

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİ DEVİRLİ ATIK BİYOREAKTÖRÜNDE ARITMA
ÇAMURLARI İLE EVSEL ATIKLARIN BERABER
DEPOLANABİLİRLİĞİ VE DEPO GAZI VERİMİNE ETKİSİ

GÜLŞAH DELİCE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİ DEVİRLİ ATIK
BİYOREAKTÖRÜNDE ARITMA
ÇAMURLARI İLE EVSEL ATIKLARIN
BERABER DEPOLANABİLİRLİĞİ VE DEPO
GAZI VERİMİNE ETKİSİ

GÜLŞAH DELİCE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. CEVAT YAMAN

GEBZE
2018

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**EFFECT OF BIOGAS PRODUCTION AND
CODISPOSAL OF MUNICIPAL SOLID
WASTE AND SEWAGE SLUDGE IN A
RECIRCULATED LANDFILL
BIOREACTOR**

GÜLŞAH DELİCE
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. CEVAT YAMAN

GEBZE
2018

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/01/2018 tarih ve 2018/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/02/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gülşah Delice'nin tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Doç. Dr. Cevat YAMAN

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ

ÜYE

: Doç. Dr. Elif İNCE

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Atık depolama sahalarında, organik maddelerin ayrışması sonucunda yüksek kirlilikte sızıntı suları ve depo gazı emisyonları meydana gelmektedir. Depo gazı ağırlıklı olarak metan ve karbondioksit gazlarından oluşmaktadır. Metan gazı atık depolama sahalarında kontrol edilmesi zor bir gazdır. Bu nedenle günümüzde depo sahaları sızıntı suyu geri devri ile bir biyoreaktör gibi işletilmektedir. Böylece depo gazı kontrol altına alınarak bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Böylece depo gazı kontrol altına alınarak bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

Aritma çamurunun atıkla beraber depolanması alternatif bir bertaraf yöntemidir. Arıtma çamurunun içeriğinde bulunan nem, besin maddeleri, organik madde ve mikroorganizmalar biyolojik ayrışmayı ve depo gazı üretim verimini artırmaktadır.

Gözenekli bir malzeme olan geotekstil, genellikle iki farklı tabakayı birbirinden ayırmak amacıyla ve atık depolama sahalarında geomembranı korumak amacıyla kullanılır. Aynı zamanda geotekstil malzemeler, biyofiltre olarak atıksu arıtımında da kullanılmaktadır.

Bu çalışmada geotekstil malzeme biyofilm tutunma yüzeyi olarak kullanılmıştır. Geotekstil malzemenin ve arıtma çamurunun atıkların ayrışmasına ve oluşan depo gazının verimine etkisini incelemek amacıyla iki adet pilot ölçekli ve sızıntı suyu geri devirli simüle atık biyoreaktörü kullanılmıştır. Ayrıca kontrol amaçlı, geri devirsiz, arıtma çamuru ve geotekstil malzemesi olmadan, tipik bir depolama sahasına benzer bir biyoreaktör daha depo gazı verimini incelemek için kullanılmıştır.

Kontrol reaktörüne (R-3) yağmursuyu ile sızıntı suyu olduğu varsayılarak bir miktar su eklenmiştir. Bu nedenle R-3 hızlı bir şekilde metanojenik safhaya ulaşmıştır. Geotekstil malzemeli ve arıtma çamuru içeren atık biyoreaktörü (R-2), diğer reaktöre kıyasla (R-1) daha çabuk metanojenik safhaya geçmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı Atıklar, Düzenli Depolama, Atık Biyoreaktörü, Depo Gazı, Arıtma Çamurları, Geotekstil.

SUMMARY

As a result of organic waste decomposition in landfills, landfill gas and highly polluted leachate are generated. Landfill gas is mainly composed of methane and carbon dioxide gases. Methane gas cannot be easily controlled in landfills. Therefore, landfills are operated as bioreactors with leachate recirculation. Thus, landfill gas can be controlled and used as an energy source.

Codisposal of sewage sludge with municipal solid waste is an alternative disposal method. Water content, nutrients, organic matter and microorganisms in the content of the treatment sludge increase the decomposition and landfill gas production efficiency.

Geotextile is a porous material which is usually used for separation of two different layers and protection of geomembrane in landfills. On the other hand, geotextile materials are also used in wastewater treatment as biofilters.

In this study, geotextile material was used as a biofilm media. Two simulated pilot-scale landfill bioreactors with leachate recirculation were used to investigate the effect of geotextile material and sewage sludge on waste decomposition and landfill gas production. Also, a control bioreactor similar to a conventional landfill without leachate recirculation, with no sewage sludge and geotextile material was used to investigate the landfill gas production efficiency.

A quantity of water was added to the control reactor (R-3) assuming that leachate would occur with rain water. Thus, R-3 quickly reached the methanogenic phase. Landfill bioreactor equipped with geotextile material and sewage sludge (R-2) reached the methanogenic phase faster than the other reactor (R-1).

Key Words: Solid wastes, Landfilling, Landfill Bioreactor, Landfill Gas, Sewage Sludges, Geotextile.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın yürütülmesindeki ve yönlendirilmesindeki katkıları, gösterdiği yakın alaka ve desteği sebebiyle danışmanım Doç. Dr. Cevat YAMAN'a şükranlarımı sunarım.

Reaktörlerin tasarımı, kurulumu, işletmeye alınması ve deneysel çalışmalar sırasındaki desteği dolayısıyla Arş. Gör. Yusuf Küçükağa'ya şükranlarımı sunarım.

Tez jüri üyelerimden Prof. Dr. Mehmet Sinan Bilgili ve Doç. Dr. Elif İnce'ye katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Doç. Dr. Mahir İnce ve Doç. Dr. Mehmet Salim Öncel'e çalışma aşamamızda bize teknik destek verdikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarını beraber yürüttüğümüz laboratuvar arkadaşım Burcu Pala'ya ve çalışmalarımızda bizden desteğini esirgemeyen arkadaşım Betül Eroğlu, Arş. Gör. Tülin Yılmaz Nayır ve Arş. Gör. Mihrican Yurtarslan'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca benden desteğini esirgemeyen ve okumam için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan annem Zeynep, babam Sami, ağabeylerim Şafak ve Kürşat'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez yazım aşamasında benden desteğini esirgemeyen nişanlım Ömer Osman Bağlama'ya teşekkürlerimi sunarım.

Reaktörlere yüklenen katı atıklar için İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ne (İSTAÇ), arıtma çamurları için İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne (İSU) ve aşı çamuru için Pakmaya İzmit Köseköy Fabrikası'na teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmayı desteklediği için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimi sunarım (TÜBİTAK-115Y299).

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Katı Atık Yönetimi	3
2.1.1. Düzenli Depolama	4
2.1.2. Atık Biyoreaktörü	5
2.2. ARITMA ÇAMURLARININ YÖNETİMİ	6
2.3. ARITMA ÇAMURLARININ EVSEL KATI ATIKLAR İLE BİRLİKTE DEPOLANABİLİRLİĞİ	7
2.4. ATIK STABİLİZASYONU	8
2.4.1. Anaerobik Ayrışma Safhaları	9
2.5. DEPO GAZI OLUŞUMU	11
2.6. GEOTEKSTİL MALZEME	12
3. MATERYAL VE METOD	14
3.1. Deneysel Başlangıç	14
3.1.1. Reaktörlerin Yapısal Özellikleri	14
3.1.2. Sızıntı Suyu Drenaj Tabakası	15
3.1.3. Sızıntı Suyu Toplama, Geri Devir ve Dağıtım Sistemi	16
3.1.4. Depo Gazı Toplama ve İzleme Sistemi	17
3.2. Reaktörlerin İşletimi	17
3.2.1. Deneysel Başlangıç	18
3.2.1.1. Reaktörlere Atık Yükleme	18
3.2.1.2. İşletim Prosedürü	19

3.3. Analitik Prosedür	20
3.3.1. Katı Atık Analizleri	20
3.3.1.1. Biyokimyasal Metan Potansiyelinin Belirlenmesi	21
3.3.2. Aşı Çamuru Analizleri	23
3.3.3. Arıtma Çamuru Analizleri	24
3.3.4. Depo Gazı Ölçümü	24
3.4. Katı Atık Karakterizasyonu	25
3.5. Aşı Çamuru Karakterizasyonu	26
3.6. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu	27
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	28
4.1. Sıcaklık Koşulları	28
4.1.1. Atık Sıcaklıkları	28
4.2. Sızıntı Suyu Miktarları	29
4.2.1. Üretilen Sızıntı Suyu Miktarları	29
4.3. Depo Gazı Miktarları	31
4.3.1. Kümülatif Depo Gazı Miktarları	31
4.3.2. Depo Gazı Model Çalışması	33
4.3.3. Depo Gazı İçeriği	35
4.4. Çalışma Sonucu Katı Atık Karakterizasyonu	38
4.4.1. Biyokimyasal Metan Potansiyeli Testi	40
4.5. Atığın Çökme Miktarları	43
4.6. Geotekstilde Biyokütle Oluşumu	44
4.6.1. Biyokütlenin Geotekstil Üzerindeki Görsel Etkisi	44
4.6.2. Geotekstilin TEM Görüntüleri	45
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	48
 KAYNAKLAR	 51
ÖZGEÇMİŞ	57
EKLER	58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
ABR	: Atık Biyoreaktörleri
AÇ	: Arıtma Çamuru
BMP	: Biyokimyasal Metan Potansiyeli
EAY	: Entegre Atık Yönetimi
EKA	: Evsel Katı Atık
GBKS	: Geotekstil Bölmeli Kontak Sistemi
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
PET	: Polyester
PP	: Polipropilen
SKM	: Sabit Katı Madde
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
TK	: Toplam Karbon
TKM	: Toplam Katı Madde
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
TN	: Toplam Azot
TOK	: Toplam Organik Karbon
TP	: Toplam Fosfor
UKM	: Uçucu Katı Madde

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Atık yönetim hiyerarşisi.	3
2.2: Türkiye’de uygulanan atık bertaraf yöntemleri.	4
2.3: Büyük ölçekli atıksu arıtma tesisi çamur yönetimi.	7
2.4: Anaerobik ayrışma safhaları.	9
2.5: Geotekstil üzerindeki biyofilm yapısının TEM görüntüleri.	13
3.1: Pilot ölçekli reaktörlerin şematik görünümü.	14
3.2: a) Reaktör içerisindeki geotekstil, b) Çakıl drenaj haznesi.	15
3.3: a) Çakıl drenaj haznesi boş görünümü, b) Harici sızıntı suyu tankı.	16
3.4: Reaktörlerin üst görünümü.	17
3.5: Bu çalışmada kullanılan pilot ölçekli atık biyoreaktörleri.	20
3.6: BMP testi deneysel düzeneği.	27
4.1: R-1 için atık gövdesi sıcaklıkları.	28
4.2: R-2 için atık gövdesi sıcaklıkları.	28
4.3: R-3 için atık gövdesi sıcaklıkları.	28
4.4: R-1 ve R-2 için oluşan ve geri devir ettirilen sızıntı suyu miktarları.	29
4.5: R-3 için oluşan sızıntı suyu miktarları.	30
4.6: Üretilen toplam depo gazı miktarlarının zamana bağlı gösterimi.	31
4.7: Kümülatif depo gazı verilerinin model ile benzetilmesi.	34
4.8: R-1 ve R-2 için günlük depo gazı üretim debileri.	35
4.9: R-3 için günlük depo gazı üretim debisi.	35
4.10: CH ₄ oranlarının zamana bağlı gösterimi.	37
4.11: CO ₂ oranlarının zamana bağlı gösterimi.	37
4.12: H ₂ S oranlarının zamana bağlı gösterimi.	38
4.13: 540 günlük işletim süresi sonrası, reaktörlerden numune alma kapaklarının açılarak numune alınması.	40
4.14: Ham atık numunesine ait BMP testi sonucu.	40
4.15: R-1’in BMP testi sonucu.	42
4.16: R-2’nin BMP testi sonucu.	42
4.17: R-3’ün BMP testi sonucu.	43

4.18:	540 günlük işletim sonrası reaktörlerin iç görünümü.	44
4.19:	Bu çalışmada kullanılan geotekstil malzeme.	45
4.20:	Temiz geotekstil örneğinin 100x büyüklüğünde TEM görüntüsü.	45
4.21:	Biyokütle kalıntısına sahip geotekstil örneğinin 100x büyüklüğünde TEM görüntüsü.	46
4.22:	Geotekstil lifleri üzerindeki mikrobiyolojik topluluğun 5000x büyüklüğünde TEM görüntüsü.	46
4.23:	Geotekstil üzerindeki çakıl tabakasının 1000x büyüklüğünde TEM görüntüsü.	47

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Kullanılan geotekstil malzemenin teknik özelliği.	15
3.2: Reaktörlerin işletim özellikleri.	18
3.3: Katı atık analiz metodları.	21
3.4: Aşı çamuru analiz metodları.	23
3.5: Arıtma çamuru analiz metodları.	24
3.6: Katı atıkların kompozisyonu.	25
3.7: Katı atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri.	26
3.8: Aşı çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.	26
3.9: Arıtma çamurunun fiziksel özellikleri.	27
4.1: R-1, R-2 ve R-3 için, hesaplanan depo gazı verimleri.	32
4.2: Laboratuvar ölçekli yapılan benzer bir çalışmada, hesaplanan depo gazı verimleri.	32
4.3: Reaktörler için model parametreleri.	33
4.4: Arıtma çamurlu (R-1 ve R-2) ve arıtma çamursuz (R-3) reaktörlerdeki fiziksel parametrelerin değışimi.	39
4.5: Çıkış atıkların kimyasal özellikleri.	40
4.6: R-1, R-2 ve R-3 için, UKM içeriğine göre hesaplanan depo gazı verimleri.	41
4.7: Reaktörlerdeki atıkların çökme miktarları.	44

1. GİRİŞ

Türkiye’de son yıllarda vahşi depolama sahalarının yerini düzenli depolama sahaları almakta ve bu sahaların işletilmesi yerel yönetimler için maliyetli olmaktadır. Sık karşılaşılan problemler: yer sorunu, işletme maliyeti, oluşan sızıntı suyunun arıtma maliyetinin yüksek olması, atık stabilizasyon süresinin uzun yıllar sürmesi ve depo gazı yönetiminde karşılaşılan problemlerdir. Oluşan depo gazı verimli bir şekilde değerlendirilmezse sera gazı etkisi bakımından karbondioksitten çok daha zararlı olan metan gazı atmosfere verilmiş olacaktır. Depo sahalarının biyoreaktör olarak işletilmeleri durumunda yukarıda bahsedilen problemler kısmen telafi edilmiş olacaktır. Bu yüzden depolama sahalarının bir biyoreaktör olarak işletilmesi hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan gereklidir. Ülkemizde çevre açısından bir diğer problem de arıtma çamurlarıdır. Bu çamurların susuzlaştırılması, stabilize edilmesi ve bertaraf edilmesi arıtma tesisi işletmecilerine ilave maliyet yüklemektedir. Arıtma çamurlarının evsel atıklarla beraber susuzlaştırıldıktan sonra düzenli depolama sahalarında beraber bertarafı en ucuz yöntemlerden biridir.

Arıtma çamurları içerdikleri yüksek oranda nem, besin maddesi ve mikroorganizma popülasyonu sebebiyle depolama sahalarında atıkla beraber depolanabilmektedir. Arıtma çamurunun katı atık ile birlikte depolandığı reaktörlerde atık stabilizasyonunun hızlandığı gözlemlenmiştir [1].

Yüksek geçirimsizliğe sahip geotekstil malzemeler, atık depolama sahalarında geçirimsiz geomembranı çakıl ve atık parçacıklarından korumak için kullanılır. G.R. Koerner, sızıntı suyunun filtrasyonu ile biyofilm oluşması sonucu geotekstilin gözeneklerinin tıkanıldığını bulmuştur [2].

Böylece geotekstillerin farklı atıksu arıtım uygulamalarında biyofiltre olarak kullanılması araştırılmıştır [3]. Geotekstil malzeme üzerinde biyofilm oluşması ile atık ayrışması hızlanacağı için depo gazının daha kısa sürede ve daha yüksek miktarlarda oluşması sağlanmaktadır. Geri devirli atık biyoreaktöründe geotekstil tabakasının sızıntı suyuna etkisinin araştırıldığı çalışmada biri geotekstil tabakalı olan iki farklı atık biyoreaktörü kullanılmış ve geotekstil tabakası bulunan reaktörde sızıntı suyu kalitesinin ve depo gazı veriminin daha iyi olduğu incelenmiştir [4].

Bu çalışmada üç adet pilot ölçekli anaerobik biyoreaktör arıtma çamurunun depo gazına etkisini araştırmak için kurulmuştur. Reaktörlerin hepsi aynı özellikte

evsel katı atık ile doldurulmuştur. Arıtma çamurlarının atık ile bertarafına etkisini araştırmak için iki reaktör (R-1 ve R-2) susuzlaştırılmış arıtma çamuru ile doldurulmuştur. Fakat Reaktör-2’de tabandaki çakıl tabakası üzerine geotekstil malzeme yerleştirilmiştir. Reaktör-3 hariç diğer reaktörler sızıntı suyu geri devri ile işletilmiştir. Reaktör içerisinde mezofilik şartları sağlamak için elektronik kontrollü otomatik ısıtma sistemi kullanılarak 37 °C sıcaklıkta sabitlenerek 540 gün işletilmiştir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı, pilot ölçekli geri devirli anaerobik biyoreaktörlerde arıtma çamurları ile evsel katı atıkların birlikte depolanmasını ve geotekstil malzemenin depo gazı üretimine ve atık stabilizasyonuna etkisini araştırmaktır.

Geotekstil malzemeler, yüksek yüzey alanı ve poroziteye sahip olması nedeniyle mikroorganizmalar için uygun bir ortam oluşturmaktadırlar. Yüksek poroziteli geotekstil malzemelerin, depo gazı üretimini ve atık stabilizasyonunu hızlandırmak için kullanımıyla ilgili literatürde çok fazla çalışma mevcut değildir. Bu çalışmanın hipotezi geotekstilin yüksek biyokütle oluşturma kapasitesi ile ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada amaç, depo sahalarında geotekstil malzemelerin depo gazı üretim oranını ve atık stabilizasyon sürecini hızlandırmak için uygulanabilirliğini araştırmaktır.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır ve her bir bölümün içeriği aşağıda özetlenmiştir.

- Bölüm 1: Bu bölüm girişe ayrılmış ve tezin amacı katkısı ve içeriğinden bahsedilmiştir.
- Bölüm 2: Literatür araştırması hakkında bilgi verilmiştir.
- Bölüm 3: Deneysel kurulum, reaktörlerin işletimi ve deneysel prosedürlere yer verilmiştir. Ayrıca katı atık, arıtma çamuru ve aşı çamurunun karakterizasyonu yer almaktadır.
- Bölüm 4: Deneysel sonuçlara yer verilmiştir ve ayrıntılı olarak açıklanmıştır.
- Bölüm 5: Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara ve yorumlara yer verilmiştir.

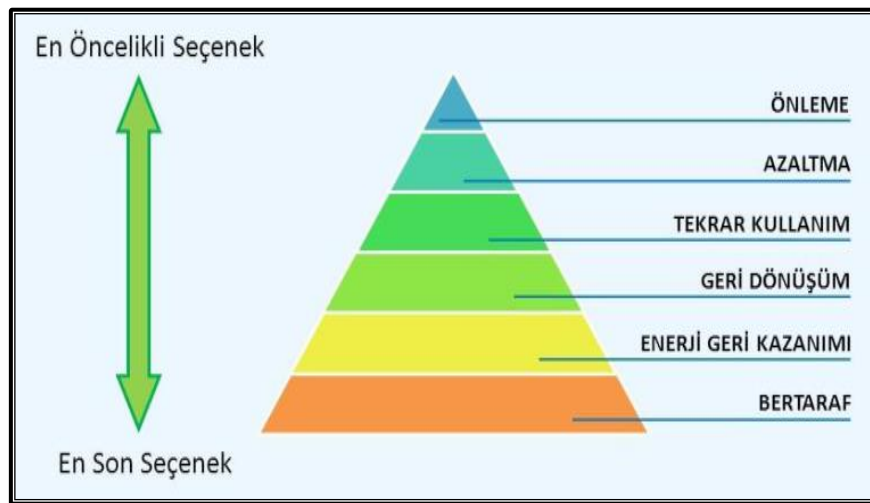
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Katı Atık Yönetimi

Hızlı nüfus artışı nedeniyle artan katı atık miktarları toprak, hava ve su kirliliği gibi çevre problemlerine neden olmaktadır. Katı atıkların toplanması, taşınması ve bertaraf edilmesi ekonomik anlamda büyük yük olmaktadır. 5216 sayılı Büyükşehir Belediye Kanunu ve 5393 sayılı Belediye Kanununa göre atıkların toplanması, taşınması, tekrar değerlendirilmesi ve nihai bertarafı yerel yönetimlere verilmiştir. Atık yönetimi ile ilgili çıkarılan mevzuatlarda da belirtildiği gibi atık yönetimi konusunda ilk yapılacak olan iş atığın kaynağında kontrol altına alınması ve oluşan atığın miktarının azaltılması öncelikli adımdır. Bundan sonra atığın geri dönüştürülmesi ve geri kazanılması gerekmektedir.

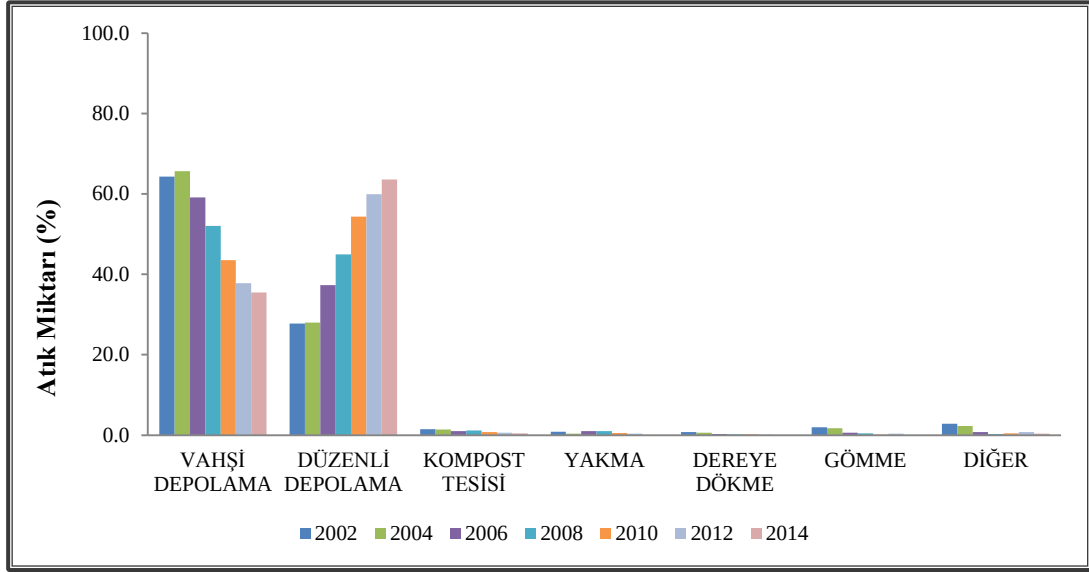
Atık yönetimi, oluşan atıkların bertaraf edilmesinde çevreye ve ekonomiye olan etkilerinin en aza indirilmesini amaçlar. Atıkların oluşturduğu etkileri en aza indirmek için atık oluşumundan bertarafına kadar entegre katı atık yönetim sistemi basamakları uygulanmalıdır. Entegre atık yönetimi (EAY), belli bir atık yönetimi hedefine yönelik olarak gerekli uygun yöntem, teknoloji ve yönetim programlarının seçilmesi ve uygulanması olarak tanımlanabilir [5].

EAY hiyerarşisi; atık önleme, azaltma, tekrar kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve bertaraf basamaklarını içermektedir (Şekil: 2.1) [6].



Şekil 2.1: Atık Yönetimi Hiyerarşisi.

Katı atıklar için, vahşi depolama, düzenli depolama, kompostlama, yakma ve geri kazanım gibi bertaraf yöntemleri uygulanabilmektedir. En çok kullanılan yöntemlerden biri olan vahşi depolama zamanla yerini düzenli depolama ile bertaraf yöntemine bırakmıştır. Diğer bertaraf yöntemleri Türkiye’de pek uygulanmamaktadır. Şekil: 2.2’de Türkiye için yıllara göre atık bertaraf yöntemleri gösterilmektedir [7].



Şekil 2.2 Türkiye’de Uygulanan Atık Bertaraf Yöntemleri.

2.1.1. Düzenli Depolama

Katı atık üretimi, katı atık miktarındaki artışa bağlı olarak gelişen küresel bir sorundur. Atık miktarındaki bu artış, katı atık yönetimi seçeneklerini geliştirmeyi gerektirir. Atık depolama sahaları en yaygın kullanılan atık yönetimi metotlarından biridir. Katı atıkların anaerobik ayrışması için fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler meydana gelir. Bunun sonucunda uzun zaman içinde sızıntı suyu ve depo gazı üretilir [8].

Düzenli depolama sahalarında en yaygın karşılaşılabilecek problemler sızıntı suyu ve gaz üretimidir. Sızıntı suyu yağmur sularının katı atıkların içerisinde çözülmesi ile oluşur. Sızıntı suyu yüksek konsantrasyonlarda organik ve inorganik maddeler, toksik bileşikler ve ağır metaller içerebilir. Diğer bir çevresel risk ise, atıkların depolanması süresince gaz üretimi ve bu gazların taşınımıdır. Depo gazı

(CH₄, CO₂ ve H₂S) depolama sahasında atıkların anaerobik ayrışması sonucunda oluşur. Oluşan depo gazı miktarının %60'ı metan gazından meydana gelir [9].

27533 sayılı ve 2010'da yayınlanan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliği'ne göre düzenli depolama tesisinin tabanı ve yan yüzeylerinde, sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde bir geçirimsizlik tabakası teşkil edilmelidir. Bunun için kil veya eşdeğeri malzemeden oluşturulmuş geçirimsizlik tabakası serilir. Sızıntı sularının toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi için düzenli depolama tesislerinde doğal geçirimsizlik tabakasına ilave olarak sızıntı suyu toplama ve drenaj sistemi inşa edilmelidir. Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre, tesisin kurulduğu bölgenin yağış özelliklerinden dolayı kapatma sonrası süreçte sızıntı suyunun oluşumunun engellenmesi ve depo gazlarının oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi amacıyla gaz drenaj katmanı inşa edilmelidir.

2.1.2. Atık Biyoreaktörü

Konvansiyonel atık depolama sahalarında depolanmış katı atıklar yavaş bir şekilde ayrılmakta, ayrıca uzun yıllar boyunca bakım ve işletme gerektirmektedir. Atık depolama sahalarında atıkların daha kısa sürede ayrışmasını sağlamak için sızıntı suyu geri devirli dizayn edilip işletilen sisteme 'atık biyoreaktörü' denilmektedir.

Biyoreaktörlerin tipik bir atık depolama sahasına göre avantajları; atığın hızlı ayrışması ve stabilizasyonu ile depo gazı miktarının artırılmasını ve kontrolünü, sızıntı suyu kontrolü ile de yeraltı ve yüzeysel suların kirlenme potansiyellerinin azaltılmasını sağlamaktır.

Depo sahasında atık gövdesinin nem oranının artırılması anaerobik ayrışmayı hızlandırır, besin maddelerini, organik maddeyi ve mikroorganizmaları depo sahasına eşit olarak dağıtır ve atıkların hidrolizini ve metan üretimini inhibe eden organik asitleri de seyreltir. Anaerobik atık biyoreaktörlerinde nem muhtevasını artırmak için en yaygın metot sızıntı suyu geri devridir [10, 11]

Atık biyoreaktörlerinde (ABR), biyolojik ayrışmayı hızlandırmak için; sızıntı suyu geri devri, atıkların parçalanması, pH ayarlama, besin ilavesi, çamur eklenmesi ve sıcaklık kontrolü gibi farklı işletim uygulamaları gerekir. ABR'leri atık depolama

sahasını kontrol etmek, izlemek ve atık stabilizasyonunu optimize etmek için kullanılır [12, 13].

Sızıntı suyu geri devri anaerobik ABR’de atıkların biyolojik olarak ayrışmasını ve biyogaz üretimini artırır [12, 14-16]. Bazı çalışmalarda, anaerobik ABR’de sızıntı suyu geri devri ve su ilavesi ile atık stabilizasyonunun hızlandığı tespit edilmiştir [8, 14, 17, 18].

Birçok çalışmada, anaerobik ABR’de atıkların doldurulmadan önce parçalanmasının ve sıkıştırılmasının atıkların ayrışması üzerinde olumlu etki oluşturduğu görülmüştür [14, 15, 17, 19-23]. Sponza ve Ağdağ (2005) yaptıkları çalışmada, anaerobik geri devirli atık biyoreaktörlerinde atıkların parçalanmasının ve sıkıştırılmasının atık ayrışması üzerine olan etkisini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmaya göre atıkların sıkıştırılarak doldurulmasının atık ayrışmasını hızlandığı tespit edilmiştir [23].

Anaerobik aşı çamurunun atık bünyesine verilmesi biyoreaktörlerde mikrobiyal popülasyonun sağlanması için önemlidir. Aşılama işleminde, atık bünyesine uygun bir anaerobik çamurun yeterli miktarda verilmesi başlangıç aşamasında önemli bir faktördür [22, 24].

Arıtma çamurları içerdikleri yüksek oranda nem, besin maddesi (özellikle fosfor) ve mikroorganizma popülasyonu sebebiyle depolama sahalarında atıkla beraber depolanabilmektedir. Yapılan çalışmalarda biyoreaktöre arıtma çamuru ilavesinin biyolojik verimliliği artırdığı ve sızıntı suyu kalitesini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Arıtma çamurunun depo sahasındaki mikroorganizmalar için azot, fosfor ve diğer mikrobeyinleri sağladığı ve depo sahası çıkış sızıntı suyunda BOİ ve KOİ’nin hızlı bir şekilde azalmasını sağladığı gözlemlenmiştir [1, 12, 20, 25]. Bu parametrelerin optimizasyonu ile depolama sahasında istenilen mikrobiyal popülasyonun oluşması için uygun ortam sağlanır ve böylece atığın stabilizasyonu da hızlı bir şekilde gerçekleşir. Böylece metan gazı oluşumunun da hızlanması, atık hacminin azalması ile ilave hacim kazanılması ve sızıntı suyundaki kirletici maddelerin daha kısa sürede giderilmesi sağlanır [9].

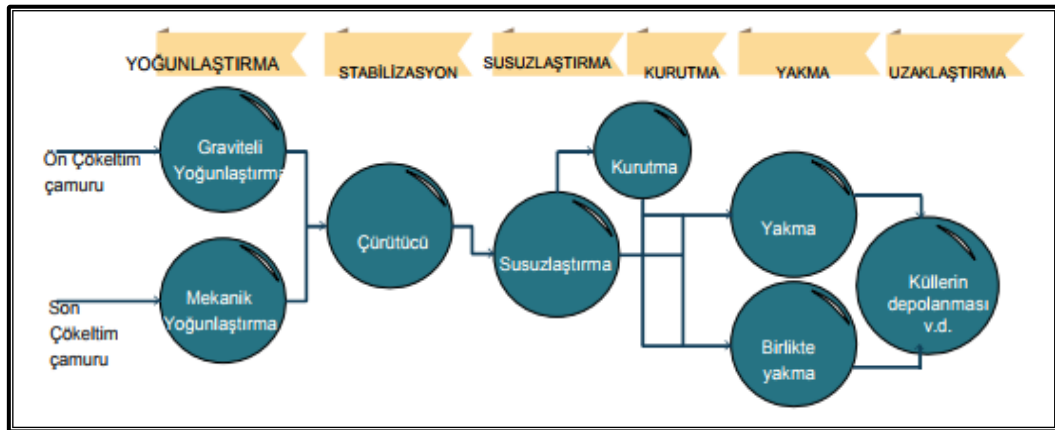
2.2. Arıtma Çamurlarının Yönetimi

Arıtma tesislerinde su ve atıksu arıtımı sonucu oluşan katı ve sıvı karışımında bulunan maddeler arıtma çamuru (AÇ) olarak adlandırılmaktadır. AÇ’ları çevreye

verildiklerinde çevrede istenmeyen kirlilikler meydana geleceği için arıtılmaları gerekmektedir.

Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'ne göre çamurlar, yüksek oranlarda su muhtevasına sahip olmaları sebebiyle, su ve organik madde içerikleri azaltılır. Ayrıca geri kazanımları ve bertarafları açısından uygun prosesler ile arıtılmaları sağlanır. Çamurların işlenmesi ve arıtılmaları amacıyla uygulanan yöntemlerden yoğunlaştırma, şartlandırma, susuzlaştırma ve kurutma yöntemlerinde esas amaç nem içeriklerinin azaltılmasıdır. Yakma, kompostlaştırma ve stabilizasyon gibi yöntemler ile çamurun organik içeriği azaltılarak kararlı hale getirilir. Bu yöntemlerin yanı sıra, belirli oranda susuzlaştırılmış arıtma çamurlarının uygun düzenli depolama alanlarında depolanarak nihai bertarafı mümkündür.

AÇ'nun susuzlaştırılması, stabilize edilmesi ve bertarafı arıtma tesisi işletmecilerine ilave maliyet yüklemektedir. Şekil 2.3'te büyük ölçekli atıksu arıtma tesisi çamur yönetim sistemi gösterilmiştir [26].



Şekil 2.3: Büyük Ölçekli Atıksu Arıtma Tesisi Çamur Yönetimi.

2.3. Arıtma Çamurlarının Evsel Katı Atıklar ile Birlikte Depolanabilirliği

Evsel katı atık (EKA) ve arıtma çamurları (AÇ) arıtım ve bertaraflarında farklı atık yönetim stratejileri içermektedirler. Konvansiyonel EKA yönetimi bertarafında ön işlem gerektirmemektedir. Arıtma çamurları yönetimi ise çamurun stabilize edilmesi, susuzlaştırılması ve bertaraf edilmesi gibi kapsamlı bir çamur arıtım sistemi içermektedir [27].

AÇ'nun susuzlaştırılması, stabilize edilmesi ve bertarafı arıtma tesisi işletmecilerine ilave maliyet yüklemektedir. Arıtma çamurunun atıkla beraber depolanması alternatif bir bertaraf yöntemidir. Arıtma çamurunun içeriğinde bulunan nem, besin maddeleri, organik madde ve mikroorganizmalar biyolojik ayrışmayı ve depo gazı üretim verimini artırmaktadır.

Literatürde arıtma çamurlarının katı atıkların anaerobik ayrışması üzerindeki etkisini araştıran birçok çalışma vardır. Bunlardan bazıları pozitif etkisi olduğunu bazıları negatif etkisi olduğunu ya da etkisi olmadığını bulmuşlardır.

Kinman ve Nutini (1987) yaptıkları çalışmada biyoreaktör içerisine anaerobik çürütülmüş çamur eklendiğinde yüksek metan üretiminin gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Atık depolama sahalarında depo gazı üretimini artırmanın tekniklerini değerlendirmişlerdir. Bu teknikler; sızıntı suyu geri devri, besin ilavesi ve anaerobik çamur eklenmesidir. Çamur ilavesinin en yüksek metan üretimini sağladığı bulunmuştur [28].

Arıtma çamurları organik madde bakımından zengindir [29]. Birçok çalışmada biyoreaktör içerisine anaerobik arıtma çamuru ilavesinin metan üretimini artırdığı görülmüştür [28, 30-33].

Arıtma tesisi çamurlarından ön çökeltim çamuru ve atık aktif çamur katı atıklar ile beraber depolandığında, atık stabilizasyonu üzerinde etkili olduğu ve yüksek metan üretim veriminin olduğu gözlemlenmiştir [33].

Leuschner (1989) yaptığı çalışmada foseptik çamurunu kullanmıştır ve foseptik çamurunun mikrobiyal popülasyon için yetersiz olduğunu vurgulamıştır. Biyoreaktör içerisine foseptik çamurunun eklenmesinin metan üretiminin ve sızıntı suyu kalitesinin üzerinde olumsuz etki oluşturduğu gözlemlenmiştir [34].

Valencia vd., (2009) yaptıkları çalışmada Leuschner'in aksine foseptik çamurunun anaerobik biyoreaktörlerde evsel katı atıkların stabilizasyon üzerinde olumlu etkisi olduğunu, çamurun nem muhtevasını artırdığını ve bakteri popülasyonu için uygun ortam oluştuğunu vurgulamışlardır [1].

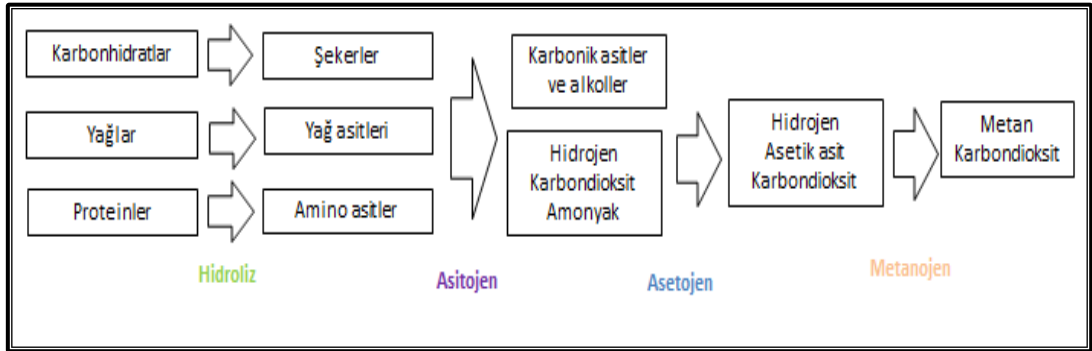
2.4. Atık Stabilizasyonu

Atık stabilizasyonu, fiziksel (buharlaştırma, çökme vb.), kimyasal (oksidasyon/redüksiyon, hidroliz) ve biyolojik prosesler (aerobik ve anaerobik ayrışma)'ın gerçekleşmesiyle meydana gelir. Sızıntı suyu, gaz, artık madde ve

biyolojik olarak ayrılmış ürünler bu proseslerin gerçekleşmesiyle meydana gelir [10]. Biyolojik prosesler atıkların stabilizasyonu üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Katı atıkların organik bölümü başlangıçta tüm serbest oksijen tüketilinceye kadar aerobik olarak bozunur ve daha sonra anaerobik proses başlar ve tüm biyolojik olarak bozunabilir organikler metanojenler tarafından tüketilene kadar devam eder. Anaerobik ayrışma sonucunda, metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) ve düşük oranda diğer gazlar içeren depo gazı üretilir.

2.4. 1. Anaerobik Ayrışma Safhaları

Anaerobik ayrışma anoksik şartlar altında meydana gelen biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan karmaşık bir indirgenme prosesidir. Anaerobik ayrışma sırasında metan oluşumu, hidroliz, asitojen, asetojen ve metanojen olmak üzere dört farklı fazda gerçekleşir. Şekil 2.4'te anaerobik ayrışma sırasında gerçekleşen ayrışma safhaları verilmiştir [35].



Şekil 2.4: Anaerobik ayrışma safhaları.

- Hidroliz

Anaerobik ayrışma prosesinin ilk safhasıdır. Çözünmeyen organik maddeler ve yüksek molekül ağırlıklı bileşikler, (lipidler, polisakkaridler, proteinler, yağlar, nükleik asitler vs) enzimler aracılığıyla çözünebilir organik maddelere (monosakkaritler, amino asitler ve diğer basit organik bileşikler) dönüştürülür. Bu aşama anaerobik ve fakültatif anaerobik bakteriler tarafından gerçekleştirilir [36]. Bu ilk safha çok önemlidir çünkü büyük organik bileşikler kolayca absorbe edilemez ve mikroorganizmalar tarafından substrat olarak kullanılırlar. Biyolojik bozunmayı sağlamak için bazı mikroorganizmalar, büyük molekülleri daha küçük parçalara

bölerek mikroorganizmanın hücrenin içine alıp enerji ve besin maddesi olarak kullanmaları için, hücre dışı enzimler olarak adlandırılan farklı enzim türleri salgırlar. Organik maddelerin bir kısmı bu safhada stabilize olur. Atıkların anaerobik ayrışması esnasında gerçekleşen bu ilk fazda CH_4 oluşumu olmaz.

- Asitojen-Asit Oluşumu

Hidroliz safhasında üretilen ara ürünler, farklı fakültatif ve zorunlu anaerobik bakteriler tarafından alınır ve bütirik asitler, propanoik asitler, asetik asitler, alkoller, hidrojen ve karbondioksit gibi kısa zincirli organik asitlere dönüştürölür [37]. Bu fazın sonunda yüksek uçucu yağ asitleri (UYA) konsantrasyonları bulunabilir.

- Asetojen-Asetat Oluşumu

Asitojenik safhasında üretilen ürünler burada substrat olarak kullanılır. Ürünler direk metana dönüştürölmez metanojenik substratlara dönüştürölür. UYA'leri ve alkoller asetat, hidrojen ve karbondioksit gibi metanojenik substratlara dönüştürölür. Uzun karbon zincirli UYA asetat ve hidrojene okside edilir.

- Metanojen-Metan Oluşumu

Bu safha organik maddelerin anaerobik stabilizasyonunun son safhasıdır. Metan oluşturan bakteriler tarafından son ürün olan CH_4 ve CO_2 meydana gelir. Metanojenler belli sıcaklık aralıklarında yaşarlar. Termofilik bakteriler 50-60 °C arasında faaliyet gösterirler, mezofilik bakteriler ise 30-40 °C arasında faaliyet gösterirler. Metanojenler metabolizmaları için besin maddesi ve enerji kaynağı olarak çok sınırlı sayıda karbon, oksijen, hidrojen, azot ve fosfor gibi besin maddeleri kullanırlar. Demir, nikel, kobalt, sülfür, kalsiyum ve diğer iz bileşikler gibi nutrientlere ise daha az miktarda gereksinim duyarlar. Evsel kaynaklı atıklar bu temel besin kaynaklarını yeterli miktarlarda ihtiva ederler. Metanojen bakteri türlerinin büyük çoğunluğu ihtiyaç duydukları enerjiyi iki temel reaksiyona dayanarak elde ettiklerinden, metanojenler fizyolojik olarak iki grupta toplanabilir [38].

- Asetat Kullanan Metanojenler: CH_4 'ın %70'i asetattan (CH_3COO^-) oluşur ve asetat CH_4 bakterileri için en önemli substrattır. Asetofilik bakteriler asetik asit

(CH₃COOH) veya asetatı CO₂ ve CH₄ gazları gibi son ürünlere dönüştürürler (Denklem 2.1).



- H₂ kullanan metanojenler: Daha önceki safhalarda (asitojen ve asetojen) üretilen H₂'i kullanarak hidrojenofilik bakteriler CH₄ ve H₂O üretirler. CH₄'ın % 25-30'luk kısmı bu reaksiyon sonucu üretilir (Denklem 2.2).



2.5. Depo Gazı Oluşumu

Depo gazı, biyolojik olarak ayrışabilen organik madde içeren depo sahalarında üretilir. Depo gazının temel bileşenleri metan ve karbondioksit gazlarıdır. Eğer depo gazı kontrol edilemezse kötü koku oluşturur, hava kalitesini düşürür ve olumsuz sağlık etkilerine neden olur. Depo gazından oluşan metan, küresel ısınmaya sera gazı etkisi olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Anaerobik bir depolama sahasında organik madde ile üretilen depo gazı enerji üretimi için kullanılabilir. Süreç çok yavaş gerçekleşir, yavaş metan üretim periyodu ile başlar. Anaerobik depolama alanının tam biyolojik stabilizasyonu 100 yıl sonra bile devam edebilir [39].

Depolama alanlarından kaynaklanan metan emisyonlarının önemini belirtmek için, metanın ısı emiliminin karbon dioksitten yaklaşık 25 kat fazla olduğu bilinmelidir. Depo gazı, metanda bulunan enerji içeriğinden dolayı birçok yararlı kullanıma sahiptir. Enerji için depo gazını kullanabilen ekonomik çeşitli teknolojiler bulunmuştur. Bu buluşlar arasında depo gazından elektrik üretilmesi en yaygın kullanılan seçenektir.

Depo gazı, evsel katı atık (EKA), arıtma çamuru ve biyolojik olarak ayrışabilir atık gibi organik atıkların anaerobik (oksijensiz) ayrışması ile meydana gelir [40, 41]. Anaerobik ayrışma prosesinde, mikroorganizmaların yardımıyla biyokütle depo gazına dönüştürülür [42].

Depo gazı içeriği, metan (%55-75), karbon dioksit (%25-45), azot (%0-5), hidrojen (%0-1), hidrojen sülfür (%0-1) ve oksijen (%0-2) gazlarından oluşur. Üretilen gaz hacminin yaklaşık %90'ı CH₄ ve CO₂ gazlarından oluşmaktadır [43].

2.6. Geotekstil Malzeme

Depo sahalarında atık bünyesine sıvı eklenmesi gibi, depo gazı üretim oranının ve atık stabilizasyon oranının verimliliğini artırmanın farklı yolları vardır. Diğer etkili bir yöntem ise depo sahalarında anaerobik mikroorganizmaların büyümesine ortam sağlamak için drenaj tabakasında sentetik bir malzeme (geotekstil malzeme) kullanmak. Geotekstil malzemeler yüksek yüzey alanı ve poroziteye sahip olması nedeniyle mikroorganizmalar için uygun bir ortam sağlayabilir.

Geotekstil malzemeler ince, dayanıklı, geçirgen özelliğe sahip ve genellikle polyester (PET) ve polipropilen (PP) türlerden üretilirler. Geotekstil malzemeler örülmüş (woven) ve dokunmuş (nonwoven) olmak üzere iki çeşittirler. Depo sahalarında geotekstil, geomembranın çakıl ve katı parçacıklardan korunması için kullanılır. Buna ek olarak geotekstiller, ayırma, filtrasyon, drenaj ve diğer birçok amaçla inşaat, geoteknik ve çevre mühendisliğinde kullanılmaktadırlar.

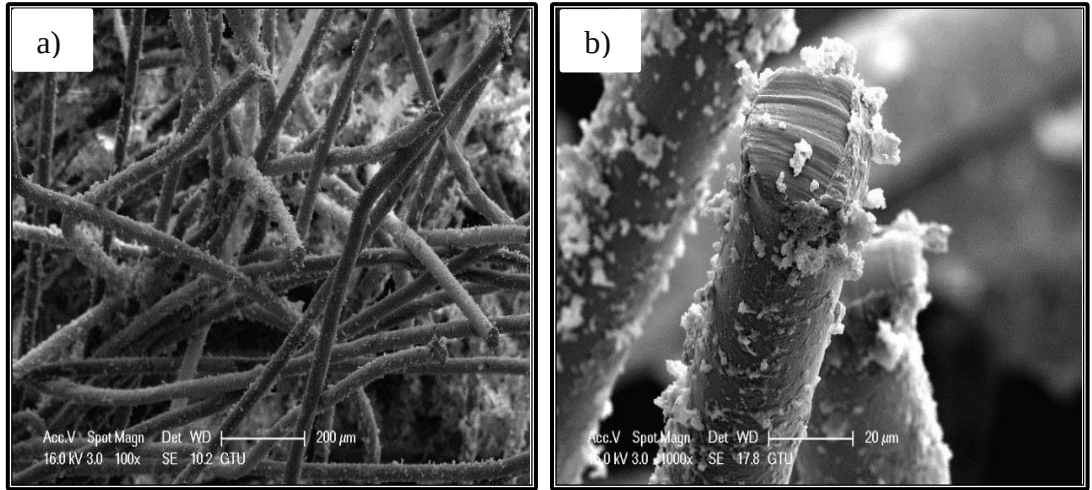
Geotekstil malzemelerin atıksuya maruz kalmaları sonucu iç yapılarında biyokütle oluşumu ile ilgili çalışmalar 1990'lı yıllarda başlamıştır. Bu konuda ilk çalışma depolama sahalarında kullanılan geotekstillerin sızıntı suyu filtrasyonu ve biyofilm oluşması sonucu tıkanması konusundadır [2]. Farklı geotekstil çeşitleri ve sızıntı suyu numuneleri ile yapılan filtrasyon çalışmalarında sızıntı suyu çakıl, geotekstil ve kum tabakalarından oluşan bir reaktörden süzdürülmüş ve geotekstillerin sızıntı suyuna maruz kalınca tıkandığı, geotekstil porozitesi ve kalınlığının bu tıkanmayı etkilediği, ısı yardımı ile birleştirilmiş geotekstillerin daha hızlı tıkandığı, sızıntı suyu organik ve hidrolik yükünün fazla olmasının tıkanmayı hızlandırdığı gözlemlenmiştir [2, 44].

Geotekstil malzemeler endüstriyel ve evsel atıksuların arıtılmasında biyofilm biyoreaktörü olarak kullanılmıştır [45]. Yaman vd. (2003), ön arıtmadan geçmiş evsel atıksu ve yağmursuyu karışımı, geotekstil tabakalarından oluşan bir biyofiltreden filtre edilmiş ve çalışma sonucunda geotekstilin içyapısında biyofilm oluşması sonucu su kalitesinde yüksek oranlarda iyileşme gözlemlenmiştir [3]. Diğer çalışmalarda, geotekstil malzemeler atıksu ve yağmursuyu arıtımında farklı yöntemlerle kullanılmıştır; biyofiltre olarak atıksu arıtımında geotekstil bölmeli kontak sistemi ile (GBKS) yağmursuyu taşkın sularının arıtımında [46], GBKS ile yağmursuyu arıtımında [47], ve geotekstil biyofiltrelerinin foseptik suyu arıtımında

kullanılmıştır [48]. Yaman vd. (2006), yaptıkları bir çalışmada ise, atıksuyun geotekstil biyofiltrelerin geçirimsiliğine olan etkisini araştırmışlardır [49].

Başka bir çalışmada silindirik bir yapının etrafı geotekstil ile sarılarak atıksuya maruz bırakılmış ve geotekstil içerisinde ve yüzeyinde biyofilm oluştuğu gözlemlenmiştir. 250 günlük çalışma sonunda sentetik olarak üretilen kuvvetli atıksudan geotekstil yardımıyla organik madde, azot ve fosfor giderimi analiz edilmiştir. Sentetik olarak üretilen atıksudaki karbon %98,9 oranında, azot %91,5 oranında, fosfor ise %95 oranında giderilmiştir [50].

Diğer bir çalışmada, laboratuvar ölçekli evsel katı atık yüklü anaerobik biyoreaktörlerde drenaj tabakasına geotekstil malzeme eklenerek sızıntı suyu arıtımı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada geotekstil malzeme kullanılan reaktörde, kontrol reaktörüne göre sızıntı suyu kalitesinin daha hızlı geliştiği görülmüştür. 210 günlük çalışma sonucunda geotekstil numunesinin taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile resimleri çekilmiş ve biyofilm açıkça tespit edilmiştir. Biyofilmin sadece yüzeyde değil iç gözeneklerde de oluştuğu gözlemlenmiştir. Geotekstil malzemesinin TEM görüntüleri Şekil 2.5'te verilmiştir [51].



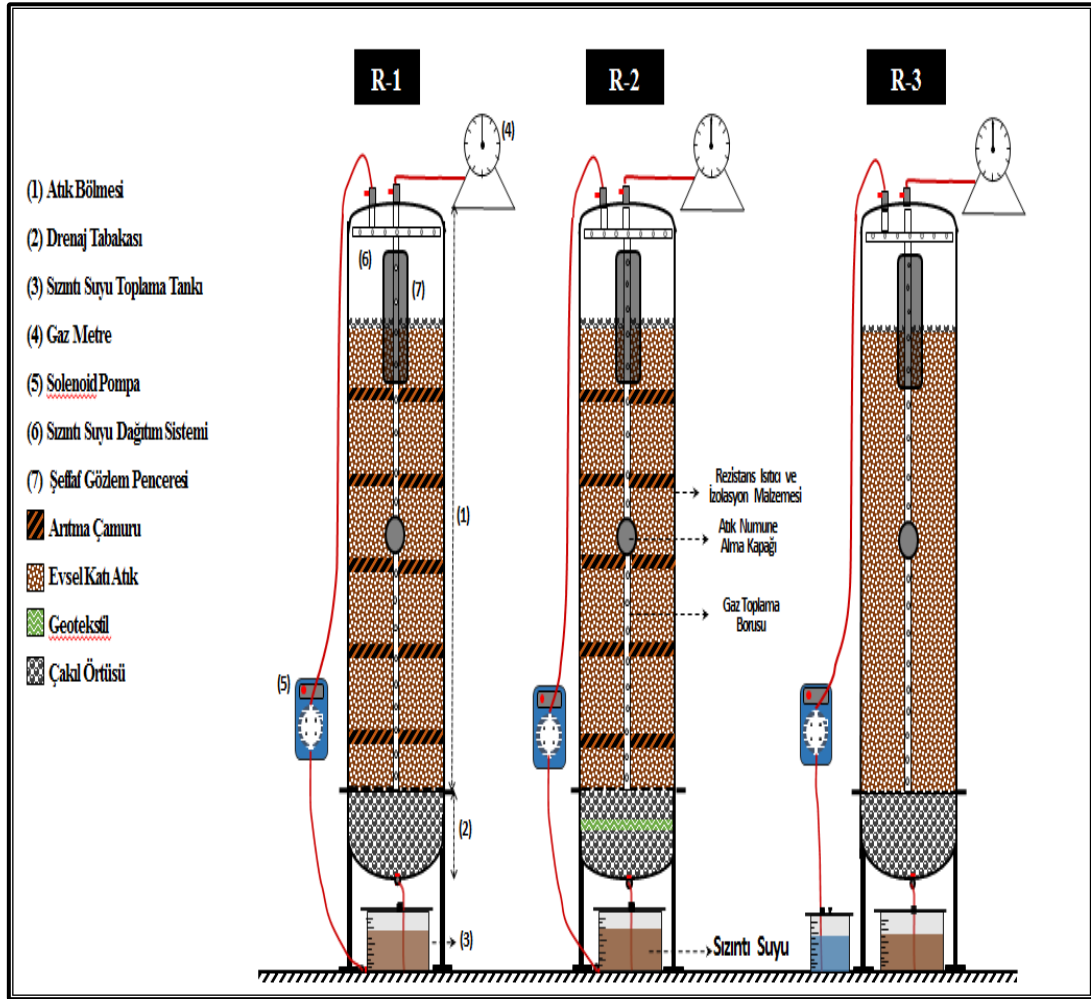
Şekil 2.5: Geotekstil üzerindeki biyofilm yapısının TEM görüntüleri:
a) 100x büyütme, b) 500x yakın büyütme.

3. MATERİYAL VE METOD

3.1. Deneysel Başlangıç

3.1.1. Reaktörlerin Yapısal Özellikleri

Pilot ölçekli, 350 cm yüksekliğinde 80 cm iç çapında 3 adet paslanmaz çelik gövdeli ve izolasyonlu reaktör kurulmuştur. Her bir reaktör dört ana çıkış ile teçhizatlandırılmış olup; bunlardan biri sızıntı suyu drenajı, ikincisi katı atık örnekleme, üçüncüsü gaz toplama, son olarak dördüncü çıkış ise sızıntı suyu geri devri amaçlı kullanılmıştır. Reaktör sıcaklığı elektronik kontrollü otomatik ısıtma sistemi ile sürekli olarak takip edilmiştir ve 37 °C’de sabit tutulmuştur. Reaktörlerin şematik görünümü Şekil 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1: Pilot ölçekli reaktörlerin şematik görünümü.

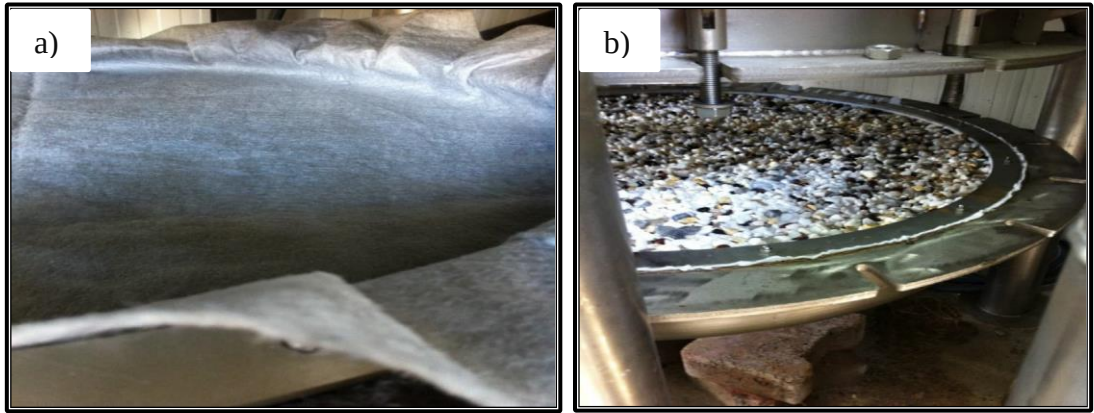
3.1.2. Sızıntı Suyu Drenaj Tabakası

Reaktör içerisine geri devrettirilecek sızıntı suyu atık gövdesinden geçerek reaktör tabanına yerleştirilen drenaj tabakasından geçtikten sonra harici sızıntı suyu tanklarında toplanmıştır. Geotekstilin atık ayrışmasına ve depo gazı oluşumuna etkisinin de incelendiği bu çalışmada drenaj tabakası özel bir öneme sahiptir.

Tüm reaktörlerde drenaj malzemesi olarak 10 mm dane çaplı doğal çakıllar iyice yıkandıktan sonra kullanılmıştır. Her bir reaktör için yaklaşık 150 kg çakıl kullanılmıştır. R-2’de kullanılan geotekstil (GT) çakıl malzemesinin arasına rijit bir şekilde serilerek hazne çeperlerinden sabitlenmiştir. Geotekstil malzemenin üzerine tekrar çakıl serilerek düz bir şekilde çakıl drenaj tabakasının arasında olması sağlanmıştır (Şekil 3.2). Kullanılan örgüsüz (nonwoven) geotekstil malzemenin ayrıntılı özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Kullanılan geotekstil malzemenin teknik özelliği.

Marka ve Model	İstanbul Teknik Geoteknik 2000
Malzeme	Polipropilen
Üretim Tekniği	İğneleme ve Isıl İşlem
Ağırlık	200 g/m ²
Kalınlık	1,90 mm
Geçirgenlik	95 L/s.m ²
Göz Açıklığı	110 µm



Şekil 3.2: a) Reaktör içerisindeki geotekstilin görünümü, b) Çakıl drenaj tabakası.

3.1.3. Sızıntı Suyu Toplama, Geri Devir ve Dağıtım Sistemi

Oluşan sızıntı suları drenaj bölgesinin tabanına yerleştirilmiş gözenekli yarım ay şeklindeki giderden toplanarak harici sızıntı suyu tanklarına aktarılmıştır. Burada bekleyen sızıntı sularının miktarları, tankın yarı şeffaf gövdesi sayesinde periyodik olarak gözlemlenmiştir. 50 litre hacminde imal edilen PVC sızıntı suyu tankları kapalı devre olarak çalıştırılmıştır ve süzülerek toplanan sızıntı sularının tamamı günlük olarak atık gövdesine peristaltik pompalar vasıtası ile geri devir ettirilmiştir (Şekil 3.3). Pompalar, otomasyon sistemi ile her gün bir defa aynı saatte 3 saat boyunca otomatik olarak tanktaki su bitene kadar çalışmıştır ve şamandıra sayesinde su bittiğinde yine otomatik olarak durmuştur.

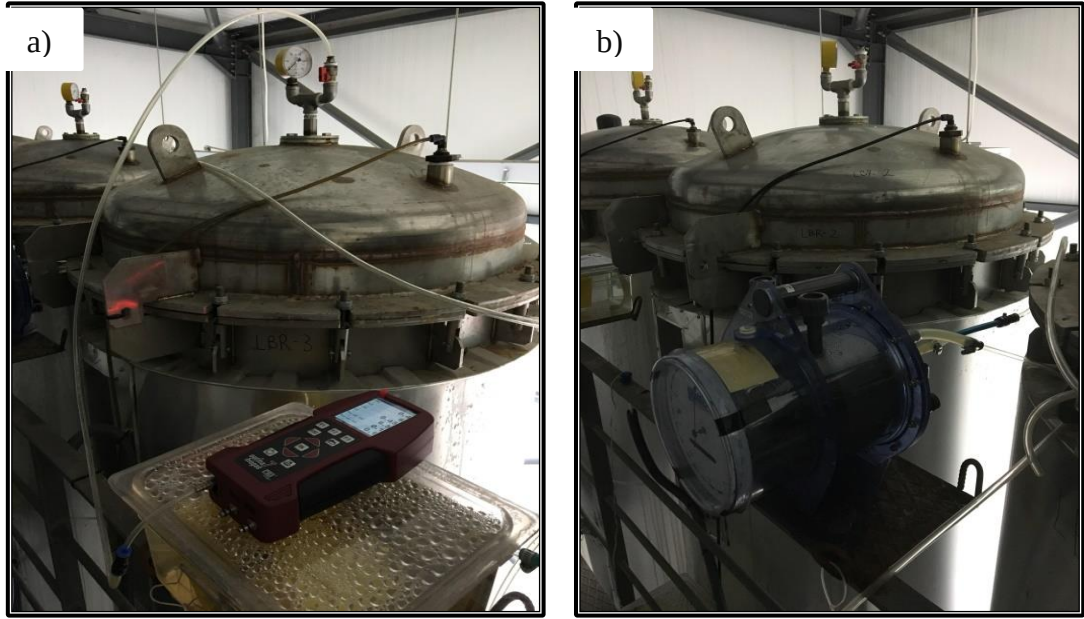
Reaktörün üst kapağının hemen altına yerleştirilen, zirai işlemlerde suyu püskürtmek amaçlı kullanılan fıskiyeler sızıntı suyu dağıtım sisteminde kullanılmıştır. Selenoid pompa yardımıyla geri devir ettirilen sızıntı suları üst çakıl tabakası üzerinden atık gövdesine enjekte edilmiştir. Geri devir ettirilen sızıntı sularının düzgün ve eşit bir şekilde atık üzerine dağıtılabilmesi için atığın en üst kısmına 1-2 cm kalınlığında 10 mm çaplı çakıl örtüsü serilmiştir.



Şekil 3.3: Harici sızıntı suyu tankı.

3.1.4. Depo Gazı Toplama ve İzleme Sistemi

Anaerobik atık biyoreaktör içerisinde oluşacak gazları toplama amaçlı 5 cm çapında 300 cm yüksekliğinde gözenekli PVC boru, atık gövdesinin merkezine yerleştirilmiştir. Bu boru sayesinde toplanan biyogazlar kendi cazibesi ile yükselerek hacimce ve içerikçe incelenmiştir. Reaktörlerin gaz çıkışına takılan gazmetre cihazı ile miktarları ölçülmüştür. Gaz analiz cihazı ile de reaktörlerdeki biyogaz kompozisyonuna bakılmıştır. Şekil 3.4' te reaktörlere ait gaz ölçüm ve gaz analiz sistemi verilmiştir.



Şekil 3.4: Reaktörlerin üst görünümü: a) Gaz ölçüm, b) Gaz analiz sistemi.

3.2. Reaktörlerin İşletimi

Tablo 3.2’de reaktörlerin işletim özellikleri özetlenmiştir. Daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Tablo 3.2: Reaktörlerin işletim özellikleri.

Parametreler	Birimler	R-1	R-2	R-3
Atık Miktarı	kg	900	900	900
Atık Hacmi	m ³	1,2	1,2	1,2
Atık Yoğunluğu	kg/m ³	750	750	750
Atık Arıtma Çamuru	-	Var	Var	Hayır
Atık Çamur Miktarı	kg	50	50	-
Aşı Çamuru Hacmi	L	30	30	30
Yağmur Suyu	L/hafta	-	-	8
Sızıntı Suyu Geri Devri	-	Evet	Evet	Hayır
Geri Devir Periyodu	kere/hafta	7	7	Yok
Geotekstil Tabakası	-	-	Var	-

3.2.1. Deneysel Başlangıç

Işığı geçirmeyecek bir malzemeden yapılan, içerisinde ısıtma sistemi bulunan ideal anaerobik koşullardaki biyoreaktörler bir pilot tesis olarak uygun ortam koşulları ile işleme alınmıştır. Reaktörlerin sıcaklığı otomatik ısıtma sistemi ile sürekli olarak 37 °C’de sabit tutulmuştur. Sıcaklık değişimleri periyodik olarak devamlı bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Reaktörlerde bulunan otomasyon sistemi ile geri devir günlük olarak belirli saatler içerisinde otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.1. Reaktörlere Atık Yükleme

Reaktörlerde bulunan katı atıklar, İstanbul’da bulunan ve evsel katı atıklardan kompost üretimi yapan İSTAÇ Kemerburgaz Kompost ve Geri Kazanım Tesisi’nin giriş hattında bulunan 8 cm elek çaplı döner elek çıkışından alınmıştır.

Reaktörler 900 kg evsel katı atık ile doldurulmuştur. Atık yoğunluğu 750 kg/m³ olacak şekilde reaktörlere yüklenmiştir. Atık gövdesi yüksekliği 245 cm ve toplam atık hacmi ise 1.2 m³ olarak hesaplanmıştır. R-1 ve R-2’ye atık ile birlikte 50 kg susuzlaştırılmış arıtma çamuru eklenmiştir. Bu arıtma çamurları İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi’nin (İSU) Gebze İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde bulunan çamur susuzlaştırma ünitesinden alınmıştır.

Reaktörlere evsel katı atık doldurulduktan sonra 30 L kadar anaerobik aşı çamuru eklenmiştir. Aşı çamuru Pakmaya İzmit - Köseköy Fabrikası'nın anaerobik tanklarından alınmıştır.

Geri devir edilecek suların atık gövdesine eşit dağılımını gerçekleştirmek amacı ile atık gövdesinin en üstüne 1-2 cm kalınlığında 10 mm dane çaplı doğal çakıllar yerleştirilerek, biyoreaktörler işletmeye hazır hale getirilmiştir.

3.2.1.2. İşletim Prosedürü

Kocaeli ili için yıllık ortalama yağış miktarı 831,30 mm (1 mm yağış = 1 kg yağmur suyu / m²) [52]. Kocaeli ili için yağmursuyu verileri kullanılarak reaktörlere eklenecek yağmur suyu miktarı hesaplanmıştır (Denklem 3.1). Çapı 80 cm olan reaktörün yüzey alanı 0,50 m² olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{831,30 \text{ mm/yıl}}{52 \text{ hafta/yıl}} = 15,99 \text{ mm/hafta} = 15,99 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hafta}$$
$$15,99 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hafta} \times 0,50 \text{ m}^2 = 8 \text{ L/hafta} \quad (3.1)$$

Reaktörler, başlangıçta 8 L su eklenerek işleme alınmıştır. Daha sonra, konvansiyonel düzenli depolama sahası gibi düşünüldüğü için sadece kontrol reaktörü olarak ele alınan ve geri devirsiz klasik bir depolama sahası gibi işletilen R-3'e haftalık yağmur suyu ilavesi yapılmıştır.

R-3 hariç diğer iki reaktörde oluşan sızıntı sularının günlük oluşum miktarlarına bakılmıştır. R-1 ve R-2'de günlük sızıntı suyu geri devri gerçekleştirilmiştir.

Anaerobik mikrobiyal bakterilerin yaşaması için atık gövdesinde mezofilik sıcaklık şartları sağlanmıştır. Atık gövdesinin sıcaklığı anlık olarak takip edilmiştir.

Bu çalışmadaki pilot ölçekli atık biyoreaktörleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Bu çalışmada kullanılan pilot ölçekli atık biyoreaktörleri.

3.3. Analitik Prosedür

3.3.1. Katı Atık Analizleri

Katı atığın kompozisyonu, sızıntı suyunun karakterizasyonu ve sistemin performansına etkisi yüksek önemli bir parametredir. Bu nedenle katı atığın kompozisyonu her tür bileşen için belirlenmiştir. Organik atık, kağıt, tekstil, cam, metal, plastik, taş ve diğer tip bileşenler olmak üzere atıklar ayrılmıştır. Her atık bileşenleri yüzde olarak hesaplanmıştır.

Evsel katı atık örneğinde; pH, iletkenlik, nem muhtevası, toplam katı madde (TKM), uçucu katı madde (UKM), toplam karbon (TK), toplam organik karbon (TOK), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP), toplam kjeldahl azotu (TKN), amonyum azotu ($\text{NH}_4\text{-N}$), yağ ve gres analizleri gerçekleştirildi. Ayrıca reaktör içi atık gövdesi sıcaklıkları PT100 thermocouple ile anlık olarak takip edildi.

Nem muhtevası, toplam katı madde, uçucu katı madde ve sabit katı madde analizleri Standard Methods (APHA 1998) kitabınca belirlenmiş yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir [53].

İletkenlik ve pH referans elektrodu ile ölçülmüştür. Toplam karbon, toplam organik karbon, toplam azot, toplam fosfor, toplam kjeldahl azotu, amonyum azotu, yağ ve gres analizleri Türk Standartları Enstitüsü'nün (TSE) ilgili yöntemlerince gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Katı atık analiz metodları.

Parametre	Standart
Nem Muhtevası	Standard Methods, 1998; 2540 G.
Toplam Katılar (TK)	Standard Methods, 1998; 2540 G.
Uçucu Katılar (UK)	Standard Methods, 1998; 2540 G.
Sabit Katılar (SK)	Standard Methods, 1998; 2540 G.
pH	TS ISO 10390
İletkenlik	TS 9748 EN 27888
Toplam Karbon (TK)	TS 12089 EN 13137
Toplam Organik Karbon (TOK)	TS 12089 EN 13137
Toplam Azot (TN)	TS ISO 13878
Toplam Fosfor (TP)	SM 4500-P B ve D
Karbon-Azot Oranı (C/N)	TS ISO 13878
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	TS EN 13654-1
Amonyum Azotu (NH ₄ -N)	SM 4500 NH ₃ -B ve D
Yağ ve Gres	SM 5520 B ve E

3.3.1.1. Biyokimyasal Metan Potansiyelinin Belirlenmesi

Biyokimyasal metan potansiyeli (BMP) testi, katı atıkların metana dönüşüm oranlarının belirlenmesinde kullanılan hızlı ve ekonomik bir yöntemdir. İlk olarak Owen vd. (1979)'nin geliştirdiği BMP testinde Bilgili vd. (2009) kullandığı deneysel yöntem farklı çalışmalarda izlenen yöntemler ile revize edilerek gerçekleştirilmiştir [54-57]. Bu çalışmada izlenen BMP testi yöntemi ayrıntılı olarak aşağıdaki paragraflarda açıklanmıştır.

BMP testi için alınan bir miktar karışık katı atık numunesi 105 °C'de en az 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan katı atık numunelerinden, organik olmayan fraksiyonlar (cam, metal, tekstil vd.) çıkartılarak, organik kısım ayrılmıştır. Ardından bu organik kuru katı atık numuneleri bıçaklı öğütücüde öğütülmüş ve 2 mm gözenek çaplı elekten elenmiştir. Ön işlemleri tamamlanmış ve elekten geçirilmiş bu organik

katı atık numunelerinin UKM'sinin belirlenmesi amacıyla 570 °C'de 1-2 saat boyunca yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur.

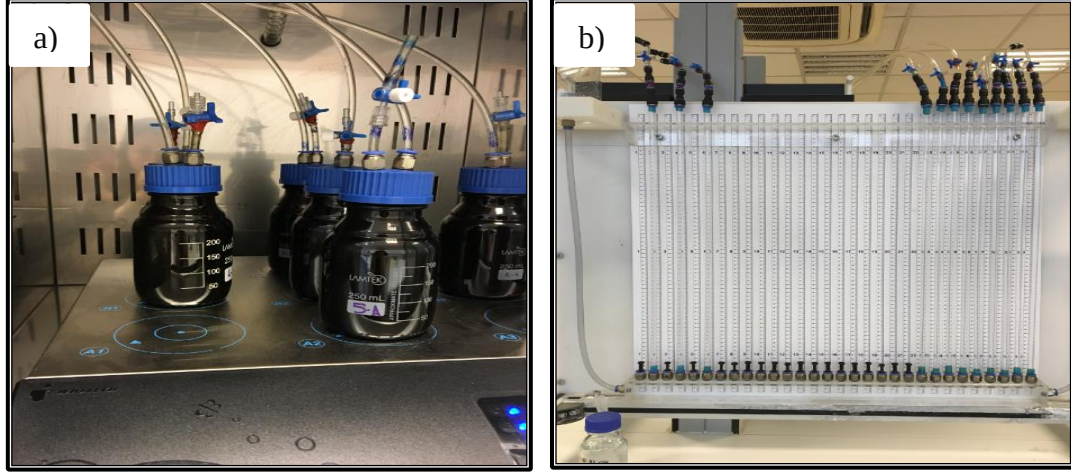
Yerel bir evsel atıksu arıtma tesisi anaerobik tanklarından temin edilen arıtma çamurunun da UKM tayini gerçekleştirilmiştir ve deney başlamadan evvel 37 °C'de bir süre bekletilmiştir. BMP testinde kullanılacak olan mineral çözeltilde Shelton and Tiedje [55]'nin geliştirdiği karışım baz alınarak, 10 kat daha derişik hazırlanmıştır. Fakat inkübasyon şişelerine ilave edilen çözelti, referans çalışmada belirtilen çamur / mineral çözelti oranına göz önüne alınarak belirlenmiştir. Hazırlanan mineral çözelti 15 dk süreyle otoklava konularak (120 °C) steril edilmiş ve çözelti içerisinde çözünmüş oksijen uçurulmuştur. Ardından 5 dakika kadar azot gazına tabi tutulan çözelti içindeki kalıntı oksijen uzaklaştırılmış ve 37 °C'ye kadar soğutulmuştur.

Her bir organik katı atık numunesinden 1,5 g UKM'ye eşdeğer gelecek ağırlıkta (2,8 – 4,8 g atık) tartılarak özel kapaklı inkübasyon şişelerine (250 mL) konulmuş, üzerine 200 mL anaerobik aşı çamuru ilave edilmiştir. Bu miktar (200 mL aşı çamuru), literatürde önerildiği üzere aşı çamuru kaynaklı UKM'nin, katı atık numunesi UKM cinsi ağırlığından fazla olması ($UKM \text{ Oranı} = \frac{\text{Aşı Çamuru}}{\text{Katı Atık}} \approx 1,2$) amacıyla belirlenmiştir [57]. Son olarak 20 mL mineral çözelti ilave edilerek şişe kapakları kapatılmıştır.

Atık numunesi, aşı çamuru ve mineral çözeltisi eklenen her bir şişenin tepe boşluğundan yaklaşık 5 dakika boyunca azot gazı geçirilerek, inkübasyona hazır hale getirilmiştir. Her bir atık numunesi için amber camlı inkübasyon şişeleri en az iki tekrarlı olacak şekilde hazırlanmıştır. İnkübasyon şişelerinden üretilen metan miktarının tespit edilebilmesi amacıyla özel olarak tasarlanan ve sıvının yer değiştirme prensibine göre ölçüm alınan manometrik gaz ölçüm teçhizatı içerisine 1 N NaOH çözeltisi konulmuştur. Böylelikle şişelerde üretilen biyogaz içerisindeki CO₂'in bazik çözelti içerisinde tamamen çözünmesi hedeflenerek, tespit edilen gaz miktarının tamamı CH₄ olarak düşünülmüştür. Ardından özel kapakları sayesinde hortumlar ile manometrik gaz ölçüm teçhizatına (Şekil 3.6) bağlanmış şişeler içerisindeki organik atıkların ürettiği metan gazı zamana karşın takip edilmiştir. Şişelerden çıkan metan miktarı ihmal edilebilir kadar azaldığında (yaklaşık 1 ay), BMP testi tamamlanarak, nihai üretilen kümülatif metan miktarı atık numunelerinin BMP'sini belirlemiştir.

Bu çalışmada ilk olarak reaktörler içerisine konulan evsel karışık katı atıklardan alınan örnekte ve 1,5 yıllık (540 gün) anaerobik işletmenin ardından atık

reaktörleri içerisinde alınan katı atık numunelerinde ayrı ayrı BMP testi gerçekleştirilmiş olup, bu deneylere ait sonuçlar daha sonraki bölümlerde verilecektir.



Şekil 3.6: BMP testi deneysel düzeneği:
a) İnkübatörün iç görünümü, b) Gaz ölçüm teçhizatı.

3.3.2. Aşı Çamuru Analizleri

Aşı çamuru atık gövdesine enjekte edilmeden önce; pH, iletkenlik, oksidasyon ve redüksiyon potansiyeli (ORP), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam kjeldahl azotu, amonyak azotu, toplam katı madde (TKM), uçucu katı madde, sabit katı madde (SKM), askıda katı madde (AKM), analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Standard Methods yöntemlerince gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.4) [53].

Tablo 3.4: Aşı çamuru analiz metodları.

Parametreler	Standart
Toplam Katı Madde (TKM)	Standard Methods, 1998; 2540 B.
Uçucu Katı Madde (UKM)	Standard Methods, 1998; 2540 E.
Sabit Katı Madde (SKM)	Standard Methods, 1998; 2540 E.
Askıda Katı Madde (AKM)	Standard Methods, 1998; 2540 D.
pH	Prob Analizi
İletkenlik	Prob Analizi
Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli (ORP)	Prob Analizi
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	Standard Methods, 1998; 5220 C.
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	Standard Methods, 1998; 4500-N _{org} B.
Amonyak Azotu (NH ₃ -N)	Standard Methods, 1998; 4500-NH ₃ B.

3.3.3. Arıtma Çamuru Analizleri

Susuzlaştırılmış atık aktif çamur örneğinde; su muhtevası, TKM, UKM ve SKM analizleri standard methods yöntemlerince gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.5) [53].

Tablo 3.5: Arıtma çamuru analiz metodları.

Parametreler	Standart
Nem muhtevası	Standard Methods, 1998; 2540 G.
Toplam Katı Madde (TKM)	Standard Methods, 1998; 2540 G.
Uçucu Katı Madde (UKM)	Standard Methods, 1998; 2540 G.
Sabit Katı Madde (SKM)	Standard Methods, 1998; 2540 G.

3.3.4. Depo Gazı Ölçümü

Atık biyoreaktörlerinden toplanan depo gazının kompozisyonu ve hacmi ölçülmüştür.

Kümülatif depo gazı miktarları sıvının yer değiştirme prensibine dayalı ıslak tip gazmetre (Ritter TG-05) ile reaktörün gaz çıkışına bağlanarak takip edilmiştir. Ritter gaz metre yüksek doğruluk oranı ile çalışır ($\pm 0.5\%$). Gaz metre, içerisinde sıvı (düşük viskoziteli yağ) ile dönen bir ölçüm mekanizması içerir. Ölçüm mekanizması, periyodik olarak ölçüm odasını doldurarak ve boşaltarak hacmi ölçmektedir. Depo gazı ölçümü haftalık olarak takip edilmiştir. Kümülatif gaz miktarları, periyodik depo gazı hacimleri toplanarak hesaplanmıştır.

Üretilen depo gazı kompozisyonu, CH_4 , H_2S , CO_2 ve O_2 gazları ölçümü yapan biyogaz analizörü (MRU Instruments, Inc. OPTIMA 7 Biogas), kullanılarak ölçülmüştür. Optima 7 Almanlar tarafından üretilmiş olup, taşınabilir gaz analiz cihazları arasında en yaygın kullanılan bir cihazdır. Bir seferde, 7 farklı gaza kadar ölçüm yapabilen taşınabilir bir analizördür. Cihaz, çalışma öncesinde standard sertifikalı test gazı ile üretici firma tarafından kalibre edilmiştir. Ölçümler iki haftada bir kez yapılarak takip edilmiştir.

3.4. Katı Atık Karakterizasyonu

Katı atık özellikleri sistem performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve sonuçların uygun bir şekilde değerlendirilmesi için karakterizasyonun bilinmesi gerekir. Bu çalışmadaki, reaktörlere yüklenen evsel katı atıkların karakterizasyonu Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6: Katı atıkların kompozisyonu.

Atık Bileşeni	Birim	Değer
Organik Madde	%	67
Kağıt	%	18
Tekstil	%	2
Cam	%	1
Metal	%	1
Plastik	%	6
Taş	%	1
Diğer	%	4

Evsel katı atıkların, nem muhtevası, toplam katılar gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri, Tablo 3.7’de verilmiştir. Sonuçlar, reaktörlere yüklenen katı atıkların zaten nemli olduğunu ve ayrıca yüksek organik içeriğe sahip olduğunu göstermiştir. Karbon, azot ve fosfor içeriği ve bunların alt formları biyolojik ayrışma prosesi için önemli parametrelerdir. C, N, P içeriği ve pH, iletkenlik, yağ ve gres gibi diğer kimyasal özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7: Katı atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Parametre	Birim	Değer
Nem Muhtevası	%	50
Toplam Katılar (TK)	%	50
Uçucu Katılar (UK)	%	80
Sabit Katılar (SK)	%	20
pH	-	6,18
İletkenlik	mS/cm	5,78
Toplam Karbon (TK)	%	38,8
Toplam Organik Karbon (TOK)	%	39
Toplam Azot (TN)	%	1,95
Toplam Fosfor (TP)	mg/kg	3148
Karbon-Azot Oranı (C/N)	-	19,9
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	mg/kg	17971
Amonyum Azotu (NH ₄ -N)	mg/kg	790
Yağ ve Gres	mg/kg	57803

3.5. Aşı Çamuru Karakterizasyonu

Reaktörleri işletmeye almadan önce her birine aşı çamuru eklenmiştir. Aşılama, atık bünyesinde mikrobiyal popülasyonun oluşması için önemli bir işlemdir. Aşı çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8: Aşı çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Parametreler	Birimler	Değer
Toplam Katı Madde (TKM)	mg/L	10790
Uçucu Katı Madde (UKM)	mg/L	4500
Sabit Katı Madde (SKM)	mg/L	6290
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	1867
pH	-	7,50
İletkenlik	mS/cm	8,70
Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli (ORP)	mV	-393,6
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	1854
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	mg/L	415,1

3.6. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Arıtma çamuru, yüksek oranda nem, besin maddesi (özellikle fosfor) ve mikroorganizma popülasyonu içermesi sebebiyle katı atık ile beraber depolanabilirliği incelenmiştir. Tablo 3.9’da arıtma çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.9: Arıtma çamurunun fiziksel özellikleri.

Parametreler	Birimler	Değer
Nem muhtevası	%	76
Toplam Katı Madde (TKM)	%	24
Uçucu Katı Madde (UKM)	%	69
Sabit Katı Madde (SKM)	%	31

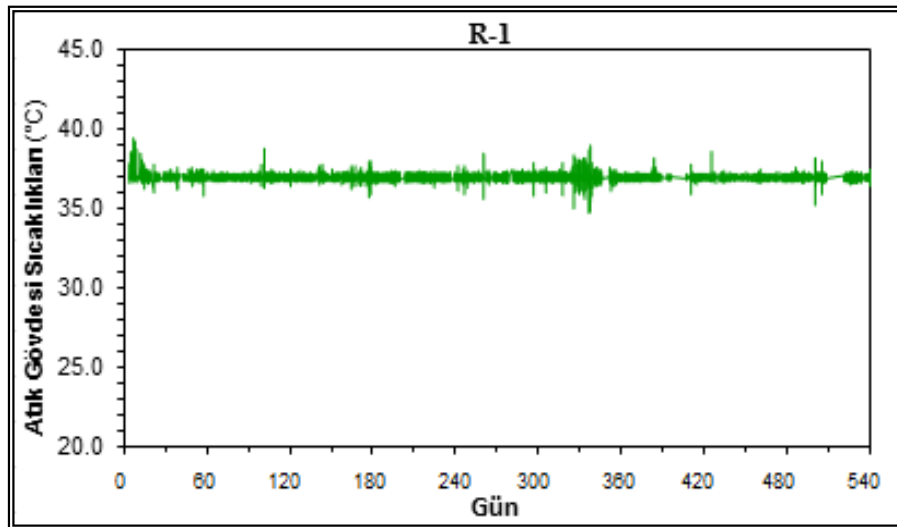
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Geotekstil tabakasının ve arıtma çamurunun etkisini araştırmak için çalışma boyunca pilot ölçekli anaerobik atık biyoreaktörleri izlenmiştir. Bu amaçla, sıcaklık verileri, depo gazı miktarları ve kompozisyonu ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ve sonuçlar hakkında ayrıntılı tartışmalar bu bölümde verilecektir.

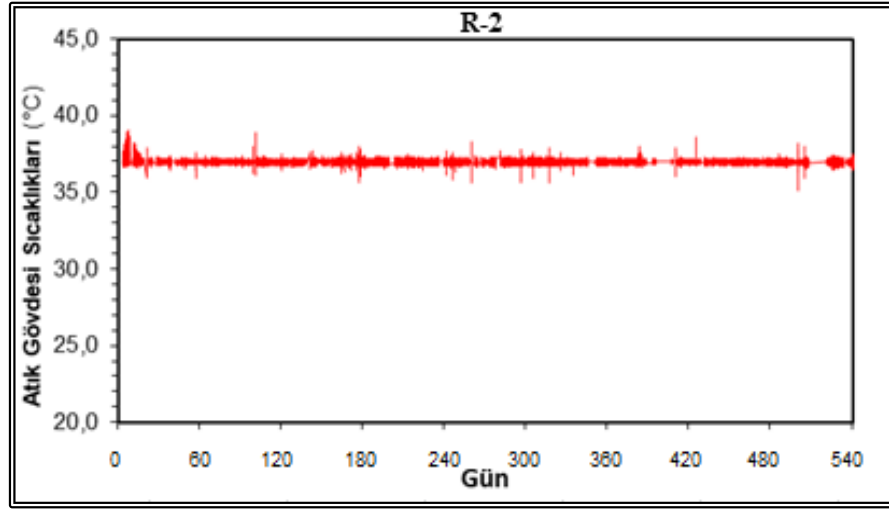
4.1. Sıcaklık Koşulları

4.1.1. Atık Sıcaklıkları

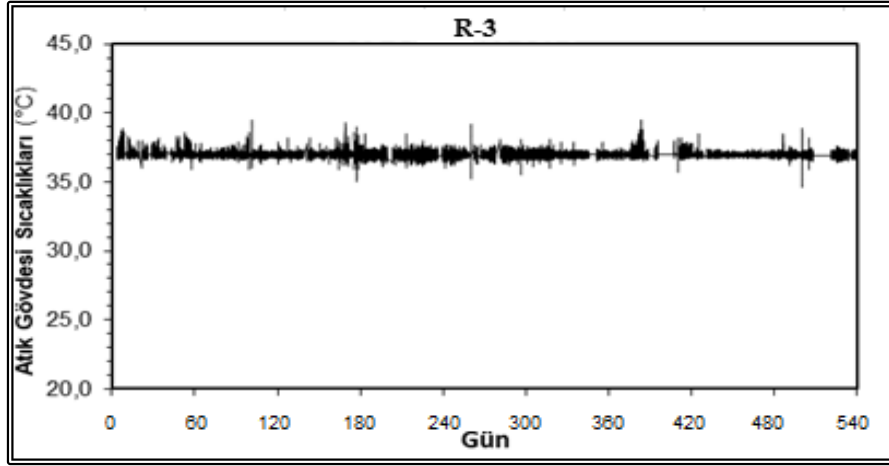
Reaktör içi sıcaklıklar, atık gövdesinin ortasına saplanmış ve ısı transfer pastası ile sarılmış PT100 model termometre (thermocouple) yardımıyla otomasyon sistemince anlık olarak takip edilmiş ve kaydedilmiştir. Anaerobik işletme açısından optimum sıcaklık aralığı olarak bilinen 35-40 °C aralığına (37 °C) sabitlenen sıcaklıkların zamana bağlı değişim grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2. ve Şekil 4.3). Grafiklerden de görüldüğü üzere ilk 15 günde tesisin bulunduğu laboratuvar da yaşanan elektriksel problemler sebebiyle yukarı yönlü bazı ufak sıcaklık dalgalanmaları görülse de, bundan sonra reaktör içi sıcaklıkları arzulanan seviyelerde tutulmuştur. İşletme süresi boyunca, zaman zaman çok kısa süreli bazı ısı dalgalanmaları yaşansa dahi reaktör içi anaerobik koşulları olumsuz etkileyecek önemli bir sorun teşkil etmemiştir.



Şekil 4.1: R-1 için atık gövdesi sıcaklıkları.



Şekil 4.2: R-2 için atık gövdesi sıcaklıkları.



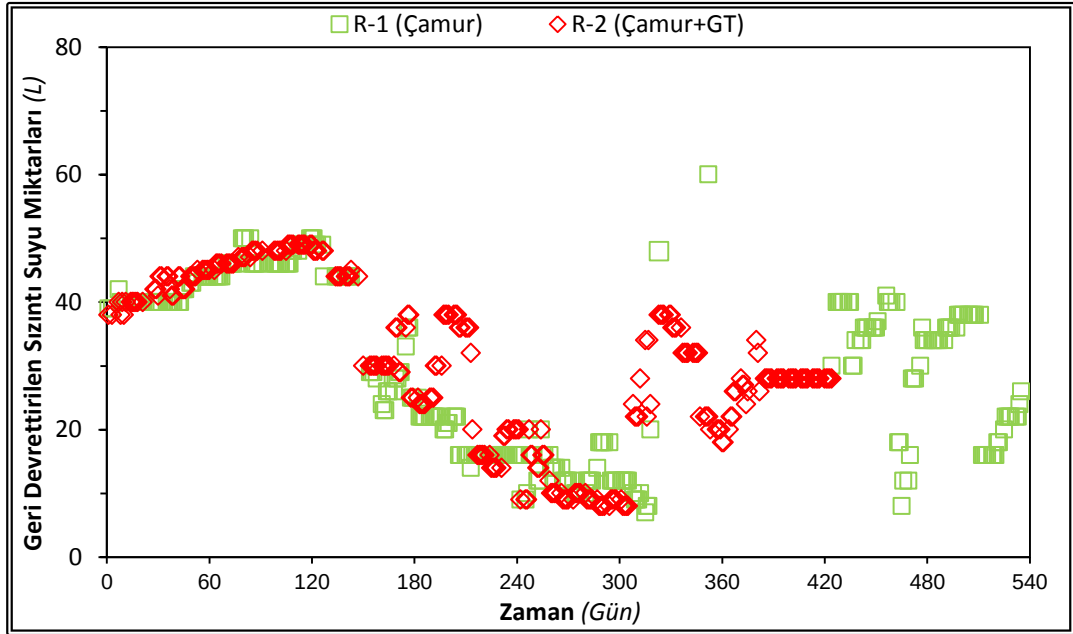
Şekil 4.3: R-3 için atık gövdesi sıcaklıkları.

4.2. Sızıntı Suyu Miktarları

4.2.1. Üretilen Sızıntı Suyu Miktarları

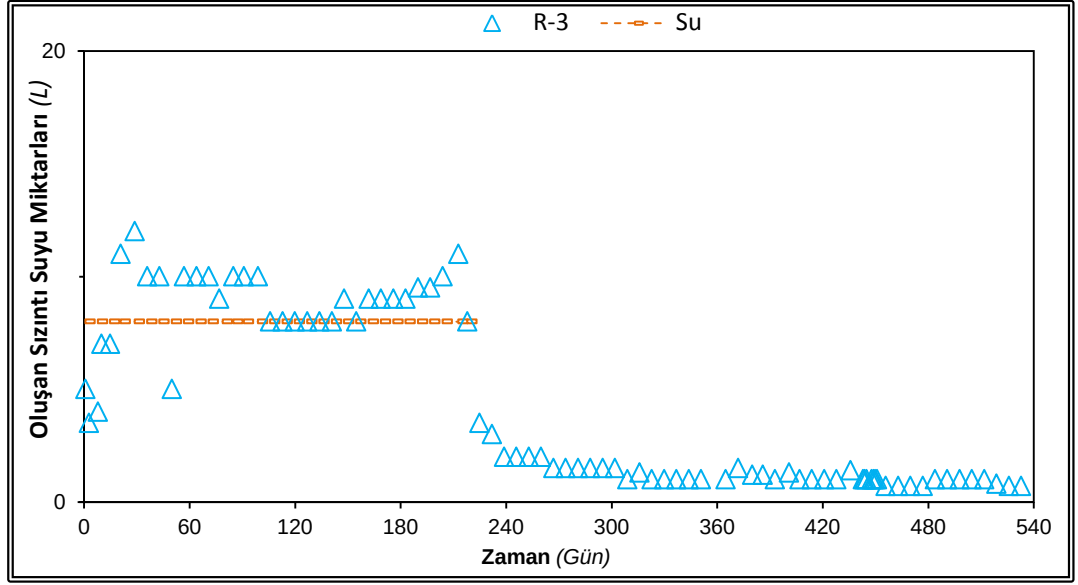
Reaktörler, 8 L yağmur suyu olduğu düşünülerek musluk suyu ve 30 L aşı çamuru eklenerek işleme alınmıştır. Daha sonra kapakları kapatılmış ve su eklemesi yapılmamıştır. Oluşan sızıntı sularının günlük olarak otomasyon sistemi ile geri devri gerçekleştirilmiştir. R-1 ve R-2 atık biyoreaktörü olarak işletildiği için bu iki reaktörde geri devir işlemi gerçekleştirilmiştir. Reaktörlerde meydana gelen ve geri devir ettirilen sızıntı suyu miktarları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Zamanla reaktörlerde oluşan sızıntı suyu miktarlarında artış görülmüştür. Reaktörler metanojenik safhaya ulaştığında atık bünyesi su salmaya başlamıştır. Bu durum hidrojenofilik metanojen aktivitesi olarak adlandırılır. Bu bakteriler, H_2 'i kullanarak CH_4 ve H_2O üretirler.



Şekil 4.4: R-1 ve R-2 için oluşan ve geri devir ettirilen sızıntı suyu miktarları.

R-3, açık depolama sahası gibi düşünüldüğü için sızıntı suyu geri devri yapılmamıştır ve haftalık olarak 8 L yağmur suyu olduğu varsayılarak musluk suyu reaktöre eklenmiştir. 31 hafta boyunca reaktöre su eklenmiştir. Daha sonra depolama sahasının kapatıldığı düşünülerek su eklemesi durdurulmuştur. Metanojenik safhaya geçerken reaktörde meydana gelen sızıntı suyu miktarlarında artış görülmüştür ve daha sonra su eklemesi de durdurulduğu için sızıntı suyu oluşum miktarları azalmıştır. Şekil 4.5'te R-3 için oluşan sızıntı suyu miktarları verilmiştir.



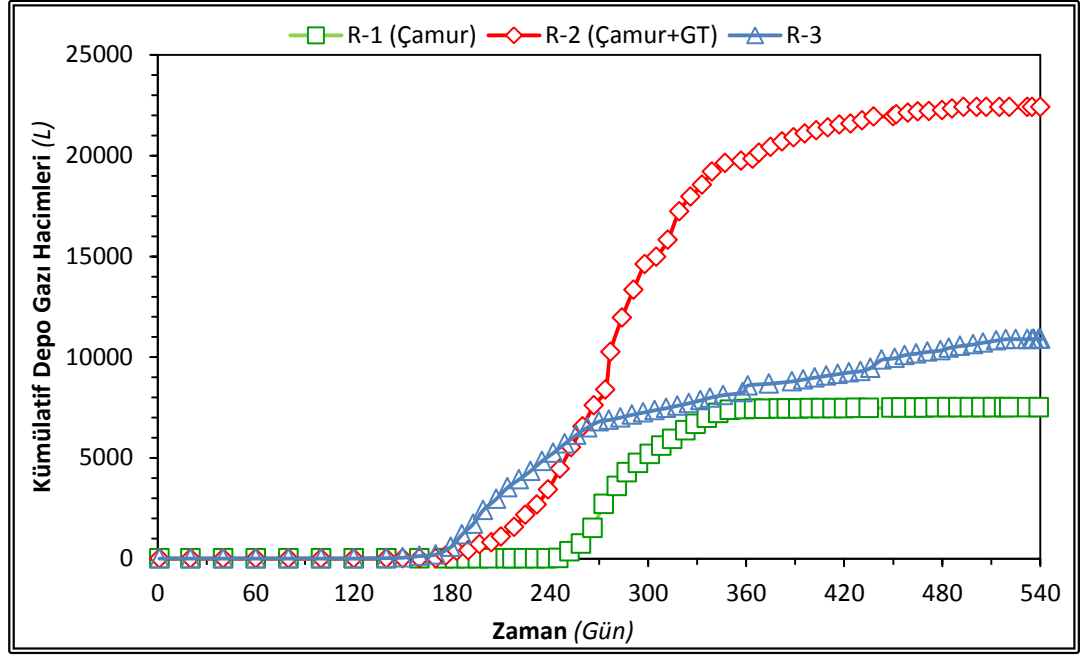
Şekil 4.5: R-3 için oluşan sızıntı suyu miktarları.

4.3. Depo Gazı Miktarları

4.3.1. Kümülatif Depo Gazı Miktarları

Kümülatif depo gazı üretim miktarları periyodik olarak takip edilmiştir. Reaktörlerde gaz üretim oranları belirgin olarak farklılıklar göstermektedir. Çalışma sonunda, toplam depo gazı miktarı R-2’de 22409,7 L, R-1’de ise 7504 L’dir (Şekil 4.6). Yani, R-2’de %66,5 daha fazla depo gazı üretimi gerçekleşmiştir. R-2’de 3 ay sonunda gaz üretimi ciddi artış göstermeye başlamıştır ve toplam gaz üretim miktarının %85’i 6 ay içerisinde gerçekleşmiştir (225. ve 403. günleri arasında). R-1’de ise gaz üretimi ilk 8 ay sonunda artış göstermeye başlamıştır. Gaz üretim oranı hızlı bir şekilde artış göstermiştir ve toplam gaz üretim miktarının %85’i 2,5 ay içerisinde gerçekleşmiştir (259. ve 343. günleri arasında) ancak gaz üretimi R-2’ye göre çok kısa sürede durmuştur. R-1’in toplam gaz üretim miktarı R-2’nin %33,5’i kadardır.

Çalışma sonunda, toplam depo gazı miktarı R-3’te 10901,8 L’dir (Şekil 4.6). R-3’e temiz su ilavesi yapılarak reaktör içindeki atıklar yıkanmıştır. Böylece diğer reaktörlere kıyasla daha erken gaz üretimi görülmüştür. 140. günden itibaren gaz üretimi başlamıştır. R-1’de 213. günden itibaren R-2’de ise 176. günden itibaren gaz üretimi başlamıştır. Ancak R-2’de arıtma çamuru ve geotekstil malzemesinin kullanılması daha fazla gaz üretiminin meydana geleceğini ortaya koymuştur.



Şekil 4.6: Üretilen toplam depo gazı miktarlarının zamana bağlı gösterimi.

Bu çalışmaya benzer laboratuvar ölçekli diğer çalışmalarda depo gazı, üretim verimi açısından araştırılmıştır. Atığın nem muhtevası, organik içeriği, miktarı ve kümülatif gaz üretim miktarı kullanılarak depo gazı verimi hesaplanmıştır [4, 14, 22, 58]. Tablo 4.1’de bu çalışma için depo gazı verimleri hesaplanmıştır. Tablo 4.2’de ise benzer bir çalışma için depo gazı verimleri gösterilmiştir.

Hesaplamalar sonucunda R-1 için, bir kilogram kuru organik atık başına üretilen depo gazı miktarı 24 L/kg.atık, R-2 için 72 L/kg.atık ve R-3 için 36 L/kg.atık olarak hesaplanmıştır. R-1 ve R-2’de, R-3’e kıyasla daha fazla depo gazı verimi hesaplanmıştır. Bu da arıtma çamurunun etkisini göstermektedir. R-2 ve R-1’i kıyasladığımızda da geotekstil malzemenin gaz üretimine önemli derecede etkisi olduğunu ve daha fazla depo gazı veriminin hesaplandığını görüyoruz.

Tablo 4.1: R-1, R-2 ve R-3 için, hesaplanan depo gazı verimleri.

	Evsel Katı Atık			Arıtma Çamuru							
İşletim Süresi	Nem Nuhtevası	EKA Miktarı		Organik İçeriği	Nem Nuhtevası	Çamur Miktarı		Organik İçeriği	Kümülatif Gaz	Depo Gazı Verimi	
		Islak	Kuru			Islak	Kuru				
gün	%	kg	kg	%	%	kg	kg	%	L	L/kg.atık	
540	50	900	450	62	76	50	12	69	7504	24	R-1
540	50	900	450	62	76	50	12	69	22409,7	72	R-2
540	50	900	450	62	76	-	-	-	10901,8	36	R-3

Tablo 4.2’de benzer bir çalışmanın depo gazı verim hesabı verilmiştir. Bu çalışmada, geotekstil malzemenin depo gazı oluşumuna etkisi incelenmiştir ve buna göre depo gazı verimleri hesaplanmıştır. Sonuçlara baktığımızda geotekstil malzemeye sahip olan reaktörün daha fazla depo gazı ürettiği ve depo gazı veriminin daha yüksek olduğu gösterilmiştir [4].

Tablo 4.2: Laboratuvar ölçekli yapılan benzer bir çalışmada, hesaplanan depo gazı verimleri.

İşletim Süresi	Nem Muhtevası	EKA Miktarı		Organik İçeriği	Kümülatif Gaz	Depo Gazı Verimi	Çalışma
		Islak	Kuru				
gün	%	kg	kg	%	L	L/kg.atık	
180	62	31	11,78	62	811	112	LBR-1
180	62	31	11,78	62	1189	164	LBR-2 (GT)

4.3.2. Depo Gazı Model Çalışması

Bu çalışmada, deneysel sonuçları model verileriyle karşılaştırmak için biyogaz üretiminin matematiksel bir modeli kullanılmıştır [59-61]. Model, biyoreaktörlerin kümülatif metan değerleri kullanılarak aşağıdaki denkleme göre belirlenmiştir (Denklem 4.1).

$$V(t) = V_{(\infty)} \exp \left[-\exp\left(\frac{ke}{V_{(\infty)}} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (4.1)$$

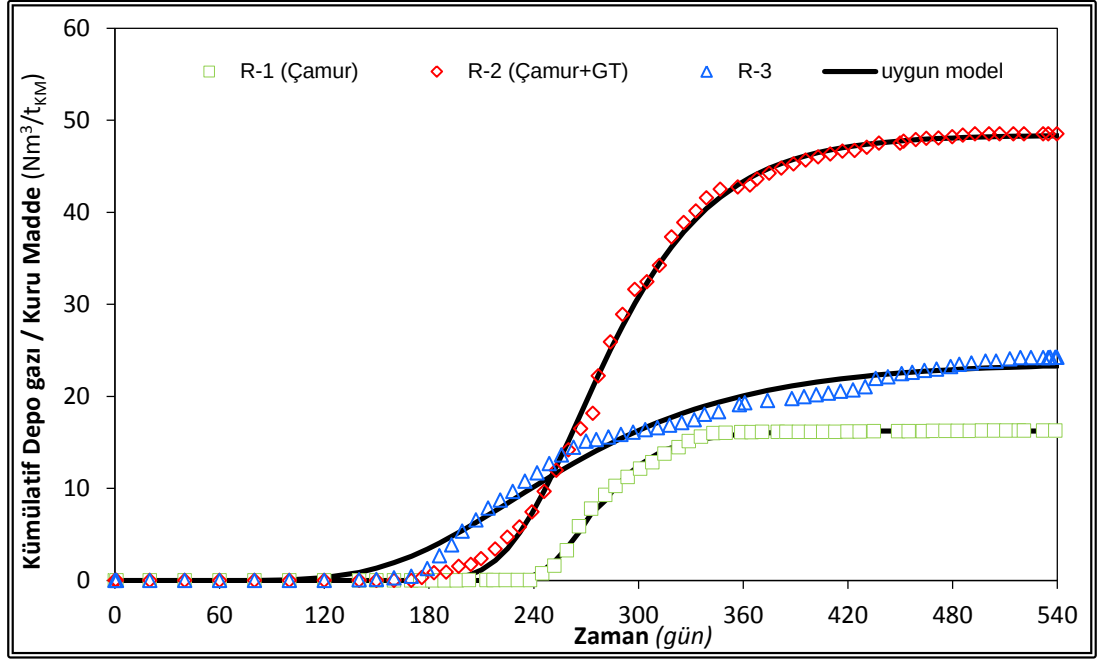
- $V(t)$ = Kümülatif biyogaz üretimi ($\text{Nm}^3 \text{ t}_{\text{kuruağırlık}}^{-1}$)
- $V_{(\infty)}$ = Maksimum kümülatif biyogaz üretimi ($\text{Nm}^3 \text{ t}_{\text{kuruağırlık}}^{-1}$)
- k = Maksimum biyogaz üretim oranı ($\text{Nm}^3 \text{ gün}^{-1} \text{ t}_{\text{kuruağırlık}}^{-1}$)
- $e = 1$ ’ in üstel fonksiyonu (2,718)
- λ = Gecikme süresi (metan fazının başlaması (gün))
- t = Geçen süre (gün)

$V_{(\infty)}$, k ve λ parametrelerini hesaplamak için doğrusal olmayan regresyon analizi kullanılmıştır Tablo 4.3.

Tablo 4.3: Reaktörler için model parametreleri.

Biyoreaktör	$V_{(\infty)}$ Maksimum kümülatif biyogaz üretimi ($\text{Nm}^3 \cdot t_{\text{kuruağırlık}}^{-1}$)	k ($\text{Nm}^3 \cdot \text{gün}^{-1}$ $t_{\text{kuruağırlık}}^{-1}$)	λ =Gecikme süresi (gün)	Standard sapmaların toplamı
R-1	16,235	0,254	252	2,768
R-2	48,396	0,418	224	34,231
R-3	23,656	0,118	154	65,557

Model çalışmasında reaktörler arasındaki maksimum kümülatif biyogaz üretimi $V_{(\infty)}$, biyogaz üretim oranı (k), gecikme süresi (λ) ve standard sapma toplamalarında büyük farklılıklar görülmektedir. Reaktörlerin $V_{(\infty)}$ miktarları karşılaştırıldığında R-2’de geotekstil malzeme bulunması nedeniyle diğer reaktörlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. R-3’ün ise R-1’e göre $V_{(\infty)}$, miktarı daha fazla olmuştur ancak model grafiğine baktığımızda R-3’te çok uygun olmadığı görülmektedir. Çünkü gecikme süresi, değerlere baktığımızda 193 günlük olması gerekirken modele göre 154 gün olarak hesaplanmıştır. Bu yüzden R-3’te model uygun görülmemektedir Şekil 4.7.



Şekil 4.7: Kümülatif depo gazı verilerinin model ile benzetilmesi.

4.3.3. Depo Gazı İçeriği

CH₄ ve CO₂ gazları, atıkların anaerobik ayrışmasında oluşan depo gazının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Atık depolama sahasında metanojenik koşulların başlamasından sonra CH₄ ve CO₂ sırasıyla, %45-65 ve %35-55 oranında meydana gelir.

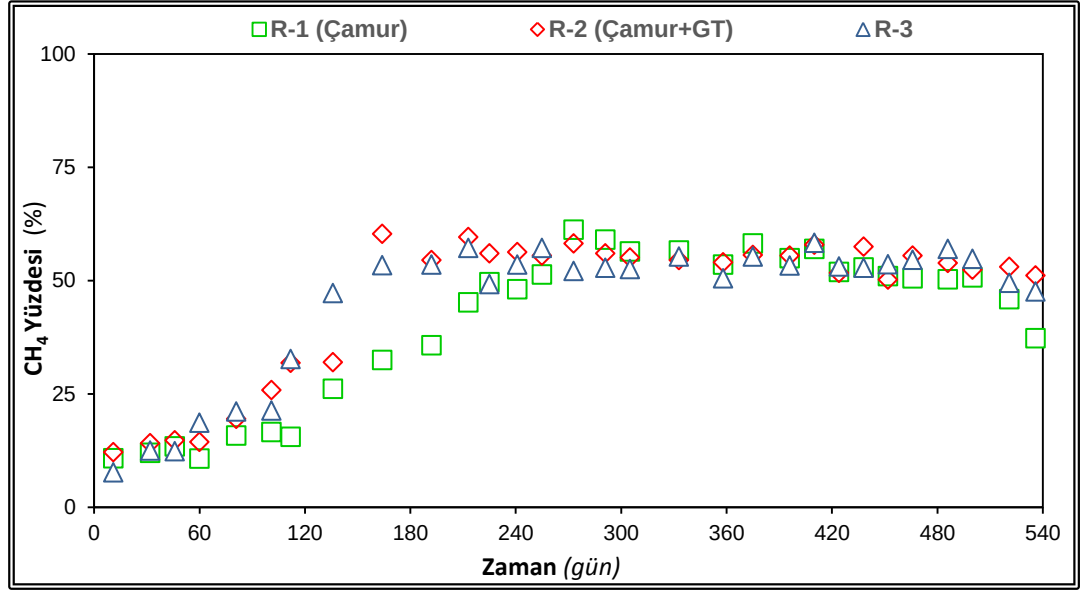
Atık biyoreaktörlerine ait gaz içerikleri Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir. R-1’de metanojenik safhanın geç başlaması nedeniyle metan oranı ilk dokuz ayda yavaş yavaş artmıştır. R-1 273. günde metan içeriği %61,2 değerine ulaşmıştır.

R-2’de 164. günde metan içeriği %60,3 değerine ulaşmıştır. R-2, geotekstil tabakasına sahip olması nedeniyle R-1’den daha çabuk metanojenik safhaya ulaşmıştır. R-2’de metanojenik koşulların başlamasından sonra depo gazı içeriğinin büyük bir kısmını oluşturan CH₄ ve CO₂ gazları %60,3 ve %40,13 değerlerine ulaşmıştır.

R-3’te ise 213. günde metan içeriği %57,2 değerine ulaşmıştır. R-3 tipik bir depolama sahası gibi işletildiği için 31 hafta boyunca haftada bir kez atık bünyesine 8 L temiz su verilmiştir. R-3’e temiz su verilerek reaktör içindeki atıkların yıkanması sağlandığı için R-1’den daha çabuk metanojenik safhaya geçmiştir. R-1’de arıtma

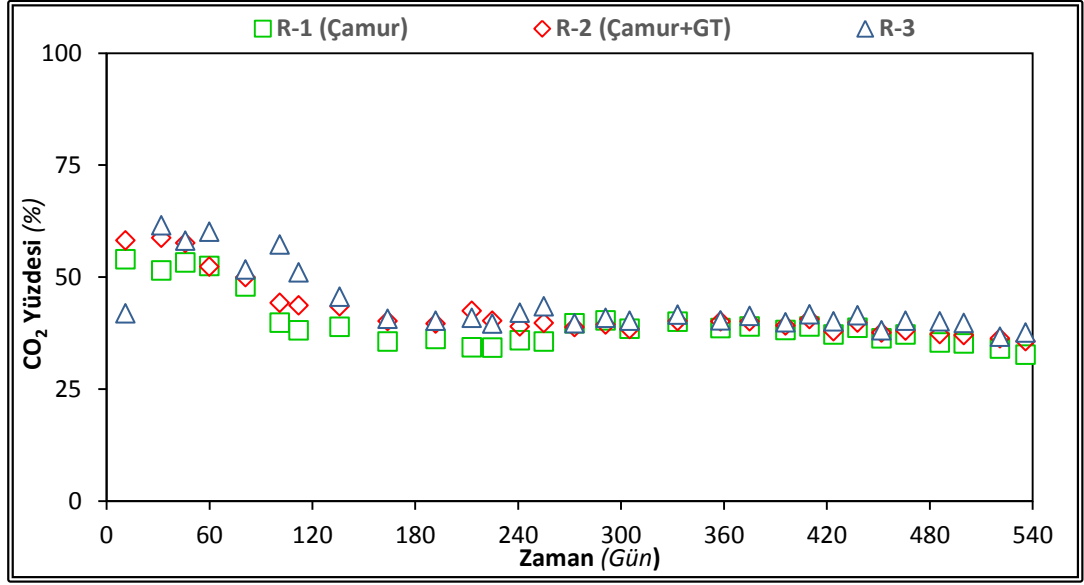
çamuru olmasına rağmen, sistem içerisinde yoğun kirliliğin olmasından dolayı metan bakterilerinin oluşumunun R-2 ve R-3'e göre daha yavaş oluşması nedeniyle metan oranı daha geç yükselmiş olabilir. R-3'te diğer reaktörlere kıyasla daha az gaz üretimi gerçekleşmiştir.

R-2'de geotekstil malzeme bulunması nedeniyle en fazla CH_4 oranına sahip reaktör olmuştur. Aynı zamanda diğer reaktörlere kıyasla daha fazla gaz üretmiştir.



Şekil 4.10: CH_4 oranlarının zamana bağlı gösterimi.

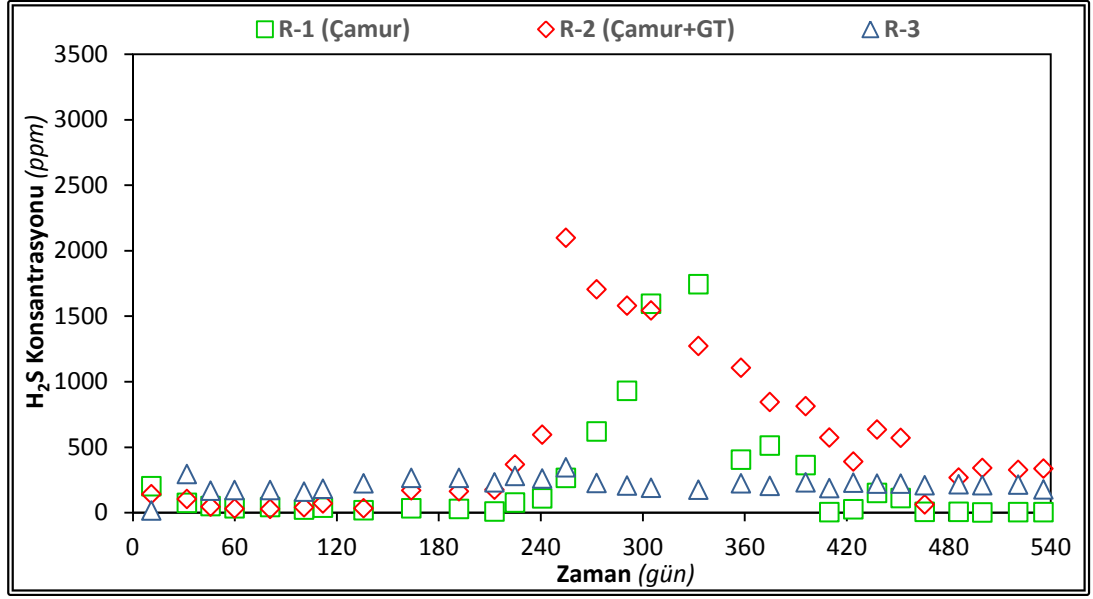
R-1 için CO_2 oranları başlarda %53 oranlarında, R-2'de %58 oranlarında ve R-3'te ise %60 oranlarında görülmüştür. CH_4 oranları artmaya başladığında ise CO_2 oranları azalmıştır. Metanojenik safhaya geçtiklerinden itibaren CO_2 oranları %40-30 aralığında görülmüştür.



Şekil 4.11: CO₂ oranlarının zamana bağlı gösterimi.

Reaktörlere ait hidrojen sülfid konsantrasyonlarının ppm mertebesinde zamana bağlı gösterimi Şekil 4.11’de verilmiştir. Sülfat indirgeyen bakteriler ve metanojenler asetik asit ve hidrojeni enerji kaynağı olarak kullanırlar. Sülfat indirgeyen bakteriler elektronları metanojenler etrafından uzaklaştırarak kendilerine doğru çekerler ve böylece daha düşük metan üretimi gerçekleşirken H₂S miktarında artış gösterir. H₂S metanojenler üzerinde olumsuz etki yapar. R-1 ve R-2 için grafiğe baktığımızda H₂S oranlarının metanojenik safhaya geçtiği aşamalarda düşük konsantrasyonlarda olduğu ve CH₄ oranlarının artış gösterip azalmaya başladığı noktalarda da H₂S konsantrasyonlarının arttığı görülmüştür. CH₄ oranlarında çok ciddi bir azalmalar görülme de H₂S konsantrasyonlarında zamanla ciddi bir şekilde azalma görülmüştür.

R-3’e baktığımızda ise reaktör içine temiz su verilmesinden dolayı metanojenik safhaya çabuk geçilmiştir ve CH₄ oranları artış göstermiştir. Ancak H₂S konsantrasyonları suda çözünmesinden dolayı miktarlarında fazla bir değişme görülmemiştir.



Şekil 4.12: H₂S oranlarının zamana bağlı gösterimi.

4.4. Çalışma Sonucu Katı Atık Karakterizasyonu

R-1 ve R-2’de evsel katı atık ile birlikte arıtma çamuru da reaktörlere eklenmiştir. Ancak R-3 sadece evsel katı atık ile doldurulmuştur. 540 günlük işletim süresi sonunda reaktörlerin numune alma kapağı açılarak her bir reaktörden ayrı ayrı katı atık numuneleri alınmıştır. Alınan atık numunelerinde reaktörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir (Tablo 4.4 ve Tablo 4.5).

Başlangıçta reaktörlere doldurulan evsel katı atık ve arıtma çamurunun fiziksel özellikleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Ancak çıkış atık numunesi arıtma çamuru ve evsel katı atığın birleşiminden oluştuğu için giriş değerleri Tablo 4.4’de reaktöre yüklenen karışım atık (EKA ve AÇ) üzerinden hesaplanmıştır. Reaktörlere yüklenen evsel katı atık ve arıtma çamuru miktarları ile toplam katı atık miktarı belirlenmiştir. Nem muhtevassından atıklar için ayrı ayrı kuru atık miktarı ve uçucu katılar için sabit atık miktarı hesaplanmıştır. Böylece evsel katı atık ve çamur karışımının girişteki fiziksel özellikleri belirlenmiştir (Tablo 4.4).

Her reaktör için atıkların giriş çıkış değerleri karşılaştırılmıştır. Reaktörlerde, kolay ayrışabilen organik maddenin ayrışması sonucunda uçucu katı maddenin önemli bir kısmı giderilmiştir. Reaktörlerde UKM giderimi sırasıyla; %58, %66 ve %43’tür. En fazla UKM giderimi önce R-2’de görülmektedir. R-2’de geotekstil biyofiltre ve arıtma çamurunun anaerobik atık biyoreaktörlerinde uygulanması ile geotekstil biyofiltrenin atık ayrışmasına olan etkisi görülmek istenmiştir. Her iki

reaktörde (R-1 ve R-2) denenen arıtma çamuru ilavesinin, UKM giderimi açısından olumlu sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 4.4: Arıtma çamurlu (R-1 ve R-2) ve arıtma çamursuz (R-3) reaktörlerdeki fiziksel parametrelerin değişimi.

Parametre	Birim	Giriş	Çıkış		Giriş	Çıkış
			R-1	R-2		R-3
Nem Muhtevası	%	51,3	63,1	58,1	49,9	62,2
TK	%	48,7	36,9	41,9	50,1	37,8
UKM	%	79,1	33,3	27,0	80,0	45,8
SKM	%	20,9	66,7	73,0	20,0	54,2

Reaktörlerden alınan atık numunelerinin kimyasal özelliklerine ait değişimler Tablo 4.5’de verilmiştir. Giriş ve çıkış değerleri karşılaştırıldığında, reaktörlerde ortalama olarak %60’dan fazla TOK, %60’dan fazla organik azot ve %70’ten fazla fosfor giderimi gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5: Çıkış atıkların kimyasal özellikleri.

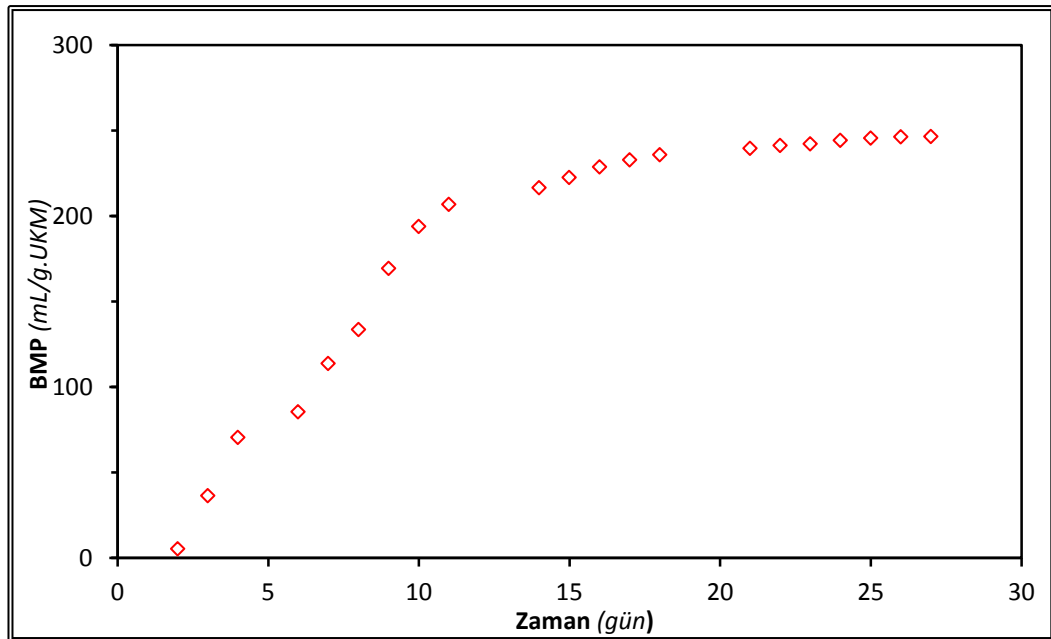
Parametre	Birim	Giriş	Çıkış		
			R-1	R-2	R-3
pH	-	6,18	8,95	9,07	8,22
TK	mg/kg	388.000	145.854	147.657	153.748
TOK	mg/kg	387.000	140.689	141.674	150.513
TKN	mg/kg	17.971	5.776	7.259	5.742
TP	mg/kg	3.148	1.023	838	750



Şekil 4.13: 540 günlük işletim süresi sonrası, reaktörlerden numune alma kapaklarının açılarak numune alınması.

4.4.1. Biyokimyasal Metan Potansiyeli Testi

Çalışma başlangıcında reaktörlere yüklenen evsel katı atıklar için BMP testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te 1 g UKM katı atık için BMP testi sonucu verilmiştir. Başlangıçta metan potansiyeli 246 mL/g.UKM olarak belirlenmiştir.



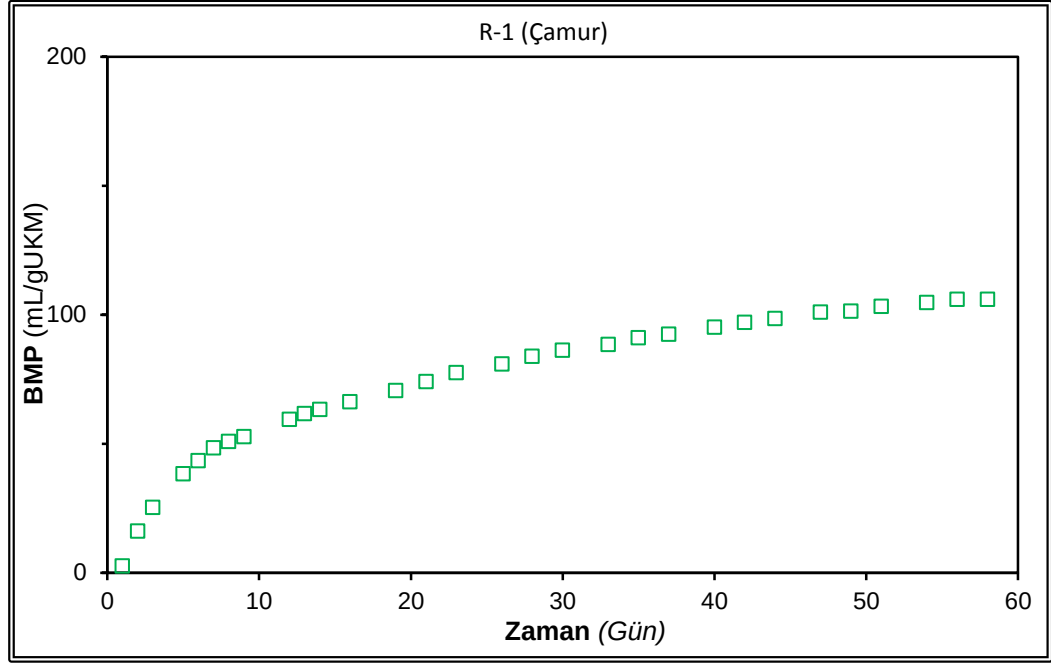
Şekil 4.14: Ham atık numunesine ait BMP testi sonucu.

Tablo 4.6’da reaktörlerde giriş UKM içeriğine göre depo gazı verimi hesaplanmıştır. Başlangıç BMP değerine baktığımızda 246 L/kg.UKM’dir. Ancak kümülatif oranlardan hesaplanan metan potansiyeline baktığımızda sırasıyla, 19 L/kg.UKM, 58 L/kg.UKM ve 30 L/kg.UKM olarak hesaplanmıştır. Buna göre BMP sonucu ile reaktörlerdeki sonuçlar oldukça farklılık göstermektedir.

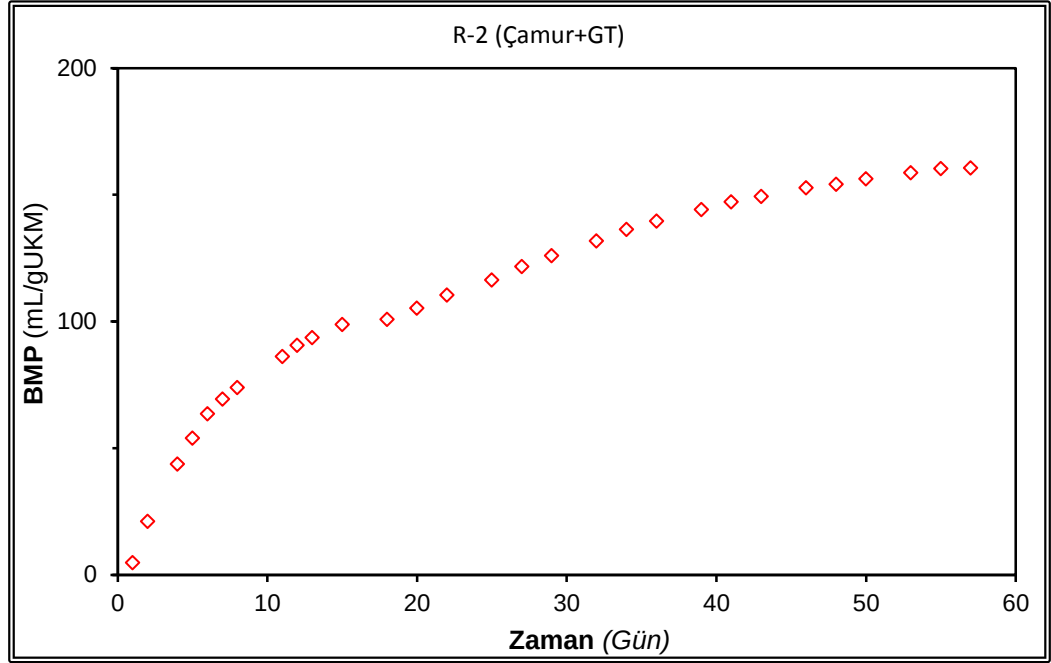
Tablo 4.6: R-1, R-2 ve R-3 için, UKM içeriğine göre hesaplanan depo gazı verimleri.

	İşletim Süresi	Nem Nuhtevası	Atık Miktarı		UKM İçeriği	Kümülatif Depo Gazı	Depo Gazı Verimi
			Islak	Kuru			
	gün	%	kg	kg	%	L	L/kg.UKM
R-1	540	51.3%	950	487	79.1%	7504.0	19
R-2	540	51.3%	950	487	79.1%	22409.7	58
R-3	540	49.9%	900	450	80.0%	10901.8	30

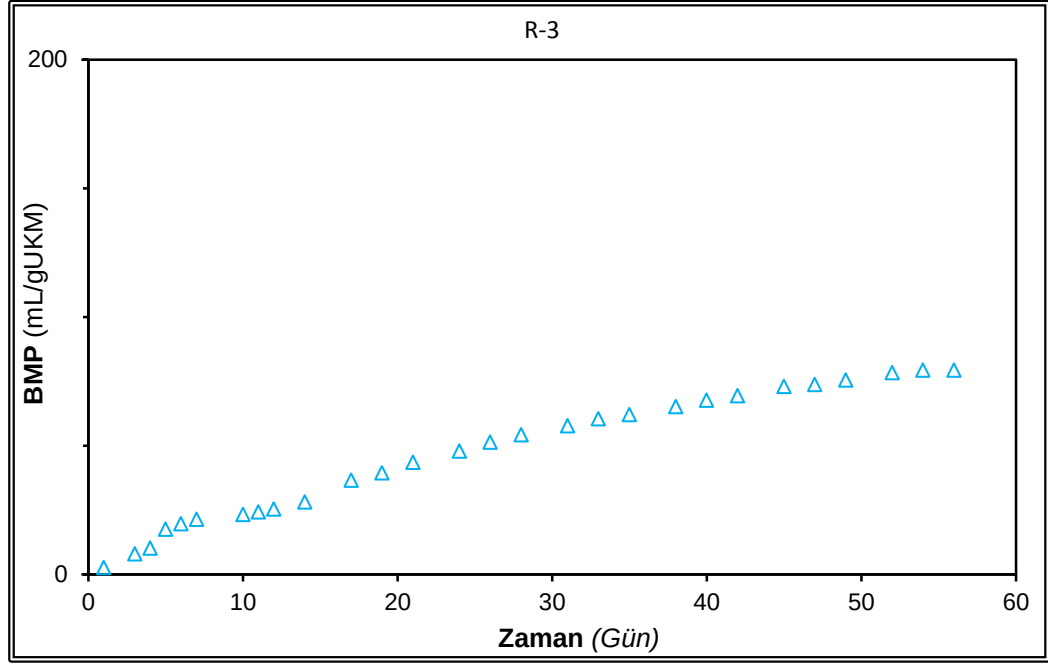
Çalışma sonucunda reaktörlerin numune alma kapakları açılmış ve her bir reaktörden ayrı ayrı katı atık numunesi alınmıştır. Alınan bu atık numunelerinde BMP testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’deki grafiklerde 1 g UKM katı atık için BMP testi sonuçları her bir reaktör için ayrı olarak verilmiştir. Buna göre reaktörlerde 1 g UKM katı atık için metan potansiyeli; R-1’de 105,9 mL, R-2’de 160,4 mL ve R-3’te ise 79,3 mL olarak tespit edilmiştir. Ham katı atık numunesine ait metan potansiyeli 246 mL/g.UKM’dir. Çalışma sonucunda her bir reaktörden alınan atıklara baktığımızda başlangıç metan potansiyeli değerinin düştüğü görülmektedir. Ham atık numunesi ve nihai atıkların BMP değişimlerine baktığımızda %70’lere varan bu azalmanın, biyoreaktörler içerisindeki gıda atıkları gibi kolay ayrışabilir organiklerin anaerobik olarak parçalandığı ve kalan organik maddelerin daha zor parçalanabilir maddelerden oluşmasından olduğu söylenebilir. Böylelikle reaktörler içindeki katı atıkların BMP değerleri çalışma sonunda azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.15: R-1' in BMP testi sonucu.



Şekil 4.16: R-2' nin BMP testi sonucu.



Şekil 4.17: R-3' ün BMP testi sonucu.

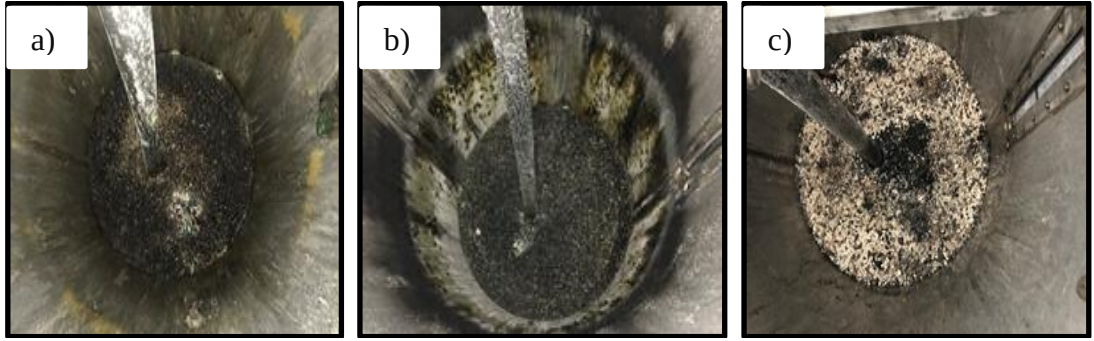
4.5. Atığın Çökme Miktarları

Başlangıçta reaktörlere yüklenen yaklaşık 1 ton atık kısa süre içerisinde yer çekimine bağlı olarak mekanik çökme gerçekleşmiştir. Tablo 4.7'de sonuçlar işletimin ilk zamanlarında gerçekleşen mekanik çökme miktarı ihmal edilerek verilmiştir.

Reaktörlerin işletimi sonlandırıldıktan sonra kapakları açılmıştır ve çökme miktarı hesabı için atık kısmına kadar olan mesafe ölçülmüştür. 540 günlük işletim sonrası reaktörlerin iç görünümü Şekil 4.18'de Buradan atık yüksekliği hesaplanmıştır. Başlangıçtaki atık yüksekliği ile son atık yüksekliğinden her bir reaktör için çökme miktarları hesaplanmıştır (Tablo 4.7). Ayrışmaya dayalı çökme miktarları; R-1'in %28,1, R-2'nin %26,7 ve R-3'ün %14,6'dır. Biyolojik ayrışmalar sonucu gerçekleştiği düşünülen çökme miktarlarına göre R-1 ve R-2'de R-3'e göre daha fazla çökme gerçekleştiği görülmektedir. Arıtma çamuru içeren reaktörlerde (R-1 ve R-2) daha fazla atık ayrışması olduğu görülmektedir.

Tablo 4.7: Reaktörlerdeki atıkların çökme miktarları.

Reaktör	Başlangıç Yüksekliği	Son Yükseklik	Çökme	
	(cm)		(cm)	(%)
R-1	240	172.5	67.5	28.1
R-2	240	176	64	26.7
R-3	240	205	35	14.6

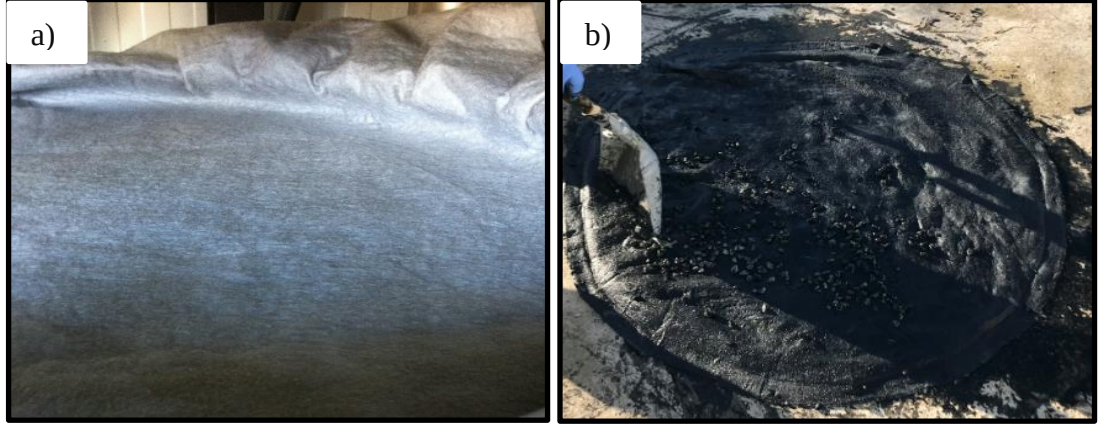


Şekil 4.18: 540 günlük işletim sonrası reaktörlerin iç görünümü:
a) R-1'in, b) R-2'nin c) R-3'ün görünümü.

4.6. Geotekstilde Biyokütle Oluşumu

4.6.1. Biyokütlenin Geotekstil Üzerindeki Görsel Etkisi

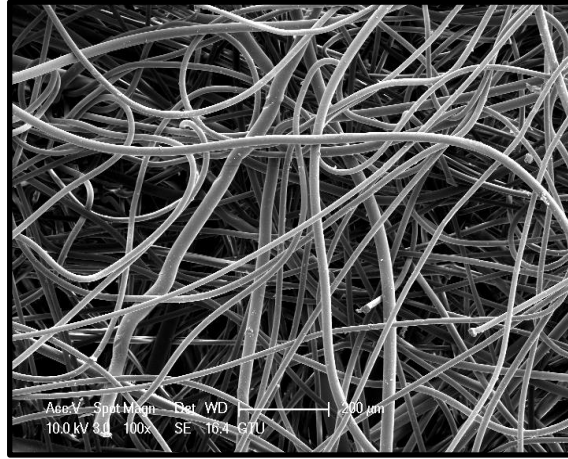
Bu çalışmada kullanılan geotekstilin, çalışmaya başlamadan önceki temiz görünümü (Şekil 4.19.a) ve 540 günlük işletim sürecinden sonraki görünümü (Şekil 4.19.b) verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, geotekstil üzerinde belirgin bir şekilde biyokütle kalıntısı olduğu görülmektedir. Uzun süreli bir işletimden sonra geotekstilin yüzeyinin tamamı biyokütle kalıntılarıyla kaplanmış ve bu durum sızıntı suyunun atık gövdesi üzerinde iyi bir şekilde dağıldığının bir göstergesidir. Geotekstili reaktörden çıkardıktan sonra (R-2) biyokütle kalıntılarının taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile görüntülenmesi için geotekstilden numune kesilerek incelemeye gönderilmiştir.



Şekil 4.19: Bu çalışmada kullanılan geotekstil malzeme:
a) Temiz geotekstilin görünümü, b) 540 günlük işletim sonrası geotekstilin görünümü.

4.6.2. Geotekstilin TEM Görüntüleri

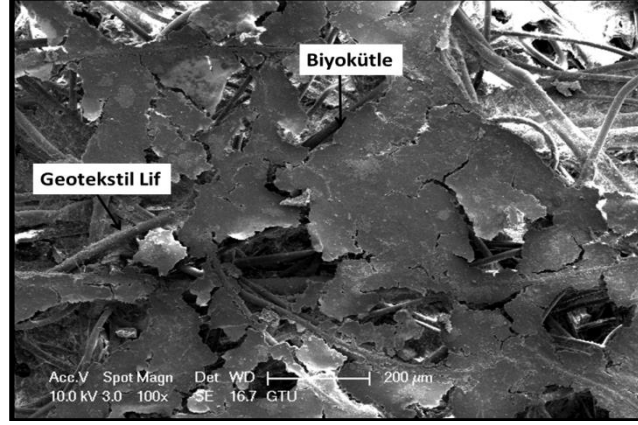
Kullanılmamış, örgüsüz (nonwoven) geotekstilin gözenekli yapısının TEM görüntüsü Şekil 4.20’de verilmiştir. Geotekstil malzemenin kullanılmadan önce lif yapısı üzerinde hemen hemen hiç partikül bulunmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20: Temiz geotekstil örneğinin 100x büyüklüğünde TEM görüntüsü.

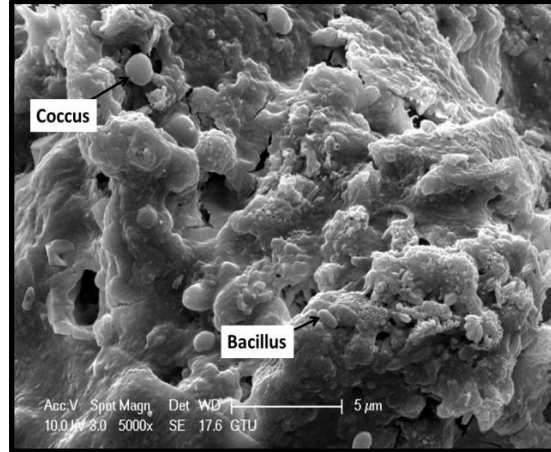
R-2 (GT)’nin 540 günlük işletiminden sonra, geotekstil malzeme üzerinde biyokütle oluşumu bekleniyordu. Bu beklenen biyokütleyi saptamak için, reaktörden çıkarılan geotekstil örneğinin TEM görüntüleri alınmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda, örgüsüz geotekstilin gözenekli yapısının içinde veya geotekstilin yüzey alanında biyofilm oluşumunun görüldüğü gözlemlenmiştir [2, 62, 63].

Geotekstil lifleri arasındaki karmaşık biyokütle oluşumu Şekil 4.21’de görülmektedir. Geotekstilin lifli yapısı üzerinde de biyokütle oluşumu açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 4.21: Biyokütle kalıntısına sahip geotekstil örneğinin 100x büyüklüğünde TEM görüntüsü.

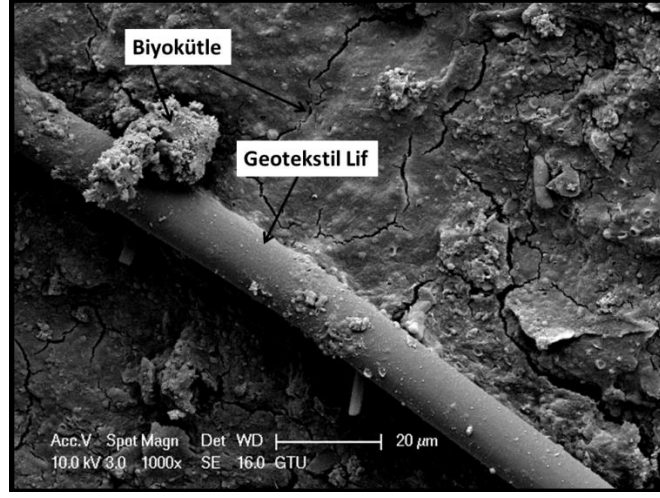
TEM resimleri ile mikrobiyolojik topluluklar açıkça ve yakından (5000x) görüntülenmiştir (Şekil 4.22). Şekil 4.16’da bazı coccus ve bacillus şekilli bakteriler açıkça görülmektedir. Metanojenler morfolojisini araştıran bazı çalışmalarda benzer gözlemler yapılmıştır [64-66].



Şekil 4.22: Geotekstil lifleri üzerindeki mikrobiyolojik topluluğun 5000x büyüklüğünde TEM görüntüsü.

Geotekstil yapısı üzerinde bulunan çakıl tabakası biyokütle oluşumu nedeniyle geotekstil malzeme üzerine tutunmuştur (Şekil 4.23). Geotekstil üzerinden ayrılan çakıllarda da TEM görüntüsüne bakılmıştır. Şekil 4.23’de çakıl üzerinde oluşan

biyofilm tabakası açıkça görülmektedir. Çakıl tabakası geotekstile tutunduğundan dolayı üzerinde geotekstil lif ve biyokütle oluşumu görülmektedir.



Şekil 4.23: Geotekstil üzerindeki çakıl tabakasının 1000x büyüklüğünde TEM görüntüsü.

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada, arıtma çamurunun ve geotekstil malzemesinin atıkların ayrışmasına ve depo gazının oluşumuna etkisini incelemek amacı ile 350 cm yüksekliğinde 80 cm iç çapında üç adet pilot ölçekli atık biyoreaktörleri kullanılmıştır. R-1 ve R-2’de reaktörlere atıkla beraber arıtma çamuru da eklenmiştir. R-2’de ise ayrıca özel olarak seçilmiş geotekstil malzemesi drenaj tabakasına yerleştirilmiştir. R-3 ise tipik bir depolama sahasına benzer bir biyoreaktör olarak düşünülmüştür ve içerisinde sadece evsel katı atık bulunmaktadır. Pilot ölçekli reaktörler 900 kg evsel katı atık ile doldurulmuştur. Her bir reaktör, yağmur suyu amaçlı 8 L musluk suyu eklenerek işleme alınmıştır. R-3 tipik bir depolama sahası gibi düşünüldüğü için ilk 8 ay haftalık 8 L yağmur suyu eklemesi yapılmıştır ve geri devir yapılmamıştır. R-1 ve R-2’de oluşan sızıntı suları ise, her gün aynı saatte periyodik olarak atık bünyesine geri devir ettirilmiştir. Depo gazı miktarları haftalık olarak incelenmiştir. Aynı zamanda depo gazı kompozisyonu periyodik olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca reaktör içi atık sıcaklıkları takip edilmiştir. Bu çalışmada vurgulanması gereken bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Reaktörlerin işletimi sırasında sıcaklık koşullarının, mezofilik bakteriler için uygun aralıkta olması sağlanmıştır. Tüm reaktörler için sıcaklık 37 °C’ye sabitlenmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan evsel katı atıklar ve arıtma çamurları Türkiye’nin depolama alanları için temsili bir örnek olarak düşünülebilir.
- Kümülatif depo gazı miktarlarının verileri (Şekil 4.6) belirgin bir şekilde gösterilmiştir. Geotekstil malzemeye sahip olan reaktörde (R-2) diğer reaktörlerden (R-1 ve R-3) daha hızlı stabilizasyon işlemi gerçekleşmiştir. Bu durum, sağlıklı bir mikrobiyal topluluğun daha hızlı oluşması ile doğrudan ilişkilidir. Toplam depo gazı miktarları reaktörler arasında oldukça farklılıklar göstermektedir ve 540 günlük işletim süresince; R-1 için, 7504 L, R-2 için, 22409,7 L ve R-3 için ise 10901,8 L’dir. R-3’e temiz su eklenmesinden dolayı daha çabuk metan üretimine geçmiştir ve R-1’den daha fazla metan üretimi gerçekleştirmiştir. R-3 daha erken gaz üretimine başlamıştır ancak R-2’den daha fazla gaz üretimi gerçekleştirememiştir. Geotekstil malzeme içermesi sebebiyle diğer reaktörlere kıyasla daha sağlıklı bir bakteri topluluğunun oluşması

sağlanmıştır ve metanojenler tarafından daha fazla gaz üretimi gerçekleşmiştir. Reaktörlerde UKM giderimlerine baktığımızda sırasıyla, %58, %66 ve %43 oranlarındadır. Çökme miktarlarına da baktığımızda reaktörlerde sırasıyla, %28, %26,7, %14,6 oranlarındadır. Bu oranlara baktığımızda R-1'in gaz üretiminin R-3'ten fazla olması gerekmektedir. Ancak R-3'te daha fazla gaz miktarı ölçülmüştür. Bunun sonucunda R-1'in daha az gaz üretmesinin sebebi reaktörde gaz kaçağı gerçekleşmesi olabilir veya reaktörden gaz ölçümü sırasında gazın verimli bir şekilde çekilmemiş olması ile ilişkilendirilebilir.

- Kümülatif depo gazı sonuçları için matematiksel bir model kullanılarak gaz verilerinin model ile benzetilmesi yapılmıştır. Model parametrelerini ($V_{(\infty)}$, k ve λ) hesaplamak için doğrusal olmayan regresyon analizi kullanılmıştır. Modele göre, maksimum biyogaz üretim oranları (k), R-1'de $0,254 \text{ Nm}^3/\text{gün.t}_{\text{kuru ağırlık}}$, R-2'de $0,418 \text{ Nm}^3/\text{gün.t}_{\text{kuru ağırlık}}$ ve R-3'te $0,118 \text{ Nm}^3/\text{gün.t}_{\text{kuru ağırlık}}$ 'dir. R-2'de diğer reaktörlere kıyasla maksimum depo gazı üretim oranı daha fazla görülmektedir. Şekil 4.7'de R-1 ve R-2'nin modele uygun olduğu görülmektedir. Ancak R-3'te gaz üretim debisi çok değişken olduğu için modele uygun görülmemektedir.
- Başlangıç ve çalışma sonucu katı atık karakterizasyonuna baktığımızda reaktörlerde, kolay ayrışabilen organik maddenin ayrışması sonucunda uçucu katı maddenin önemli bir kısmı giderilmiştir. Ayrıca, giriş ve çıkış değerleri karşılaştırıldığında, reaktörlerde ortalama olarak %60'dan fazla TOK, %60'dan fazla organik azot ve %70'ten fazla fosfor giderimi gözlemlenmiştir.
- BMP deneyi ile atıkların başlangıçtaki metan potansiyeli 246 mL/g UKM olarak belirlenmiştir. 540 günlük işletim süresi sonrasında reaktörlerde, 1 g UKM katı atık için metan potansiyeli; R-1'de $105,9 \text{ mL}$, R-2'de $160,4 \text{ mL}$ ve R-3'te ise $79,3 \text{ mL}$ olarak tespit edilmiştir. Her bir reaktörün metan potansiyeli değerlerine baktığımızda başlangıç metan potansiyeli değerinin düştüğü görülmektedir. Bu azalmanın gıda atıkları gibi kolay ayrışabilir organiklerin anaerobik olarak parçalandığı ve kalan organik maddelerin daha zor parçalanabilir maddelerden oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir.
- Reaktörlerin 540 günlük işletimi sonrasında içerilerinde bulunan atıkların çökme miktarları hesaplanmıştır. Buna göre arıtma çamuru bulunan reaktörlerde (R-1 ve R-2) arıtma çamuru bulunmayan reaktöre (R-3) kıyasla daha fazla çökme

miktarı oluştuğu gözlemlenmiştir. Böylece arıtma çamurunun daha hızlı atık ayrışmasına etki ettiği görölmektedir. UKM giderimlerine de baktığımızda en az giderimin R-3'te gerçekleştiği görölmektedir. UKM giderim verimlerine paralel olarak en az çökme R-3'te meydana gelmiştir.

- Geotekstil biyofiltrenin, reaktörden (R-2) çıkarıldıktan sonra temiz geotekstille karşılaştırıldığında, üzerinde biyofilm tabakası oluştuğu açıkça görölmektedir. Farklı boyutlarda TEM görüntüleri incelendiğinde de geotekstil biyofiltre üzerinde ve gözenekleri arasında biyokütle oluşumu ve mikrobiyolojik toplulukların oluşumu incelenmiştir.

Ülkemizde atık depolama sahalarında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri depo gazı yönetimidir. Depo gazı içerik olarak %50'den fazla metan gazı içermesinden ve de metan gazının en önemli sera gazlarından birisi olmasından dolayı, metan gazının kısa süre içerisinde elde edilerek enerjiye çevrilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmadaki çıktılarından da görüleceği üzere depo gazı oluşumunu artırmaya yarayacak olan geotekstil gibi yüksek biyofilm tutunma yüzeyi sağlayan malzemelerin sızıntı suyu geri devirli depo sahalarının drenaj tabakalarında kullanımı faydalı olacaktır. Bu tür biyofilm tutunma malzemeleri sızıntı suyu geri devri esnasında sızıntı suyu ile sürekli temas halinde kalarak sızıntı suyundaki organik bileşenleri daha hızlı ayrıştırarak depo gazı oluşum hızını artıracaktır. Ayrıca bu çalışmada arıtma çamurları ile evsel atıkların beraber depolanabilirliği de başarılı bir şekilde ortaya konmuştur. Bu sebeple ülkemizde geleneksel yöntemlerle işletilen atık depolama sahaları biyoreaktör moduna dönüştürölerek ve yeni depo sahalarının da geri devirli biyoreaktör olarak tasarlanmaları suretiyle atıktan elde edilecek depo gazı daha kısa sürede gerçekleşecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Valencia R., Den Hamer D., Komboi J., Lubberding H., Gijzen H., (2009), “Alternative treatment for septic tank sludge: Co-digestion with municipal solid waste in bioreactor landfill simulators”, Journal of Environmental Management, 90 (2), 940-945.
- [2] Koerner G. R., (1993), “Performance evaluation of geotextile filters used in leachate collection systems of solid waste landfills”, PhD Thesis, Drexel University.
- [3] Yaman C., Korkut E., Marino R., (2003). “Groundwater recharge of urban runoff after biological treatment in geotextile filters”, Proc., 2003 Pennsylvania Stormwater Management Symp.
- [4] Küçükağa Y., (2016), “Effect of Geotextile Layer on Leachate Quality in Recirculated Landfill Bioreactor”, Master of Science, Gebze Technical University.
- [5] İSTAC, (2012), “Entegre katı atık yönetimi”, İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret A.Ş.
- [6] Web 1, (2015), <https://www.csb.gov.tr/dosyalar/images/file/atikyonetimi.pdf>, (Erişim Tarihi: 06/02/2017).
- [7] Web 2, (2017), <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=119&locale=tr>, (Erişim Tarihi: 09/02/2017).
- [8] Bilgili M. S., Demir A., Özkaya B., (2007), “Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes”, Journal of Hazardous Materials, 143 (1-2), 177-183.
- [9] Al-Yousfi A. B., Pohland F. G., (1998), “Strategies for simulation, design, and management of solid wastes disposal sites as landfill bioreactors”, Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2 (1), 13-21.
- [10] Reinhart D. R., Basel Al-Yousfi A., (1996), “The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics”, Waste Management & Research, 14 (4), 337-346.
- [11] Benson C., Barlaz M. A., Lane D., Rawe J., (2007), “Practice review of five bioreactor/recirculation landfills”, Waste Management, 27 (1), 13-29.
- [12] Warith M., (2002), “Bioreactor landfills: experimental and field results”, Waste Management, 22 (1), 7-17.

- [13] Reinhart D. R., McCreanor P. T., Townsend T., (2002), "The bioreactor landfill: Its status and future", *Waste Management & Research*, 20 (2), 172-186.
- [14] Šan I., Onay T. T., (2001), "Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation", *Journal of Hazardous Materials*, 87 (1), 259-271.
- [15] Ko J. H., Yang F., Xu Q., (2016), "The impact of compaction and leachate recirculation on waste degradation in simulated landfills", *Bioresource Technology*, 211, 72-79.
- [16] Białowiec A., Siudak M., Jakubowski B., Wiśniewski D., (2017), "The influence of leachate recirculation on biogas production in a landfill bioreactor", *Environment Protection Engineering*, 43 (1), 113-120.
- [17] Sanphoti N., Towprayoon S., Chaiprasert P., Nopharatana A., (2006), "The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill", *Journal of Environmental Management*, 81 (1), 27-35.
- [18] Francois V., Feuillade G., Matejka G., Lagier T., Skhiri N., (2007), "Leachate recirculation effects on waste degradation: Study on columns", *Waste Management*, 27 (9), 1259-1272.
- [19] Jun D., Yong-sheng Z., Mei H., Wei-Hong Z., (2009), "Influence of alkalinity on the stabilization of municipal solid waste in anaerobic simulated bioreactor", *Journal of Hazardous Materials*, 163 (2), 717-722.
- [20] Jun D., Yongsheng Z., Henry R. K., Mei H., (2007), "Impacts of aeration and active sludge addition on leachate recirculation bioreactor", *Journal of Hazardous Materials*, 147 (1-2), 240-248.
- [21] Chugh S., Chynoweth D., Clarke W., Pullammanappallil P., Rudolph V., (1999), "Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach-bed process", *Bioresource Technology*, 69 (2), 103-115.
- [22] Sandip T. M., Kanchan C. K., Ashok H. B., (2012), "Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill", *Bioresource Technology*, 110, 10-17.
- [23] Sponza D. T., Ağdağ O. N., (2005), "Effects of shredding of wastes on the treatment of municipal solid wastes (MSWs) in simulated anaerobic recycled reactors", *Enzyme and microbial Technology*, 36 (1), 25-33.
- [24] Aktas D., Agdag O. N., Simsek O., (2013), "Seed sludge effect on anaerobic treatment of organic solid waste and its microbial community", *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science*, 300-310.

- [25] Dong J., Sheng H., Wen C., Hong M., Jiang H., (2013), "Effects of phosphorous on the stabilization of solid waste in anaerobic landfill", *Process Safety and Environmental Protection*, 91 (6), 483-488.
- [26] Web 3, (2017), (<https://www.csb.gov.tr/db/destek/editordosya/EK12.pdf>), (Erişim Tarihi: 03.02.2017).
- [27] Hamzawi N., Kennedy K., McLean D., (1998), "Technical feasibility of anaerobic co-digestion of sewage sludge and municipal solid waste", *Environmental Technology*, 19 (10), 993-1003.
- [28] Kinman R. N., Nutini D. L., Walsh J. J., Vogt W. G., Stamm J., Rickabaugh J., (1987), "Gas enhancement techniques in landfill simulators", *Waste Management & Research*, 5 (1), 13-25.
- [29] Kacprzak M., Neczaj E., Fijałkowski K., Grobelak A., Grosser A., Worwag M., Rorat A., Brattebo H., Almås Å., Singh B. R., (2017), "Sewage sludge disposal strategies for sustainable development", *Environmental Research*, 156, 39-46.
- [30] Kayhanian M., Rich D., (1996), "Sludge management using the biodegradable organic fraction of municipal solid waste as a primary substrate", *Water Environment Research*, 68 (2), 240-254.
- [31] Craft D., Blakey N., (1998). "Codisposal of sewage sludge and waste in landfills", *ISWA Proceedings*, 161-168.
- [32] Gülec S., Onay T., Erdinçler A., (2000), "Determination of the remaining stabilization potential of landfilled solid waste by sludge addition", *Water Science and Technology*, 42 (9), 269-276.
- [33] Cinar S., Onay T. T., Erdinçler A., (2004), "Co-disposal alternatives of various municipal wastewater treatment-plant sludges with refuse", *Advances in Environmental Research*, 8 (3), 477-482.
- [34] Leuschner A. P., (2012), "2.4 Enhancement of Degradation: Laboratory Scale Experiments", *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Thomas Christensen.
- [35] Al Seadi T., Rutz D., Prassl H., Köttner M., Finsterwalder T., Volk S., Janssen R., (2008), "Biogas Handbook.-University of Southern Denmark Esbjerg", Technical Report, ISBN 978-87-992962-0-0.
- [36] Christy P. M., Gopinath L., Divya D., (2014), "A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 167-173.
- [37] Gerardi M. H., (2003), "The microbiology of anaerobic digesters", 1. Edition, John Wiley & Sons.

- [38] Pohland F., Kim J., (2000), "Microbially mediated attenuation potential of landfill bioreactor systems", *Water Science and Technology*, 41 (3), 247-254.
- [39] Rich C., Gronow J., Voulvoulis N., (2008), "The potential for aeration of MSW landfills to accelerate completion", *Waste Management*, 28 (6), 1039-1048.
- [40] Appels L., Baeyens J., Degreè J., Dewil R., (2008), "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge", *Progress in energy and combustion Science*, 34 (6), 755-781.
- [41] Nasir I., Mohd. Ghazi T., Omar R., Idris A., (2014), "Bioreactor performance in the anaerobic digestion of cattle manure: A review", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36 (13), 1476-1483.
- [42] Bharathiraja B., Yogendran D., Ranjith Kumar R., Chakravarthy M., Palani S., (2014), "Biofuels from sewage sludge-A review", *Int. J. Chem. Tech. Res*, 6, 4417-4427.
- [43] Demirbas A., (2008), "Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines", *Springer-Verlag London Limited*, 10, 978-971.
- [44] Koerner G. R., Koerner R. M., Martin J. P., (1994), "Design of landfill leachate-collection filters", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (10), 1792-1803.
- [45] White D. M., Pilon T. A., Woolard C., (2000), "Biological treatment of cyanide containing wastewater", *Water Research*, 34 (7), 2105-2109.
- [46] Korkut E., Yaman C., Marino R., (2003), "Treatment of combined sewer overflows using geotextile baffle contact method", *Pennsylvania Stormwater Management Symposium*, Villanova University, Villanova, PA USA October, 16-17.
- [47] Korkut E. N., Martin J. P., Yaman C., (2006), "Wastewater treatment with biomass attached to porous geotextile baffles", *Journal of Environmental Engineering*, 132 (2), 284-288.
- [48] Yaman C., Martin J. P., Korkut E., (2005), "Use of layered geotextiles to provide a substrate for biomass development in treatment of septic tank effluent prior to ground infiltration", *Journal of Environmental Engineering*, 131 (12), 1667-1675.
- [49] Yaman C., Martin J., Korkut E., (2006), "Effects of wastewater filtration on geotextile permeability", *Geosynthetics International*, 13 (3), 87-97.
- [50] Alimahmoodi M., Yerushalmi L., Mulligan C. N., (2012), "Development of biofilm on geotextile in a new multi-zone wastewater treatment system for simultaneous removal of COD, nitrogen and phosphorus", *Bioresource Technology*, 107, 78-86.

- [51] Yaman C., Küçükağa Y., (2017), “Effect of a geotextile filter on leachate quality in a recirculated landfill bioreactor”, *Desalination and Water Treatment*, 80, 61-73.
- [52] Web 4, (2016), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/yillik-toplam-yagis-verileri.aspx?m=kocaeli>, (Erişim Tarihi: 04/02/2016).
- [53] Association A. P. H., Association A. W. W., Federation W. P. C., Federation W. E., (1915), “Standard methods for the examination of water and wastewater”, 1. Edition, American Public Health Association.
- [54] Zehnder A. J., Wuhrmann K., (1977), “Physiology of a Methanobacterium strain AZ”, *Archives of Microbiology*, 111 (3), 199-205.
- [55] Shelton D. R., Tiedje J. M., (1984), “General method for determining anaerobic biodegradation potential”, *Applied and environmental microbiology*, 47 (4), 850-857.
- [56] Shanmugam P., Horan N., (2009), “Simple and rapid methods to evaluate methane potential and biomass yield for a range of mixed solid wastes”, *Bioresource technology*, 100 (1), 471-474.
- [57] Angelidaki I., Alves M., Bolzonella D., Borzacconi L., Campos J., Guwy A., Kalyuzhnyi S., Jenicek P., Van Lier J., (2009), “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays”, *Water Science and Technology*, 59 (5), 927-934.
- [58] Erses A. S., (2008), “Sustainable Solid Waste Management and In Situ Attenuation Mechanisms in Landfills Under Aerobic and Anaerobic Conditions”, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [59] Zwietering M., Jongenburger I., Rombouts F., Van't Riet K., (1990), “Modeling of the bacterial growth curve”, *Applied and environmental microbiology*, 56 (6), 1875-1881.
- [60] Zhu B., Gikas P., Zhang R., Lord J., Jenkins B., Li X., (2009), “Characteristics and biogas production potential of municipal solid wastes pretreated with a rotary drum reactor”, *Bioresource Technology*, 100 (3), 1122-1129.
- [61] Benbelkacem H., Bayard R., Abdelhay A., Zhang Y., Gourdon R., (2010), “Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor”, *Bioresource Technology*, 101 (14), 5206-5212.
- [62] Yaman C., (2003), “Geotextiles as biofilm filters in wastewater treatment”, PhD Thesis, Drexel University.
- [63] Marino R. J., (2006), “Geotextile filter treatment of combined sewer discharges”, Drexel University.

- [64] Mussati M., Thompson C., Fuentes M., Aguirre P., Scenna N., (2005), "Characteristics of a methanogenic biofilm on sand particles in a fluidized bed reactor", *Latin American Applied Research*, 35 (4), 265-272.
- [65] Chen S., Zhang J., Wang X., (2015), "Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste", *Waste Management & Research*, 33 (11), 1033-1040.
- [66] Pazinato J. M., Paulo E. N., Mendes L. W., Vazoller R. F., Tsai S. M., (2010), "Molecular characterization of the archaeal community in an Amazonian wetland soil and culture-dependent isolation of methanogenic archaea", *Diversity*, 2 (7), 1026-1047.

ÖZGEÇMİŞ

Gülşah Delice 1991 yılında İstanbul’da doğdu. 2010 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünü 2015 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2015-2017 yılları arasında Gebze Teknik Üniversitesinde TÜBİTAK-1001 projesinde proje asistanı olarak çalıştı.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Yaman C., Kucukaga Y., Pala B., Delice G., (2016), “Operating Landfills as Bioreactor by Recirculating Leachate”, EurAsia Waste Management Symposium (EWMS), 96-104, İstanbul-Turkey, 2-4 May.

Küçükağa Y., Yaman C., Delice G., Pala B., (2016), “Operational Start-Up of Lab-Scale Anaerobic Landfill Bioreactor” International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), 834, Sarajevo-Bosnia and Herzegovina, 24-28 May.

Delice G., Pala B., Küçükağa Y., Yaman C., (2016), “Pilot Scale Anaerobic Landfill Bioreactor Operation” International Conference on Sustainable Development (ICSD), Skopje-Macedonia, 19-23 Nov.

Küçükağa Y., Yaman C., Pala B., Delice G., (2017), “Using Geotextile Filter as Biofilm Media in Anaerobic Landfill Bioreactor” 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management (ATHENS2017), Athens-Greece, 21-24 June.

Yaman C., Delice G., Pala B., Kucukaga Y., Kara S., Akyol A., (2017), “Landfill Gas Production In Landfill Bioreactors Containing Municipal Solid Waste And Sewage Sludge” 3rd International Conference On Environmental Science And Technology (ICOEST), Budapest-Hungary, 19-23 October.

Yaman C., Delice G., Pala B., Kucukaga Y., Kara S., Akyol A., (2017), “Variation Of Leachate Quality In Pilot Scale Landfill Bioreactors Containing Municipal Solid Waste And Sewage”, 3rd International Conference On Environmental Science And Technology (ICOEST), Budapest-Hungary, 19-23 October.