



**HAREKETLİ YATAKLI MEMBRAN
BİYOREAKTÖR İLE EVSEL
ATIK SULARIN ARITIMI**

Ekrem GÜLLÜCE

**Yüksek Lisans Tezi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı
Prof. Dr. Ergün YILDIZ
2017**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAREKETLİ YATAKLI MEMBRAN BİYOREAKTÖR İLE EVSEL
ATIK SULARIN ARITIMI**

Ekrem GÜLLÜCE

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU



**HAREKETLİ YATAKLI MEMBRAN BİYOREAKTÖR İLE
EVSEL ATIK SULARIN ARITIMI**

Prof. Dr. Ergün YILDIZ danışmanlığında, Ekrem GÜLLÜCE tarafından hazırlanan bu çalışma, 28/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Çevre Teknolojisi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu** (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ergün YILDIZ

İmza :

Üye : Prof. Dr. Recep BONCUKCUOĞLU

İmza :

Üye : Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **28/12/2017** tarih ve **51...../39** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak 1003 projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No:114Y499

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAREKETLİ YATAKLI MEMBRAN BİYOREAKTÖR İLE EVSEL ATIK SULARIN ARITIMI

Ekrem GÜLLÜCE

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ergün YILDIZ

Bu çalışmada, pilot ölçekli hazırlanan klasik MBR, hareketli ve sabit yataklı biyofilm destekli hibrit MBR'nin üçlü sisteminden biri olan hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör (HYMBR) ile evsel atık suyun arıtımı araştırılmıştır. %50, %65 ve %80 oranında biyofilm dolgu malzemesi doldurulan sistemde ∞ , 30, 20, 10 ve 5 günlük çamur yaşlarında deneyler sürdürülmüş ve 22 lt/m²saat'e kadar membran akıllarında çalışılmıştır. Hidrolik kalış süresi olarak 45 dakika'ya inilen deneylerde ortalama olarak %95,24 TKOİ, %73,31 TOK ve %30,55 TN giderimleri sağlanmıştır. Artan nüfusa karşılık, azalan tarım alanları ve giderek yok olan temiz su kaynakları ciddi çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu yüzden tarımın sulama suyuna olan ihtiyacını giderebilmek için evsel atık suların geri kazanımı önem taşımaktadır. Bu çalışmada yaklaşık 340 gün işletilen HYMBR ile arıtılan çıkış suların ortalama bulanıklık değeri 0,676 NTU, elektriksel iletkenlik 449 μ S/cm, pH değeri 7,04 ve SAR 1,46 olarak belirlenmiştir. Bu değerler göz önünde alındığında HYMBR'lerin evsel atıksuları 45 dk gibi kısa sürede A sınıfı sulama suyu kriterlerini karşılayacak derecede artırılabilirdiği görülmüştür. Sonuç olarak HYMBR'lerin düşük şiddetli evsel atık suların yüksek hızda arıtılarak sulama suyu olarak kullanılabilmesi konusunda son derece etkili bir arıtım sistemi olabileceği sonucuna varılmıştır.

2017, 60 sayfa

Anahtar Kelimeler: Atık suyun arıtımı, hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktörler

ABSTRACT

Master Thesis

THE TREATMENT DOMESTIC WASTEWATER WITH MOBILE BED MEMBRANE BIOREACTOR

Ekrem GÜLLÜCE

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering
Department of Environmental Technology

Supervisor: Prof. Dr. Ergün YILDIZ

In this study, the treatment of domestic wastewater was investigated with hybrid moving bed membrane bioreactor (HYMBR) which is one of the triple systems of pilot scale MBR, mobile and fixed bed biofilm supported hybrid MBR. Experiments were continued at ∞ , 30, 20, 10 and 5 days of sludge age at 50%, 65% and 80% of the system filled with biofilm filling material and the membrane flux up to 22 lt / m²h. As a result of 45 minutes of hydraulic retention time, 95.24% TKOI, 73.31% TOC and 30.55% TN removal were achieved on average. In contrast to the growing population, declining agricultural land and increasingly abundant clean water resources lead to serious environmental problems. Therefore, it is important to recover domestic wastewater in order to be able to meet the need of agriculture for irrigation water. In this study, the average turbidity value of outflow waters treated with HYMBR for about 400 days was determined to be 0.676 NTU, electrical conductivity 449 μ S / cm, pH value 7.04 and SAR 1.46. When these values are taken into consideration, it is seen that HYMBR's domestic wastewater can be treated in a short time like 45 minutes to meet the criteria of class A irrigation water. As a result, it has been concluded that HYMBRs can be a very effective treatment system for the treatment of low intensity domestic wastewater at irrigation water at high speed.

2017, 60 pages

Keywords: Domestic wastewater treatment, hybrid mobile bed membrane bioreactor

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında çalışmalarımı büyük bir titizlikle yürüten tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ergün YILDIZ'a tezin oluşum sürecinde ve bulguların değerlendirilmesinde emeği geçen hocam Sayın Arş. Gör. İbrahim CENGİZ'e, her zaman manevi desteğini ve yardımını gördüğüm, engin bilgi ve deneyimleriyle bana öncülük eden Rektör Yardımcısı Sayın Prof. Dr. Medine GÜLLÜCE'ye ve çalışmalarımın çoğu aşamasında; tezin hazırlanma sürecinde benden manevi desteklerini esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Mehmet KARADAYI'ya, Sayın Arş Gör. Dr. Gökçe KARADAYI'ya, Sayın Arş. Gör. Neslihan HIDIROĞLU'na, Çevre Mühendisi Sayın Numan Suadi TATAROĞLU'na ve Sayın Banu TULUK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın farklı aşamalarında ve tezin hazırlanma sürecinde istifade ettiğim fikirlerinden ve manevi desteklerinden dolayı Sayın Dr. Burak ALAYLAR'a, Sayın Uzm. Biy. Ceyda IŞIK'a, Sayın Uzm. Biy. Selma SEZEN'e, Sayın Uzm. Biy. Taha Yasin KOÇ'a, Sayın Uzm. Biy. Abdussamed Yasin DEMİR'e, Sayın Uzm. Biy. Selin Doğan'a ve Sayın Uzm. Kim. Mine İSAOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 114Y499 nolu 1003 projesinin bir parçası olup, desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a da teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca benim bütün zorluklarıma katlanan, eğitimimin her aşamasında maddi, manevi desteklerini esirgemeyen ve bana olan güvenlerinden dolayı anneme, babama, kardeşlerime, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekrem GÜLLÜCE

Aralık, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Atık Suların Arıtılması	3
2.1.1. Fiziksel arıtım.....	3
2.1.2. Kimyasal arıtım	4
2.1.3. Biyolojik arıtım	4
2.2. Membran Sistemleri	4
2.2.1. Mikrofiltrasyon.....	6
2.2.2. Ultrafiltrasyon	6
2.2.3. Nanofiltrasyon	7
2.2.4. Ters osmoz	7
2.3. Membran Modülleri	7
2.4. Membran Biyoreaktörler (MBR).....	7
2.4.1. MBR konfigürasyonları.....	9
2.4.2. Membran kirlenmesi.....	10
2.5. Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktörler (MBBR).....	12
2.6. Hibrit Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktörler-Membran Biyoreaktörler (MBBR-MBR)	13
2.7. Arıtılmış Atık Suların Sulama Suyu Olarak Kullanımı.....	15
2.8. Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalardan Örnekler	18
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal.....	22
3.1.1. Giriş atıksuyunun özellikleri	22

3.1.2. Sistemde kullanılan biyofilm malzemenin özellikleri.....	23
3.1.3. Sistemde kullanılan membranların özellikleri.....	23
3.1.4. Hibrit hareketli yataklı MBR sisteminin ekipmanları	24
3.1.5. Deneysel çalışmalar için yapılan analizlerde kullanılan cihazlar.....	28
3.2. Yöntem	28
3.2.1. Yapılan analizler ve ölçülen parametreler	28
3.2.2. Pilot ölçekli MBR sisteminin düzeneği	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	32
4.1. Sistemin Karbonlu Organik Madde Giderim Performansı.....	32
4.2. AKM Konsantrasyonu Değişimi	35
4.3. TOK Konsantrasyonu Değişimi	37
4.4. TN Konsantrasyonun Değişimi	39
4.5. Nitrat Konsantrasyonu Değişimi	41
4.6. Aktif Güç Tüketimi	43
4.7. TMB	44
4.8. Akı/TMB	45
4.9. SAR (Sodyum Adsorpsiyon Oranı) Değeri.....	46
4.10. pH	47
4.11. Elektriksel İletkenlik	48
4.12. Bulanıklık	49
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	santigrat derece
µm	mikrometre
µS	mikroSiemens
C/N	karbon/azot
cm	santimetre
dk	dakika
h	saat
kPa	kilopascal
lt	litre
m	metre
m ²	metrekare
m ³	metreküp
mbar	milibar
meq	miliekivelan
mg	miligram
ml	mililitre
mm	milimetre
NH ₄ ⁺	amonyum
NH ₄ ⁺ -N	amonyum azotu
NTU	bulanıklık
PO ₄ ⁻³	fosfat
SO ₄ ⁻²	sülfat
ΔC	konsantrasyon farkı
ΔE	elektriksel potansiyel farkı
ΔP	basınç farkı
ΔT	sıcaklık farkı
Θ _c	çamur yaşı

Kısaltmalar

AKM	askıda katı madde
BOİ ₅	biyolojik oksijen ihtiyacı
EPS	hücre dışı polimerik madde
Hibrit	MBBR-MBR hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör
HYMBR	hareketli yataklı membran biyoreaktör
KOİ	kimyasal oksijen ihtiyacı
MBBR	hareketli biyofilm reaktör
MBR	membran biyoreaktör
MF	mikrofiltrasyon
MLSS	karışık sıvı süspanse katı madde
NF	nanofiltrasyon
RO	ters osmoz
SAR	sodyum adsorpsiyon oranı
SMP	çözünür mikrobiyal ürünler
TKOİ	toplam kimyasal oksijen ihtiyacı
TMB	transmembran basıncı
TN	toplam azot
TOK	toplam organik karbon
UF	ultrafiltrasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atık su arıtma tesisi	3
Şekil 2.2. Membran prosesinin şematik gösterimi	5
Şekil 2.3. Por büyüklüklerine göre membran proseslerden madde geçişi	6
Şekil 2.4. MBR akım şeması	8
Şekil 2.5. Harici ve batık MBR konfigürasyonları	9
Şekil 2.6. MBBR reaktör sistemi	12
Şekil 2.7. MBMBR akım şeması	13
Şekil 3.1. Sistemde kullanılan membran modülü	24
Şekil 3.2. Sistemde kullanılan blower	25
Şekil 3.3. Vakum pompası	25
Şekil 3.4. Çift yönlü debimetre	26
Şekil 3.5.a. Sistemin ön arıtım üniteleri	27
Şekil 3.5.b. Sistemin genel görünüşü	27
Şekil 3.6. Pilot ölçekli sisteme ait genel akış şeması	29
Şekil 3.7. Sistemin otomasyon kontrol sistemi	30
Şekil 3.8. Sistem kontrol odası ve PLC panonun fotoğrafı	31
Şekil 4.1. Giriş tankında ölçülen TKOİ değerleri	33
Şekil 4.2. Hareketli yataklı MBR tankında ölçülen TKOİ değerleri	33
Şekil 4.3. MBR çıkış tankında ölçülen TKOİ değerleri	34
Şekil 4.4. TKOİ giderim verimlerin değeri	34
Şekil 4.5. Giriş tankında ölçülen AKM değerleri	36
Şekil 4.6. Hareketli yataklı MBR tankında ölçülen AKM değerleri	37
Şekil 4.7. Giriş tankında ölçülen TOK değerleri	38
Şekil 4.8. Çıkış tankında ölçülen TOK değerleri	38
Şekil 4.9. TOK giderim verimi değerlerinin zamanla değişimi	39
Şekil 4.10. Giriş tankından ölçülen TN değerleri	40
Şekil 4.11. Çıkış tankından ölçülen TN değerleri	40
Şekil 4.12. TN giderim verimi değerleri	41
Şekil 4.13 Giriş tankında ölçülen NO_3^- değerleri	42

Şekil 4.14. Çıkış tankında ölçülen NO_3^- değerleri	43
Şekil 4.15. MBR tankında tüketilen aktif güç miktarı	44
Şekil 4.16. MBR tankında TMB değerleri	45
Şekil 4.17. MBR tankında Akı/TMB değerleri	46
Şekil 4.18. SAR değerleri	47
Şekil 4.19. Çıkış tankında ölçülen pH değerleri	48
Şekil 4.20. Çıkış tankından ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri	49
Şekil 4.21. Çıkış tankında ölçülen bulanıklık değerleri	50
Şekil 5.1. Kirlenen ve mekanik olarak temizlenmiş membranların görünümü	53
Şekil 5.2. Kış şartlarında pilot ölçekli MBR tesisi	54
Şekil 5.3. MBR sisteminin taşması sonrası oluşan görüntüsü	54
Şekil 5.4. Atıksu alma dalgıç pompasının arızalanması	55
Şekil 5.5. Vakum pompasının arızalanması	55
Şekil 5.6. Rögarın tıkanması	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Sürücü kuvvetlerine göre membran çeşitleri	5
Çizelge 2.2. Batık ve harici MBR'lerin kıyaslanması	10
Çizelge 2.3. Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atık suların sınıflandırılması	16
Çizelge 2.4. Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi.....	17
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan giriş suyunun değerleri	22
Çizelge 3.2. Sistemin işletme evreleri	23
Çizelge 3.3. Biyofilm malzemenin özellikleri	23
Çizelge 5.1. Çıkış suyunun ortalama değerleri	52

1. GİRİŞ

Su, canlıların yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmeleri için en önemli kaynaklardandır (Eroğlu 2008).

Dünyada bulunan suların %97'si tuzlu su olup bunun büyük bir kısmı denizlerden ve okyanuslardan oluşmaktadır. Geriye kalan %3'lük kısım ise tatlı sudur ve bu oranın yaklaşık %0,3'lük kısmı ise insanların kullanabileceği su miktarıdır.

Artan nüfusla birlikte temiz su kaynaklarının kullanımı da git gide artacaktır. Özellikle yiyecek tüketiminin artması tarım alanlarında çok büyük bir sıkıntı teşkil etmiş olacaktır. Bu yüzden tarımın sulama suyuna olan ihtiyacını gidermek için evsel atık suların geri kazanımı daha da büyük bir önem taşımaktadır (Kukul vd 2007).

Su kaynaklarının yetersiz olması ve tüketiminin artması sebebiyle atık suların geri kazanımı gerekmektedir. Bundan dolayı atık suların arıtımı için çeşitli arıtım teknolojilerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Atık su arıtımı için konvansiyonel arıtma tesislerinin büyük alan ihtiyacının olması, işletiminin zor olması gibi problemlerin yaşanmasından dolayı yeni çevre teknolojileri arayışına girmesine sebep olmuştur.

Son zamanlarda su ve atık su arıtımında membran teknolojileri önemli gelişmeler kat etmiştir ve dünya çapında membran teknolojilerinin uygulanabilirliği giderek artmıştır. İşletiminin kolay olması ve alan gereksiniminin az olması gibi birçok nedenden dolayı tercih edilmektedir.

Hibrit hareketli yataklı biyofilm reaktörler-membran biyoreaktörler (MBBR-MBR) sisteminin giderek popülaritesi artmaktadır. Bunun sebebi ise membran performansının en iyi olmasıdır (Yang *et al.* 2009a; Duan *et al.* 2013; Luo *et al.* 2015). Hibrit MBBR-

MBR, MLSS konsantrasyonunu azaltır ve membran kirlenmesinin önüne geçmektedir (Yang *et al.* 2009).

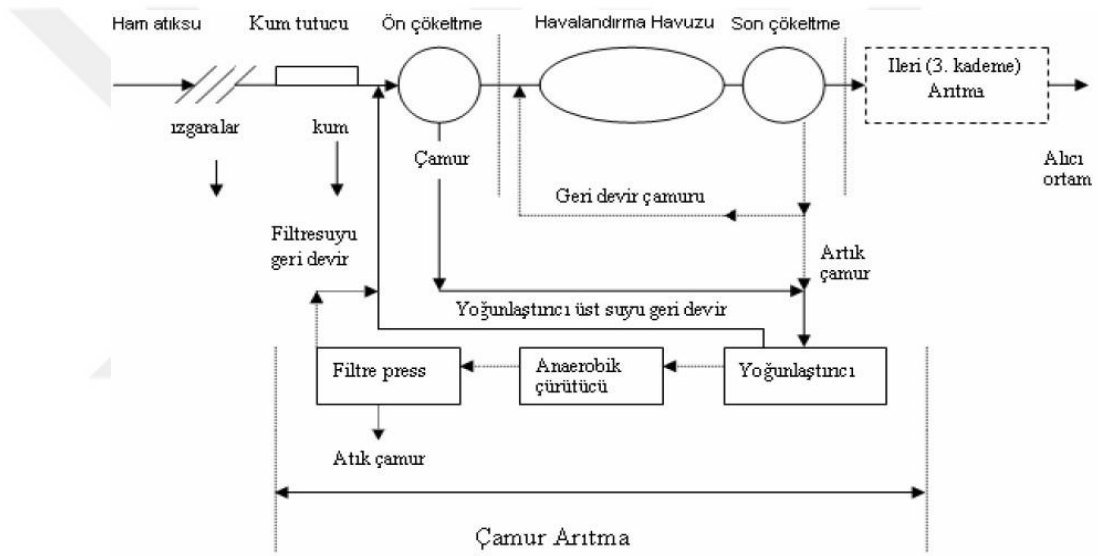
Bu çalışmada, pilot ölçekli hazırlanan klasik MBR, hareketli ve sabit yataklı biyofilm destekli hibrit MBR'nin üçlü sisteminden biri olan hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör ile evsel atık suyun arıtımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör ile arıtılan atık suyun sulama suyu kriterleri açısından incelenmesi araştırılmıştır.

Çalışmanın amacı, hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör (MBBR-MBR) ile düşük şiddetli evsel atık suların yüksek hızda arıtılarak sulama suyu olarak kullanılabilirliğine yönelik araştırılmasıdır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Atık Suların Arıtılması

Suların kirlenmesi en önemli çevre problemlerinden biridir. Bu yüzden atık sular alıcı ortamlara verilmeden önce iyi bir şekilde arıtmadan geçmesi gerekmektedir (Eroğlu 2008).



Şekil 2.1. Atık su arıtma tesisi (Samsunlu 2005)

2.1.1. Fiziksel arıtım

Atık suların içerisindeki kirletici maddelerin, kendi ağırlıklarıyla veya yüzebilen maddelerin sudan uzaklaştırılması işlemidir.

Prosesler: Izgaralar, kum tutucular, elekler, dengeleme havuzları, yüzdürme sistemleri, çöktürme havuzları.

2.1.2. Kimyasal arıtım

Çökebilir veya koloidal boyuttaki taneciklerin çeşitli kimyasal maddelerin ilavesiyle çökebilir haline getirip sudan ayırma işlemidir.

Prosesler: Nötralizasyon, flokülasyon, koagülasyon.

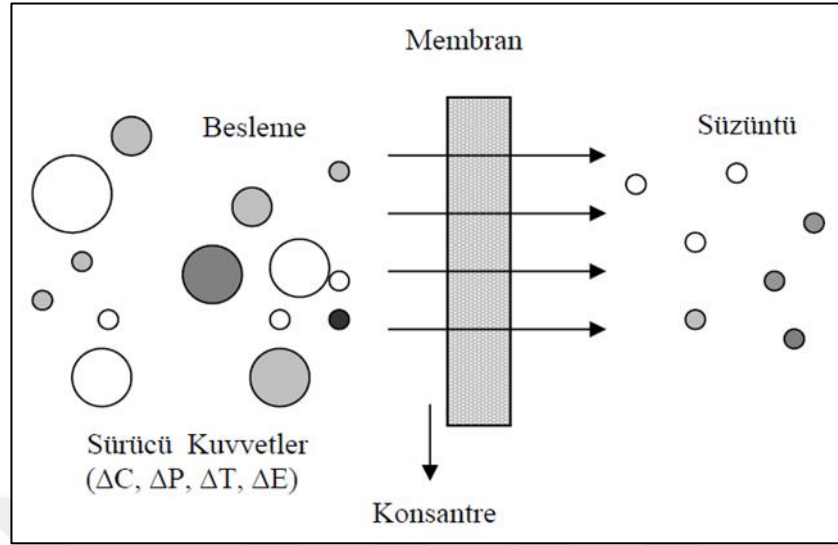
2.1.3. Biyolojik arıtım

Atık suyun içinde bulunan askıda veya çözünmüş organik maddelerin bakterilerin yardımıyla atık sudan giderme işlemidir.

Prosesler: Aktif çamur sistemleri, biyofilm sistemleri, stabilizasyon sistemleri, havalandırma lagünler, damlatmalı filtreler.

2.2. Membran Sistemleri

Membran iki faz arasında seçicilik yapan bazı maddelerin geçişine izin vermezken bazı maddelerin geçişine izin veren yarı geçirgen bir malzemedir. Membran filtrasyonu; askıda katı maddelerin, partikül maddelerin, çözünmüş maddelerin ayrımını yapan bir yöntemdir.



Şekil 2.2. Membran prosesinin şematik gösterimi (Kaleli 2006)

Filtrasyon sırasında besleme bölgesinden, besleme çözeltisi sürücü kuvvetler etkisiyle membrandan geçerken iki akıma ayrılırlar. Bunlar membrandan geçen kısma süzüntü akımı, membrandan geçemeyen kısma ise konsantre akımı denir (Koyuncu 2001).

Membranlar sürücü kuvvetlerine göre dört gruba ayrılır. Bunlar; konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve elektriksel potansiyel farklılığıdır. Membran proseslerinde kullanılan sürücü kuvvet genellikle basınçtır. Membran proseslerin sürücü kuvvetlerine göre sınıflandırılmaları Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

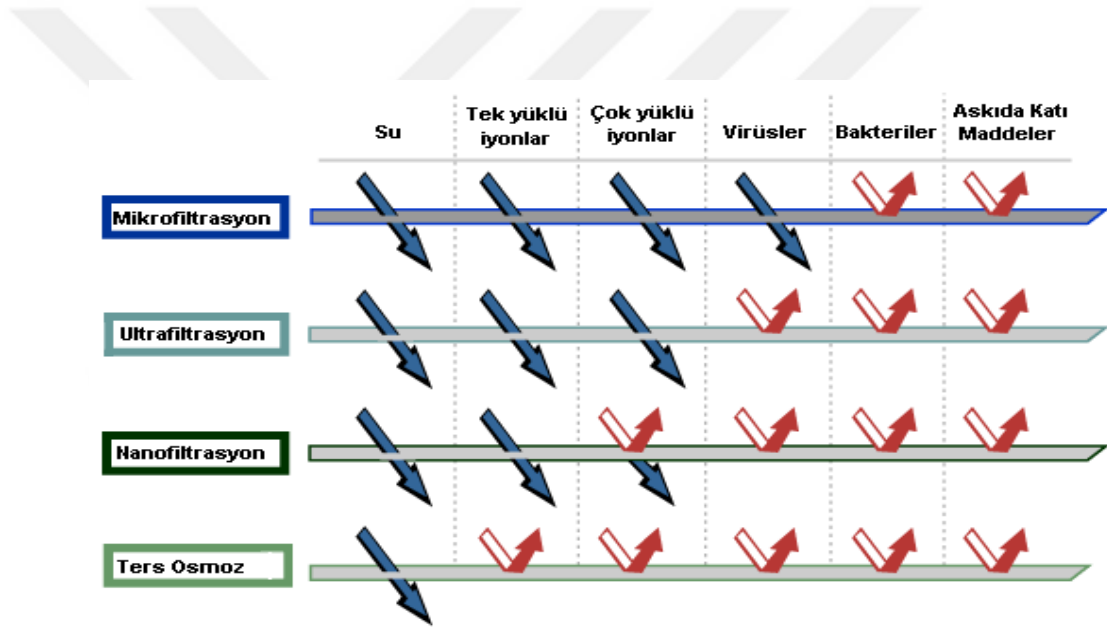
Çizelge 2.1. Sürücü kuvvetlerine göre membran çeşitleri (Kop 2016)

Membran prosesi	Besleme fazı	Süzüntü fazı	Sürücü kuvvet
Mikrofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	Basınç
Ultrafiltrasyon	Sıvı	Sıvı	Basınç
Nanofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	Basınç
Ters osmoz	Sıvı	Sıvı	Basınç
Gaz ayırma	Gaz	Gaz	Basınç
Diyaliz	Sıvı	Sıvı	Konsantrasyon
Osmoz	Sıvı	Sıvı	Konsantrasyon

Çizelge 2.1. (devam)

Pervaporasyon	Sıvı	Gaz	Basınç
Elektrodiyaliz	Sıvı	Sıvı	Elektriksel potansiyel
Termo- osmoz	Sıvı	Sıvı	Sıcaklık/Basınç
Membran distilasyon	Sıvı	Sıvı	Sıcaklık/Basınç

Membranlar gözenek boyutuna göre dört gruba ayrılır. Bunlar, mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (RO)'dur.



Şekil 2.3. Por büyüklüklerine göre membran proseslerden madde geçişi (Akpınar 2014)

2.2.1. Mikrofiltrasyon

Gözenek boyutları 0,1–10 µm arasındadır. Bu boyuttan küçük olan maddelerin geçişine izin verilirken, bu boyuttan büyük olan maddelerin geçişine izin verilmemektedir.

2.2.2. Ultrafiltrasyon

0,001 – 1 µm arasında gözenek boyutuna sahiptir. Ayırma mekanizması mikrofiltrasyon

gibi eleme mekanizması olmakla birlikte ayrılacak maddenin şekli de ayırma şeklini etkilemektedir (Kaleli 2016).

2.2.3. Nanofiltrasyon

Gözenek boyutları 0,001 μm 'den büyük olan maddelerin gideriminde kullanılır. Nanofiltrasyon, ters osmoz ile kıyaslandığı zaman düşük basınçta çalıştıkları için düşük kalitede çıkış suyu elde edilmektedir (Kop 2016).

2.2.4. Ters osmoz

Gözenek boyutları 0,001 μm 'den küçük olan maddelerin uzaklaştırılmasında kullanılır.

2.3. Membran Modülleri

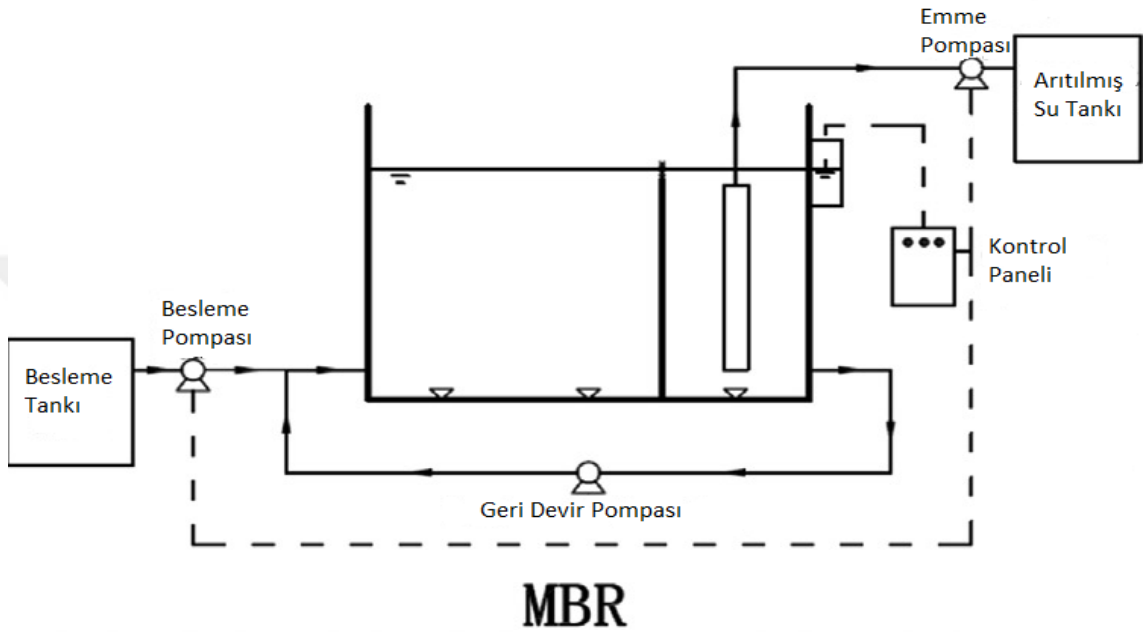
Membranlar uygulamaları esnasında modül olarak adlandırılan cihazlara yerleştirilmektedirler. Modüller, pratikte kullanılan ve membranların değişik şekillerde düzenlendiği tarzlardır. Ticari olarak kullanılan ve en çok tercih edilen membran modülleri;

- Spiral sargı modülü,
- İçi boş lif modülü,
- Kapiler modülü,
- Levha – çerçeve modülü,
- Tübüler modülü.

2.4. Membran Biyoreaktörler (MBR)

Membran biyoreaktör (MBR), membran teknolojileriyle biyolojik arıtımının bileşimiyle oluşan bir prostestir. MBR son 30 yıldan beri çok iyi gelişmekte olan bir teknolojidir

(Cho *et al.* 2011; Malaeb *et al.* 2013; Habib *et al.* 2017). MBR atık su arıtımı ve yeniden kullanımı için yenilikçi ve umut verici bir seçenek olarak kullanılmaktadır (Rahimi *et al.* 2010).



Şekil 2.4. MBR akım şeması (Fu *et al.* 2015)

MBR teknolojisi atık suyun yeniden kullanımı ve su niteliğinin gelişmesinde katkıda bulunmaktadır (Rahimi *et al.* 2010). Bu teknolojinin işletimi kolay ve az yer kaplamakta olup tek bir basamakta atık sudan çoğu kirleticiler giderilmektedir (Guo *et al.* 2008; Rahimi *et al.* 2010).

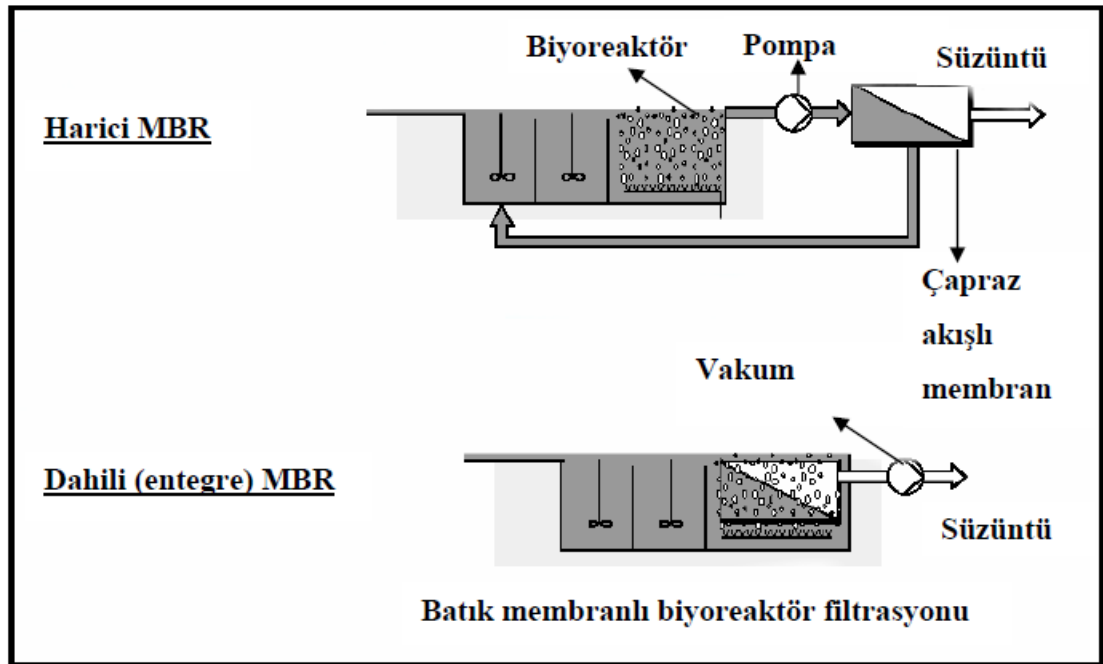
MBR uzun çamur yaşı, düşük çamur üretimi, yüksek MLSS konsantrasyonu, yüksek azot giderimi ve küçük alan ihtiyacı gereksinimi olan hem evsel hem de endüstriyel atık su arıtma teknolojisi için en iyi sistemdir (Cho and Fane 2002; Judd 2008; Cho *et al.* 2011; Habib *et al.* 2017).

Havalandırma, MBR'nin tasarım ve işletiminde önemli bir parametredir. Havalandırma biyolojik arıtımı yapmaktadır. Ayrıca membranı temizlemesinde yardımcı olmaktadır. Hava temizlemesi, membran yüzeyi boyunca çapraz akış şartlarında oluşan batık MBR

için gerekmektedir. Membranda oluşan kek tabakasını azaltmaktadır. Havalandırma, MBR işletiminin tüm enerji ihtiyacının hemen hemen %50'sini içermektedir (Gil *et al.* 2010; Rahimi *et al.* 2010). Bu yüzden MBR proseslerinde havalandırmayı optimize etmek çok önemlidir (Rahimi *et al.* 2010).

2.4.1. MBR konfigürasyonları

Biyoreaktörde membranların işletimi için 2 MBR konfigürasyonları vardır (Guerra 2010). Bunlar harici MBR ve batık MBR'dir. Harici MBR basınçlı filtrasyon tarafından yapılırken, biyoreaktör içinde bulunan batık MBR ise doğrudan vakumla yapılmaktadır (Radjenović *et al.* 2007).



Şekil 2.5. Harici ve batık MBR konfigürasyonları (Yiğit 2007)

Atık su arıtımı için işletim maliyeti düşük olması sebebiyle batık MBR tercih edilmektedir. Reaktör tabanından difüzörlerle verilen kaba hava kabarcıklı havalandırma ile biyokütlenin oksijen ihtiyacını sağlamaktadır. Bunun yanında kaba

hava kabarcıkları, membran yüzeyini temizler ve bu şekilde kısmen kirliliğin giderilmesi sağlanmaktadır.

Batık MBR, harici MBR konfigürasyonlarından daha az enerji gerekmektedir (Guerra 2010).

Çizelge 2.2. Batık ve harici MBR’lerin kıyaslanması (Kop 2016)

Batık MBR	Harici MBR
Reaktörün içine yerleştirilir.	Reaktör dışına yerleştirilir.
Daha düşük akı	Daha yüksek akı
Daha yüksek hava maliyeti	Daha düşük hava maliyeti
Daha az temizleme ihtiyacı	Daha sık temizleme ihtiyacı
Daha düşük işletme maliyeti	Daha yüksek işletme maliyeti
Daha yüksek sermaye	Daha düşük sermaye
Daha düşük sıvı pompalama maliyeti	Daha yüksek sıvı pompalama maliyeti

Harici MBR, filtrasyonu sürdürebilmesi ve yüksek basıncı sağlamak için geri devir pompası gerekmektedir. Harici MBR, batık MBR konfigürasyonlarından daha yüksek süzüntü akımı işletme problemini oluşturmaktadır. Başka bir deyişle, harici MBR’deki yüksek akım daha fazla kirliliğe sebep olmaktadır. İşletim şartlarında harici MBR konfigürasyonları her zaman pompalama enerji-akım arasında bir dengeyi gerektirmektedir. Dolayısıyla batık MBR konfigürasyonları ekonomik olarak daha az cazibeli olmaktadır (Guerra 2010).

2.4.2. Membran kirlenmesi

Membran kirlenmesi MBR’nin uygulamalarını geniş bir şekilde sınırlandırmaktadır (Guo *et al.* 2012; Habib *et al.* 2017). Karışık çamur sıvısı membran tıkanmasının asıl sebebidir (Wu *et al.* 2006; Habib *et al.* 2017).

Tıkanma membran kirlenmesinin önünü açmaktadır ve sonuç olarak yüksek TMB ve düşük akı MBR işletimini zorlaştırmaktadır. Membran tıkanması, porlar tıkandığı için meydana gelir ve bunun sonucunda kek tabakası oluşmaktadır (Habib *et al.* 2017).

Kalın ve gözeneksiz kek tabakası şeklinde oluşmasından dolayı katı süspansiyonda ipliksi bakterilerinin aşırı büyümesi membran kirlenmesinin sonucu olmaktadır. Membran filtrasyonunda çamur floklarının birikimi 2 faktöre bağlıdır;

- Emme kuvveti TMB tarafından ortaya çıkması,
- Kesme kuvveti havalandırma tarafından ortaya çıkması (Meng *et al.* 2006b; Yang *et al.* 2008).

İpliksi bakteriler düzensiz yapılar olduğu için çamur flokları emme kuvvetiyle membran yüzeyinde kolaylıkla birikmektedir (Yang *et al.* 2008).

Membran kirlenmesi eğiliminde biyo taşıyıcıların etkileri şu şekilde sınıflandırılır;

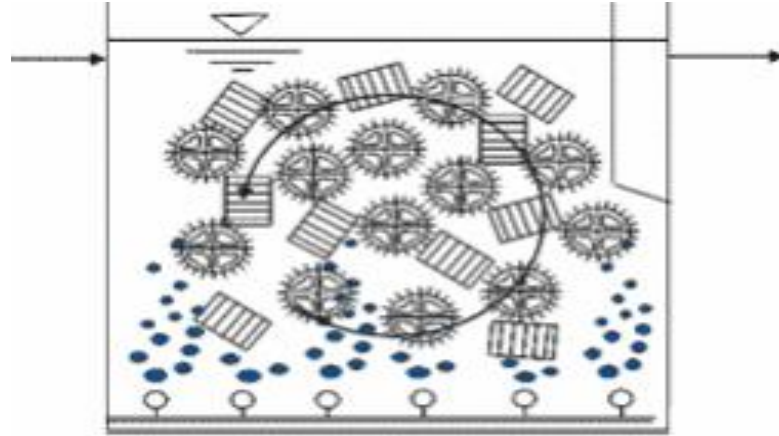
- Askıda katı süspansiyonun karakteristiğinde uygulanan fiziko-kimyasal etkiler.
- Membran yüzeyinde uygulanan mekanik etkiler (Fu *et al.* 2015).

Biyo taşıyıcıların eklenmesiyle ilgili Lee *et al.* (2006)'ya göre membran kirliliğinde sadece MLSS konsantrasyonu azalmaz aynı zamanda membran yüzeyiyle çarpıştırmayı oluşturarak azaltmaktadır. Bunun aksine biyokütle karakteristiğinde biyo taşıyıcıların fiziko-kimyasal etkilerini bulan Hu *et al.* (2012)'ye göre membran kirliliğini azaltmasında katkıda bulunmaktadır. Oysaki mekanik etki göz ardı edilebilmektedir (Fu *et al.* 2015).

2.5. Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktörler (MBBR)

Şiddetli atıksu miktarı ve ötrofikasyonun artmasıyla birlikte dünya genelinde nütrient gibi konvansiyonel kirleticilerin giderilmesiyle ilgili çalışmalar artmıştır. Bu çalışmaların sonucunda hareketli yataklı biyofilm reaktörler gibi bağlı büyüme reaktörleri atık su arıtımı için geliştirilmiştir (Zhang *et al.* 2016).

MBBR prosesleri 1980'lerin sonu 1990'ların başında Norveç'te biyofiltrasyon proseslerin en iyi özelliğine sahip ve konvansiyonel aktif çamur prosesi temel alınarak gerçekleştirilmiştir (Ødegaard *et al.* 1994; Chen *et al.* 2008; Zhang *et al.* 2016). Bu teknoloji Norwegian Şirketi'nin Kaldness MiljØteknologi tarafından geliştirilmiş olup ve birçok ülkede kentsel ve endüstriyel atık suların arıtımında uygulandığı bilinmektedir (Chrispim *et al.* 2016). Son yapılan çalışmalarla birlikte MBBR prosesinin basit ve etkili bir teknoloji olduğu anlaşılmış, 2009'dan bu yana 50 ülkede 600'den fazla bu prosesin uygulaması yapılmıştır (Chen *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2016).



Şekil 2.6. MBBR reaktör sistemi (Lariyah *et al.* 2016)

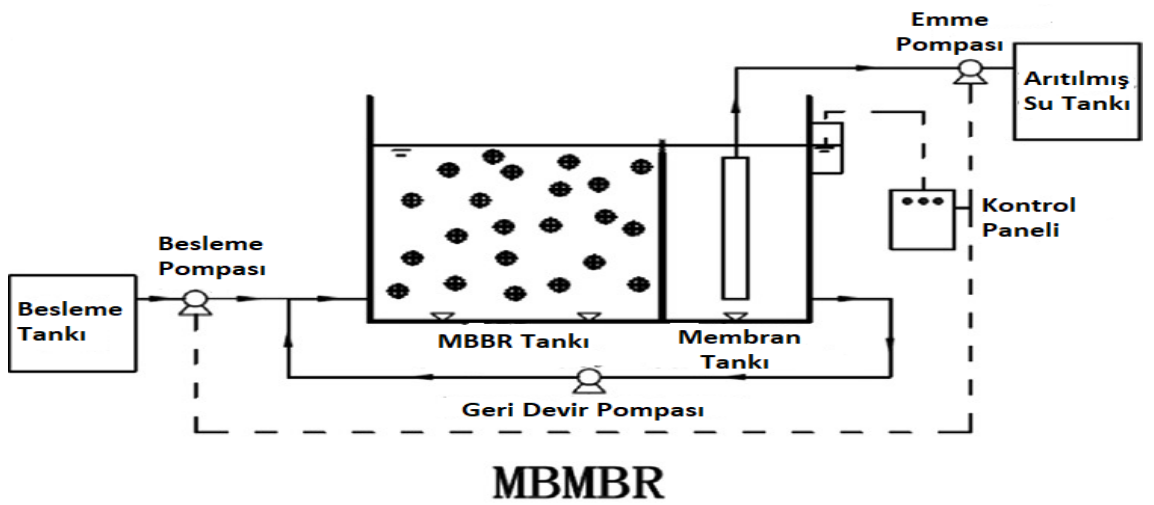
MBBR prosesi havalandırma ve mekanik karıştırıcılar tarafından sağlanan minimum enerjiyle askıda tutmak için suya yakın yoğunluğa sahip biyofilm dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Biyofilm denilen karmaşık mikroorganizma topluluğu ise alg, fungi, bakteri ve protozoa/metazoa içeren mikroorganizmaların herhangi bir türünü

kapsamaktadır (Briones and Raskin 2003; Lariyah *et al.* 2016). Bu çoklu mikroorganizmaların yapışması ve büyümesi için bir yüzey gerekmektedir. MBBR sistemi, biyofilm dolgu malzemesi ve biyofilm için bu ortamı sağlamaktadır (Lariyah *et al.* 2016).

MBBR sistemleri diğer konvansiyonel sistemlerle kıyaslandığı zaman birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar, yüksek biyokütle konsantrasyonu, yüksek KOİ yükleme, uzun süreli çamur yaşları, düşük hidrolik kalış süresi, yüksek hacim giderim oranları, çamur devri daimin olmaması, küçük alan ihtiyacı, çamur şişme probleminin görülmemesidir (McQuarrie and Boltz 2011; Leyva-Díaz *et al.* 2013; Zhang *et al.* 2016).

2.6. Hibrit Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktörler-Membran Biyoreaktörler (MBBR-MBR)

Son yıllardan mikro kirleticilerin saptanması ve mikrokirleticilerin sucul çevrede ve insan sağlığı açısından zararlı etkilere sahip olduğu için yaşanan endişeler giderek artmıştır. Aktif çamur prosesine alternatif olarak MBBR teknolojisi mikro kirleticilerin giderimi için de uygun bir teknolojidir (Luo *et al.* 2014; Luo *et al.* 2015).



Şekil 2.7. MBMBR akım şeması (Fu *et al.* 2015)

MBBR teknolojisi mikro kirleticilerin giderimi için yaygınlaşan bir teknoloji olurken, MBBR uygulamalarında atık sular yüksek derecede arıtıldığı zaman çamur çökmesinin azalması büyük bir endişeye sahip olmaktadır. Bu durum da katı ayırma işlemleri için çöktürme havuzları kullanıldığında işletim problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu problemi çözmek için çeşitli hibrit sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, koagülant eklenmesi, membran filtrasyonu veya flotasyonlu katı ayırma prosesleridir. Bunlar MBBR'ın temel modifikasyonlarını oluşturmaktadır. (Leikness *et al.* 2006; Luo *et al.* 2015).

Tüm bu modifikasyonlar arasında, MBBR ile membran teknolojisini birleştirilmesiyle oluşan bu sisteme Hibrit MBBR-MBR (hareketli yataklı membran biyoreaktör) denilmektedir. Oluşan bu sistemin giderek popülaritesi artmaktadır. Bunun sebebi membranlı sistemin performansının en iyi olmasıdır (Yang *et al.* 2009a; Duan *et al.* 2013; Luo *et al.* 2015).

Hibrit MBBR-MBR teknolojisi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar şu şekildedir;

- Daha az çamur üretimi
- Yüksek organik yükleme hızı
- MLSS konsantrasyonunun azaltılması ve bunun sonucunda
- Membran kirlenmesinin azalması
- Yüksek biyokütle oluşumundan dolayı eş zamanlı nitrifikasyon-denitrifikasyon gerçekleşmekte ve fosfor giderimi sağlanmaktadır (Rahimi *et al.* 2011).

Hibrit MBBR-MBR teknolojisi bahsedildiği gibi MBR'ların en önemli sorunu olan membran kirlenmesini biyofilm dolgu malzemesi katkısı ile azaltılabilmektedir. Lee *et al.* (2006)'ya göre biyofilm dolgu malzemelerinin eklenmesi membran kirliliğinde sadece MLSS konsantrasyonunu azaltarak katkı sunmaz aynı zamanda membran yüzeyiyle çarpışarak kirlilik oluşumunu da azaltır. Biyokütle karakteristiğinde biyo taşıyıcıların fiziko-kimyasal etkilerini inceleyen Hu *et al.* (2012)'ye göre de biyofilm

dolgu malzemeleri membran kirliliğinin azaltılmasında katkıda bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda ise bu mekanik etki göz ardı edilebilmektedir (Fu *et al.* 2015).

2.7. Arıtılmış Atık Suların Sulama Suyu Olarak Kullanımı

Arıtılan atık sular çeşitli şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanımlar, endüstriyel, tarımsal, yer altı suyunun beslenmesi, park ve bahçe sulaması gibi suyun geri kazanımı mümkündür. Diğer bir kullanımı ise sulama suyu olarak kullanımıdır.

Bitkilerin gelişebilmesi için doğal yollarla karşılanamayan suyun toprağa verilme işlemine sulama denilmektedir. Bir başka deyişle, toprağın yapısına zarar vermeden su kaynaklarından verimli bir şekilde yararlanılarak bitkilerin köklerine yapay yollarla su ihtiyacının karşılanması olayının adı sulamadır (Okuroğlu ve Yağanoğlu 2013).

Ancak artan nüfus nedeniyle daha fazla tarımsal faaliyetin yapılmak zorunda kalınması sulama suyuna olan ihtiyacı artırmaktadır. Ayrıca sulama suyu olarak kullanılacak olan su kaynaklarının miktarı da kısıtlı olduğundan atık suların arıtılarak yeniden kullanılması artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu konu ile ilgili olarak 27527 sayılı resmî gazetede yayımlanan “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde” atık suların arıtılarak sulama suyu olarak kullanılması durumunda yerine getirilmesi gereken kriterler belirtilmiştir. Bu tebliğin EK7 Tablo E7.1 ve E7.2’de verilen sulamada tekrar kullanılacak arıtılmış atık sularda aranan özellikler bu tezde Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atık suların sınıflandırılması

Geri kazanım türü	Arıtma tipi	Geri kazanılmış suyun kalitesi ^a	İzleme periyodu	Uygulama mesafesi ^b
Sınıf A				
a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri ¹				
b-Kentsel alanların sulanması				
a) Yüzeysel ve yağmurlama sulama ile sulanan ve ham olarak direkt olarak yenilebilen her tür gıda ürünü	-İkincil arıtma ^c -Filtrasyon ^d -Dezenfeksiyon ^e	-pH=6-9 -BOİ ₅ <20 mg/L -Bulanıklık <2 NTUf -Fekal koliform: 0/100 mL ^{g,h} -Bazı durumlarda, spesifik virüs, protozoa ve helmint analizi istenebilir. -Bakiye klor> 1 mg/L ⁱ	-pH: Haftalık -BOİ ₅ : Haftalık -Bulanıklık: Sürekli -Koliform: günlük -Bakiye klor: sürekli	İçme suyu temin edilen kuyulara en az 50 m mesafede
b) Her türlü yeşil alan sulaması (Parklar, golf sahaları vb.)				
Açıklamalar:				
-Tarımsal sulamada tavsiye edilen ağır metal analizlerine dikkat edilmelidir.				
-Standartları sağlamak üzere filtrasyon öncesinde koagülant ilavesi yapılabilir.				
-Geri kullanılacak arıtılmış atıksu renksiz ve kokusuz olmalıdır.				
-Virüs ve diğer parazitlerin yok edilmesi için daha uzun dezenfeksiyon temas süreleri kullanılabilir.				
-Arıtılmış atıksu dağıtım sisteminde (en son uygulama noktasında) bakiye klor değeri 0.5 mg/L'nin üzerinde olmalıdır.				
-Virüs ve diğer parazitlerin yok edilmesi için daha uzun dezenfeksiyon temas süreleri kullanılabilir.				
-Yüksek nütrient içeriği besinleri büyüme aşamasında etkileyebilir.				
Sınıf B				
a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenen gıda ürünleri ^m				
b-Girişi kısıtlı sulama alanları				
c- Tarımsal sulama: Gıda ürünü olmayan bitkiler				
a) Meyve bahçeleri ve üzüm bağları gibi ürünlerin salma sulama ile sulanması	-İkincil arıtma ^c -Dezenfeksiyon ^e	-pH=6-9 -BOİ ₅ <30 mg/L -AKM <30 mg/L -Fekal koliform <200 ad/100 mL ^{g,j,k} -Bazı durumlarda, spesifik virüs, protozoa ve helmint analizi istenebilir. -Bakiye klor> 1 mg/L ⁱ	-pH: Haftalık -BOİ ₅ : Haftalık -AKM: günlük -Koliform: günlük -Bakiye klor: sürekli	İçme suyu temin edilen kuyulara en az 90 m mesafede.
b) Çim üretimi ve kültür tarımı gibi halkın girişinin kısıtlı olduğu yerler				
c)Otlak hayvanları için mera sulaması				Yağmurlama sulama yapılıyor ise halkın bulunduğu ortama en az 30 m mesafede

Çizelge 2.3. (devam)**Açıklamalar:**

- Tarımsal sulama için tavsiye edilen limitlerde gözönünde bulundurulmalıdır.
- Püstkürtmeli sulama yapılıyor ise AKM <30 mg/L olmalıdır.
- Yüksek nütrient içeriği besinleri büyüme aşamasında etkileyebilir.
- Süt hayvanlarının meralara girişi sulama yapıldıktan 15 gün sonra olmalıdır. Bu süre kısa olması gerektiği durumlarda, fekal koliform değeri en fazla 14 ad/100 mL olabilir.

^aAksi belirtilmedikçe, arıtılmış atıksu kalitesini belirtmektedir.

^bSu kaynaklarını ve dolayısıyla insanları arıtılmış atıksuyun etkisinden korumak için konuluş bir sınırlamadır.

^cİkincil arıtma, aktif çamur sistemleri, biyodisk, damlatmalı filtreler, stabilizasyon havuzları, havalandırma lagünleri vb içerebilir.

^dKum filtreleri veya mikrofiltrasyon ile ultrafiltrasyon gibi membran filtreler olabilir.

^eDezenfektant olarak klor kullanılması, diğer dezenfeksiyon yöntemlerinin de kullanımını kısıtlamaz.

^fTavsiye edilen bulanıklık değeri dezenfeksiyon öncesinde sağlanmalıdır. Hiç bir zaman 5 NTU'yu geçmemelidir. Bulanıklık yerine AKM'nin kullanıldığı durumlarda, AKM değeri 5 mg/L'nin altında olmalıdır.

^g7günlük ortalama değerleri karakterize eder.

^hFekal koliform değeri hiç bir zaman 14 ad/100 mL'yi geçmemelidir.

ⁱBakiye klor değeri 30 dk temas süresi sonrasındaki değeri karakterize etmektedir.

^jFekal koliform değeri hiç bir zaman 800 ad/100 mL'yi geçmemelidir.

^kStabilizasyon havuzları fekal koliform değerini dezenfeksiyon olmadan da sağlayabilir.

^lİleri arıtma uygulanmalıdır.

^mTicari olarak işlenen gıda ürünleri halka satılmadan önce patojen mikroorganizmaların öldürülmesi için fiziksel veya kimyasal bir işlemden geçirilen ürünlerdir.

Çizelge 2.4. Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi

Parametreler		Birimler	Kullanımında zarar derecesi		
			Yok (I. sınıf su)	Az – orta (II. sınıf su)	Tehlikeli (III. sınıf su)
Tuzluluk					
İletkenlik	µs/cm	<700	700-3000	>3000	
Toplam çözünmüş Madde	mg/L	<500	500-2000	>2000	
Geçirgenlik					
SAR _{Tad}	0-3	EC ≥ 0.7	0.7-0.2	< 0.2	
	3-6	≥ 1.2	1.2-0.3	< 0.3	
	6-12	≥ 1.9	1.9-0.5	< 0.5	
	12-20	≥ 2.9	2.9-1.3	< 1.3	
	20-40	≥ 5.0	5.0-2.9	< 2.9	
Özgül iyon toksisitesi					
Sodyum (Na)					
Yüzey sulaması	meq/L	<3	3-9	> 9	
Damlatmalı sulama	mg/L	<70	> 70		
Klorür (Cl)					
Yüzey sulaması	mg/L	<140	140 –350	> 350	
Damlatmalı sulama	mg/L	<100	> 100		
Bor (B)	mg/L	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0	

2.8. Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalardan Örnekler

Atık suların hibrit MBBR-MBR ile arıtımına yönelik literatür taraması yapıldığında birçok çalışmalar mevcuttur.

Leyva-Díaz *et al.* (2015c), çalışmalarında biri aerobik diğeri anaerobik 2 bölge için hibrit MBBR-MBR sistemlerinde araştırma yapmıştır. Bu çalışmada aerobik bölgesinde sadece dolgu malzemesinin olduğu ve dolgu malzemesinin %35 doluluk oranına sahip olduğu bildirilmiştir. Çalışmada hidrolik kalış süresi 18 saat ve toplam biyokütle konsantrasyonu 6500 mg/l civarında olup KOİ giderim verimi %87,98 ve TN giderim verimi %72,39 olarak belirlenmiştir. Duan *et al.* (2015a), doluluk oranının %30 ve hidrolik kalış süresinin 17 saat olan buna benzer bir çalışma yapmıştır. Ancak bu çalışmada biyo taşıyıcıların türü belirtilmemiştir. Bu çalışmada KOİ giderim verimi %97 olup bu giderim verimi Leyva-Díaz *et al.* (2015c) çalışmasındaki KOİ giderim veriminden daha yüksek elde edilmiştir. Ancak NH_4^+ -N giderim oranı her iki çalışmada %99'un üstündeydi.

Martín-Pascual *et al.* (2015a), hibrit MBBR-MBR sisteminde organik madde ve azotun giderilmesinde doluluk oranı, MLSS, hidrolik kalış süresi ve sıcaklık etkilerini araştırmışlardır. KOİ giderimi %87,4'den %95,98'e BOİ₅ giderimi %94,88'den %98,67'ye değişim göstermiştir. Bu değişimin sebebi MLSS, hidrolik kalış süresi ve sıcaklık etkilerinin artmasıyla ilgiliydi. Nitrifikasyon oranının %40,4'den %98,5'e değişim gösterdiği bu çalışmada, bu değişim sıcaklık ile artış göstermektedir. Doluluk oranının NH_4^+ -N giderimi üzerindeki etkisi sıcaklığın etkisiyle engellenmektedir.

Leyva-Díaz *et al.* (2015a) çalışmasında 2 hibrit MBBR-MBR sistemleri incelemişlerdir. Bu iki sistem 1 aerobik ve 1 anoksik bölge olmak üzere 2 kısma ayrılmıştır. Bu sistemlerin birinde aerobik bölgesinde biyo taşıyıcılar içermekte olup anoksik bölgede biyo taşıyıcılar bulunmamaktadır. Diğer sistemde ise hem aerobik bölgede hem anoksik bölgede biyo taşıyıcılar bulunmaktadır. Bu sistemlerde sadece aerobik bölgede bulunan biyo taşıyıcıların TN giderimi %56,58 olurken hem aerobik hem anoksik bölgede biyo

taşıyıcıların bulunduğu ise sistemde TN giderimi %54,84 olarak belirlenmiştir. Bu iki sistemde de KOİ (%87,05-%87,62) ve BOİ₅ (%98,58-%98,81) giderim verimleri aynı bulunmuştur.

Leyva-Díaz *et al.* (2013a), ortalama toplam biyokütle konsantrasyonu 3700 mg/lt ve hidrolik kalış süresinin 26,47 saat olan hibrit MBBR-MBR sistemi üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Bu sistemin KOİ giderim verimleri %90,97-%90,97 ve TN giderim verimleri %63,84-%67,34 olup bu giderim verimleri Leyva-Díaz *et al.* (2015a) çalışmasına göre çok yüksekti. Bunun sebebi organik ve amonyum yükleme hızlarının, 9 saatlik hidrolik kalış süresi için hesaplanan değerlerden daha düşük olmasıdır.

Cuevas-Rodríguez *et al.* (2015), hidrolik kalış süresinin 58,8 ve 76,32 saat ve MLSS konsantrasyonun 6390 mg/lt olan hibrit MBBR-MBR sisteminde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada KOİ giderim verimi %99,5'lik bir oran sağlamıştır. Bu oranın yüksek olmasının sebebi kolay bir şekilde asimile olan ve yavaş bir şekilde biyolojik parçalanmış substratların farklı heterotrofik mikroorganizmaların askıda biyokütlede ve bağlı biyokütlede gelişmesinden dolayıdır. İlaveten TN giderimi verimi %85,5 ile oldukça yüksek bulunmuştur. Bu değer yüksek olması şu şekilde açıklanmaktadır. Biyofilmin farklı bölgelerinde mikroorganizmalar büyümektedir. Biyofilmin en derin bölgelerinde denitrifikasyon, biyofilmin yüzeyinde ise nitrifikasyon işlemi gerçekleşmektedir. Bu nedenle azotlu maddeler eş zamanlı denitrifikasyon-nitrifikasyon ile giderilmektedir.

Guo *et al.* (2014) doluluk oranının %20 ve MLSS konsantrasyonun 10000 mg/lt ile hibrit MBBR-MBR sisteminde gözenekli polivinil klorür taşıyıcılar ile çalışma yapmışlardır. En iyi performansa sahip olan hibrit MBBR-MBR sisteminde eş zamanlı olarak KOİ ve TN giderim verimleri çalışıldı. Hibrit MBBR-MBR sisteminde, membran filtrasyonu ve biyofilm taşıyıcı malzemeler katkı sağladığı için KOİ giderim verimi %95'in üstündeydi. Ancak TN giderim verimi hibrit MBBR-MBR sisteminde %93 iken MBR'de %90'dı ve büyük bir fark olmadığı görülmüştür. Oluşan fark biyofilmin içinde

ve yüzeyinde eş zamanlı nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemleri gerçekleştiği için meydana gelmiş olabilir.

Yang *et al.* (2009a), hidrolik kalış süresinin 12 saat ve doluluk oranının %30 olan hibrit MBBR-MBR sistemi üzerinde çalışma yapmıştır. Bu sistemde askıda biyokütle ve bağlı biyokütlelerin etkileri bileştirilmesi organik karbon giderimini yükseltmiştir. Sistem %95,6 KOİ giderim verimiyle konvansiyonel MBR'e göre şok yüklemelere karşı daha dirençli bir performans sergilemiştir. NH_4^+-N ve TN giderim verimleri sırasıyla %80 ve %70 olup bu giderim verimleri konvansiyonel MBR'den yüksekti. Biyofilmin içine oksijen transferi sınırlı olması eş zamanlı nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemini gerçekleştirmesine yardımcı olmaktadır. Bu yüzden anoksik/anaerobik şartlar biyofilmin iç bölgesinde gerçekleşirken aerobik şartlarda biyofilmin dış tabakasında gerçekleşmektedir.

Luo *et al.* (2015)'e göre hibrit MBBR-MBR sistemi membran kirlenme eğilimini azaltabilir. Yaptıkları çalışmada TMB (transmembran basıncı) 89 gün işletim süresinde sadece 35 kPa'a ulaşmıştı. Hibrit MBBR-MBR'da çözünür mikrobiyal ürünlerin (SMP) konsantrasyonu düşük olduğundan bu değerin oluşması şaşırtıcı olmamıştır. Çoğu araştırmacı, yüksek SMP konsantrasyonun membran kirlenmesinin artmasına yol açtığı konusunda hemfikirdirler.

Di Trapani *et al.* (2015), membran kirlenmesinin giriş suyu C/N oranları ile hücre dışı polimer madde (EPS) artışının ilişkili olduğunu bulmuştur. MBR'de yüksek EPS konsantrasyonlarında kek tabakası direnci azalmaktadır. Kek tabakasının oluşumu ve por tıkanması membran kirlenmesinin temel sebebi olduğundan bu direnç hibrit MBBR-MBR sisteminden 5 kat düşüktür (Duan *et al.* (2015b)).

Literatür araştırılması yapıldığında genel olarak biyofilm malzemesinin %20 ile %30 arasında değişen doluluk oranıyla ve hidrolik kalış sürelerinin ise 9 ile 56 saat arasında değişimler gösteren çalışmalar yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada ise düşük şiddetli evsel atıksuların 45 dakika ile 3,3 saat arasında değişen daha düşük hidrolik kalış süresinde ve %50, %65 ve %80 gibi daha yüksek biyofilm dolgu malzemesi oranlarında sulama suyu amaçlı arıtılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışma evsel atıksuların arıtılarak sulama suyu olarak kullanılmasına yönelik üç adet pilot MBR sisteminden birisi olarak gerçekleştirilmiştir. Otomatik kontrollü pilot ölçekli olarak yapılan arıtma tesisinde klasik, hareketli ve sabit yataklı biyofilm destekli hibrit MBR sistemleri bulunmaktadır. Kurulan bu üçlü sistemden biri olan hareketli yataklı biyofilm destekli hibrit MBR sistemi ile evsel atık suların sulama suyu amaçlı arıtılması yaklaşık 12 ay boyunca incelenmiştir.

3.1.1. Giriş atıksuyunun özellikleri

Çalışmada kullanılan giriş suyunun karakterizasyonu Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de sistemin işletme verileri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan giriş suyunun değerleri

Parametre	Ortalama
TKOİ (mg/l)	210
ÇKOİ (mg/l)	53,8
BOİ ₅ (mg/l)	124,5
AKM (mg/l)	110,3
TOK (mg/l)	22,1
TN (mg/l)	24,1
NH ₄ ⁺ (mg/l)	13,9
pH	7,56
Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	541,5
Sıcaklık (°C)	17,8
PO ₄ ⁻³	5,52
SO ₄ ⁻²	39,8

Çizelge 3.2. Sistemin işletme evreleri

Tarih	Akı (lt/m ² h)	Hidrolik kalış süresi (h)	Çamur yaşı (gün)
09.03.2017-11.04.2017	5	3,33	∞
11.04.2017-20.05.2017	10	1,67	30
20.05.2017-07.06.2017	16	1,04	30
07.06.2017-18.06.2017	22	0,76	30
18.06.2017-31.08.2017	18	0,925	20
31.08.2017-05.09.2017	16	1,04	20
05.09.2017-05.10.2017	14	1,19	20
05.10.2017-20.11.2017	18	0,925	10
20.10.2017-23.11.2017	18	0,925	5

3.1.2. Sistemde kullanılan biyofilm malzemenin özellikleri

Kullanılan biyofilm malzemenin özellikleri Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir. Biyofilm malzemesinin belirli zamanlarda %50, %65 ve %80 oranında artırılmıştır.

Çizelge 3.3. Biyofilm malzemenin özellikleri

Ölçüler (mm)	Özgül Yüzey Alan (m ² /m ³)	Biyofilm oluşum süresi (gün)	Kullanım sıcaklığı (°C)	Ömrü (yıl)	Paket yoğunluğu (adet/m ³)
14.5-9.8	>800	5-15	<65	≥10	250000

3.1.3. Sistemde kullanılan membranların özellikleri

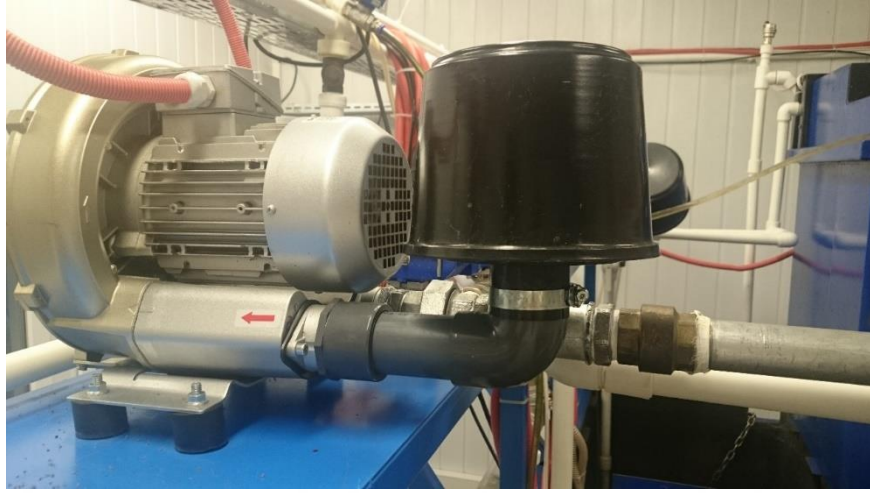
Sistemde kullanılan membranların gözenek çapı 0,04 µm olup PVDF hollow fiber malzemesinden yapılmıştır. Sistemde 2 tane membran modülü kullanıldı ve her birinin membran alanı 10 m²'dir.



Şekil 3.1. Sistemde kullanılan membran modülü (PVDF 0.04 µm, 10 m2 yüzey alanlı Hollow Fiber)

3.1.4. Hibrit hareketli yataklı MBR sisteminin ekipmanları

Blower, biyofilm tankına ve MBR tankına hava sağlamak için kullanılmaktadır. Mikroorganizmaların gerekli oksijeni kullanarak yaşamsal faaliyetlerine devam edebilmesi için MBR tanklarına hava verilmektedir. Sistemde havalandırma tankına hava üflemek için kullanılan blower Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Sistemde kullanılan blower

Vakum pompası, membrandan geçen suyu vakumlayarak çıkış arıtılmış temiz su tankına aktarılmasını sağlamaktadır. Üzerinde bulunan manometre ile basınç ölçümü yapılmaktadır. Vakum pompası Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Bu hat üzerinde bir adet basınç transmitteri de yer almaktadır. Ölçülen transmembran basınçları bilgisayara kaydedilmektedir. Bu basınç transmitterinin zaman zaman kalibrasyonu Şekil 3.3’de gösterilen yağlı vakum ölçer kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.3. Vakum pompası

Sistemde akının ölçümü bilgisayar ortamında otomatik olarak yapılmaktadır. Bunun için sisteme bir tane çift yönlü ölçüm yapabilen debimetre konulmuştur. Ölçülen debiler membran yüzey alanına bölünerek membran akıları hesaplanmıştır. İstenilen akı değeri vakum pompasının frekansları ayarlanarak sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bu arada membran trasnmembran basınç değerleri ise sürekli değişmekte ve bilgisayara kaydedilmektedir. Debi ölçümünde kullanılan çift yönlü debimetre Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



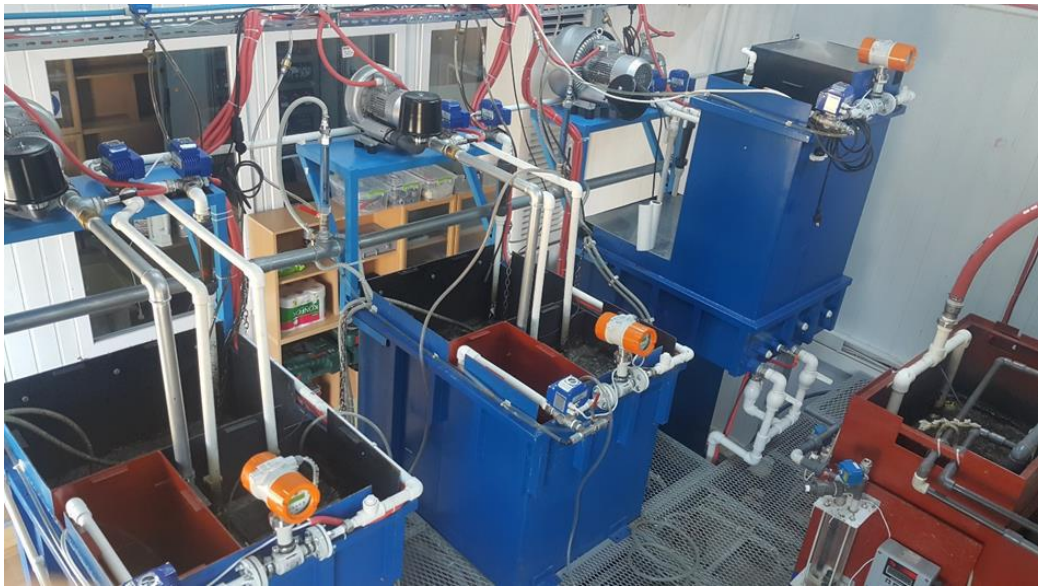
Şekil 3.4. Çift yönlü debimetre

Sistemin ön arıtım ünitesi ve genel görünüşü ise Şekil 3.5.a. ve Şekil 3.5.b’de gösterilmektedir. Bu noktada atıksu kanalizasyon hattından alınan ham evsel atıksu önce bir hidrosiklon kum tutucudan geçmekte daha sonra ise 3 mm çaplı döner tip ızgaraya gelmektedir. Bu ızgarada zamanla biriken katı maddeler nedeniyle yük kaybı artmakta ve yükselen su seviyesi, seviye sensörüne temas ettiğinde ızgarayı temizleyen burgu fırça redüktörlü bir motor vasıtasıyla harekete geçirilerek, ızgarada tutulan katı atıklar geri tarafta bulunan çöp kovaına boşaltılmaktadır.



Şekil 3.5.a. Sistemin ön arıtım üniteleri (kum tutucu + döner tambur elek)

Şekil 3.5.b’de gösterilen genel görünüşünde ise hareketli yatak bMBR sistemi ortadaki sistem olarak görülmektedir. Ön arıtmadan geçen evsel ham atıksu bir giriş tankına alınmakta ve sonrasında membran filtrasyonu ile azalan seviye değerlerine bağlı olarak bir dalgıç pompa yardımıyla hareketli yataklı MBR sistemine gönderilmektedir. Gerek ana giriş tankı gerekse de membran filtrasyon tankında bulunan seviye sensörleri sayesinde doldur boşalt şeklinde sisteme taze atıksu beslemesi yapılmıştır.



Şekil 3.5.b. Sistemin genel görünüşü

3.1.5. Deneysel çalışmalar için yapılan analizlerde kullanılan cihazlar

Pilot ölçekli hareketli yataklı MBR sisteminde giriş tankında hareketli ve çıkış MBR tanklarında günlük olarak analizler yapılmıştır. Bu analizlerden TOK (Toplam Organik Karbon) ve TN (Toplam Azot) analizi için SHIMADZU TOK cihazı, bulanıklık ölçümleri için Micro 100 Turbidimeter marka türbidimetre, KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), elektriksel iletkenlik ve pH değerlerinin ölçümleri için WTW Multi 340i, numunelerin anyon ve katyon konsantrasyonlarının ölçümü için DIONEX ICS-3000 ve ICS-1100 iyon kromatografisi kullanılmıştır.

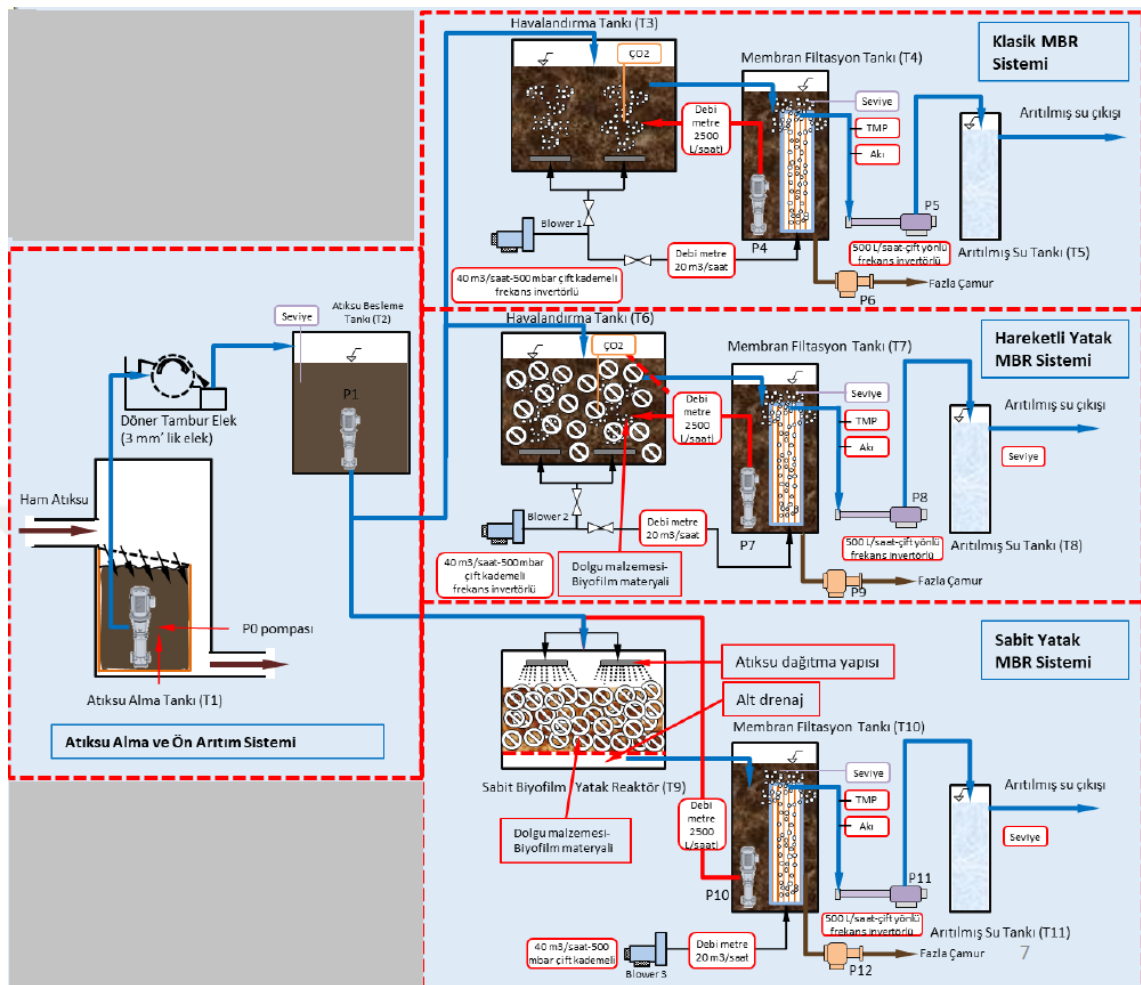
3.2. Yöntem

3.2.1. Yapılan analizler ve ölçülen parametreler

Pilot ölçekli olan bu sistemde günlük olarak alınan numunelerde KOİ, AKM, TOK, TN, bulanıklık, pH, elektriksel iletkenlik, anyon ve katyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca sistemde sürekli otomatik olarak ölçülen parametreler de bulunmaktadır. Bunlar tank seviyeleri, transmembran basınçları, çözünmüş oksijen değerleri, blower basınçları, membran akı değerleri, sıcaklık ve membran akılarıdır. Ölçülen tüm bu parametreler bilgisayara kaydedilmekte ve uzaktan erişim ile de takip edilebilmektedir.

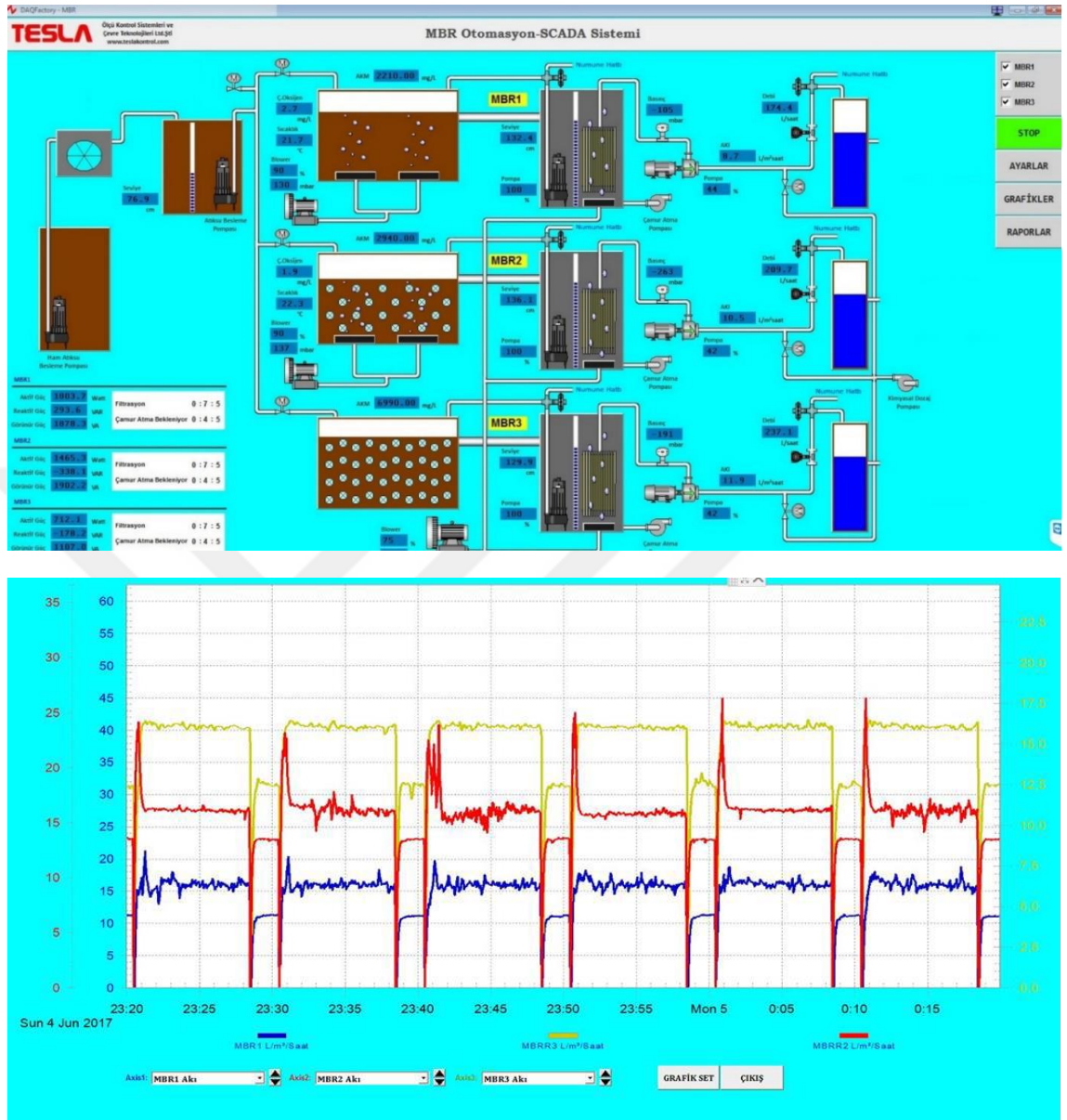
3.2.2. Pilot ölçekli MBR sisteminin düzeneği

Bu çalışmada pilot ölçekli klasik MBR, hareketli ve sabit yataklı MBR sistemleri kullanılmıştır. Sisteme ait akış şeması Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Pilot ölçekli sisteme ait genel akış şeması

Şekil 3.7’de ise kullanılan kontrol yazılımının ara yüzüne ait bir ekran görüntüsü gösterilmektedir. Ana ekrandan gerekli tüm ayarlar girilebilmekte ve istenilen parametrelerin değişimleri takip edilebilmektedir. Bu arayüzey sayesinde membran filtrasyonuna ait değişkenler girilebilmekte ve kontrol olaylarına ait parametreler ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.7. Sistemin otomasyon kontrol sistemi

Arıtma sisteminin genel işleyişi ise aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

Ham atıksu ilk önce kanalizasyon hattından tali röğara alınmıştır. Tali rögardaki atıksu, atıksu alma pompasıyla (P0) ön arıtma pompalanmıştır. Ön arıttıktan geçen atıksu besleme tankına gönderilmiştir. Besleme tankında seviye sensörü yerleştirilmiştir. Seviyenin düşmesi durumunda atıksu alma tankından su pompalanmıştır. Besleme tankına gelen atıksu besleme pompasıyla (P1) havalandırma tankına (T6)

pompalanmıştır. Havalandırma tankında seviye sensörü bulunmakatdır. Havalandırma tankında su seviyesi düştüğü zaman besleme tankından su pompalanmıştır. Havalandırma tankında biyofilm malzemeleri bulunmaktadır ve havalandırma tankında blower (blower 2) ile tabandan hava verilmiştir. Havalandırma tankında bulunan çamur, çamur atma pompasıyla (P9) sistemden atılmıştır. Membran filtrasyon tankındaki atıksu geri devir pompasıyla (P7) havalandırma tankında geri devir yapılmıştır. Vakum pompası (P8) ile membrandan geçen arıtılmış su arıtılmış su tankına (T8) gönderilmiştir. Arıtılmış olan atıksu ise bir savak aracılığı ile sistemden çıkışa verilmiştir.

Bu çalışmamızda otomasyon sistemi ile çalıştırılmıştır. Akı, çamur atma periyotları, filtrasyon-dinlenme süresi gibi ayarlamalar sistemden otomatik olarak yapılmıştır. Sistemin otomasyon sistemi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Sistem kontrol odası ve PLC panonun fotoğrafı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

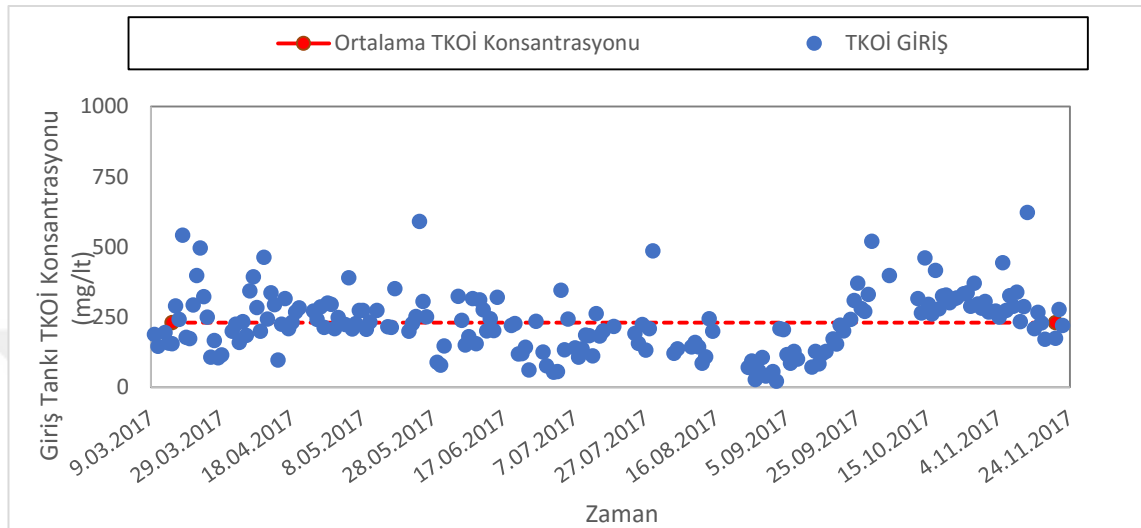
Bu bölümde yapılan deneylerin detaylı bir şekilde bulguları verilmiştir.

4.1. Sistemin Karbonlu Organik Madde Giderim Performansı

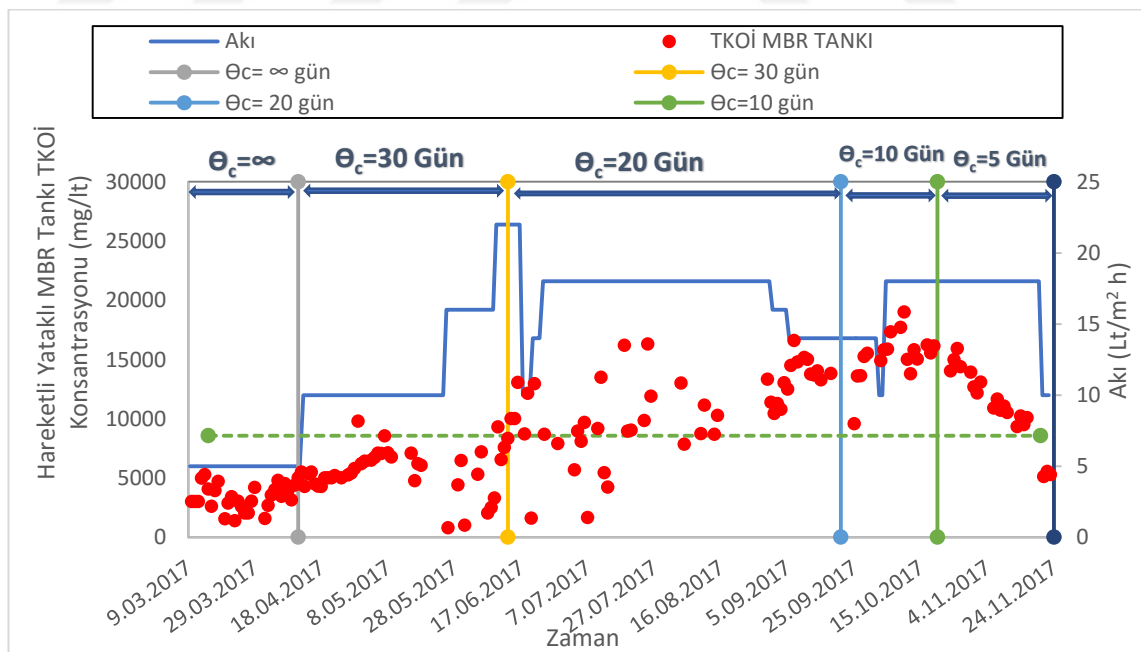
Literatür incelendiğinde hareketli yataklı biyofilm sistemleri ve özellikle hareketli yataklı membran biyofilm sistemlerinin evsel ve endüstriyel kökenli karbonlu organik madde gideriminde yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir. Son yıllarda eser organik maddeler ve toksik organiklerin gideriminde de HYMBR lerin çok başarılı olduğu birçok çalışmada belirlenmiştir. Bu çalışmada ise HYMBR'lerin sadece karbonlu madde giderim performansı incelenmiştir.

Giriş atıksuyundaki KOİ ile hareketli yataklı MBR havalandırma tankları ve MBR çıkışında ölçülen TKOİ değerleri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Giriş tankında ölçülen ortalama giriş TKOİ konsantrasyonu 210 mg/lt olarak bulunmuştur. Hareketli yataklı MBR tankında ölçülen ortalama TKOİ konsantrasyonu 8570,8 mg/lt olarak bulunurken arıtılmış çıkış ölçülen ortalama TKOİ konsantrasyonu ise 8,84 mg/lt'dir. Hareketli yatak MBR tankında ölçülen TKOİ değeri çok büyük oranda ortamdaki mikroorganizmaların oluşturduğu KOİ'dir. Giriş TKOİ değerlerine göre TKOİ giderim verimi Şekil 4.4'de gösterilmiştir. TKOİ giderim verimi %95,24'tür. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi çamur miktarının azalmasıyla birlikte hareketli yataklı MBR tankında ölçülen TKOİ değerleri de azalmaktadır. Çıkış MBR tankında çamur yaşı sonsuz olduğu zaman ortalama TKOİ konsantrasyonu 11,1 mg/lt, çamur yaşı 30 gün olduğu zaman ortalama TKOİ konsantrasyonu 11,08 mg/lt, çamur yaşı 20 gün olduğu zaman ortalama TKOİ konsantrasyonu 6,93 mg/lt, çamur yaşı 10 gün olduğu zaman ortalama TKOİ konsantrasyonu 4,85 mg/lt ve çamur yaşı 5 gün olduğu zaman ortalama TKOİ konsantrasyonu 4,67 mg/lt olarak bulunmuştur. Çamur yaşının sonsuz, 30 ve 20 gün olduğunda TKOİ değerleri artarken çamur yaşının 10 ve 5 gün olduğunda çıkış suyu TKOİ değerleri azalmıştır. Bu durumun sebebi çamur yaşı

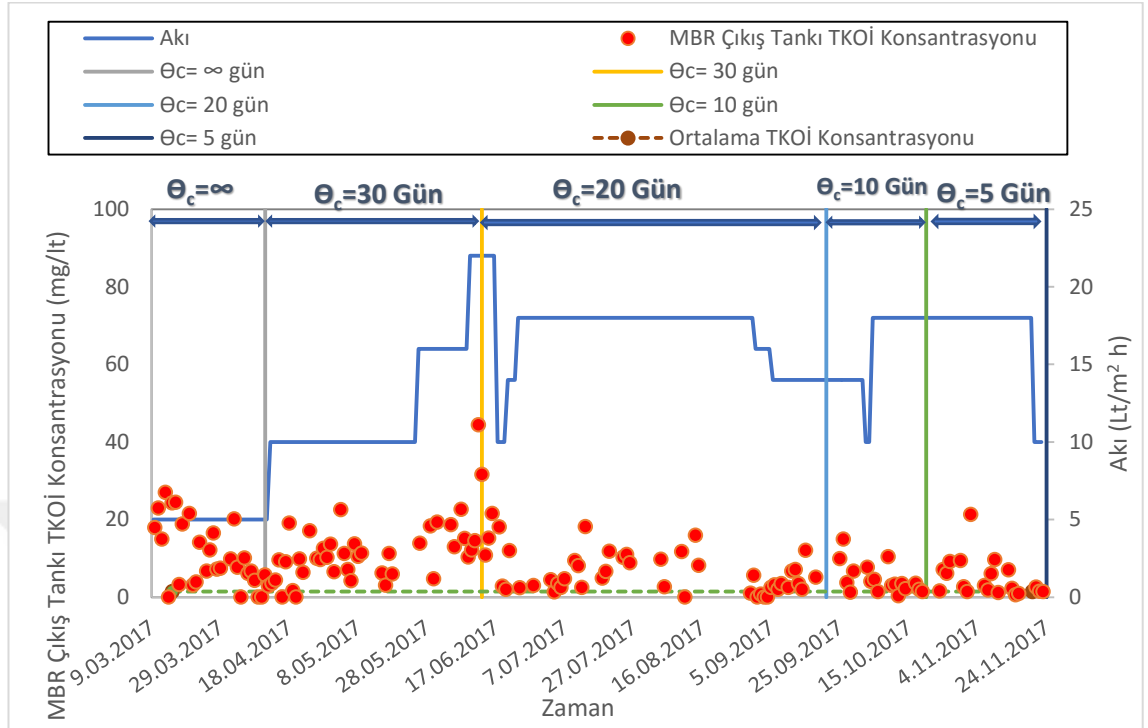
değişiminden ziyade giriş atıksuyundaki TKOl değerlerindeki değişim olarak açıklanmaktadır.



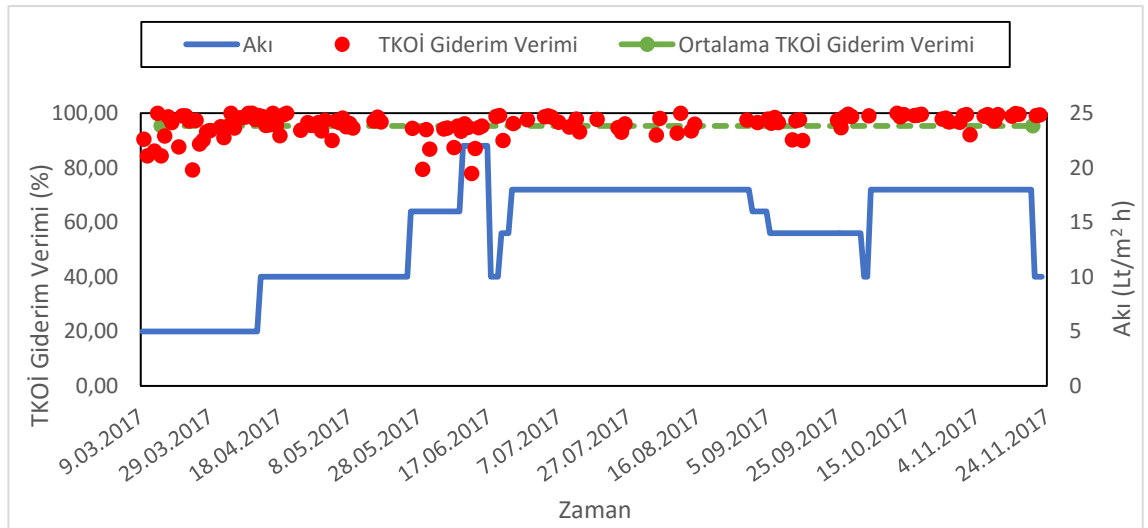
Şekil 4.1. Giriş tankında ölçülen TKOİ değerleri



Şekil 4.2. Hareketli yataklı MBR tankında ölçülen TKOİ değerleri



Şekil 4.3. MBR çıkış tankında ölçülen TKOİ değerleri



Şekil 4.4. TKOİ giderim verimlerin değeri

Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi değişik akı ve çamur yaşlarında çıkış suyu KOİ değerleri %95 arıtım ortalamasına sahiptir. Bu durum hareketli yatak MBR sisteminin

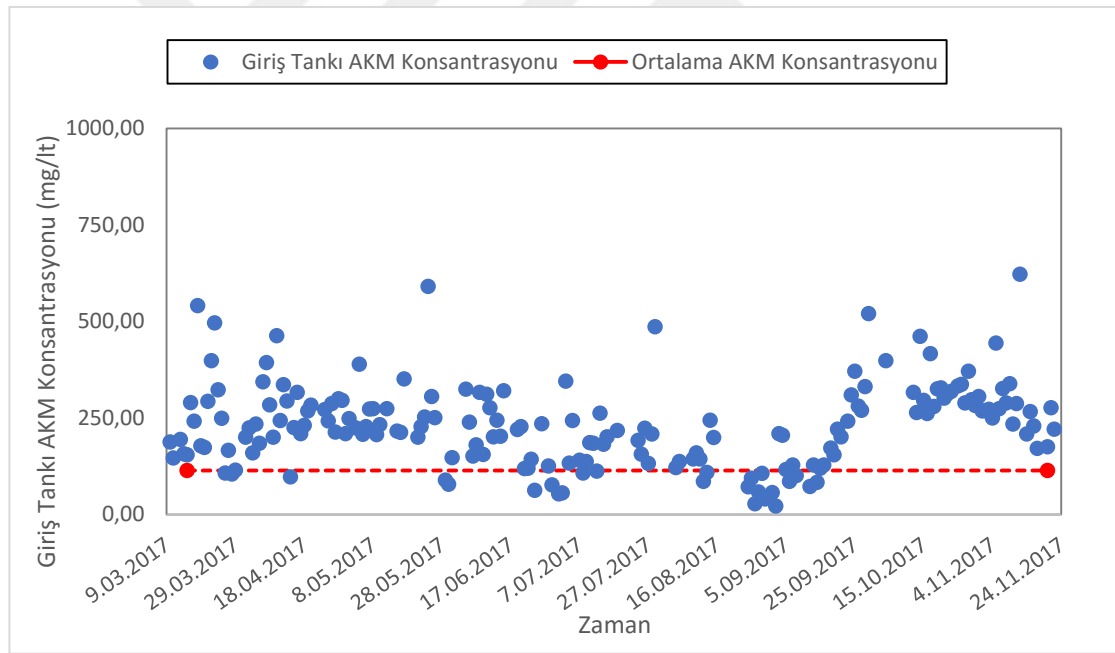
giriş suyu kalite değişimlerinden çok etkilenmediğini ve iyi bir performans ile arıtım işlemini başardığını göstermektedir.

4.2. AKM Konsantrasyonu Değişimi

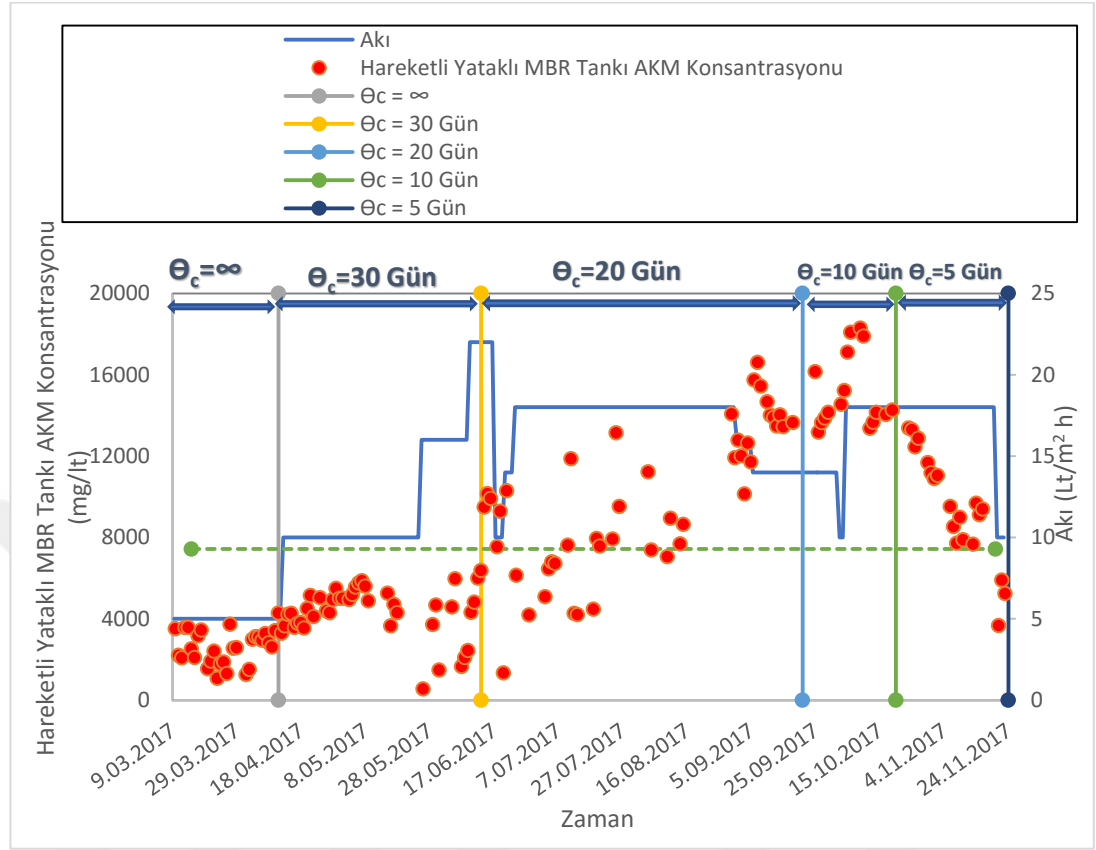
Giriş atıksuyunda ve hareketli yataklı MBR tankında ölçülen AKM değerleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Giriş atıksuyunda ölçülen ortalama AKM konsantrasyonu 113,65 mg/l'tir. Hareketli yataklı MBR tankında ise ortalama AKM konsantrasyonu 7436,2 mg/l'tir. Hareketli yataklı MBR tankında ölçülen ortalama TKOİ konsantrasyonu 8570,8 mg/l'tir. Ortamdaki mikroorganizmaların %85'inin uçucu katı maddelerden oluştuğu kabul edilirse, 6320 mg/l UAKM bulunmaktadır. UAKM'lerin teorik KOİ değeri ise $1,42 \times 6320 \text{ mg/l} = 8975,5 \text{ mg/l}$ olup, ölçülen TKOİ değeri ile uyumludur. Çamur yaşının sonsuz, 30 ve 20 gün olduğu durumlarda atılan çamur miktarından fazladır. Bundan dolayı çamur yaşının sonsuz, 30 ve 20 gün olduğu durumlarda AKM değerleri artarken, çamur yaşının 10 ve 5 gün olduğu durumlarda AKM değerleri azalmaktadır.

Hareketli yataklı MBR tankında çamur yaşının sonsuz olduğu durumda en yüksek AKM konsantrasyonu 4275 mg/lt iken en düşük AKM konsantrasyonu ise 1075 mg/lt'dir. Ortalama olarak çamur yaşının sonsuz olduğu durumda AKM konsantrasyonu 2609,44 mg/lt'dir. Çamur yaşı 30 gün olduğu durumda en yüksek AKM konsantrasyonu 6375 mg/lt olarak ölçülürken en düşük AKM konsantrasyonu 550 mg/lt'dir. Ortalama olarak çamur yaşının 30 gün olduğu durumda AKM konsantrasyonu 9846,94 mg/lt'dir. Çamur yaşı 20 günde en yüksek AKM konsantrasyonu 16595 mg/lt olarak ölçülürken en düşük AKM konsantrasyonu 1333,3 mg/lt'dir. Ortalama olarak çamur yaşının 20 gün olduğu durumda AKM konsantrasyonu 9846,94 mg/lt'dir. Çamur yaşı 10 gün olduğu zaman ölçülen en yüksek AKM konsantrasyonu 18286,6 mg/lt iken en düşük AKM konsantrasyonu ise 13166,7 mg/lt olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak çamur yaşının 10 gün olduğu durumda AKM konsantrasyonu 15094,4 mg/lt'dir. Çamur yaşının 5 gün olduğu zaman ölçülen en yüksek AKM konsantrasyonu 13380 mg/lt olarak ölçülürken en düşük AKM konsantrasyonu 3673,3 mg/lt olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak

çamur yaşının 5 gün olduğu durumda AKM konsantrasyonu 9502,9 mg/lt'dir. Hareketli yataklı MBR çalışmalarında genellikle AKM konsantrasyonu 10000 mg/lt'nin altında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmamızda 18286,6 mg/lt AKM konsantrasyonunda en yüksek pik değerine ulaşılmıştır. Çamur yaşının azalmasıyla birlikte AKM değerleri artarken çamur yaşının 10 gün olduğunda AKM değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Çamur yaşının sonsuz, 30 ve 20 gün olduğunda AKM değerleri artarken çamur yaşının 10 ve 5 gün olduğunda AKM değerleri azalmıştır. Bu durumun sebebi çamur yaşının 10 ve 5 gün sürelerinde atılan çamur miktarı, çamur yaşının sonsuz, 30 ve 20 gün olduğu durumlarda atılan çamur miktarından fazladır. Bundan dolayı çamur yaşının sonsuz, 30 ve 20 gün olduğu durumlarda AKM değerleri artarken, çamur yaşının 10 ve 5 gün olduğu durumlarda AKM değerleri azalmaktadır.



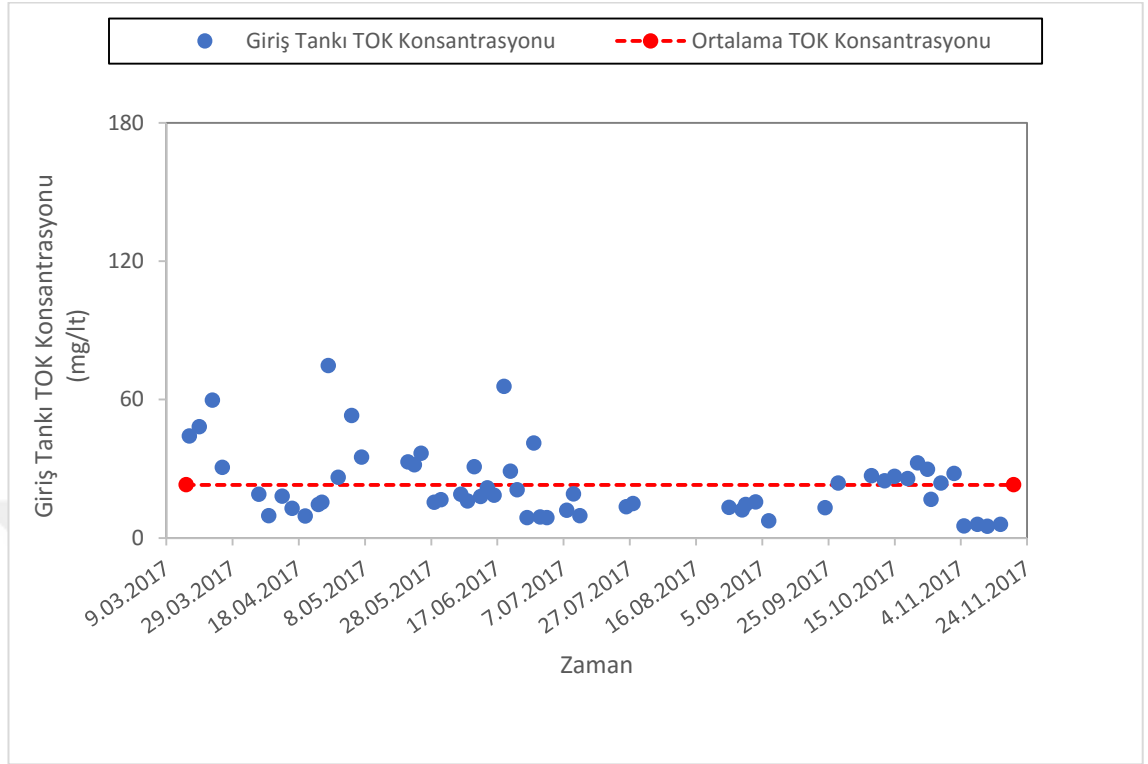
Şekil 4.5. Giriş tankında ölçülen AKM değerleri



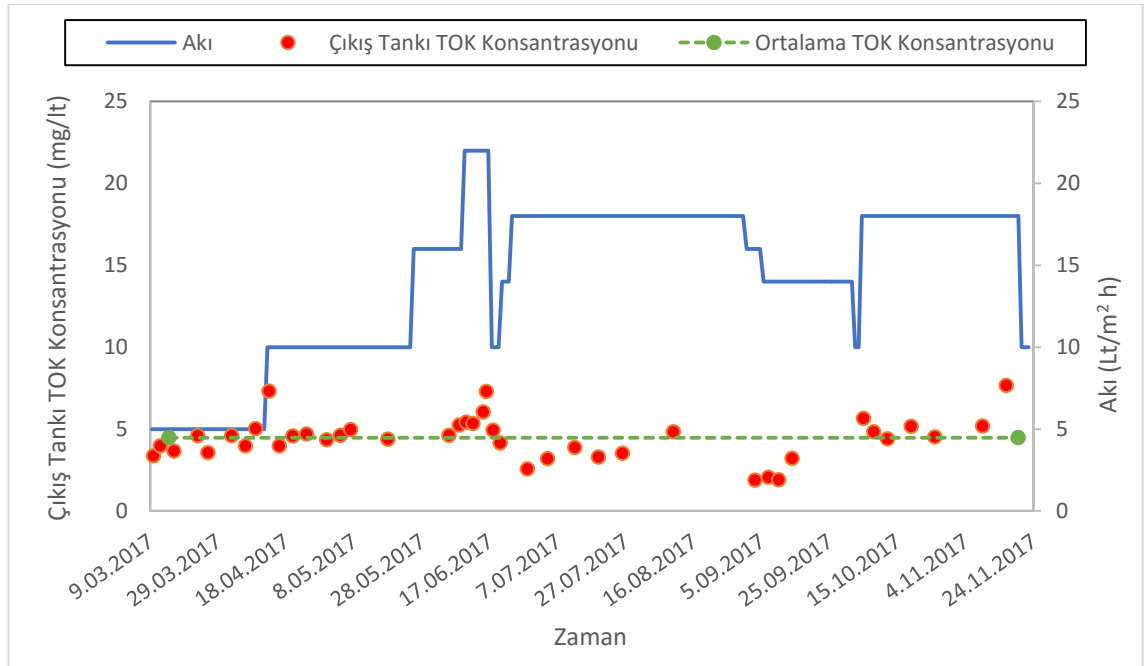
Şekil 4.6. Hareketli yataklı MBR tankında ölçülen AKM değerleri

4.3. TOK Konsantrasyonu Değişimi

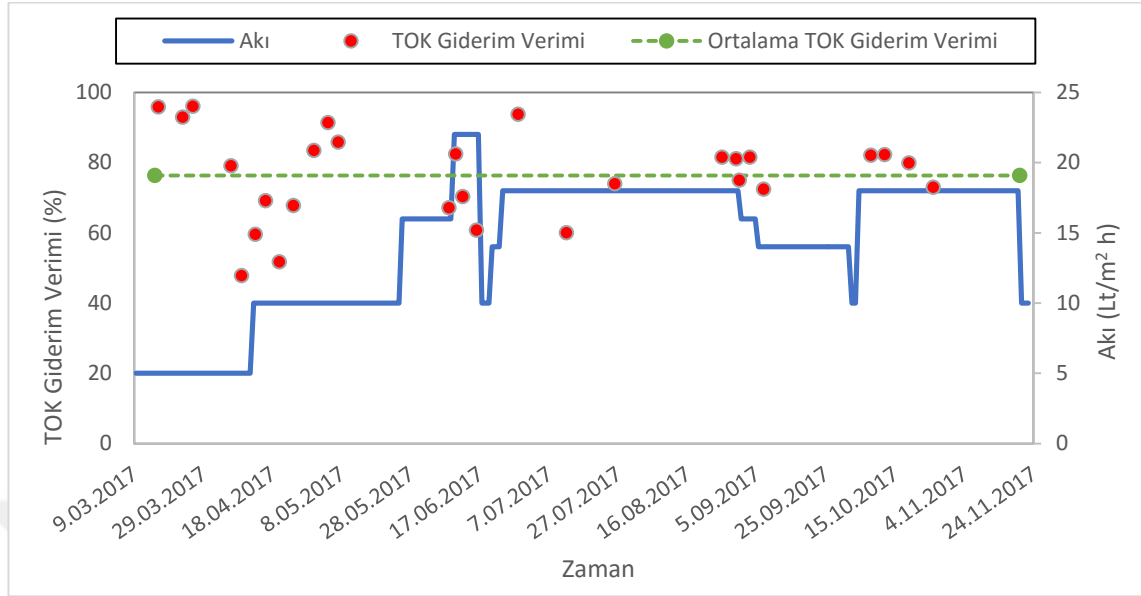
Giriş tankından ve çıkış MBR tankından ölçülen TOK değerleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. TOK giderim verimi ise Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Giriş atıksuyunda ölçülen en yüksek TOK konsantrasyonu 74,64 mg/lt iken en düşük TOK konsantrasyonu 5,08 mg/lt’dir. Ortalama olarak ölçülen TOK konsantrasyonu 23,03 mg/lt’dir. Çıkış tankında ölçülen en yüksek TOK konsantrasyonu 7,06 mg/lt iken en düşük TOK konsantrasyonu 1,88 mg/lt’dir. Ortalama olarak ölçülen TOK konsantrasyonu 4,47 mg/lt’dir. Çıkış tankında ölçülen değerler incelendiğinde ise çok fazla salınım gözlenmemiştir. Elde edilen değerler neticesinde en yüksek TOK giderim verimi %96,06 iken en düşük TOK giderim verimi %47,81’dir. Ortalama olarak TOK giderim verimi %73,31 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.7. Giriş tankında ölçülen TOK değerleri



Şekil 4.8. Çıkış tankında ölçülen TOK değerleri

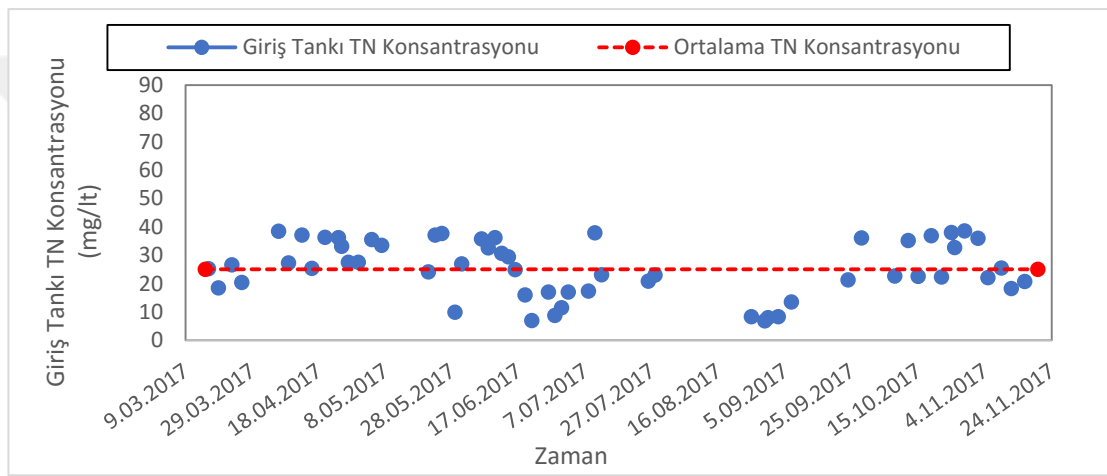


Şekil 4.9. TOK giderim verimi değerlerinin zamanla değişimi

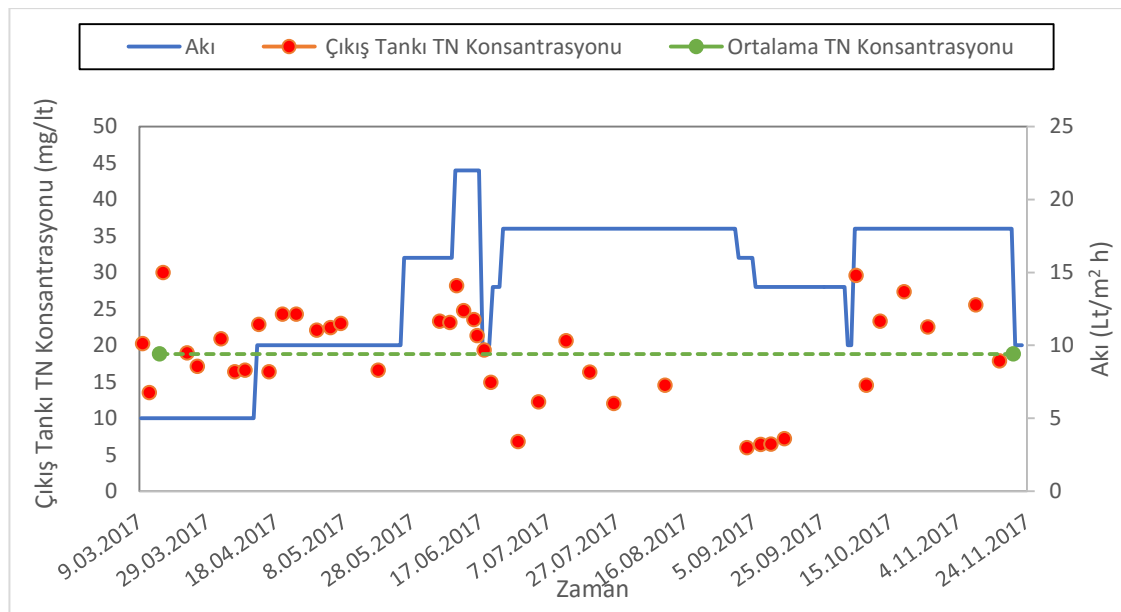
4.4. TN Konsantrasyonun Değişimi

Giriş atıksuyunda ve çıkış tankından ölçülen TN değerleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir. TN giderim verimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Giriş tankında ölçülen en yüksek TN konsantrasyonu 38,57 mg/l’t iken en düşük TN konsantrasyonu 6,9 mg/l’t’dir. Ortalama olarak ölçülen TN konsantrasyonu 25,05 mg/l’t’dir. Çıkış tankında ölçülen en yüksek TN konsantrasyonu 29,95 mg/l’t iken en düşük TN konsantrasyonu 5,96 mg/l’t’dir. Ortalama olarak ölçülen TN konsantrasyonu 18,81 mg/l’t’dir. Elde edilen değerler neticesinde en yüksek TN giderim verimi %57,44 iken en düşük TN giderimi %9,13’dür. Ortalama olarak TN giderim verimi %30,55 olarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler neticesinde TN giderim verimi azotlu madde giderimine göre tasarlanmamış bu sistem için oldukça iyi sayılabilir. TN giderim veriminin daha fazla olması arzu edilirdi. TN giderim verimlerinin daha fazla olmamasının nedeni sistemde nitrifikasyon işlemi gerçekleşirken denitrifikasyon işleminin gerçekleşmemesidir. Ancak bu durum çıkış suyunun sulamada kullanılacak olması durumunda gübre değeri taşınması açısından önemlidir. TN gideriminin yüksek olduğu sistemlerde eş zamanlı nitrifikasyon ve denitrifikasyon işleminin aynı anda gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Evsel atık su kaynaklı olmasından dolayı giriş tankında fazla miktarda NH_4^{+} ’e rastlanmıştır. Çıkış

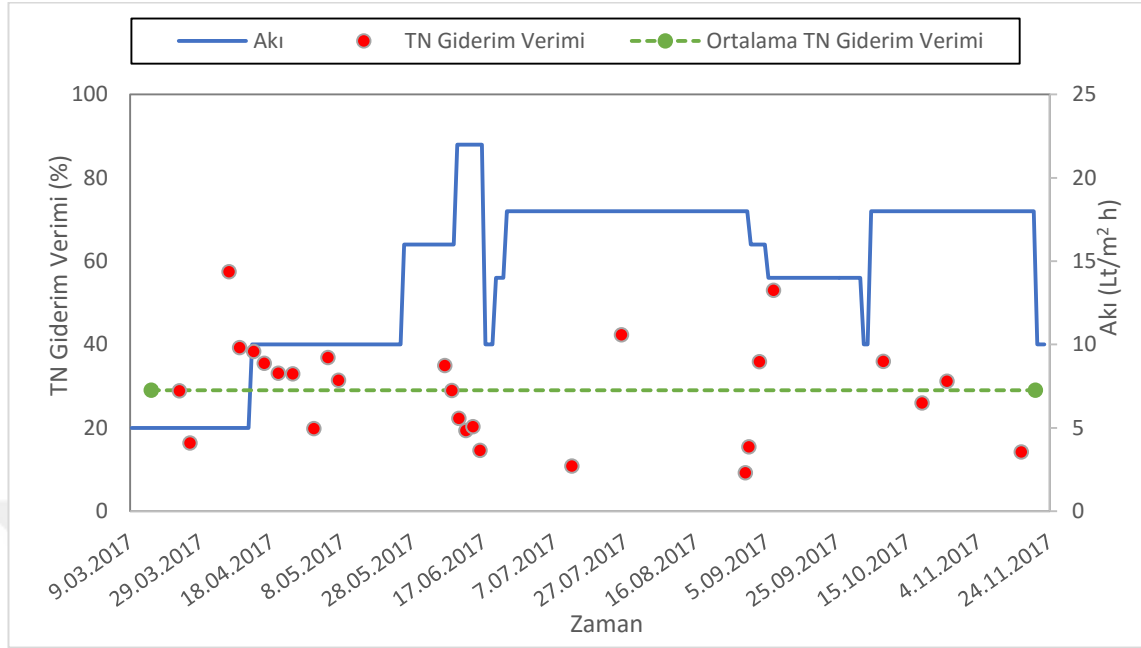
tankında ise NH_4^+ ortalama 1,7 mg/L ölçülmüştür. NH_4^+ 'ün oksitlenerek NO_3^- 'e dönüşmesi olayına nitrifikasyon denilmektedir. Bunun neticesinde NH_4^+ iyonları MBR tankında verilen hava sayesinde oksijeni kullanarak NO_3^- 'e dönüşmüştür. Bu dönüşüm sayesinde nitrifikasyon işlemi gerçekleşmiştir. Çıkış tankında NH_4^+ bulunmasından dolayı tam manasıyla nitrifikasyon işlemi gerçekleşmemiştir. Ancak hareketli yatak MBR sisteminin giriş TKN'nun büyük bir kısmını nitrifikasyonla nitrata çevirebildiği görülmüştür.



Şekil 4.10. Giriş tankından ölçülen TN değerleri



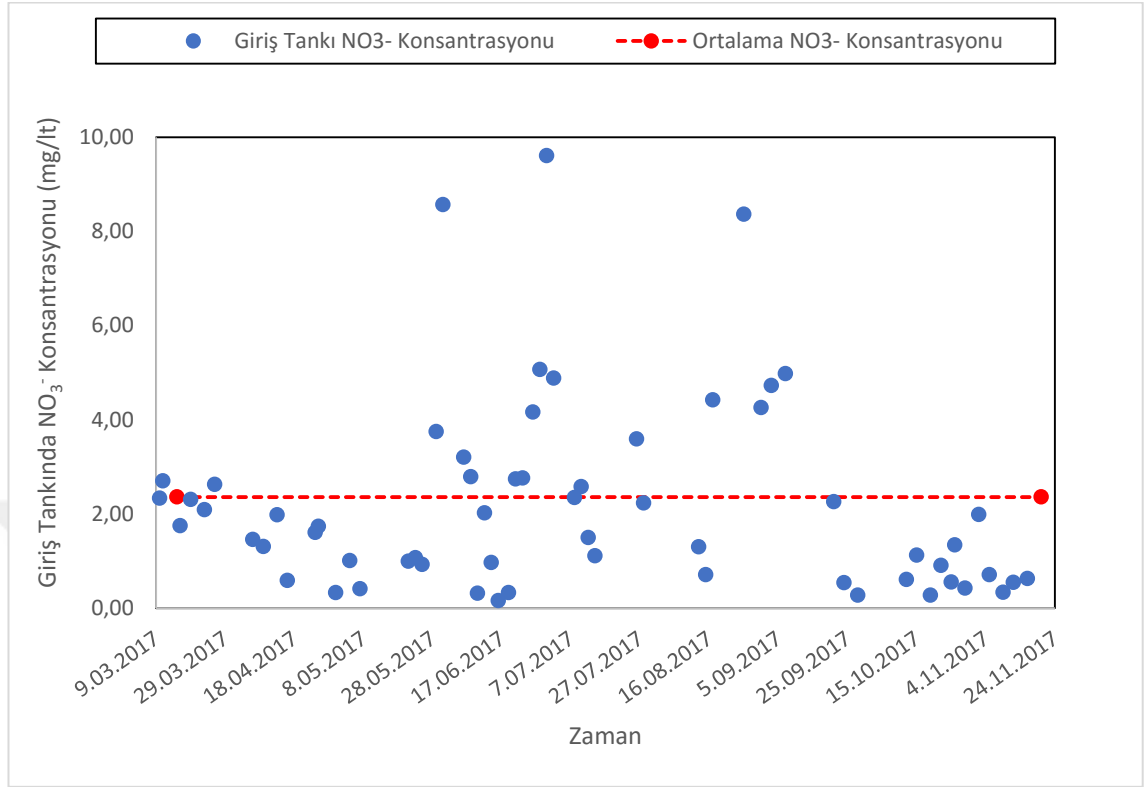
Şekil 4.11. Çıkış tankından ölçülen TN değerleri



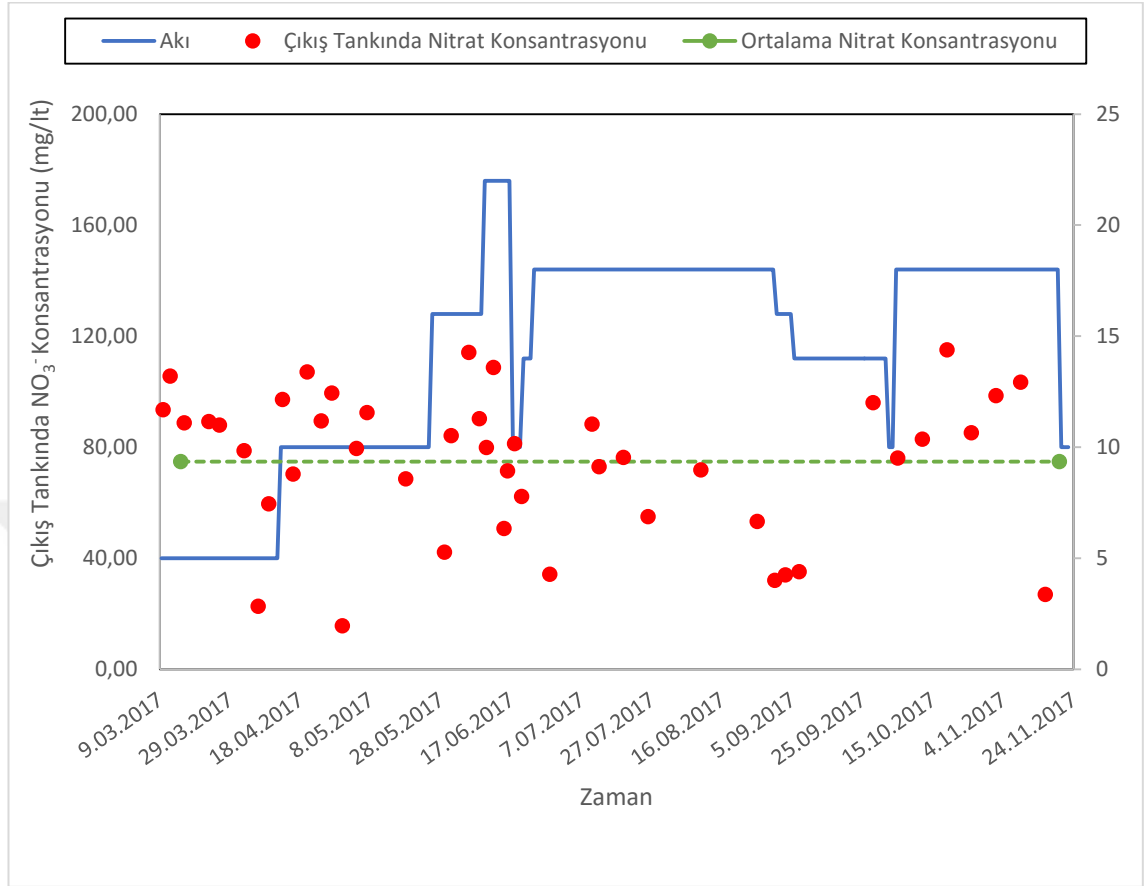
Şekil 4.12. TN giderim verimi değerleri

4.5. Nitrat Konsantrasyonu Değişimi

Giriş atıksuyunda ve çıkış tankında ölçülen nitrat değerleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Giriş tankında ölçülen en yüksek nitrat konsantrasyonu 9,61 mg/l’t iken en düşük nitrat konsantrasyonu 0,16 mg/l’t’dir. Ortalama olarak ölçülen nitrat konsantrasyonu 2,36 mg/l’t’dir. Çıkış tankında ölçülen en yüksek nitrat konsantrasyonu 115,07 mg/l’t iken en düşük nitrat konsantrasyonu 15,58 mg/l’t’dir. Ortalama olarak ölçülen nitrat konsantrasyonu 74,82 mg/l’t’dir. Genellikle giriş suyunda nitrat rastlanmamaktadır. Yapılan çalışmada nitrat bulunmaktadır. Bunun sebebi Erzurum yer altı suyunda nitrat tespit edilmiştir. Çıkış tankında ölçülen nitrat değerleri giriş tankından nitrifikasyondan dolayı fazla olduğu görülmektedir. Çıkış amonyum konsantrasyonlarının düşüklüğü nitrifikasyon işleminin büyük oranda gerçekleştiğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.13 Giriş tankında ölçülen NO₃⁻ değerleri

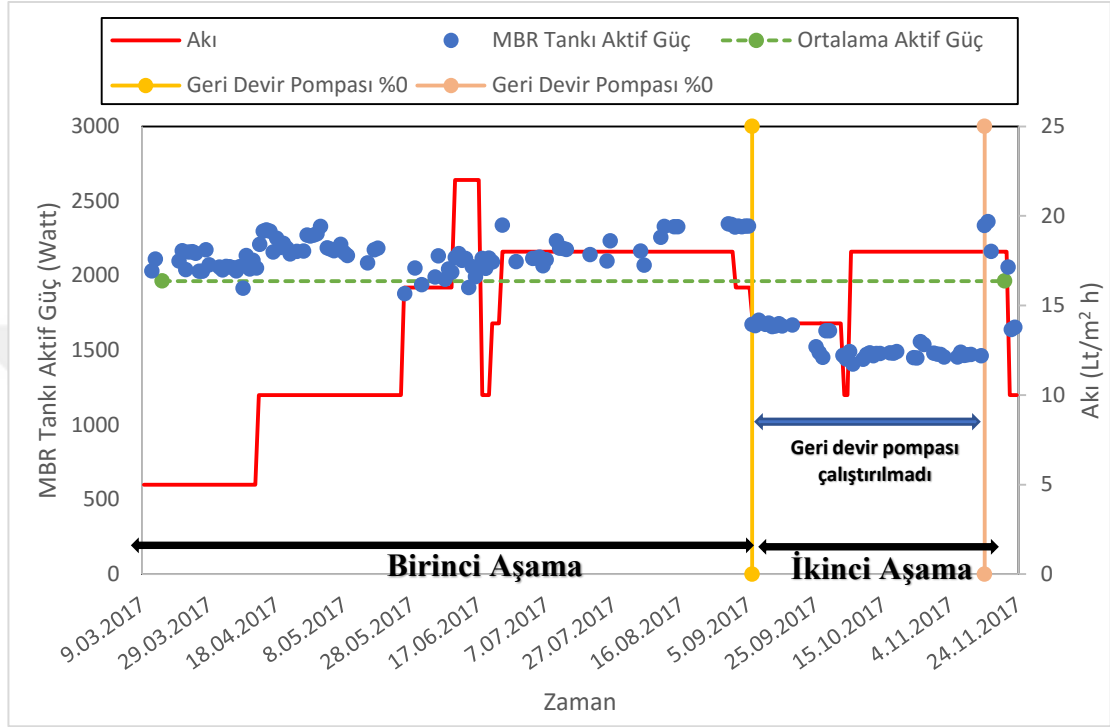


Şekil 4.14. Çıkış tankında ölçülen NO_3^- değerleri

4.6. Aktif Güç Tüketimi

MBR tankında tüketilen aktif güç değerleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Çalışmamızda kullandığımız bu sistem iki aşamada çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Sistemin birinci aşamasında vakum pompası, blower ve geri devir pompası kullanılırken ikinci aşamasında ise vakum pompası ve blower kullanılmıştır. Birinci aşamada vakum pompası, blower ve geri devir pompasından elde edilen ortalama güç miktarı 2115,87 watt’tır. İkinci aşamada vakum pompası ve blower’den elde edilen ortalama güç miktarı 1527,86 watt’tır. Bu aşamalarda elde edilen ortalama toplam güç miktarı 1963,08 watt’tır. Birinci aşamada elde edilen ortalama güç miktarının ikinci aşamada elde edilen ortalama güç miktarından fazla olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda geri devir pompasının kullanımı ile elde edilen ortalama güç miktarı 588,01 watt’tır. Elde edilen

bu ortalama güç miktarı neticesinde geri devir pompasının çalışması tüketilen güç miktarını artırmıştır.

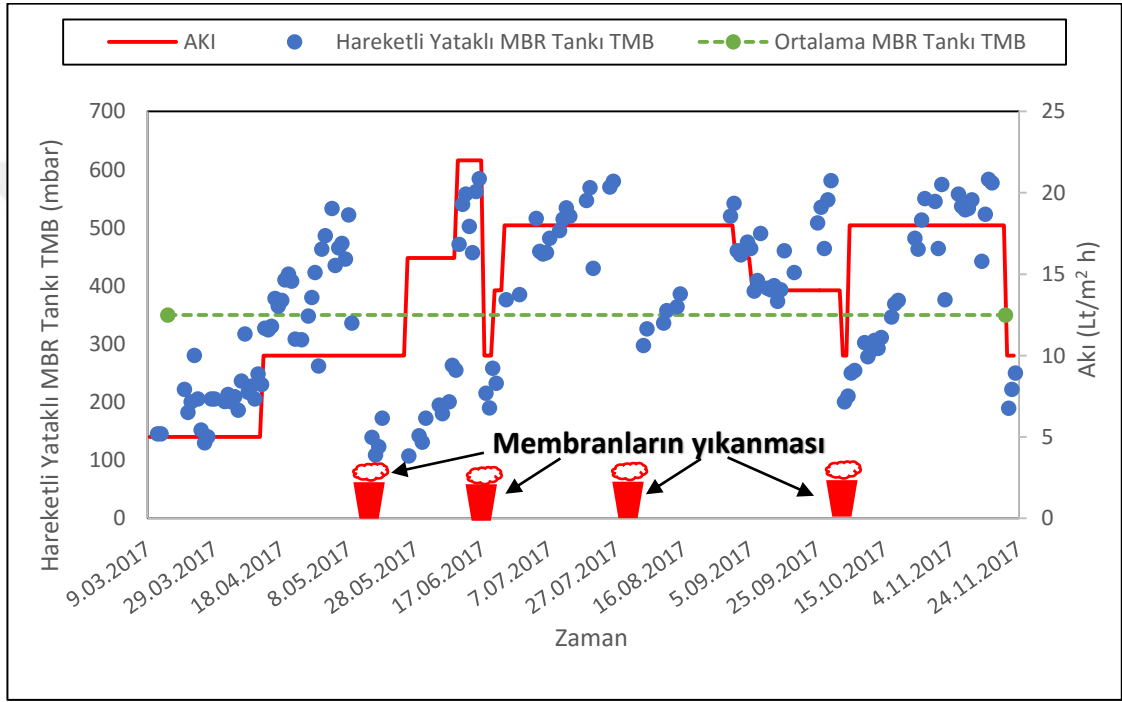


Şekil 4.15. MBR tankında tüketilen aktif güç miktarı

4.7. TMB

Membran filtrasyonunda membran kirlenmesinin en önemli yansıması artan transmembran basınçlarıdır. Çalışma süresince MBR tankında ölçülen TMB değerleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Sistem ilk çalıştığında başlangıçtaki TMB değeri 145 bar'dır. Zamanla TMB değeri kirlenmeden dolayı artmaktadır. TMB değeri arttığında membranlarda tıkanmalar gözlemlenmiş ve bunun neticesinde membranlar yıkanmıştır. Her yıkamadan sonra ölçülen TMB değerleri ilk kullanıldığı zaman ki gibi düşük olamamıştır. Bunun nedeni kalıcı kirlenmelerin gelmesidir. Zaman zaman NaOCl ve sitrik asit ile yerinde yıkamalar yapılmış, ancak yeterli gelmediği durumlarda tank dışına çıkartılarak daha yoğun yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler boyunca ölçülen en düşük TMB değeri 107 bar olup en yüksek TMB değeri 584 bar'dır.

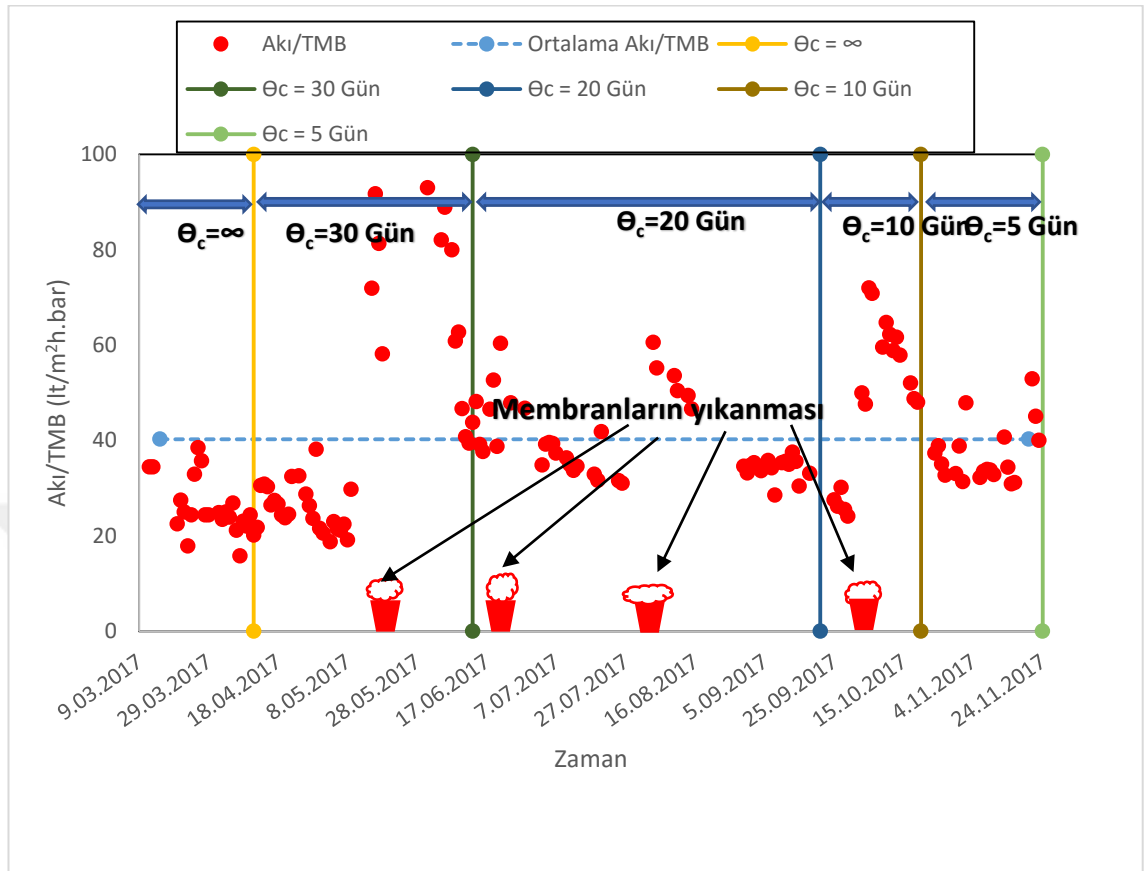
Ortalama olarak ölçülen TMB değeri 366 bar'dır. Şekil 4.16'da membran filtre modüllerinin tank dışında yoğun yıkama zamanlarını göstermektedir. Bu zamanlarda sistemdeki mikroorganizma konsantrasyonunda da kayıplar yaşanmıştır (Şekil 4.16). Yoğun yıkama işlemlerinden sonra TMB değerleri önemli oranda azalmış ancak kısa sürede tekrar yükselmiştir. Bu nedenle yoğun yıkama işlemi birkaç sefer tekrarlanmıştır.



Şekil 4.16. MBR tankında TMB değerleri

4.8. Akı/TMB

Membranlarda ölçülen akı değerleri ve ölçülen TMB değerleri arasındaki oran membran geçirimsizliğini vermektedir. Ölçülen TMB değerleri ve akılar kullanılarak hesaplanan akı/TMB elde edilen değerlerinin değişim yani membran geçirimsizlikleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



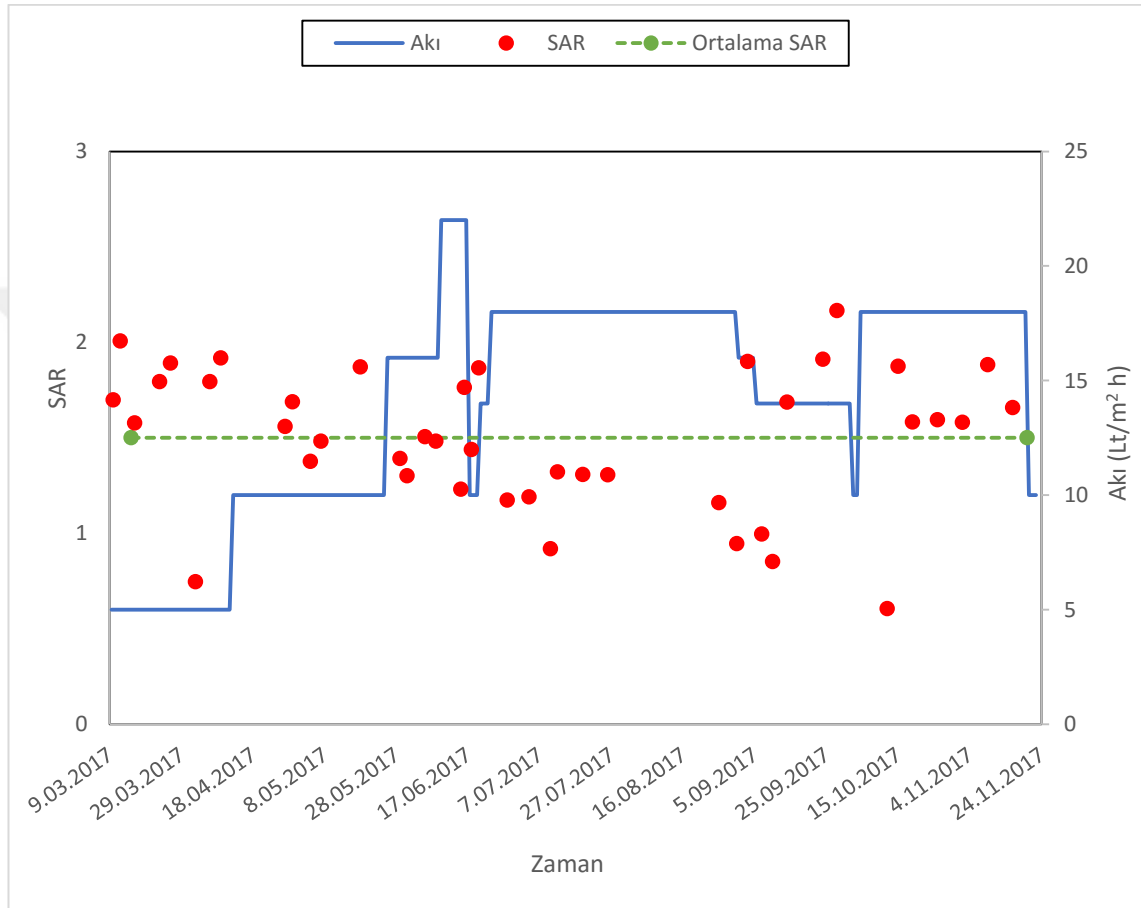
Şekil 4.17. MBR tankında Akı/TMB değerleri

Şekil 4.17’de membran geçirimsizliklerinin tank dışı yoğun yıkama işlemleri sonrasında arttığı ve tekrar zamanla azaldığı açıkça görülmektedir. Ortalama olarak hesaplanan geçirimsizlik değeri 40,30 Lt/m²h bar’dır.

4.9. SAR (Sodyum Adsorpsiyon Oranı) Değeri

Hesaplanan SAR değerleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Ortalama SAR değeri 1,46 meq/lt olarak bulunmuştur. Sodyum miktarının artmasıyla birlikte toprakların yapısını bozmaktadır. Bu yüzden SAR değeri sulama suyunun toprakta değişebilir sodyum miktarının iyi bir göstergesidir. SAR değeri Eşitlik 4.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (4.1)$$



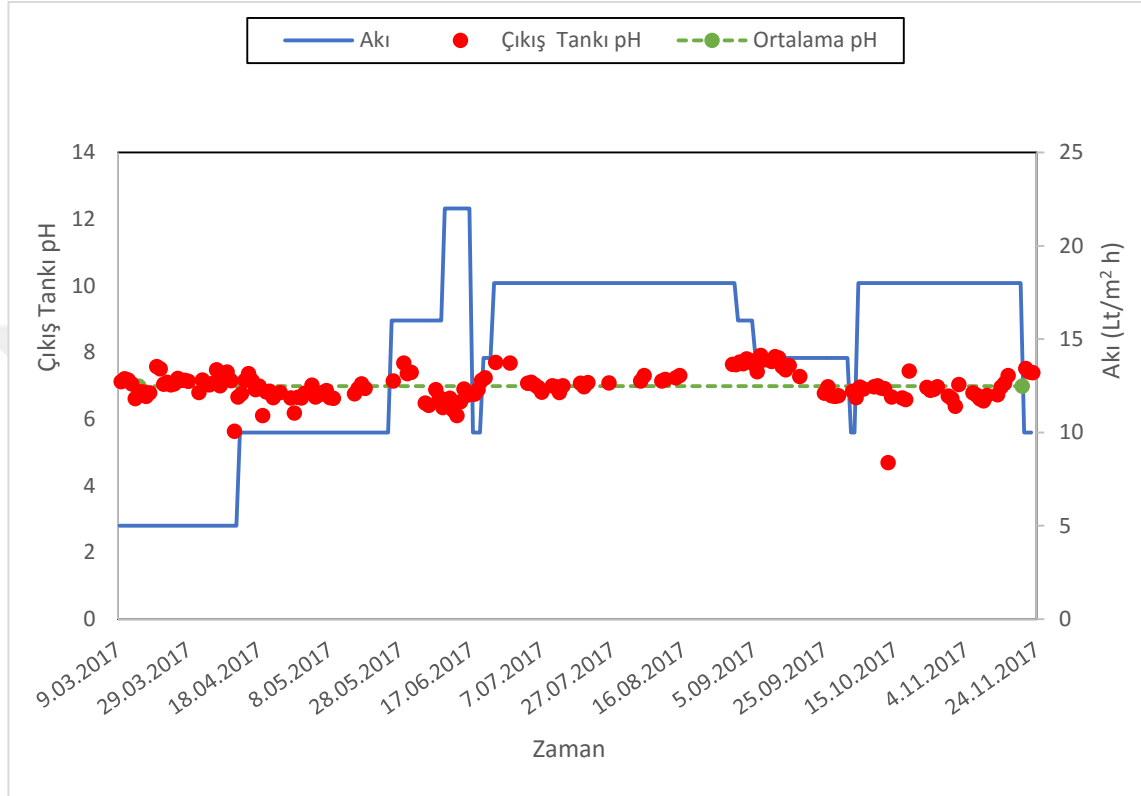
Şekil 4.18. SAR değerleri

Şekil 4.18’de bulunan değerler SAR değerinin 3’ün altında olduğunu göstermektedir. Bu açıdan sulama suyu kriterlerine son derece uygun bir çıkış suyu elde edildiği görülmektedir.

4.10. pH

Çıkış tankından ölçülen pH değerleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Çıkış MBR tankında ölçülen ortalama pH değeri 7,06’dır. Sulama suyu açısından pH 6-9 aralığında

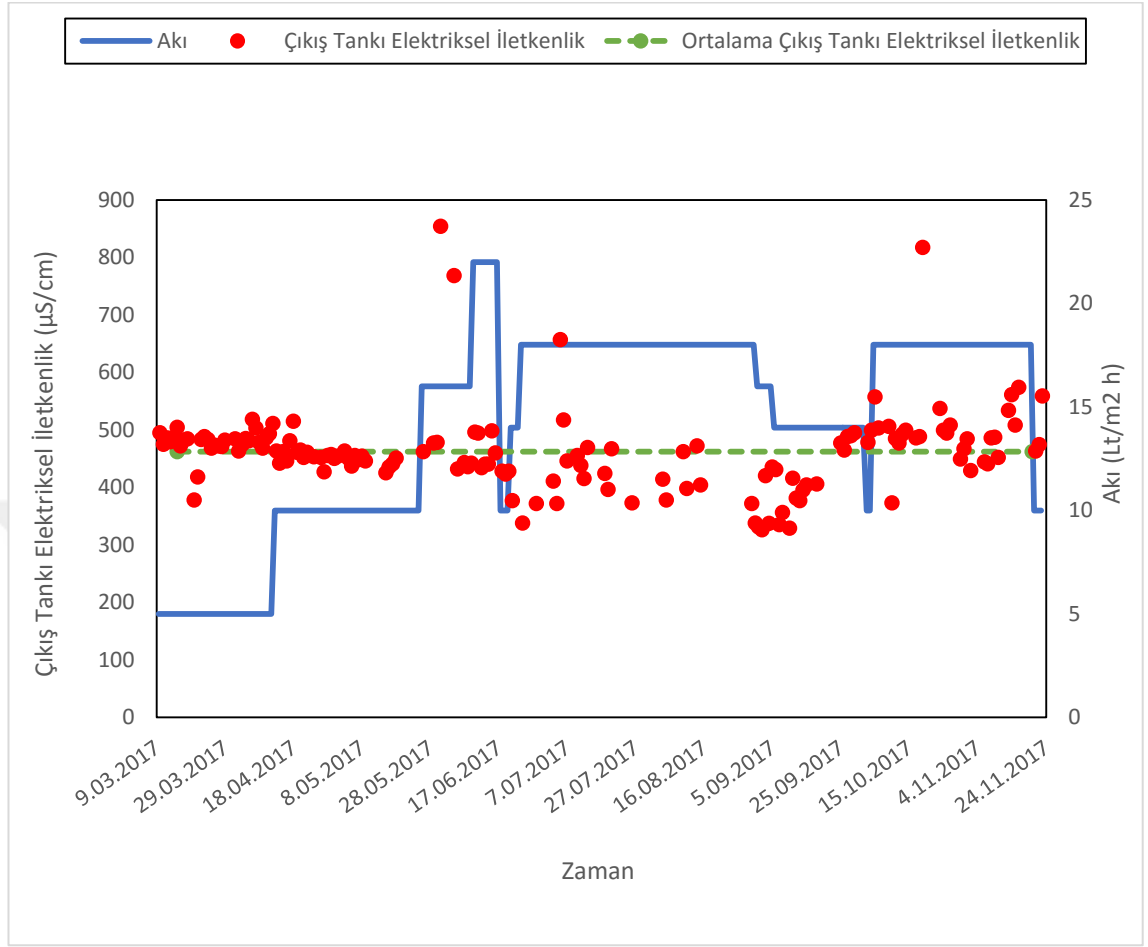
olmaktadır. Bu aralığın dışındaki pH değerleri su besin madde arasındaki dengeyi bozmaktadır.



Şekil 4.19. Çıkış tankında ölçülen pH değerleri

4.11. Elektriksel İletkenlik

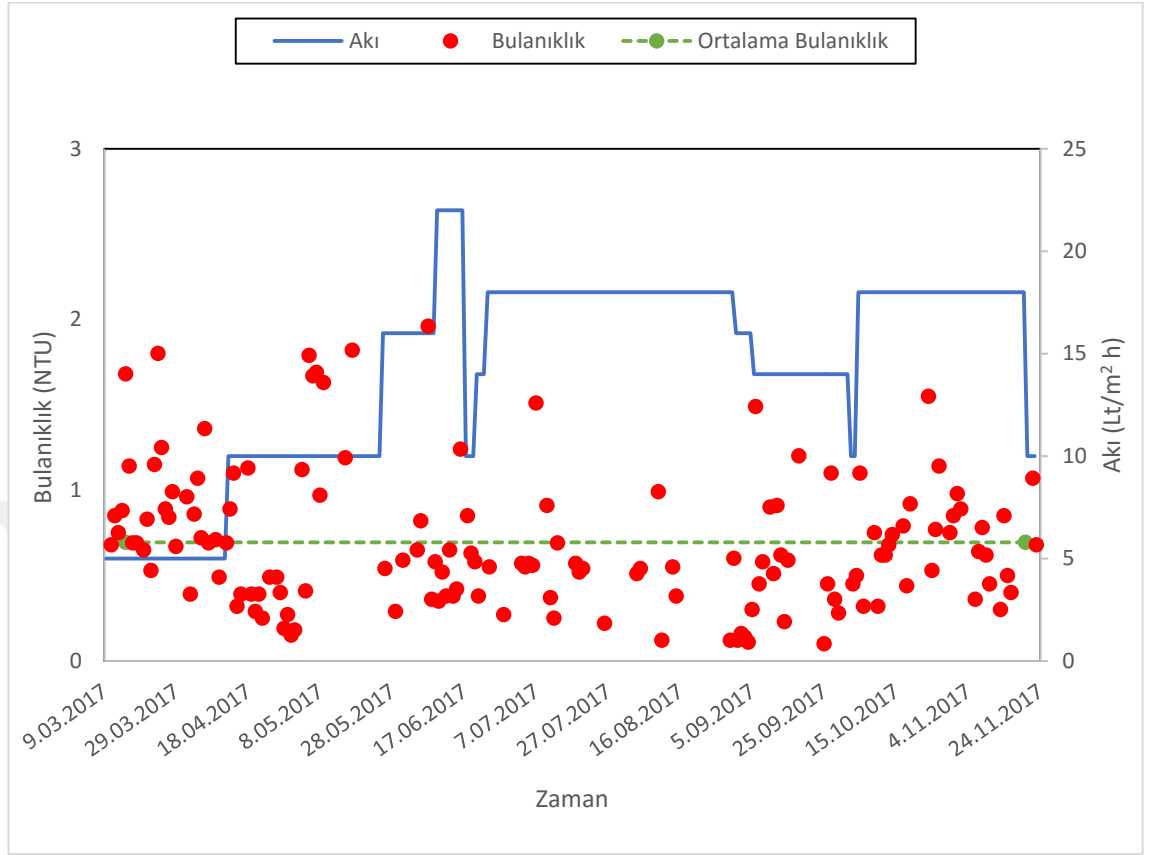
Çıkış tankından ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Çıkış tankında ölçülen ortalama elektriksel iletkenlik değeri $449 \mu\text{S}/\text{cm}$ 'dir. Ölçülen bu değer sulama suyu yönetmeliğinde $700 \mu\text{S}/\text{cm}$ 'den az olması sulama suyu kullanımında zarar derecesinin bulunmadığını göstermektedir.



Şekil 4.20. Çıkış tankından ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri

4.12. Bulanıklık

Çıkış tankında ölçülen bulanıklık değerleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Ortalama bulanıklık değeri 0,676 NTU'dur. Çıkış suyunun sulama suyu olarak kullanılabilmesi için bulanıklık değerinin 2 NTU'nun altında istenilmektedir. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi çıkış MBR tankında ölçülen bulanıklık değerleri 2 NTU'nun altında gözlemlenmiştir. Bunun neticesinde bulanıklık açısından MBR'ler çok iyi performans göstermektedir. Yapılan bu çalışmada bu sonuç görülmektedir.



Şekil 4.21. Çıkış tankında ölçülen bulanıklık değerleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör ile evsel atık suyun arıtımına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktör ile evsel atıksu %95,24 TKOİ giderim verimi ile arıtılmıştır. Çalışılan süre boyunca ortalama arıtılmış çıkış suyunda ölçülen TKOİ değeri 8,84 mg/l olarak ölçülmüştür. Hibrit hareketli yataklı MBR tankında tüketilen güç ortalama olarak 1963,08 watt olarak belirlenmiştir ve arıtılan bir m³ atıksu başına güç tüketim değeri 9.9 kW/m³ olarak belirlenmiştir. Bu değerin yüksek olması çalışma tesisin pilot ölçekli olmasından kaynaklanmaktadır. Kullanılan ekipmanların arıtma sistemin ölçülerine göre büyük olması, tesisin deniz seviyesinden 1850 m yukarıda kurulu olması ve geri devir yapılması vb unsurlar güç tüketimine etkileyen unsurlar olarak değerlendirilmiştir.

Bu sistemde TOK giderim verimi %73,31 ile arıtım gerçekleşirken TN giderim verimi ise %30,55'tür. TN giderim veriminin düşük olmasının sebebi biyofilm malzemelerinde yeterince mikroorganizmaların tutunmamasından kaynaklanmış olduğu görülmektedir. Ancak yine de asimilatif giderimden daha fazla azotlu madde giderilmiştir. Mikroorganizmalar yüzeyde tutunması eş zamanlı nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemini yapmaktadır. Biyofilmin iç yapısında oksijen olmadığı için denitrifikasyon işlemi gerçekleşirken dış yüzeyde ise mikroorganizmaların oksijenin kullanımıyla nitrifikasyon işlemi gerçekleşmektedir. Çıkış MBR tankında ölçülen nitrat değerleri giriş değerlerinden fazla olduğu görülmektedir. Bu değerlerin fazla olmasının sebebi nitrifikasyon işleminin büyük oranda gerçekleşmiş olduğunun bir göstergesi olmaktadır.

Bu çalışma da hibrit hareketli yataklı membran biyoreaktörden arıtılan atık sular sulama suyu olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Değerlendirmeler sonucunda çıkış suyunun bulanıklık, elektriksel iletkenlik, SAR, pH ortalama değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir. Çıkış suyunda fekal koliform 0 olarak ölçülmüştür. Değerlendirilen

ıkış suyunun sulama suyu olarak kullanımı 27527 sayılı resmî gazetede yayımlanan “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde” EK7’de Tablo E7.1 ve E7.2’de verilen kriterler karşılaştırıldığında uygun olduğu gör÷lmektedir.

Çizelge 5.1. Çıkış suyunun ortalama değeri

Bulanıklık (NTU)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	SAR	pH
0,676	449	1,46	7,04

Elde edilen değeri göz önünde bulundurduğunda düşük şiddetli evsel atık suların yüksek hızda arıtılarak sulama suyu olarak kullanılabilirliğinin sonucuna varılmıştır.

Pilot ölçekli olan bu çalışmada birçok muhtelif sorunlarla karşılaşmıştır. Yaşanılan bazı muhtelif sorunlar řu şekilde gerçekleşmiştir.

- Membran kirlenmesi
- Geri devir pompasının sistemin çalışma esnasında arızalanması
- Sistemin taşması
- Vakum pompasının arızalanması
- Rögarın tıkanması
- Ağır kış koşulları gibi durumlar sistemin işletimini olumsuz açıdan etkilemiştir.

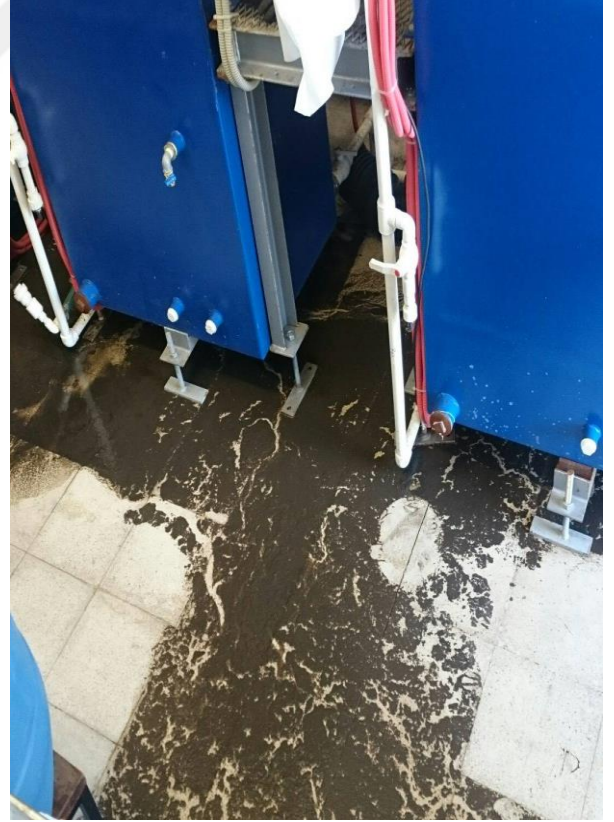
Yaşanan sorunlara ait bazı fotoğraflar ise Şekil 5.1-5.6’da gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Kirlenen ve mekanik olarak temizlenmiş membranların görünümü



Şekil 5.2. Kış şartlarında pilot ölçekli MBR tesisi



Şekil 5.3. MBR sisteminin taşması sonrası oluşan görüntüsü



Şekil 5.4. Atıksu alma dalgıç pompasının arızalanması



Şekil 5.5. Vakum pompasının arızalanması



Şekil 5.6. Rögarın tıkanması

Bu çalışmada öneri olarak şunlar söylenebilmektedir;

- Farklı biyofilm malzemesi kullanılarak eş zamanlı nitrifikasyon denitrifikasyon ve fosfor giderim işlemi gerçekleştirilmelidir.
- Yüksek şiddetli kirlilik yüküne sahip evsel ve endüstriyel atık sular için hareketli yatak MBR'ler denenebilir.
- Güç tüketimin azaltıcı çeşitli önlemler üzerinde çalışılmalıdır. Geri devir işleminin kesikli yapılması veya membran filtrasyon ve biyolojik tank arasında delikli bir perdenin konularak geri devrin ortadan kaldırılması işlemi uygulanabilir.
- Membran tıkanmasının önüne geçebilmek için PVDF hollow fiber membran modülleri yerine yerine flat sheet membran modülleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Akpınar, D., 2014. Erzurum Palandöken Baraj Gölü Suyunun Seramik Membran Mikrofiltrasyon Yöntemiyle Arıtılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Briones, A. and Raskin, L., 2003. Diversity and dynamics of microbial communities in engineered environments and their implications for process stability, *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 14, no. 3. pp. 270–276.
- Chen, S., Sun, D., Chung, J., 2008. Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic–aerobic moving-bed biofilm reactor system. *Waste Manage*, 28, 339–346.
- Chen, X., Kong, L., Wang, X., Tian, S., Xiong, Y., 2015. Accelerated start-up of moving bed biofilm reactor by using a novel suspended carrier with porous surface. *Bioprocess Biosystems Engineering*, 38, 273–285.
- Cho, B. and Fane, A., 2002. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 209, 391–403.
- Cho, Y.H., Sibag, M.L., Eusebio, R.C., Kim, H.-S., 2011. Effect of organic loading on the performance of MBR for advanced treatment and water reuse. *Desalination Water Treatment*, 33, 224–230.
- Cho, Y.H., Sibag, M.L., Eusebio, R.C., Kim, H.S., 2011. Effect of organic loading on the performance of MBR for advanced treatment and water reuse. *Desalination Water Treatment*, 33, 224–230.
- Chrispim, M.C. and Nolasco, M.A., 2016. Greywater treatment using a moving bed biofilm reactor at a university campus in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 142, 290–296.
- Cuevas-Rodríguez, G., Cervantes-Avilés, P., Torres-Chávez, I., Bernal-Martínez, A., 2015. Evaluation of different configurations of hybrid membrane bioreactors for treatment of domestic wastewater. *Water Science Technolgy*, 71, 338–346.
- Duan, L., Jiang, W., Song, Y., Xia, S., Hermanowics, S.W., 2013. The characteristics of extracellular polymeric substances and soluble microbial products in moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor. *Bioresource Technolgy*, 148, 436–442.
- Duan, L., Li, S., Han, L., Song, Y., Zhou, B., Zhang, J., 2015b. Comparison between moving bed-membrane bioreactor and conventional membrane bioreactor systems. Part I: membrane fouling. *Environmental Earth Sciences*, 73, 4881–4890.
- Duan, L., Tian, Y., Liu, X., Song, Y., Yang, L., Zhang, J., 2015a. Comparison between moving bed-membrane bioreactor and conventional membrane bioreactor systems. Part II: bacterial community. *Environmental Earth Sciences*, 73, 4891–4902.
- Eroğlu, V., 2008. Atık Suların Tasfiyesi, Su Vakfı Yayınları, 1s, İstanbul.
- Fu, C., Bi, X., Ng, H.Y., 2015. Effects of bio-carriers on membrane fouling mitigation in moving bed membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 499, 134–142.
- Gil, J.A., Túa, L., Rueda, A., Montaña, B., Rodríguez, D.P.M., 2010. Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR. *Desalination*, 250, 997–1001.

- Guerra, L., 2010. Evaluation of Bassussarry Wastewater Treatment Plant after Upgrading with Membrane Bioreactor Technology. Master's Thesis, Water and Environmental Engineering Department of Chemical Engineering Lund University, Sweden
- Guo, J., Guan, W., Xia, S., 2014. Membrane fouling of hybrid submerged membrane bioreactor (hMBR) in treating municipal wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 52, 6858–6867.
- Guo, W., Ngo, H.H., Li, J., 2012. A mini-review on membrane fouling. *Bioresource Technology*, 122, 27–34.
- Guo, W., Ngo, H.H., Vigneswaran, S., Xing, W., Goteti, P., 2008. A novel sponge submerged membrane bioreactor (SSMBR) for wastewater treatment and reuse. *Separation Science and Technology*, 43, 273–285.
- Habib, R., Asif, M.B., Iftekhhar, S., Khan, Z., Gurung, K., Srivastava, V., Sillanpää, M., 2017. Influence of relaxation modes on membrane fouling in submerged membrane bioreactor for domestic wastewater treatment. *Chemosphere*, 181, 19–25.
- Hu, J., Ren, H., Xu, K. Geng, J., Ding, L., Yan, X., Li, K., 2012. Effect of carriers on sludge characteristics and mitigation of membrane fouling in attached-growth membrane bioreactor, *Bioresource Technology*, 122, 35–41.
- Ivanovic, I., and Leiknes, T., 2008. Impact of aeration rates on particles colloidal fraction in the biofilm membrane bioreactor (BF-MBR). *Desalination*, 231, 182–190.
- Judd, S., 2008. The status of membrane bioreactor technology. *Trends Biotechnology*, 26, 109–116.
- Kaleli, B., 2006. Atıksuların İleri Arıtımında Membran Proseslerinin Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kop, A., 2016. Erzurum Palandöken Baraj Gölü Suyunun Batık Hollow Fiber Mikrofiltrasyon Yöntemiyle Arıtılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Koyuncu, İ., 2001. Nanofiltrasyon membrantları ile tuz gideriminde organik iyon etkisi.
- Kukul, Y.S., Çalışkan, A.D., Anaç, S., 2007. Arıtılmış Atık Suların Tarımda Kullanılması ve İnsan Sağlığı Yönünden Riskler. *Ege Üniversitesi. Ziraat Fak. Dergisi*, 44 (3), 101–116.
- Lariyah, M.S., Mohiyaden, H.A., Hayder, G., Hussein, A., Basri, H., Sabri, A.F., Noh, M.N., 2016. Application of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) and Integrated Fixed Activated Sludge (IFAS) for Biological River Water Purification System: A Short Review. *IOPSCIENCE*, 32, 1–15.
- Lee, W.N., Kang, I-J., Lee, C-H., 2015. Factor affecting filtration characteristics in membrane-coupled moving bed biofilm reactor, *Water Resource*, 40, 1827–1835.
- Leiknes, T., Bolt, H., Engmann, M., Ødegaard, H., 2006. Assessment of membrane reactor design in the performance of a hybrid biofilm membrane bioreactor (BFMBR). *Desalination*, 199, 328–330.
- Leyva-Díaz, J.C., Calderón, K., Rodríguez, F.A., González-López, J., Hontoria, E., Poyatos, J.M., 2013. Comparative kinetic study between moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor and membrane bioreactor systems and their

- influence on organic matter and nutrients removal. *Biochemical Engineering Journal*, 77, 28–40.
- Leyva-Díaz, J.C., Calderón, K., Rodríguez, F.A., González-López, J., Hontoria, E., Poyatos, J.M., 2013a. Comparative kinetic study between moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor and membrane bioreactor systems and their influence on organic matter and nutrients removal. *Biochemical Engineering Journal*, 77, 28–40.
- Leyva-Díaz, J.C., González-Martínez, A., González-López, J., Munió, M.M., Poyatos, J.M., 2015a. Kinetic modeling and microbiological study of two-step nitrification in a membrane bioreactor and hybrid moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor for wastewater treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 259, 692–702.
- Leyva-Díaz, J.C., López-López, C., Martín-Pascual, J., Munió, M.M., Poyatos, J.M., 2015c. Kinetic study of the combined processes of a membrane bioreactor and a hybrid moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor with advanced oxidation processes as a post-treatment stage for wastewater treatment. *Chemical Engineering and Processing*, 91, 57–66.
- Lu, M., Gu, L.P., Xu, W.H., 2013. Treatment of petroleum refinery wastewater using a sequential anaerobic–aerobic moving-bed biofilm reactor system based on suspended ceramsite. *Water Science and Technology*, 67(9), 1976–1983.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Kang, J., Xia, S., Zhang, Z., Price, W.E., 2014. Removal and fate of micropollutants in a sponge-based moving bed bioreactor. *Bioresource Technology*, 159, 311–319.
- Luo, Y., Jiang, Q., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Price, W.E., Wang, J., Guo, W., 2015. Evaluation of micropollutant removal and fouling reduction in a hybrid moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor system. *Bioresource Technology*, 191, 355–359.
- Malaeb, L., Le-Clech, P., Vrouwenvelder, J.S., Ayoub, G.M., Saikaly, P.E., 2013. Do biological-based strategies hold promise to biofouling control in MBRs. *Water Research*, 47, 5447–5463.
- Martín-Pascual, J., Reboleiro-Rivas, P., López-López, C., Leyva-Díaz, J.C., Jóver, M., Munió, M.M., González-López, J., Poyatos, J.M., 2015a. Effect of the filling ratio, MLSS, hydraulic retention time, and temperature on the behavior of the hybrid biomass in a hybrid moving bed membrane bioreactor plant to treat urban wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 141(7):04015007
- McQuarrie, J.P. and Boltz, J.P., 2011. Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance. *Water Environment Research*, 83, 560–575.
- Meng, F.G., Yang, F.L., Xiao, J.N., *et al.*, 2006b. A new insight into membrane-fouling mechanism during membrane filtration of bulking and normal sludge suspension. *Journal of Membrane Science*, 285, 159–165.
- Okuroğlu, V. ve Yağanoğlu, A.V., 2013. *Kültürteknik*, Atatürk Üniversitesi Yayınları, 5s, Erzurum.
- Radjenović, J., Matosić, M., Mijatović, I., Petrović, M., Barceló, D., 2007. *Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology*. Springer, pp. 37–101.

- Rahimi, Y., Torabian, A., Mehrdadi, N., Habibi-Rezaie, M., Pezeshk, H., Nabi-Bidhendi, G.R., 2010. Optimizing aeration rates for minimizing membrane fouling and its effect on sludge characteristics in a moving bed membrane bioreactor. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1097–1102.
- Samsunlu, A., 1999. Reuse of Wastewater in Agriculture. *Çevre Mühendisliği Kimyası*.
- Wu, J., Chen, F., Huang, X., Geng, W., Wen, X., 2006. Using inorganic coagulants to control membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Desalination*, 197, 124–136.
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R., 2009. Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on membrane fouling. *Bioresource Technology*, 100, 6655–6657.
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R., 2009a. Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane on organic carbon and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 100, 2369–2374.
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R., 2009b. Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on membrane fouling. *Bioresource Technology*, 100, 6655–6657.
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R., 2018. Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 100, 2369–2374.
- Yiğit, N. Ö., 2007. Membran Biyoreaktörü İle (MBR) Evsel Atıksu Arıtımı, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Zhang, X., Chen, X., Zhang, C., Wen, H., Guo, W., Ngo, H.H., 2016. Effect of filling fraction on the performance of sponge-based moving bed biofilm reactor. *Bioresource Technology*, 219, 762–767.

ÖZGEÇMİŞ

25.06.1991’de Erzurum da doğdu. İlköğretimini Tatbikat ve Sabancı İlköğretim Okulunda, lise eğitimini ise Hacı Sami Boydak Lisesinde tamamladı. 2010 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2014 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisansa başladı. Halen aynı bölümde öğrenimine devam etmektedir.

