

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİ DEVİRLİ VE GEOTEKSTİL TABAKALI EVSEL ATIK  
BİYOREAKTÖRDE SIZINTI SUYU KALİTESİNİN İNCELENMESİ**

**BURCU PALA**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2018**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİ DEVİRLİ VE GEOTEKSTİL**  
**TABAKALI EVSEL ATIK**  
**BİYOREAKTÖRDE SIZINTI SUYU**  
**KALİTESİNİN İNCELENMESİ**

**BURCU PALA**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DOÇ. DR. COŞKUN AYDINER**

**GEBZE**  
**2018**

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

**INVESTIGATION OF LEACHATE  
QUALITY IN MUNICIPAL LANDFILL  
BIOREACTOR WITH RECIRCULATION  
AND GEOTEXTILE LAYER**

**BURCU PALA**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**ASSOC. PROF. DR. COŞKUN AYDINER**

**GEBZE**

**2018**

GTÜ FEN BİLİMLERİ Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/06/2018 tarih ve 2018/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/07/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan BURCU PALA 'ın tez çalışması ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. COŞKUN AYDINER



ÜYE

: DOÇ. DR. MAHİR İNCE



ÜYE

: DR. ÖĞR. ÜYESİ BERNA KIRIL MERT



**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

## ÖZET

Atık depolama sahaları içinde organik maddelerin bulunduğu birçok kirleticiyi barındırmaktadırlar ve bu kirleticiler zamanla oluşan sızıntı suyuna geçmektedirler. Günümüzde atık depolama sahalarında nem, besin maddesi ve mikroorganizmaların atık gövdesine eşit dağılması ve atık stabilizasyonunun sağlanması için sızıntı suyu geri devri yapılmaktadır.

Atık depolama sahalarında iki farklı tabakayı birbirinden ayırmak veya geomembranı korumak amacıyla kullanılan geotekstil malzeme gözenekli bir yapıya sahiptir. Ayrıca geotekstil malzemeler biyolojik arıtım amacıyla atık su arıtımında biyofiltre olarak kullanılmaktadırlar.

Bertaraf edilmesi gereken arıtma çamurları içlerinde nem, organik besin maddeleri ve mikroorganizmaları içermektedirler. Bu çamurların atıklarla birlikte depolanması bertaraf yöntemlerinden birisidir.

Bu çalışmada geotekstil malzeme biyofilm oluşturmak amacıyla kullanılmış olup, tek ve çift geotekstil tabakası kullanılması durumunda ve ayrıca arıtma çamuru ile birlikte depolandığında sızıntı suyu kalitesinin yerinde iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla sızıntı suyunun geri devredildiği dört adet pilot ölçekli biyoreaktör kullanılmıştır. İki reaktörde tek (R-2, R-3) ve bir reaktörde çift (R-4) tabakalı geotekstil kullanılırken, aynı zamanda iki reaktörün birinde arıtma çamuruyla (R-2) birlikte geotekstil kullanılmış, diğerinde (R-1) geotekstil kullanılmamıştır.

İki geotekstil malzemenin kullanıldığı biyoreaktörde (R-4) sızıntı suyu kalitesinde iyileşme ve atık stabilizasyonunun sağlanması açısından daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca R-1 ve R-2’de arıtma çamuru kullanılmasından dolayı diğer reaktörlerden daha az giderim görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler: Katı Atıklar, Düzenli Depolama, Atık Biyoreaktörü, Sızıntı Suyu Arıtımı, Geotekstil, Biyofilm, Arıtma Çamurları.**

## SUMMARY

Landfills contain many pollutants in which organic matter is found and these pollutants. Nowadays, landfill is operated by circulating the leachate in order to distribute moisture, nutrients and microorganisms evenly to the waste body and to provide waste stabilization.

Geotextile is a porous structure which used to separate two layers from each other or to protect the geomembrane in the landfill. In addition, geotextile materials are used as biofilter in wastewater treatment for biological treatment.

Sewage sludge which should be disposed of, contains moisture, organic nutrients and microorganisms. Co-disposal of sewage sludge with municipal solid waste is one of the disposal methods.

In this study, geotextile material was used to form biofilm. It is aimed to improvement the quality of leachate in situ when one and more than one geotextile layers use and also co-disposal of sewage sludge with municipal solid waste. For this purpose, four pilot scale bioreactors were used in which the leachate was recycled. While two reactors (R-2, R-3) are used one geotextile layer and one reactor are used more than one geotextile layers, at the same time, one of the two reactors used geotextile with sewage sludge (R-2) and the other (R-1) did not use geotextile.

Bioreactor (R-4) which one more than geotextile layers were used, showed better results in terms of improving the quality of leachate and ensuring waste stabilization. Furthermore, it has been observed that co-disposal of sewage sludge with municipal solid waste reduces the removal.

**Key Words: Solid Wastes, Landfilling, Landfill Bioreactor, Leachate Treatment, Geotextile, Biofilm, Sewage Sludges.**

## TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda ufkumu genişleterek bana yol gösteren, desteğini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Coşkun Aydıner'e,

Tezimi okumaya ve yorumlamaya zaman ayırdıkları için Tez jüri üyelerim Doç. Dr. Mahir İnce ve Dr. Öğr. Üyesi Berna Kırıl Mert'e,

Çalışmaların yürütülmesi esnasında, deneyimlerini benimle paylaştığı ve sağladığı destekten dolayı Doç. Dr. Cevat Yaman'a,

Reaktörlerin kurulumu, işletmeye alınması ve deneysel çalışmalar sırasındaki desteğinden dolayısıyla Arş. Gör. Yusuf Küçükkağa ve Çevre Yüksek Mühendisi Gülşah Delice'ye,

Çalışma süresince, gösterdikleri destek ve sabırdan dolayı arkadaşlarım, Merve Koç, Gizem Duruel ve Betül Eroğlu'na,

Hayatım boyunca hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen annem Serpil Pala, babam Ali Pala ve kardeşim Yaşar Alp Pala'ya teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, 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.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. LİTERATÜR	3
2.1. Katı Atık Tanımı ve Sınıflandırılması	3
2.2. Katı Atık Karakterizasyonu	3
2.3. Katı Atık Yönetimi	4
2.3.1. Depolama Sahası	6
2.3.2. Atık Biyoreaktörü	6
2.4. Atık Stabilizasyonu	7
2.4.1. Anaerobik Ayrışma Evreleri	8
2.4.2. Sızıntı Suyu Oluşumu	9
2.5. Arıtma Çamuru ile Katı Atığın Birlikte Depolanması	10
2.6. Geotekstil Malzeme	10
3. MATERYAL VE METHOD	13
3.1. Deneysel Kurulum	13
3.1.1. Reaktörün Yapısı	13
3.1.2. Sızıntı Suyu Drenaj Yapısı	14
3.1.3. Sızıntı Suyu Toplama, Geri devir ve Dağıtım Yapısı	15
3.2. İşletme	16
3.2.1. İşletimin Başlatılması	17
3.2.2. Reaktörlere Atık Yüklenmesi	17
3.2.3. İşletim Prosedürü	18



3.3. Analizler	19
3.3.1. Katı Atık Analizleri	19
3.3.2. Aşı Çamuru Analizleri	20
3.3.3. Arıtma Çamuru Analizleri	20
3.3.4. Sızıntı Suyu Analizleri	20
3.3.5. Geotekstil üzerinde Biyokütle Oluşumu	21
3.4. Katı Atık Karakterizasyonu	22
3.5. Aşı Çamuru Karakterizasyonu	23
3.6. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu	23
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	24
4.1. Sıcaklık	25
4.2. Oluşan Sızıntı Suyu ve Geri Devredilen Miktarlar	26
4.3. Sızıntı Suyu Kalitesi	27
4.3.1. pH	27
4.3.2. Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli	28
4.3.3. İletkenlik ve Toplam Çözünmüş Katı	29
4.3.4. Organik İçerik	31
4.3.4.1. Kimyasal Oksijen İhtiyacı	31
4.3.4.2. Biyolojik Oksijen İhtiyacı	32
4.3.4.3. Toplam Organik Karbon	33
4.3.5. Alkalinite	34
4.3.6. Amonyak ve Toplam Kjeldahl Azotu	35
4.3.7. Toplam Fosfor	37
4.3.8. Uçucu Yağ Asidi	37
4.3.9. Elementel Analizler	40
4.3.9.1. Anyonlar	40
4.3.9.2. Katyonlar	42
4.3.10. İşletme Sonucu Katı Atık Karakterizasyonu	46
4.3.11. Geotekstilde Biyofilm Oluşumu ve SEM Görüntüleri	48
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	60
EKLER	61

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

## Simgeler ve Açıklamalar Kısaltmalar

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
GT	: Geotekstil
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
ORP	: Oksidasyon-Redüksiyon Potansiyeli
PET	: Polyester
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
SKM	: Sabit Katı Madde
TÇK	: Toplam Çözünmüş Katı
TK	: Toplam Karbon
TKM	: Toplam Katı Madde
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
TN	: Toplam Azot
TOK	: Toplam Organik Karbon
TP	: Toplam Fosfor
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UKM	: Uçucu Katı Madde
UYA	: Uçucu Yağ Asidi

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Atık yönetim hiyerarşisi.	4
2.2: Dünya’da, Avrupa’da ve Türkiye’de atık bertaraf yöntemleri.	5
2.3: Türkiye’deki atık bertaraf miktarları.	5
2.4: Atık biyoreaktör tasarımı.	7
2.5: Anaerobik ayrışma evreleri.	8
2.6: Sahada geotekstil kullanımları.	11
2.7: Geotekstil üzerindeki biyofilm yapısının SEM görüntüleri.	12
3.1: Reaktör yapısı	13
3.2: Atık biyoreaktörlerin şematik görünümü.	14
3.3: Reaktörlerin çakıl drenaj tabakası.	15
3.4: Sızıntı suyu toplama tankı.	16
3.5: Çalışmada kullanılan atıkların doldurulması.	18
3.6: Pilot ölçekli atık biyoreaktörleri.	19
4.1: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için atık gövdesi sıcaklığı.	25
4.2: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için oluşan sızıntı suyu miktarları.	26
4.3: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen pH değerleri.	28
4.4: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen ORP değerleri.	29
4.5: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen iletkenlik değerleri.	30
4.6: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TÇK değerleri.	30
4.7: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen KOİ değerleri.	32
4.8: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen BOİ <sub>5</sub> değerleri.	33
4.9: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TOK değerleri.	34
4.10: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen alkalinite değerleri	35
4.11: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen amonyak değerleri.	36
4.12: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TKN değerleri.	36
4.13: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TP değerleri.	37
4.14: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen UYA değerleri.	39
4.15: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen sülfat değerleri.	40
4.16: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen klorür değerleri.	41
4.17: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen florür değerleri.	42

4.18:	R-1 için zamanla değişen katyon değerleri.	43
4.19:	R-2 için zamanla değişen katyon değerleri.	44
4.20:	R-3 için zamanla değişen katyon değerleri.	45
4.21:	R-4 için zamanla değişen katyon değerleri.	46
4.22:	Reaktörlerin numune alma kapakları.	47
4.23:	R-2'nin geotekstilinin (GT-3) SEM görüntüleri.	49
4.24:	R-3'ün geotekstilinin (GT-3) SEM görüntüleri.	49
4.25:	R-4'ün üst geotekstilinin (GT-1) SEM görüntüleri.	50
4.26:	R-4'ün alt geotekstilinin (GT-2) SEM görüntüleri.	50
4.27:	R-2'nin çakıl numunelerinin SEM görüntüleri.	51
4.28:	R-3'ün çakıl numunelerinin SEM görüntüleri.	51
4.29:	R-4'ün çakıl numunelerinin SEM görüntüleri.	52

# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: 2015 yılı İstanbul ili atık karakterizasyonu.	3
3.1: Kullanılan geotekstillerin özellikleri.	15
3.2: Reaktörlerin işletim özellikleri.	17
3.3: Sızıntı suyu analizleri parametreleri, yöntemleri ve ölçüm sıklığı.	21
3.4: Atık karakterizasyonu.	22
3.5: Atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri.	22
3.6: Aşı çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.	23
3.7: Arıtma çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.	23
4.1: Katı atık bitiş fiziksel özellikleri.	47
4.2: Katı atık bitiş kimyasal özellikleri.	48

# 1. GİRİŞ

Birçok gelişmekte olan ÷lkede olduğu gibi bizim ÷lkemizde de, atıkların bertarafı için kullanılan en yaygın yöntem kurulum ve işletim kolaylığından dolayı depolama sahalarıdır. Gñmñzde vahşi depolamanın yerine dñzenli depolama sahalarna geçilmesiyle birlikte yer sorunu, işletme maliyeti, oluşan sızıntı suyunun arıtılma maliyetinin yñksek olması ve atık stabilizasyon sñresinin uzun yıllar sñrmesi gibi bazı sorunlar oluşmaktadır. Depolama sahalarnının biyoreaktör olarak kullanılması bu sorunlarında azalmasına yardımcı olmaktadır. Bu amaçla sızıntı suyu geri devri, ek su ilavesi, alkalinite ilavesi ve arıtma çamurlarıyla birlikte depolanması gibi birçok çalışma gerçekteşirilmiştir. Oluşan sızıntı suyunun yerinde iyileşmesinin gerçekteşirilmesi sonucu biyoreaktörler hem çevresel hem ekonomik açıdan tercih edilir hale gelmiştir.

Atık depolama sahalarnında geçirimsiz geomembranı, çakıl ve atık parçalarından korumak için kullanılan geotekstil malzemesi yñksek geçirgenliğe sahiptir. Bu alanda yapılan çalışma da, geotekstilin aşırı biyokñtle oluşumundan ve sızıntı suyunun filtrasyonundan dolayı tıkanığı bulunmuştur [1]. Daha sonraki araştırmalarda geotekstil malzeme biyofiltre olarak kullanımı farklı atık su arıtımları üzerinde çalışılmıştır. Yapılan bir başka çalışmada ise, biri geotekstil malzemeli iki geri devirli atık biyoreaktörü kullanılmış, geotekstil tabakası kullanılan reaktörün hem atığının daha çabuk ayrıştığı, hemde sızıntı suyu kalitesindeki iyileşmenin daha iyi olduğu görñlmüřtür [2]. Ayrıca arıtma çamuru ile katı atığın birlikte depolandığı reaktörlerde, arıtma çamurlarnının içerdikleri nem, besin maddesi ve mikroorganizmalar nedeniyle atık stabilizasyonunun hızlandığı görñlmüřtür [3].

Bu çalışmada, birden fazla geotekstil malzemenin kullanılması veya atığın arıtma çamuruyla birlikte depolanması durumunda sızıntı suyu kalitesi araştırılmak için dört adet pilot ölçekli anaerobik biyoreaktör kullanılmıştır. Tüm reaktörler aynı özellikteki evsel katı atıklarla doldurulmuş ve geri devirli olarak işletilmıştir. R-1 ve R-2'ye arıtma çamuru eklenmiştir. Reaktörlerin tabanındaki çakıl tabakası üzerine R-2 ve R-3'te tek, R-4'te ise çift geotekstil malzeme yerleştirilmıştir. Reaktörler 540 gün boyunca anaerobik şartlar altında elektronik kontrollñ ısıtma sistemi ile 37°C'ye sabitlenerek sızıntı suyu kalitesi izlenmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda, geotekstilin üzerindeki biyokñtle de incelenmiştir.

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı, geri devirli atık biyoreaktörlerde iki geotekstil tabakası kullanılması veya atıkların arıtma çamurlarıyla birlikte depolanması durumunda geotekstil tabakalarının sızıntı suyu kalitesine etkisini pilot ölçekte araştırmaktır.

Yüksek yüzey alanına ve poroziteye sahip olması nedeniyle geotekstil malzeme, mikroorganizmaların biyokütle oluşturmaları için uygun ortama sahiplerdir. Bu çalışmada da farklı sayıda geotekstil tabakası kullanılarak hem sızıntı suyu kalitesinin yerinde iyileştirilmesi üzerindeki etkilerini araştırmak hem de atık stabilizasyon süresini hızlandırmak hedeflenmiştir.

Bu çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır ve her bölüm içeriği aşağıda verilmiştir.

- Bölüm 1: Bu bölümde giriş, tezin amacı, katkısı ve içeriğine yer verilmiştir.
- Bölüm 2: Ayrıntılı bir literatür incelemesi yapılmıştır.
- Bölüm 3: Deneysel kurulum, reaktörlerin işletimi ve deneysel prosedürler bu bölümde yer almaktadır. Ek olarak katı atık, arıtma çamuru ve aş çamurunun karakterizasyonuna yer verilmiştir.
- Bölüm 4: Çalışma boyunca yapılan tüm deneyler ve sonuçları ayrıntılı olarak paylaşılmıştır.
- Bölüm 5: Bu çalışmada varılan önemli noktalar vurgulanmış, ana sonuçlara yer verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR

### 2.1. Katı Atık Tanımı ve Sınıflandırılması

Katı atık; çevre kanununda üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı atık maddeleri şeklinde ifade edilmiştir [4].

Katı atıkların çevreye verdikleri zarar en aza indirilerek toplanıp bertaraf edilmesi için sınıflandırılmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Katı atıklar, şu şekilde sınıflandırılabilir:

- evsel katı atıklar
- endüstriyel atıklar
- tehlikeli atıklar, özel atıklar
- tıbbi atıklar
- tarımsal ve bahçe atıkları
- inşaat artığı ve moloz atıkları [5].

### 2.2. Katı Atık Karakterizasyonu

Katı atıkların bertaraf yöntemleri seçilirken, atığın karakterizasyonunu belirlemek önemli rol oynamaktadır. Katı atığın içeriğinin belirlenmesi, en doğru bertaraf yönteminin seçilmesini bunun sonucunda da hem insan sağlığının hem de çevre sağlığının olumsuz etkilerini azalmasına neden olur. 2015 yılında yapılan çalışmada İstanbul ilindeki atık karakterizasyonu Tablo 2.1'deki gibi belirlenmiştir [6].

Tablo 2.1: 2015 yılı İstanbul ili atık karakterizasyonu.

Organik madde	53%
Kağıt	13%
Plastik	17%
Cam	6%
Tekstil	4%
Metal	1%
Seramik-tuğla ve inert madde	3%
Kül	3%



## 2.3. Katı Atık Yönetimi

Artan nüfus ve değişen yaşam şartlarıyla birlikte, her geçen gün oluşan atığın miktarı ve çeşidi artmaktadır. Bu artış atığın kontrolünü ve yönetimini zorlaştırmaktadır. Katı atıklar, artan atıklar arasında çevre açısından büyük problemler oluşturabilecek potansiyele sahiptirler. Bu problemleri önlemek amacıyla katı atık yönetimine ihtiyaç duyulmuş, bu alanda çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde entegre katı atık yönetimi herkes tarafından kabul edilmiş ve izlenilmektedir. Entegre atık yönetimi, belirli atık yönetimi hedef ve amaçlarına ulaşmak için uygun teknikler, teknolojiler ve yönetim programlarının seçimi ve uygulanması olarak tanımlanabilir [7]. Entegre katı atık yönetimi aynı zamanda çevresel faydaları, ekonomik optimizasyonu ve toplumsal kabul edilebilirliği de elde etmek amacıyla atık oluşumunu, toplanmasını, arıtılmasını ve yöntemlerini birleştirir [8].

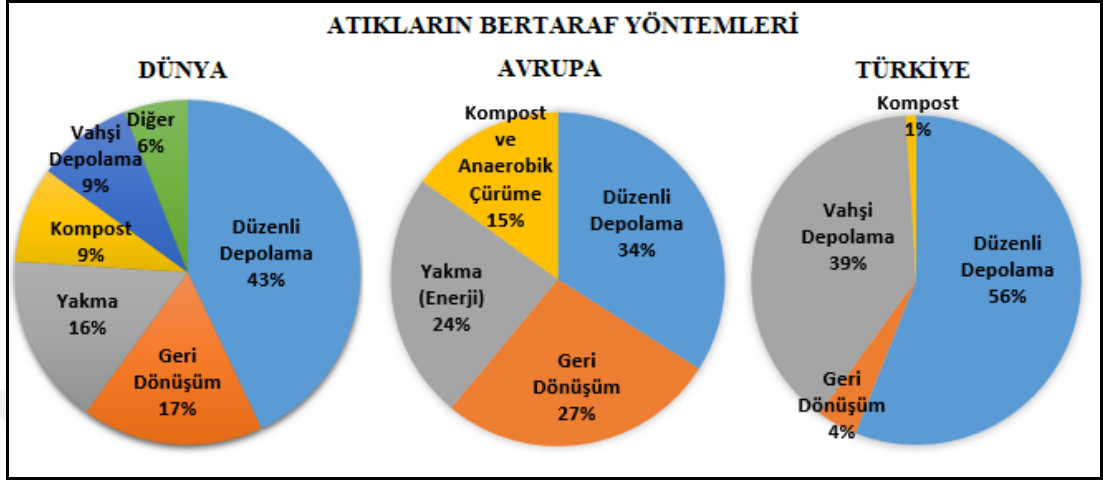
Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA), atık yönetimi hiyerarşisini, her koşulda ve her türden atığı yönetebilmek için tek bir atık yönetimi yaklaşımının uygun olmadığını gösteren bir hiyerarşi geliştirdi. Bu hiyerarşi, çeşitli yönetim stratejilerini, en çok çevresel olandan en az çevresel olana doğru sıralamaktadır. Hiyerarşi, atığı (1) kaynağında azaltma, (2) geri dönüşüm- geri kazanım (3) ve (4) bertaraf basamaklarından oluşmaktadır [9].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi mevcut durumda bertaraf ön plandayken ülkelerin gelişmesiyle birlikte gelecek planlarında atıkları kaynağında azaltma önem kazanmıştır.



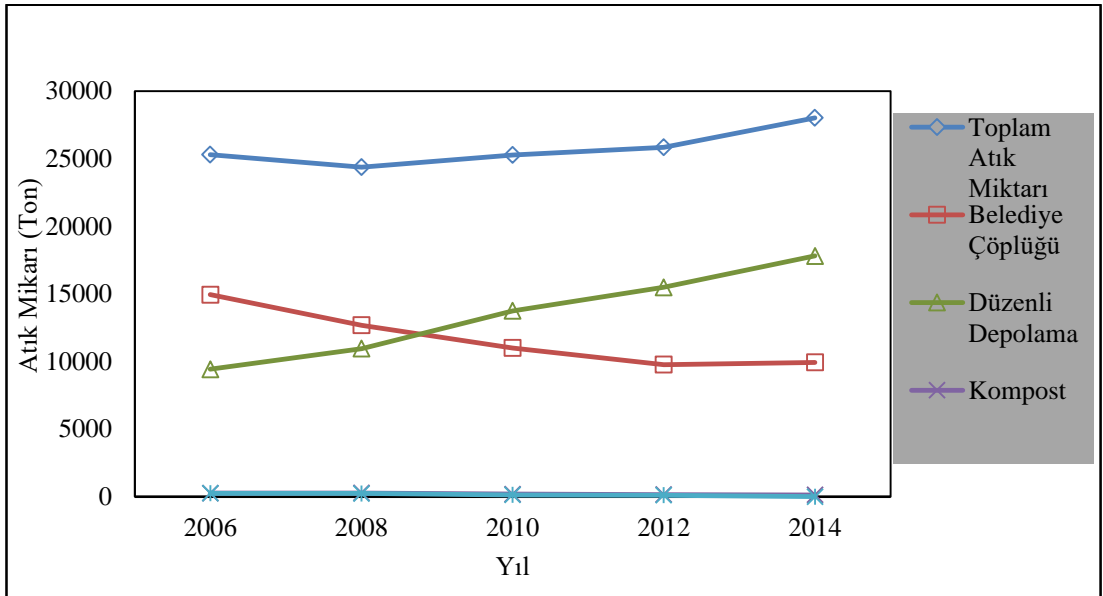
Şekil 2.1: Atık yönetimi hiyerarşisi.

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere ise günümüzde ülkemiz (Türkiye), Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında her ne kadar geri dönüşüm ve yakma tercih edilmeye başlanmış olsa da, düzenli depolama sahaları hala yüksek oranda tercih edilmektedir [10].



Şekil 2.2: Dünya’da, Avrupa’da ve Türkiye’de atık bertaraf yöntemleri.

Şekil 2.3’te Türkiye’deki toplam oluşan atık miktarı ve bertaraf yöntemleri verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi vahşi depolama sahalarını tercih azalırken düzenli depolama sahalarına geçiş artmaktadır [11].



Şekil 2.3: Türkiye’deki atık bertaraf miktarları.

### **2.3.1. Depolama Sahası**

Depolama sahaları, yeryüzündeki katı atıkların bertaraf edildiği insan sağlığı üzerinde risk oluşturmayan fiziksel özelliklere sahip tesislerdir [12]. Depolama sahalarındaki biyolojik süreç, atıklar depolandığı sürece ve saha kapatıldıktan sonra da devam etmektedir. Depolama sahalarında mikroorganizmaların çoğalması için gerekli şartlar gerçekleştiği sürece atığın parçalanması ve sızıntı suyu oluşumu devam eder. Bu süreç atığın içeriğine göre de değişiklik göstermekle beraber 30 – 40 yıl sürebilir [13].

Depolama sahaları, dünya çapında katı atık yönetimi için en yaygın kullanılan yöntemdir [14]. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde çoğunlukla, evsel katı atıklar için, diğer atık yöntemlerine kıyasla daha basit ve daha ucuz bir çözüm olduğundan daha çok tercih edilir. TÜİK'in 2016 yılında yayınladığı rapora göre, Türkiye'de 113 adet katı atık düzenli depolama tesisi bulunmaktadır [15]. Düzenli depolama tesisi yer seçimi ve tasarımı yapılırken toprağın, yüzeysel suların ve yeraltı sularının kirlenmesini önlemesi göz önünde bulundurulur ve depolama sahası kapatıldıktan sonra, üstü örtülür [16].

Depolama sahaları, atıkların insan ve çevre sağlığı için oluşabilecek riskleri azaltan ve ekonomik açıdan da karlı bir katı atık yönetimidir. Bu nedenden dolayı atık düzenli depolama sahaları geliştirilmeli ve uygulanmaya devam etmelidir.

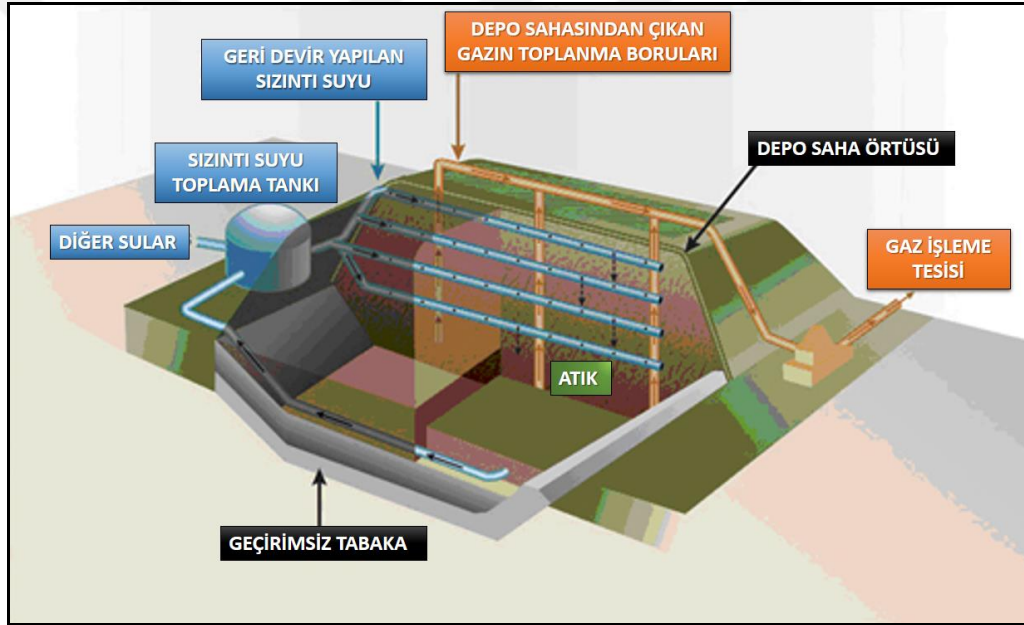
### **2.3.2. Atık Biyoreaktörü**

Konvansiyonel atık depolama sahalarında atıkların organik bileşenlerinin ayrışması uzun zaman almakta buda işletim maliyetlerini arttırmaktadır. Bu sebeple konvansiyonel depolama sahalarında birçok modifikasyon yapılmıştır. Sızıntı suyu geri devrettirilerek atığın nem muhtevasının artırılması ve depo gazı oluşumunun hızlandırılması ile oluşan sisteme atık biyoreaktörü (landfil biyoreaktör) denmektedir.

Atık biyoreaktörlerin amacı, atıkların ayrışmasını optimize ederek çevresel etkilerini azaltmaktır [17]. Sızıntı suyu geri devri sayesinde sızıntı suyu kalitesi iyileşmekte, yeraltı ve yüzeysel suların kirlenmesi önlemekte ve atıkların ayrışması hızlandırılmaktadır. Ayrıca, biyoreaktörler yerinde -in situ- olarak dizayn edilir ve atıkların ayrışmasını olumlu yönde etkiler [18].

Atık biyoreaktörlerinin verimini etkileyen faktörlerle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda bulunan faktörlere örnek olarak şunları verebiliriz; atıkların parçalanarak yüklenmesi [19], pH – alkalinite ayarı [20], ve arıtma çamuru ile depolama [21]. Diğer bir çalışmada ise, geri devir yapılan suyun hacminin ve geri devir sıklığının etkileri araştırılmıştır [22].

Atık biyoreaktörlerine başlangıçta eklenen aşı çamuru, mikrobiyal popülasyonun oluşumunu olumlu yönde etkiler [23]. Buna ek olarak, arıtma çamuru eklenen çalışmalarda da olumlu etkiler görülmüştür. Bunun sebebi arıtma çamurunun mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu azot, fosfor gibi besinleri ve nem içermesidir. Bu sayede mikroorganizmalar için uygun ortam oluşur ve atık stabilizasyonu hızlanır [3, 21]. Şekil 2.4'te bir atık biyoreaktörünün yan kesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Atık biyoreaktör tasarımı.

## 2.4. Atık Stabilizasyonu

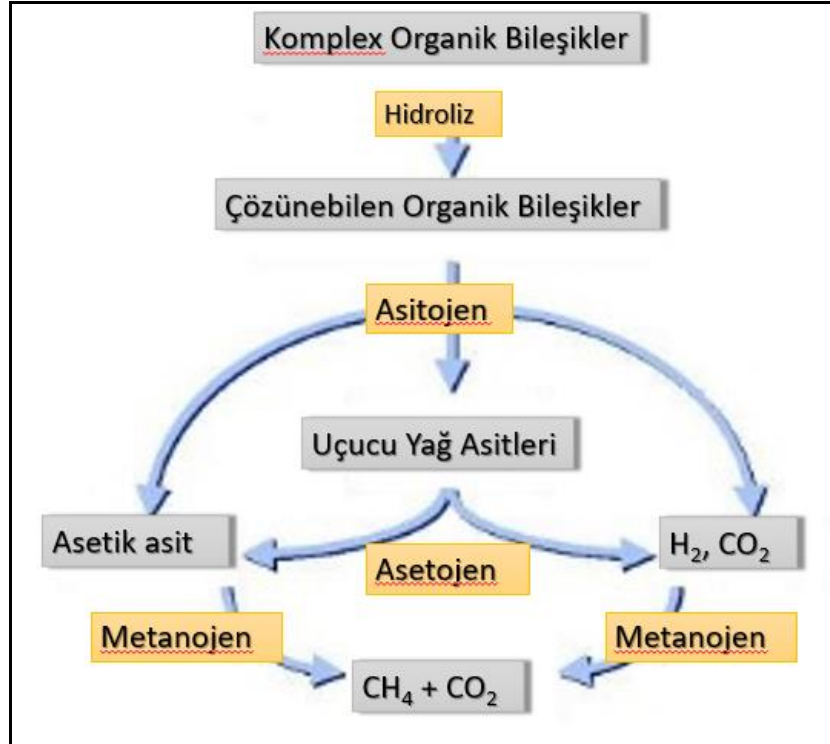
Atık stabilizasyonu, biyogaz üretim oranı ve sızıntı suyunu oluşturan bileşenlerin konsantrasyonu gibi çevresel performans ölçüm parametrelerinin sabit seviyelerde kaldığı ve herhangi bir sorun durumunda biyoreaktör sisteminin kapatılması durumunda bile sabit seviyede kalması ve artmamasıdır [24]. Atık stabilizasyonu, atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak parçalanması işlemidir.

Öncelikle ortamda bulunan serbest oksijen aerobik bakteriler tarafından kullanılarak organikler parçalanır. Ortamdaki oksijen bittikten sonra eğer yeterli miktarda da nem muhtevası varsa anaerobik işlem başlar ve parçalanabilen organiklerin tamamı metanojenler tarafından tüketilene kadar devam eder. Bu anaerobik parçalama sonucunda biyogaz ve sızıntı suyu oluşur. Atık stabilizasyonu süresince en önemli prosesler biyolojik olanlardır.

#### 2.4.1. Anaerobik Ayrışma Evreleri

Katı atıkların içerdiği organikler dört fazdan oluşan seri anaerobik prosesler sonucu metan ve karbondioksite dönüştürülür. Bu fazlar sırasıyla, hidroliz, asitojen, asetojen ve metanojendir. Anaerobik ayrışma evreleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

- Hidroliz: İlk evre olan hidroliz evresinde, kompleks yapıda olan ve çözünmeyen bileşikler enzimler aracılığıyla daha basit yapıda organik maddelere dönüştürülür. Bu reaksiyon sırasında, proteinler, lipitler ve karbonhidratlar sırasıyla amino asitlere, uzun zincirli yağ asitlerine ve şekere hidrolize edilirler [25]. Hidroliz evresinde metan üretimi yoktur.



Şekil 2.5: Anaerobik ayrışma evreleri.

- Asitojen: Hidrolizden sonra gelen bu evrede, indirgenmiş bileşikler; kısa zincirli uçucu yağ asitler (UYA'lar) ve karbondioksit, hidrojen, asetik asit gibi diğer küçük ürünlerin bir karışımına dönüştürülür [25].
- Asetojen: Üçüncü evre olan bu evrede, önceki evrede üretilen ürünler kullanılarak, asetat, hidrojen ve karbondioksit gibi substratlara dönüştürülür.
- Metanojen: Anaerobik ayrışmanın son olan bu evresinde, son ürün olan metan ve karbondioksit gazı üretilmesi için asetat ve hidrojen kullanılır. Bu evrede metan üretimi yavaş olmasından dolayı anaerobik ayrışmanın hız sınırlayıcı evresidir [26]. Metanojenlerin aktif olabildikleri sıcaklıklar termofilik mikroorganizmalar için yaklaşık 50-60 °C iken, mezofilik mikroorganizmalar için 30-40 °C arasındadır. Ayrıca metanojenler başlangıçta karbon, hidrojen, azot ve fosfor gibi besin maddelerine ihtiyaç duyarlar. Bunların yanında azda olsa demir, kükürt, kalsiyum ve diğer iz elementlere de ihtiyaç duyarlar. Evsel katı atıklar bu besinleri içerdiğinden dolayı ayrıca bir besin ilavesine gerek duyulmaz. Metanojenik bakteriler fizyolojik olarak iki ana gruba ayrılabilir [27].  
Asetat Kullanan Metanojenler: Toplam metanın %70'i asetattan oluşur. Asetik asit (CH<sub>3</sub>COOH) veya asetat (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>) tüketilerek, CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazları gibi son ürünler oluşur (Denklem 2.1).



H<sub>2</sub> Kullanan Metanojenler: Daha önceki evrelerde üretilen H<sub>2</sub> gazı kullanarak hidrojenofilik bakteriler tarafından CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub>O üretilir. CH<sub>4</sub>'ın % 25-30'luk kısmı bu reaksiyon sonucu üretilir (Denklem 2.2).



#### 2.4.2. Sızıntı Suyu Oluşumu

Depo sahasında oluşan sızıntı suyu, atığın içerisindeki nemin ve depo sahasına düşen yağmur sularının atık içerisinde süzülmesi sonucu oluşur. Anaerobik ayrışma sırasında gerçekleşen biyolojik reaksiyonlar sonucu bazı çözünmeyen maddelerde form değiştirerek çözünebilirler. Bu maddelerin sızıntı suyu içerisindeki bulunma miktarları zamanla değişiklik gösterebilir. Depo sahalarında atıklar hacimce %45-65

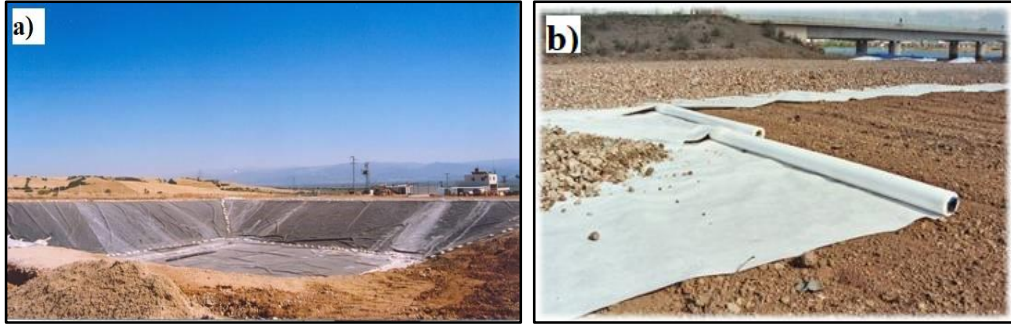
nem oranına sahip olduğunda yani doygunluk seviyesine ulaştıktan sonra fazla gelen sızıntı suyu miktar süzülür. Atık biyoreaktörlerinin işletiminde en önemli uygulamalardan biri de atık stabilizesini hızlandırmak için nem içeriğini korumaktır [23, 28]. Belediye katı atıkları, gıda, plastik, tekstil, kağıt ve diğerleri gibi birçok farklı malzemeden oluşur. Bu nedenle, sızıntı sularının karakterizasyonu çok karmaşıktır. Sızıntı suyu miktarının depolama alanına giren su miktarı ile ilişkili olduğu söylenebilir.

## **2.5. Arıtma Çamuru ile Katı Atığın Birlikte Depolanması**

Arıtma çamuru, atık su arıtma tesislerinde arıtma işlemleri sırasında oluşan katı veya yarı katı olarak oluşan yan üründür. Arıtma çamurlarının çevreye verdikleri kirlilikten dolayı arıtılmaları gerekmektedir. Arıtma çamurları azot, fosfor gibi besinlerde içermektedirler [29]. Biyolojik ayrışmanın da olduğu arıtma yöntemlerinde kullanılması olumlu sonuçlar vermiştir. Çamurun atık biyoreaktörler üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışmada hem iyi bir nem kaynağı olarak sızıntı suyu kalitesini iyileştirdiği, hem de gaz üretimini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır [30].

## **2.6. Geotekstil Malzeme**

Geotekstil günümüzde birçok farklı alanlarda kullanılan Polipropilen (PP) veya polyester (PET) malzemeden üretilmiş ince, dayanıklı ve geçirgen polimerik bir malzemedir. Depolama sahalarında geotekstil, geomembranın çakıl ve katı parçacıklardan korunması için kullanılır. Buna ek olarak, geotekstiller filtrasyon, ayırma, drenaj veya farklı uygulamalar için inşaat, geoteknik ve çevre mühendisliğinde kullanılır. Şekil 2.6'da geotekstil kullanımları gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Sahada geotekstil kullanımları: a) Depolama sahası alt örtüsü, b) Depolama sahası üst örtüsü.

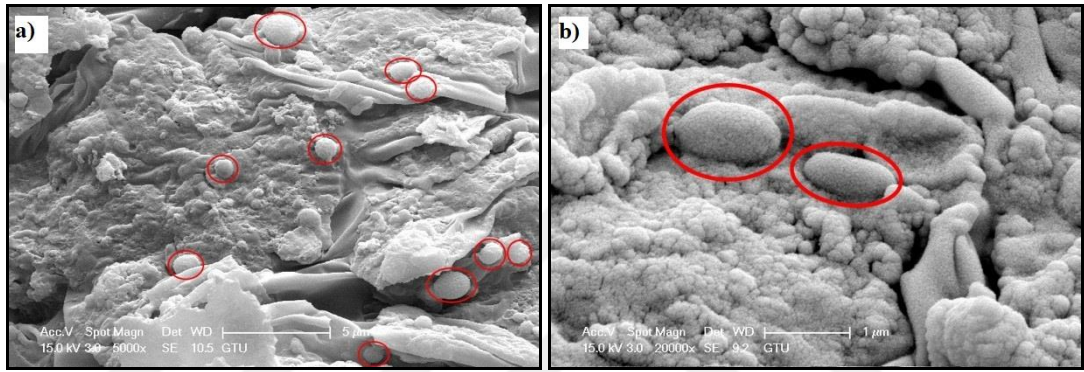
Depo sahalarında atık stabilizasyonunu arttırmak ve sızıntı suyu kalitesini iyileştirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Geotekstil tabakasının yüksek yüzey alanı ve poroziteye sahip olması kullanılarak drenaj tabakasına yerleştirilip, anaerobik mikroorganizmaların büyümesine ortam sağlanmaktadır.

Geotekstil malzemenin iç yapısındaki biyokütle oluşumu ilk defa 1990'lı yıllarda dikkat çekmiştir. Yapılan ilk çalışmada, depolama sahalarında kullanılan geotekstillerin sızıntı suyu filtrasyonu ve biyofilm oluşması sonucu tıkanması gözlenmiştir [1]. Bu çalışmada sızıntı suyu, çakıl, geotekstil ve kum tabakalarından geçirilmiştir. Süzülen sızıntı suyu geotekstil malzemede biyokütle oluşumuna ve bundan dolayı da geotekstilin tıkanmasına neden olmuştur. Buna ek olarak geotekstil gözenek boyutunun ve kalınlığının tıkanmayı etkilediği görülmüştür. Ayrıca ısı yardımı ile birleştirilmiş geotekstillerin ve fazla organik ya da hidrolik yüke sahip sızıntı sularının da tıkanmayı hızlandırdığı gözlenmiştir [1, 31].

Endüstriyel ve belediye atık sularının arıtılmasında biyofilmi bağlamak için geotekstil malzeme kullanılmıştır [32]. Yapılan bir çalışmada, ön arıtmadan geçirilmiş evsel atık su ve yağmur suyunun karışımı kullanılmış, bu karışım geotekstil tabakalarından filtre edilmiştir. Çalışma sonucunda, geotekstilin iç yapısında biyofilm oluşmasından dolayı su kalitesinde yüksek oranlarda iyileşme gözlemlenmiştir. Diğer çalışmalarda ise, atık su ve yağmur sularını arıtmak için geotekstil malzeme kullanılarak farklı yöntemler uygulanmıştır. Bir çalışmada, yağmursuyu taşkın sularını arıtmak için geotekstil bölmeli kontak sistemi (GBKS) kullanılırken, diğer çalışmada fosseptik suyunu arıtmak için geotekstil biyofiltre kullanılmıştır [33]. Ayrıca yağmur suyu arıtımında da yine geotekstil malzeme biyofiltre olarak kullanılmıştır [34]. Yine bu alanda yapılan bir çalışmada, atık suyun geotekstil biyofiltrelerinin geçirirliliğine olan etkisi araştırılmıştır [35].



250 gün süren bir çalışmada, etrafı geotekstil ile sarılmış silindirik yapı atık suya maruz bırakılmış, sonuç olarak geotekstil malzemenin içerisinde ve yüzeyinde biyofilm oluştuğu ayrıca atık sudan geotekstil yardımıyla %99 oranında karbon, %91 oranında azot ve %95 oranında fosfor giderildiği gözlemlenmiştir [36]. 210 gün süren laboratuvar ölçekli evsel katı atık yüklü anaerobik biyoreaktörün kullanıldığı başka bir çalışmada, drenaj tabakasına geotekstil malzemesi eklenmiş ve eklenen bu reaktörde kontrol reaktörüne göre sızıntı suyu kalitesinin daha hızlı iyileştiği görülmüştür. Şekil 2.7’de görülen SEM görüntülerinde biyofilmin hem yüzeyde hem de iç gözeneklerde oluştuğu görülmektedir [37].



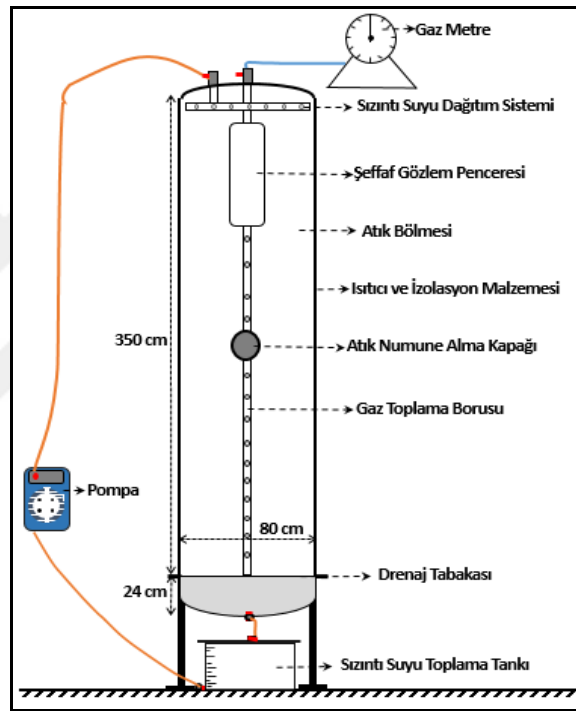
Şekil 2.7: Geotekstil üzerindeki biyofilm yapısının SEM görüntüleri:  
a) 100x büyütme, b) 500x yakın büyütme.

## 3.MATERYAL VE METHOD

### 3.1. Deneysel Kurulum

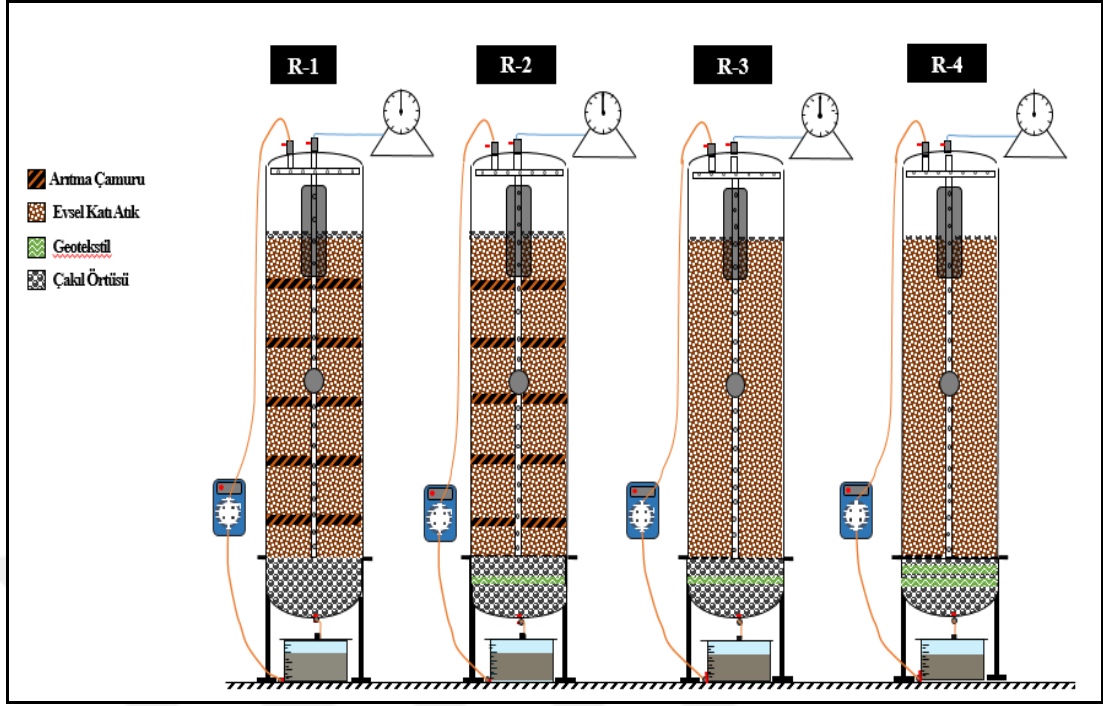
#### 3.1.1. Reaktörün Yapısı

Bu çalışmada 350 cm yüksekliğinde, 80 cm çapında silindirik paslanmaz çelik gövdeli ve izolasyonlu dört adet pilot ölçekli atık biyoreaktör kurulmuştur. Tüm reaktörler eşit özelliklerde tasarlanmıştır. Şekil 3.1’de reaktör yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1: Reaktör yapısı.

Her bir reaktörün dört ana çıkışı vardır. Bunlardan birincisi sızıntı suyu drenajı, ikincisi katı atık örnekleme, üçüncüsü gaz toplama, son olarak dördüncü çıkış ise sızıntı suyu geri devri amaçlı kullanılmıştır. Atıkların yerleştirilmesini izlemek için 5.5 cm genişliğinde ve 42.0 cm yüksekliğinde reaktörün duvarı üzerinde şeffaf bir pencere bulunmaktadır. Reaktör sıcaklığı, mezofilik sıcaklık aralığında kalacak şekilde elektronik kontrollü otomatik ısıtma sistemi ile sürekli olarak takip edilmeye uygun şekilde tasarlanmış ve 37°C’de sabit tutulmuştur. Reaktörlerin şematik görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Atık biyoreaktörlerin şematik görünümü.

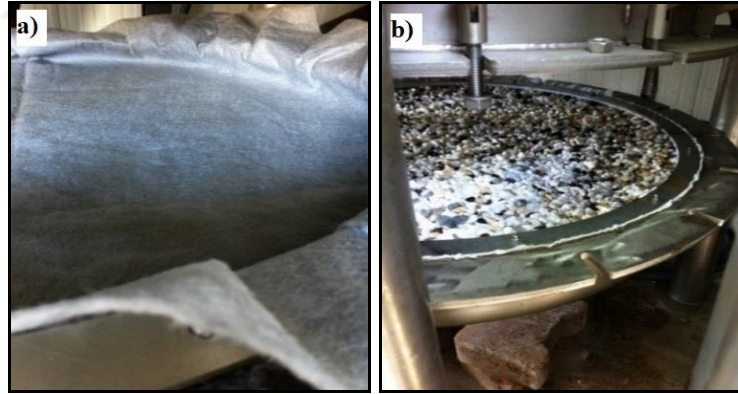
### 3.1.2. Sızıntı Suyu Drenaj Yapısı

Reaktörlerin atık gövdesinde oluşan sızıntı suyu, özel olarak tasarlanmış bir drenaj tabakasından geçtikten sonra sızıntı suyu tanklarında toplanarak, buradan tekrar reaktörün içerisine geri devir yapılmıştır. Tüm reaktörlerde drenaj malzemesi olarak 10 mm dane çaplı doğal çakıllar iyice yıkandıktan sonra kullanılmıştır. Her bir reaktör için yaklaşık 150 kg çakıl kullanılmıştır. Drenaj tabakasının toplam derinliği 24 cm'dir. Ayrıca R-2 ve R-3'te kullanılan geotekstil (GT-3) çakıl malzemenin arasına serilerek hazne çeperlerinden sabitlenmiş ve Şekil 3.3'te gösterilmiştir. İki farklı geotekstilin (GT-1 ve GT-2) kullanıldığı R-4'te ise geotekstiller dikey olarak eşit uzaklıklarda serilerek yine çakıllar ile sandviç haline getirilmiştir. Böylelikle atık gövdesinden süzülen sızıntı sularının tamamı geotekstilin gözenekleri arasından geçiş yaparak sızıntı suyu tankına aktarılmaktadır. Tablo 3.1'de geotekstillerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Kullanılan geotekstillerin özellikleri.

Tip	GT-1	GT-2	GT-3
Marka	TenCate	İstanbul Teknik	İstanbul Teknik
Model	TS 50	İzoteknik 2000	Geoteknik 2000
Kalınlık (mm)	1,91	1,40	1,90
Göz Açıklığı ( $\mu\text{m}$ )	112,38	84,00	110,00
Geçirgenlik ( $\text{L/s.m}^2$ )	113,11	60,00	95,00
Malzeme	Polipropilen	PET	Polipropilen
Üretim tekniği	İğneleme - Baskı	İğneleme - Isıl işlem	İğneleme - Isıl işlem

Reaktörlerde kullanılan geotekstil malzeme seçilirken, R-4 için göz açıklığı ve geçirgenliğine bakılmış, yüksek geçirgenliğe ve göz açıklığına sahip olan GT-1 üst tabaka olarak daha az geçirgenliğe ve göz açıklığına sahip GT-2 alt tabaka olarak kullanılmıştır. R-2 ve R-3 için ise, ortalama göz açıklığı ve geçirgenliğe sahip GT-3 tercih edilmiştir.



Şekil 3.3: Reaktörlerin drenaj yapısı: a) Geotekstil malzeme, b) Çakıl drenaj tabakası.

### 3.1.3. Sızıntı Suyu Toplama, Geri devir ve Dağıtım Yapısı

Oluşan sızıntı suları, drenaj tabakalarından geçerek, drenaj bölmelerinin tabanındaki gözenekli yarım ay şeklindeki giderlerden toplanıp sızıntı suyu tanklarına aktarılmıştır. Sızıntı suyu tankları Şekil 3.4'te görülen PVC'den yapılmış olup 50 litre kapasitesindedir. Tamamen kapalı devre çalışan bu sistemde bulunan sızıntı suyu

tankları, yarı şeffaf olma özelliğiyle de periyodik olarak oluşan miktarın gözlenmesini sağlamaktadır. Oluşan sızıntı sularının tamamı günlük olarak, solenoid dozaj pompaları yardımı ile geri devir yapılmıştır. Pompalar otomasyon sistemi ile her gün aynı saatte çalışmış ve tanktaki sular bittiğinde şamandıra sayesinde yine otomatik olarak durmuştur.

Geri devir yapılan sızıntı suları, reaktörlerin üst kapaklarının hemen altına yerleştirilen fiskiyeler sayesinde püskürtülmüş ayrıca atık gövdelerinin üstü 2 cm kalınlığında 10 mm çaplı çakıl örtülerle kaplanmış böylece sızıntı sularının atık gövdelerine homojen olarak dağılması sağlanmıştır.



Şekil 3.4: Sızıntı suyu toplama tankı.

## 3.2. İşletme

Tablo 3.2’de reaktörlerin doldurulduğu evsel atık, arıtma çamuru ve aşı çamuru miktarları ile çalışma ve işletme özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2: Reaktörlerin işletim özellikleri.

Parametre	Birim	R-1	R-2	R-3	R-4
Atık Kütlesi	kg	900	900	900	900
Atık Hacmi	m <sup>3</sup>	1,2	1,2	1,2	1,2
Atık Yoğunluğu	kg/ m <sup>3</sup>	750	750	750	750
Arıtma Çamuru	kg	50	50	yok	yok
Aşı Çamuru Hacmi	L	30	30	30	30
Aşı Çamuru Oranı	% (V:V)	2,65	2,65	2,65	2,65
Geri Devir Periyodu	kere/hafta	7	7	7	7
Geotekstil Tabakası	-	yok	GT-3	GT-3	GT-1+GT-2

### 3.2.1. İşletimin Başlatılması

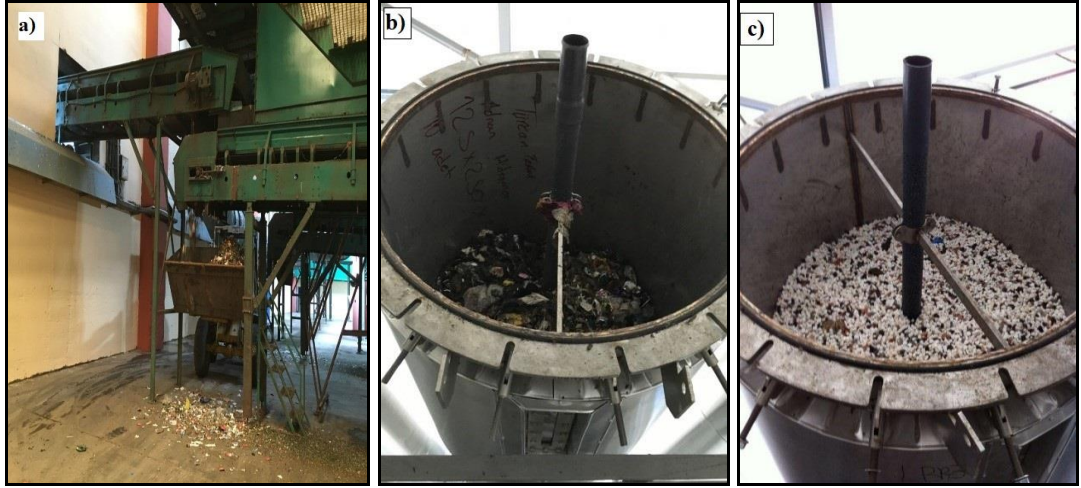
Reaktörlerin içindeki sıcaklık, mezofilik şartları sağlaması amacıyla elektronik kontrollü otomatik ısıtma sistemi ile sürekli izlenmekte olup, 37°C 'de sabit tutulmuştur. Kurulan otomasyon sistemi sayesinde hem sıcaklık anlık olarak takip edilmiş hem de sızıntı suyu geri devri periyodik olarak gerçekleştirilmiştir. Sistem tamamen kapalı devre olarak çalıştırılarak anaerobik koşullar sağlanmıştır.

### 3.2.2. Reaktörlere Atık Yükleme

Kullanılan katı atıklar, İSTAÇ Kemerburgaz Kompost ve Geri Kazanım Tesisi'nin giriş hattında bulunan 8 cm elek çaplı döner elek çıkışından alınmıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi dört reaktörün her biri 900 kg evsel katı atık ile doldurulmuş, 750 kg /m<sup>3</sup> atık yoğunluğuna karşılık geldiği hesaplanmıştır. Toplam atık hacmi 1.2 m<sup>3</sup>'tür.

R1 ve R2'nin her birine atıklar yüklenirken, 50 kg, İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (İSU) Gebze İleri Biyolojik Atık su Arıtma Tesisi'nden alınan susuzlaştırılmış arıtma çamuru karıştırılarak eklenmiştir. Atıklar yüklendikten sonra tüm reaktörlerin her birinin üzerine 30 litre, Pakmaya İzmit – Köseköy Fabrikası'ndan alınan anaerobik aşı çamuru eklenmiştir. Aşı çamuru sıvı fazda olduğundan atık gövdesinden geçerek süzölmüştür. Son olarak, katı atık gövdelerinin en üstüne geri devir edilecek suların atık gövdesine eşit dağılımını sağlamak amacıyla, 1-2 cm kalınlığında çakıl serilerek, biyoreaktörler işletmeye hazır hale getirilmiştir.





Şekil 3.5: Çalışmada kullanılan atıkların doldurulması: a) Kullanılan atıklar, b) Reaktörlere doldurulan atıklar, c) Atık üzerindeki çakıllar.

### 3.2.3. İşletim Prosedürü

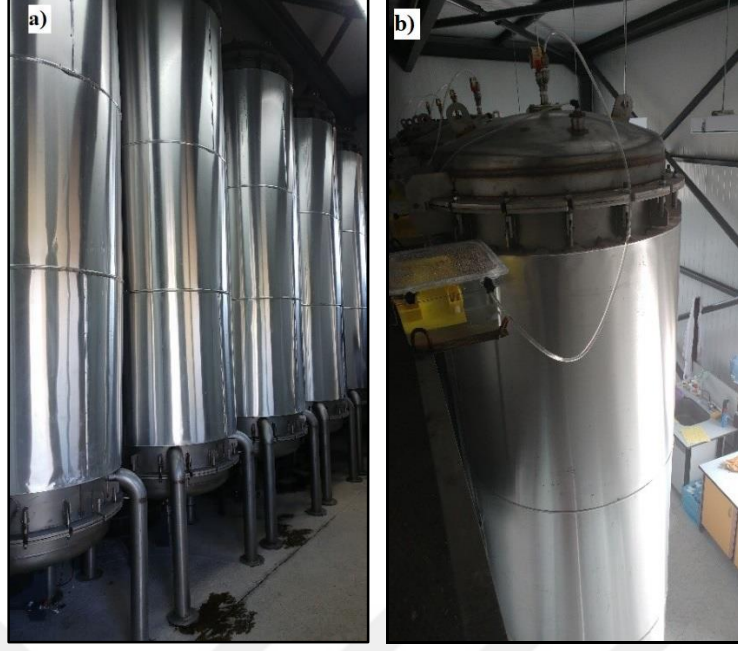
Reaktörlere gereken yağış miktarını belirlemek için, Kocaeli ilinin yıllık yağış miktarı dikkate alınmıştır. (Denklem 3.1). Kocaeli'nin yıllık yağış ortalaması 814.7 mm'dir (1 mm yağış = 1 kg yağış / m<sup>2</sup>) [38]. Daha önce belirtildiği gibi, reaktörlerin çapı 80 cm ve reaktörlerin yüzey alanı 0,5 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{814.70 \text{ mm/}y\text{il}}{52 \text{ hafta/}y\text{il}} = 15.67 \text{ mm/hafta} = 15.67 \text{ kg/m}^2.\text{hafta}$$

$$15.67 \text{ L/m}^2.\text{hafta} \times 0.50 \text{ m}^2 = 8 \text{ L/hafta} \quad (1.1)$$

Tüm reaktörlere başlangıçta 8 L yağmur suyu eklenerek işleme alınmış sonrasında hiçbir reaktöre su eklenmemiştir. İşleme alındıktan sonra oluşan sızıntı sularının hacimleri günlük olarak takip edilmiştir ve geri devir yapılmıştır. Ayrıca anaerobik mikrobiyal bakteriler için atık gövdelerindeki mezofilik koşulların önemli olmasından dolayı sıcaklık değişimleri anlık olarak izlenmiştir.

Şekil 3.6'da bu çalışmada kullanılan pilot ölçekli katı atık biyoreaktörleri görülmektedir.



Şekil 3.6: Pilot ölçekli atık biyoreaktörleri  
a) Tüm reaktörlerin görünüşü, b) Reaktörlerin üst kapakları.

### 3.3. Analizler

#### 3.3.1. Katı Atık Analizleri

Depo sahalarında, katı atık kompozisyonu sızıntı suyu kalitesini ve atık stabilizasyon hızını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Katı atıklar heterojen bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle katı atığın kompozisyonu her bileşen için ayrı ayrı belirlenmiştir. Her bir reaktöre yüklenen atık kompozisyonları yüzde olarak hesaplanmıştır.

Katı atık örneğinde; pH, iletkenlik, su muhtevası, uçucu katı madde (UKM), toplam karbon (TK), toplam organik karbon (TOK), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP), toplam kjeldahl azotu (TKN), amonyum azotu (NH<sub>4</sub>-N), yağ ve gres analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca reaktör içi atık gövdesi sıcaklıkları 'PT100 thermocouple' ile anlık olarak izlenmiştir. Nem içeriği, toplam katı madde, uçucu katı madde ve sabit katı madde analizleri Standard Methods (APHA 1998) kitabına göre belirlenmiş yöntemlerle gerçekleştirilmiştir [39]. Diğer katı atık analizleri ise 'Türk Standartları Enstitüsü (TSE)'nin ilgili yöntemlerince gerçekleştirilmiştir.



### 3.3.2. Aşı Çamuru Analizleri

Aşı çamuru atık gövdesine enjekte edilmeden önce; pH, iletkenlik, oksidasyon indirgeme 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 [39].

### 3.3.3. Arıtma Çamuru Analizleri

Susuzlaştırılmış atık aktif çamur örneğinde; su muhtevası, toplam katı madde, uçucu katı madde ve sabit katı madde analizleri Standard Methods yöntemlerine göre gerçekleştirilmiştir [39].

### 3.3.4. Sızıntı Suyu Analizleri

Sızıntı suyu miktarları, sızıntı suyu tanklarının şeffaf gövdesi üzerinde bulunan hacimsel ölçekler sayesinde takip edilmiştir. Sızıntı suyu örneklerinde periyodik olarak; sıcaklık, pH, oksijen indirgeme potansiyeli (ORP), iletkenlik, toplam çözünmüş katı (TÇK), toplam alkalinite, klorür, sülfat, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik karbon (TOK), toplam fosfor (TP), Nitrat, amonyak azotu, toplam kjeldahl azotu (TKN), uçucu yağ asitleri (UYA), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ); ve elementel analizlerden K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu, Ni, Ba, Co, Pb, Ag, Cd, As, Se, Hg parametrelerine bakılmıştır.

pH, iletkenlik, TDS ve sıcaklık ölçümleri, uygun probalar ile taşınabilir multiparametre cihazı (Mettler Toledo Seven Go Duo Pro) kullanılarak belirlenmiştir. KOİ, alkalinite, TKN, amonyak azotu, toplam fosfor, klorür analizleri sırasıyla standart method 5220 C., 2320 B., 4500-Norg, 4500NH<sub>3</sub>, 4500-P, 4500-Cl'e göre yapılmıştır. BOD<sub>5</sub>, WTW OxiTop® yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TOK analizleri Shimadzu TOC-L enstrümanında, iyon analizlerinden nitrat ve sülfat ölçümleri iyon kromatografi sisteminde (Shimadzu IC-SA2), elementel analizler Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES optima 7000DV) cihazı ile ve uçucu yağ asitleri ölçümleri ise FID detektörlü ve Zebran ZB-Wax capillary kolonu (30 m × 250 µm × 0,50 µm) ile teçhizatlandırılmış taşıyıcı gaz

olarak He kullanılan Agilent Gaz Kromatografi sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Diğer tüm sızıntı suyu analizleri Standard Methods (APHA 1998) yöntemlerine göre gerçekleştirilmiştir. Analizlerin listesi Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Sızıntı suyu analizleri parametreleri, yöntemleri ve ölçüm sıklığı.

<b>Sızıntı Suyu Analizleri</b>		
<b>Parametre</b>	<b>Analiz Yöntemi</b>	<b>Ölçüm Sıklığı</b>
Sıcaklık	Mettler Toledo Seven Go Duo Pro	Haftalık
pH	Mettler Toledo Seven Go Duo Pro	Haftalık
Oksidasyon-Redüksiyon Potansiyeli	Mettler Toledo Seven Go Duo Pro	Haftalık
İletkenlik	Mettler Toledo Seven Go Duo Pro	Haftalık
Toplam Çözünmüş Katı	Mettler Toledo Seven Go Duo Pro	Haftalık
Toplam Alkalinite	APHA (1998) 2320 B.	15 günlük
Klorür	APHA (1998) 4500-Cl	Aylık
Sülfat	Shimadzu IC-SA2	Aylık
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	APHA (1998) 5220 C.	Haftalık
Toplam Organik Karbon (TOK)	Shimadzu TOC-L	Aylık
Toplam Fosfor (TP)	APHA (1998) 4500-P	Aylık
Nitrat	Shimadzu IC-SA2	Aylık
Amonyak Azotu	APHA (1998) 4500NH3	15 günlük
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	APHA (1998) 4500-Norg	15 günlük
Uçucu Yağ Asitleri (UYA)	GC -FID	Aylık
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)	WTW OxiTop®	15 günlük
Elemental Analizler	ICP-OES optima 7000DV	Aylık

### 3.3.5. Geotekstil üzerinde Biyokütle Oluşumu

540 günlük işletim sonrasında reaktörlerin içinden her bir geotekstil çıkarılmış ve bir gece boyunca kuruması için bekletilmiştir. SEM görüntüleri almak için her bir geotekstilden yaklaşık 1 cm<sup>2</sup> alanında örnekler alınmıştır. Geotekstil örnekleri önce altın kaplanmıştır. Daha sonra tüm geotekstil örneklerinden Philips XL30S-FEG cihazı ile üzerinde oluşan biyokütle oluşumunu gözlemlemek için görüntü alınmıştır.

### 3.4. Katı Atık Karakterizasyonu

Katı atık özellikleri sistemin verimini büyük ölçüde etkiler. Bu yüzden sonuçları uygun şekilde değerlendirmek için karakterizasyon bilinmelidir. Bu çalışmada kullanılan belediye katı atıklarının karakterizasyonu Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Atık karakterizasyonu.

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 içeriği, toplam katılar gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Sonuçlara göre, evsel katı atıkların nemli olduğunu ve yüksek organik içeriğe sahip olduğunu göstermiştir. Karbon, azot ve fosfor içerikleri ve bunların alt formları, biyolojik ayrışma için önemli parametrelerdir.

Tablo 3.5: 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)	%	38,9
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

Tablo 3.5: Devam.

Amonyum Azotu (NH <sub>4</sub> -N)	mg/kg	790
Yağ ve Gres	mg/kg	57803

### 3.5. Aşı Çamuru Karakterizasyonu

Reaktörler işleme alınmadan önce atık bünyelerindeki mikrobiyal popülasyonun oluşmasında büyük önem taşımamasından dolayı aşı çamuru eklenmiştir. Eklenen aşı çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6: Aşı çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Parametre	Birim	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 İndirgeme Potansiyeli (ORP)	mV	-393,6
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	1854
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	mg/L	415,1
Amonyak Azotu (NH <sub>3</sub> -N)	mg/L	222,9

### 3.6. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Arıtma çamuru yüksek oranda nem, besin maddesi ve mikroorganizma içermektedir. Tablo 3.7’de katı atıklar ile beraber depolanan arıtma çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.7: Arıtma çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

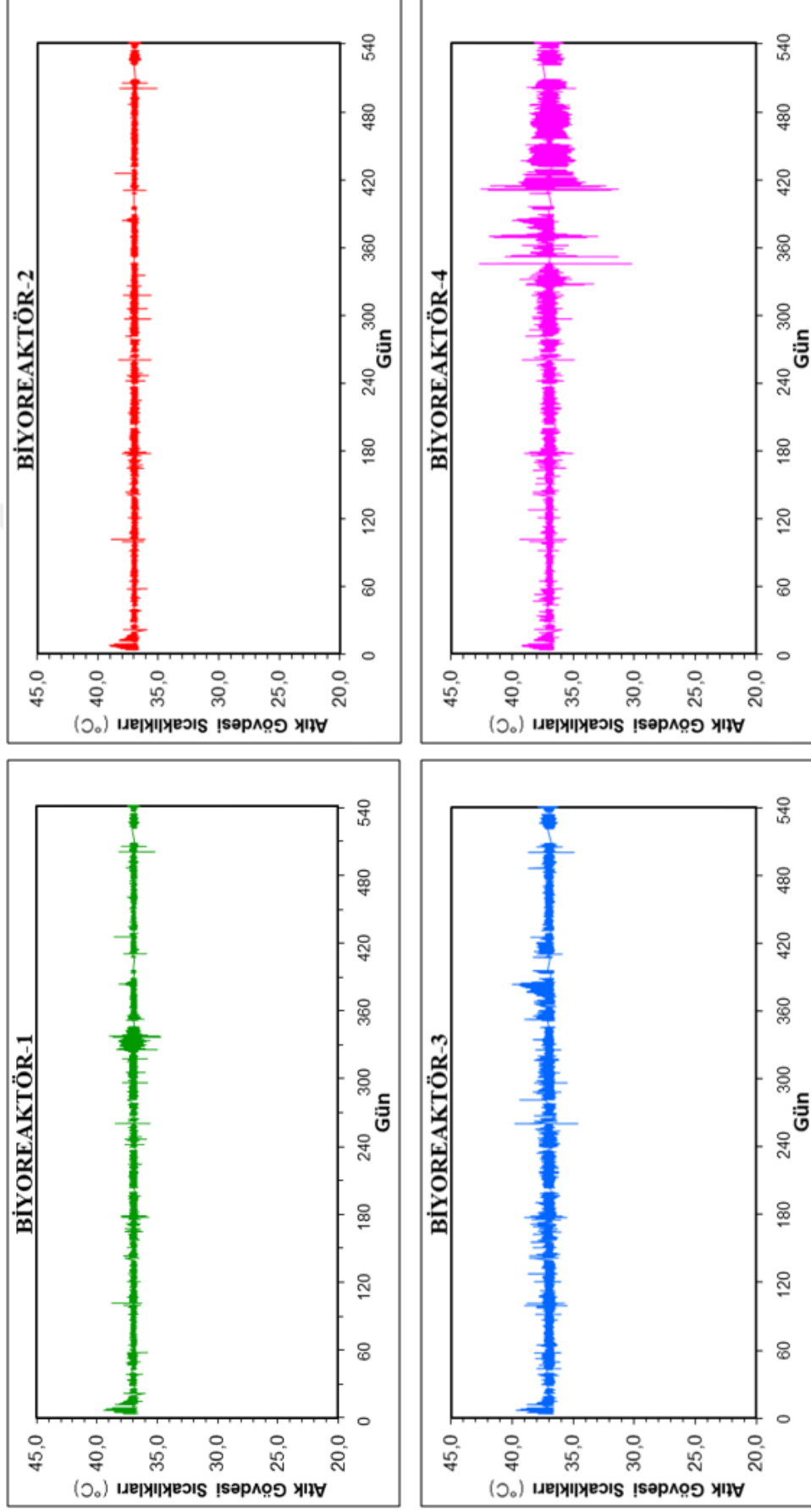
Parametre	Birim	Değer
Su muhtevası	%	76
Toplam Katı Madde (TKM)	%	24
Uçucu Katı Madde (UKM)	%	69
Sabit Katı Madde (SKM)	%	31

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Pilot ölçekli yapılan bu çalışmada dört adet anaerobik biyoreaktör kullanılarak 540 gün boyunca bir veya birden fazla geotekstil tabakası ve arıtma çamuru kullanılmasının sızıntı suyuna etkileri izlenmiştir. Bu sebeple, sıcaklık verileri, sızıntı suyu miktarları ve kaliteleri analizlerinden elde edilen sonuçlar ve geotekstil üzerindeki biyokütle oluşumları ayrıntılı tartışmalarla birlikte bu bölümde verilecektir.

### 4.1. Sıcaklık

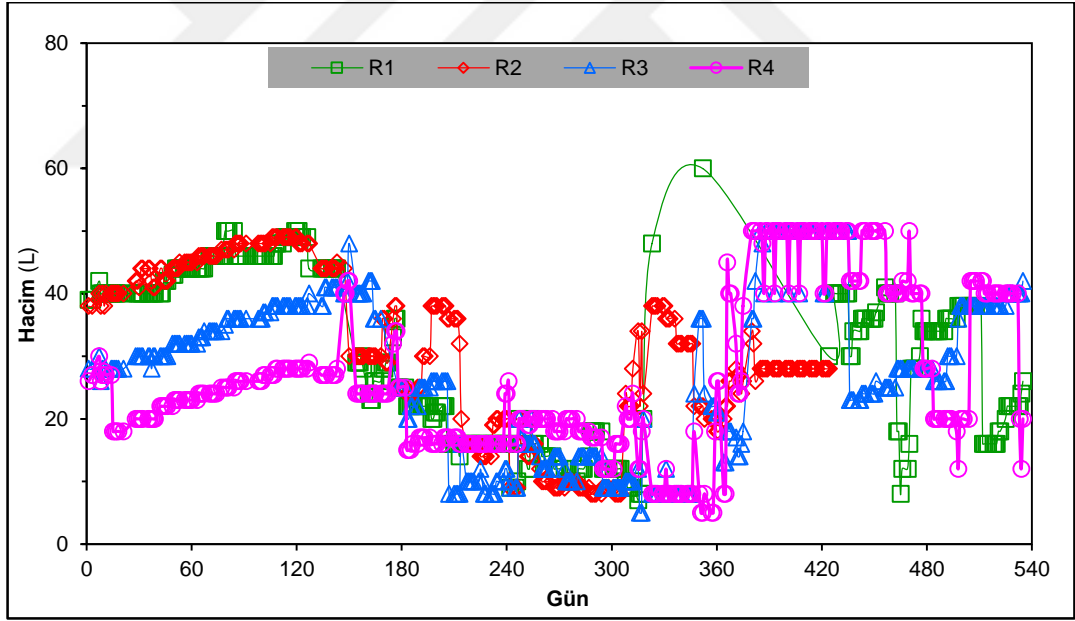
Reaktörlerin içlerindeki atık sıcaklıkları, atık gövdesinin ortasında yer alan PT100 model termometre (thermocouple) ile anlık olarak ölçülmüş ve otomasyon sistemiyle takip edilmiştir. Reaktör içi sıcaklık 37°C'ye sabitlenmiştir. Şekil 4.1'de dört reaktöründe sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.1: R-1, R-2, R-3 ve R-4'ün atık gövdesi sıcaklıkları.

## 4.2. Oluşan Sızıntı Suyu ve Geri Devredilen Miktarlar

Reaktörler işleme alınırken her birine yağmur suyunu temsilen 8 L musluk suyu eklenmiştir. Tüm reaktörlere 30 L aş çamuru ilavesi yapılmıştır. R-1 ve R-2'ye 50 L arıtma çamuru eklendikten sonra tüm reaktörlerin kapakları kapatılmış ve tekrar hiçbir reaktöre su ilavesi yapılmamıştır. R-1 ve R-2'ye eklenen arıtma çamurundan dolayı başlangıçta sızıntı suyu oluşumu daha fazladır. Oluşan sızıntı suyu miktarları tanklarda toplanmış ve tankların üzerinden günlük olarak ölçülerek takip edilmiştir. Aynı reaktörler kullanılarak yapılan diğer çalışmada reaktörlerde oluşan sızıntı suları ile metan fazı arasındaki ilişki, reaktörlerin metanojenik safhaya ulaştığında bir yandan metan gazı üretilirken diğer yandan atık bünyesi su salmaya başladığı şeklinde açıklanmıştır [40]. Reaktörlerde metanojenik safhaya geçmesiyle birlikte yaklaşık olarak 300. günden itibaren oluşan sızıntı suları miktarlarında da artış görülmüştür. Oluşan sızıntı suyu miktarları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için oluşan sızıntı suyu miktarları.

Reaktörlerde oluşan sızıntı suları 50 L hacmindeki sızıntı suyu toplama tanklarında toplandıktan sonra, solenoid dozaj pompaları yardımıyla her gün reaktörlere geri devrettirilmiştir. Reaktörlere günlük olarak geri devredilen sızıntı suyu miktarları eğer yaklaşık olarak aynı oranda süzülüyorsa atık neme doymuş olduğu düşünülerek, nem değerleri optimum değerde tutulmuştur. Geri devir pompalarındaki

arızalardan dolayı belirli dönemlerde işletimde bazı problemler yaşanmış buda su kayıplarına neden olmuş, grafiğe ani iniş – çıkışlar olarak yansımıştır. Ayrıca sistem tamamen kapalı devre olarak çalıştırıldığından buharlaşmanın sızıntı suyu kalitesine etki edecek kadar olmadığı düşünülmüş ve ihmal edilmiştir.

### **4.3. Sızıntı Suyu Kalitesi**

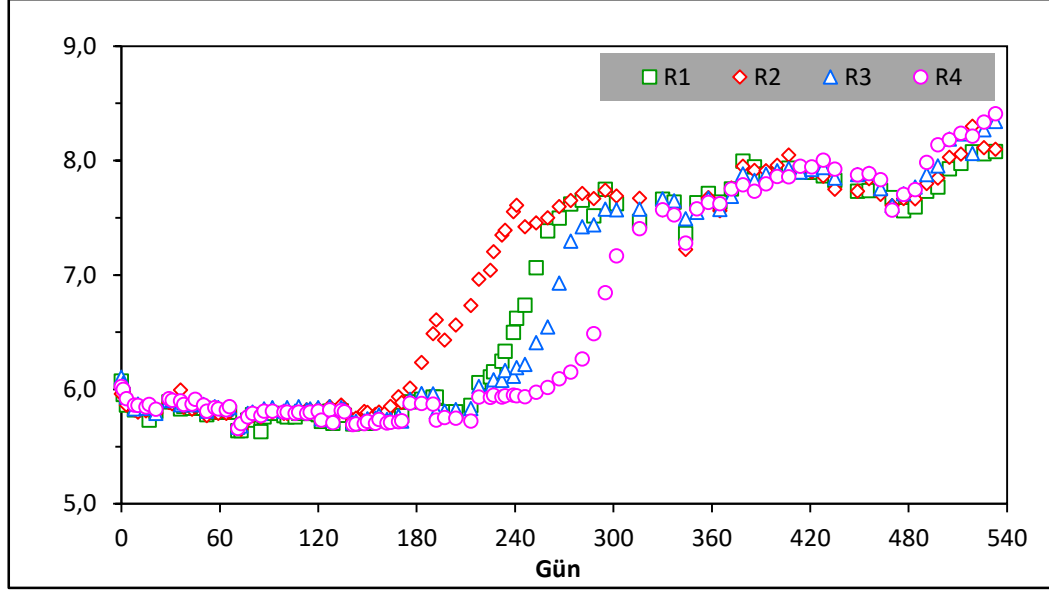
#### **4.3.1. pH**

Sızıntı suyunun pH değerleri prob kullanılarak haftalık periyodik olarak takip edilmiştir.

Sızıntı suyunun pH'ı sistemin alkalinitesi ve uçucu yağ asidi ile doğrudan ilgilidir [41]. Oluşan CO<sub>2</sub> ve uçucu yağ asidi (UYA) birikimi pH'm düşmesine, alkalinitenin ise artmasına neden olur. Metanojenler için ortalama pH değeri 6.5 – 8.2 olarak kabul edilmektedir [42].

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, 4 reaktöründe pH değerleri 6.5 civarında başlamış, sonra herbir reaktörün pH değeri 5.7'ye kadar düşmüştür. Bunun nedeni, organik atıkların hidrolize olmasından dolayı küçük moleküllü organik bileşikler, asit bakterileri tarafından uçucu yağ asitlerine dönüştürülmesidir. İlk olarak 6 aydan sonra R-2 (GT+çamur) pH değeri nötr seviyeye ulaşmıştır. R-2'yi sırasıyla R-1 (çamur), R-3 (GT), R-4 (GT+GT) takip etmiştir. pH'daki bu artış uçucu organik asitlerin, mikrobik topluluklar veya alkalinite tarafından tüketilmesi veya tamponlanması ile ilgilidir. R-2'deki pH artışının önce olmasının nedenleri olarak çamur eklenmesi ve geotekstil katmanın biyofiltre olarak kullanımının stabilizasyon safhalarını hızlandırdığı düşünülmektedir.





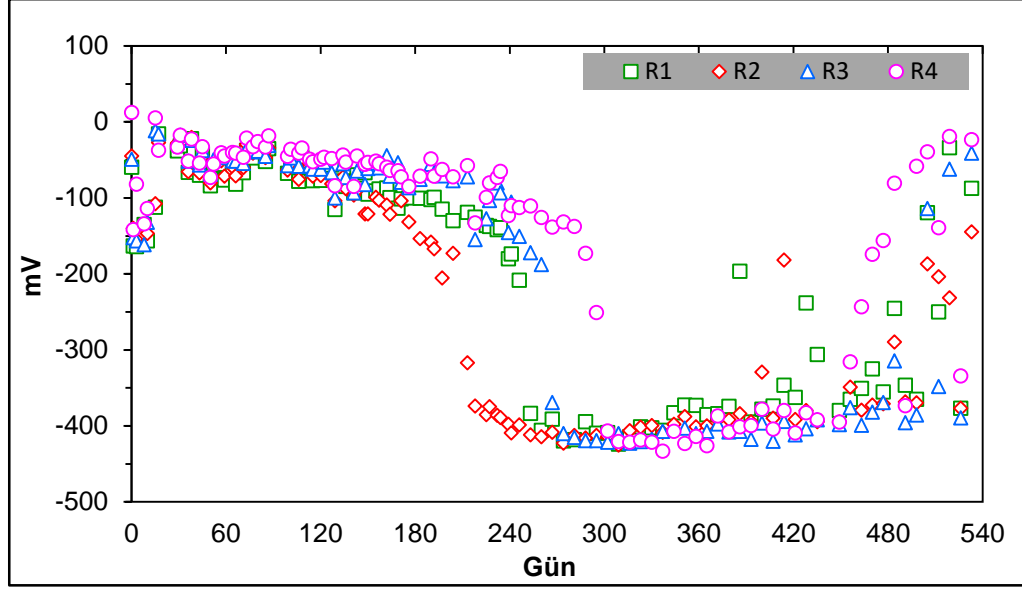
Şekil 4.3: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen pH değerleri.

Sızıntı suyunun pH değeri nötr seviyelere ulaştığı zaman metanojenler için uygun ortam oluşmuştur. R-1, R-2, R-3 ve R-4'ün sırasıyla en yüksek pH değerleri 7.995, 8.047, 7.929 ve 8.002'dir.

#### 4.3.2. Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli (ORP)

Oksidasyon redüksiyon potansiyeli (ORP), anaerobik sistemler için çok önemli bir parametredir ve sistemin anaerobik durumda olup olmadığını anlamanın en kolay yoludur. Oksidasyon indirgeme potansiyelinin pozitif değerlerden negatif değerlere düşmesi metanojenik fazın başlaması olarak kabul edilse de, metanojenler için uygun koşullar  $-330$  mV'un altı kabul edilir [43]. Negatif ORP değerleri, anaerobik koşulların varlığına işaret ederken, pozitif ORP değerleri, aerobik koşulları belirtir. ORP değerlerinin  $0$  mV değerinin üstünde olması, sisteme hava kaçağının olduğunu dolayısıyla metanojenik aktivitelerin gerçekleşmesinin mümkün olmadığını gösterir.

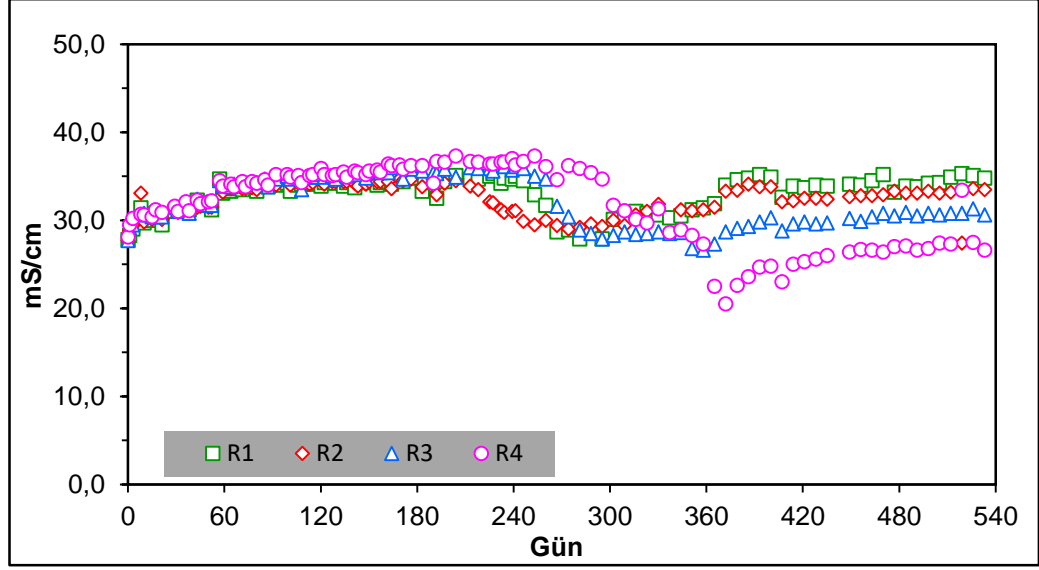
Reaktörlere başlangıçta eklenen anaerobik aşı çamuru ORP'nin de başlangıçta negatif değerlerde olmasına neden olmuştur. Ancak 21. günde tüm reaktörlerde ORP en yüksek değerlere ulaşmıştır. Reaktörlerde bulunan mevcut oksijenin tüketilmesi sonucu ORP değerlerinin 4 reaktörde de farklı zamanlarda düşüşü gözlenmiştir. R-1, R-2, R-3 ve R-4 sırasıyla 246, 213, 267 ve 302. günde  $-300$  mV değerine düşmüştür. Buda reaktörlerde anaerobik koşulların sağlandığını ve reaktörlerin artık metanojenik faza geçtiğini göstermiştir. Şekil 4.4'te ORP'nin zamana bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.4: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen ORP değerleri.

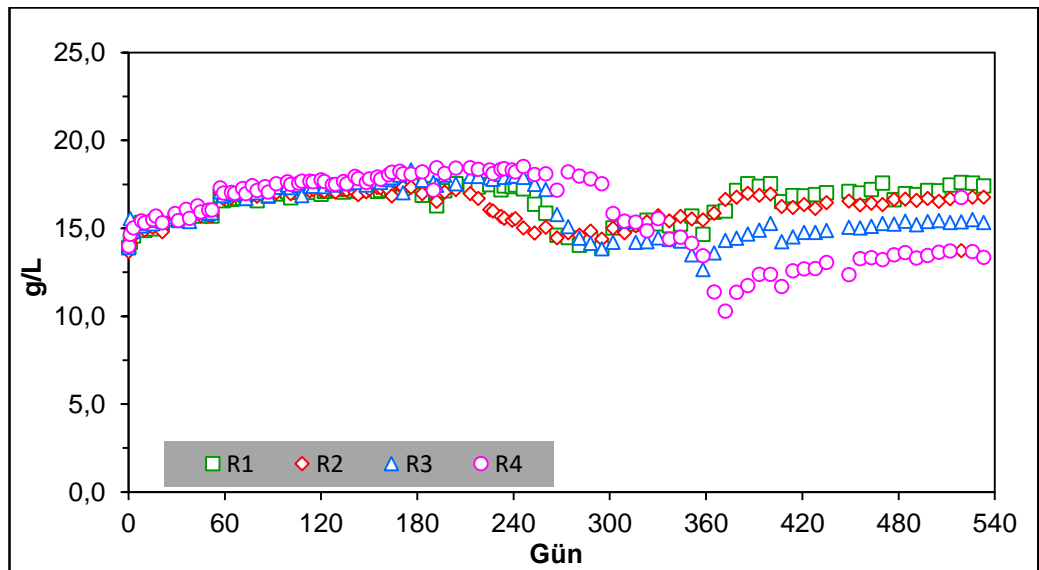
### 4.3.3. İletkenlik ve Toplam Çözünmüş Katı Madde

İletkenlik, bir çözeltildeki elektrik iletkenliğini ve iyonik çözünen maddelerin toplam konsantrasyonunu gösterir. Literatürde iletkenlik 2.5-35 mS/cm aralığında değişmektedir [44]. Sızıntı suyu asidik fazdan metan fazına geçerken iletkenliğin ve TÇK miktarlarının bir miktar azalması beklenmektedir. Bu çalışmadaki iletkenlik değerlerinin gösterildiği Şekil 4.5'teki grafikten de anlaşılacağı üzere 240. günden itibaren düşüş görülmüştür. R-3 ve R-4'te geotekstil kullanılması iletkenliğin düşüşünü arttırmıştır. Bu çalışmada iletkenlik aralığı 16.20 - 37.30 mS/cm arasındadır ve literatürdeki değerlerle de uyumludur.



Şekil 4.5: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen iletkenlik değerleri.

Toplam çözünmüş katı madde (TÇK), stabilizasyon sırasında gerçekleşen mineralizasyonun bir göstergesidir ve doğrudan elektriksel iletkenlik ile ilişkilidir. TÇK, bir su örneğindeki çözülmüş bileşenlerin toplam konsantrasyonunu yansıtan tüm iyonları ( $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{+}$ ,  $Ca^{+}$ ,  $Na^{+}$  vd.) ve karbonat türlerini içerir. TÇK ve iletkenlik eğilimleri birbirleriyle aynı şekilde değişiklik göstermiştir. Literatürde TÇK 2000 - 60000 mg/L (2-60 gr/L) aralığında değişmektedir [44]. Bu çalışmadaki TÇK değerleri 12.66 -18.23 g/L aralığında olup literatürdeki aralık ile benzerlik göstermektedir. TÇK değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TÇK değerleri.

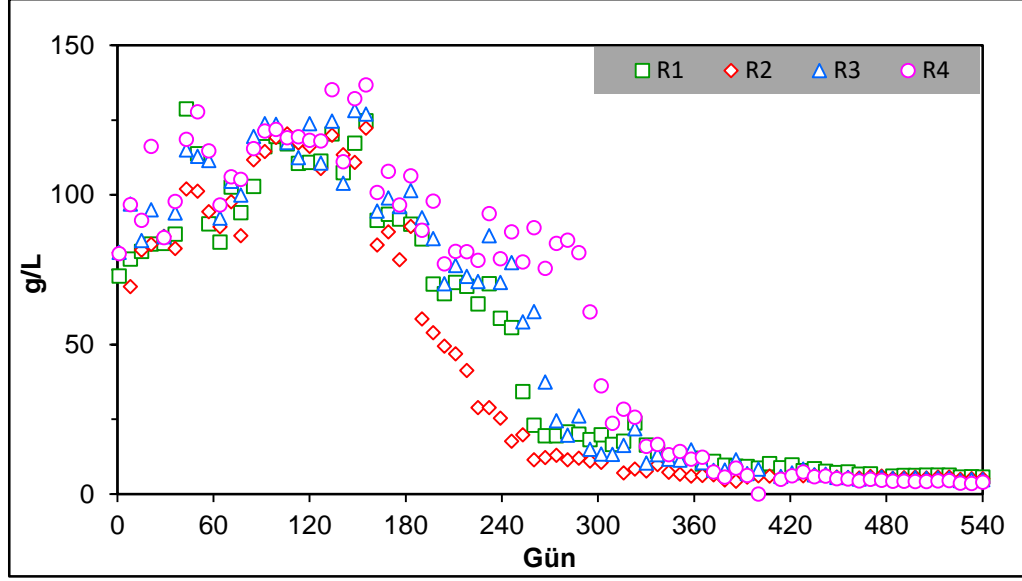
#### 4.3.4. Organik İçerik

Organik bileşenler, stabilizasyon süresi boyunca atık gövdesinden süzülerek sızıntı suyuna geçerler. Oluşan sızıntı suyunun hem kalitesinin hem de miktarının, depolama alanlarındaki organik kütle atığı üzerinde büyük etkisi olduğu bilinmektedir. Depo sahalarında, sızıntı suyunun organik madde içeriğinin, atıklar ayrışmaya başlamadan önce oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Metanojenik faza geçtikten sonra, sızıntı suyunun organik miktarın düşmesi beklenir [45]. Bu bölümde organik içerik ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

##### 4.3.4.1. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

KOİ, atıkları kimyasal olarak okside etmek için gerekli oksijen miktarı olarak tanımlanabilir. KOİ sızıntı suyunun organik içeriğinin belirlenmesi için kullanılan önemli bir parametredir. Literatürde, sızıntı suyunun KOİ değerleri ile ilgili çok farklı aralıktaki değerlere yer verilmektedir. Bir çalışmada asit fazında 6000-60000 mg/L ve metan fazında 500-4500 mg/L KOİ değeri aralığı verilirken [44], başka bir çalışmada 10000-50000 mg/L [46] verilmiştir.

Şekil 4.7’de reaktörlerdeki KOİ konsantrasyonlarının zamanla değişimi gösterilmektedir. Sızıntı suyunun ilk başlardaki KOİ değeri 70000-80000 mg/L aralığında ölçülmüştür. Kirleticilerin atık kütesinden sızıntı suyuna geçiş miktarı arttıkça KOİ değerleri 120000-130000 mg/L değerlerine kadar çıkmıştır. Kurulumdan yaklaşık 5 ay sonra KOİ değerleri gözlemlenen maksimum KOİ değerine göre azalmaya başlamıştır.



Şekil 4.7: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen KOİ değerleri.

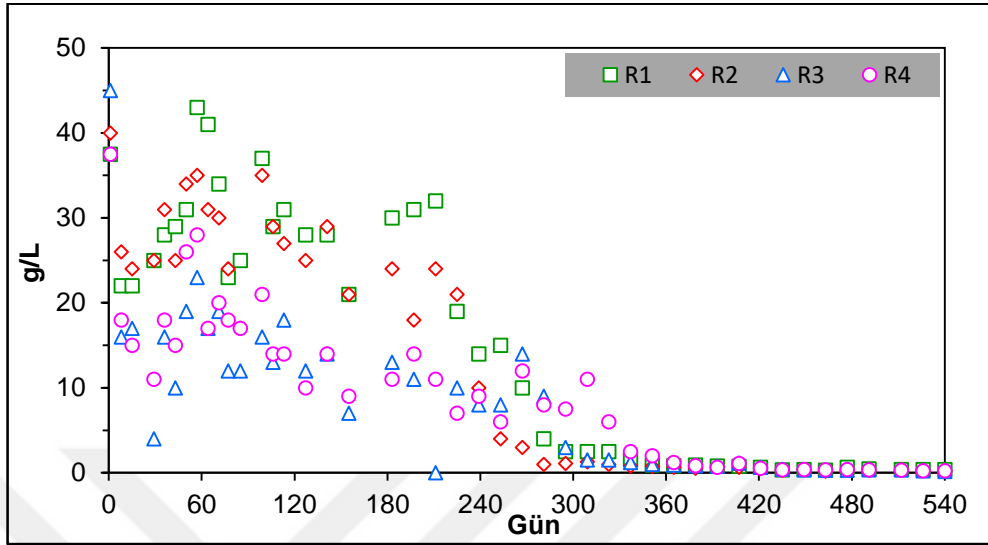
Reaktörlerin en düşük KOİ değerleri R1(çamur), R2(GT+çamur), R3(GT) ve R4(GT+GT) için, 5660, 4260, 4450 ve 3510 mg/L olarak ölçülmüştür. Giderme verimleri sırasıyla, %95.61, %95,79, %96,25 ve %97.11 olarak hesaplanmıştır. 2 Reaktöre arıtma çamurunun eklenmesi R1 ve R2 için gideme veriminin az da olsa daha düşük olmasına neden olurken, R3'te tek geotekstil kullanıldığı için verim biraz daha artmıştır ve son olarak, iki geotekstil kullanılan R4'teki giderimin en fazla olduğu açıkça görülmüştür.

#### 4.3.4.2. Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)

Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ), atıkların mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak okside etmesi için gerekli oksijen miktarı olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle, su numunesindeki organik maddelerin sadece biyolojik olarak parçalanabilen bölümünü temsil eder. BOİ değerleri genellikle KOİ konsantrasyonları ile benzer eğilim göstermektedir. Literatürde depo sahasının BOİ<sub>5</sub> aralığını 550-40000 mg/L arasında verilmiştir [47].

Bu çalışmada beş günlük biyolojik oksijen ihtiyacı ölçülmüştür. BOİ<sub>5</sub> değerleri 16000-26000 mg/L (16-26 gr/L) aralığında başlamış zamanla her bir reaktör yaklaşık olarak 45000 mg/L değerlerine kadar çıkmış, tekrar inişe geçerek 540. gün sonunda R1(çamur), R2(GT+çamur), R3(GT) ve R4(GT+GT) sırasıyla 300, 180, 160 ve 220 mg/L'a kadar düşmüştür. BOİ<sub>5</sub> grafiklerine baktığımızda değerlerin zamanla büyük

ölçüde azaldığı görülmektedir. Şekil 4.8’de  $BOI_5$  konsantrasyonlarının zamanla değişimi gösterilmektedir.

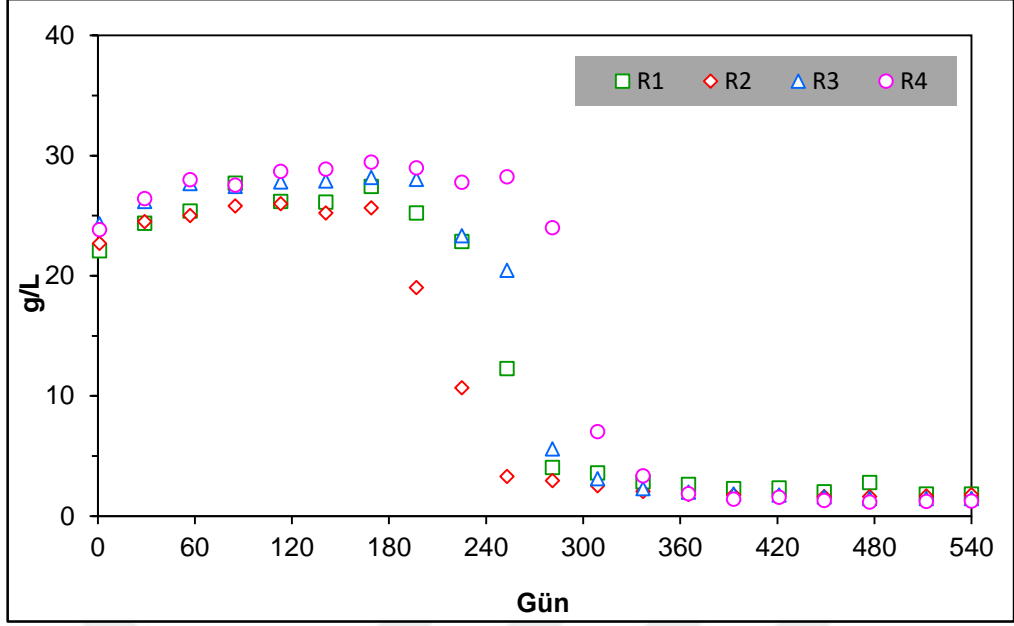


Şekil 4.8: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen  $BOI_5$  değerleri.

#### 4.3.4.3. Toplam Organik Karbon (TOK)

KOI sızıntı suyundaki organik ve inorganik maddelerin parçalanması için gerekli oksijen miktarını,  $BOI$  ise sadece organik maddelerin parçalanması için gerekli oksijen miktarını tanımlamaktadır.  $BOI$  ve  $KOI$ 'den farklı olarak toplam organik karbon (TOK) ise oksidasyon durumuna bakılmaksızın toplam organik karbonu içermektedir.

Sızıntı suyundaki TOK konsantrasyonları asit fazında artış gösterirken, metan fazında UYA içeriğinin metana dönüşmesi nedeniyle azalma eğilimi gösterir. Daha önce yapılan çalışmalarda TOK aralığı 30-29000 mg/L aralığında verilmiştir [44]. Sızıntı suyunun zamanla TOK konsantrasyonundaki değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Reaktörlerin TOK değerleri sırasıyla 22080, 22680, 24300 ve 23830 mg/L ile başlamıştır. Asit fazında değerler biraz yükselse de sırasıyla 1840, 1780, 1460 ve 1250 mg/L'ye düşmüştür. Sızıntı sularının içerdiği son TOK miktarlarına bakıldığında arıtma çamurunun yer aldığı R1 ve R2'de giderim daha azken iki geotekstil içeren R4'ün giderimi en yüksektir. Verimler sırasıyla, %93, %93, %95 ve %96'dır.



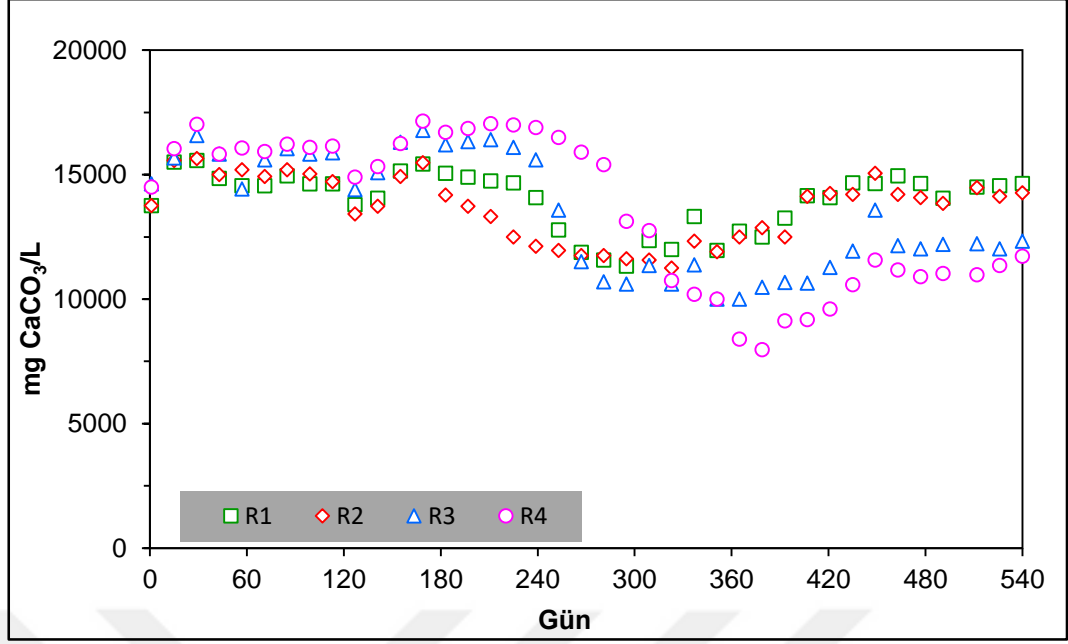
Şekil 4.9: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TOK değerleri.

#### 4.3.5. Alkalinite

Toplam alkalinite sistemdeki tamponlama kapasitesinin ölçüsünü göstermektedir. Alkalinite anaerobik bozunmanın gerçekleştiği biyoreaktörlerde büyük öneme sahiptir. Sızıntı suyunun geri devri, sızıntı suyunda yüksek alkalinite sağlayabilir buda pH'ın tamponlanmasını sağlayarak sistemin performansının iyileşmesine yardımcı olur [48]. Alkalinitenin fazla yüksek olması pH'ın düzensiz değişimine neden olabilir. Sistemde yüksek miktarda uçucu yağ asidi birikim oluşumu, asit konsantrasyonlarının sistemin alkalinitesini aşmasına ve metanojenik aktivitenin engellenmesine neden olur [20].

Bu çalışma da, R1, R2, R3 ve R4'ün alkalinite değerleri sırasıyla 13750, 13750, 14625 ve 14500 mg CaCO<sub>3</sub>/L olarak başlamış, 15575, 15650, 16775 ve 17150 mg CaCO<sub>3</sub>/L değerlerine ulaşmıştır. Zamana bağlı alkalinite değerlerinde dalgalanma görülmüş en düşük 11325, 11250, 10000 ve 7975 mg CaCO<sub>3</sub>/L değerlerine düşmüştür.

Literatürde sızıntı suyu için alkalinite değeri 11500-18900 mg CaCO<sub>3</sub>/L arasında verilmiştir [46]. Şekil 4.10'da de görüldüğü gibi çalışma boyunca alkalinite değerleri literatüre göre de atık stabilizasyonu için yeterlidir.



Şekil 4.10: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen alkalinite değerleri.

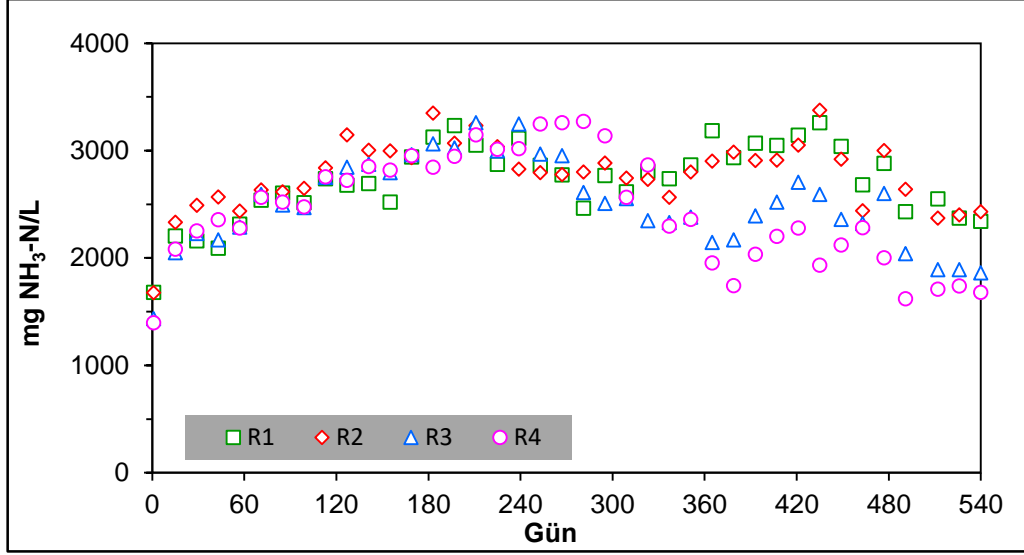
#### 4.3.6. Amonyak Azotu ve Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)

Amonyak azotu, depolama alanlarında uzun vadeli en önemli kirlilik sorunlarından biridir [18]. Amonyak azotu herhangi bir bozunma yolu bulunmadığından sistemde birikebilir. Anaerobik sistemlerde oksijen olmadığından nitrifikasyon gerçekleşemez bu sebeple amonyak, nitrit ve nitrata dönüşemez. Geri devirli biyoreaktörlerde ek su ilavesi ve/veya sızıntı suyunun geri devri mikrobiyal aktiviteyi etkilediğinden normal depolama alanlarına göre daha yüksek amonyak konsantrasyonuna neden olur [44]. Amonyak azotunun hangi formda olduğu pH değerine bağlıdır ve pH 8'den küçükse  $\text{NH}_4^+$  iyonu formunda yer alır [18].

Literatürde farklı amonyak değerleri yer almaktadır. Bir çalışmada bu değerler 864-2056 mg/L aralığındayken [49] diğer bir çalışmada 390-1064 mg./L aralığındadır [17]. Ancak başka bir çalışmada da anaerobik biyoreaktörlerde 6000 mg/L'ye kadar  $\text{NH}_3\text{-N}$  konsantrasyonlarının tolere edilebileceğini bildirmiştir [50].

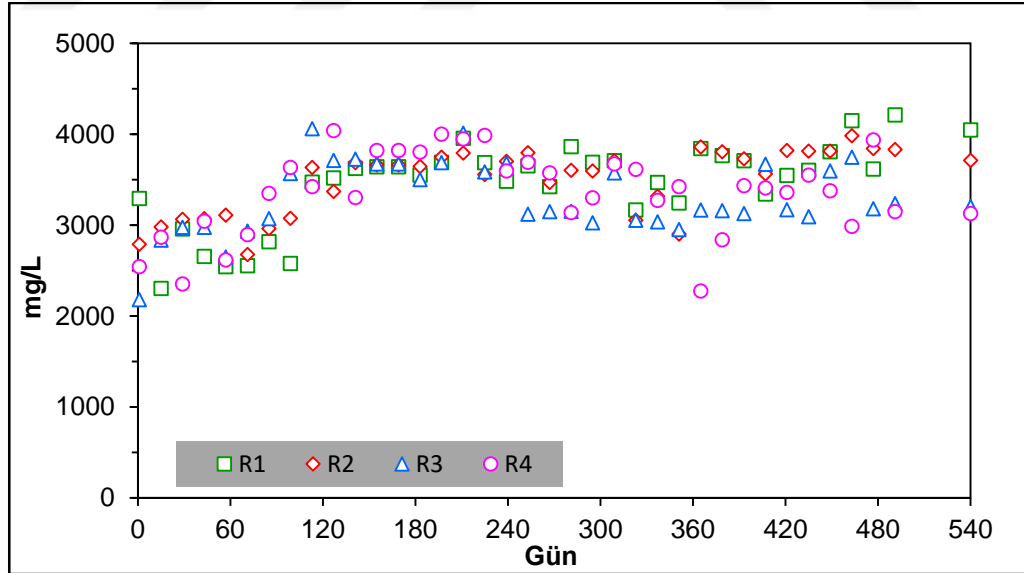
Şekil 4.11'de reaktörlerin amonyak konsantrasyonlarının değişimini göstermektedir. Bu çalışma da, R1, R2, R3 ve R4'ün amonyak azotu değerleri sırasıyla 1680, 1677, 1434 ve 1397 mg  $\text{NH}_3\text{-N/L}$  olarak başlamıştır organik atıkların parçalanmasıyla bir miktar yükselmiş daha sonra dalgalanarak devam etmiştir.





Şekil 4.11: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen amonyak değerleri.

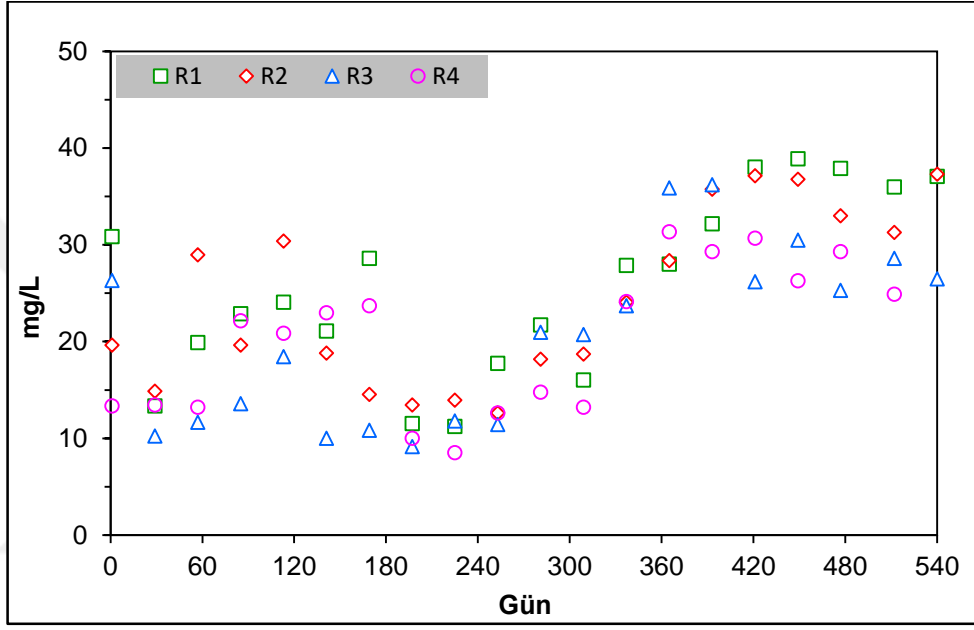
TKN organik azot ve Amonyanın toplamına eşittir. Literatürde TKN hem asidik hem de metan fazda 40-3425 mg/L arasında değiştiği belirtilmiştir [47]. TKN ağırlıklı olarak Amonyaktan oluşmaktadır. TKN değerleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu çalışmadaki TKN değerleri literatür değerlerine yakındır.



Şekil 4.12: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TKN değerleri.

### 4.3.7. Toplam Fosfor

Fosfor konsantrasyonu, depolama alanındaki sızıntı suyundaki sınırlayıcı bir besindir.  $4\mu\text{g/L}$ 'nin altında olmaması istenir. Yapılan bir çalışma da ise bu aralığı asit ve metan fazı için  $0.3 - 54 \text{ mg/L}$  olarak vermiştir [51]. Bu çalışmada tüm reaktörler için toplam fosfor aralığı  $52.68 - 8.53 \text{ mg/L}$  arasındadır. Bu çalışmadaki fosfor değerleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen TP değerleri.

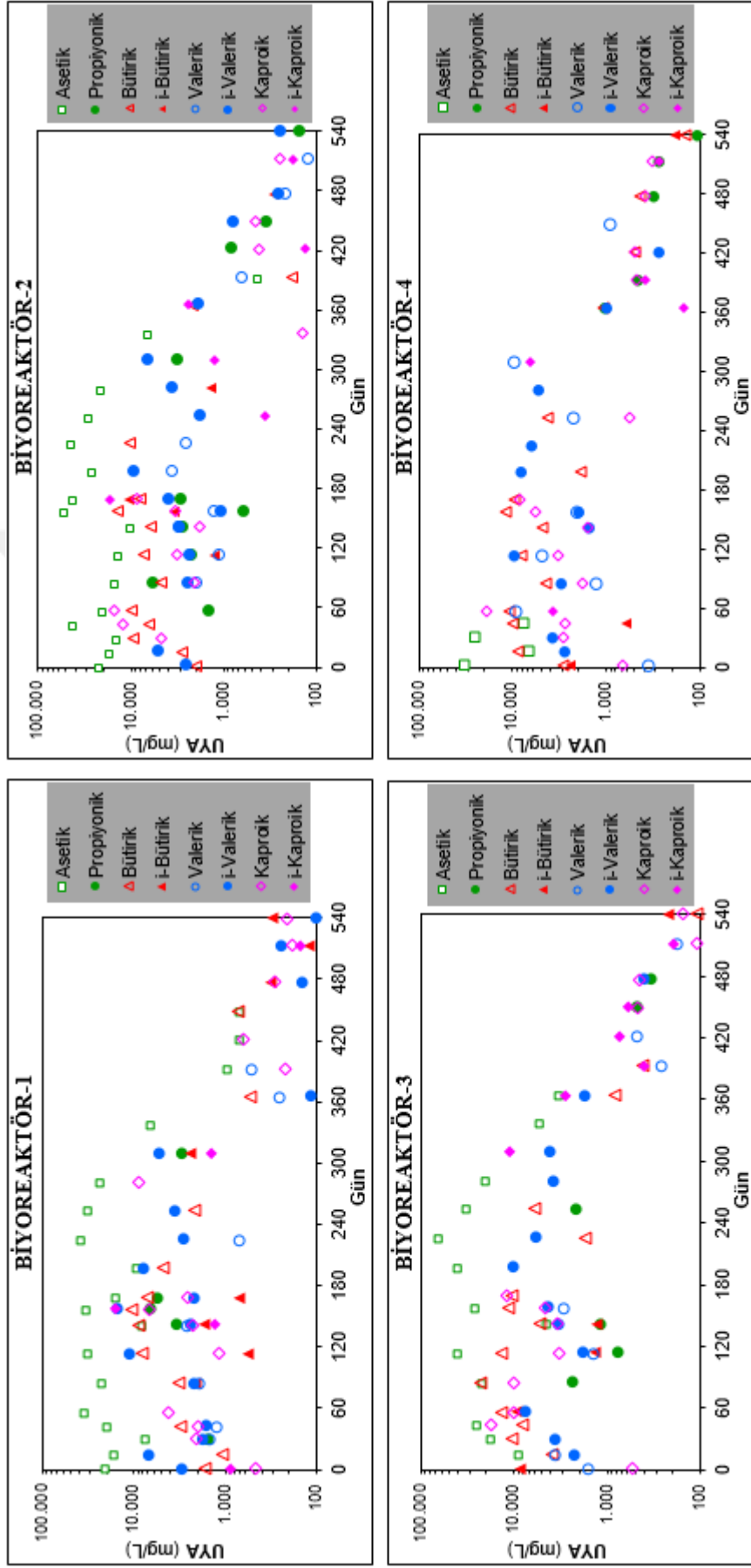
### 4.3.8. Uçucu Yağ Asidi

Uçucu yağ asidi (UYA) depolama sahalarında atıkların organik fraksiyonlarının ayrışması ve fermantasyonu sonucu oluşmaktadır. UYA'ların üretilmesi ve birikmesi depo sahasının asit fazında olduğu anlamına gelmektedir. Asetik, formik, propanik, isobutirik, butirik, isovalerik, valerik, isokaproik, kaproik ve heptanoik asitler UYA'ları oluşturmaktadır. Eğer sızıntı suyunda UYA'lar yüksek miktarlarda bulunursa, pH optimum değerinde olsa bile, organik maddelerin hidroliz yoluyla parçalanmaları yavaşlar. Ortamda oluşan asetik asit metan bakterileri tarafından kullanılmaz ise UYA'lar birikir ve pH değeri düşer [52]. Atığın bünyesinde bulunan organikler hidroliz yoluyla ara organik ürünlere ve uçucu yağ asitlerine dönüşmektedir. Ortamda uçucu yağ asitlerinin olması metan üretiminin olmadığı

anlamına gelmez. Oluşan depo gazındaki metan oranı eğer belli bir değerin üzerine çıkmış ise, örneğin %25, metan bakterileri kolay ve yavaş ayrışan organiklerden metan gazı üretmektedirler. Ayrıca hidrojen tüketen bakteriler de metan gazı üretebilmektedirler [22]. Asetik, propiyonik, bütirik, isobütirik, valerik, isovalerik, kaproik, ve isokaproik olmak üzere 8 çeşit UYA ölçülmüş ve aşağıdaki Şekil 4.14'te verilmiştir.

Reaktörlerde asit fazında yüksek olan UYA değerleri metan fazına geçtikten sonra, büyük ölçüde azalmıştır.





Şekil 4.14: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen UYA değerleri.

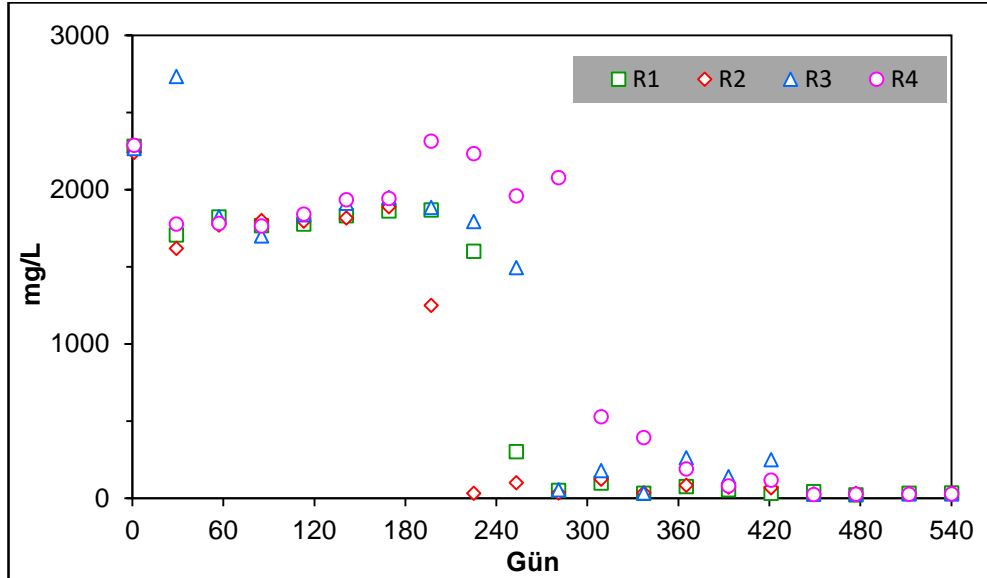
### 4.3.9. Elementel Analizler

#### 4.3.9.1. Anyonlar

Bu başlık altında sülfat, klorür ve florür iyonlarının değerleri verilmiştir.

Sülfat içeren atık sular anaerobik olarak arıtılırken sülfatı indirgeyen bakteriler ve metanojenler arasında rekabet olduğu gözlemlenmiş, sülfat indirgeyen bakterilerin besinleri bağlayarak metan oluşumunu engellediği ve önce sülfatın olduğu görülmüştür [53]. Sülfür bileşenleri atıklarda çözünebilir olan sülfat ve çökelebilen sülfid formlarında bulunurlar. Sülfid bileşikleri, anaerobik ayrışma sırasında, sülfat ve sülfat içeren diğer inorganik bileşiklerin ayrışması sonucu oluşurlar. Anaerobik koşullar altında, metanojenik faza geçildiğinde sülfatın sülfite mikrobiyal olarak indirgenmesine bağlı olarak sülfat konsantrasyonu da düşer [54]. Bu sebeple KOİ konsantrasyonu ile de aynı eğilimi göstermektedir.

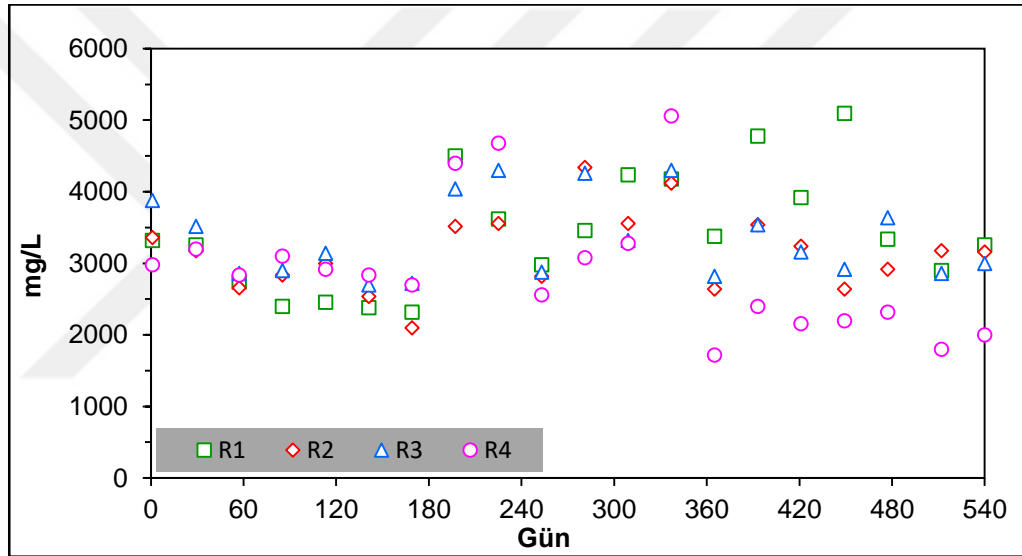
Bu çalışmada metanojenik faza geçene kadar sülfat konsantrasyonlarında dalgalanmalar görülmüş, R1, R2, R3 ve R4'ün sırasıyla ulaştıkları en yüksek değerler 2280, 2243, 2734 ve 2315 mg/L olmuştur. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi metanojenik koşulların oluşması ile birlikte sülfat konsantrasyonları keskin bir şekilde azalmıştır. Sülfat konsantrasyonları 540 günde 23, 29, 26ve 24 mg/L'ye kadar düşmüştür.



Şekil 4.15: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen sülfat değerleri.

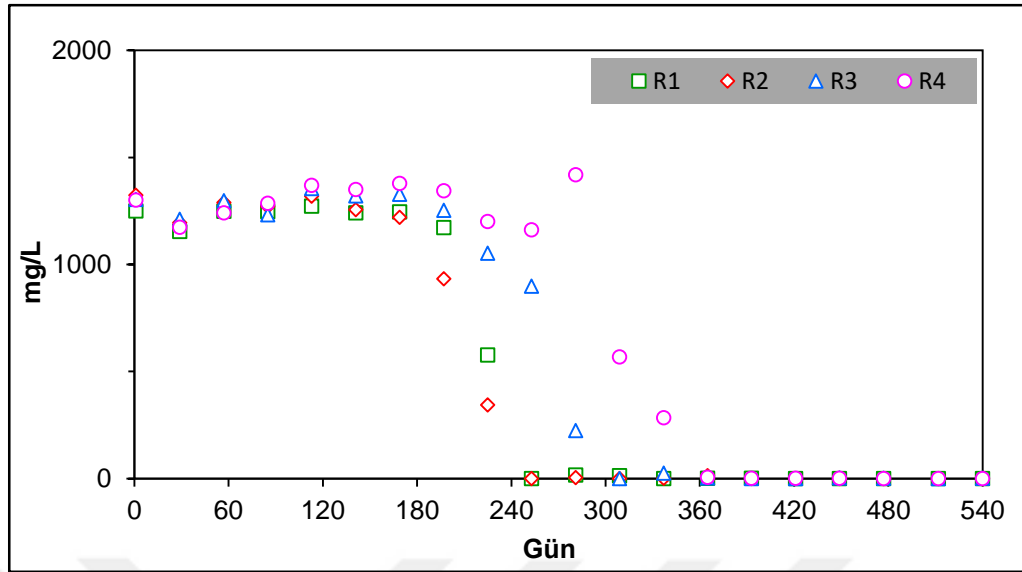
Biyolojik olarak parçalanamayan ve kalıcı bir bileşen olarak bilinen klorür iyonu sızıntı suyundaki seyreltme etkilerini tahmin etmek için kullanılır. Bu çalışmada kurulum tamamlandıktan sonra, herhangi bir su ilavesi yapılmamış, kapalı devre olarak kullanılmıştır. Bu nedenle Cl<sup>-</sup> konsantrasyonlarında önemli bir değişikliğin olması beklenmemektedir. Sadece pH'ın artması ile birlikte sızıntı suyundaki klorürün çözünürlüğü artmış buda klorür konsantrasyonunun bir miktar artmasına neden olmuştur.

R1, R2, R3, ve R4 için en yüksek değerler 5098, 4339, 4299 ve 5058 mg/L en düşük değerler 2319, 2099, 2699 ve 1719 mg/L olarak ölçülmüştür. Şekil 4.16'da, tüm reaktörler için zamanla klorür iyonu konsantrasyonlarının değişimi verilmiştir.



Şekil 4.16: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen klorür değerleri.

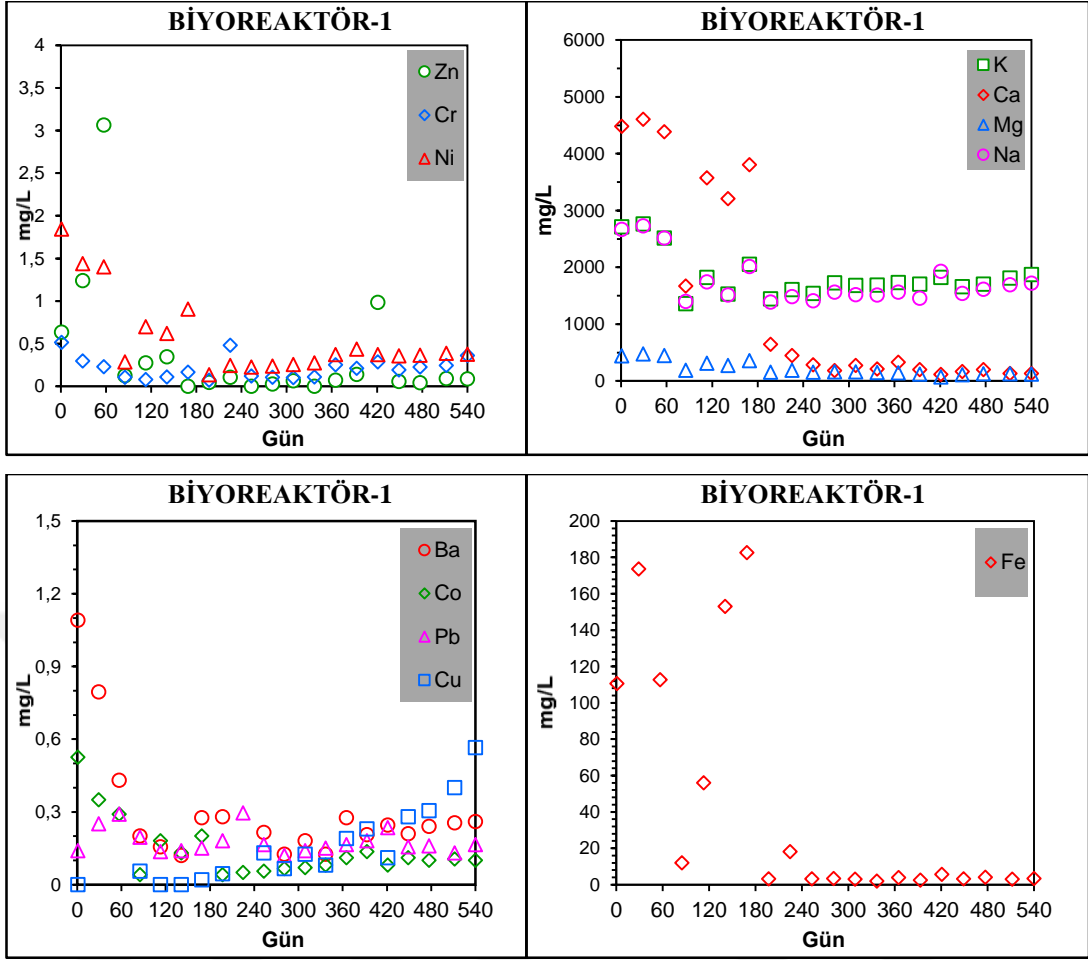
Bu çalışmadaki florür konsantrasyonunun zamanla değişimi Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Anaerobik mikrobiyal popülasyon sızıntı suyunun içindeki florürü tüketerek giderimini sağlamıştır. R1, R2, R3, ve R4 için ölçülen en yüksek florür konsantrasyonu sırasıyla 1272, 1323, 1355 ve 1418 mg/L'dir. Tüm reaktörlerin 540 gün sonunda florür konsantrasyonları 0 mg/L'ye düşmüş %100 giderim sağlanmıştır.



Şekil 4.17: R-1, R-2, R-3 ve R-4 için zamanla değişen florür değerleri.

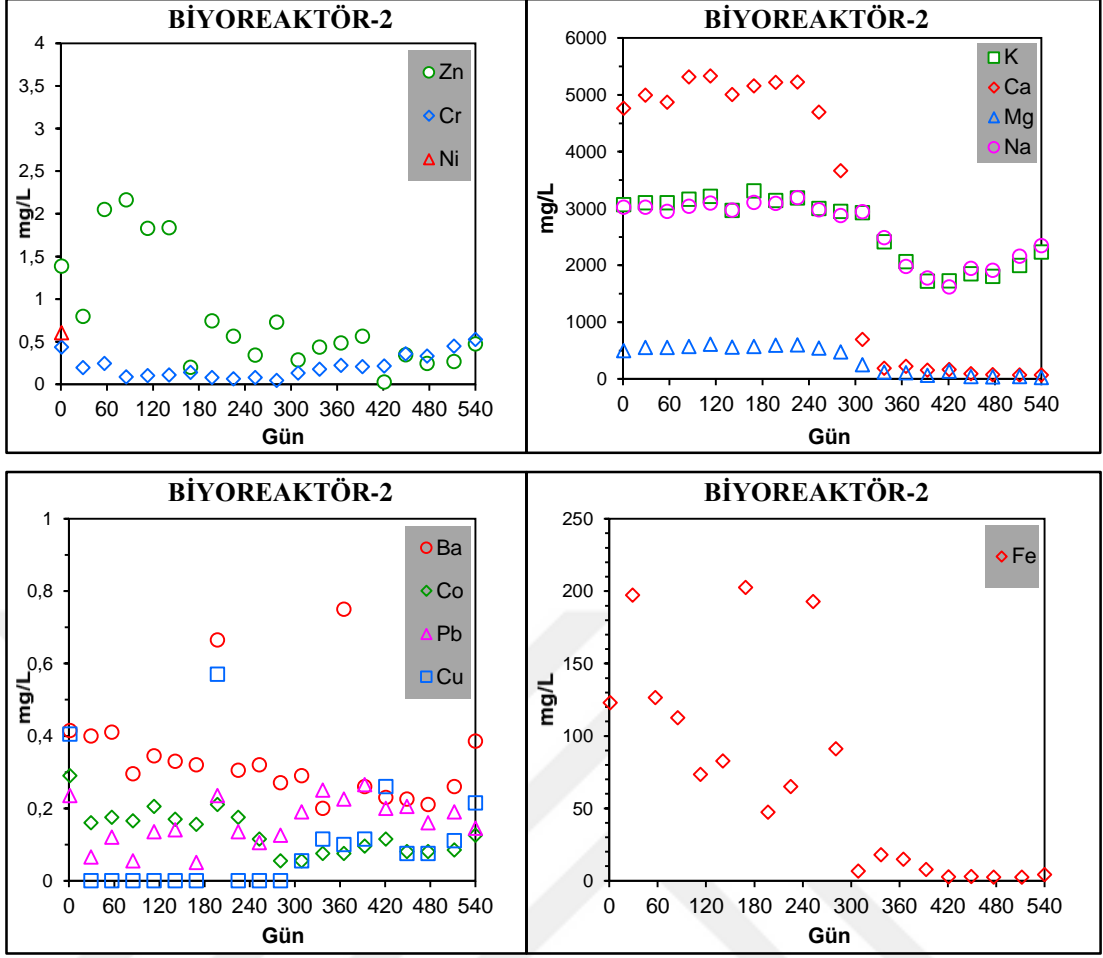
#### 4.3.10. Katyonlar

Sızıntı suyunda katyonlar önemli kirleticidir. Depolama sızıntı suyunda çinko, bakır, krom, manganez, nikel, kurşun ve kadmiyum gibi çeşitleri bulunabilir. Literatürde asit fazında K 10-2500 mg/L, Ca 10-2500 mg/L, Mg 50-1150 mg/L, Na 50-4000 mg/L, Zn 0.1-120 mg/L, Cu 0.004-1.4 mg/L, Ni 0.02-2.05 mg/L, ve Pb 0.008-1.02 mg/L aralığında değişirken ve metan fazında K 10-2500 mg/L, Ca 20-600 mg/L, Mg 40-350 mg/L, Na 50-4000 mg/L, Zn 0.03-4 mg/L, Cu 0.004-1.4 mg/L, Ni 0.02-2.05 mg/L ve Pb 0.008-1.02 mg/L aralığında değişmektedir [47]. Başka bir çalışma sonucu literatürde K için 50-3700 mg/L, Ca için 107200 mg/L, Mg için 30-15000 mg/L, Na için 70-7700 mg, 0.03-1000 mg/L, Cu 0.005-10 mg/L, Ni 0.015-13 mg/L, Co 0.005-1.5 mg/L ve Pb 0.001-5 mg/L aralıkları verilmektedir [44]. Bu çalışmada Ag, Cd, As, Se ve Hg metallerine de bakılmış fakat tüm numunelerde görülmemiştir. Diğer metaller Şekil 4.18, 19, 20 ve 21'deki grafiklerde gösterilmiştir. Zn, Co, Mg, Ni, Pb gibi metaller reaktörler metanojenik faza geçtiğinde az da olsa azalma göstermiştir. Bunun nedeni pH'daki artış metal çözünürlüğüne bağlı olarak konsantrasyonunda düşüşe neden olur [55]. Sızıntı suyundaki Ca ve K gibi mineraller ise zamanla mikroorganizmaların tüketmesinden dolayı azalma göstermiştir.

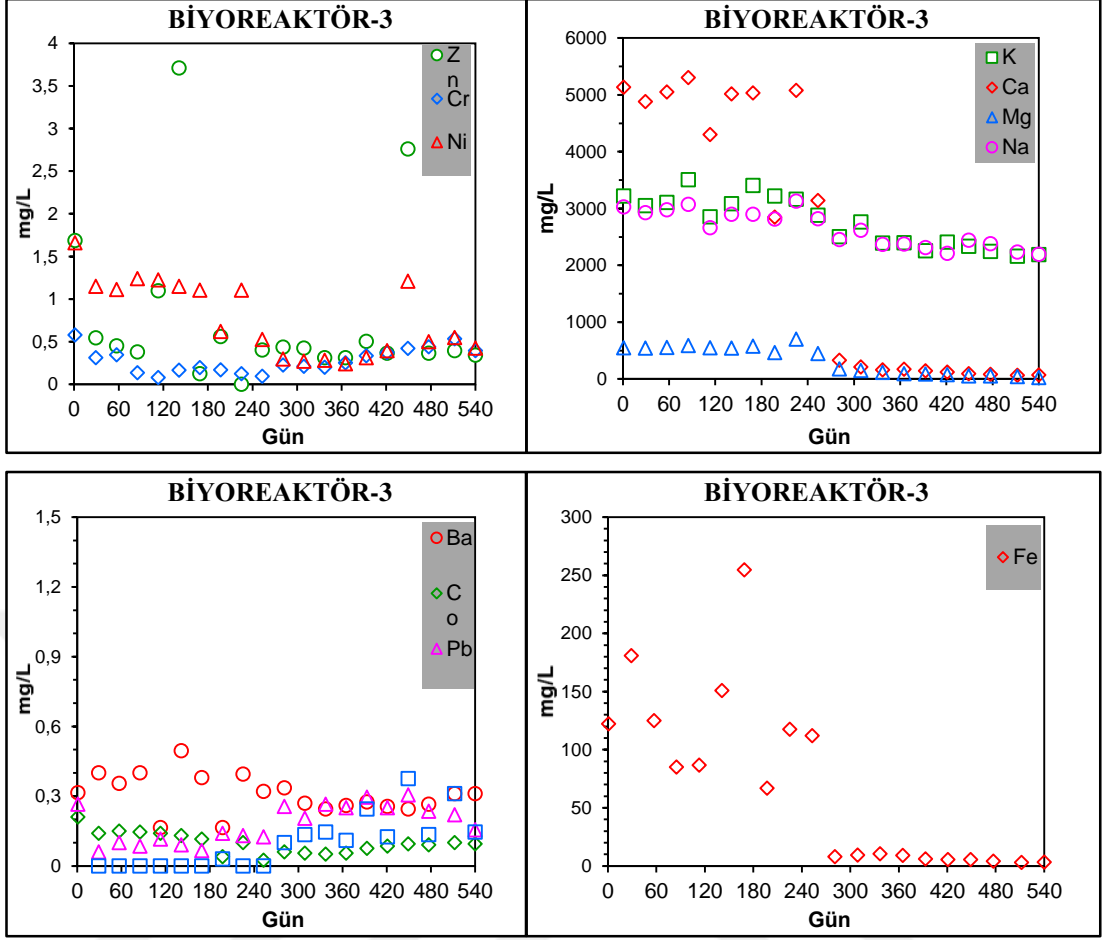


Şekil 4.18: R-1 için zamanla değişen katyon değerleri.

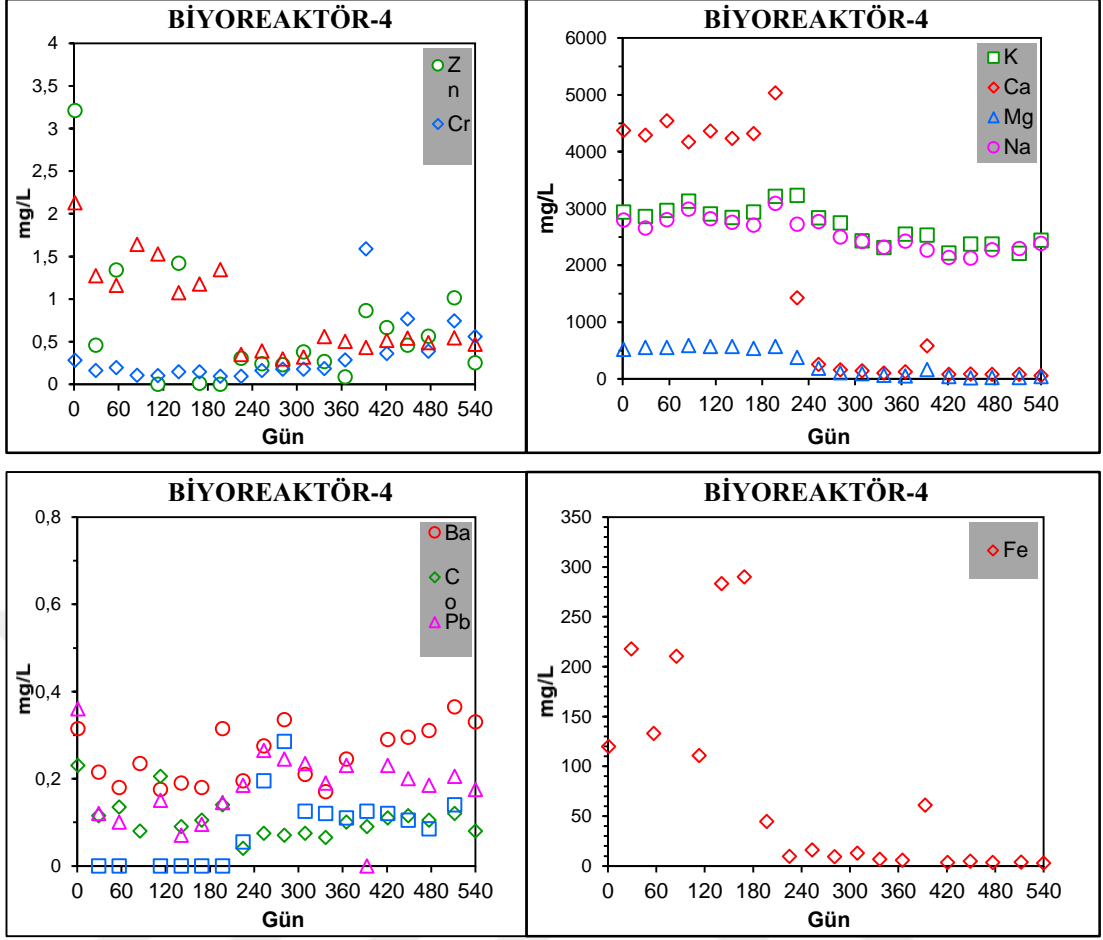




Şekil 4.19: R-2 için zamanla değişen katyon değerleri.



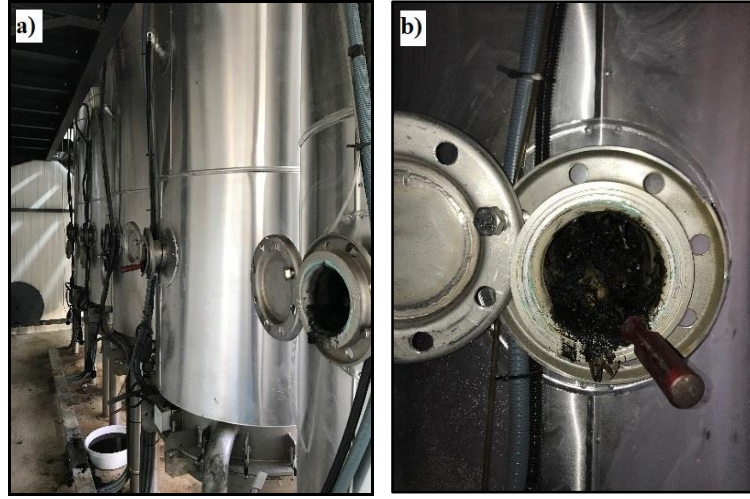
Şekil 4.20: R-3 için zamanla değişen katyon değerleri.



Şekil 4.21: R-4 için zamanla değişen katyon değerleri.

#### 4.3.11. İşletme Sonucu Katı Atık Karakterizasyonu

540 günlük işletim sonucunda Şekil 4.22’de gösterildiği gibi reaktörlerin numune alma kapakları açılmış, her bir reaktörden ayrı ayrı katı atık numunesi alınmıştır. Alınan numunelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Reaktörlerin numune alma kapakları: a) Reaktörlerin numune alma kapakları, b) Reaktörden numune alma.

R-1 ve R-2'ye başlangıçta doldurulan evsel katı atık ve arıtma çamurlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Ancak 540 günlük işletmenin sonunda reaktörlere yüklenen evsel katı atıkve arıtma çamuru karıştığından dolayı kütlece karışım oranları dikkate alınarak fiziksel özelliklerine ait giriş değerleri tekrar hesaplanarak kıyaslanmıştır. R-3 ve R-4 için sadece evsel katı atığın fiziksel özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 4.1: Katı atık bitiş fiziksel özellikleri.

Parametre	Birim	R-1/R-2	R-1	R-2	R-3/R-4	R-3	R-4
		Başlangıç	Bitiş	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Bitiş
Nem Muhtevası	%	51,3	63,1	58,1	49,9	58,8	59,9
TK	%	48,7	36,9	41,9	50,1	41,2	40,1
UKM	%	79,1	33,3	27,0	80,0	31,5	27,7
SKM	%	20,9	66,7	73,0	20,0	68,5	72,3

Tüm reaktörlerin giriş ve çıkış değerleri karşılaştırıldığında, organik maddelerin ayrışması sonucu uçucu katı madde yüksek oranda giderilmiştir. Giderim verimleri sırasıyla %57,9, %65,9, %60,6 ve %65,4'tür. Arıtma çamurunun ilave edildiği ve geotekstilin biyofiltre olarak kullanıldığı R-2'de en yüksek giderim verimi görülmüştür. İki geotekstil kullanılan R-4'te R-2'ye yakın bir giderim verimi görülürken diğer iki reaktör biraz daha düşük verimde kalmıştır.

Tüm reaktörlerin kimyasal özellikleri karşılaştırıldığında en yüksek TOK giderimi % 67,6 ile iki geotekstilin biyofiltre olarak kullanılarak organik giderimin yapıldığı R-4'tür. R-1, R-2 ve R-3'ün TOK giderim verimleri sırasıyla %63,6, %63,4 ve %61,7'dir.

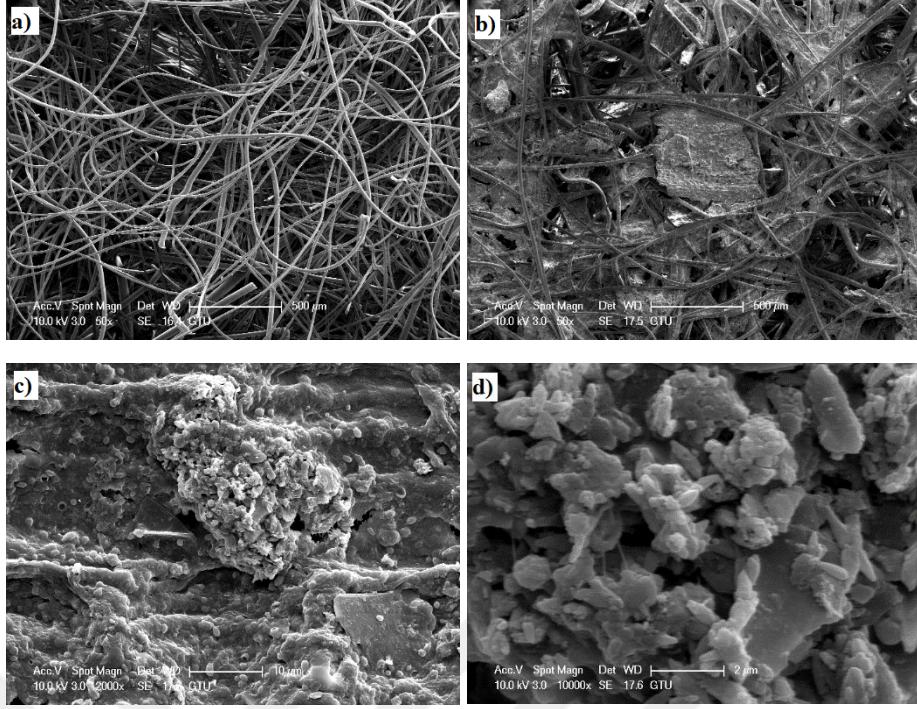
Tablo 4.2: Katı atık bitiş kimyasal özellikleri.

Parametre	Birim	Başlangıç	Bitiş			
			R-1	R-2	R-3	R-4
pH	-	6,18	8,95	9,07	8,57	8,82
TK	%	38,8	14,6	14,8	15,6	13,1
	mg/kg	388.000	145.854	147.657	156.236	131.163
TOK	%	38,7	14,1	14,2	14,8	12,5
	mg/kg	387.000	140689	141674	148043	125474
TKN	mg/kg	17.971	5.776	7.259	8.058	8.309
TP	mg/kg	3.148	1.023	838	541	865

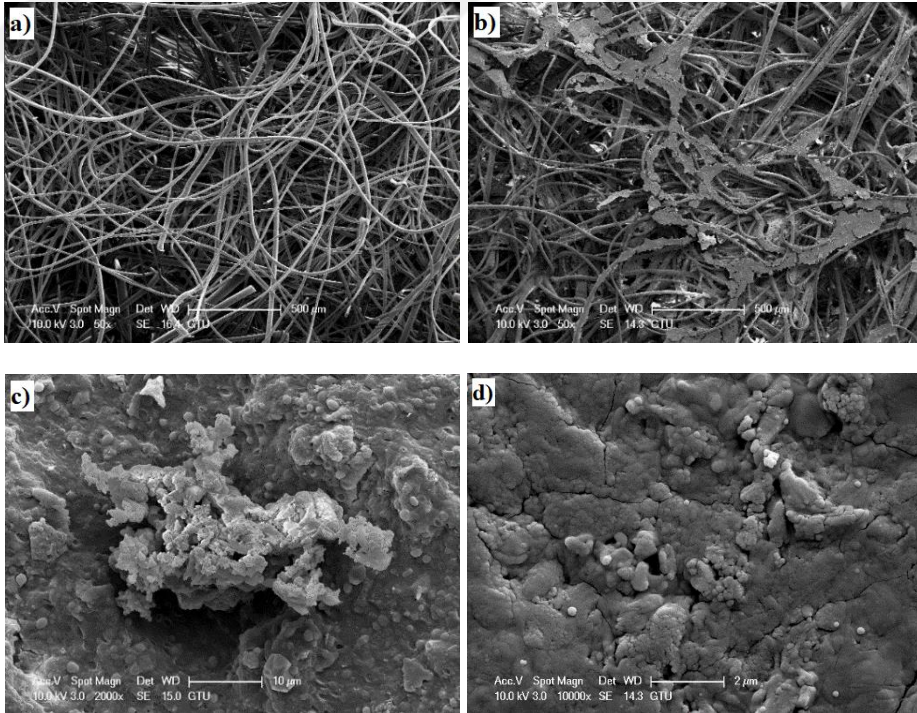
#### 4.3.12. Geotekstilde Biyofilm Oluşumu ve SEM Görüntüleri

Şekil 4.23, 24, 25 ve 26'da, geotekstil yapıları değişik boyutlarda gözlemlenmiştir. Kullanılmadan önce geotekstil numunenin yapısı lif yapısı üzerinde hemen hemen hiç parçacık bulunmadığı görülmektedir. Reaktörlerin işletiminden sonra kullanılan geotekstillerin fiberleri üzerinde ve gözenekleri arasında mikrobiyolojik topluluklar görülmüştür. Oluşan biyokütleler, biyolojik arıtım yaparak sızıntı suyu kalitesinin iyileşmesini sağlamıştır.

R-4 için 2 tabaka geotekstil kullanılmıştır. Her bir tabakanın görüntüsü ayrı ayrı alınmıştır. Kullanılan iki geotekstil oluşan biyokütleyi arttırmış, böylece daha fazla biyolojik arıtma gerçekleşmiştir.

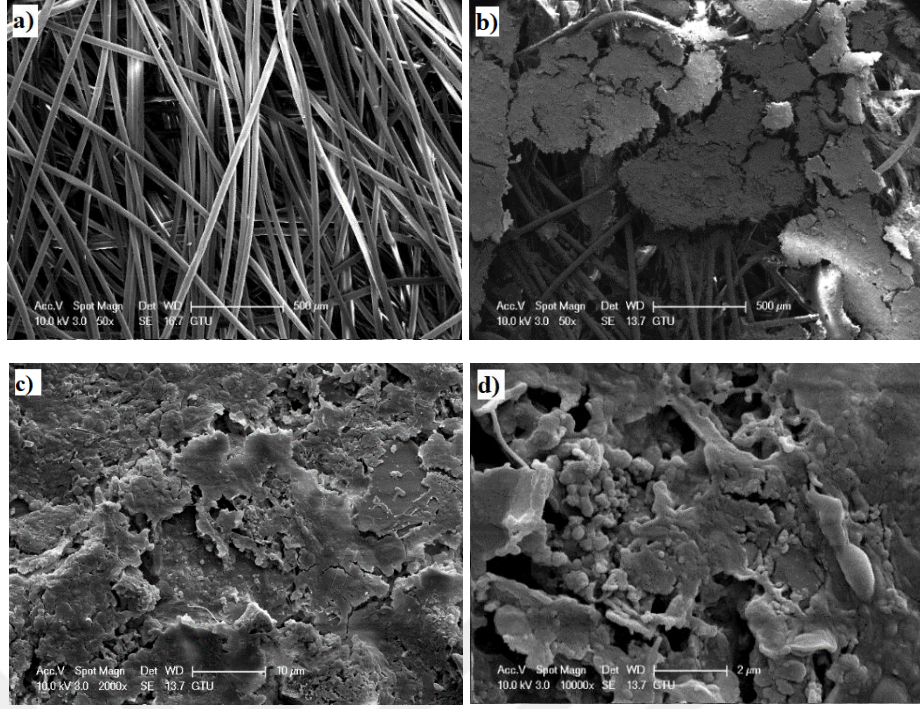


Şekil 4.23: R-2'nin geotekstilinin (GT-3) SEM görüntüleri: a) Temiz 50x büyütme, b) 50x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.

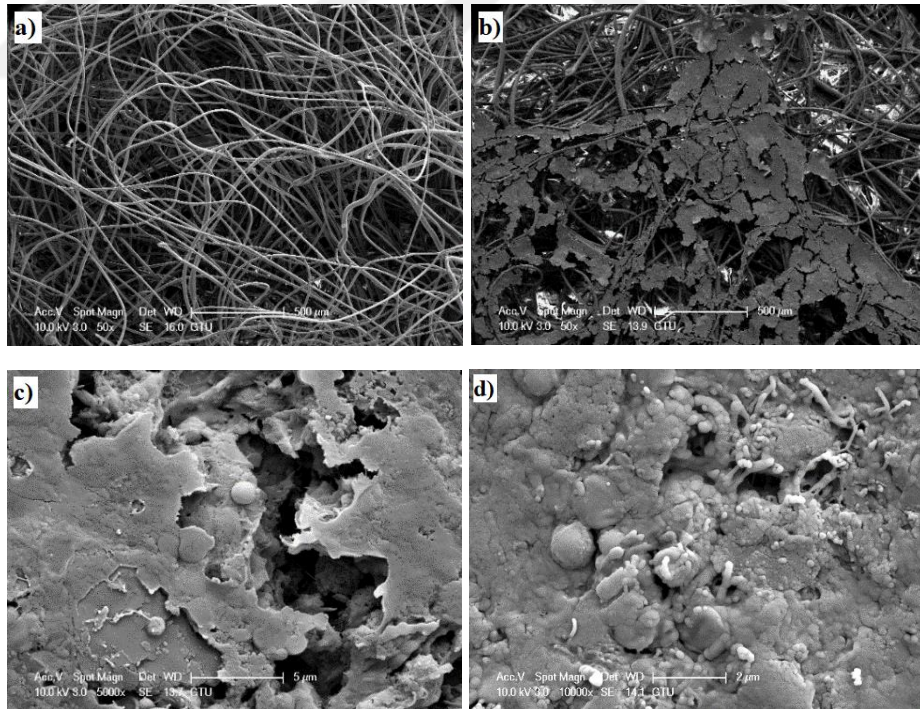


Şekil 4.24: R-3'ün geotekstilinin (GT-3) SEM görüntüleri: a) Temiz 50x büyütme, b) 50x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.





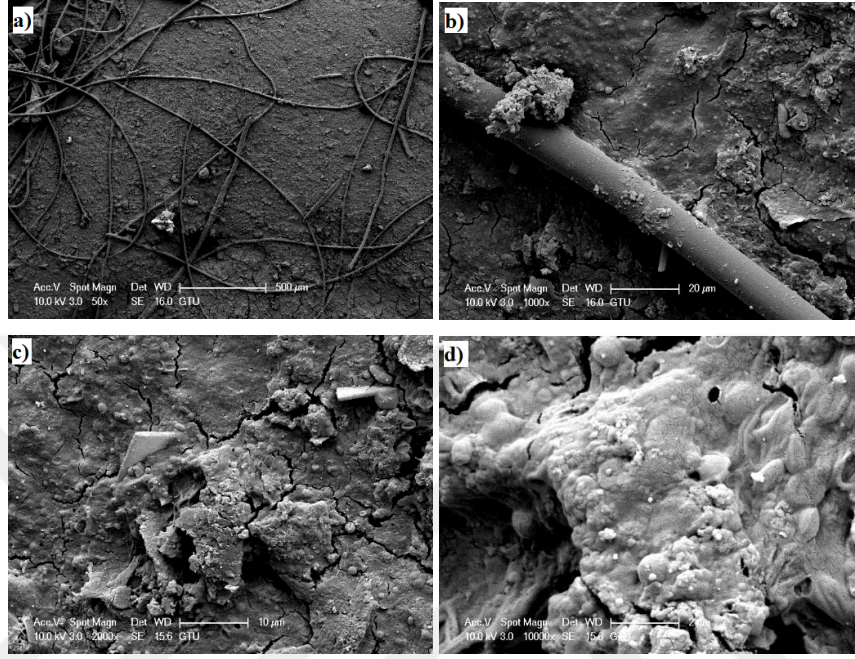
Şekil 4.25: R-4'ün üst geotekstiline (GT-1) SEM görüntüleri: a) Temiz 50x büyütme, b) 50x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.



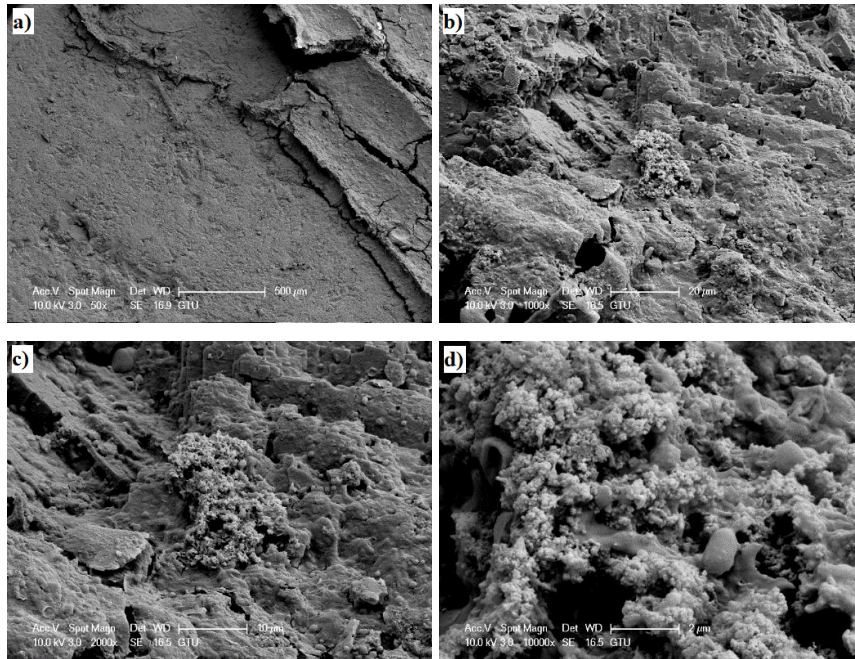
Şekil 4.26: R-4'ün alt geotekstiline (GT-2) SEM görüntüleri: a) Temiz 50x büyütme, b) 50x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.



R-2, R-3 ve R-4 açıldıktan sonra içerisinde bulunan çakılardan da numune alınarak SEM görüntüleri kaydedilmiştir. Çakılların üzerinde biyokütleler oluşmuş, mikrobiyal topluluklar görülmüştür. Çakıl numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 4.27, 28 ve 29’da verilmiştir.

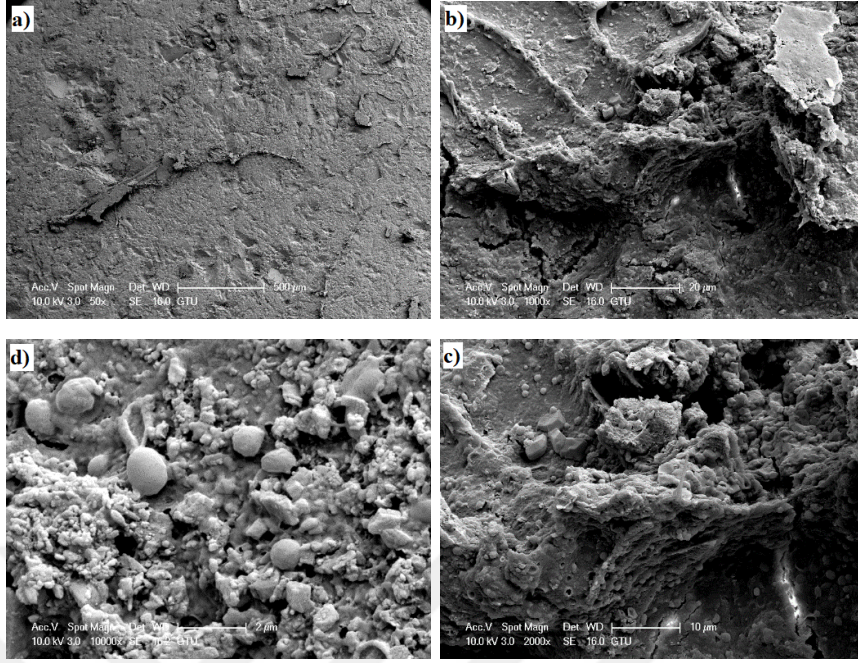


Şekil 4.27: R-2'nin çakıl numuneleri SEM görüntüleri: a) 50x yakın büyütme, b) 1000x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.



Şekil 4.28: R-3'ün çakıl numuneleri SEM görüntüleri: a) 50x yakın büyütme, b) 1000x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.





Şekil 4.29: R-4'ün çakıl numuneleri SEM görüntüleri: a) 50x yakın büyütme, b) 1000x yakın büyütme, c) 2000x yakın büyütme, d) 10000x yakın büyütme.

## 5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, tek ve çift kat geotekstil malzemesi kullanılması veya arıtma çamuru kullanılması durumunda sızıntı suyu kalitesi üzerindeki etkiyi araştırmak için, dört adet 350 cm yüksekliğinde, 80 cm iç çapında pilot ölçekli atık biyoreaktörler kullanılmıştır. Tüm reaktörler aynı özelliklere sahip 900 kg evsel katı atık ile doldurulurken, R-1 ve R-2'ye arıtma çamuru da eklenmiştir. R-2 ve R-3'te tek kat geotekstil malzeme kullanılırken R-4'te çift kat geotekstil malzeme kullanılmıştır. Tüm reaktörler 540 gün boyunca geri devir yapılarak işletilmiştir. Sızıntı suları hem miktar hem de kalite olarak periyodik olarak izlenmiştir. Bu çalışmadaki varılan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Tüm reaktörlerin içindeki atık sıcaklıkları 37 °C'de sabit tutulmuş böylece mikroorganizmalar için mezofilik şartlar sağlanmıştır.
- Bu çalışmada kullanılan evsel atıklar %50 nem içeriğine sahip olmasının yanında yüksek organik içeriğe de sahiptir. İstanbul'un atık karakterizasyonuna sahip olduğu düşünülen bu atıkların yeteri kadar nem içeriğine ve organik içeriğe sahip olduğu düşünülmüş, işletim sırasında hiçbir ilaveye ihtiyaç duyulmamıştır.
- Anaerobik koşulların sağlandığını gösteren iki parametre pH ve ORP değerleridir. Metanojenik faza geçilmesiyle birlikte ORP değerleri -300 mV'un altına düşerken pH'da nötr seviyeye ulaşmıştır. Metanojenik faza ilk ulaşan 6 ay sonra R-2 'dir. Bunu daha sonra sırasıyla R-1, R-3 ve R-4 takip etmiştir. Arıtma çamurunun eklenmesi nem içeriğini arttırmış, buda prosesin hızlanmasına neden olmuştur.
- Sistemdeki iletkenlik ve TÇK değerleri birbirlerine yakın olmakla birlikte çift geotekstil kullanılan R-4'te en düşük seviyelere ulaşmış, tek geotekstil kullanılan R-3 onu takip etmiştir. R-1 ve R-2'de arıtma çamuru kullanımı düşüşün daha az olmasına neden olmuştur.
- Organik bileşen konsantrasyonları çevre için büyük önem taşımaktadır. Bu anlamda KOİ giderme verimlerine bakıldığında, R-1, R-2, R-3 ve R-4'ün sırasıyla %95,6 , %95,8 , %96,2 ve %97,8 olarak hesaplanmıştır. Çift geotekstilin kullanılması en yüksek verime ulaştırırken, arıtma çamurunun organik içeriği yüksek olmasından dolayı birlikte depolandığı reaktörlerin verimi daha düşük kalmıştır. BOİ<sub>5</sub> giderimleri 4 reaktörde de %99 seviyesine

ulaşırken TOK gideriminde de yine en çok R-4'te görülmüştür. Sırasıyla verim %93, %93, %95 ve %96'dır.

- Birçok kirleticinin giderildiği dört reaktörde de herhangi bir alkalinite yada nem ihtiyacına gerek duyulmamış, arıtma çamurunun eklendiği iki reaktörde atığın nem ve organik içeriği artarken bunun sonucu olarak proses hızlanmış fakat sızıntı suyundaki organik giderim daha düşük olmuştur. Arıtma çamuru kullanılan iki reaktör karşılaştırıldığında ise geotekstil kullanılan R-2, kullanılmayan R-1'e göre daha iyi sonuç vermiştir.
- Geotekstil malzemelerden alınan numunelerde kullanılmadan önce lif yapısı üzerinde herhangi bir parçacık gözlemlenmezken, reaktörlerin işletimi sonrasında geotekstilin üzerinde ve boşluklarında biyofilm oluştuğu gözlenmiştir.
- İşletme sonunda çıkartılan tüm geotekstil malzemelerinden ve çakıllardan numune alınmış, SEM görüntüleri incelenmiştir. Farklı tip geotekstiller denenmiş olup, geotekstil malzeme içeren reaktörlerde biyokütlelerin oluşması daha fazla gözlenmiştir. Buda mikroorganizmaların biyolojik arıtma gerçekleştirerek, sızıntı suyu kalitesinin yerinde iyileşmesini sağlamış, ve bunu da depo sahalarındaki maaliyetin düşürülmesine yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır.
- İşletme sonucunda sızıntı suyu kalitesinin iyileşmesi kıyaslandığında, çift geotekstilin kullanıldığı R-4'te en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çift geotekstilin kullanılması oluşan biyokütle miktarını arttırmış buda verimin artmasına neden olmuştur. En iyi sonuçlarda R-4 'ü tek geotekstil bulunan R-3 takip etmiş, yine tek geotekstil bulunan R-2'den daha iyi sonuç vermesinin nedeni ise R-2'de arıtma çamuru kullanılmasıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Koerner G. R., (1993), "Performance evaluation of geotextile filters used in leachate collection systems of solid waste landfills", PhD thesis, Drexel University.
- [2] Küçükağa Y., (2016), "Effect of Geotextile Layer on Leachate Quality in Recirculated Landfill Bioreactor", Master of Science, Gebze Technical University.
- [3] 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.
- [4] Web 1, (2017), <https://www.csb.gov.tr/db/destek/edotordosya/EK12.pdf>, (Erişim Tarihi: 03/02/2017).
- [5] Gündüzalp A. A., Güven S., (2016), "Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği", 14.sayı, Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi.
- [6] Kemirtlek A., (2012), "Entegre katı atık yönetimi", İSTAÇ.
- [7] Tchobanoglous G. K. F., (2002), "Handbook of solid waste management", 2 Edition, McGraw-Hill.
- [8] McDougall F. R., White P. R., Franke M., Hindle P., (2008), "Integrated solid waste management: a life cycle inventory", 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- [9] Web 2, (2017), <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>, (Erişim Tarihi: 23/11/2017).
- [10] Web 3, (2018), <http://slideplayer.biz.tr/slide/8844951/>, (Erişim Tarihi: 29/04/2018).
- [11] Web 4, (2018), <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18777>, (Erişim Tarihi: 29/04/2018).
- [12] Tchobanoglous G., (1993), "Integrated solid waste management engineering principles and management issues", 1st Edition, McGraw-Hill.
- [13] Robinson A., (2005), "Landfill leachate treatment", Membrane Technology, 2005 (6), 6-12.
- [14] 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.

- [15] Web 5, (2017), [http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2016\\_4\\_2016\\_0113.pdf](http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2016_4_2016_0113.pdf), (Erişim Tarihi: 04/12/2017).
- [16] Web 6, (2017) [https://www.csb.gov.tr/db/destek/editorodosya/Duzenli\\_Depolama\\_Tesis\\_Saha\\_Yon\\_ve\\_isletme\\_kilavuzu.pdf](https://www.csb.gov.tr/db/destek/editorodosya/Duzenli_Depolama_Tesis_Saha_Yon_ve_isletme_kilavuzu.pdf) , (Erişim Tarihi: 04/12/2017).
- [17] Erses A. S., Onay T. T., Yenigun O., (2008), “Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills”, *Bioresource technology*, 99 (13), 5418-5426.
- [18] Berge N. D., Reinhart D. R., Batarseh E. S., (2009), “An assessment of bioreactor landfill costs and benefits”, *Waste Management*, 29 (5), 1558-1567.
- [19] 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.
- [20] Ağdağ O. N., Sponza D. T., (2005), “Effect of alkalinity on the performance of a simulated landfill bioreactor digesting organic solid wastes”, *Chemosphere*, 59 (6), 871-879.
- [21] 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.
- [22] Sponza D. T., Ağdağ O. N., (2004), “Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors”, *Process Biochemistry*, 39 (12), 2157-2165.
- [23] 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.
- [24] Warith M., (2002), “Bioreactor landfills: experimental and field results”, *Waste Management*, 22 (1), 7-17.
- [25] Jain S., Jain S., Wolf I. T., Lee J., Tong Y. W., (2015), “A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 142-154.
- [26] Yayınları İ. S. V., (1999), “Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları”, Edition.
- [27] Pohland F., Kim J., (2000), “Microbially mediated attenuation potential of landfill bioreactor systems”, *Water Science and Technology*, 41 (3), 247-254.

- [28] Yaman C., Küçükağa Y., Pala B., Delice G., (2016). "Operating Landfills as Bioreactor by Recirculating Leachate", EurAsia 2016 Waste Management Symposium, 96-104, Istanbul, TURKEY, 2-4 May.
- [29] Warith M., Li X., Jin H., (2005), "Bioreactor landfills: state-of-the-art review", Emirates Journal for Engineering Research, 10 (1), 1-14.
- [30] 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.
- [31] Koerner G. R., Koerner R. M., Martin J. P., (1994), "Design of landfill leachate-collection filters", Journal of Geotechnical Engineering, 120 (10), 1792-1803.
- [32] White D. M., Pilon T. A., Woolard C., (2000), "Biological treatment of cyanide containing wastewater", Water Research, 34 (7), 2105-2109.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Yaman C., Martin J., Korkut E., (2006), "Effects of wastewater filtration on geotextile permeability", Geosynthetics International, 13 (3), 87-97.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Web 7 (2016), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/yillik-toplam-yagis-verileri.aspx?m=kocaeli>, (Erişim Tarihi: 04/02/2016).
- [39] Association A. P. H., Association A. W. W., Federation W. P. C., Federation W. E., (1999), "Standard methods for the examination of water and wastewater", 20th Edition, American Public Health Association.
- [40] Delice G., (2018), "Geri Devirli Atık Biyoreaktöründe Arıtma Çamurları ile Evsel Katı Atıkların Beraber Depolanabilirliği ve Depo Gazı Verimine Etkisi", Yüksek Lisans, Gebze Teknik Üniversitesi.

- [41] Kondusamy D., Kalamdhad A. S., (2014), "Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production—A review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (3), 1821-1830.
- [42] Singh L., Kalia V. C., (2017), "Waste Biomass Management: A Holistic Approach", 1st Edition, Springer.
- [43] Christensen T. H., Kjeldsen P., (1989), "Basic biochemical processes in landfills, in: *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*", 1st Edition, Elsevier, 29-49.
- [44] Kjeldsen P., Barlaz M. A., Rooker A. P., Baun A., Ledin A., Christensen T. H., (2002), "Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32 (4), 297-336.
- [45] 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.
- [46] Gülşen H., Turan M., (2004), "Anaerobic treatability of sanitary landfill leachate in a fluidized bed reactor", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 28 (5), 297-306.
- [47] Ehrig H.-J. (1989), "Water and element balances of landfills", 1st Edition, Springer, 83-115.
- [48] Yu H. W. S. Z., Hanson A., Smith G., (2002), "Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion", *Waste Management*, 22(1), 1-5.
- [49] Kheradmand S., Karimi-Jashni A., Sartaj M., (2010), "Treatment of municipal landfill leachate using a combined anaerobic digester and activated sludge system", *Waste Management*, 30 (6), 1025-1031.
- [50] Calli B., Mertoglu B., Inanc B., Yenigun O., (2005), "Methanogenic diversity in anaerobic bioreactors under extremely high ammonia levels", *Enzyme and microbial technology*, 37 (4), 448-455.
- [51] Kruse K., (1994) "Langfristiges emissions geschehen von siedlungsabfalldeponien", Technische Universität Braunschweig, 54.
- [52] Griffin M. E., McMahon K. D., Mackie R. I., Raskin L., (1998), "Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids", *Biotechnology and bioengineering*, 57 (3), 342-355.
- [53] Elferink O., Visser A., Hulshoff Pol L. W., Stams A. J., (1994), "Sulfate reduction in methanogenic bioreactors", *FEMS Microbiology Reviews*, 15 (2-3), 119-136.

- [54] Pohland F., Kim J., (1999), "In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors", *Water Science and Technology*, 40 (8), 203-210.
- [55] Tatsi A., Zouboulis A., (2002), "A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece) ", *Advances in Environmental Research*, 6 (3), 207-219.





## ÖZGEÇMİŞ

Burcu Pala 1992 yılında İstanbul'da doğdu. 2010 yılında başladığı Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2016-2018 yılları arasında Gebze Teknik Üniversitesinde TÜBİTAK-1001 projesinde proje asistanı olarak çalıştı. 2018 yılından itibaren Gebze Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.



## **EKLER**

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar**

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 November.

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.

