkin bir şekilde işlenmesi halinde peyzaj malzemesi olarak, toprak iyileştirici olarak, düzenli depolama sahalarında günlük örtü toprağı olarak, yüksek kalorifik değeri yüzünden biyoyakıt olarak kullanılabilir. 1998 yılı itibariyle yılda  $6,9 \times 10^6$  ton üretilmekte, %60’ ı arazide uygulamada kompost vb., %40’ ı ise yakma, düzenli depolama benzeri şekillerde bertaraf edilmektedir. Türkiye’de ise TÜİK 2010 yılı verilerinde göre  $1 \times 10^6$  ton/yıl arıtma çamuru üretilmekte, %63’ ü atık depolama sahalarında, %15’ i kompostlaştırma, araziye uygulama ya da ek yakıt olarak çimento fabrikalarına gönderilmekte kalan %22’ si ise diğer yöntemlerle bertaraf edilmektedir (Anonim, 2015)

Türkiye’de her yıl yaklaşık 1.38 milyon ton arıtma çamuru üretilmektedir (Uzun ve Bilgili, 2011). TÜİK 2018 yılı verilerine göre, 82.003.882 nüfuslu ülkemizde 16 Büyükşehir Belediyesi, 1399 Belediye bulunmaktadır. Bu yerleşimlerde kanalizasyon hizmeti verilen nüfus oranı %91’ dir. 2018 yılı itibariyle şebekeden alıcı ortama deşarj edilen 4.795.130 Bin m<sup>3</sup> atık suyun %88.35’ i arıtılmıştır. 2018 yılı TÜİK verileri dikkate alınarak atık su arıtma tesisleri ile hizmet verilen nüfusun toplam nüfusa oranı %79’ dur. Kişi başı 60 g katı



madde/gün miktarı kabul edilerek, evsel/kentsel kaynaklı günlük 3.361.008 ton arıtma çamuru üretildiği yılda ise 1.226.767.920 milyar ton arıtma çamuru üretildiği tahmin edilmektedir. Üretilen bu çamurlar düşük maliyetinden ve işletme kolaylığından dolayı katı atık depolama sahalarında bertaraf edilmektedir.

Son yıllarda Avrupa Birliği uyum sürecinde benimsenen yasal mevzuatlar küresel ısınmanın etkilerinin artık daha net hissedilmesiyle beraber suyun önemi daha iyi anlaşılmış ve atık su arıtım sistemleri gelişmiş ve uygulamaları artmıştır. Bu nedenle son yıllarda üretilen arıtma çamurlarında ciddi artışlar görülmektedir.

## **2.4. Arıtma Çamurlarına Uygulanan Ön İşlemler**

Nihai arıtımı esnasında işlemi kolaylaştırmak amacıyla uygulanır. Başlıca ön işlemler; öğütme, kum ayırma, karıştırma, disintegrasyon ve depolama işlemleridir. Bu işlemler sayesinde çamur homojen ve sabit bir yapıya kavuşur.

### **2.4.1. Öğütme**

Çamurun içindeki iri parçaları ufalayıp dönen parçalara yaşanabilecek takılmaları ve tıkanmaların önüne geçilebilmesi için öğütme işlemi yapılır. Fakat öğütücüler yapılan işlemin zorlu olmasından dolayı özel ihtimam gerektiren makinalardır.

Başlıca öğütme gerektiren prosesler; santrifüj ile ayırma, bant filtre ile susuzlaştırma, mono pompayla ayırma ısıtma ve klorla oksidasyon işlemleridir (Metcalf ve Eddy, 2003)

### **2.4.2. Kum Ayırma**

Kum ayırma işlemleri, kum tutucuların çalışmadığı ya da yetemediği durumlarda birincil çökeltim tanklarının önüne yerleştirilir. En başarılı kum ayırma şekli santrifüjdür ve etkin bir kum ayırma işlemi olabilmesi için çamurun sulu olması gerekir.

### **2.4.3. Karıştırma**

Bu işlem birincil, ikincil ve ileri seviyeli atık su arıtma sistemlerinde kullanılır. Çamurum karıştırma işlemi ile homojen olması susuzlaştırma, ısıtma ve yakma işlemleri için ciddi önem arz eder. Bu sayede verim artar. Çamurun karıştırıldığı noktalar; ön çökeltim

tankında (geri devir ile), borularda, uzun bekletme süresi gerektiren çamur işleme sistemlerinde ayrı karıştırma tankıdır.

#### **2.4.4. Disintegrasyon**

Çamuru, dış gerilmeler vasıtasıyla yapısının bozulmasıyla elde edilir. Bu dezenformasyon fiziksel, kimyasal ve biyolojik yollarla yapılabilir.

Disintegrasyona uğramış çamur katı formunu kaybedip sıvı forma geçiş yapar ve flok yapısı bozulur. Hücre duvarı parçalanıp çözünür forma geçer. Bu sayede susuzlaştırma sırasında daha yüksek katı madde içeriğine sahip olurlar.

Biyolojik olarak bu işlemin yapılması ile oluşan sıvı faz organik içerik bakımından oldukça zengin olduğu için ciddi bir karbon kaynağı olarak kullanılabilir. (Foladori, Andreottola ve Ziglio ,2010)

Aritımın geçici süre ile durduğu durumlarda çamurun sabit bir debi ile kireç stabilizasyonu, ısıtma arıtım, mekanik susuzlaştırma, kurutma ve yakma proseslerine gönderilmesi için biriktirilir. Septikleşmenin önüne geçmek için karıştırılır klor vb. eklemeler yapılır.

#### **2.5. Arıtma Çamuru Şartlandırma**

Şartlandırma çamurun içindeki katı madde ve sıvı maddelerin birbirinden ayrılma performansının artırılmasıdır. Sıvı fazın tamamen bileşikten ayrılmasına şartlandırma denir. Şartlandırma işlemi arıtma işlemlerinin önemli basamaklarından olan mekanik yoğunlaştırma ve çamur susuzlaştırma işlemlerinde önemli bir yere sahiptir.

İşlemi desteklemek performansı arttırmak için bir takım inorganik veya organik kimyasallar uçucu küller (çamur yakma fırınından çıkmış) ya da dondurma, ısıtma, eritme gibi bir takım fiziksel yöntemler kullanılabilir. Tam başarıya ulaşmak için yukarıda sayılan birkaç işlemin bir arada kullanılması gerekebilir. Örneğin ısıtma soğutma gibi fiziksel yöntemlere ek olarak kimyasal madde katkısı gerekmektedir.

Her arıtma tesisi çamurunun geldiği kaynağa bağlı olarak kendine has birtakım özellikleri vardır (su içeriği, yüzey kimyası vb.). Bu farklı özellikler yüzünden şartlandırma da etkilenecektir. Şartlandırmayı etkileyen faktörler; çamur pH ve alkalitesi, partikül boyutu ve

dağılımı, yüzey yükü ve hidrasyon derecesi, katı madde konsantrasyon, çamur kaynağı ve diğer fiziksel faktörlerdir.

## 2.6. Arıtma Çamuru Yoğunlaştırma

Çamur içeriğindeki suyun uçurulması ile hacminde yaşanan küçülmeye çamur yoğunlaştırma denir. Bu süreçteki çamur hala ciddi su içeriğine sahiptir ve akışkan kıvamdadır. Yoğunlaştırma işleminin birincil artışı hacim azalması sayesinde susuzlaştırma ve çürütme işlemleri daha verimli hale gelmesidir.

Graviteli yoğunlaştırıcı, çözünmüş hava yüzdürmeli yoğunlaştırıcı ve döner tamburlu yoğunlaştırıcı en sık kullanılan tiplerdendir.

Seçilecek yoğunlaştırıcı sistem için;

- Katı madde konsantrasyonu ve besleme debisi
- Kimyasal maddeli şartlandırma yapılacaksa kullanılan kimyasalın maliyeti
- Çözünmüş katı madde konsantrasyonu
- Çamur debisi ve katı madde konsantrasyonu en önemli kriterlerdir.

Çizelge 2.3. Yoğunlaştırma yöntemleri avantaj-dezavantajları (Öztürk vd., 2015)

Yöntem	Avantaj	Dezavantajlar
Graviteli Yoğunlaştırma	<ul style="list-style-type: none"><li>• Uygulama Kolaylığı</li><li>• Az Maliyet</li><li>• Düşük kapasiteli tesisler için uygun</li><li>• Hızlı çökelen çamurlar için uygun</li><li>• Şartlandırma için kimyasal ilavesi gerekli değil</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geniş Alan İhtiyacı</li><li>• Düzensiz ve az atık aktif çamur konsantrasyonu</li></ul>
Çözünmüş Hava Flotasyonu	<ul style="list-style-type: none"><li>• %3,5-5 arası katı konsantrasyonu ile Graviteli yoğunlaştırmadan daha başarılıdır</li><li>• Graviteli yoğunlaştırıcıdan daha az alana ihtiyaç duyar</li><li>• Kimyasal madde ilavesine ihtiyaç duyulmaz ya da az</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Graviteli yoğunlaştırıcıya göre daha yüksek işletme maliyetline sahip</li><li>• Yüksek güç ihtiyacı</li><li>• Eğitimli (orta) operatöre ihtiyaç duyulur</li><li>• Potansiyel koku problemi</li><li>• Geniş yer ihtiyacı</li><li>• Graviteli yoğunlaştırıcıya oranla nispeten ufak depolu</li></ul>

	<p>miktarda kimyasala ihtiyaç duyulur</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basit alet edevata ihtiyaç duyulur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İlk kademe çamurları için uygun değil</li> <li>• Yüksek katı tutulma ihtiyacında ve çamur miktarının artışında polimer ekleme ihtiyacı duyulmaktadır</li> </ul>
Santrifüjlü Yoğunlaştırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atık aktif çamur yoğunlaştırılmasında etkili</li> <li>• Sistem etkinliğini denetleyebilme</li> <li>• Daha az temizlik ve koku sorunu</li> <li>• Daha az alan ihtiyacı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek maliyetli</li> <li>• Fazla güç tüketimi</li> <li>• Eğitimli çalışan ihtiyacı</li> <li>• Karmaşık bakım materyallerine sahip</li> <li>• Katı tutuculuğunun artması için polimer takviyesi ihtiyacı</li> </ul>
Bantlı Yoğunlaştırıcı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atık aktif çamur yoğunlaştırılmasında etkili</li> <li>• Proses performansını kontrol edebilme</li> <li>• Yüksek katı tutma kapasitesi</li> <li>• Düşük yatırım maliyeti</li> <li>• Düşük güç tüketimi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimer takviyesine ihtiyaç</li> <li>• Temizlik ihtiyacı</li> <li>• Koku problemi</li> <li>• Eğitimli (orta) operatöre ihtiyaç duyulur</li> <li>• Bina ihtiyacı</li> </ul>
Döner Tambur Yoğunlaştırıcı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atık aktif çamur yoğunlaştırılmasında etkili</li> <li>• Düşük güç tüketimi</li> <li>• Düşük alan ihtiyacı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimer takviyesine ihtiyaç ve kullanılan polimere karşı duyarlılık</li> <li>• Temizlik ihtiyacı</li> <li>• Koku problemi</li> <li>• Eğitimli (orta) operatöre ihtiyaç duyulur</li> <li>• Bina ihtiyacı</li> </ul>

## 2.7. Arıtma Çamuru Stabilizasyonu

Arıtma çamurları muhteviyatları itibariyle bol miktarda zararlı ve zararsız mikroorganizmalar bulundurur. Bu mikroorganizmalar zaman içerisinde çürüyüp kokuşup, sıcaklık ve rüzgar etkisiyle ciddi kötü problemlerinin yaşanmasına sebep olur. Çamur stabilizasyonu arıtma çamurlarında ortaya çıkan bu kötü koku, çürüme ve bozulma problemlerinin giderilmesinde kullanılır. Bu süreçte dikkat edilmesi gereken en mühim konu çamur içindeki uçucu ve organik maddelerin giderilerek mikroorganizmaların yaşayamayacakları bir ortam oluşturmaktır. Söz konusu bu şartlar kimyasal madde eklenerek,

ısı ile arıtma, oksitleyici kimyasal ilavesi ile oluşturulabileceği gibi havalı çürütme, havasız çürütme ve kompostlaştırma gibi yöntemlerle sağlanabilmektedir.

Stabilizasyon işlemiyle koku problemiyle savaşılmasının yanı sıra diğer mühim hususlardan olan çamur hacminin azaltılması çamurdan biyogaz eldesi ve çamur susuzlaştırması konularında da ciddi faydalar göstermektedir.

Arıtma çamur stabilizasyonu yapmak için çeşitli yöntemler bulunmakla beraber en uygun yöntemin seçilmesi çamur içeriği uyulması gereken çevresel şartlar ile doğrudan bağlantılıdır. Stabilizasyon prosesi tasarım aşamasında çamurların nihai bertarafında kullanılacak yöntemin seçilmiş olması ve bu yöneme göre hareket edilmesi gerekmektedir.

### **2.7.1. Kimyasal ile Stabilizasyon**

Arıtma çamuruna kimyasal ilavesi eldesi ile stabilizasyon işlemi etkili uygulaması basit bir yöntemdir. Her metotta olduğu gibi birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Kimyasal madde ilavesi ile ortam alkali hale getirilerek mikroorganizmaların yaşamları için elverişsiz bir ortam hazırlanmaktadır. En sıklıkla kullanılan kimyasal kireç ilavesi olmakla beraber bazı özel uygulamalarda çimento ocağı tozu, çimento veya silikat gibi sertleştirici katkı maddeleri de kullanılıp çamur alkali hale getirilmektedir. Kireç ilavesi anaerobik olarak bozunmuş çamurun, ham birincil çamurun ve atık aktif çamurun stabilizasyonu için uygulanabilmektedir. Söz konusu kireç ilavesi susuzlaştırma öncesi ve sonrası olmak üzere iki ayrı safhada yapılabilmektedir.



Şekil 2.7. Kireçle stabilizasyonda ön kireçleme ve son kireçlenmenin olumlu yönleri (Öztürk vd., 2015)

Kimyasal stabilizasyonda kireç ilavesinin kullanılması sonrasında oluşacak ürün düzenli depolama sahalarında değerlendirebileceği gibi farklı amaçlar içinde kullanılacak nitelikte bir ürün oluşmaktadır.

Kireç ilavesinin bir diğer faydası da pH' ın 12 ve üzerinde seyretmesi nedeniyle mikroorganizmalar için hiç de elverişli ortamlar oluşmamaktadır. Bu tür ortamların yüksek alkalinitesinden dolayı mikrobiyal reaksiyonlar, virüsler, bakteriler ve diğer mikroorganizmaların faaliyetleri en aza iner hatta durur buna bağlı olarak koku oluşumu engellenir, vektörlerin çoğalması söz konusu olmaz bu nedenle hastalıkların oluşması ve yayılmasının önüne geçilmiş olur. pH' ın yüksek alkalinite de olmasının süreklilik arz etmesi durumunda bozunma, çürüme, kötü koku oluşumunun önüne geçilerek konunun sağlığa zararlı boyutlara ulaşması engellenir.

Kireçle stabilizasyon işlemindeki genel uygulama 2 saat boyunca pH' ın 12 olmasını sağlayacak kadar kireç ilavesini kapsar. Bu şartlar altında patojenler ve mikroorganizmalar inhibe olacak veya aktiviteleri en aza inecektir.

Aritma çamurlarında stabilizasyonun tam ve etkin bir şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği sadece kötü koku oluşmaması ve susuzlaştırma işleminin tam yapılması ile sağlanmaz. Tüm bileşenlere ek olarak pH' ında izlenmesi ve belirli bir düzeyin altına inmediğinden emin olunması gerekmektedir. Ayrıca fekal koliform ve fekal streptokok gibi mikroorganizmaların oluşumlarını da kontrol altında tutulması amacıyla 3 ayda bir mikrobiyal ölçümlerin yapılması gerekmektedir.

Kireçle stabilizasyon kompostlaştırma gibi işlemlere göre daha uygulanabilir. Bu prosesin yegane olumsuz özelliği, pH' ın düşmesi durumunda çamurun kararsızlaşması ve biyolojik aktivitenin tekrar başlamasıdır. pH' ın tekrar yükseltip çamurun karalı hale gelebilmesi için yeniden kireç ilavesine ihtiyaç duyulmaktadır bu da nihai çamur miktarının artması anlamına gelmektedir. Bu da ekstra maliyete sebep olmaktadır.

### **2.7.2. Isıl İşlem**

Isıl işlem, eğer çamurun susuzlaştırılma seviyesinin ve biyobozunurluğunun artırılması isteniyorsa uygulanır. Bu proseste çamur önce belirli bir ebata getirilir ve yüksek bir basınçla pompalanır (Öztürk vd., 2015) çamurun sıcaklığı 20 °C' den 170 °C' ye çıkarılıp büyük pişirme kaplarına konulur. Burada sıcaklık 180 °C' ye buhar enjeksiyonu ile çıkartılıp 30 dakika boyunca pişirilir. Sonra taze çamur ile karıştırılıp soğutulur. Proses esnasında çıkan gazlar yakılarak, filtre yolu ile ya da kimi hallerde havalandırma havuzlarının tabanından difüzörler vasıtasıyla uzaklaştırılabilmektedir. Yine ısıl işlem prosesine emsal bir şekilde ıslak hava oksidasyonu da uygulanan benzer yöntemlerdendir. Aralarındaki başlıca fark ıslak hava oksidasyonunda daha yüksek sıcaklıklara çıkılmasıdır.

### **2.7.3. Aerobik Çamur Çürütme**

Aerobik çamur çürütme özellikle organik madde içeriği yüksek olan çamurların biyolojik stabilizasyonunda kullanılan havasız çamur çürütmeye alternatif bir yöntemdir.

Aerobik çamur çürütmede; atık aktif çamur ayrı bir tank içine alınıp birkaç gün boyunca havalandırılıp, bileşikteki uçucu katı maddeler biyolojik olarak stabilize olur. Başlıca

kullanılan aerobik çamur çürütme yöntemleri, klasik aerobik çürütme ve ototermal aerobik çürütmedir. Havalı çamur çürütme işleminin sağladığı birtakım faydalar ve zararlar bulunmakta olup Çizelge 2.3' de söz konusu unsurlar sıralanmıştır.

Çizelge 2.4. Aerobik çamur çürütme avantaj ve dezavantajları (Öztürk vd., 2015)

Yöntem	Avantaj	Dezavantajlar
Aerobik Çamur Çürütme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sıvı BOİ konsantrasyonu az</li> <li>• Proses sonucu oluşan çamur neredeyse kokusuz, humusa benzer, yararlı bir son ürün</li> <li>• Oluşan çamurun susuzlaştırılma oranı yüksek</li> <li>• Kolay işletim</li> <li>• Proje açılış maliyeti az</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proses sonucunda metan elde edilememesi</li> <li>• Oksijen temini için yüksek enerji ihtiyacı</li> <li>• Yüksek maliyet</li> </ul>

## 2.7.4 Anaerobik Çamur Çürütme

Anaerobik çamur çürütme özellikle biyolojik içerikli ham çamurlar üzerinde kullanılır. Çamurlar hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi aşamalarında anaerobik bakteriler tarafından parçalanarak gerçekleştirilir (Öztürk,2007). Hidroliz aşamasında; çözünmemiş kompleks yapıli organik maddeler enzimlerle parçalanarak daha az karmaşık maddelere evrilir. Asit üretimi ise; bileşik içerisindeki karbonhidrat, yağ ve proteinlerin asit bakterileri vasıtasıyla uçucu yağ asitleri elde edilmesiyle gerçekleşmektedir. Üçüncü aşamada ise CO<sub>2</sub> ile H<sub>2</sub>' in senteziyle veya daha önce üretilmiş asetik asidin parçalanmasıyla CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> oluşur. Anaerobik çamur çürütücüler; düşük hızlı ve yüksek hızlı çamur çürütücüler olmak üzere ikiye ayrılır. Havasız çamur çürütme işleminin sağladığı birtakım faydalar ve zararlar bulunmakta olup Çizelge 2.4' de söz konusu unsurlar sıralanmıştır.

Çizelge 2.5. Anaerobik çamur çürütme avantaj ve dezavantajları (Öztürk vd., 2015)

Yöntem	Avantaj	Dezavantajlar
Anaerobik Çamur Çürütme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proses sonucu oluşan çamur kararlı, kokusuz, patojen içeriği az, arazide kullanılacak bir son ürün</li> <li>• Oluşan çamurun susuzlaştırılma oranı yüksek</li> <li>• Kolay işletim</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proje açılış maliyeti fazla</li> <li>• İşletmesi zor</li> <li>• Çıkış suyu kirlilik yükü fazla</li> </ul>



## **2.8. Arıtma Çamuru Susuzlaştırma ve Kurutma**

Arıtma çamurunun neminin azaltılması amacıyla yapılan fiziksel işleme susuzlaştırma denir. Susuzlaştırma işleminin yapılması ile azalan çamur hacmi sayesinde nakliye masrafları azalacak, kurumuş çamur keki alet edevat vasıtası ile kolayca taşınabilecek, kalorifik değerinin artmasından dolayı yakma işleminde faydalı olacak, kompostlaştırma sürecinde yardımcı madde ihtiyacının azaltılmasına sebep olacak, çamurun kuru olmasından dolayı koku problemi oluşmayacak aynı zamanda ekstra sızıntı suyu üretiminin önüne geçilmiş olacaktır.

Başlıca doğal susuzlaştırma yöntemlerinin arasında süzülme ve buharlaşma gelmektedir. Mekanik susuzlaştırmada proses hızlı bir şekilde seyreder. En sıklıkla kullanılan mekanik susuzlaştırma yöntemleri kapiler hareket, santrifüj, filtrasyon, sıkma, sıkıştırma ile ayırmadır. Susuzlaştırma işlemi sırasında en dikkat edilmesi gereken üç unsur; çamurun karakteristiği, alan ihtiyacı ve susuzlaştırma sonrası oluşacak kek özelliğidir. Örneğin; yer bulma problem değilse kurutma yatakları ve lagünler, yer bulmak ciddi bir sorun ise mekanik susuzlaştırma seçeneğine gidilmelidir.

Tüm çamur susuzlaştırma yöntemleri sırasında koku oluşumu kontrol altında tutulmalıdır özellikle havasız ortamlarda çürütülmüş çamurların susuzlaştırılması aşamalarında dikkat edilmesi gereken bir unsurdur. Ancak aerobik çamur çürütme işlemi yapılan ortamlarda mekanik susuzlaştırma işlemleri uygulanmamalıdır, çünkü çürütme işlemi sırasında küçülen partiküller mekanik susuzlaştırmayı zorlaştırmaktadır. Aerobik çürütme uygulanmış çamurlara kum yataklar vb. doğal susuzlaştırma yöntemleri daha uygundur. Başlıca kullanılan çamur susuzlaştırma işlemleri; pres filtre, kurutma yatakları, bant filtre ve lagünler olduğu gibi sazlık ve benzeri bitki örtüsü ile örülmüş altı geçirimsiz malzeme ile kaplanmış çamur kurutma yatakları da kullanılabilecek diğer doğal susuzlaştırma yöntemlerindedir. Daha önceki yıllarda vakum filtreleri de kullanılan mekanik susuzlaştırma yöntemlerinden olsa da daha verimli yöntemlerin son zamanlarda türemesiyle artık oldukça az kullanılan yöntemler arasındadır.

### **2.8.1. Çamur Kurutma Yatakları**

Çamur kurutma yatakları doğal susuzlaştırma yöntemlerinden olup, bilhassa çürütülmüş arıtma çamurlarının ve yoğunlaştırma yapılmamış uzun havalandırılmalı aktif çamur sistemlerinden üretilen çamurlar üzerinde kullanılır. Bu proses sonucunda oluşan

çamurlar arazilerde toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilceği gibi düzenli depolama sahalarına da gönderilebilirler.

Çizelge 2.6. Çamur kurutma yatakları avantaj ve dezavantajları (Öztürk vd., 2015)

Yöntem	Avantaj	Dezavantajlar
Çamur Kurutma Yatakları	<ul style="list-style-type: none"><li>• Düşük maliyet</li><li>• İşletme kolaylığı</li><li>• Proses sonucu üretilen çamurda yüksek katı madde miktarı</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fazla alan ihtiyacı</li><li>• Meteorolojik koşullardan olumsuz etkilenebilme</li><li>• Çamur kekinin uzaklaştırılmasında insan gücü ihtiyacı</li><li>• Haşere, kötü koku problemi</li></ul>

### 2.8.2. Mekanik Susuzlaştırma

Mekanik susuzlaştırma çamurun içinde olan suyun fiziksel işlemlerle uzaklaştırılmasıdır. Mekanik susuzlaştırma; santrifüj ile susuzlaştırma, bant filtre ile susuzlaştırma, pres filtre ile susuzlaştırma, burgu (vida) pres ile susuzlaştırma olmak üzere dört ana başlık altında toplanmıştır (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.7. Mekanik susuzlaştırma çeşitleri (Öztürk vd., 2015)

Yöntem	Özellikleri
Santrifüj ile Susuzlaştırma	<ul style="list-style-type: none"><li>• Santrifüj ile susuzlaştırma merkezkaç kuvveti etkisiyle çamur içindeki suyun ayrılarak yoğun bir çamur kekine dönüşmesidir.</li><li>• Santrifüjden çıkan çamur %10-30 arasında katı madde içeriğine sahiptir.</li></ul>
Bant Filtre ile Susuzlaştırma	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bant filtrede kesintisiz olarak çamur akışı bulunmakta ve sistem 3 ana kısım ile çalışmakta; kimyasal şartlandırma, yer çekimi etkisiyle drenaj işlemi ve susuzlaştırma amacıyla mekanik basınç uygulamasıdır.</li><li>• Ayrıca susuzlaştırma esnasında açığa çıkan H<sub>2</sub>S gibi gazların ortamdaki uzaklaştırılması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.</li></ul>
Pres Filtre ile Susuzlaştırma	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pres filtre ve bantlı filtre arasındaki en mühim fark daha fazla suyun uzaklaştırılabilmesi için uygulanan basıncın artırılmasıdır.</li><li>• Karmaşık teçhizat, ekstra insan gücü vb. dezavantajları vardır.</li><li>• Avantajları ise yüksek katı madde konsantrasyonlu kek oluşur, kaliteli sızıntı suyu oluşmasıdır.</li></ul>
Burgu (Vida) Pres ile Susuzlaştırma	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bu tip susuzlandırmada çamur vida tipli eleklerle kullanılır. Başlıca cinsleri yatay ve eğimli vida prestir.</li><li>• Yatay tipli olanda dışarıdan buhar verilerek kurutma yapılır.</li><li>• Fakat eğimli olan daha sıklıkla kullanılır.</li><li>• Vida tipli pres kolaya fırçalar vasıtasıyla temizlenir. Düşük enerji tüketimi vardır ve az yer kaplar. Düşük kapasitesi nedeniyle küçük yerleşim yerleri için kullanılabilen bir yöntemdir</li></ul>

### 2.8.3. Güneş Enerjili Kurutma

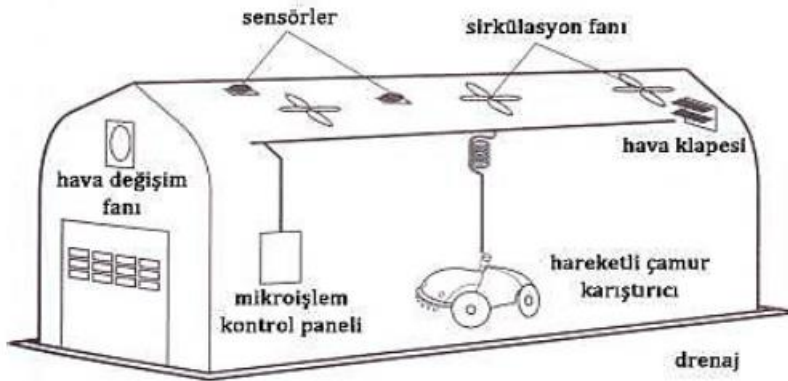
Çamur kurutma işleminde eğer hızlı bir şekilde sonuç alınması isteniyorsa mutlaka enerji sarfiyatı olacaktır. Bu enerjinin de yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması son yıllarda çalışan konulardandır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında doğrudan veya dolaylı en yüksek kapasiteye sahip olan cins güneş enerjili enerjidir (Öztürk vd., 2015).

Çamur kurutmada 3 değişik yolla kullanılabilir.

- a. Çamur yatağına güneş ışınlarının direkt verilmesi (konvansiyonel çamur kurutma yataklarındaki uygulamaya benzer olarak)
- b. Ayrıca güneş ışınlarına maruz çamurdaki ışınların yansıtıp kaçmasının önüne geçebilmek için yatağın üzerinin kapatılması

- c. Güneş enerjili ışımanın kesilmeyerek akışın sürekli tutulması uygulamalarıdır. Böylece sera türevi kapalı ortamlar oluşturularak güneş enerjili kurutma işlemi yapılır. Bu işlemin maliyeti mekanik kurutma sistemlerine göre daha azdır (Salihoğlu ve Pınarlı, 2007)

Tipik bir güneş enerjili kurutucu serasının görseli Şekil 2.8' deki gibidir.



Şekil 2.8. Güneş enerji destekle kurutulma sera (Salihoğlu ve Pınarlı, 2007)

Mikroişlemci hava durumunu analiz ederek kurutma işlemi için gerekli ortamı ayarlayabilmek adına nem tutucu ortamın oluşabilmesi için analiz yapar. Ayrıca karıştırma ekipmanı sayesinde çamur nemin yüzeye çıkması için yardımcı olup, prosesin çabuk bitmesi sağlanır. Bu yöntemle çamurun katı madde içeriğini %90' a çıkarabilmek eğer yeterli süre çamur bekletilirse mümkündür (Salihoğlu ve Pınarlı, 2007).

Güneş enerjili kurutma prosesinde enerjinin asıl merkezi olan unsur güneş enerjili radyasyondur. Sistem güneş enerjili radyasyonun ana unsur olarak kullanılıp tasarlanmasıyla ve sıcaklık nem oranı gibi unsurların yıllık değişimlerinin sistem boyutlandırılmasına katkı sağlamasıyla kurgulanır. Bu sistemde patojenler daha az kireç ilavesi ve bekletme süresi ile giderilir.

#### 2.8.4. Termal Kurutma

Aritma çamuruna uygulanan çeşitli termal işlemler şunlardır; termal kurutma, yakma prosesleri ve termal şartlandırmadır. Termal şartlandırmada kimyasal ilavesine gerek kalmaksızın uygulanan basınç ve ısı değişimleriyle çamurdaki bağlı suyun açığa çıkmasını sağlar. Termal kurutma işleminde; çamurdaki suyun ısı yoluyla buharlaştırılması

gerçekleştirilirken yakma proseslerinde çamur içindeki organik katıların ısıyla bertarafı sağlanır.

Son yıllarda arıtma çamurlarının miktarının giderek artması buna karşın bertaraf için gerekli olan alanın bulunamaması ayrıca ekonomik nedenlerle de termal kurutma yöntemleri en etkin bertaraf metotlarının arasındadır. Termal işlemler sonrasında oluşan çamurlar çimento katkısı, tarımda kullanılabilir olması sebebiyle çok olmasa da gelir getirici bir faaliyettir. Fakat termal kurutma yöntemleri bu avantajlarına karşın açılış ve işletme aşamalarında maliyetli aynı zamanda çalışanların eğitimi olmaları gerekmektedir.

#### **2.8.4.1. Termal kurutma yöntemleri**

Termal kurutma yöntemleri; ısının çamura verilme şekline göre konveksiyonlu (iletim), kondüksiyonlu (taşınım) ve ışınlı (kızılötesi) kurutma olmak üzere 3'e ayrılır.



Şekil 2.9. Termal kurutma yöntemleri (Öztürk vd., 2015)

Termal kurutmaya alınmadan önce çamur; içeriğindeki su muhtevidatının mekanik susuzlaştırma yolu ile azaltılması işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede 60-93 °C arasında olan çamur içindeki organik maddeler parçalanmadan su buharlaştırılmış olurken kuru çamurun bir kısmı sisteme geri devir yapılarak topaklanma probleminin önüne geçilip yüzey alanı arttırılır. Bakiye çamur ve atıkgazlar siklonlardan dışarı atılır. Atık gazlar için arıtım işlemi yapılarak alıcı ortama verilmektedir. Başlıca kurutucu cinsleri ve özellikleri Çizelge 2.7' de açıklanmıştır.

Çizelge 2.8. Termal kurutucular ve özellikleri (Öztürk vd., 2015)

Yöntem	Özellikleri
Flaş Kurutucular	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sıcak gaz akımına (700°C) çamurun atılır ve hızlı bir kurutma süreci elde edilir.</li> <li>Kurutulmuş çamur geri devir yapılarak yaş olanla karıştırılır bu sayede çamurun nakli kolaylaşır.</li> <li>Santrifüjden çıkan çamur %10-30 arasında katı madde içeriğine sahiptir.</li> <li>Yüksek enerji ihtiyacı, bakım ve onarım masraflarının fazlalığı tercih edilmeme sebebidir.</li> </ul>
Döner Tamburlu Kurutucular	<ul style="list-style-type: none"> <li>Döner kurutucuda ana mantık 3 ila 4°'lik yatay eksendeki eğim sayesinde cazibe etkisiyle çamurun üst kottan alt kota doğru ilerlemesi prensibine göre tasarlanmıştır (Turovskiy ve Mathai, 2006).</li> </ul>
Akışkan Yataklı Kurutucular	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sıcak havanın geçebileceği deliklere sahip tabanı ve dik konumuyla akışkan yataklı kurutucular sabit dikey bir yapıya sahiptir.</li> <li>Bu tip kurutucularda inert madde olarak kuvars veya cüruf kullanılır. 10 ila 15 dakika arasında çamur kurutulurken sıcaklık 300-900° C bandındadır.</li> <li>Sistem avantajları; tasarım basitliği, hareketli parçaların olmaması, kuruma süresi ve ısı iletim veriminin kontrol edilebilmesidir. Dezavantajları ise; çıkan gazdaki yüksek toz muhteviyatıdır.</li> </ul>
Ters Akışlı Jet Kurutucular	<ul style="list-style-type: none"> <li>Susuzlaştırılmış çamur konveyör bant ile ters akışlı jet kurutucusuna gider. İşlem sırasında kurumuş parçacıklar geri devir yapılır ve oluşan hava püskürtülerek atılır.</li> <li>Kuruma işlemi esnasında hava akımı ile ayrışan partiküller bir süspansiyon oluştururlar Fakat eğimli olan daha sıklıkla kullanılır.</li> <li>Çamur nem oranı kurutmadan önce %60-80 iken kurutma işlemi sonrasında %20-50 arasındadır.</li> </ul>
Yatay Endirekt Kurutucular	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bu sistemde burgulu ve disk tipi kurutma sistemleri çamurun taşınmasında, yatay endirekt kurutucular ise çamurun karıştırılmasında kullanılmaktadır. Sistem içinde akışkanlığı sağlayan buhar karıştırıcılar üzerinden akıtılır.</li> <li>Kuru çamur geri devri ile nem %40-50 oranında düşürülüp, çamurun homojen yapıya kavuşması sağlanır ısı çamurun her yerine ulaşır. Etkin bir karıştırma sağlanırsa yatay endirekt kurutucular nemi %10'un altına düşmesine sağlanır.</li> </ul>
Dikey Endirekt Kurutucular	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hem kurutma hem pelletleme işlemi yapılır (Turovskiy ve Mathai, 2006).</li> <li>Bu sistemde %90'ın üzerinde yüksek nem gideriminin yapılabilir. Bunu sağlamada termal yağ veya buhar kullanılır. Katlar ve tablalardan oluşmuş sistemde kurutucunun kalbinde döner kollar üzerinde shaft vardır. Bu sistemde toz ve partikül oluşması nispeten azdır. Koku giderimi için bir ünitesi bulunmaktadır.</li> </ul>

## 2.9. Arıtma Çamuru Bertaraf İşlemleri

Arıtma çamuru son işlemlerinde işlenmiş olan çamurun niteliğine ve işlenme amacına uygun olarak bertaraf edilme metotları açıklanmıştır. Başlıca yöntemler; kompostlaştırma termal bertaraf, araziye uygulama, düzenli depolama ve lagünlerde depolamadır.

### 2.9.1. Kompostlaştırma

Kompostlaştırma dünya genelinde özellikle ABD' de yaygın olarak kullanılan nihai çamur uzaklaştırma yöntemlerindedir (Arıkan ve Öztürk, 2008). En yaygın çamur işleme işlemlerinden olan düzenli depolama sahalarında arıtma çamuru bertaraf seçeneği popülaritesini depolama sahası eksikliği sebebiyle yitirmiş, kompostlaştırma seçeneği daha tercih edilir olmuştur (Hassouneh, Jamrah ve Qaisi, 1999). Kompostlaştırma yöntemi maliyet açısından düzenli depolamadan daha maliyetli bir yöntem olmasına karşın yakma işleminden daha az maliyetli bir prosestir (Arıkan ve Öztürk, 2008).

Kompostlaştırma işleminde çamurun organik içeriği bakımından zengin olan kısmının aerobik ortamda, sıcaklığın 70 °C' ye çıkartılması ile atığın biyodegrade olması sağlanmaktadır (Anonim, 2015). Bu sayede atık hacmi, kütlesi ve nemi azalması gerçekleştirilmektedir (Öztürk vd., 2015).

Ülke genelinde topraklar organik madde muhtevası bakımından fakirdir, bu durum bitki örtüsü ve ağaçlandırma işleminin gelişmemesine yol açmakta, erozyon oluşmaktadır (Anonim, 2015). Arıtma çamurundan elde edilen kompostun toprak üzerinde kullanılması toprağın organik madde muhteviyatının artmasına sebep olurken aynı zamanda çamur içeriğinde olması muhtemel ağır metaller, tehlikeli maddeler nedeniyle toprağın tuzluluk problemi baş gösterebilir (Jayasinghea, Tokashiki, Arachchi ve Arakaki, 2010). Başlıca kompost yöntemleri arasında tünel reaktörler ve kompostlama makinaları bulunmaktadır (Anonim, 2015).





Şekil 2.10. Döner tambur tipi kompost sistemi Anonim, (2019)



Şekil 2.11. Tekne kompost sistemi Anonim, (2019)



Şekil 2.12. Karıştırırmalı yığın kompost örneği Anonim, (2019a)



Şekil 2.13. Statik havalandırılmalı sistemi Anonim (2019b)

### 2.9.2. Termal Bertaraf

Termal bertaraf yönteminde arıtma çamuru oksijenli ortamda içerisinde yanıcı maddelerin tutuşturulması ile başlayan ekzotermik bir reaksiyon vasıtasıyla atık yakılır. Oksijenli bir ortamda 420-500 °C sıcaklıkta susuzlaştırılmış arıtma çamurunun tutuşmakta, 760-820 °C sıcaklıkta ise tam yanma gerçekleşerek organik maddeler giderilmektedir (Öztürk vd., 2015). Bu proses sonucunda arıtma çamuru; muhteviyatına göre çeşitli kirletici içeriklere sahip tehlikeli gazlar, karbondioksit, su buharı ve küle dönüşür. Yakma prosesinde patojenler giderimi, toksin giderimi konusunda oldukça başarılıdır. Ayrıca elde edilen üründe hacimsel olarak %95 oranda azalmalar gerçekleşirken enerji kazanımı görülür (Öztürk vd., 2015). Yakma sistemi bir takım dezavantajlara da sahiptir bunlar; yakma ürünü olarak oluşan zararlı gazlar, uçucu küllerin iyi bir filtrasyondan geçirilememesi halinde ciddi zararlara sebebiyet verilebilecektir. İşletmesi çetrefilli ve masraflıdır, organik madde içeriği yüksek olan çamurların yakılması sonucu kullanılabilir organik maddelerin boşa gitmesine yol açılacaktır. Yakma sonucu oluşan katı atıkların muhteviyatında tehlikeli maddeler olması halinde özel bertaraf işlemleri uygulanmalıdır (Öztürk vd., 2015).

Çizelge 2.9. Arıtma çamur ısı değerleri (Anonim, 2015)

<b>Alt Isıl Değer(cal/g)-</b>	<b>Alt Isıl Değer(cal/g)-</b>
<b>Kış Dönemi</b>	<b>Yaz Dönemi</b>
Adana 2287,5±27,41	Adana 2570,2±25,64
Ankara 2511,5±8,79	Ankara 2452,1±11,48
Antalya/Kemer 3408,6±11,27	Antalya/Kemer 4243,4±82,71
Antalya/Lara 3061,4±115,11	Antalya/Lara 3369,3±18,51
Bursa 3207,8±31,86	Bursa 3247,5±37,28
Denizli 3802,5±100,07	Denizli 2714,7±19,92
Düzce 3037,3±6,32	Düzce 2895,4±41,39
Düzce/Akçakoca 3559,2±35,73	Düzce/Akçakoca 3482,6±5,90
Elazığ 2833,7±39,19	Elazığ 3292,4±31,48
Erzincan 3050,2±56,23	Erzincan 3607,6±101,94
Gaziantep 1 3381,2±33,46	Gaziantep 1 3307,1±35,9
Gaziantep 2 3378,9±26,85	Gaziantep 2 2676,3±44,85
İstanbul/Bahçeşehir 3262,3±4,41	İstanbul/Bahçeşehir 3312,8±10,26
İzmir/Çiğli 3768,3±25,18	İzmir/Çiğli 4078,1±29,48
İzmir/Foça 2371,1±62,4	İzmir/Foça 2992±71,68
Kayseri 2971,6±18,47	İzmir/Güneybatı 3152,1±116,87
Kocaeli/Karamürsel 2450,2±30,53	Kayseri 2827,4±22,11
Kocaeli/Kullar 2557,4±49,18	Kocaeli/Karamürsel 3939,1±26,97
Malatya 3678,5±28,48	Kocaeli/Kullar 2885,3±6,83
Manisa 2456,5±24,60	Malatya 2939,4±18,73
Mersin 2168,7±19,18	Manisa 2900,1±99,73
Nevşehir 3775,3±9,14	Mersin 2684,1±52,19
Samsun/19 Mayıs 3859,2±12,69	Nevşehir 3780,7±82,64
Samsun/Bafra 3278,8±51,66	Samsun/19 Mayıs 3505,4±29,33
Siirt 3828,7±73,23	Samsun/Bafra 3552,4±48,57
Van 3945,2±43,65	Siirt 2854,2±56,16
Yozgat 4165,6±31,31	Van 2843,2±28,96
LHV (cal/g) = Kuru bazda alt ısı değer	Yozgat 4031,2±34,69



### 2.9.3. Araziye Uygulama

Araziye uygulama yöntemi arıtma çamurlarının çeşitli proseslerden geçirildikten sonra sınırları belirlenmiş ve geçirimsiz kontrollü bir alana üstten serilerek ya da yüzey altına verilmesidir. Evsel arıtma çamurları genellikle çeşitli sebeplerle bozulmuş olan tarla, mera veya yanmış orman arazilerine uygulanmaktadır. Bu sayede çamur içindeki patojenler ve diğer zararlılar topraktaki mikroorganizmalar sayesinde giderilirken çamurun nem içeriği azalır. Çamur içeriğindeki organikler alandaki böcek, mikroorganizmalar ve bitkiler tarafından bünyelerine alınıp biyo kütle haline getirilir. Arazide arıtma seçeneğinin gerçekleştirilebilmesi için 2010 yılında yayınlanan Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik'te belirlenen hususların sağlanması gerekmektedir. Arıtma çamurlarının yüksek organik içeriği sayesinde su tutma ve mineral tutuma özelliğini kaybetmiş deforme olmuş topraklarda kullanılması sayesinde toprak zenginleşir ve ıslah edilmiş olur.

Uygulamanın gerçekleşeceği yerlerde; yeraltı su oranının en az 1m' den aşağıda olması, yakınında su kaynağı olabilecek unsurların olmaması şartları aranır.



Şekil 2.14. Araziye uygulama emsali (Öztürk vd., 2015)

### 2.9.4. Düzenli Depolama

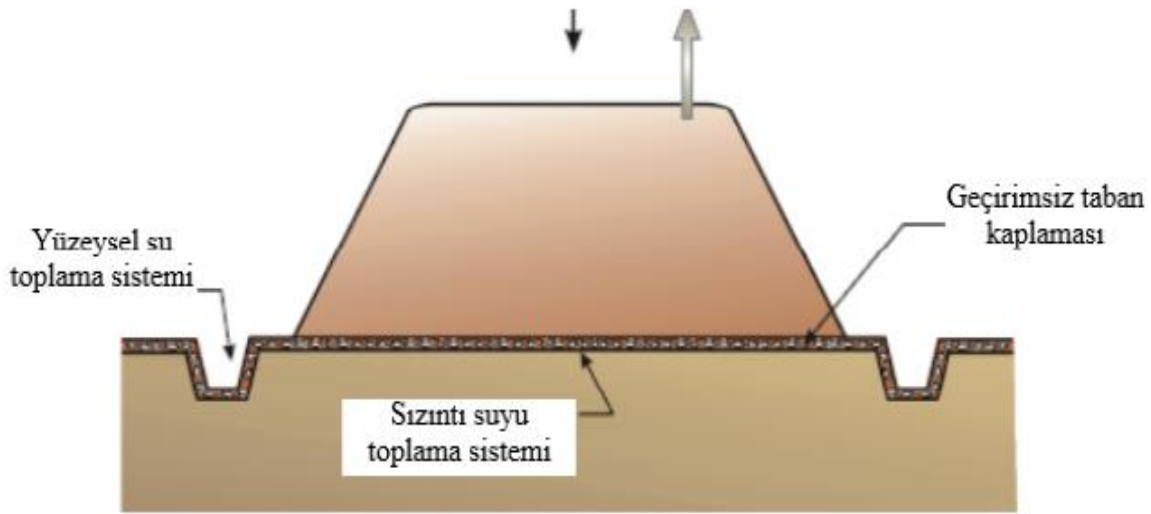
Arıtma çamurlarının düzenli depolanması geçmiş yıllarda çoğunlukla tercih edilen bir proses iken son yıllarda yenilikçi yaklaşımlarla çamurdan daha fazla fayda edilecek sistemler uygulanmaktadır. Malta, Yunanistan, İzlanda gibi bazı ülkelerde ise oluşan arıtma çamurlarının tamamına yakınının düzenli depolamaya gönderilmesine devam edilmektedir (Pure, 2012).

Arıtma çamurlarının düzenli depolanmasında kullanılan iki yöntem vardır. Birincisi sadece arıtma çamurlarının depolanmasını içeren yöntem diğ erinde ise düzenli depolama sahasında diğ er atıklarla beraber depolama seçeneğ idir.

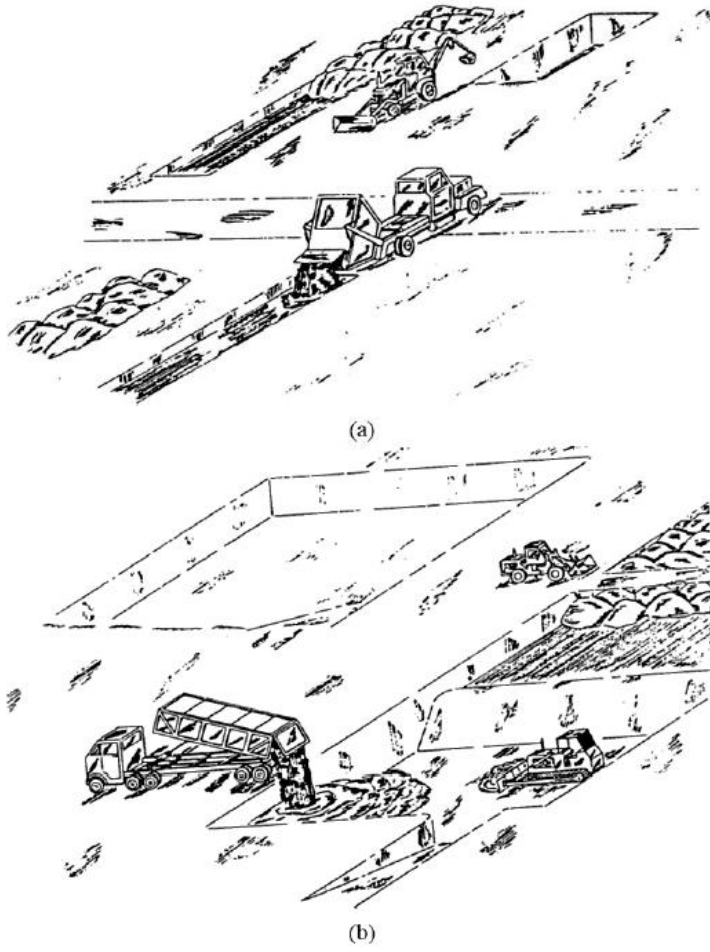
Çamurların diğ er atıklardan ayrı olarak depolanmasında kullanılan iki temel yöntem vardır, bunlardan ilki hendek yöntemidir. Hendek metodunda atığın katı madde muhteviyatına göre dar veya geniş hendekler açılarak başlangıç kotuna kadar doldurulmasını ihtiva eder. Bu yöntemle alandan maksimum fayda sağlanır.

Atığın katı madde içeriğ i az ise dar hendekler, katı madde içeriğ i fazla ise geniş hendekler tercih edilir. Çamurun bileşenleri arasında çeşitli tehlikeli madde yoğunluğ u varsa hendek ve alan tipi depolamada geçirimsiz taban uygulaması ve sızıntı suyu toplama sistemi de uygulanır. Diğ er tekdüze çamur depolama yöntemi ise alan tipi uygulamadır.

Doğ al toprak çöküntülerine ya da müsait alanların üzerine stabilize olmuş çamurun yığılması esasına dayanır. Bu yöntem hendek kazılmasının uygun olmadığı yerlerde kullanılırken olumsuz tarafı ise ciddi alan kaplayarak toprak israfına sebep olur.



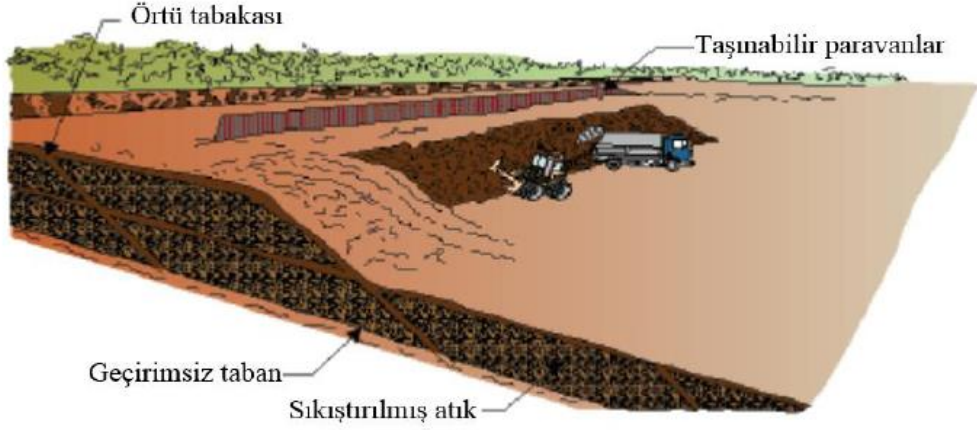
Şekil 2.15. Alan tipi çamur depolama örneğ i (Güney Afrika Su araştırma Komisyonu, 2009)



Şekil 2.16. Hendek yöntemi a) dar hendek b) geniş hendek (Qasim, 1999)

Düzenli depolama sahasında belediye atıklarıyla beraber depolama yönteminde arıtma çamurlarının ekstra yük getirmesi dışında ekstra yasal zorluk çıkarmaz. Uygulamada alan, topuk, hendek ve alternatif metotlar ile uygulanmaktadır (Güney Afrika Su Araştırma Komisyonu, 2009) Alan metodunda atıklar belediye atıklarına benzer şekilde serilir kompaktör ile sıkıştırılır.

Topuk metodunda; alanın topuk kısmına serilip kompaktör ile ezilir. Alternatif metotta ise bir öbek belediye atığı bir öbek arıtma çamuru yanına bir öbek daha belediye atığı gelecek şekilde konulur sonra kompaktör ile üzerinden geçilir. Bu yöntemde aracın çamura gömülmemesi sağlanıp rahat hareket ettirilir.



Şekil 2.17. Arıtma çamurlarının düzenli depolanması yöntemi örneği (Güney Afrika Su araştırma Komisyonu, 2009)

Atığın düzenli depolanması arıtma çamurundan maksimum fayda elde edilebilecek uygulamalar tercih edilemeyecekse kullanılır. Çünkü düzenli depolama seçeneğinde çamurun kirletici yükünün fazla olması ve geniş alan ihtiyacı bu yöntemi tercih edilen yöntemler sıralamasında gerilere iter. Fakat yine de birtakım avantajları bulunmaktadır. Bunlar; araziye uygulama yönteminden daha az yere ihtiyaç duyması, depo gazını arttırması, ekonomik olmasıdır.

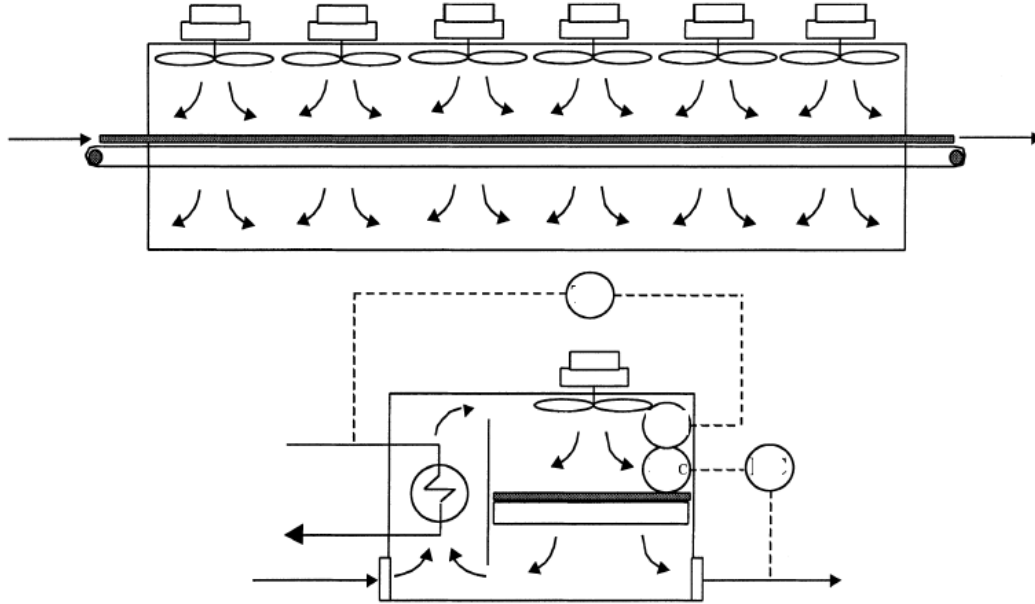
### 2.9.5. Lagünlerde Depolama

Lagünlerde depolama yöntemi geçirimsiz bir tabaka ile kaplanmış lagünlere ham ya da işlenmiş çamurun serilmesi şeklindedir. Üzeri açık olacağı için yağışlarda taşmayacak şekilde büyük olarak tasarlanmış olması gerekir. Koku probleminden dolayı yerleşim yerlerinden uzak inşa edilmesi gerekmektedir. Ekonomik bir yöntemdir.

### 2.10. Konveyör Bantlı Kurutucu Sistemi

Konveyör bantlı kurutucular çok yönlü olarak kullanılabilir. Genellikle endüstride tercih edilir; fındık, hayvan yemi, briket, lastik ve biyoyakıt kurutması yapılır (Tınmaz Köse, 2019). Endüstriyel konveyör bantlı kurutucular, tarım ürünlerinin kurutulması için en popüler kurutucular arasındadır. Kurutulacak ürünlerin homojen bir şekilde giriş yapabileceği bir taşıma bandı bulunmaktadır. Şekil 2.18' de görülen kurutma sisteminin çalışma prensibi elektrik enerjisiyle ısıtılan sıcak havanın konveyör bant üzerinde taşınan ürünün içine girmesiyle kurumaya üzerine kurulmuştur.

Konveyör bantlı kurutucularda ısıtmanın sıcak havanın sirkülasyonu yolu ile yapılması ve sistem üzerindeki dışarıdaki havanın çıkış yapabileceği boşlukların olması sebebiyle yüksek kurutma sıcaklıkları görülmez. Kurutma ortamı sıcaklıkları, düşük ila orta sıcaklık seviyelerindedir (Kiranoudis ve Markatos, 2000).



Şekil 2.18. Endüstriyel konveyör bantlı kurutucu (Kiranoudis ve Markatos, 2000)

## 2.11. Mikrodalga Kurutma Sistemi

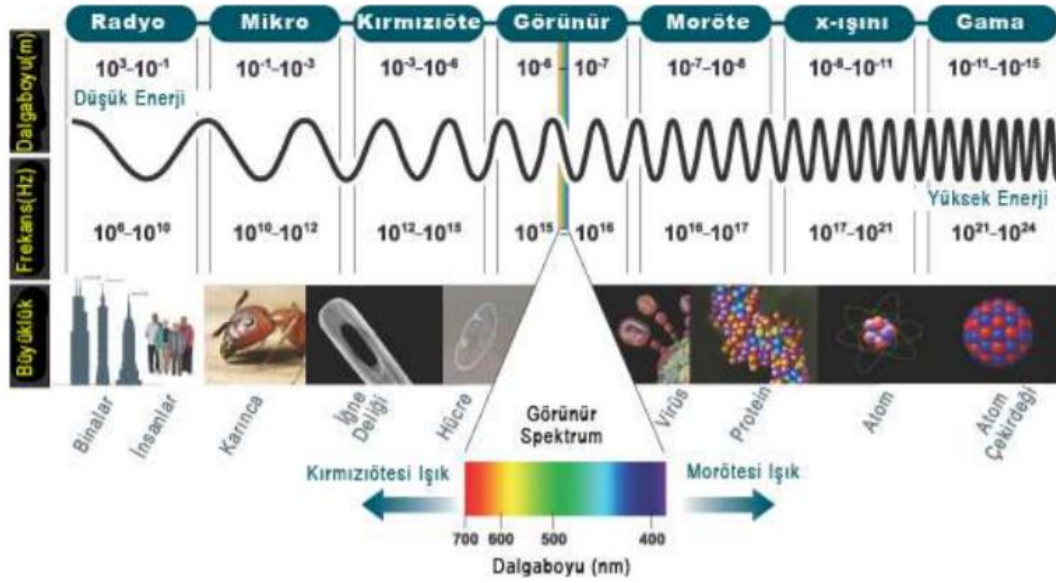
Mikrodalga elektromanyetik dalgaların bir cinsidir. Dalga boyu 1m' nin altında olan 300 MHz-300 GHz frekans aralığındaki ışınlar mikrodalga denir (Çelen, 2010). Dalgalar şeklinde yayılmakta olup nükleer ya da iyonize değildir.

Mikrodalgalar bir madde (gıda, çamur vb.) üzerine verildiğinde ısını yükseltmektedir. Isının kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere üç çeşit yayılma şekli bulunmaktadır. Elektromanyetik dalga enerji aktarımını radyasyon yolu ile yapar. Elektromanyetik dalgalar sinüs dalgaları halinde yayılma yönüne ve diğer elektromanyetik dalgalara dik olarak seyreden elektrik ve manyetik alandan meydana gelir. Elektro manyetik radyasyonun dalga boyu  $10^{-12}$  m-10 km arasındadır. Bu geniş spektrum arasında kızıl ötesi, morötesi, x ışınları, radyo dalgaları, gama ışınları ve mikrodalgalar bulunmaktadır.

Bu elektromanyetik dalga cinslerinin; ısının etki etme şekli, kaynakları, dalga boyları ve frekansları gibi farklı birtakım özellikleri bulunmaktadır. Elektromanyetik dalgalar genel



olarak frekans ile doğru, dalga boyu ile ters orantılı olup kimi zaman dalga kimi zaman parçacık özelliği göstermektedir.



Şekil 2.19. Elektromanyetik spektrum Anonim, (2019c).

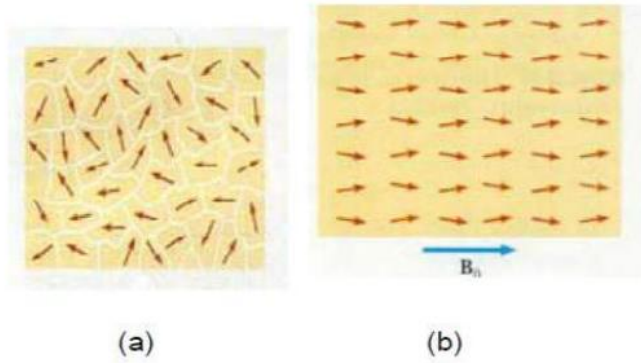
Bir tür elektromanyetik ışına olan mikrodalgalarda enerji transferi diğer alışla gelmiş ısıtma yöntemlerinin aksine konveksiyon veya kondüksiyon ile değil dielektrik ısıtması şeklinde gerçekleşir. Kurutma prosesinde kullanılan iki tip mikrodalga ışını bulunmaktadır; sanayi tipi fırınlarda 915 MHz ve ev tipi olanlarda 2450 MHz frekansa sahiptirler.

Mikrodalga ısıtma mekaniği; elektromanyetik enerjinin madde içerisinde direkt ısıya dönüştüğü sistemlere mikrodalgalı ısıtmalar denir. Klasik ısıtma yöntemlerinin aksine ısı oluşumu maddenin içinden dışına doğrudur.

Isıtılacak madde üzerine gönderilen mikrodalga ışınının oluşturduğu alternatif alanı özellikle dielektrik maddelerde bulunan su molekülleri takip edemez ve iletim kayıpları yaşanır bunun sonucunda da ısı meydana gelir. Dielektrik maddedeki kayıp açıları maddedeki su oranına ve sıcaklığına bağlı olarak farklılık göstermekte olduğu için bu tür maddelerin mikrodalgada ısıtılması kendini düzenleyen bir işlem niteliğindedir. Böylece diğer klasik kurutma yöntemleri olan kondüksiyon ve konveksiyonlu ısıtmanın aksine mikrodalgalı ısıtmada; kurutma ya da ısıtma süresi az olurken maddenin her yerindeki ısıtma ya da kurutma oranı eşit bir şekilde gerçekleşmektedir.

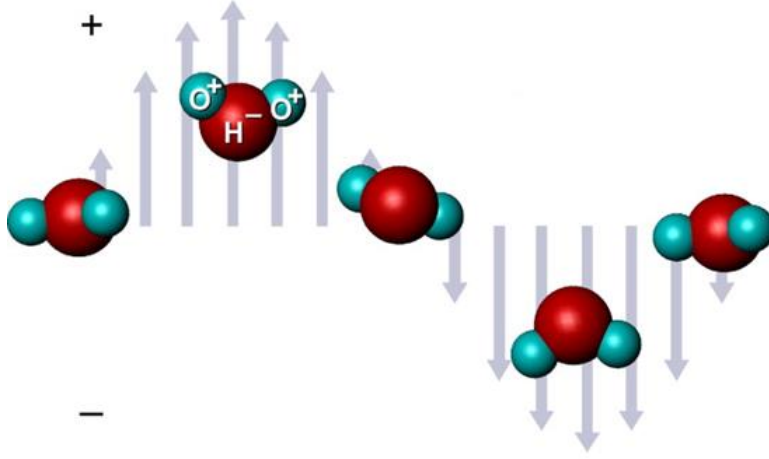
Mikrodalga ile ısıtmada, oluşan başarı maddeye verilen elektrik alan şiddeti sonrasında moleküllerin polarizasyon-depolarizasyon mekanizması ve iyonik bileşiklerin hareketi sebebiyle meydana gelir (Gwarek ve Celuch- Marcysiak 2004). Bu sistemdeki ısı üretimi; iyonik polarizasyon ve dipol dönmesi mekanizması sonucu gerçekleşir.

Mikrodalgada ısıtılabilecek çoğu malzemenin (gıda ürünleri, su, içecekler, çamur vb.) içerisinde, su gibi polar moleküller, madde içinde çeşitli yerlerde düzensiz olarak bulunmaktadır. Söz konusu maddeye mikrodalga enerjisi verildiğinde madde bünyesinde düzensiz şekilde bulunan polar moleküller frekansa bağlı olarak polaritesi hızla değişen elektrik alanı nedeniyle dönme eğilimi (dipol rotasyon) sergilemektedir. Evlerde ve laboratuvar çalışmalarında kullanılan mikrodalga fırınlarda elektrik alan yönü dakikada 147 milyar defa değişmektedir (Çelen, 2010). Elektrik alanda yaşanan bu hızlı değişime benzer yaklaşım sergilemek isteyen polar moleküller; kendileri ve madde içerisindeki diğer moleküller etrafında dönerken yaptıkları sürtünmeleri sonucu ısı açığa çıkarırlar (Uslu ve Certel 2006).



Şekil 2.20. a) Düzensiz hareket eden polar moleküller, b) Elektromanyetik alan altındaki düzenlenmiş moleküller (Toraman ve Depçi, 2007)

Maddenin üzerine verilen elektromanyetik dalga ne kadar dielektrik maddeye nüfuz edebilirse o kadar maddede bulunan polarizasyon zayıflar ya da iyonik bileşenlerin hareket etmesi sonucu su molekülleri buharlaşır ısı açığa çıkar kuruma- ısıtma gerçekleşir



Şekil 2.21. Mikrodalga'nın su molekülüne etkisi Anonim, (2019d).

Şekil 2.20' de görülen oklar, radyo dalgasının yönünü ve kuvvetini ifade etmektedir. Dalganın yönündeki değişim göre su molekülü de yön değiştirmektedir. Maddedeki molekül veya atomların hareketi ısı oluşumuna sebep olmaktadır.

İşlenecek madde içerisindeki iyonik bileşenler, üzerlerine uygulanan elektrik yükü sebebiyle uygulanan elektrik alanın polaritesinin ters yönünde hızlı bir şekilde hareket eder ve iyonlar çarpışır, kinetik enerji termal enerjiye dönüşür (Uslu ve Certel, 2006).

Mikrodalgalı ısıtma sisteminde ısıtmaya etki eden diğer faktörler; frekans, mikrodalga çıkış gücü ve ısıtma hızı, kurutulacak malzeme kütesidir. Frekans; kurutulacak materyalin tüm noktalarına nüfus edebilmek için çok mühim bir parametredir. En çok kullanılan ev tipi mikrodalga fırınlarda kullanılan frekans 2450 MHz olup 2-3 cm derinliğe işleme kabiliyetine sahiptir. 915 MHz frekansa sahip sistemler ise 20 cm derinliğe erişebilmektedir (Öztürk, 2014).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Arıtma Çamuru Numunesi Kaynağı

Arıtma çamuru numunesi evsel atık su arıtma tesisinden alınmıştır.

##### 3.1.1. Atık su Arıtma Tesisi

Çalışmaya konu olan tesisin halihazırdaki kapasitesi 4440 m<sup>3</sup>/gün 'dür. Diğer atık su arıtma tesisinden terfi edilen atık sular atık su arıtma tesisinde ilkin kaba ve ince ızgaralara, sonra kum tutucuya oradan da dağıtım yapısına gelerek biyolojik fosfor havuzuna alınır. Burada işlem gören atık sular havalandırma havuzuna geçer ardından çıkış yapısına geçer. Çöktürme havuzunda çöktürülmüş atık sular son klor havuzuna iletilip klor gazı ile işleme alınır.

Tesiste 7 gün 24 saat süreyle anlık KOİ, AKM, pH, iletkenlik, çözünmüş oksijen ölçümleri Çevre ve Şehircilik Bakanlığına iletilmektedir. SCADA sistemiyle anlık kontroller yapılmaktadır. Ayrıca tesiste blowlara bağlı enstrümanlarsan sinyal alınarak elektrik tasarrufu yapılmaktadır. Tesisin geçici faaliyet belgesi bulunmaktadır.

Çamur susuzlaştırması dekantörlerle yapılmakta, katyonik polielektrolit verilmektedir. Günlük olarak yaklaşık 40 ton arıtma çamuru oluşmaktadır. Oluşan çamur her gün bertaraf edilmek üzere lisanslı yakma tesisine gönderilmektedir.



Şekil 3.1. Arıtma tesisi genel görünüm



Şekil 3.2. Çıkış suyu görüntüleri



Şekil 3.3. Çamur susuzlaştırma ünitesi dekantör

### 3.1.2. Numune Alım Şekli

Arıtma çamuru numunesi 20 kg olacak şekilde endüstriyel tipli kalın siyah üç kat çöp poşeti ile kurutulmuş arıtma çamurunun döküldüğü bant sistemi üzerinden alınmış, havayla teması kesilecek şekilde numune alma ve saklama standartlarına uygun olarak alınıp muhafaza edilmiştir.





Şekil 3.4. Atık su arıtma tesisi çamur römork sistemi

### 3.1.3. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Steril plastik şişe kullanılarak alınan 2 kg arıtma çamuru üzerinde yapılan analiz sonuçları Çizelge 3.1’de aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.1. Atık su arıtma tesisi arıtma çamuru karakterizasyonu

Parametre	Birim	Analiz Sonuçları	İnert Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri	Tehlikesiz Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri	Tehlikeli Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri
<b>Eluat Kriterleri</b>					
<b>Antimon</b>	mg/L	<b>&lt;0,001</b>	0,06	0,07	0,5
<b>Arsenik</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,05	0,2	2,5
<b>Bakır</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,2	5	10
<b>Baryum</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	2	10	30
<b>Civa</b>	mg/L	<b>&lt;0,0001</b>	0,001	0,02	0,2
<b>Çinko</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,4	5	20
<b>DOC (Çözünmüş Organik Karbon)</b>	mg/L	<b>18,9</b>	50	80	100
<b>Fenol İndeksi</b>	mg/L	<b>0,092</b>	0,1	-	-
<b>Florür</b>	mg/L	<b>&lt;1</b>	1	15	50
<b>Kadmiyum</b>	mg/L	<b>&lt;0,001</b>	0,004	0,1	0,5
<b>Klorür</b>	mg/L	<b>40,03</b>	80	1500	2500
<b>Kurşun</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,05	1	5
<b>Molibden</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,05	1	3

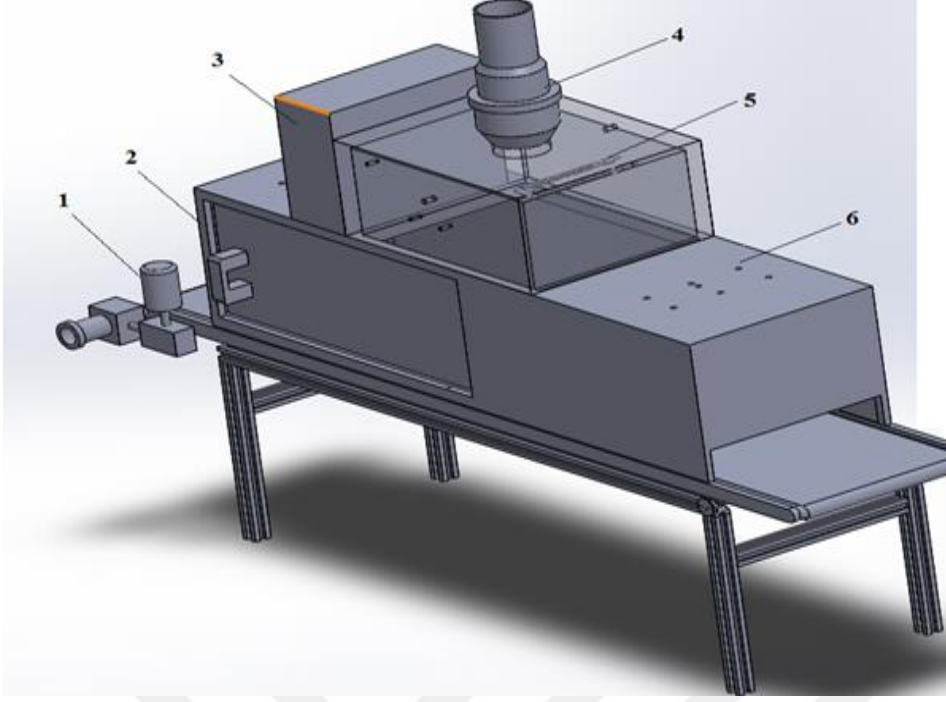
<b>Nikel</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,04	1	4
<b>pH</b>	-	<b>7,26</b>	-	$\geq 6$	-
<b>Selenyum</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,01	0,05	0,7
<b>Sülfat</b>	mg/L	<b>6,7</b>	100	2000	5000
<b>TDS (Toplam Çözünen Katı)</b>	mg/L	<b>400</b>	400	6000	10000
<b>Toplam Krom</b>	mg/L	<b>&lt;0,01</b>	0,05	1	7
<b>Orijinal Atıkta Bakılacak Kriterler</b>					
<b>BTEX (Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen)</b>	mg/kg	<b>0,06</b>	6	-	-
<b>Kızdırma Kaybı (LOI)</b>	%	<b>76,6</b>	-	-	10
<b>Mineral Yağ</b>	mg/kg	<b>105,63</b>	500	-	-
<b>Nem</b>	%	<b>34,88</b>	-	-	-
<b>PCBs</b>	mg/kg	<b>0,07</b>	1	-	-
<b>Toplam Organik Karbon (TOC)</b>	mg/kg	<b>24650</b>	30000	50000	60000
<b>Poliklorlubifeniller (PCBs)</b>	mg/kg	<b>0,07</b>			

### 3.2. Deney Sistemleri

#### 3.2.1. Konveyör Bantlı Kurutma Sistemi

Konveyör kurutma denemeleri 1,8 m bant boyunda,  $60\pm 1$  °C,  $70\pm 1$  °C ve  $90\pm 1$  °C sıcaklıklarda 0,2 m/dk sabit bant hızında ve 1 m/s hava hızında yapılmıştır. Konveyör bantlı kurutucu içindeki sıcaklığı ölçebilmek amacıyla sistem içine bir adet saplama termometre yerleştirilmiştir. (-200 °C) - (+600 °C) sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen PT100 termometredir. Ölçümlenen değerler manuel olarak not alınmıştır.

Ayrıca sisteme dıştan içe doğru olacak şekilde bağlı çubuk saplı termometre ile bant üzerindeki sıcaklığın ölçümü gerçekleştirilmektedir. Yapılan hesaplamalarda bu iki termometrede ölçülen değerlerin ortalamaları kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Konveyör kurutma sistemi (1. Elektrik Motoru, 2. Kurutma odası, 3. Kontrol Paneli, 4. Fan, 5. Isıtıcı, 6. Havalandırma delikleri ) (Tınmaz Köse, 2019)

### 3.2.2. Mikrodalga Kurutma Sistemi

Mikrodalga kurutma sistemi deneyleri için Tekirdağ Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği bölümünde bulunan 2450 MHz frekanslı, 1200 W enerji değerine sahip, döner tablalı 6 kademeli güç seviyesine sahip bir mikrodalga ile çalışılmıştır.

Ayrıca kurutma süresince ürünün koyulacağı mikrodalgaya dayanıklı 9'ar cm çaplarında kaplar ve teraziye bağlamak için ısıya dayanıklı ip kullanılmıştır.

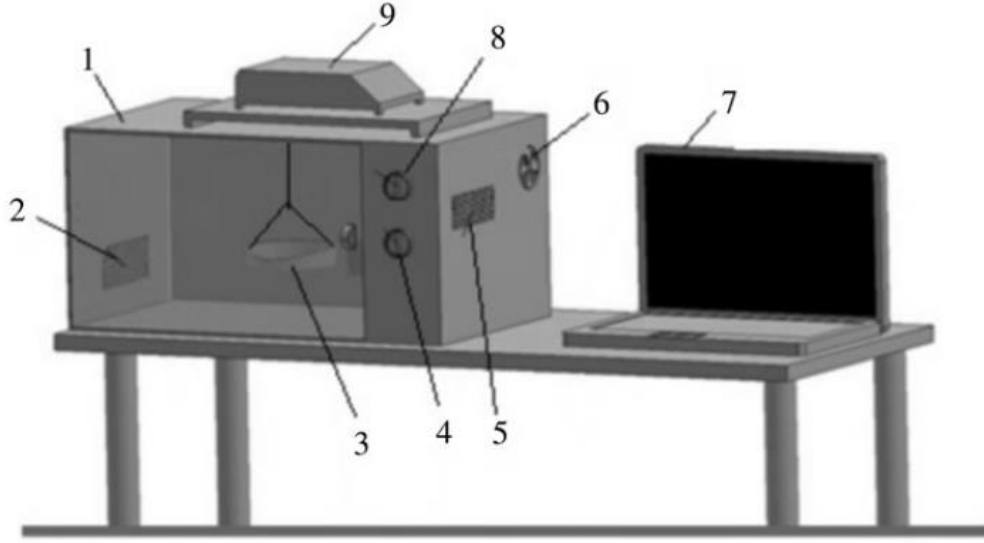




Şekil 3.6. Mikrodalga dıştan görünüm



Şekil 3.7. Mikrodalga deney düzeneğinin genel görünüşü



Şekil 3.8. Mikrodalga Kurutma Sistemi (1: Mikrodalga Fırın, 2: Havalandırma Boşluğu, 3: Cam Kap, 4: Zamanlayıcı, 5: Magnetron, 6: Fan, 7: Bilgisayar, 8: Güç Düğmesi, 9: Hassas Terazi) (Tınmaz Köse, 2019)

### 3.3. Ölçüm Aletleri

#### 3.3.1. Hassas Terazi

Ağırlık kayıpları Şekil 2.5’ de görülen Presca marka, XB 620 M model 0,001 g hassasiyete sahip terazi ile ölçülmüştür. Mikrodalgalı kurutma sisteminde hassas terazi mikrodalga fırının üstüne yerleştirilip özle düzenekle alttan ölçüm olarak ağırlık kayıpları kayıt edilmektedir. Mikrodalgalı kurutma sisteminde terazinin bilgisayara bağlanması ile ölçülen ağırlık değerleri bir yazılım ile bilgisayarda kayıt altına alınmaktadır.

Konveyör bantlı kurutma sisteminde de ağırlık kayıpları aynı hassas terazi ile ölçülmüştür. Mikrodalgalı kurutmanın aksine yapılan ölçümler sisteme direkt bağlı olarak değil manuel olarak sistemin dışından yapılmıştır. Ölçülen değerler not alınmıştır.



Şekil 3.9. Hassas terazi



Şekil 3.10. Nem Ölçer



Şekil 3.11. Konveyör bantlı kurutucu deney sistemi



Şekil 3.12. Konveyör bantlı kurutucu deney sistemi

### 3.3.2. Enerji Ölçüm Cihazı

Konveyör bantlı ve mikrodalga kurutma sistemlerinin her ikisinde de 0,01 kW hassasiyetli dijital elektrik sayacı kullanıldı.



Şekil 3.13. Elektrikli enerji ölçüm sayacı



Şekil 3.14. Kronometre



### 3.3.3. Etüv

Numunelerin nem içeriklerinin tespitinde MINGDA KIT-35A marka etüv kullanılmıştır.



Şekil 3.15. Etüv

### 3.3.4. Termal Kamera

Deney öncesinde çamur yaşken ve kurutma sonrasında Flir Ex E6, Estonya marka termal görüntüleme cihazı ile numunelerin sıcaklık değişimleri ölçümlendi ve fotoğrafları çekildi.



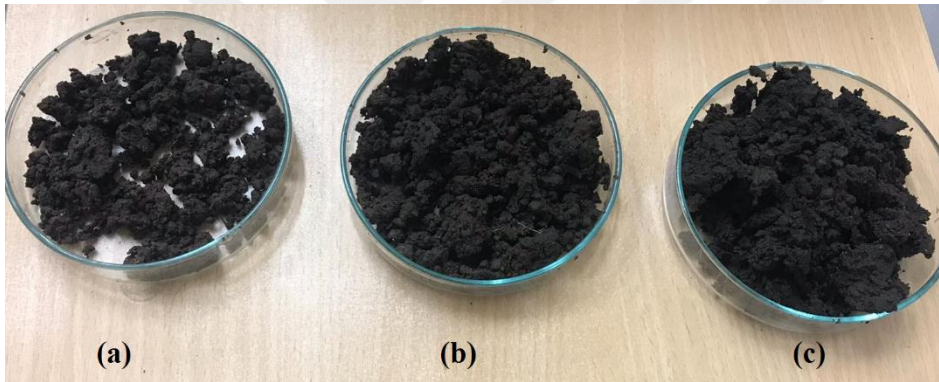
Şekil 3.16. Termal görüntüleme cihazı

### 3.4. Yöntem

#### 3.4.1. Örneklerin Hazırlanması ve Kurutulması

Aritma çamuru, 20 g, 40 g ve 60 g'lık numuneler şeklinde olacak biçimde darası alınmış cam petri kaplarına konulmuştur. Deney sonuçlarının sağlıklı olması için petri kaplarının çaplarının ve boyutlarının benzer olmasına özen gösterilmiştir. Denemelerde kullanılan çamurun başlangıç nem değerlerinin hesaplanabilmesi için MINGDA KIT-35A marka etüvde 105 °C sıcaklıkta 24 saat süresince kuru ağırlık tespiti yapılmıştır.

Cam kaplar sırasıyla alınarak tüm yüzeyleri kapanacak şekilde arıtma çamurları konulmuştur. Numuneleri hazırlama esnasında arıtma çamuruna hiçbir şekilde dışarıdan fiziksel sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Deney öncesinde her bir kabın termal görüntüleme cihazı ile yaşken sıcaklıkları ölçüldü ve görüntülendi.



Şekil 3.17. Yaş arıtma çamuru örnekleri (a) 20 g, (b) 40 g ve (c) 60 g

Mikrodalga kurutma sisteminde, kurutma süresince ürünün koyulacağı kaplar mikrodalgaya dayanıklı olup 9'ar cm çaplarındadır. Ayrıca teraziye bağlamak için ısıya dayanıklı ip kullanılmıştır. Hassas terazinin altına bağlanmış cam kaba sırasıyla 20 g, 40 g, 60 g olacak şekilde önce 360 W sonra 600 W ve en son 800 W güç uygulanmıştır. Mikrodalga fırına bağlı bilgisayarda kullanılan yazılım esnasında her 10 s de bir ağırlık verileri bilgisayara işlenmiştir. Fırına monte edilmiş olan PT100 cihazı sayesinde fırın içi sıcaklık değeri de bilgisayarda kayıt altına alınmıştır. Ayrıca kurutulan numunenin yüzey sıcaklığı mikrodalga fırının yan yüzeyine açılan delikten lazer sıcaklık ölçüm cihazı vasıtasıyla her 10s' de bir ölçülüp bilgisayara işlenmiştir.

Mikrodalga kuruma denemeleri yaş baza (y.b) göre  $86\pm 0,5$  değerine gelince bitirilmiştir. Kurutma denemelerinde son nem değeri sabitleninceye kadar kurutma sürmüştür. İşlem esnasında mikrodalga tarafından tüketilen enerji, enerji sayacı vasıtasıyla ölçülmüştür. Ölçümlenen değerler kayıt altına alınmıştır. Her bir kurutma işlemi sonrasında termal görüntüleme cihazı ile numunelerin sıcaklık değişimleri ölçümlendi ve fotoğrafları çekildi. Denemeler her bir parametre için üç kez tekrar edilmiştir. Verilerin ortalamaları kullanılmıştır.

Konveyör bantlı kurutucu ile yapılan işlemde de yine 20 g, 40 g ve 60 g' lık numuneler hazırlanarak kaplara homojen bir şekilde konulmuştur. Numuneleri hazırlama esnasında arıtma çamuruna hiçbir şekilde dışarıdan fiziksel sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır.

Deney öncesinde her bir kabın termal görüntüleme cihazı ile yaşken sıcaklıkları ölçümlendi ve fotoğrafları çekildi. Cam petri kaplar konulan numuneler konveyör banda arka arkaya yerleştirildi. Deneyde kullanılan konveyör bant 2000 Watt gücünde 2370x50x40 mm boyutlarındadır. Deney sistemi 0,2 m/dk ve 1 m/s hava hızında yapılacak şekilde ayarlanmış,  $60\pm 1$  °C,  $70\pm 1$  °C ve  $90\pm 1$  °C sıcaklıklarında çalışılmıştır.

Kurutma esnasında enerji ölçümleri, enerji ölçer vasıtasıyla ölçülmüş, sonuçlar kayıt altına alınmıştır. İşlem sırasında sıcaklık ölçümleri iki farklı yolla yapılmış, ilkinde sistem içindeki sıcaklığı ölçebilmek için saplama termometre yerleştirilmiş, gösterdiği değerler not alınmıştır. İkinci ölçüm metodunda; sisteme dıştan- içe doğru olacak şekilde bağlı çubuk saplı termometre ile çıkıştaki sıcaklığın ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda bu iki termometrede ölçülen değerlerin ortalamaları kullanılmıştır. Kurutma esnasında her 15 dakikada bir cam petri kaplar hassas terazi ile ölçülerek ağırlıkları not alınmıştır. Ayrıca termal görüntüleme cihazı ile numunenin sıcaklıkları ölçümlenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Çamurlar kap içerisine ince tabaka şeklinde yerleştirilmiştir. Denemeler  $79\pm 0,5$  (y.b) değerine gelince bitirilmiştir. Kurutma denemelerinde son nem değeri sabitleninceye kadar kurutma sürmüştür. Denemeler her bir parametre için üç kez tekrar edilmiştir. Verilerin ortalamaları kullanılmıştır.



### 3.4.2. Nem Analizi

Denemelerde kullanılan çamurun başlangıç nem değerlerinin hesaplanabilmesi için MINGDA KIT-35A marka etüvde 105 °C sıcaklıkta 24 saat süresince kuru ağırlık tespiti yapılmıştır. Yapılan kuru ağırlık tespiti sonucunda ürünlerin başlangıç nem değeri %96±0.5 (y.b) olarak belirlenmiştir.

Ürünlerin nem içeriği yaş baza göre eşitlik 1' deki gibi hesaplandıktan sonra boyutsuz nem oranı konveyör kurutma denemelerinde eşitlik 2, mikrodalga kurutma denemelerinde eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır (Çelen vd., 2015, 2016). Mikrodalga fırın içinde denge nem içeriği sıfır kabul edilmiştir.

$$m = \frac{M_y - M_k}{M_y} \quad (3.1)$$

$$M_R = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} \quad (3.2)$$

$$M_R = \frac{m}{m_o} \quad (3.3)$$

Bu eşitliklerde;

M<sub>k</sub>: ürünün kuru kütlesi (g), M<sub>y</sub>: ürünün yaş kütlesi (g), M<sub>R</sub>: boyutsuz nem oranı, m: ürünün belli bir zamandaki nem içeriği (g.su/g.yaş madde), m<sub>e</sub>: denge nem içeriği (g.su/g.yaş madde), m<sub>o</sub>: ilk nem içeriği (g.su/g.yaş madde)

### 3.4.3. Matematiksel Modelleme

Son yıllarda gittikçe artan bir problem olan arıtma çamurlarının kurutulması ve bertarafı konusu yenilikçi çözüm arayışları bu hususta ar-ge faaliyetleri yapılmaktadır. Daha etkin bir kurutmanın gerçekleştirilebileceği, düşük enerjili ve maliyetli sistem arayışları iyi tasarlanmış yeni sistemlerle mümkündür. Söz konusu sistemler boyutları küçültülüp yalıtkanlığı tam yapılmış böylelikle enerji tasarruflu ve düşük maliyetli sistemler haline getirilebilmektedir. Sadece kullanılan malzemelerin optimizasyonu ve dış etkenlerin iyileştirilmesi ile kurutma kalitesi artmaz aynı zamanda kurutulacak materyalin biyolojik yapısı da ciddi önem arz eder. Kurutma işleminin mikroskop altındaki incelemesinde dış etkenlerin ciddi bir önem arz etmediği, daha çok materyalin iç yapısıyla ilgili olduğu görülmüştür. Mesela, kurutulan organik materyalin içeriğinde kuruma işlemi esnasında bir dizi fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar oluşur bir reaksiyon

bir diğeri tetikleyebilmektedir. Tüm bu karmaşıklığın etkisiyle işlenecek materyal içeriğindeki nem transfer döngüsü etkilenmektedir.

Bu çalışmada incelenen arıtma çamurları yapısı itibariyle heterojen bir yapıya sahiptir bu sebeple tekdüze bir kuruma ısınma davranışı sergilememektedirler. Çünkü ısınma prosesi esnasında gerçekleşen ısı ve kütle yer değiştirmesi zincirleme etkilere sebep olarak başka reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu da teorikte homojen bir yapının kururken ya da ısınırken gösterdiği davranışlarla arıtma çamuru gibi homojen olmayan yapıdaki bir materyalin gösterdiği davranışların aynı olması beklenemez. Bu nedenle bu tür ürünler değişik sistemler ve momentum transferi, malzeme bilgisi, kütle bilgisi kullanılarak kendine özgü modeller vasıtasıyla incelenmelidir (Bingöl ve Devres, 2010).

### **3.4.3.1. Kuruma davranışının matematiksel modellenmesi**

Arıtma çamuru gibi kompleks yapılu bileşiklerin kurutulması işleminin modellenmesinde ampirik ve yarı ampirik modellemeler kullanılır. Teorik modellerde ampirik ve yarı ampirik modellemelerin aksine birçok parametre iç içedir ve karmaşıktır bu nedenle tercih edilmezler. Karmaşık bileşiklerin bir araya geldiği arıtma çamuru gibi maddelerde ampirik ve yarı ampirik modeller kullanılır (Çelen,2010).

Başlıca ampirik ve yarı ampirik modeller; Newton, Page, Modified Page, Henderson&Pabis, Geometric, Wang&Singh, Two term, Two term exponential, Logarithmic, Logistic, Midilli ve diğ., Verna ve diğ. ve Difüzyon modelidir. Yapılan araştırmalarda; arıtma çamuru, ahşap malzemeler ve gıdaların kurutulmasında difüzyon modellemesi kullanılmaktadır (Bennamoun, Chen ve Afzal, 2016).

Bu çalışmadaki modellemeler yapılırken lineer olmayan regresyon analizi kullanılarak deney sonucunda elde edilen nem azalması incelenerek modellemeler yapılmıştır (Çelen vd., 2016) bilgisayar programı vasıtasıyla kod bulunmuş, modelin deneysel verileri ifade etmedeki uygunluğuna korelasyon katsayısının (r) aldığı değere göre karar verilmiştir. Standart hata ( $e_s$ ) ve chi-kare ( $\chi^2$ ) değerleri modelin uygunluğunu ölçebilmek için kullanılmıştır. Bu büyüklükler eşitlik 4-8' de tanımlanmıştır (Çelen,2010):

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (3.4)$$

$$e_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_o} (mr_{pre,i} - mr_{exp,i})^2}{n_o}} \quad (3.5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} (mr_{pre,i} - mr_{exp,i})^2}{n_o - m_c} \quad (3.6)$$

$$S_t = \sum (mr_{exp,i} - m_{ort})^2 \quad (3.7)$$

$$S_r = \sum (mr_{exp,i} - m_{ort})^2 \quad (3.8)$$

r: korelasyon katsayısı,  $e_s$ : standart sapma, chi-kare,  $mr_{exp}$ : deney sonucu elde edilen boyutsuz nem oranı,  $mr_{pre}$ : uygun modelde elde edilen boyutsuz nem oranı,  $n_o$ : gözlem sayısı,  $n_c$ : kurutma modelindeki sabitlerin sayısı olarak verilmiştir.

Model sonuçları ile deneysel veriler arasındaki uygunluk ne kadar iyi ise korelasyon katsayısı 1' e o kadar yakın, standart hata ve chi-kare ise 0' a o kadar yakın olmaktadır.

Çizelge 3.2. Deney sonuçlarını ifade etmede kullanılan modeller

Model İsmi	Model Eşitliği
Page	$MR = exp(-kt^n)$
Henderson&Pabis	$MR = a exp(-kt)$
Wang&Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Logarithmic	$MR = a_0 + a exp(-kt)$
Newton	$MR = exp(-kt)$

#### 3.4.4. Termal Analiz

Deney öncesinde çamur yaşken ve kurutma sonrasında termal görüntüleme cihazı ile numunelerin sıcaklık değişimleri ölçümlenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Termal görüntüleme ile numunenin en fazla ısıtıldığı bölgeleri ve ısının homojen şekilde dağılıp dağılmadığı analiz

edilmiş olur. Her iki kurutma sistemindeki tüm güç seviyeleri ve kurutma sıcaklıkları için tüm numunelerin termal görüntüleri alınmıştır.

#### **3.4.5. Kalorifik Değer Analizi**

Bir maddenin ısı değeri atığın bileşimine dayanan analiz, tahmini analiz, kalorimetre ölçümü veya elementel analiz gibi çeşitli metotlarla belirlenir. Atığın bileşimine dayanan analiz metodunda elementel analiz metodunda kullanılan hesaplama yönetiminin birtakım değişiklikler yapılmasıyla elde edilir. Tahmini analiz metodunda; atığın uçucu madde ve inert madde bilgileri kullanılarak uçucu ve inert maddelerin yüksek sıcaklıklarda yaşadığı kütle kaybı ölçümlenerek bulunur. Kalorimetre ölçümü en sık kullanılan yöntemlerdendir. Bomba kalorimetre ile ölçülür. Elementel analizde ise DuLong denklemi vasıtasıyla numunenin kimyasal yapısında bulunan karbon, hidrojen, oksijen ve kükürt miktarları kullanılarak ölçümlenir (Öztürk, 2014).

#### **3.4.6. Enerji Analizi**

Konveyör bantlı ve mikrodalga kurutma sistemlerinin her ikisinde de 0,01 kW hassasiyetli dijital elektrik sayacı kullanıldı. Kurutma işlemlerinin her ikisinde de tüm güç seviyeleri ve kurutma sıcaklıkları altında yapılan enerji ölçümlerinin başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki fark hesaplanarak kurutma işlemi boyunca harcanan enerji miktarı ölçülmüştür.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

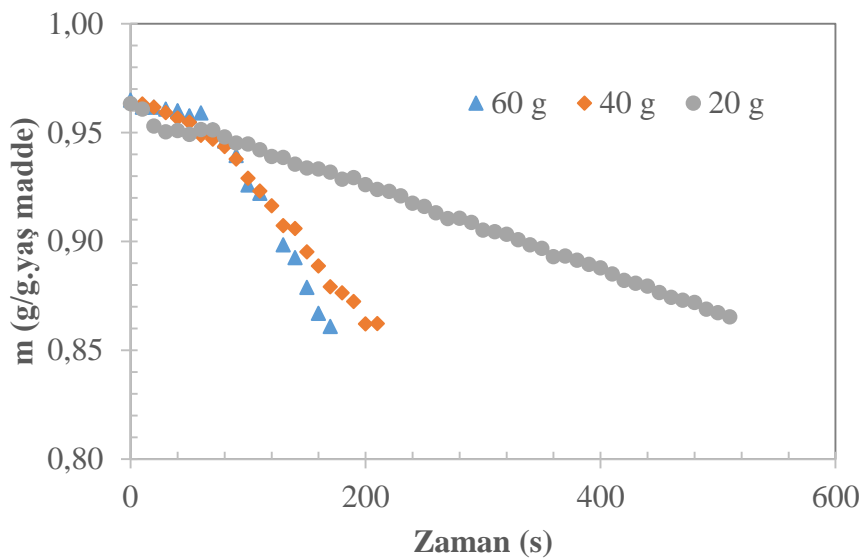
### 4.1. Nem Değişimi Bulguları

Mikrodalga kurutma sisteminde 20 g, 40 g, 60 g numuneler sırasıyla 360 W, 600 W ve 800 W güç altında kurutulmuştur. Başlangıç ağırlıkları ve deney esnasında uygulanan güç altındaki yaşanan ağırlık kayıpları, mikrodalga fırına bağlı bilgisayarda kullanılan Balint programı sayesinde kurutma esnasında her 10 s de bir bilgisayara işlenmiştir.

360 W güçte 20g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 67,97 g ve nem içeriği 0,9629 g/g.yaş madde iken 8 dakika 29 saniye sonra numune ağırlığı 61,31 g ve nem içeriği 0,8650 g/g.yaş maddeye düşmüştür. Numunelerin ağırlık ölçümlenmeleri 10 s' de bir olacak şekilde alınmıştır.

360 W güçte 40g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 87,83 g ve nem içeriği 0,9713 g/g.yaş madde iken 3 dakika 20 saniye sonra numune ağırlığı 78,94 g ve nem içeriği 0,8701 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

360 W güçte 60 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 109,17 g ve nem içeriği 0,9769 g/g.yaş madde iken 3 dakika sonra numune ağırlığı 96,57 g ve nem içeriği 0,8615 g/g.yaş maddeye düşmüştür. Şekil 2.13' de görüldüğü üzere, alınan deney sonuçlarına göre uygulanan sabit güç altında numunedeki ağırlık artışı kuruma süresi ile doğru orantılıdır.

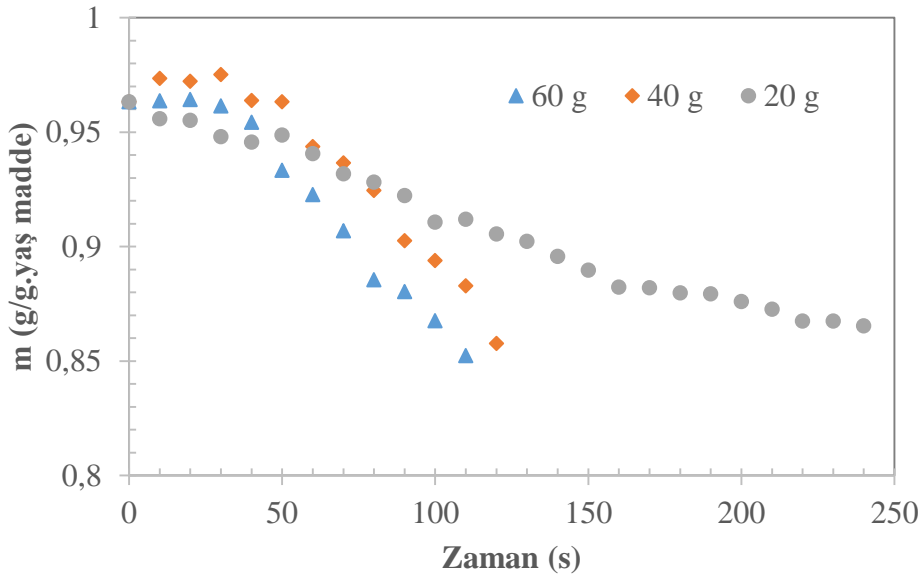


Şekil 4.1. 360 W mikrodalga gücünde kurutulan çamurun nem değişimi

600 W güçte 20 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 68,55 g ve nem içeriği 0,9635 g/g.yaş madde iken 4 dakika 9 saniye sonra numune ağırlığı 61,84 g ve nem içeriği 0,8656 g/g.yaş maddeye düşmüştür. Numunelerin ağırlık ölçümlenmeleri 10 s' de bir olacak şekilde alınmıştır.

600 W güçte 40 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 89,30 g ve nem içeriği 0,9720 g/g.yaş madde iken 1 dakika 50 saniye sonra numune ağırlığı 78,62 g ve nem içeriği 0,8524 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

600 W güçte 60 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 107,65 g ve nem içeriği 0,9768 g/g.yaş madde iken 2 dakika sonra numune ağırlığı 94,82 g ve nem içeriği 0,8576 g/g.yaş maddeye düşmüştür. Şekil 2.14' de görüldüğü üzere alınan deney sonuçlarına göre uygulanan sabit güç altında numunedeki ağırlık artışı kuruma süresi ile doğru orantılıdır.

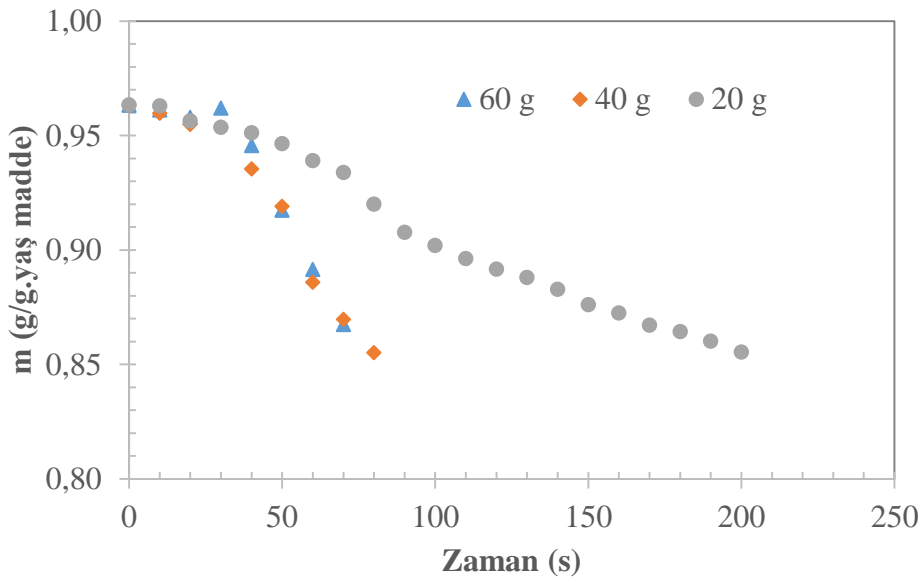


Şekil 4.2. 600 W mikrodalga gücünde kurutulan çamurun nem değişimi

800 W güçte 20 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 69,24 g ve nem içeriği 0,9639 g/g.yaş madde iken 3 dakika 10 saniye sonra numune ağırlığı 62,39 g ve nem içeriği 0,8650 g/g.yaş maddeye düşmüştür. Numunelerin ağırlık ölçümlenmeleri 10 s' de bir olacak şekilde alınmıştır.

800 W güçte 40 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 86,52 g ve nem içeriği 0,9711 g/g.yaş madde iken 1 dakika 20 saniye sonra numune ağırlığı 77,16 g ve nem içeriği 0,8629 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

800 W güçte 60 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 109,90 g ve nem içeriği 0,9773 g/g.yaş madde iken 1 dakika 20 saniye sonra numune ağırlığı 96,99 g ve nem içeriği 0,8598 g/g.yaş maddeye düşmüştür. Şekil 2.14' de görüldüğü üzere alınan deney sonuçlarına göre uygulanan sabit güç altında numunedeki ağırlık artışı kuruma süresi ile doğru orantılıdır.

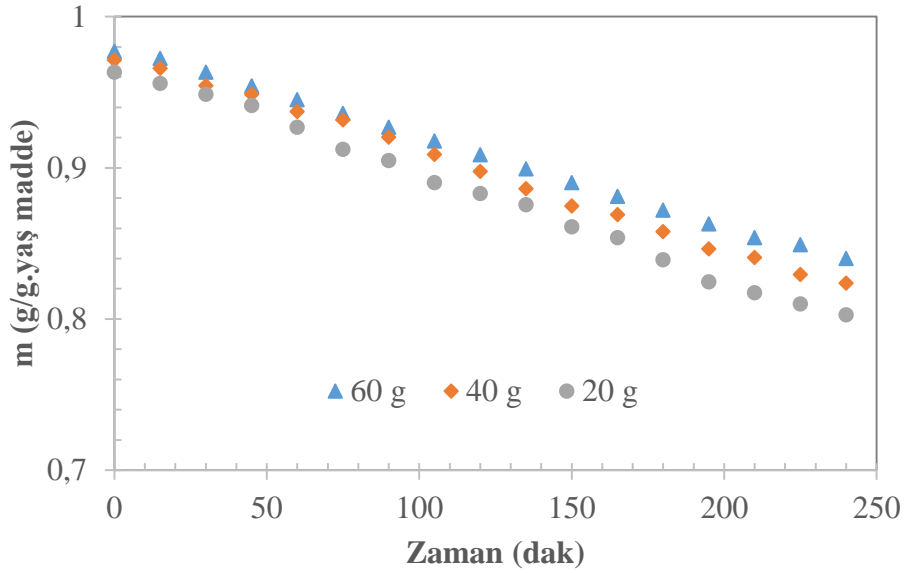


Şekil 4.3. 800 W mikrodalga gücünde kurutulan çamurun nem değişimi

Konveyör bantlı kurutma sisteminde 20 g, 40 g, 60 g numuneler sırasıyla 60 °C, 70 °C ve 90 °C sıcaklık altında kurutulmuştur. Deneyde kullanılan konveyör bant 2000 Watt gücünde 2370 x 50 x 40 mm boyutlarındadır. Bant hızı 0,2 m/dk ve 1 m/s hava hızında yapılacak şekilde ayarlanmış, 60±1 °C, 70±1 °C ve 90±1 °C sıcaklıklarında çalışılmıştır. Kurutma esnasında enerji ölçümleri, enerji ölçer vasıtasıyla ölçülmüş, sonuçlar kayıt altına alınmıştır. İşlem sırasında sıcaklık ölçümleri iki farklı yolla yapılmış, ilkinde sistem içindeki sıcaklığı ölçebilmek için saplama termometre yerleştirilmiş, gösterdiği değerler not alınmıştır.

İkinci ölçüm metodunda; sisteme dıştan içe doğru olacak şekilde bağlı çubuk saplı termometre ile çıkıştaki sıcaklığın ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalarda bu iki termometrede ölçülen değerlerin ortalamaları kullanılmıştır.

Kurutma esnasında her 15 dakikada bir cam petri kaplar hassas terazi ile ölçülerek ağırlıkları not alınmıştır. Denemeler  $79 \pm 0.5$  (y.b) değerine gelince bitirilmiştir. Kurutma denemelerinde son nem değeri sabitleninceye kadar kurutma sürmüştür. Denemeler her bir parametre için üç kez tekrar edilmiştir. Verilerin ortalamaları kullanılmıştır.



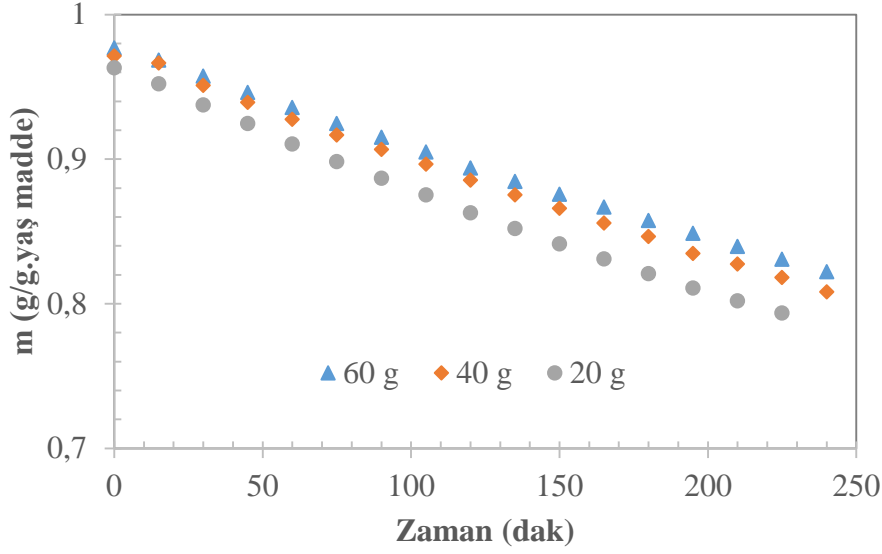
Şekil 4.4. 60 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun nem değişimi

Şekil 2.17' de görüldüğü üzere; 60 °C sıcaklıkta 20 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 68,50 g ve nem içeriği 0,9632 g/g.yaş madde iken 255 dakika sonra numune ağırlığı 56,50 g ve nem içeriği 0,7880 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

60 °C sıcaklıkta 40 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 88 g ve nem içeriği 0,9713 g/g.yaş madde iken 300 dakika sonra numune ağırlığı 72 g ve nem içeriği 0,7896 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

60 °C sıcaklıkta 60 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 109,50 g ve nem içeriği 0,9770 g/g.yaş madde iken 345 dakika sonra numune ağırlığı 89 g ve nem içeriği 0,7898 g/g.yaş maddeye düşmüştür.



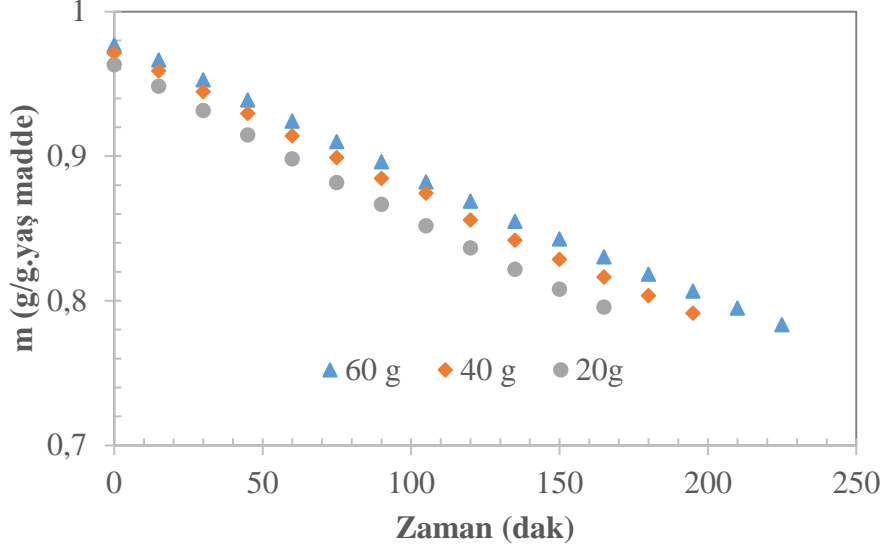


Şekil 4.5. 70 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun nem değişimi

Şekil 2.18' de görüldüğü üzere; 70 °C sıcaklıkta 20 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 68,50 g ve nem içeriği 0,9632 g/g.yaş madde iken 225 dakika sonra numune ağırlığı 56,88 g ve nem içeriği 0,7936 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

70°C sıcaklıkta 40g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 88,05 g ve nem içeriği 0,9714 g/g.yaş madde iken 255 dakika sonra numune ağırlığı 72,86 g ve nem içeriği 0,7989 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

70 °C sıcaklıkta 60g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 109,43 g ve nem içeriği 0,9770 g/g.yaş madde iken 285 dakika sonra numune ağırlığı 89,63 g ve nem içeriği 0,7960 g/g.yaş maddeye düşmüştür.



Şekil 4.6. 90 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun nem değişimi

Şekil 2.19' da görüldüğü üzere; 90 °C sıcaklıkta 20 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 68,50 g ve nem içeriği 0,9632 g/g.yaş madde iken 165 dakika sonra numune ağırlığı 57,02 g ve nem içeriği 0,7956 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

90 °C sıcaklıkta 40 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 88,05 g ve nem içeriği 0,9714 g/g.yaş madde iken 195 dakika sonra numune ağırlığı 72,20 g ve nem içeriği 0,7914 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

90 °C sıcaklıkta 60 g' lık numune üzerinde yapılan kurutma işlemi başlangıcında numune ağırlığı 109,45 g ve nem içeriği 0,9770 g/g.yaş madde iken 225 dakika sonra numune ağırlığı 88,26 g ve nem içeriği 0,7834 g/g.yaş maddeye düşmüştür.

Farklı ağırlıklarda alınan çamur örneklerinin kuruma karakteristikleri Şekil 2.13, Şekil 2.14, Şekil 2.15'de verilmiştir. Kuruma zamanı, mikrodalga gücünden etkilenmekte, kurutma gücünün artmasına paralel şekilde nem kaybı hızlanmakta ve kuruma süresi kısalmaktadır. Numune kütlelerinin düşmesine eş kuruma zamanında da farklılıklar görülmektedir. Bu olgunun nedeni numunedeki nemin homojen olmayışı, ısı enerjisinin iç kısımlarda çokça oluşması ve mikrodalga enerjisinin bant hızından kaynaklanan ürün ile etkileşiminin değişken olması kuruma zamanlarında çeşitliliğe yol açmaktadır.

360 W mikrodalga gücü için bant hızına göre sırasıyla 170, 210 ve 510 saniyede, 600 W mikrodalga gücü için sırasıyla 110, 120 ve 240 saniyede ve 800 W mikrodalga gücü için sırasıyla 70, 80 ve 200 saniyede kuruma işlemleri gerçekleşmiştir.

Konveyör kurutmada ise 60 °C kurutma sıcaklığı için bant hızına göre sırasıyla 255, 300 ve 345 dakikada, 70 °C kurutma sıcaklığı için sırasıyla 225, 255 ve 285 dakikada ve 90 °C kurutma sıcaklığı için sırasıyla 165, 195 ve 225 dakikada kuruma işlemleri gerçekleşmiştir.

Her iki kurutmanın kurutma mekanizmaları farklı olduğu için farklı kuruma süreleri oluşmuştur. Mikrodalga kurutmada hacimsel ısıtmadan dolayı konveyör kurutmaya göre kuruma daha hızlı gerçekleşmiştir.

#### **4.2. Matematiksel Modelleme Bulguları**

Deney sonuçları lineer olmayan regrasyon analizi sonucuna göre incelenip, bulunan değerler Çizelge 4.1- Çizelge 4.6 özetlenmiştir. Mikrodalga gücünün artması ile enerji tüketimi artmıştır. En az enerji tüketimi 800 W ve 60 g değerlerinde 0,015 kWh olarak ölçülmüştür. Kuruma zamanları dikkate alındığında da aynı değerler söz konusudur. Kurutma sıcaklığının artması ile kuruma süresi azalmış, enerji tüketimi azalmıştır. En az enerji tüketimi 90° C ve 20 g değerlerinde 4,1 kWh olarak ölçülmüştür.

Mikrodalga kurutma sisteminde 60 g' lık numune için hazırlanan modelleme değerleri Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1' de verilen modeller içerisinde 60 g için hesaplanan korelasyon katsayısı bire en yakın (0,902-0,986), standart hata (0,014-0,05) ve  $\chi^2$  ( $2 \times 10^{-5}$ ;  $2,1 \times 10^{-4}$ ) sifira en yakın olduğu için Logaritmik modelin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak model sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusudur. Mikrodalga güçleri arasında en iyi uygunluk kurumanın en hızlı gerçekleştiği 800 W gücünde söz konusu olmaktadır.

Çizelge 4.1. Mikrodalga kurutma sisteminde 60 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri

Model	M.G.	Sabitler		r	$\chi^2$	$e_s$
Newton	360 Watt	$k=8,22 \times 10^{-4}$		0,881	$1,5 \times 10^{-4}$	0,012
	600 Watt	$k=1,43 \times 10^{-3}$		0,957	$7,3 \times 10^{-4}$	0,009
	800 Watt	$k=1,83 \times 10^{-3}$		0,865	$1,9 \times 10^{-4}$	0,014
Logaritmik	360 Watt	$k=-0,012$ $a=-0,017$	$a_0=0,986$	0,986	$2 \times 10^{-5}$	0,005
	600 Watt	$k=0$ $a=123,357$	$a_0=-122,366$	0,968	$6,9 \times 10^{-5}$	0,008
	800 Watt	$k=-0,005$ $a=-0,255$	$a_0=1,246$	0,902	$2,1 \times 10^{-4}$	0,014
Page	360 Watt	$k=7,73 \times 10^{-4}$	$n=0$	0,871	$1,7 \times 10^{-4}$	0,013
	600 Watt	$k=1,33 \times 10^{-3}$	$n=0$	0,943	$1,1 \times 10^{-4}$	0,01
	800 Watt	$k=1,71 \times 10^{-3}$	$n=0$	0,856	$2,5 \times 10^{-4}$	0,016
Henderson ve Pabis	360 Watt	$a=0,988$	$k=0,01$	0,906	$1,3 \times 10^{-4}$	0,006
	600 Watt	$a=0,993$	$k=0,01$	0,963	$7 \times 10^{-5}$	0,011
	800 Watt	$a=0,996$	$k=0,02$	0,868	$2,3 \times 10^{-4}$	0,011
Wang ve Singh	360 Watt	$a=-0,001$	$b=3,51 \times 10^{-7}$	0,885	$1,5 \times 10^{-4}$	0,012
	600 Watt	$a=-0,001$	$b=4,46 \times 10^{-7}$	0,957	$8,1 \times 10^{-5}$	0,009
	800 Watt	$a=-0,001$	$b=6,55 \times 10^{-6}$	0,887	$1,9 \times 10^{-4}$	0,014

Çizelge 4.2' de verilen modeller içerisinde 40 g için hesaplanan korelasyon katsayısı bire en yakın (0,937-0,978), standart hata (0,012-0,005) ve  $\chi^2$  ( $3 \times 10^{-5}$ ;  $1,2 \times 10^{-4}$ ) sifira en yakın olduğu için Logaritmik modelin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak model sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusudur. Mikrodalga güçleri arasında en iyi uygunluk kurumanın en hızlı gerçekleştiği 800 W gücünde söz konusu olmaktadır.

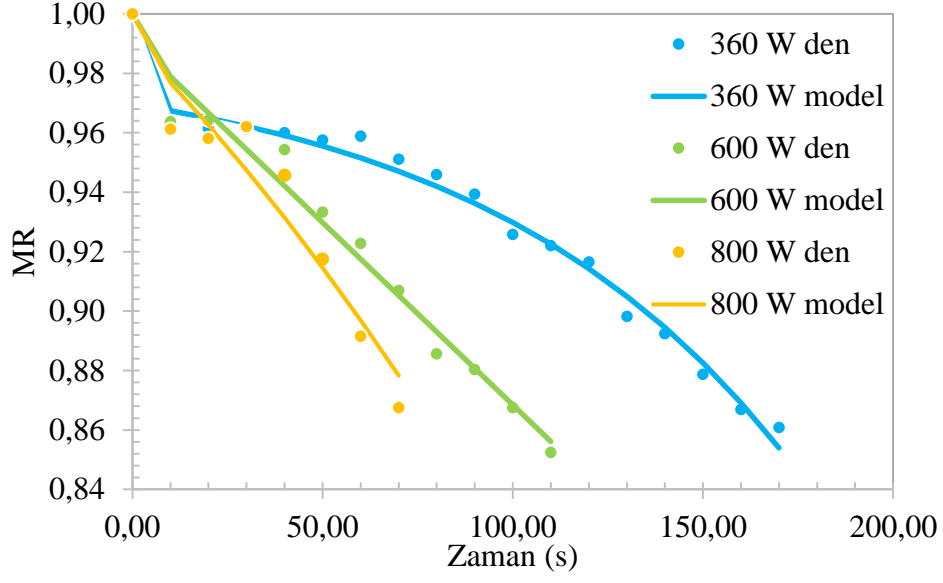
Çizelge 4.2. Mikrodalga kurutma sisteminde 40 g' lık numune için hazırlanan modelleme değerleri

Model	M.G.	Sabitler		r	$\chi^2$	$e_s$
Newton	360 Watt	$k=7,42 \times 10^{-4}$		0,909	$1,1 \times 10^{-4}$	0,011
	600 Watt	$k=1,10 \times 10^{-4}$		0,927	$1,2 \times 10^{-4}$	0,011
	800 Watt	$k=1,92 \times 10^{-4}$		0,929	$1,2 \times 10^{-4}$	0,011
Logaritmik	360 Watt	$k=6,83 \times 10^{-6}$ $a=81,92$	$a_0 = -80,94$	0,978	$3 \times 10^{-5}$	0,005
	600 Watt	$k=7,08 \times 10^{-6}$ $a=152,08$	$a_0 = -151,07$	0,937	$1,2 \times 10^{-4}$	0,011
	800 Watt	$k=1,49 \times 10^{-5}$ $a=110,34$	$a_0 = -109,34$	0,944	$1,4 \times 10^{-4}$	0,012
Page	360 Watt	$k=0,001$	$n=0$	0,894	$1,4 \times 10^{-4}$	0,012
	600 Watt	$k=0,001$	$n=0$	0,918	$1,5 \times 10^{-4}$	0,012
	800 Watt	$k=0,002$	$n=0$	0,916	$1,7 \times 10^{-4}$	0,013
Henderson ve Pabis	360 Watt	$a=0,981$	$k=0,01$	0,974	$3,4 \times 10^{-5}$	0,006
	600 Watt	$a=1,00$	$k=0,01$	0,929	$1,3 \times 10^{-4}$	0,011
	800 Watt	$a=0,992$	$k=0,02$	0,937	$1,3 \times 10^{-4}$	0,011
Wang ve Singh	360 Watt	$a=-0,001$	$b=-9,65 \times 10^{-7}$	0,92	$1 \times 10^{-4}$	0,01
	600 Watt	$a=-0,001$	$b=-3,47 \times 10^{-6}$	0,962	$6,8 \times 10^{-5}$	0,008
	800 Watt	$a=-0,002$	$b=-5,44 \times 10^{-7}$	0,932	$1,4 \times 10^{-4}$	0,012

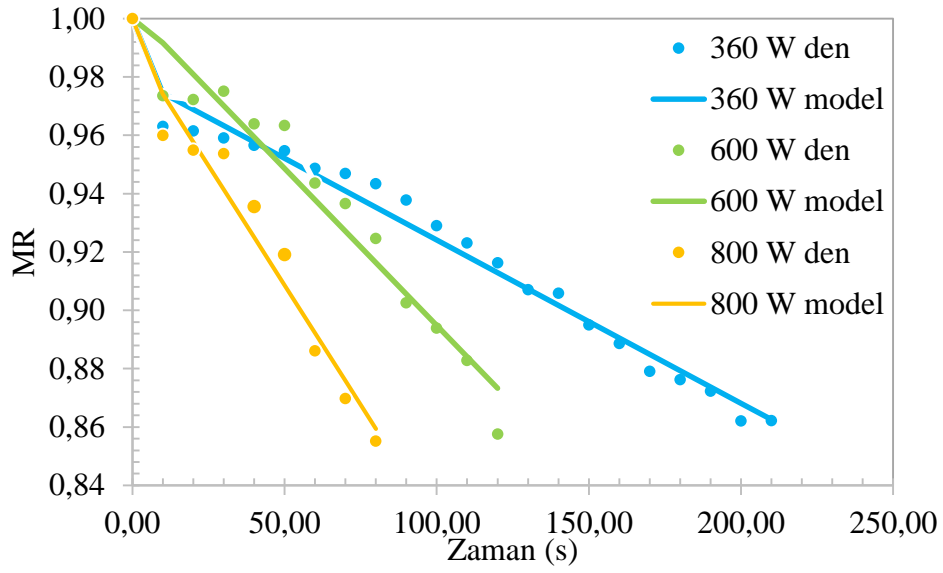
Çizelge 4.3' de verilen modeller içerisinde 20 g için hesaplanan korelasyon katsayısı bire en yakın (0,985-0,996), standart hata (0,002-0,004) ve  $\chi^2$  ( $3,1 \times 10^{-6}$ ;  $1,6 \times 10^{-5}$ ) sifira en yakın olduğu için Logaritmik modelin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Model sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusudur. Mikrodalga güçleri arasında en iyi uygunluk kurumanın en hızlı gerçekleştiği 800 W gücünde söz konusu olmaktadır.

Çizelge 4.3. Mikrodalga kurutma sisteminde 20 g'lık numune için hazırlanan modelleme değerleri

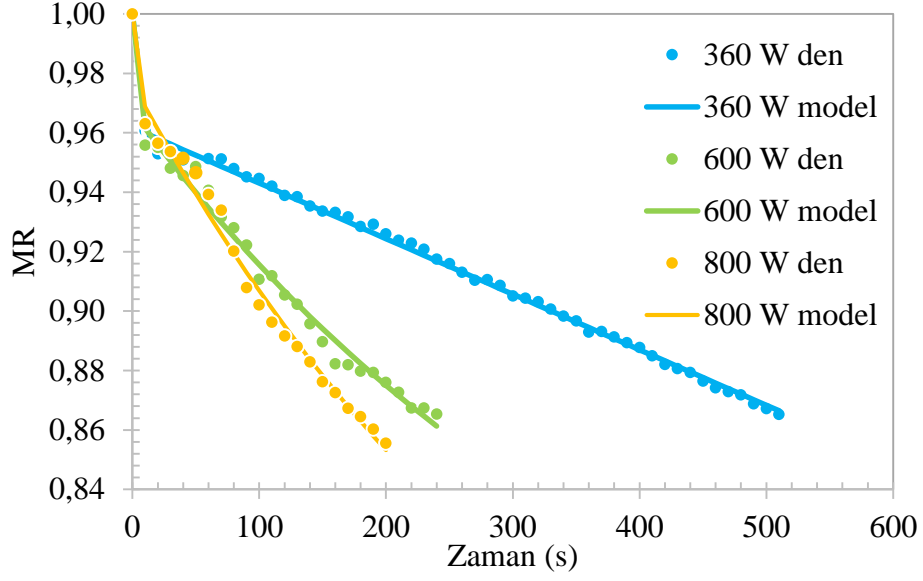
Model	M.G.	Sabitler		r	$\chi^2$	$e_s$
Newton	360 Watt	$k=3,2 \times 10^{-4}$		0,578	$3,3 \times 10^{-4}$	0,018
	600 Watt	$k=0,001$		0,651	$3,4 \times 10^{-4}$	0,018
	800 Watt	$k=0,001$		0,848	$2 \times 10^{-4}$	0,014
Logaritmik	360 Watt	$k=0$ $a=42,937$	$a_0 = -41,975$	0,996	$3,1 \times 10^{-6}$	0,002
	600 Watt	$k=0,02$ $a=0,239$	$a_0 = 0,729$	0,985	$1,6 \times 10^{-5}$	0,004
	800 Watt	$k=0,003$ $a=0,302$	$a_0 = 0,674$	0,986	$2 \times 10^{-5}$	0,004
Page	360 Watt	$k=2,98 \times 10^{-4}$	$n=0$	0,584	$3,6 \times 10^{-4}$	0,019
	600 Watt	$k=6,69 \times 10^{-4}$	$n=0$	0,622	$3,8 \times 10^{-4}$	0,02
	800 Watt	$k=8,19 \times 10^{-4}$	$n=0$	0,824	$2,4 \times 10^{-4}$	0,016
Henderson ve Pabis	360 Watt	$a=0,963$	$k=0,0002$	0,995	$3,9 \times 10^{-6}$	0,002
	600 Watt	$a=0,962$	$k=0,0005$	0,98	$2,1 \times 10^{-5}$	0,005
	800 Watt	$a=0,972$	$k=0,001$	0,984	$2,3 \times 10^{-5}$	0,005
Wang ve Singh	360 Watt	$a=0$	$b=4,59 \times 10^{-7}$	0,775	$1,8 \times 10^{-4}$	0,013
	600 Watt	$a=-0,001$	$b=2,43 \times 10^{-6}$	0,887	$1,1 \times 10^{-4}$	0,011
	800 Watt	$a=-0,001$	$b=2,71 \times 10^{-6}$	0,948	$7,2 \times 10^{-5}$	0,008



Şekil 4.7. Mikrodalga kurutma sistemi – Log modeli (60g)



Şekil 4.8. Mikrodalga kurutma sistemi – Log modeli (40g)



Şekil 4.9. Mikrodalga kurutma sistemi – Log modeli (20g)

Konveyör Bantlı kurutma sisteminde 60 g' lık numune için hazırlanan modelleme değerleri Çizelge 4.4'de özetlenmiştir. Deneysel verilere değerlere göre; Henderson ve Pabis modeli en uygun modeldir.



Çizelge 4.4. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 60 g' lık numune için hazırlanan modelleme değerleri

Model	M.G.	Sabitler		r	$\chi^2$	$e_s$
Newton	90 C	$k= 1,14 \times 10^{-3}$		0,979	$7,39 \times 10^{-5}$	0,009
	70 C	$k= 8,47 \times 10^{-4}$		0,96	$1,14 \times 10^{-4}$	0,011
	60 C	$k= 7,29 \times 10^{-4}$		0,977	$7,58 \times 10^{-5}$	0,009
Logaritmik	90 C	$k= 0$ $a= -224,83$	$\alpha_0 = 225,81$	0,998	$6,23 \times 10^{-6}$	0,002
	70 C	$k= 0,001$ $a=0,654$	$\alpha_0 = 0,325$	1	$6,23 \times 10^{-6}$	0,001
	60 C	$k= 0,001$ $a=0,672$	$\alpha_0 = 0,312$	0,999	$6,23 \times 10^{-6}$	0,001
Page	90 C	$k=1,04 \times 10^{-3}$	$n=0$	0	0,012	0,111
	70 C	$k=7,23 \times 10^{-4}$	$n=0$	0	0,01	0,102
	60 C	$k=6,46 \times 10^{-4}$	$n=0$	0	0,011	0,104
Henderson ve Pabis	90 C	$a=0,981$	$k=1,01 \times 10^{-3}$	1	$6,11 \times 10^{-7}$	0,001
	70 C	$a=0,981$	$k=1,01 \times 10^{-3}$	1	$1,03 \times 10^{-6}$	0,001
	60 C	$a=0,982$	$k=1,01 \times 10^{-3}$	0,999	$2,70 \times 10^{-6}$	0,002
Wang ve Singh	90 C	$a=-0,001$	$b=1,65 \times 10^{-6}$	0,992	$2,96 \times 10^{-5}$	0,005
	70 C	$a=-0,001$	$b=1,12 \times 10^{-5}$	0,985	$4,44 \times 10^{-5}$	0,007
	60 C	$a=-0,001$	$b=7,25 \times 10^{-7}$	0,992	$2,87 \times 10^{-5}$	0,005

Çizelge 4.4' de verilen modeller içerisinde 60 g için hesaplanan korelasyon katsayısı bire en yakın (0,999-1), standart hata (0,002-0,001) ve  $\chi^2$  ( $6,1 \times 10^{-7}$ ;  $2,7 \times 10^{-6}$ ) sifira en yakın olduğu için Henderson ve Pabis uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Model sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusudur. Konveyör bantlı kurutma şartları arasında en iyi uygunluk kurumanın en hızlı gerçekleştiği 90 °C gücünde söz konusu olmaktadır.

Çizelge 4.5. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 40 g' lık numune için hazırlanan modelleme değerleri

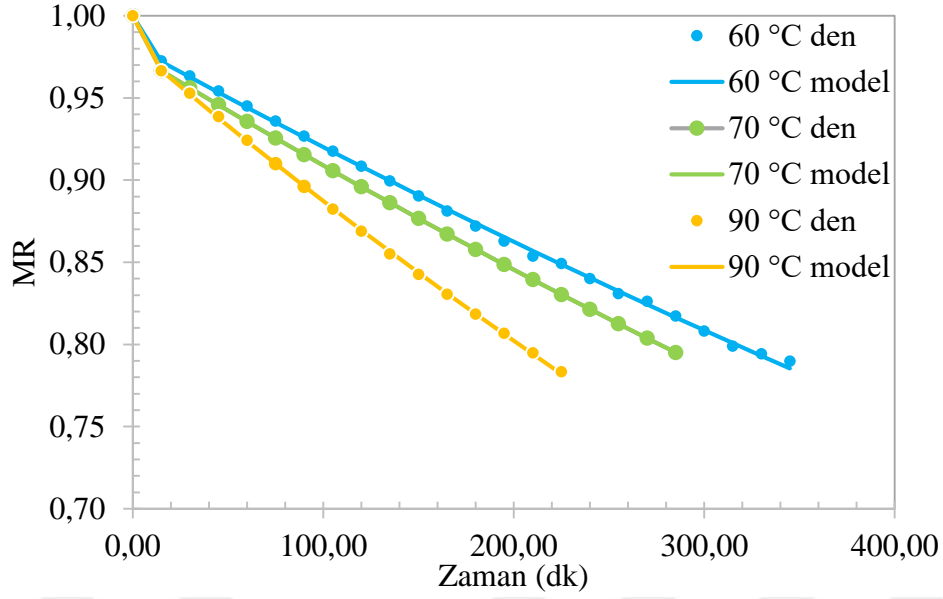
Model	M.G.	Sabitler		r	$\chi^2$	$e_s$
Newton	90 C	$k= 1,27 \times 10^{-3}$		0,956	$1,32 \times 10^{-4}$	0,011
	70 C	$k= 9,39 \times 10^{-4}$		0,943	$1,54 \times 10^{-4}$	0,012
	60 C	$k= 8,32 \times 10^{-4}$		0,965	$1,09 \times 10^{-4}$	0,01
Logaritmik	90 C	$k= 0$	$a_0 = 222,17$	0,999	$4,80 \times 10^{-6}$	0,002
		$a= -221,2$				
	70 C	$k= 0,001$	$a_0 = 217,79$	0,998	$7,31 \times 10^{-6}$	0,003
$a= -216,82$						
60 C	$k= 0,001$	$a_0 = 0,186$	0,998	$6,55 \times 10^{-6}$	0,003	
Page	90 C	$k= 1,17 \times 10^{-3}$	$n=0$	0	0,012	0,11
	70 C	$k= 8,61 \times 10^{-4}$	$n=0$	0	0,011	0,103
	60 C	$k= 7,51 \times 10^{-4}$	$n=0$	0	0,01	0,099
Henderson ve Pabis	90 C	$a=0,975$	$k=1,08 \times 10^{-3}$	1	$1,63 \times 10^{-6}$	0,001
	70 C	$a=0,973$	$k=7,79 \times 10^{-4}$	0,999	$2,23 \times 10^{-6}$	0,001
	60 C	$a=0,978$	$k=1,01 \times 10^{-3}$	0,998	$6,38 \times 10^{-6}$	0,003
Wang ve Singh	90 C	$a=-0,002$	$b=2,55 \times 10^{-6}$	0,982	$5,94 \times 10^{-5}$	0,008
	70 C	$a=-0,001$	$b=1,63 \times 10^{-5}$	0,979	$5,95 \times 10^{-5}$	0,008
	60 C	$a=-0,001$	$b=1,03 \times 10^{-6}$	0,985	$4,94 \times 10^{-5}$	0,007

Çizelge 4.5' de verilen modeller içerisinde 40 g için hesaplanan korelasyon katsayısı bire en yakın (0,998-1), standart hata (0,003-0,001) ve  $\chi^2$  ( $6,38 \times 10^{-6}$ ;  $1,63 \times 10^{-6}$ ) sifıra en yakın olduğu için Henderson ve Pabis uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Model sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusudur. Konveyör bantlı kurutma şartları arasında en iyi uygunluk kurumunun en hızlı gerçekleştiği 90 °C gücünde söz konusu olmaktadır.

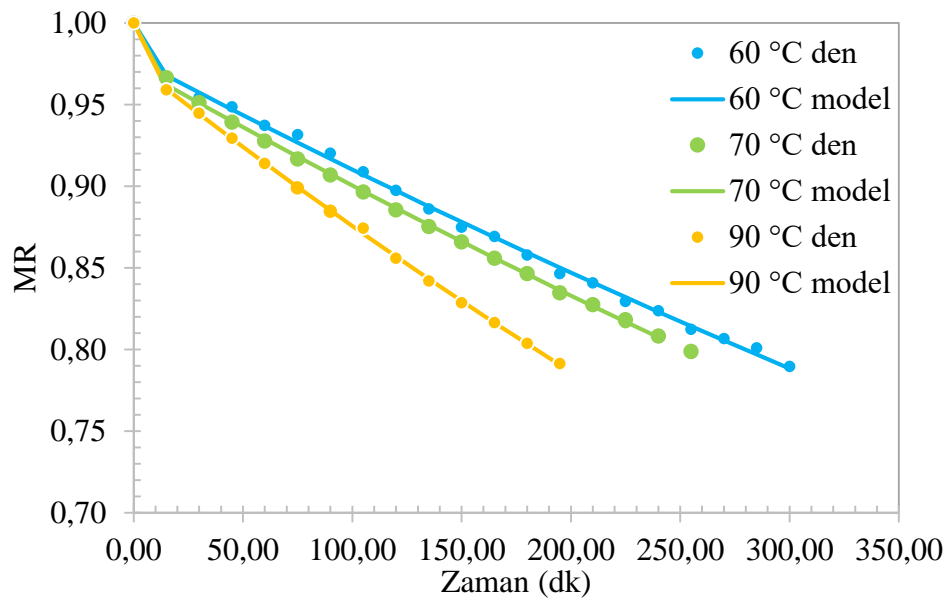
Çizelge 4.6. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 20 g' lık numune için hazırlanan modelleme değerleri

Model	M.G.	Sabitler		r	$\chi^2$	$e_s$
Newton	90 C	$k= 1,51 \times 10^{-3}$		0,898	$2,65 \times 10^{-4}$	0,016
	70 C	$k= 1,14 \times 10^{-3}$		0,87	$3,32 \times 10^{-4}$	0,018
	60 C	$k= 9,82 \times 10^{-4}$		0,94	$1,74 \times 10^{-4}$	0,013
Logaritmik	90 C	$k= 0,001$ $a= 0,949$	$a_0= 0,015$	1	$9,29 \times 10^{-7}$	0,001
	70 C	$k= 0$ $a=-232,3$	$a_0= 233,26$	0,996	$1,29 \times 10^{-5}$	0,004
	60 C	$k= 0$ $a=-142,02$	$a_0= 142,99$	0,997	$9,18 \times 10^{-6}$	0,003
Page	90 C	$k=1,39 \times 10^{-3}$	$n=0$	0	0,013	0,15
	70 C	$k=1,05 \times 10^{-3}$	$n=0$	0	0,013	0,112
	60 C	$k=8,95 \times 10^{-4}$	$n=0$	0	0,012	0,108
Henderson ve Pabis	90 C	$a=0,964$	$k=1,18 \times 10^{-3}$	1	$8,07 \times 10^{-7}$	0,001
	70 C	$a=0,961$	$k=8,72 \times 10^{-4}$	0,998	$4,63 \times 10^{-6}$	0,002
	60 C	$a=0,972$	$k=8,13 \times 10^{-4}$	0,997	$8,68 \times 10^{-6}$	0,003
Wang ve Singh	90 C	$a=-0,002$	$b=4,72 \times 10^{-6}$	0,964	$1,04 \times 10^{-3}$	0,01
	70 C	$a=-0,001$	$b=2,96 \times 10^{-6}$	0,959	$1,14 \times 10^{-4}$	0,011
	60 C	$a=-0,001$	$b=1,58 \times 10^{-6}$	0,969	$5,56 \times 10^{-5}$	0,01

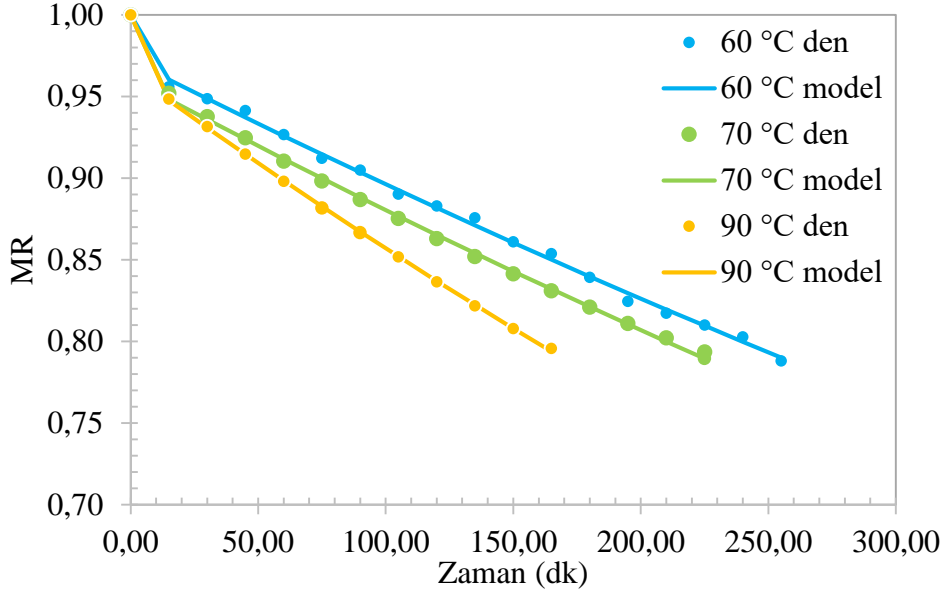
Çizelge 4.6' da verilen modeller içerisinde 20 g için hesaplanan korelasyon katsayısı bire en yakın (0,997-1), standart hata (0,003-0,001) ve  $\chi^2$  ( $4,63 \times 10^{-6}$ ;  $8,68 \times 10^{-6}$ ) sifira en yakın olduğu için Henderson ve Pabis uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Model sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusudur. Konveyör bantlı kurutma şartları arasında en iyi uygunluk kurumanın en hızlı gerçekleştiği 90 °C gücünde söz konusu olmaktadır.



Şekil 4.10. Konveyör bantlı kurutma sistemi – Henderson ve Pabis modeli (60g)



Şekil 4.11. Konveyör bantlı kurutma sistemi – Henderson ve Pabis modeli (40g)



Şekil 4.12. Konveyör bantlı kurutma sistemi – Henderson ve Pabis modeli (20g)

### 4.3. Termal Analiz Bulguları

Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’ de termal görüntülerin en düşük ve en yüksek sıcaklıkları görülmektedir. Mikrodalga kurutma sistemi için sıcaklıklar; 23,8 - 130 °C / 22,9 - 128 °C / 23,6 – 145 °C arasında ölçülmüştür. Yüksek enerji emilimi ve kuruma oranları bölgesel aşırı ısınmalarına neden olur. Aşırı ısınma aşırı lokalizasyona neden olur ve kontrolü zorlaşır. Mikrodalga gücü arttıkça son ürünün sıcaklığı artmıştır. Bazı bölgelerde renk sarı olarak görülmüştür, bu noktalar ürünün ısınmaya devam ettiği yerlerdir.

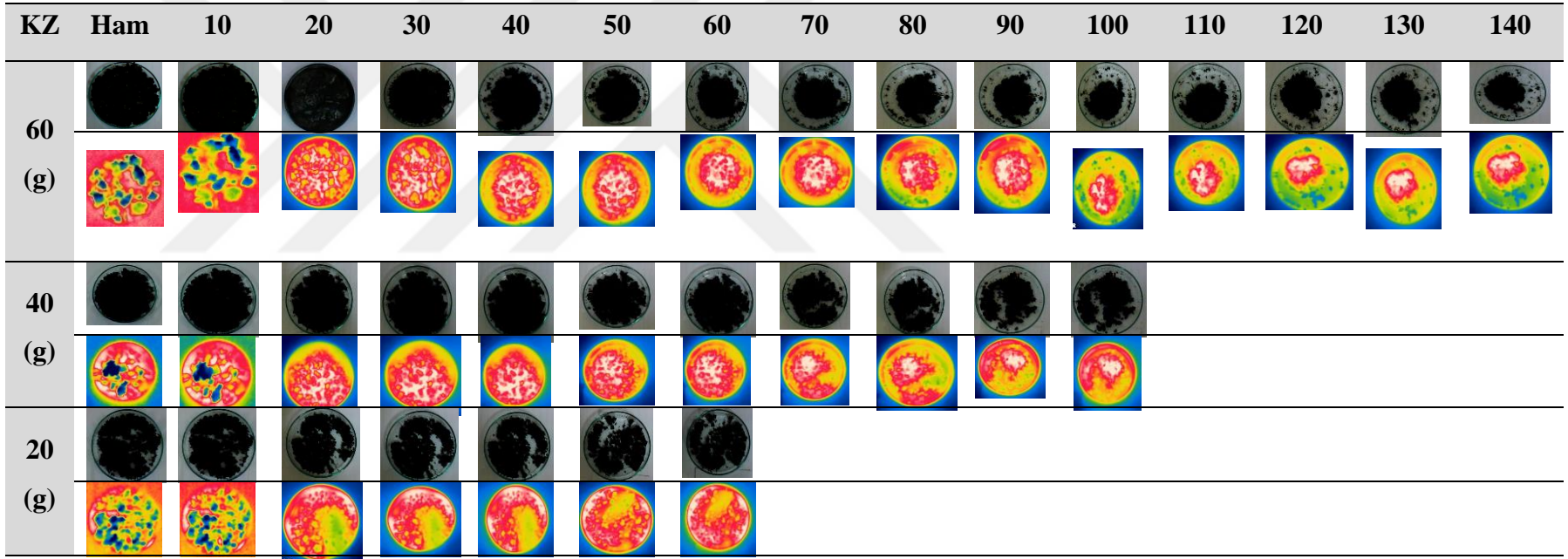
Mikrodalga enerji su molekülleri etki eder ve titreşen su molekülleri tarafından ısının salınmasına neden olur. Bunun sonucu olarak özellikle numunenin ortasında artan sıcaklık tespit edilmiştir.

Yanlardaki kırmızı renk, bulamacın sıvı kısmının yanlara doğru atığını ve bunun nedenin aşırı enerji yüklemesinin olduğunu gösterir. Mikrodalga kurutma sisteminde çekilen termal görüntülere göre kurutma işlemi homojendir. Mikrodalga kurutma sisteminde görülen farklar Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 gibidir.

Konveyör bantlı kurutma sistemi için sıcaklıklar 22,4 - 51,5 °C / 19,7 – 53 °C / 21,7- 65,5 °C arasında ölçülmüştür. Konveyör bantlı kurutma sisteminde sıcaklık yüzeyde kalır, derine inemez bu nedenle Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18’ de görüldüğü gibi sıcaklık

homojen değildir. Sıcaklıklarda görülen farklar arıtma çamurunun homojen yapıda olmamasıyla ilgilidir. Homojen bir yapının sağlanabilmesi için numunenin karıştırılması gerekmektedir.



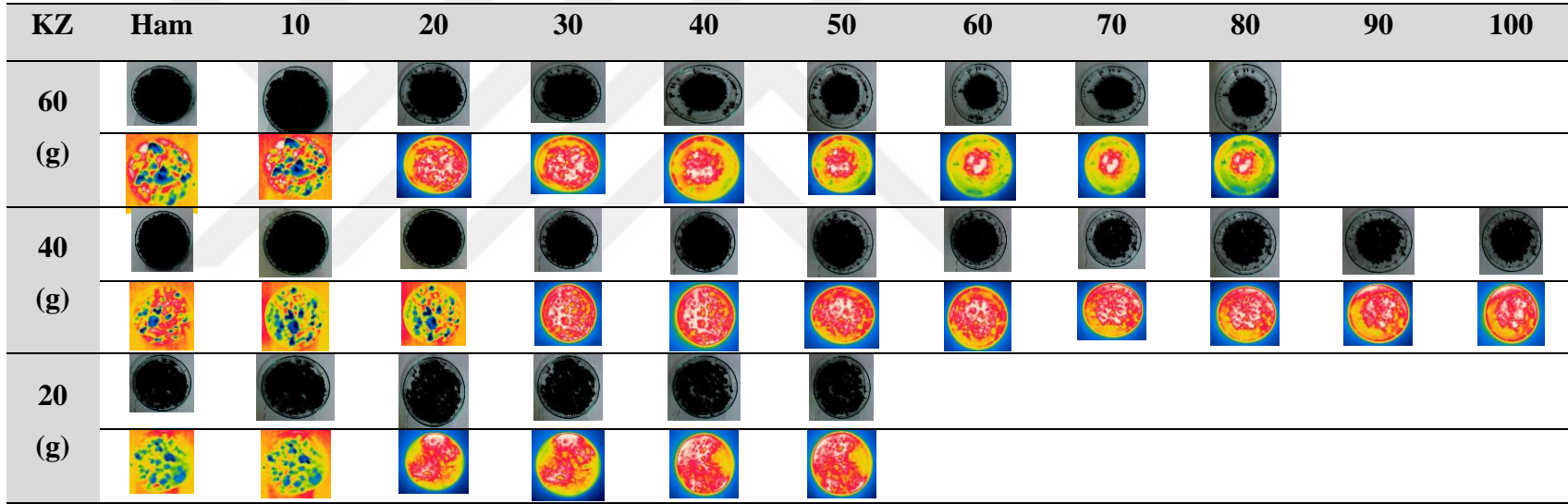


23,8°C



130°C

Şekil 4.13. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 360W altındaki termal görüntüleri (KZ: Kuruma Zamanı, dakika.)



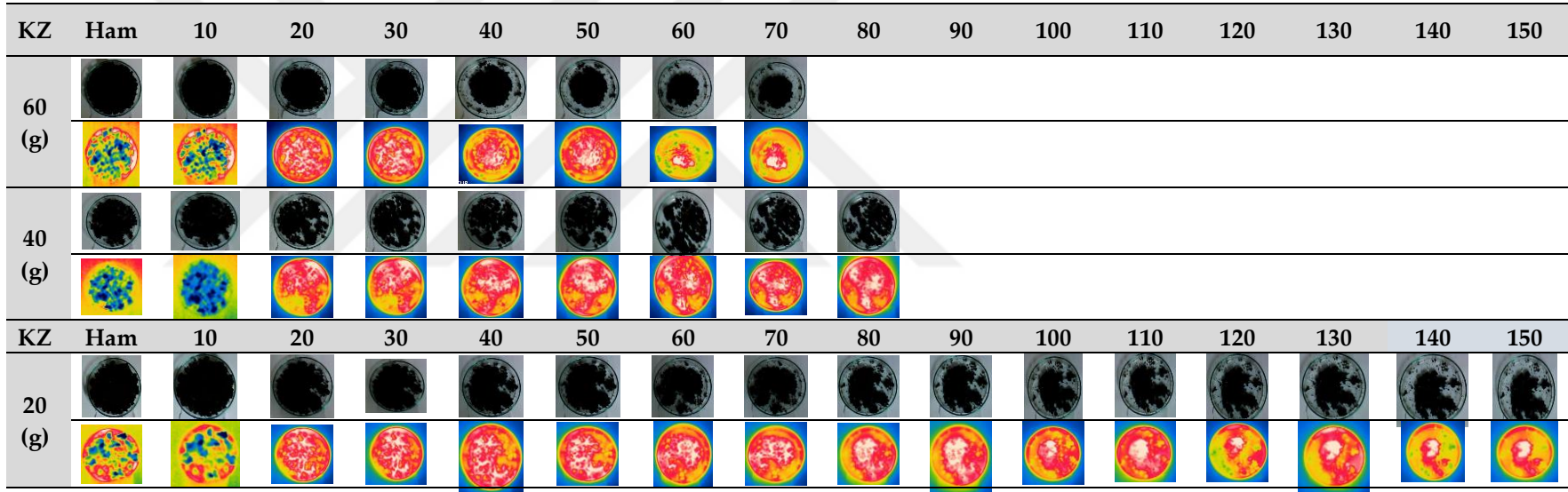
22,9°C



128°C

Şekil 4.14. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 600W altındaki termal görüntüleri (KZ: Kuruma Zamanı, dakika.)



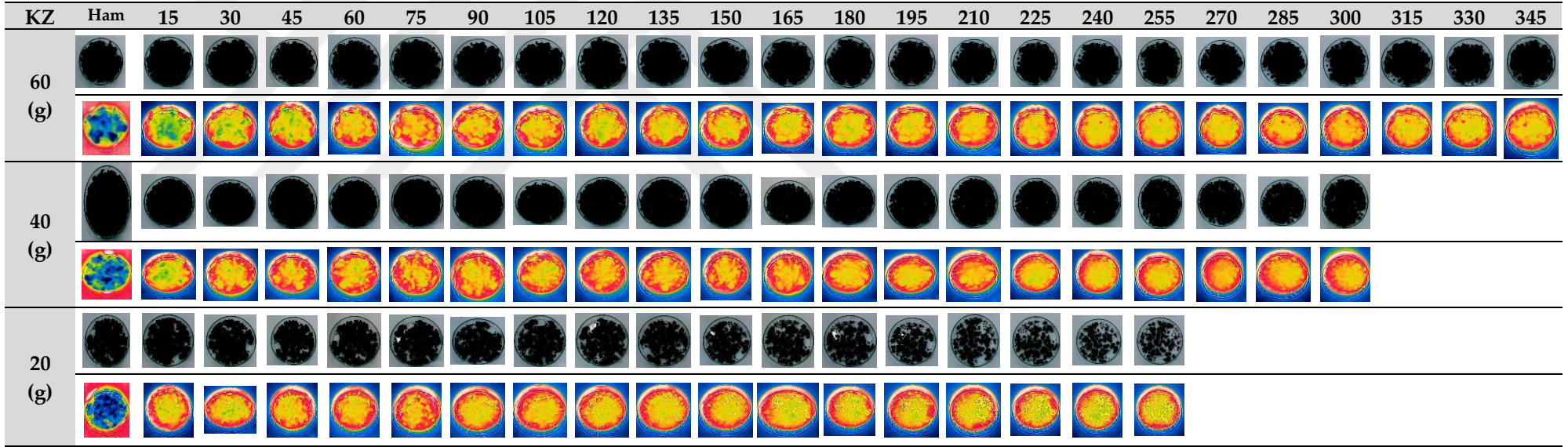


Şekil 4.15. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 800W altındaki termal görüntüleri

23,6°C

145°C

Şekil 4.15. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun mikrodalga kurutma sisteminde 800W altındaki termal görüntüleri

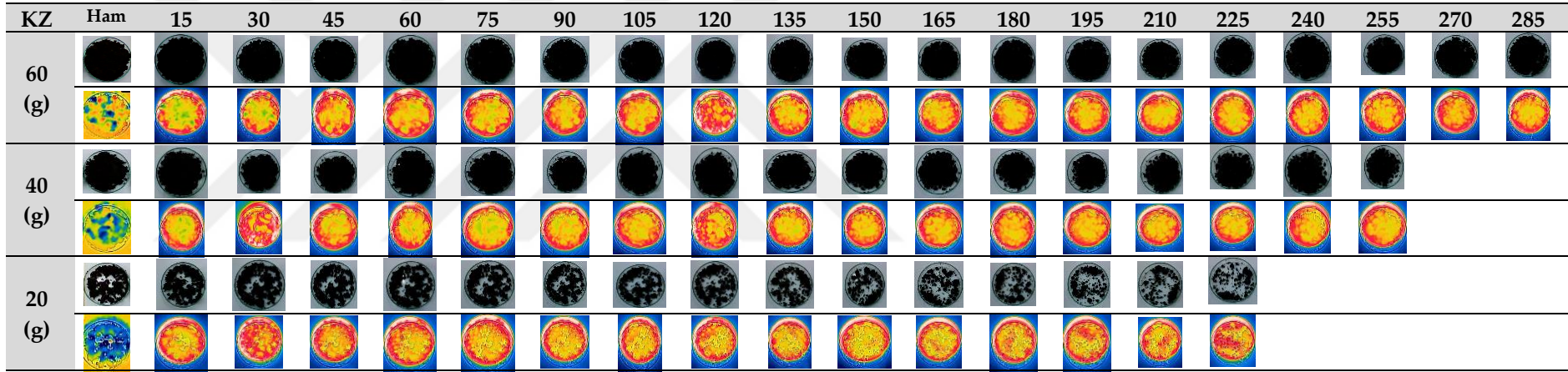


22,4°C



51,5°C

Şekil 4.16. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun konveyör bantlı kurutma sisteminde 60 °C altındaki termal görüntüleri

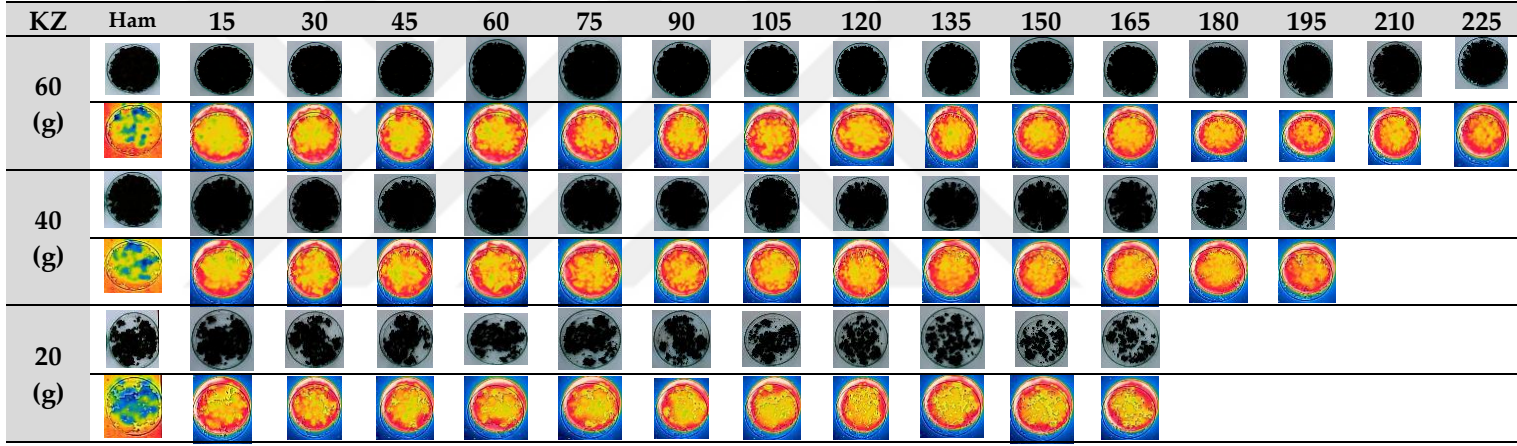


19,7°C



53°C

Şekil 4.17. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun konveyör bantlı kurutma sisteminde 70 °C altındaki termal görüntüleri



21,7°C



65,5°C

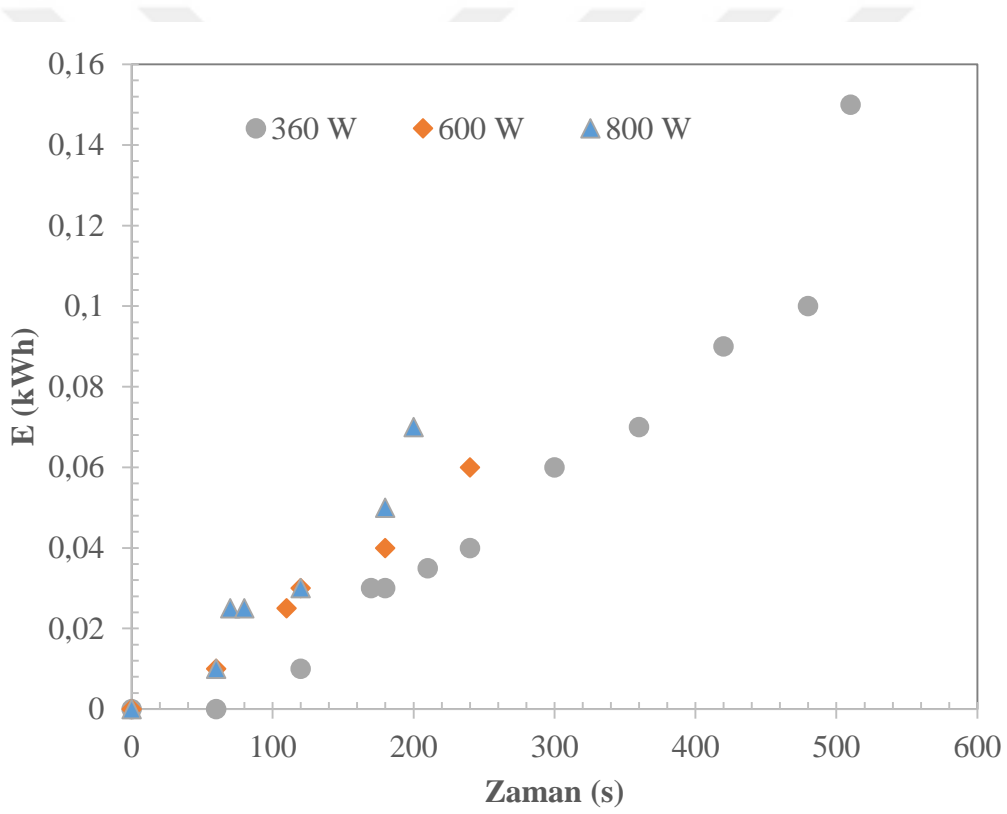
Şekil 4.18. Ham ve kurutulmuş arıtma çamurunun konveyör bantlı kurutma sisteminde 90 °C altındaki termal görüntüleri

#### 4.4. Kalorifik Değer Analiz Bulguları

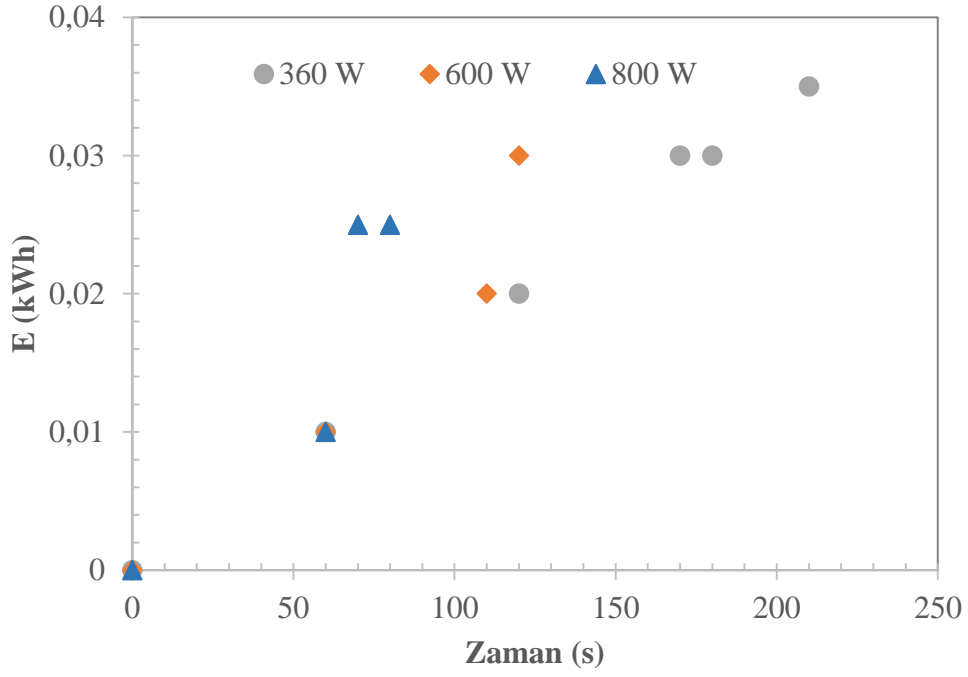
Kalorifik değer analizi Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi laboratuvarlarında yapılmıştır. Ham arıtma çamur etüvde 100 °C' de 2 saat kurutulduktan sonra numunenin kalorifik değeri Leco AC-350 cihazında hesaplanmış ve 3503,8 kal/g değerleri bulunmuştur.

#### 4.5. Enerji Analizi Bulguları

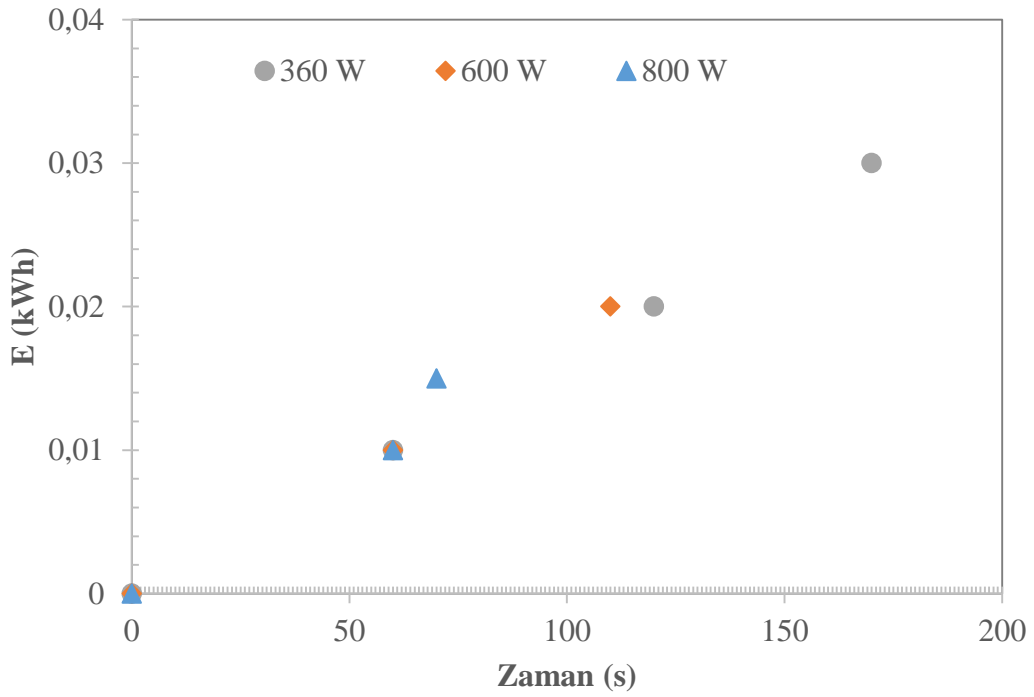
Mikrodalgada ve konveyör kurutma sırasındaki enerji tüketimi kontrol panosunda bulunan sayaç sayesinde test başlangıç ve bitişlerinde kaydedilmiştir. Toplam tüketim değerleri mikrodalga kurutma sistemi için Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21' de, konveyör bantlı kurutma sistemi için Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24' de verilmiştir.



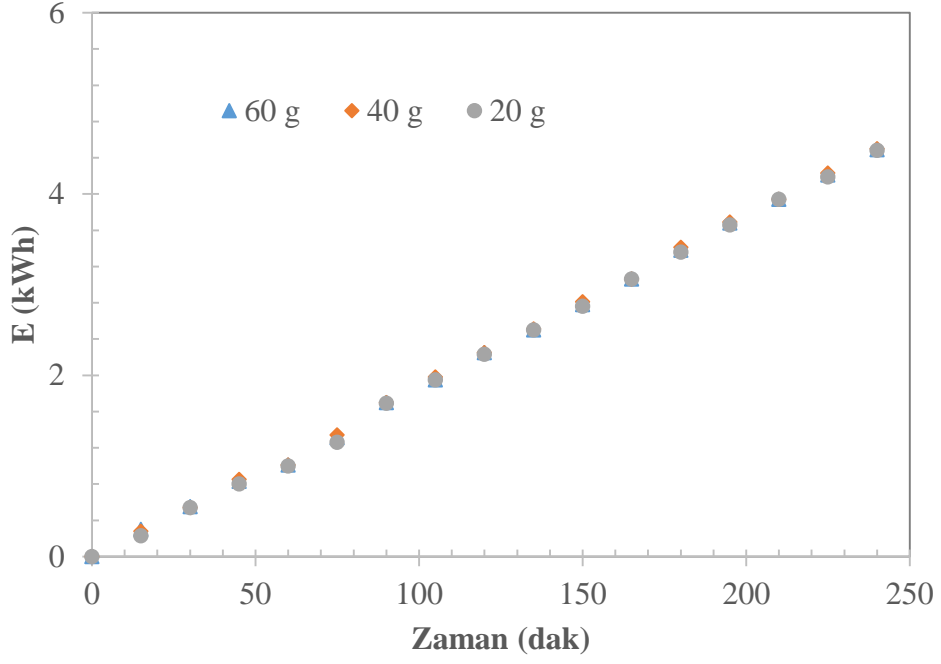
Şekil 4.19. Mikrodalga kurutma sisteminde 20 g ağırlığındaki çamurun farklı güçlerdeki enerji tüketimi



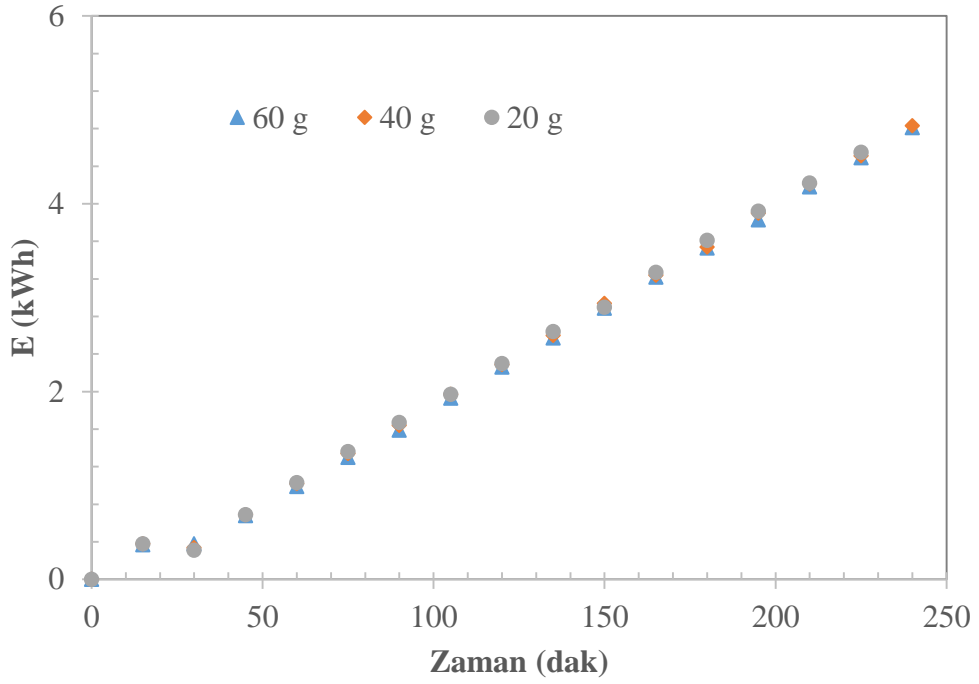
Şekil 4.20. Mikrodalga kurutma sisteminde 40 g ağırlığındaki çamurun farklı güçlerdeki enerji tüketimi



Şekil 4.21. Mikrodalga kurutma sisteminde 60 g ağırlığındaki çamurun farklı güçlerdeki enerji tüketimi

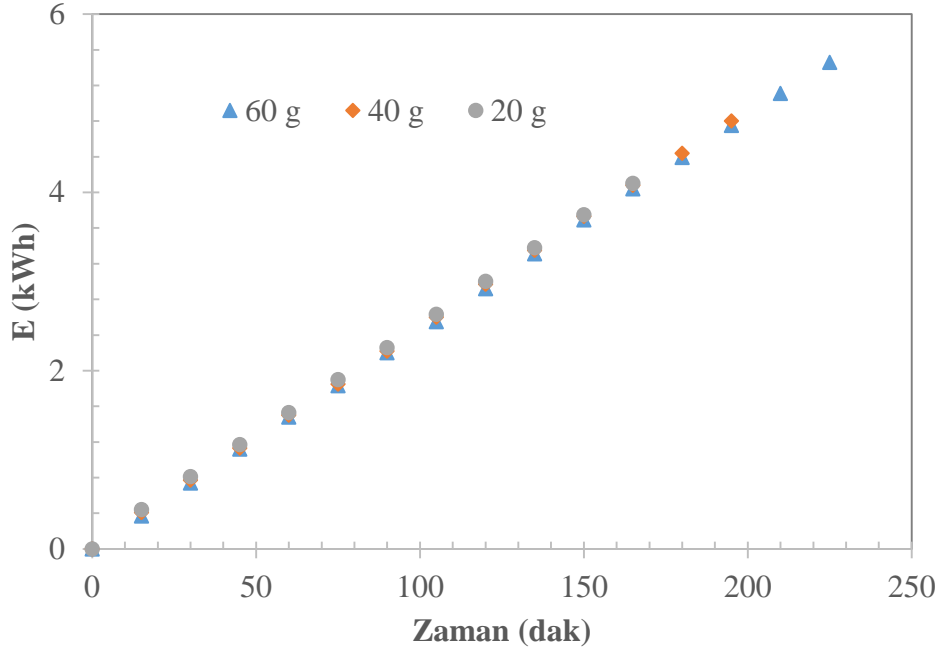


Şekil 4.22. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 60 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun enerji tüketimi



Şekil 4.23. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 70 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun enerji tüketimi





Şekil 4.24. Konveyör bantlı kurutma sisteminde 90 °C kurutma sıcaklığında kurutulan çamurun enerji tüketimi

Araştırmada, çamurun konveyör kurutmada  $79 \pm 0.5$  (y.b), mikrodalga kurutma da  $86 \pm 0.5$  (y.b) seviyelerine kadar kurutulması için gerekli süre ve sistemin elektrik enerjisi tüketimi değerleri 360 W mikrodalga gücü için ağırlığa göre 0,03-0,15 kWh, 600 W mikrodalga gücü için 0,02-0,06 kWh ve 800 W mikrodalga gücü için 0,015-0,07 kWh arasında gerçekleşmiştir.

Kurutma gücü kurutma süresi arttığı için enerji değerlerin artış olmuştur. Konveyör kurutmada ise 60° C kurutma sıcaklığı için ağırlığa göre sırasıyla 4,75-6,32 kWh, 70° C kurutma sıcaklığı için 4,55-5,78 kWh ve 90° C kurutma sıcaklığı için 4,1-5,46 kWh arasında gerçekleşmiştir. Kurutma sıcaklığı düştükçe kuruma zamanı arttığı için enerji tüketimi artmıştır.

Düşük mikrodalga güçlerinde üretilen ısı az olduğundan, üretilen ısının malzeme içerisinde transferi ve üründen çevreye olan ısı transferi için daha fazla zaman söz konusudur. Böylece ürünün içerisindeki suyun buharlaşma sıcaklığına ulaşması için gereken süre uzamakta ve buharlaşma için harcanan enerji azalmaktadır. Bu durumda etkin bir kurutma sağlanmasını engellemektedir.



Mikrodalga gücünün artması ile enerji tüketimi artmıştır. En az enerji tüketimi 800 W ve 60 g değerlerinde 0,015 kWh olarak ölçülmüştür. Kuruma zamanları dikkate alındığında da aynı değerler söz konusudur. Kurutma sıcaklığının artması ile kuruma süresi azalmış, enerji tüketimi azalmıştır. En az enerji tüketimi 90 °C ve 20 g değerlerinde 4,1 kWh olarak ölçülmüştür. Her iki kurutma sisteminden en uygununun zaman ve enerji açısından 800 W değerinde belirlenmiştir.

Ürün daha geniş kaba yerleştirilip yüzey alanı genişletildiğinde daha fazla miktarda kurutma yapılabilir. Çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde her iki kurutmanın kurutma mekanizmaları farklı olduğu için farklı kuruma süreleri gözlemlendiği ve mikrodalga kurutmanın hacimsel ısıtmadan dolayı konveyör kurutmaya göre daha hızlı gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Arıtma çamurlarının kurutulmasında mikrodalga kurutma sistemi ve konveyör bantlı kurutma sistemi karşılaştırılmıştır. Konveyör bantlı kurutma sisteminin mikrodalga kurutma sistemine göre daha uzun kurutma süresine sahip olduğu görülmüştür. Enerji tüketiminde ise mikrodalga kurutma sisteminin konveyör bantlı kurutma sistemine göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. Her iki kurutma sisteminden en uygununun zaman ve enerji açısından 800 W değerinde belirlenmiştir. Ürün daha geniş kaba yerleştirilip yüzey alanı genişletildiğinde daha fazla miktarda kurutma yapılabilir.

Çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde her iki kurutmanın kurutma mekanizmaları farklı olduğu için farklı kuruma süreleri gözlemlendiği ve mikrodalga kurutmanın hacimsel ısıtmadan dolayı konveyör kurutmaya göre daha hızlı gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Mikrodalga çıkış gücü ne kadar yüksek ve kurutulan malzeme kütlesi ne kadar az olursa o kadar hızlı bir kuruma gerçekleştiği görülmüştür.

Arıtma çamuru üzerinde yapılan termal analize göre mikrodalga kurutma sisteminde, yapılan kurutma işlemi daha homojendir konveyör bantlı kurutma sisteminde yapılan kurutma işlemi homojen değildir. Yapılan kalorifik değer analizinde ise arıtma çamurunun kurutulmuş olarak kalorifik değerinin arttırılabildiği görülmüştür.

Arıtma çamurlarının yüksek nem içeriğine sahip olması ve miktar bakımından her geçen gün artması sebebiyle kurutulması; nakliye ve yönetim maliyetlerinin azaltılması, bu atıkların saklanması depolanması ve geri kazanılması adına etkin bir yöntemdir. Uygun kurutma yöntemi seçerken kurutma süresi ve enerji tüketimi sınırlayıcı bir faktördür.

Mikrodalga kurutma sisteminde kurutma işlemi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için arıtma çamuru içindeki patojen mikroorganizmaların daha etkin bir şekilde giderilebildiği düşünülmektedir.

Konveyör bantlı kurutma sisteminde kurutulan numunelerin homojen bir şekilde kurutulmadığı numunedeki bazı bölgelerin farklı sıcaklıklara sahip olduğu görülmüş, söz konusu hususun mikrodalga kuruma sisteminde görülmediği yapılan kurutma işleminin daha homojen bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Isı dağılımının düzgün olması isteniyorsa numunenin karıştırılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Mikrodalga ince tabakalı malzemelerin kurutulmasında çok etkili bir yöntem olsa da yüksek hacim ve kütleli malzemelerin kurutulması için uygun değildir. Toplu kurutma yapılmak isteniyorsa konveyör bantlı kurutma sistemi kullanılmadır. Bu tür farklılıklardan dolayı iki sistemin beraber çalışacağı entegre bir sistemin oluşturulması gerektiği kanaatine varılmaktadır.

Atığın kalorifik değer incelemesiyle 3503,8 kal/g sonucuna ulaşılmıştır.



## 6. KAYNAKLAR

- A. Idris, K. Khalid, W. Omar, (2004). Drying of silica sludge using microwave heating, Applied Thermal Engineering, Volume 24, Issues 5–6, Pages 905-918, Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431103003107>
- Alibaş İ, (2012). Asma Yaprağının (Vitis vinifera L.) Mikrodalga Enerjisiyle Kurutulması ve Bazı Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi. Journal of Agricultural Sciences Cilt 18, 43-53. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ankutbd/issue/1925/24634>
- Alibaş, İ . (2015). İnce tabaka mango dilimlerinin mikrodalga tekniği ile kurutulması. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 30 (2), 99-109. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/omuanajas/issue/20242/214626>
- Anonim (2019b). Erişim adresi: <https://shkolazhizni.ru/animal/articles/13606/> [Erişim Tarihi: 14.10.2019]
- Anonim, (2015). Evsel-Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi Projesi Final Raporu Erişim adresi: <https://cygm.csb.gov.tr/evsel-kentsel-aritma-camurlarinin-yonetimi-projesi-duyuru-33959>
- Anonim, (2016). Erişim adresi: <http://www.egedesentez.com/yerel/hem-dogaya-hem-ekonomiye.htm>, [Erişim tarihi: 23.11.2019]
- Anonim, (2016a). Erişim adresi: <https://www.enerjigazetesi.ist/izmirde-aritma-camurlari-cimento-uretiminde-ek-yakit-olarak-kullanilacak/>, [Erişim tarihi: 23.11.2019]
- Anonim, (2019). Erişim adresi: <http://compost-turner.net/composting-technologies/in-vessel-composter-and-windrow-turner.html> [Erişim tarihi: 23.11.2019]
- Anonim, (2019a). Erişim adresi: <https://powerscreening.com/composting/> [Erişim Tarihi: 14.10.2019]
- Anonim, (2019c). Erişim adresi: [http://gozlemevi.omu.edu.tr/depo/elektromanyetik\\_spektrum.pdf](http://gozlemevi.omu.edu.tr/depo/elektromanyetik_spektrum.pdf) [Erişim tarihi: 22.10.2019]
- Anonim, (2019d). Erişim adresi: <https://tr.redsearch.org/images/7122203> [Erişim tarihi: 22.10.2019]

- Arıkan, O. A. , Öztürk, İ., (2008). Arıtma çamuru Kompostlaştırılmasında Organik Evsel Katı Atık İlavesinin Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, İstanbul.
- Bennamoun, L., Chen Z., Afzal M., (2016). Microwave drying of wastewater sludge: Experimental and modeling study, *Drying Technology*, Vol.34, No.2, 235–243, Department of Mechanical Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada
- Bingöl, G. Vve Devres, Y. O., (2010). Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri IV, İstanbul Sanayi Odası, İstanbul.
- C.T. Kiranoudis \*, N.C. Markatos, Pareto Design Of Conveyor-Belt Dryers. Department of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece
- Cemeroğlu, B. (2005). Dondurulmuş Ürünlerin Çözülmesi. Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler, Başkent Klîşe Matbaacılık, s. 278-281, Türkiye.
- Chen, Z.; Afzal, M. T.; Salema, A. A., (2014). Microwave drying wastewater sewage sludge. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(3), 282–286.
- Çalışkan, M. K., (2002). *Mikrodalga Enerjisi ile Kurutma*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çelen, İ , Çelen, S , Moralar, A , Buluş, H , Önler, E . (2015). Mikrodalga Bantlı Kurutucuda Patatesin Kurutulabilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 5 (4), 57-69 Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejovoc/issue/45167/565492>
- Çelen, S. (2010). *Mikrodalga ve Vakum Kurutucuda Bazı Gıda Ürünlerinin Kurutulması ve Modellenmesi*. (Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, s. 1. Edirne
- Çelen, S., Aktaş, T., Karabeyoğlu, S.S., and Akyıldız, A., (2016). Drying Behaviour of Prina (Crude Olive Cake) Using Different Type of Dryers, *Dry Technol.*, 34 (7), 843-853.
- Çelen, S.; Aktaş, T.; Karabeyoğlu, S. S.; Akyıldız, A. (2015). Drying of prina using microwave energy and determination of appropriate thin layer drying model, *JOTAF*, 12(2), 21-31.

2872 Sayılı Çevre Kanunu (a). 09/08/1983, Resmi Gazete 18132 Sayılı, Erişim adresi:  
<https://mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.2872.pdf>

Atık Yönetimi Yönetmeliği Çevre Kanunu (b). 02.04.2015, Resmi Gazete 2914 Sayılı, Erişim  
adresini: <https://mevzuat.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.20644&MevzuatIliski=0>

Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik, Çevre Kanunu  
(c) 03.08.2010 Resmi Gazete 27661 Sayılı Erişim adresini:  
<https://mevzuat.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.14167&MevzuatIliski=0&sourceXmlSea>

Kentsel Atık Su Arıtımı Yönetmeliği, Çevre Kanunu (d) 08.01.2006 Resmi Gazete 26047  
Sayılı Erişim adresini:  
<https://mevzuat.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.9844&MevzuatIliski=0&sourceXmlSear>

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Çevre Kanunu (e) 26.03.2010 Resmi  
Gazete 27533 Sayılı Erişim adresini:  
<https://mevzuat.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.13887&MevzuatIliski=0&sourceXmlSea>

Atık Su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, Çevre Kanunu (f) 20.03.2010 Resmi  
Gazete 27527 Sayılı Erişim adresini: <https://mevzuattakip.com.tr/mevzuat/atiksu-aritma-tesisleri-teknik-usuller-tebligi>

Decareau, V.R. (1985). Microwaves in The Food Processing Industry, Academic Press,  
Inc.,London.

Erarslan, D. (2006). Fındıkta Mikrodalga ile Kurutmanın Aspergillus Flavus Küfüne Etkisinin  
İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği  
Anabilim Dalı, s. 37. İstanbul

Foladori P., Andreottola G., Ziglio G., Sludge reduction Technologies in wastewater  
treatment plants, (38), University of Trento, Italy , London IWA Publishing Depolama

Galema, S.A. (1997). Microwave chemistry. Chem Soc Rev, 26, 233-238.

Gökhan BİNGÖL , Y. Onur DEVRES, (2010). Üzümlerin mikrodalga kurutma eğrilerinin ve  
sıcaklık değişiminin matematiksel modellenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda  
Mühendisliği Programı, Ayazağa, İstanbul, İTÜ dergisi/d mühendislik Cilt:9, Sayı:4, 63-71

- Gwarek, W.K. and Celuch-Marcysiak, M. (2004). A review of microwave power applications in industry and research. *Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2004. 15th International Conference*, 3, 843-848.
- Hassouneh, O., Jamrah, A. and Qaisi, K. (1999). Sludge stabilization by composting: a Jordanian case study, *Bioprocess Engineering*; 20:413–421.
- Jayasinghea G.Y., Tokashiki Y., Arachchi I.D. L. , Arakaki M. (2010) Sewage sludge sugarcane trash based compost and synthetic aggregates as peat substitutes in containerized media for crop production, *Journal of Hazardous Materials*, 174 (1-3), 700-706.
- Knutson, K.M., Marth, E.H. and Wagner, M.K. (1987). Microwave heating of food, *Lebensmittel-Wissenschaft Technologie*, 20:101-110.
- Mawioo ve diğ. (2016). Evaluation of a microwave based reactor for the treatment of blackwater sludge, *Science of the Total Environment* 72–81
- Metcalf&Eddy, (2003). *Wastewater Engineering and Reuse*, McGraw Hill.
- Öztürk İ. (2007). *Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, Genişletilmiş 2.Baskı*, Su Vakfı
- Öztürk İ. (2014). *Katı Atık Yönetimi Ve Ab Uyumlu Uygulamaları, İst 2014 2. Baskı, İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi 2*
- Öztürk, İ. Çallı, B, Arıkan, O. Altınbaş, M., (2015). *Atık Su Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı (El Kitabı)* Ankara: Türkiye Belediyeler Birliği,
- Öztürk, S. (2014)., *Muz ve Kivinin Dielektrik Özelliklerinin Mikrodalga ve Kızılötesi-Mikrodalga Kombinasyonu İle Kurutma Karakteristikleri Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, s. 27. Ankara*
- Page, R.M. (1962). *The origin of radar*. Anchor Books, New York. Alınmıştır: Decareau, R. V., (1985). *Microwaves in the food processing industry*, Academic Pres, Florida.
- Pervin Uzun, Uğur Bilgili, (2011). *Arıtma Çamurlarının Tarımda Kullanılma Olanakları*, U.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, 135-146
- Pure, (2012). *Good Practices in Sludge Management, Project on Urban Reduction of Eutrophication (Pure)*, Union of the Baltic Cities Environment Commission, Finland
- Güney Afrika Su Araştırma Komisyonu, (2009). *Guidelines for the Utilisation and Disposal of Wastewater Sludge, Volume 3: Requirements for the on-site and off-site disposal of sludge*, JE Herselman and HG Snyman Golder Associates Africa.

- Qasim S. R., (1999). Wastewater Treatment Plants; Planning, Design and Operation, Technomic Publishing Co. Inc.
- Qiang Yu, Hengyi Lei, Guangwei Yu, Xin Feng, Zhaoxu Li, Zhicheng Wu, (2009). Influence of microwave irradiation on sludge dewaterability, Chemical Engineering Journal, Volume 155, Issues 1–2, Pages 88-93, Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894709004975>
- Quan Gan, (2000). A case study of microwave processing of metal hydroxide sediment sludge from printed circuit board manufacturing wash water, Waste Management, Volume 20, Issue 8, Pages 695-701, Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X00000362#!> 02.04.2015 Tarih ve 2914 Sayılı Resmi Gazete Atık Yönetimi Yönetmeliği,
- Regier, M. ve Schubert, H. (2001). Microwave processing in Thermal Technologies in Food Processing ed. Richardson, P., Woodhead Publishing, England.
- Reynolds, L. (1989). The History of the Microwave Oven, Microwave World, 10, 11– 15.
- Rulkens, W.H., (2004). Sustainable sludge management - what are the challenges for the future?, Water SciTechnol., 49(10):11-9
- Salihoğlu N.K., Pınarlı V., (2007). Atık su Arıtma Çamurlarının Kapalı Yataklarda Günel Enerjisiyle Kurutulması, İTÜ Dergisi/E- Su Kirlenmesi Kontrolü, Cilt:17, Sayı:1, 3-14.
- Tınmaz Köse, E., (2019). Drying of Drilling Cutting: Emphasis on Energy Consumption and Thermal Analysis, Processes Article, Cilt No 46, Sayı No 3, Sayfa No 43-53.
- Toraman, Ö.Y. ve Depçi, T. (2007). Kömürde Mikrodalga Uygulamaları, Madencilik, Cilt No 46, Sayı No 3, Sayfa No 43-53.
- Turovskiy I.S., Mathai P.K., (2006). Wastewater Sludge Processing, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- TÜİK. (2018), Belediye Atık Su İstatistikleri Erişim adresi: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=120&locale=tr> [Erişim tarihi: 14.10.2019]
- TÜİK. (2019), Belediye Atık Su İstatistikleri Erişim adresi: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=120&locale=tr> [Erişim tarihi: 14.10.2019]
- Uslu, M.K. ve Certel, M., (2006). Dielektrik Isıtma Ve Gıda İşlemede Kullanımı, Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt No 3, Sayfa No 61-69.



- Uzun P, Bilgili U, (2011). Arıtma Çamurlarının Tarımda Kullanılma Olanakları, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, 135-146.
- Ünlü, A. ve Tunç, M.S., (2007). Elazığ kenti atık su arıtma tesisi çamur isleme birimlerinin işletiminin değerlendirilmesi, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimi Dergisi, 19(1): 53-60.
- Venkatesh, M.S. and Raghavan, G.S.V. (2004). An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. Biosyst Eng, 88 (1), 1-18.
- Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E. J., Hansen, D., Hallman, G., Drake, S.R. and Wang, Y. (2003). Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments. Biosyst Eng, 85 (2), 201–212
- Wen-Hong Li, Qin-Yan Yue, Bao-Yu Gao, Xiao-Juan Wang, Yuan-Feng Qi, Ya-Qin Zhao, Yan-Jie Li, (2011). Preparation of sludge-based activated carbon made from paper mill sewage sludge by steam activation for dye wastewater treatment, Desalination 278:179–185.

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Tuğçe EKİCİ 07.05.1989 Fatih/İstanbul'da doğdu. 2003 yılında ilk öğrenimini İhlas İlköğretim Okulunda tamamladı. 2007 yılında orta öğretimini İhlas Kolejinde tamamladı. 2012 yılında lisans eğitimin Fatih Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde tamamladı. Yüksek lisans eğitimi Namık Kemal Üniversitesinde halen devam etmektedir.

