

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜBÜLER MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜN ATIKSU
ARITMA VERİMİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Müh. Duygu TOPALOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep İLERİ

Haziran 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜBÜLER MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜN ATIKSU
ARITMA VERİMİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Müh. Duygu TOPALOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 03/06/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof Dr. Recep İleri Jüri Başkanı	Prof Dr. Saim Özdemir Üye	Yrd. Doç. Dr. Emrah Doğan Üye
---	---	---

ÖNSÖZ

Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanan ve Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışmada “Tübüler Membran Biyoreaktörün Atıksu Arıtma Verimine Etki Eden Parametrelerin Araştırılması” incelenmiştir.

Bu çalışma süresince her türlü teşvik ve fedakarlığı gösteren, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim çok değerli hocam Prof. Dr. Recep İleri'ye ilgisi, anlayışı, sunmuş olduğu imkanlar ve vermiş olduğu destek için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans tezimin hazırlanması sırasında yapılan mikrobiyolojik çalışmalarda değerli vaktini ayıran, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Nurtaç Öğleni'ye, yüksek lisans eğitimim sırasında değerli fikirleri ve tecrübeleriyle her zaman yanımda olan ve bana ışık tutan kıymetli hocam Prof. Dr. Saim Özdemir'e ve laboratuvar çalışmalarım sırasında benden bilgi, tecrübe ve yardımını esirgemeyen sevgili Araş. Gör. Dr. Yasemin Damar'a çalışmalarım sırasında yol gösterip yanımda olduğu çok teşekkür ederim.

Laboratuvar ölçekli Tübüler Membran Biyoreaktör sisteminin işletilmesi sırasında gerekli atıksu ve aktif çamuru temin ettiğim Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi'nin tüm sorumlularına ve çalışanlarına yardımları için teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her döneminde olduğu gibi bu çalışma döneminde de bana gösterdikleri hoşgörü, fedakarlık ve desteklerinden dolayı sevgili aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Duygu Topaloğlu

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kentsel Atıksular.....	3
2.1.1. Adapazarı Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi atıksu özellikleri.....	3
2.2. Membran Biyoreaktörler.....	5
2.2.1. Genel prosesin tanımlanması.....	5
2.2.1.1. Membran prosesler.....	7
2.2.1.2. Membran proseslerin arıtma mekanizmaları.....	8
2.2.1.3. Membran proseslerin işletim şekilleri.....	9
2.2.1.4. Membran biyoreaktör konfigürasyonları.....	10
2.2.2. Ardışık kesikli biyoreaktör.....	12
2.2.2.1. Genel prosesin tanımlanması.....	12
2.2.2.2. Ardışık kesikli biyoreaktörün reaksiyon (substrat giderim) kinetiği.....	13

2.2.2.3. Ardışık kesikli biyoreaktörün çökelme kinetiği.....	18
2.2.2.4. Ardışık kesikli biyoreaktörün avantajları.....	20
2.2.3. Tübüler membran.....	20
2.2.4. Konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanması.....	21
2.2.4.1. Konsantrasyon polarizasyonu.....	21
2.2.4.2. Membran tıkanması	23
2.2.5. Membran proseslerin temizliği.....	25
2.2.6. Membran biyoreaktörlerin avantajları.....	26

BÖLÜM 3.

TÜBÜLER MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜN ATIKSU ARITMA

VERİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER.....	28
3.1. Membran Performansı.....	28
3.1.1. Akı.....	28
3.1.2. Giderme verimi.....	29
3.2. Membran Performansına İşletme Şartlarının Etkisi.....	30
3.2.1. Akı.....	30
3.2.1.1. Debi.....	30
3.2.1.2. Alan.....	30
3.2.2. Basınç.....	30
3.2.3. Konsantrasyon.....	31
3.2.4. Hız.....	32
3.2.6. Sıcaklık.....	32
3.2.7. pH.....	32

BÖLÜM 4.

MATERYAL VE METOD.....	33
4.1. Laboratuvar Ölçekli Tübüler Membran Biyoreaktör Sistemi.....	33
4.1.1. Ardışık kesikli biyoreaktör sistemi	33
4.1.2. Tübüler membran.....	34
4.2. Atıksu Karakterizasyonu.....	35
4.3. Ölçülen Parametreler.....	36
4.4. Sulama Suyu Sınıfının Bulunması.....	36

4.5. Mikrobiyolojik İnceleme.....	37
BÖLÜM 5.	
BULGULAR.....	39
5.1. Ardışık Kesikli Biyoreaktör Çalışmaları.....	39
5.1.1. Reaksiyon kinetiği.....	39
5.1.1.1. Optimum reaksiyon süresinin (t_r) bulunması.....	39
5.1.1.2. Reaksiyon sabitinin (k) bulunması.....	42
5.1.2. Çökelme kinetiği.....	43
5.1.2.1. Optimum çökelme süresinin (t_c) bulunması.....	43
5.1.2.2. Çökelme hızı.....	46
5.2. Membran Biyoreaktör Çalışmaları.....	47
5.2.1. Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyu kalitesi ve giderme verimi.....	47
5.2.2. Sulama suyu sınıfının belirlenmesi.....	51
5.2.3. KOİ giriş konsantrasyonu membran süzüntü akısı ilişkisi.....	51
5.2.4. AKM giriş konsantrasyonu membran süzüntü akısı ilişkisi....	52
5.2.5. TÇM giriş konsantrasyonu membran süzüntü akısı ilişkisi....	53
5.2.6. Membran biyoreaktörün temizlenmesi.....	53
5.3. Mikrobiyolojik Çalışmalar.....	54
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	68
EKLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Toplam membran yüzey alanı
AKM	: Askıda katı madde
AKR	: Ardışık kesikli biyoreaktör
BOİ	: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
Ca	: Kalsiyum elementi
c_f	: Besleme suyu konsantrasyonu
c_m	: Membran yüzeyindeki konsantrasyon
cm	: Santimetre
c_p	: Süzüntü akımı konsantrasyonu
ÇO	: Çözünmüş oksijen
d	: Partikül çapı
E	: Giderme verimi
EC	: Elektriksel iletkenlik
EPS	: Hücre dışı polimerik maddeler
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamur yüksekliği
HRT	: Hidrolik bekleme süresi
J_t	: t zamanındaki anlık süzüntü suyu akısı
k	: Reaksiyon sabiti
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
KP	: Konsantrasyon polarizasyonu
L	: Litre
m	: Metre
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
MBR	: Membran biyoreaktör

MF	: Mikrofiltrasyon
mg	: Miligram
Mg	: Magnezyum elementi
MLSS	: Askıda katı madde konsantrasyonu
Na	: Sodyum elementi
NF	: Nanofiltrasyon
p	: Sıvının yoğunluğu
p_d	: Partikül yoğunluğu
Q	: Debi
Q_p	: t zamanındaki süzüntü suyu debisi
R_0	: Gözlenen giderme verimi
RES	: Renklilik sayısı
R_g	: Gerçek giderme verimi
r_{sf}	: Doldurma süresi boyunca giderilen substratın oranı
S_0	: Başlangıçtaki substrat konsantrasyonu
sa	: Saat
SAR	: Sodyum adsorbsiyon oranı
S_e	: Reaksiyon süresinin sonundaki substrat konsantrasyonu
S_f	: Doldurma sürecinin sonundaki substrat konsantrasyonu
SKKY	: Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği
sn	: Saniye
SRT	: Çamur yaşı
SVI	: Çamur hacim indeksi
t	: Süre
t_c	: Ardışık kesikli biyoreaktörün devir zamanı
TÇM	: Toplam çözünmüş madde
t_d	: Ardışık kesikli biyoreaktörün boşalma süresi
t_f	: Ardışık kesikli biyoreaktörün doldurma süresi
t_i	: Ardışık kesikli biyoreaktörün bekleme süresi
TMP	: Transmembran basıncı
TN	: Toplam azot
TO	: Ters osmoz
TP	: Toplam fosfor

t_r	: Ardışık kesikli biyoreaktörün reaksiyon süresi
t_s	: Ardışık kesikli biyoreaktörün çökelme süresi
UF	: Ultrafiltrasyon
V	: Hacim
V	: Mutlak çökelme hızı
V_a	: Reaktör içindeki mevcut aktif çamur hacmi
V_{ab}	: Ardışık kesikli biyoreaktöre beslenen atıksu hacmi
V_b	: Ardışık kesikli biyoreaktörün toplam hacmi
$V_ç$: Çökelme hızı
V_e	: Etkin çökelme hızı
V_w	: Suyun artan çökelme hızı
γ	: Kinematik vizkozite
δ	: Hacim/hacim olarak ifade edilmiş çamur konsantrasyonu
α	: Doldurma periyodu başlangıcındaki hacmin toplam hacme oranı
$^{\circ}C$: Derece santigrad
μm	: Mikrometre

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Adapazarı Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi akım şeması...	5
Şekil 2.2.	Membran proseslerin arıtma mekanizmalarının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.3.	Membran proseslerin işletim şekilleri.....	10
Şekil 2.4.	Membran biyoreaktör konfigürasyonları.....	10
Şekil 2.5.	Ardışık kesikli biyoreaktörün çalışma evreleri.....	12
Şekil 2.6.	Tübüler membranın şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.7.	Konsantrasyon polarizasyonu olayının şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.8.	Membran yüzeyinde meydana gelen direnç türleri.....	24
Şekil 2.9.	MBR’lerde tıkanmayı etkileyen faktörler.....	24
Şekil 3.1.	Membran proseslerde basınç ile akı arasındaki ilişki.....	31
Şekil 4.1.	Tübüler membran biyoreaktör sistemi.....	33
Şekil 4.2.	Ardışık kesikli biyoreaktörün şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.3.	Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi kum tutucu ve aktif çamur çıkışından bir görünüm.....	35
Şekil 5.1.	Farklı reaksiyon süreleri için KOİ (a), BOİ (b), TN (c) ve TP (d) giderim verimleri.....	40
Şekil 5.2.	Farklı reaksiyon süreleri için AKM (a), bulanıklık (b) ve renk (c) giderim verimleri.....	41
Şekil 5.3.	Deneysel KOİ çıkış konsantrasyonlarının teorik olarak hesaplanan KOİ çıkış konsantrasyonlarıyla karşılaştırılması.....	43
Şekil 5.4.	Farklı çökelme süreleri için KOİ (a), BOİ (b), TN (c) ve TP (d) giderim verimleri.....	44
Şekil 5.5.	Farklı çökelme süreleri için AKM (a), bulanıklık (b) ve renk (c) giderim verimleri.....	45
Şekil 5.6.	Çökelme süresi boyunca aktif çamur yüksekliğinin değişimi.....	46

Şekil 5.7.	Çökeltme süresi boyunca çökeltme hızının değişimi.....	47
Şekil 5.8.	Tübüler membran biyoreaktördeki KOİ (a) ve BOİ (b) konsantrasyonlarının değişimi.....	47
Şekil 5.9.	Tübüler membran biyoreaktördeki TN (a) ve TP (b) konsantrasyonlarının değişimi.....	48
Şekil 5.10.	Tübüler membran biyoreaktördeki AKM (a), bulanıklık (b) ve renk (c) parametrelerinin değişimi.....	49
Şekil 5.11.	Tübüler membran biyoreaktör giriş ve çıkış suyu kalitelerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 5.12.	KOİ giriş konsantrasyonuyla tübüler membran süzüntü akısının değişimi.....	52
Şekil 5.13.	AKM giriş konsantrasyonuyla tübüler membran süzüntü akısının değişimi.....	52
Şekil 5.14.	TÇM giriş konsantrasyonuyla tübüler membran süzüntü akısının değişimi.....	53
Şekil 5.15.	I. Numunede karışım fazındaki aktif çamurun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 40x, (b) Arcella sp. 40x, (c) Epistylis sp. 40x, (d) Philodina sp 40x, (e) Scyphidia sp. 100x, (f) Ulothrix sp. 40x, (g) Carchesium sp. 40x, (h) Diffugia sp. 40x.....	56
Şekil 5.16.	I. Numunede çökeltme fazındaki dip çamurunun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 40x, (b) Epistylis sp. 40x, (c) Carchesium sp. 40x, (d) Acineta sp. 40x, (e) Arcella sp. 40x, (f) Ulothrix sp. 40x, (g) Rotifer 40x, (h) Carchesium sp. 40x.....	57
Şekil 5.17.	II. Numunede karışım fazındaki aktif çamurun mikrobiyolojik yapısı, (a) Arcella sp. 40x, (b) Cocconeis sp. 100x, (c) Diffugia sp. 40x, (d) Carchesium sp. 40x, (e) Arcella sp. 40x, (f) Vorticella sp. 40x, (g) Arcella sp. 40x, (h) Diffugia sp. 40x.....	59
Şekil 5.18.	II. Numunede çökeltme fazındaki dip çamurunun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 40x, (b) Diffugia sp. 40x, (c) Rotifer 40x, (d) Volvox sp. 40x, (e) Arcella sp. 40x, (f) Carchesium sp. 40x, (g) Diffugia sp. 40x, (h) Arcella sp. 40x.....	60

- Şekil 5.19. III. Numunede karışım fazındaki aktif çamurun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 10x, (b) Habrotrocha sp 40x, (c) Aspidisca sp. 40x, (d) Arcella sp. 40x, (e) Carchesium sp. 40x, (f) Epistylis 62
- Şekil 5.20. III. Numunede çökelme fazındaki dip çamurunun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 10x, (b) Didinium sp. 40x, (c) Vorticella sp. 40x, (d) Acineta sp. 40x, (e) Peranema sp. 40x, (f) Targidrade sp. 40x, (g) Scyphidia sp. 40x, (h) Epistylis sp. 40x... 63

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Dahili ve harici membran biyoreaktörlerin karşılaştırılması.....	11
Tablo 4.1.	Çalışmada kullanılan kentsel atıksuyun karakterizasyonu.....	35
Tablo 5.1.	Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyu kalitesi ve giderme verimi.....	50
Tablo 5.2.	Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyunun sulama suyu kriterleri açısından incelenmesi.....	51
Tablo 5.3.	Mikrobiyolojik çalışmada kullanılan kentsel atıksuyun karakterizasyonu.....	54

ÖZET

Anahtar kelimeler: İleri arıtma, membran biyoreaktör, ardışık kesikli biyoreaktör, tübüler membran, reaksiyon kinetiği, çökeltme kinetiği, mikrobiyoloji, sulama suyu sınıfı

Bu çalışmada; kentsel nitelikli atıksuların laboratuvar ölçekli Tübüler Membran Biyoreaktör ile ileri arıtımı amaçlanmıştır. Membran biyoreaktör (MBR) sisteminin kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP), askıda katı madde (AKM), renk ve bulanıklık giderim verimleri ile ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamurun mikrobiyolojik kompozisyonu incelenerek Tübüler Membran Biyoreaktör sisteminin performansına etki eden faktörler araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen yüksek kalitedeki MBR çıkış suyunun Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği sulama suyu standartlarına göre sulama suyu sınıfı belirlenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında ardışık kesikli biyoreaktörün reaksiyon-çökeltme kinetiği araştırılmıştır. Ardışık kesikli biyoreaktör sistemi ile kentsel atıksuyun farklı reaksiyon ve çökeltme sürelerinde arıtma verimleri incelenerek optimum reaksiyon ve çökeltme süresi 1.5 sa bulunmuştur. Optimum reaksiyon süresi için k reaksiyon sabiti ise 0.30 sa^{-1} olarak hesaplanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, Tübüler Membran Biyoreaktör sisteminin çıkış suyu kalitesi ve giderim verimi incelenmiştir. Tübüler Membran Biyoreaktör sistemiyle KOİ %93, BOİ %97, TN %97, TP %88, AKM %100, bulanıklık %99.9 ve renk %90 oranındaki giderme verimleriyle arıtılarak yüksek kalitede çıkış suyu elde edilmiştir. Elde edilen yüksek kalitedeki çıkış suyunun Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği sulama suyu standartlarına göre sulama suyu sınıfı C₃S₁; III. sınıf kullanılabilir su olarak bulunmuştur.

Çalışmanın son aşamasında ardışık kesikli biyoreaktördeki mikroorganizma türleri ve aktif çamurun flok yapısı mikroskopta incelenmiştir. Bunun için reaktörden karışım anında aktif çamurdan ve çökeltme anındaki dip çamurdan numuneler alınarak incelenmiştir. Ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamurun mikrobiyolojik kompozisyonu incelendiğinde aktif çamurdaki protozoa ve metazoa popülasyonunun iyi bir aktif çamur için arzu edilen karakterde olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF EFFECTIVE PARAMETERS ON WASTEWATER TREATMENT EFFICIENCY OF TUBULAR MEMBRANE BIOREACTOR

SUMMARY

Key Words: Advanced treatment, membrane bioreactor, sequencing batch reactor, tubular membrane, reaction kinetic, sedimentation kinetic, microbiology, irrigation water class

In this study, advanced treatment of urban wastewaters by lab-scale Tubular Membrane Bioreactor was intended. Treatment efficiency of chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), suspended solids (SS), color, turbidity and micobiological composition of activated sludge was investigated to identify the effective parameters on wastewater treatment efficiency of Tubular Membrane Bioreactor. Also a class of irrigation water was determined according to Notification of Technical Methods of Water Pollution Control Regulations for irrigation water standards

During the first phase of the study, reaction and sedimentation kinetics of sequencing batch reactor were investigated. Performance of a lab-scale sequencing batch reactor was observed at different reaction and sedimentation times. Optimum reaction and sedimentation time was obtained 1.5 h and reaction constant (k) was calculated 0.30 h^{-1} for optimum operating conditions.

During the second phase of the study, water quality and removal efficiency of Tubular Membrane Bioreactor were investigated. Urban wastewater was treated in the ratios of COD 93%, BOD 97%, TN 97%, TP 88%, SS 100%, turbidity 99.9% and color 90% removal efficiencies and high quality treated water was obtained by Tubular Membrane Bioreactor. According to Notification of Technical Methods of Water Pollution Control Regulations for irrigation water standards The class of irrigation water was determined C_3S_1 ; the third class irrigation water and available for irrigation.

During the last phase of the study, microorganism types and floc structure of the activated sludge in the sequencing batch reactor were examined by using microscope. Samples of activated sludge were taken during the mixing phase and settlement phase. The protozoa and metazoa population of the activated sludge have the required characteristics for good quality activated sludge.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, aşırı sanayileşme, artan kuraklık ve aşırı tüketim ile birlikte tatlı su kaynakları global ölçekte hızla tükenmektedir. Bu problem özellikle ülkemizin de coğrafyasında bulunduğu Balkanlar ve Orta doğuda son yıllarda daha da önemli hale gelmekte ve sahip olunan su kaynakları, ülkeler arasındaki stratejik ilişkiler ve pazarlıkların ana unsurlarından biri olmaktadır. Artan talebe karşılık tatlı su kaynaklarını yenileyip artırmak teknik ve ekonomik açıdan sınırlayıcı olduğu için sürdürülebilir kalkınmayı sağlayabilecek değişik pratik çözümlere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda “temiz su kaynaklarını korumanın ilk yolu atıksuları geri kazanma ile başlar” düşüncesi ile arıtılmış atıksuların geri kazanımı ve birçok değişik amaçlı geri kullanımı için son yıllarda çalışmalar ve uygulamalar artırılmıştır. Atıksuların geri kullanımı ile hem tatlı su kaynaklarının tüketimi azaltılmakta hem de deşarj edilen arıtılmış atıksuların çevresel etkileri en aza indirilebilmektedir [1].

Türkiye 187 milyar m³ su potansiyeli ile genel olarak zengin su kaynaklarına sahip gibi görülmektedir. Fakat son yıllarda nüfusun artması, endüstriyel faaliyetlerin hızlanması ve turizm aktivitelerinin çoğalması gibi sebeplerle pek çok bölgemizde yaz aylarında su sıkıntısı bütün şiddetiyle hissedilmektedir. Bunun sebebi ise su potansiyelinin zaman içerisinde homojen dağılmamasıdır. Yine bazı bölgelerimizde yaz aylarında sulama suyunun yanı sıra ciddi kullanım ve içme suyu sıkıntısı da çekilmektedir. Eğer şimdiden önlemler alınmazsa gelişen teknoloji ve üretimin yanı sıra nüfus artışına bağlı olarak var olan kaynakların 20-25 yıl içerisinde tükenebileceği düşünülmektedir. Hatta bulunduğumuz coğrafyada gelecekte su savaşlarından bahsedilmektedir [2]. Özellikle geçtiğimiz yıllar içerisinde Kocaeli başta olmak üzere Ankara ve İstanbul İlleri’nde ciddi su sıkıntıları yaşanmış, barajlardaki doluluk oranları % 1’in altına düşmüştür.

Ülkemizde olduğu gibi su talebinin çok olduğu sektörlerden birisi tarımdır. Dolayısıyla arıtılmış atıksuların zirai sulamada geri kullanımı tatlı su talebini düşürme açısından önemlidir. Bu bağlamda zirai sulamada kullanılabilecek nitelikte, güvenilir arıtılmış su üretebilecek, ilk yatırım ve işletme maliyeti açısından rekabet edebilecek, ileri arıtma teknolojilerine ihtiyaç vardır. Bu teknolojiye tipik ve çok iyi bir örnek son 10 yıl içinde geliştirilen membran biyoreaktör (MBR) sistemleridir. Biyolojik arıtımın membran teknolojisiyle birleşmesi sonucunda oluşan MBR'ler aktif çamur sisteminde katı/sıvı faz ayrımının son çöktürme tankı yerine bir membran ünitesi tarafından sağlanması prensibine dayanmaktadır [1, 2].

Bu çalışmada; kentsel nitelikli atıksuların ileri arıtımı araştırılarak, yeni bir teknoloji olan MBR sisteminin kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP), askıda katı madde (AKM), renk, bulanıklık giderim verimleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında; KOİ, BOİ, TN, TP, AKM, renk ve bulanıklık giderme verimine etki eden faktörlerin laboratuvar deneyleri ile incelenmesi ve elde edilen yüksek kalitedeki MBR çıkış suyunun Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY) Teknik Usuller Tebliği sulama suyu standartlarına uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kentsel Atıksular

Yerleşim yerlerinde yoğun nüfus artışı, endüstrileşme, tarım sektöründeki gübre ve ilaç kullanımındaki artışlar, hayvansal ürünlerin üretimini temin için kurulan çiftlikler ve tesisler çevreye büyük bir kirlilik olarak geri dönmektedir. Alıcı su ortamına pis su toplama şebekesi ve atık toplama sistemlerinden geçmeden ulaşan tüm kentsel atıklar kontrol edilemeyen kirlilik kaynaklarını oluştururlar. Ayrıca karayolları üzerinde trafik yoğunluğunun olduğu yerlerdeki su kaynaklarında kirliliğe neden olabilecek unsurlar da oldukça fazladır. Bu tür yolların kenarında bulunan birikinti sular yoğun bakteri tabakasına sahip olup genellikle oksijenden yoksundur. Yağmur sularının oluşturduğu kentsel akışlar da kontrol altına alınmadıkları takdirde kanalizasyon sistemine karışabileceği gibi, doğrudan alıcı ortama da ulaşabilmektedir [3].

Atıksu karakterizasyonu, uygun arıtma sistemlerinin tasarımı ve tesisin düzgün bir şekilde işletilmesi açısından çok önemlidir. Kentsel atıksular genellikle ham evsel atıksular ile ön arıtmadan geçmiş endüstriyel atıksulardan oluşmaktadır. Bu yüzden bu atıksular çok farklı özelliklere sahiptir ve ekonomik bir arıtma için karakterizasyonunun bilinmesi gerekmektedir. Atıksuların karakterizasyonunu belirlerken deşarj yönetmeliğinde belirtilen tüm parametreler dikkate alınmalıdır [4].

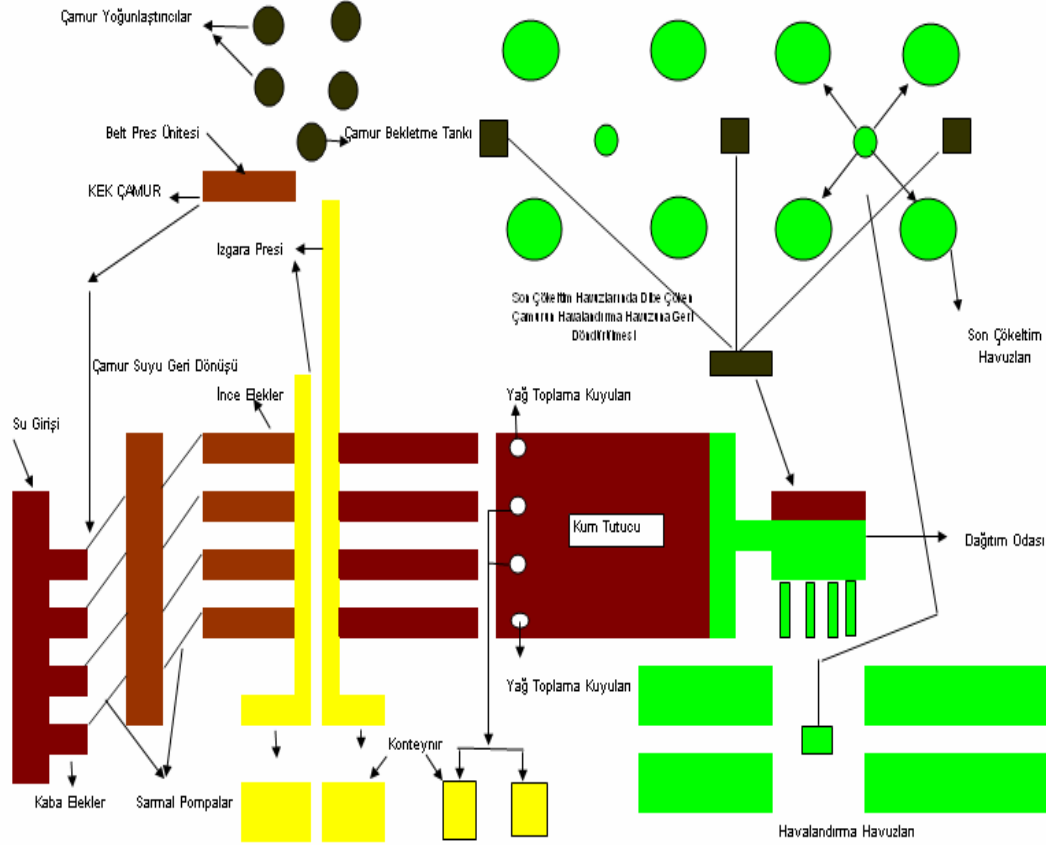
2.1.1. Adapazarı Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi atıksu özellikleri

Tesis, konutlardan ve endüstriden kaynaklanan atık sularının tümünü arıtmak üzere tasarlanmıştır. Sanayi kuruluşları, zehirli madde, ağır metal veya başka bir kirletici içeren atık sularını pis su toplama sistemine boşaltmadan önce ön arıtmadan

geçirmek zorundadır. Tesis kuru havalarda günde 198800 m³/gün, yağışlı havalarda 271941 m³/gün atık suyu arıtacak kapasitededir. Atık suyun arıtılması sonucunda, tam kapasite çalışmada günde yaklaşık 932 m³/gün %30 kuru maddeli çamur keki elde edilmektedir. Tesise gelen atık sudaki organik kirlilik (BOİ) takriben 225 mg/L olup, çıkış değerleri arıtmadan sonra deşarj sınır değeri olan 30 mg/L'den daha düşük seviyelerde gerçekleşmektedir [4].

Şekil 2.1.'de akım şeması verilen tesis aşağıdaki ünitelerden oluşmaktadır.

- Kaba Elekler
- Sarmal Pompa İstasyonu
- İnce Elekler
- Havalandırmalı Kum Tutucu
- Yağ Toplama Kuyuları
- Havalandırma Havuzu (Uzun Havalandırmalı Aktif Çamur)
- Son Çökeltim Havuzu
- Çamur Yoğunlaştırıcı
- Çamur Geri Devir Pompa İstasyonu
- Çamur Bekletme Tankı
- Belt Pres Ünitesi



Şekil 2.1. Adapazarı Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi akım şeması [5]

2.2. Membran Biyoreaktörler

2.2.1. Genel prosesin tanımlanması

Son yıllarda kullanımı yaygınlaşan membran biyoreaktörler 1960'lı yıllarda Dorr Oliver tarafından evsel atıksuların arıtımında kullanılmıştır [6]. 1990'lı yılların başında yeni bir arıtma prosesi olarak kabul edilen MBR teknolojisinin, son 15 yıl içerisinde polimer teknolojilerindeki gelişmeler ve etkin rekabet neticesinde, gelişimi doygunluğa ulaşma noktasındadır. 15-20 yıl öncesinde global olarak onlarla ifade edilebilen MBR tesisi sayıları 2009 yılı itibariyle onbinlere yaklaşmaktadır. Uygulama sayısındaki artışın yanı sıra MBR prosesleri artık $>300.000 \text{ m}^3/\text{gün}$ gibi yüksek debili tesislerde de kullanılmaktadır. Bu trend, küçük debili evsel atıksu

arıtma uygulamalarına ilaveten, MBR prosesinin büyük arıtma tesisleri içinde konvansiyonel sistemlerle maliyet açısından rekabet edebilir hale geldiğinin ispatıdır [7].

MBR sistemleri katı/sıvı ayrımında etkili performans sergilemektedirler. Klasik aktif çamur sistemleriyle kıyaslandıklarında daha yüksek oranda biyokütle konsantrasyonu, daha iyi biyolojik parçalanma, yüksek kalitede çıkış suyu elde edilmesi, daha az çamur üretimi ve daha az alan ihtiyacı gibi avantajlara sahiptirler [6, 8-11].

Membran biyoreaktörler atıksuların arıtılmasında biyolojik çamurun ayrıştırılmasında ve organik maddelerin gideriminde başarılı sonuçlar vermektedir [12]. Son yıllarda, MBR sistemlerinin evsel atıksuların arıtımında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Evsel atıksuların arıtımında oldukça yüksek oranlarda AKM, KOİ ve toplam organik karbon (TOC) giderimi sağlanmaktadır. [11, 13]. Ayrıca Membran biyoreaktörlerden elde edilen yüksek kalitedeki çıkış suyu bakteri gibi patojenleri muhteva etmediğinden dezenfeksiyon ihtiyacı yoktur, elde edilen çıkış suları ise evsel ve endüstriyel amaçlı kullanılabilir [6, 9, 14].

MBR sistemleri, evsel atıksuların yanında kozmetik, ilaç, tekstil, metal, kimya, mezbaha ve kağıt sanayi atıksularının arıtılmasında da başarıyla uygulanmaktadır [15].

Bu sistemlerde çökeltme tankı olmadığından yatırım maliyetleri klasik aktif çamur sistemlerine göre daha az, işletme maliyetleri ise sistemin yüksek enerji ihtiyacı ve membran ömürlerinin kısa oluşu dolayısıyla daha yüksektir [13].

2.2.1.1. Membran prosesler

Membranlar, kendine bir sürücü kuvvet uygulandığında fiziksel ve kimyasal özelliklerin bir fonksiyonu olarak çözelti içindeki bazı türleri ayırma yeteneğine sahip ince bir film tabakasıdır. Membran, besleme çözeltisi içindeki bazı maddeleri tutarak, diğer tarafa arıtılmış suyun geçmesini sağlamaktadır. Membranlardan, molekül ve partikül transferi, homojen bölgelerden birine bir kuvvet uygulayarak gerçekleştirilmektedir. Bu kuvvet, sürücü kuvvet olarak adlandırılmakta ve membrana doğru meydana gelen potansiyel farklılığının, membran kalınlığına olan oranı olarak tarif edilmektedir [16].

Sürücü kuvvetler akımın membranın bir tarafından diğer tarafına geçişini sağlar. Bu sürücü kuvvetler iki faz arasındaki basınç, sıcaklık, konsantrasyon ve elektriksel potansiyel farklardır. Membran prosesler de en sık kullanılan sürücü kuvvet basınçtır. Uygulanan basınç membranın karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Basınç sürümlü membran prosesler, mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) olmak üzere dört gruba ayrılırlar.

Mikrofiltrasyon ile büyüklükleri 0.05-5 μm arasında değişen partiküller ve organizmalar giderilmektedir. Çok düşük membran direncine sahip olduğundan dolayı 0-2 bar basınç aralığında işletilmektedirler. Mikrofiltrasyon prosesi bakteriler, yağlar, proteinler ve mantarlar gibi yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerin gideriminin de, kimyasal, biyolojik, farmakolojik ve gıda çözeltilerinin arıtımında ve atıksu arıtmada kullanılırlar [16].

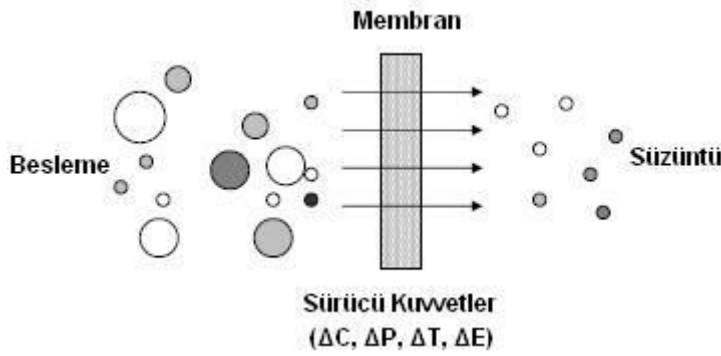
Ultrafiltrasyon membranlarının gözenek büyüklükleri 0.1-0.01 μm arasında değişmektedir. Uygulanan basınç 1-10 bar aralığındadır. Bu prosesde genellikle askıda katı maddeler, kolloidal maddeler, bakteriler ve yüksek molokül ağırlıklı maddelerin giderilmesi için kullanılmaktadır [16].

Nanofiltrasyon, düşük moleküler ağırlıklı organik bileşiklerin ve iki değerlikli iyonların ayırımında kullanılmaktadır. Nanofiltrasyon membranlarının önemli ve farklı bir özellikleri iyon seçici olmalarıdır. Bir değerlikli iyonlar membrandan büyük oranda geçerler. Fakat sülfat ve karbonat gibi iki değerlikli iyonlar önemli oranda tutulurlar [17]. NF membranlardan sadece boyutu 0.001 μ m den daha küçük olan moleküller geçmektedir. Nanofiltrasyon ile arıtılmış su tek değerlikli iyonlar ve düşük molekül ağırlıklı organik maddeler içerir. NF membranlar su yumuşatma, boya geri dönüşümü, tuz giderimi, ürün ayırma ve atıksu artımında kullanılmaktadır [16].

Ters osmoz, konsantre çözeltiliye çözeltilinin osmotik basıncından daha yüksek basınç uygulanmasıyla ortaya çıkan kütle transfer olayıdır. Böylece su konsantre çözeltiliden ayrılıp saf su tarafına akar ve aralarında konsantrasyon farkı bulunan iki faz meydana gelmiş olur [18]. Ters osmozun temel ilkesi membran içerisinden yalnızca su geçişine izin vermesidir. Bunun dışında kalan bütün maddeler (tuz, şeker vs.) membran tarafından tutulmaktadır. Arıtılan su kimyasal, fiziksel ve bakteriyolojik olarak saftır [16].

2.2.1.2. Membran proseslerin arıtma mekanizmaları

Membran prosesler çözülmüş maddelerin sıvılardan ve gazlardan ayrılmasını sağlamaktadır. Basınç uygulamalı membran proseslerde çözelti üzerine membranın bir tarafından sürüş gücü (driving force) olarak basınç uygulanır ve besleme çözeltisi süzüntü ve konsantre şeklinde iki kısma ayrılır [16]. Membran proseslerin arıtma mekanizmalarının şematik gösterimi Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.

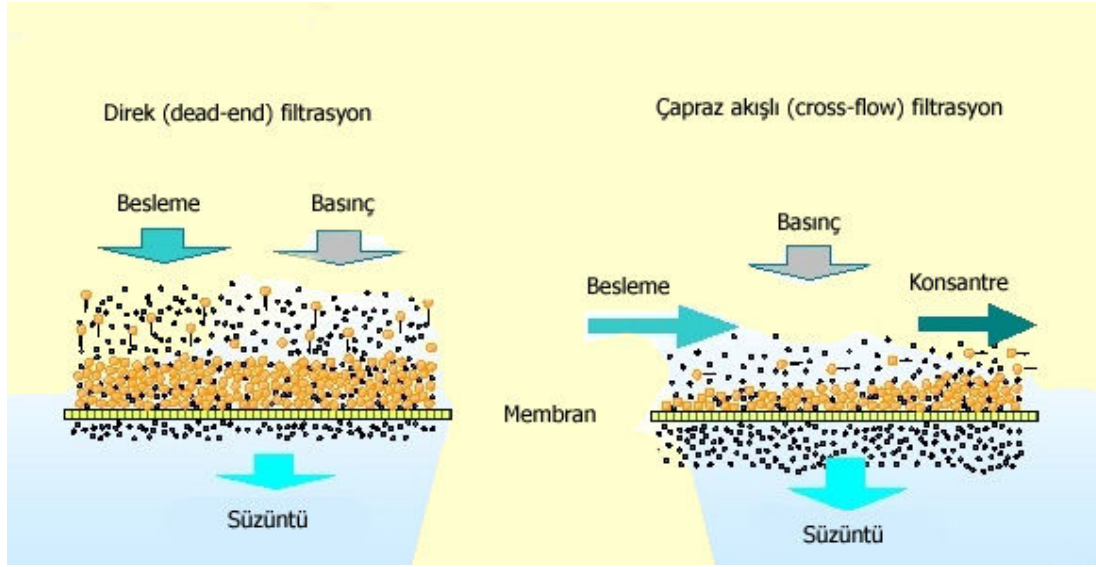


Şekil 2.2. Membran proseslerin arıtma mekanizmalarının şematik gösterimi [19]

Membran prosesler; besleme, süzüntü, konsantre olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır. Arıtma işlemi besleme fazındaki bir çözeltinin membran tarafından tutulmasıyla gerçekleşmektedir. Membrandan geçen akım süzüntü geçemeyen akım ise konsantre olarak adlandırılır.

2.2.1.3. Membran proseslerin işletim şekilleri

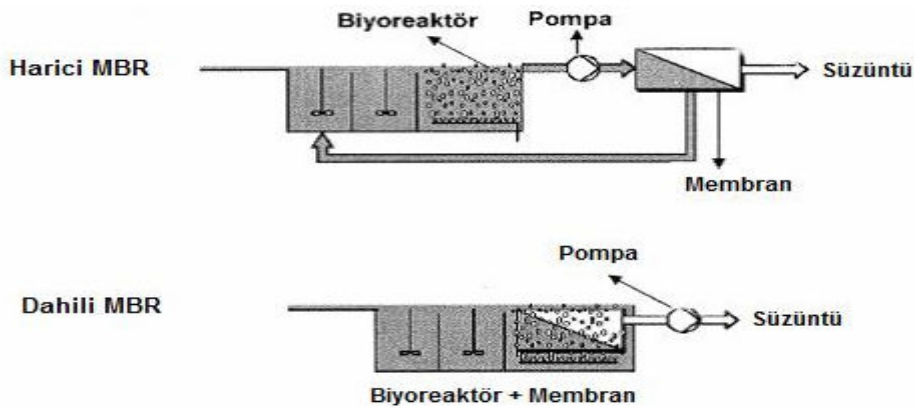
Membran proseslerde genellikle iki tür işletim şekli vardır. Bunlar direk filtrasyon (dead-end filtration) ve çapraz akışlı filtrasyon (cross-flow filtration)'dur. Direk filtrasyonda besleme çözeltisi membran yüzeyine dikey olarak uygulanır. Bu durumda giderilen çözünen maddeler membran yüzeyinde birikerek bir kek tabakası oluşturur. Bu kek tabakasının kalınlığı zamanla artar. Sonuç olarak akı değerinde ve giderim oranında bir azalma meydana gelir. Bu olay membran proseslerde istenmeyen bir durumdur. Çapraz akışlı membran filtrasyonu en çok endüstrilerde kullanılmaktadır. Burada besleme çözeltisi membran yüzeyine yatay olarak uygulanmaktadır. Bu yüzden tıkanma olayı direk filtrasyona göre daha az olmaktadır. Bunun yanında akı ve giderim oranındaki azalma doğru modül seçilmesi ve uygun çapraz akış hızı ile minimize edilebilir. Şekil 2.3'de membran proseslerin işletim şekilleri şematik olarak gösterilmiştir [16].



Şekil 2.3. Membran proseslerin işletim şekilleri [16]

2.2.1.4. Membran biyoreaktör konfigürasyonları

MBR sistemlerinin harici ve batık (dahili-entegre) olmak üzere 2 ana konfigürasyonu mevcuttur [1, 20, 21]. Harici MBR'ler sıvı/biyokütle ayırımının çapraz akışlı membran filtrasyonu ile ayrı bir ünite, batık MBR'ler ise sıvı/biyokütle ayırımının reaktör içine yerleştirilen membranlar ile gerçekleştirildiği sistemlerdir [1, 22]. Şekil 2.4.'te membran biyoreaktör konfigürasyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Membran biyoreaktör konfigürasyonları [1]

Dahili membran biyoreaktörlerde farklı amaçlar için genellikle iki tür havalandırma uygulanmaktadır. Reaktör tabanındaki difüzörlerden verilen kaba hava kabarcıklı havalandırma ile biyokütlenin oksijen ihtiyacı hedeflenir. Öte yandan membran yüzeyine uygulanan ince hava kabarcıklı havalandırma ile membran yüzeyine maddelerin birikip akıyı azaltması engellenmeye çalışılır. Yükselen hava kabarcıkları membran yüzeyinde türbülanslı karşı akım yaratıp (yaklaşık 1 m/sn), membran yüzeyinde materyallerin birikmesini azaltır, böylece sistem daha etkin çalışır. Reaktördeki türbülanslı karışım ve reaktör hidroliğinden dolayı iki havalandırma türü de pratikte hem temizleme hem de oksijen ihtiyacı taleplerini karşılayabilir. Diğer bir deyimle uygulamada iki havalandırmanın da sonuçlarını ayırt etmesi zordur [1]. Batık ve harici MBR konfigürasyonlarının karşılaştırılması Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Dahili ve harici membran biyoreaktörlerin karşılaştırılması

Dahili (Batık) Membran Biyoreaktör	Harici Membran Biyoreaktör
Membran yüzey alanı fazla	Membran yüzey alanı az
Düşük akı	Yüksek akı
Havalandırma ihtiyacı yüksek	Havalandırma ihtiyacı daha az
Daha az temizleme gereksinimi	Daha sık temizleme ihtiyacı
Daha düşük basınç gereksinimi	Daha yüksek basınç gereksinimi
İşletme maliyetleri düşük	İşletme maliyetleri yüksek
İlk yatırım maliyeti yüksek	İlk yatırım maliyeti daha düşük

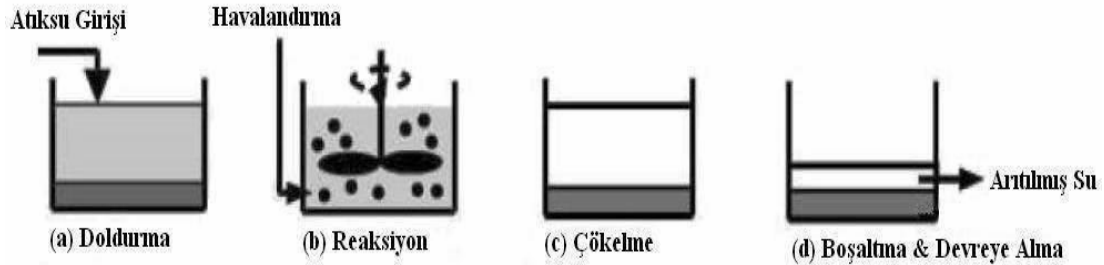
Batık membran biyoreaktörler daha düşük işletme akılarında çalıştırıldıkları için daha fazla geçirimsizliğe (permeabiliteye) dolayısıyla da daha fazla hidrolik verimliliğe sahiptirler. Düşük akı ile çalışmak batık membran biyoreaktörlerde önemlidir çünkü bu uygulama membran kirlenmesini veya tıkanmasını minimize eder. Tıkanma membran biyoreaktörlerin en önemli dezavantajlarından birisi olup, maliyeti artırıcı ve işletmeyi zorlaştırıcı temizleme mekanizmalarını gerektirir. Batık biyoreaktörler harici biyoreaktörlere göre daha düşük pompaj masrafları gerektirse de daha yoğun havalandırma ihtiyacı arz ederler. Bunun nedeni havalandırmanın membran tıkanmasını engelleyici ana yöntem olmasıdır. Ayrıca, batık membran biyoreaktörlerde düşük akı ile çalışılması sabit süzüntü suyu debisi üretimi baz

alındığında daha fazla membran yüzey alanı (dolayısıyla daha fazla ilk yatırım maliyeti) gerektirmektedir [1].

2.2.2. Ardışık kesikli biyoreaktör

2.2.2.1. Genel prosesin tanımlanması

Ardışık kesikli biyoreaktörler gerek endüstriyel ve gerekse evsel atıksuların arıtılmasında kullanılan ve son zamanlarda yaygınlaşan, havalandırma (reaksiyon) ve çökeltme işleminin tek tank içerisinde yapıldığı doldur boşalt esasına dayanan biyolojik arıtma sistemleridir [23-28]. AKR sistemi beş farklı adımda tanımlanabilmektedir. Bunlar sırasıyla doldurma/reaksiyon, reaksiyon, çökeltme, boşaltma ve tekrar sisteme almadır. Ardışık kesikli biyoreaktörün çalışma evreleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Ardışık kesikli biyoreaktörün çalışma evreleri [29].

Doldurma fazında atıksu tankı beslenir ve bir önceki çevrim sonunda çökmüş olarak tankta bulunan biyokütle ile karışmaya başlar. Doldurma fazı sonunda karıştırma ve havalandırma başlar bu evre reaksiyon fazı olarak adlandırılmaktadır. Çökeltme fazında reaksiyon için gerekli havalandırma ve karıştırma durdurulur ve çökeltmenin başlamasına izin verilir. bu işlemle mikroorganizmaların çöktürülerek arıtılmış sudan ayrılması sağlanır. Çökeltme sona erdiği anda üst faz (arıtılmış atıksu) sistemden uzaklaştırılır. Arıtılmış su boşaltıldıktan sonra, sistemin bir sonraki doldurma fazına geçilir.

Her bir periyodun süresi, deneyimli operatörler tarafından ayrıntılı pilot tesis çalışmaları ve tecrübeleri temelinde belirlenmektedir. Farklı nitelikteki atıksuların kendilerine ait karakteristikleri nedeniyle uygun işletme parametrelerini seçmek önemli ve gereklidir. Çökelme ve boşaltma periyotlarının sürelerinin sabitlenmesine karşılık kontrol edilen reaksiyon süresi sistemin verimini geliştirilebilmektedir [30, 31]. AKR organik ve besi maddelerinin uzaklaştırılması için uygun bir prostestir. AKR son yıllarda endüstriyel atıksuların arıtılması için de geliştirilmiştir [32]. Endüstriyel atıksuların arıtılması için kullanılabilen AKR uygulamaları her geçen gün artmakta olup, Almanya'daki atıksu arıtma teknolojileri arasındaki AKR uygulanması oranı % 1.3 civarındadır [33]. AKR bir aktif çamur biyolojik arıtma prosesidir. AKR sistemleri, sürekli (plug flow) ve tam karışım (complete mixed) sistem özellikleri gösteren melez (hybrid) sistemlerdir. Fakat bunlardan farklı özellikler gösterdikleri de literatürde ifade edilmektedir. AKR sistemi, klasik aktif çamur reaktöründen farklı olup, havalandırma ve çökelme fonksiyonlarının tek tankta gerçekleştiği bir sistemdir [34-39].

2.2.2.2. Ardışık kesikli biyoreaktörün reaksiyon (substrat giderim) kinetiği

Doldurma fazı sonundaki substrat konsantrasyonu, hacmin ve doldurma süresince giderilen substratın kinetiğinin fonksiyonudur. Bu fonksiyonu ifade etmek için doldurma fazındaki kütle denge denklemi yazılırsa [32];

Giren – Çıkan + Üretilen = Birikim

$$Q S_o - 0 + r_{sf} V = \frac{d}{dt} (V S) \quad (2.1)$$

Burada; r_{sf} , doldurma süresi boyunca giderilen substratın oranını ifade eder.

$$r_{sf} = -k S \quad (2.2)$$

(2.2) nolu denklemdeki r_{sf} değeri (2.1) nolu denklemde yerine yazılırsa

$$Q S_o - k S V = S \frac{dV}{dt} + V \frac{dS}{dt} \quad (2.3)$$

$dV / dt = Q$ eşitliği kullanılarak, eşitliğin her iki tarafı V ile bölünürse

$$\frac{dS}{dt} + \frac{Q}{V} S + k S = \frac{Q}{V} S_o \quad (2.4)$$

$Q / V = 1 / t$. Doldurma periyodunun başındaki reaktör hacmi V_a ve $t = V_a / Q$;
doldurma periyodunun sonunda $t = V_b / Q$. Yukarıdaki diferansiyel denklem
çözülürse:

$$\frac{dS}{dt} + \frac{S}{t} + k S = \frac{S_o}{t} \quad (2.5)$$

Denklem integre edilirse çözüm:

$$S = e^{-\int \left(\frac{1}{t} + k\right) dt} \int \frac{S_o}{t} e^{-\int \left(\frac{1}{t} + k\right) dt} dt + C e^{-\int \left(\frac{1}{t} + k\right) dt} \quad (2.6)$$

Denklemden C integrasyon sabitir.

$$S = \frac{S_o}{t} e^{-kt} \int e^{kt} dt + \frac{C}{t} e^{-kt} \quad (2.7)$$

Denkleme integral uygulanırsa

$$S = \frac{S_o}{k t} + \frac{C}{t} e^{-kt} \quad (2.8)$$

Başlangıçtaki $t = V_a / Q$ ve $S = S_e$ alınırsa.

$$S_e = \frac{S_o Q}{k V_a} + \frac{C Q}{V_a} e^{-k \left(\frac{V_a}{Q} \right)} \quad (2.9)$$

$$C = \left(\frac{V_a}{Q} S_e - \frac{S_o}{k} \right) e^{-k \left(\frac{V_a}{Q} \right)} \quad (2.10)$$

Denklemden C'nin değeri yerine konursa

$$S = \frac{S_o}{k t} + \left(\frac{V_a}{Q} S_e - \frac{S_o}{k} \right) \frac{1}{t} e^{-k \left(\frac{V_a}{Q} - t \right)} \quad (2.11)$$

$t_f = \frac{V_b}{Q}$ ve $S = S_f$ eşitlikleri kullanılarak doldurma süreci sonundaki substrat konsantrasyonu bulunur.

$$S_f = \frac{S_o Q}{k V_b} + \left(\frac{V_a}{Q} S_e - \frac{S_o}{k} \right) \frac{Q}{V_b} e^{k \left(\frac{V_a}{Q} - \frac{V_b}{Q} \right)} \quad \text{ya da}$$

$$S_f = \frac{S_o Q}{k V_b} + \left(\frac{V_a}{V_b} S_e - \frac{Q S_o}{V_b k} \right) e^{k \left(\frac{-V_{ab}}{Q} \right)} \quad (2.12)$$

Reaksiyon süresi boyunca giderilen substratın hesap edilmesi, direkt olarak integralinin alınması ile ifade edilir [32].

(2.2) nolu denklem substrat giderimi için doğrudan integre edilirse

$$\frac{dS}{dt} = -k S$$

$$\int_{S_f}^{S_e} \frac{dS}{S} = -k \int_0^{t_r} dt \quad \text{ya da}$$

$$S_e = S_f e^{-k t_r} \quad (2.13)$$

Burada, S_f doldurma süresinin sonundaki substrat konsantrasyonu.

S_e reaksiyon süresinin sonundaki substrat konsantrasyonu.

(2.12) numaralı denklem (2.13) numaralı denklemde yerine konursa, reaksiyon süresinin sonundaki substrat konsantrasyonu S_e denklemi

$$S_e = \frac{\frac{S_0 Q}{k V_b} e^{-k t} \left(1 - e^{k \left(\frac{-V_{ab}}{Q} \right)} \right)}{1 - \frac{V_a}{V_b} e^{k \left(\frac{-V_{ab}}{Q} \right)} e^{-k t}} \quad (2.14)$$

$$E_{Exp.} = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \quad (2.15)$$

Eğer (2.14) numaralı denklem (2.15) numaralı denklemde yerine konursa, bu çalışma için yeni arıtma verimi (E) denklemi:

$$E_{Model} = 1 - \left[\frac{Q}{k V_B} \left(1 - e^{-k \left(\frac{V_{AB}}{Q} \right)} \right) e^{-k t_R} + \frac{V_A}{V_B S_0} S_e \left(e^{-k \left(\frac{V_{AB}}{Q} \right)} \right) (e^{-k t_R}) \right] \quad (2.16)$$

Bir tam devir; doldurma, reaksiyon (havalandırma), çökelme, boşaltma ve yeniden devreye alma için bekletme fazlarından oluşmaktadır [32, 40].

$$t_c = t_f + t_r + t_s + t_d + t_i \quad (2.17)$$

Burada, c , f , r , s , d ve i devir, doldurma, reaksiyon, çökelme, boşaltma ve yeniden devreye almayı tanımlamaktadır.

AKR sisteminde doldurma süresi (t_f) reaktörün mevcut hacmine bağlıdır. Reaktörün mevcut hacmi, reaktörün toplam hacmi ile reaktördeki çamur hacminin farkıdır. Denklem olarak [32]:

$$V_{ab} = \alpha V_b \quad (2.18)$$

$$t_f = \frac{V_{ab}}{Q} = \frac{\alpha V_b}{Q} \quad (2.19)$$

Burada,

Q doldurma periyodu sırasındaki giriş debisini

α doldurma periyodu başlangıcındaki hacmin toplam hacme oranını

V_b reaktörün boş hacmini

V_{ab} doldurma periyodunun başındaki mevcut hacmi ifade etmektedir.

2.2.2.3. Ardışık kesikli biyoreaktörün çökeltme kinetiği

Çevre mühendisliği uygulamalarında, bazı su ve atıksularda bulunan katı tanecikler, birbirinden farklı özellikler içerebilmektedir. Bu taneciklerin bazıları elektrostatik yük içerirken bazıları içermemekte ve bazı tanecikler de diğer taneciklere nazaran daha fazla Vander Walls Kuvvetine sahip olabilmektedir. Bu tür taneciklerin bulunduğu su ortamında tanecikler arası kuvvetler diğer taneciklerin çökmesini çeşitli şekillerde engelleyebilir. Ancak bu parçacıklar birbirine göre sabit pozisyonlarda kalmakta ve tanecik kütlesi bir birim halinde çökeltmektedir. Çökelen kütlenin üzerinde ise, bir katı-sıvı ara fazı oluşmaktadır [41].

Yapılan literatür çalışması sonucunda da AKR sistemlerindeki çökeltme kinetiğinin genel olarak engelli çökeltme kinetiğine uyabileceği düşünülmektedir. Bu çökeltme türünde, partikül maddelerin çökmesi Stokes Kanunları (Hazen ve Newton) ile ifade edilir [41].

$$V = \frac{1}{18} \frac{g}{\gamma} \left(\frac{\rho_d}{\rho} - 1 \right) d^2 \quad (2.20)$$

V = Mutlak çökeltme hızı

g = Yerçekimi ivmesi

γ = Kinematik vizkozite, su için 0.01 cm²/dak

ρ_d = Partikül yoğunluğu

ρ = Sıvının yoğunluğu, su için 1.0 g/cm³

d = Partikül çapı

Bu kanun partikülün etrafındaki sıvı akışının laminer olduğu durumlarda geçerlidir. Ayrıca bu kanun sadece sıvı fazının sabit olduğu durumlar için geçerlidir. Bu nedenle o mutlak çökme hızını verir. Aktif çamur durumunda, çökelen floklar tankın dibinden yukarıya doğru eşit su hacimlerini çıkarırlar. Çökelen katı akışının yanında, çamurun çökmesini engelleyen yükselen bir sıvı akışı vardır Bu özellikle, yüksek çamur seviyesi ve büyük çamur flokları durumunda bu şekildedir [41].

Lineer çökme periyodu, başlangıç konsantrasyonundaki çamurun çökebilirliği için örnek olarak alınır.

$$\text{Etkili çökme; } V_e = V - V_w \quad (2.21)$$

denklemleriyle ifade edilir.

V_e = Etkin çökme hızı

V = Mutlak çökme hızı

V_w = Suyun artan çökme hızı

V_w , hacimsel çamur konsantrasyonunun bir fonksiyonu olduğundan dolayı aşağıda verilen denkleme dönüştürülebilir.

$$V_e = V(1 - \gamma \delta^{2/3}) \quad (2.22)$$

δ = Hacim/hacim olarak ifade edilmiş çamur konsantrasyonu

γ = Biçim faktörü

δ ölçülmesi kolay değildir. Bu sebepten $V_e = f(x)$ ilişkisi deneysel olarak belirlenir. Artan çamur konsantrasyonlu bir çökme silindirleri serisi kurulur. Normal olarak,

çöken çamur ve supernatant arasında belirgin bir ara faz oluşur. Zamanın bir fonksiyonu olarak bu ara fazın yüksekliğinin takip edilmesiyle statik çökeltme eğrisi belirlenir.

2.2.2.4. Ardışık kesikli biyoreaktörün avantajları

AKR'lerde sürekli aktif çamur sistemlerinin tersine, hem biyolojik reaksiyonların hem de biyokütlenin çökeltilmesinin aynı reaktör içinde gerçekleştirilebilmesinden dolayı alan ihtiyacını önemli ölçüde azaltmaktadır ayrı bir çökeltme tankına ihtiyaç olmayışı işletme ve ilk yatırım maliyetinden tasarruf edilmesini sağlamaktadır [25, 42-44].

AKR'ler doldurma fazında dengeleme tankı gibi çalışarak pik debilere ve şok yüklemelere karşı dirençli olup toksik maddeleri tolere edebilirler [26, 27].

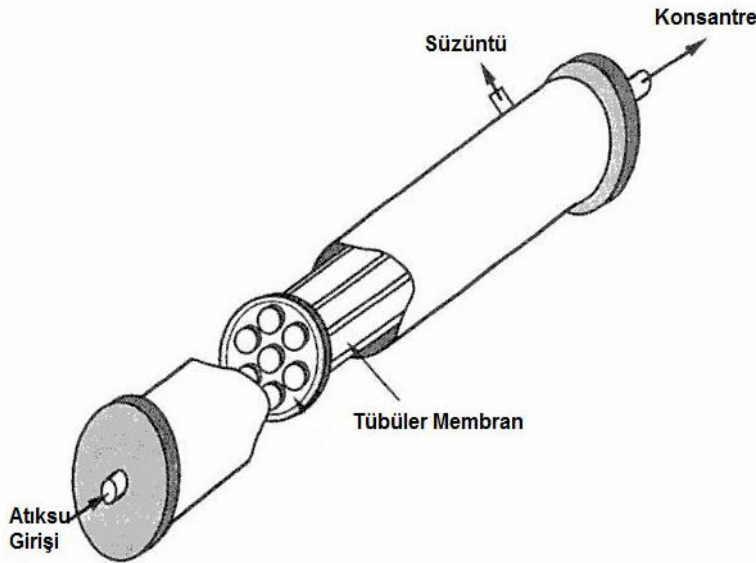
Son çöktürme tankı ve çamur geri devir sistemleri gerekmediği için yatırım ve bakım maliyetleri de klasik aktif çamur sistemlerine göre daha azdır [27]. AKR sistemi ayrıca, daha az atık çamur üretimi, aktif çamur reaktöründe karşılaşılabilecek çamur kabarma probleminin sistem içinde uygun stratejilerle üstesinden gelinebilmesi gibi avantajlara da sahiptir [43].

AKR'ler işletme ve kontrol bakımından esnek sistemlerdir. Faz sürelerindeki değişikliklerle farklı artım ihtiyaçlarını kolaylıkla karşılayabilirler. Doldurma evresi için farklı stratejiler ve prosesin işletme şartlarındaki farklı kombinasyonlar ile KOİ ve fosfor giderimine ilave olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon yoluyla azot gideriminin yapıldığı çeşitli modifikasyonlarla alıcı ortam standartlarının sağlanması mümkündür [27, 42, 43].

2.2.3. Tübüler Membran

1965'li yıllarda kullanılmaya başlayan tübüler membranlar gözenekli küçük tüplerin büyük sağlam borular içine yerleştirilmesiyle üretilirler. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere

akışkana basınç uygulanarak sıvının gözeneklerden geçerek süzüntü akımının tüp dışına geçmesi sağlanır. Konsantre kısım ise ortadaki tüpte toplanır. Mekanik olarak temizlenebilen tübüler membranlar da türbülanslı akım oluşturularak tıkanma minimuma indirilebilmektedir. Üretimlerinin pahalı olması, büyük alana ihtiyaç göstermeleri ve maliyetlerinin yüksek oluşu gibi dezavantajlara sahiptirler [45]. Tübüler Membranın şematik gösterimi Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Tübüler membranın şematik gösterimi [46]

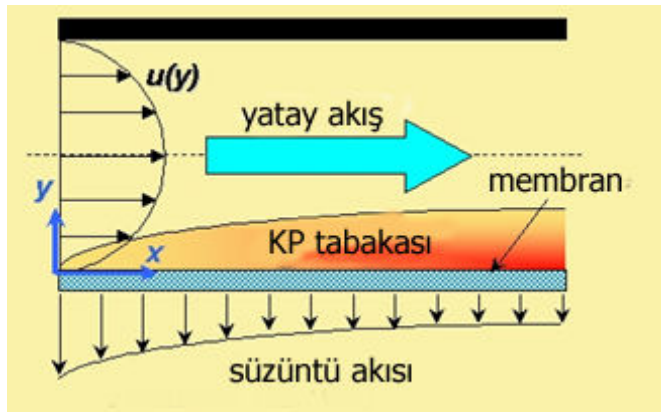
2.2.4. Konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanması

Konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanması, süzüntü akısı ve membran ömründe önemli etkiye sahip faktörlerdir. Bu iki olay hem membran performansını olumsuz etkilemektedir hemde işletme maliyetlerini artmasına neden olmaktadır.

2.2.4.1. Konsantrasyon polarizasyonu

Konsantrasyon polarizasyonu (KP) tüm basınç sürürlü membran proseslerde membran performansını olumsuz etkileyen en önemli faktördür. Konsantrasyon polarizasyonu; çözünen maddenin özellikleri, membranın karakteristikleri ve hidrodinamikler tarafından kontrol edilmektedir [47]. Konsantrasyon polarizasyonu olayı suyun membrandan serbestçe geçmesi ve çözelti içerisindeki çözünmüş

maddelerin membran tarafından tutulması sonucunda meydana gelmektedir. Membran tarafından tutulan maddeler, membran yüzeyinde birikmektedir. Bu da zamanla membran yüzeyinde konsantrasyon artışına sebep olmaktadır. Yatay akışlı bir membran prosesde, membrana yakın kısımlarda akışkanın hızı azalmaktadır. Membran yüzeyindeki hız azalmasının sebebi, viskoziteden dolayı kayma gerilmesinden kaynaklanmaktadır. Yüzeyde akışkan hızı sıfır olmakta ve sınır tabakası teşekkül etmektedir. Bu sınır tabakasındaki konsantrasyon artışı, konsantrasyon polarizasyonu olarak adlandırılmaktadır [16]. Konsantrasyon polarizasyonu olayının şematik gösterimi Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Konsantrasyon polarizasyonu olayının şematik gösterimi [16]

KP membran proseslerin işletme koşullarına bağlı olan ve deneysel olarak gözlemlenmesi zor bir olaydır. KP membran proselerde verimi azaltıcı bir etki göstermekte ve membranın geri dönüşümsüz tıkanma olayına doğru ilk adımı temsil etmektedir. Bununla birlikte membranın tıkanma olayının aksine KP tabakasının oluşumu kolayca tersinir [16].

Konsantrasyon polarizasyonunun etkileri [18]:

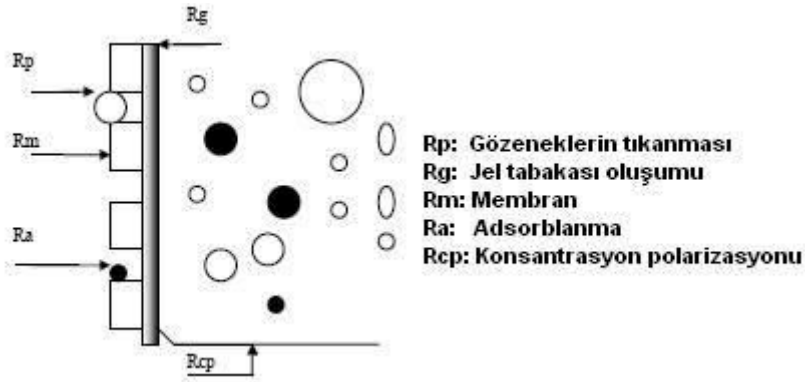
- 1- Membran yüzeyinde ozmotik basıncın artması ve akının azalması.
- 2- Membran yüzeyindeki konsantrasyon artışıyla membran deliklerinin tıkanması ve böylece akı miktarının azalması.
- 3- Membran arıtma veriminin değişmesi.
- 4- Membran kirlenmesi olarak sıralanabilir.

Konsantrasyon polarizasyonunun etkisini azaltmak ve kütle transferini arttırmak için, membran yüzeyine yakın bölgede iyi bir karışım sağlanmalıdır. Bu karışımı sağlamak için, besleme kanalındaki çapraz akış hızı (yatay hız) artırılmalı ve türbülanslı akımlar oluşturulmalıdır [16, 18].

KP olayı membran proseslerinde daha fazla süzüntü oranı (akı) arzu edilmesinden beri önemini artırmıştır. Bu olayın tam olarak anlaşılması için bu alanda daha fazla çalışma yapılmaya başlanmıştır. Konsantrasyon polarizasyonu olayının tam olarak anlaşılması membran proseslerin optimizasyonu ve tasarımı için önemlidir [16].

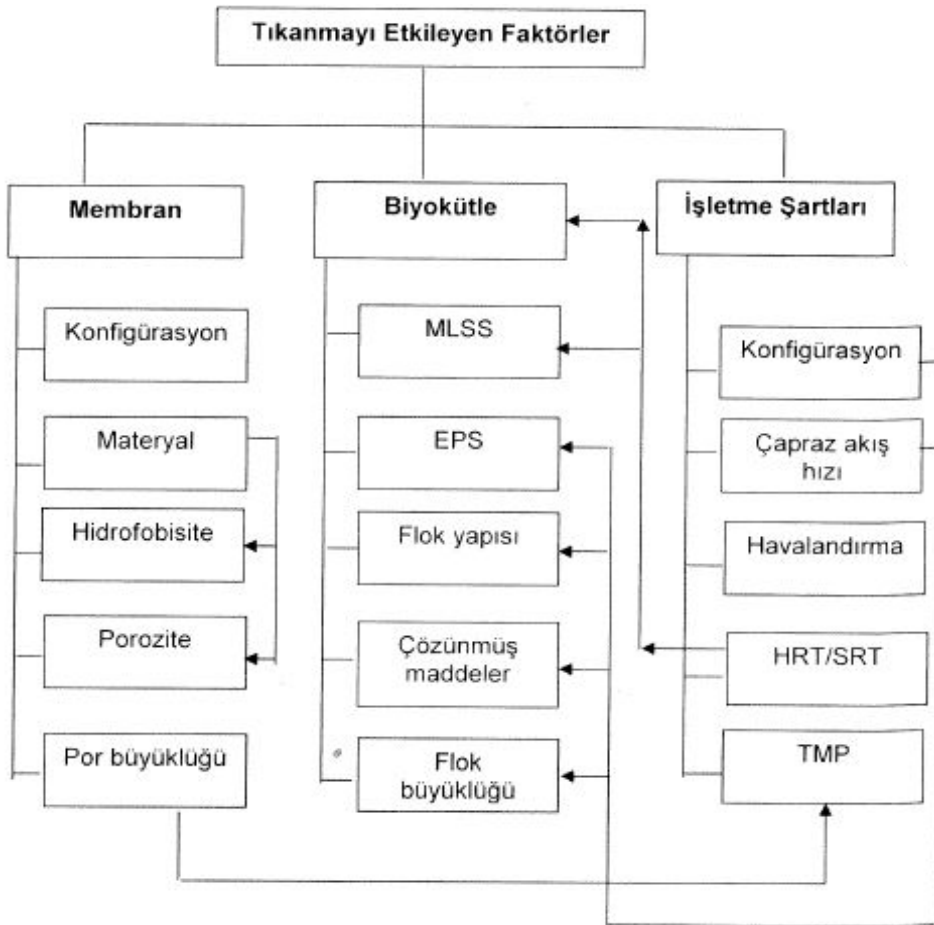
2.2.4.2. Membran tıkanması

Membran biyoreaktörler yatırım ve işletim maliyetlerinin azalmasına, yüksek kalitede çıkış suyu üretmelerine ve konvansiyonel sistemlere göre pek çok avantaja sahip olmalarına rağmen tıkanma; membranların yaygın olarak kullanılmasını engelleyen bir problemdir [1, 48-51]. Tıkanma membran permeabilitesini düşürerek akının azalmasına yani birim zamandaki birim membran alanı başına düşen arıtılmış suyun azalmasına neden olur [52]. Tıkanma, membranların kimyasal temizleme ve geri yıkama ihtiyacı nedeniyle işletim ve bakım maliyetlerinin de artmasına neden olmaktadır [51-52]. Tıkanmalar membran yüzeyinde veya membran gözeneklerinin içinde gerçekleşebilir. Membran tıkanmaları geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz tıkanma olmak üzere ikiye ayrılır: geri dönüşümlü tıkanma yüzeyde oluşan jel ve kek tabakasının havalandırma veya geri yıkama ile giderildiği tıkanmadır. Geri dönüşümsüz tıkanma ise çözünmüş veya kolloidal maddelerin adsorbsiyon sonucu gözenek içinde birikerek gözeneği tıkanması sonucu oluşan ve kimyasal temizleme ile giderilebilen tıkanmadır [51]. Geri dönüşümsüz tıkanmalarda azalan süzüntü akısı tekrar orijinal miktarlara yükseltilememektedir [1]. Şekil 2.8.'de membran yüzeyinde meydana gelen direnç türleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Membran yüzeyinde meydana gelen direnç türleri [19]

Kullanılan atıksu karakteri, biyokütle, tercih edilen membran modülü ve işletme koşulları MBR'lerde tıkanmayı etkileyen önemli faktörlerdir [48]. Şekil 2.9.'da MBR'lerde tıkanmayı etkileyen faktörler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9. MBR'lerde tıkanmayı etkileyen faktörler [1]

Besleme akımında bulunan mikrobiyal organizmalar, membran yüzeyinde kek tabakası oluşturmaktadır. Oluşan kek tabakası, hem akıyı azaltmakta, hem de süzüntü suyunun bakteriyel olarak kirlenmesine sebep olmaktadır. Besleme suyunda bulunan çözünmüş tuzlar da membran gözeneklerinde ve yüzeyinde birikerek akıda düşüş meydana getirmektedir. EPS'ler ise membranı hem yüzeyden hem de içeriden tıkaçabilen çözünebilir ve kolloidal makromoleküllerden oluşmaktadır [18].

Gözenek boyutu, porozitesi, hidrofilik/hidrofobik yapısı gibi membran özellikleri membran tıkanmasında doğrudan etkilidir. Membranların üretiminde kullanılan polimerler yüzeyleri yeterli derecede hidrofilik olacak şekilde üretilmektedir. Bu da proteinler gibi hidrofobik maddelerin yüzeyde birikerek tıkanma yapmasını azaltmaktadır. Membranların gözenek boyutu biyokütle içerisindeki çözünmüş bileşenlere ve partikül büyüklüğüne bağlı olarak tıkanmada etkilidir. Küçük gözenek boyutuna sahip membranlar daha büyük gözenek boyutuna sahip membranlara göre tıkanma gerçekleşmeden daha yüksek akı değerinde daha uzun süre arıtım yapabilmektedir. Küçük boyutlu partiküller gözenekler içerisine girememekte ve membran yüzeyinde kek tabakası oluşturmaktadırlar. Bu sebeple gözenekler üzerinde ve/veya içerisinde meydana gelebilecek geri dönüşümsüz tıkanmalar oluşmamakta veya tıkanmanın oluşumu daha uzun sürede gerçekleşmektedir [51].

İşletme sırasında sudaki süspanse veya kolloid çözünmüş maddeler ya da biyolojik gelişim nedeniyle membran yüzeyinde oluşan kirlilik tabakasının kalınlığı neredeyse ölçülemeyecek kadar küçük olmasına rağmen, membrandan geçmesi gereken komponentler için ek bir direnç/engel meydana gelir ve süzüntü akısı azalır. Tıkanma süzüntü akısı, çapraz akış hızında değişimlere neden olur [17].

2.2.5. Membran proseslerin temizliği

Son yıllarda MBR'lerde tıkanmayı önleyici kontrol stratejileri geliştirilmiş olmasına ve bu konuda çeşitli metotlar kullanılmasına rağmen tıkanma mevcut MBR proseslerinin halen yaşadığı en önemli sorun olarak kabul edilmektedir.

Bazı sistemlerde membranlar otomatik düzende, üretilen süzüntü suyu kullanılarak düzenli olarak geri yıkanılır. Bu işlemle membran yüzeylerine gevşek olarak tutunmuş materyallerin uzaklaştırılarak tıkanan membran gözenekleri temizlenmeye çalışılır. Geri yıkama prosesinde önce yıkanacak modüldeki arıtım durdurulur sonra basınçla bu sefer dıştan içe doğru kademeli olarak su basılır [51].

Son yıllarda öne çıkan tıkanma kontrolü stratejilerinden biri de kimyasalların eklendiği süzüntü suyu ile geri yıkamadır. Kimyasal eklentiler ile yapılan çalışmalarda metal tuzları ve polimerlerin kullanıldığı flokülasyon ve genellikle toz aktif karbonun kullanıldığı adsorpsiyon mekanizmaları üzerinden tıkanma kontrolü gerçekleştirilir. Bu çalışmalarda öne çıkan hedef çözünmüş mikrobiyal ürünler gibi tıkanmaya neden olan organik maddelerin floklar içinde tutulması veya adsorban bir madde üzerine adsorplanarak sucul ortamdan uzaklaştırılması yolu ile membran porları içerisinde neden olacakları tıkanmayı azaltmaktır [53].

Bir diğer temizleme metodu da hava ile sıyırmadır. Bu metotta da geri temizleme su yerine basınçlı hava kullanılarak yapılmaktadır. İlk metottan tek farkı su yerine basınçlı hava kullanılarak temizlemenin gerçekleştirilmesidir.

Tüm bu temizleme metotlarının yetersiz kaldığı durumlarda membran servis dışına alınarak yüksek dozlarda kimyasal içeren başka bir tanka batırılarak birkaç saat bekletilir. Bu en yoğun temizleme metodudur, prosese ve kullanılan atıksuyun karakterine bağlı olarak yılda birkaç kez tekrarlanabilir [51].

2.2.6. Membran biyoreaktörlerin avantajları

Atıksu arıtımında MBR proseslerinin konvansiyonel sistemlere göre bazı avantajları şu şekilde özetlenebilir. MBR'lerdeki yüksek askıda katı madde konsantrasyonundan dolayı gerekli hidrolik bekleme süresi azdır; bu da daha küçük reaktör hacmi ve ilk yatırım maliyetinde azalma anlamına gelmektedir. Biyokütle ayrımı mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon ile gerçekleştiği için aktif çamurun çökebilme özelliğinden bağımsızdır; son çökeltim tankına ihtiyaç olmadığından, çamur şişmesi, filamentli büyümeden kaynaklanan çökeltim problemleri yaşanmaz. Yüksek MLSS

konsantrasyonlarından dolayı sisteme fazla organik yükleme yapılabilir. MBR'lerde nitrifikasyonun olumsuz etkilenmesi veya toksik maddelerin engelleyici etkileri gibi işletme problemleriyle daha az karşılaşılır. Çünkü MBR'lerde konvansiyonel aktif çamura göre daha fazla çamur yaşı (SRT) ile çalışılabilir. Yüksek SRT değerleri, oluşan biyokütle miktarını dolayısıyla da atık çamur miktarını azaltmaktadır [7].

BÖLÜM 3. TÜBÜLER MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜN ATIKSU ARITMA VERİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

3.1. Membran Performansı

Membranların performansı akı ve giderme verimi dikkate alınarak belirlenmektedir. İdeal bir membranda, yüksek giderme verimi ile yüksek akı veya geçirimsizlik istenmektedir.

3.1.1. Akı

Akı, birim zamanda membranın birim alanından geçen akım miktarıdır. Akı m^3 / m^2 .gün veya L / m^2 .saat gibi birimlerle ifade edilmektedir. Ortalama süzüntü akısı membran performansını göstermek için en yaygın kullanılan parametredir. Membrandan geçen akım, membrana uygulanan basınç ile doğru, akışkanın viskozitesi ile ters orantılıdır.

$$J_t = \frac{Q_p}{A} \quad (3.1)$$

Burada,

J_t : t zamanındaki anlık süzüntü suyu akısı (L/m^2 saat)

Q_p : t zamanındaki süzüntü suyu debisi ($L/saat$)

A = Toplam membran yüzey alanı (m^2)'dir.

3.1.2. Giderme verimi

Giderme verimi, membran sisteminde membran tarafından tutulan kısmın bir ölçüsüdür ve % olarak ifade edilmektedir. Membranlarda giderme verimi R ile gösterilir ve boyutsuzdur. Bu ifade 0 ile 1 arasında değişmektedir. “0” bütün çözülmüş maddelerin membranda geçtiğini “1” ise membranın hiçbir madde geçişine izin vermediğini göstermektedir [16, 17, 19, 54].

Membran proseslerde iki çeşit giderme verimi söz konusudur. Bunlar global (gözlenen) giderme verimi (R_0) ve lokal (gerçek) giderme verimi (R_g)’dir. Global giderme verimi, elde edilen süzüntü akımı konsantrasyonu ile besleme akımı konsantrasyonu arasındaki giderme verimini ifade ederken (denklem 3.2), lokal giderme verimi, elde edilen süzüntü akımı konsantrasyonu ile çözeltilinin membran yüzeyindeki konsantrasyonu arasındaki ilişkiden hesaplanarak belirlenen giderme verimini ifade etmektedir (denklem 3.3)

$$R_0 = \frac{c_f - c_p}{c_f} = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad (3.2)$$

$$R_g = \frac{c_m - c_p}{c_m} = 1 - \frac{c_p}{c_m} \quad (3.3)$$

Burada,

c_p : Süzüntü akımı konsantrasyonu

c_f : Besleme suyu konsantrasyonu

c_m : Membran yüzeyindeki konsantrasyonu

ifade etmektedir.

3.2. Membran Performansına İşletme Şartlarının Etkisi

3.2.1. Akı

Birim zamanda birim membran alanından geçen süzüntü miktarının ölçüsü olan akı; süzüntü debisi ve kullanılan membran modülünün alanına göre değişmektedir.

3.2.1.1. Debi

(3.1) nolu denklemden de anlaşılacağı üzere süzüntü debisi ile akı arasında doğru orantı vardır. Süzüntü debisi arttıkça akıda artmaktadır. Kullanılan atıksu debisi yani besleme suyunun debisi arttığında ise membrandaki hız artmaktadır. Membran yüzeyindeki hız artışının membran performansı üzerine etkisi Bölüm 3.2.4.'te anlatılmıştır.

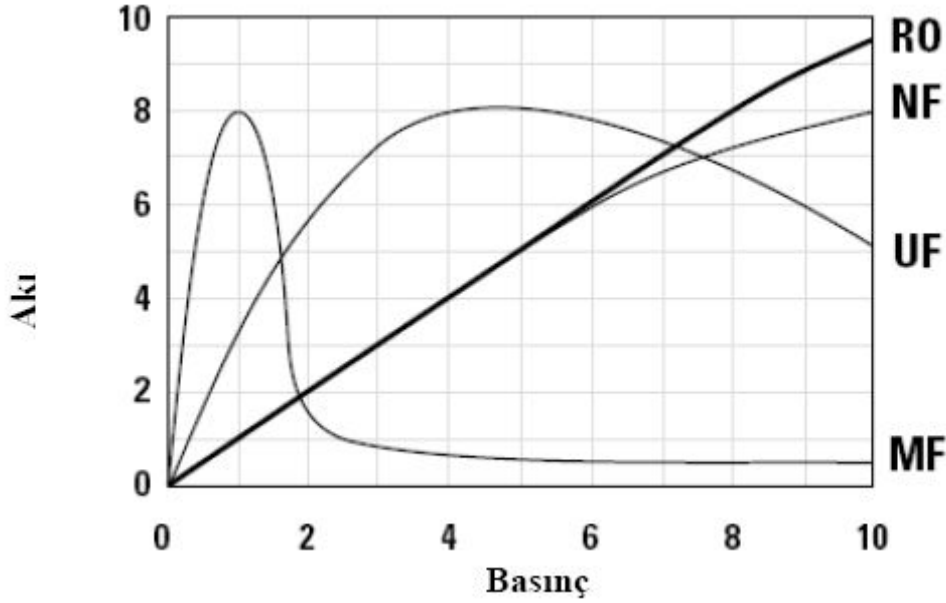
3.2.1.2. Alan

Kullanılan membran modülüne göre membran proseslerin gösterecekleri performansları da önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Tercih edilen membran modülüne göre membran yüzey alanı da değişmektedir. (3.1) nolu denkleme göre membran yüzey alanı ile akı arasında ters orantı olduğu görülmektedir. Membran yüzey alanı arttıkça akı da azalma meydana gelmektedir.

3.2.2. Basınç

Basıncın artması akıyı artırmaktadır. Konsantrasyon polarizasyonu etkisi söz konusu olduğunda eğer jel tabakasının direnci membran direncinden daha düşükse işletme basıncının artması ile akı değeri arasında doğrusal bir ilişki vardır. Fakat jel tabakasının direnci membran direncinden büyük olduğu durumda basıncın artması ile akı değeri bir noktaya kadar artarak burada bir düzliğe ulaşır ve bundan sonra basıncın artması akı değerini azaltabilir [16].

Çok genel bir çizim olan basıncın bir fonksiyonu olarak akı değişimi Şekil 3.1.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Membran proseslerde basınç ile akı arasındaki ilişki [17]

RO sistemleri için genel kural olarak net sürücü basınç iki katına çıkarıldığında akı da iki katına çıkar. NF sistemleri de benzerdir, fakat akı ile net sürücü basınç arasındaki ilişki RO kadar doğrusal değildir. UF sistemlerinde ise besleme basıncı birkaç barın üzerinde arttırıldığında akı azalır. İşletme basıncı seçimi açısından en zor membran prosesi MF'dur. Yaklaşık 0,5 barın üzerinde akı azalır. Sonuç olarak bir genelleme yapılırsa; RO ve NF sistemlerinde süzüntü akısını optimize etmek için basınç bir değişken olarak kullanılabilirken, UF ve MF'da basınç süzüntü akısını çok etkin biçimde belirlememektedir [17].

3.2.3. Konsantrasyon

Membran tarafından giderilen türlerin konsantrasyonu ne kadar az olursa akı değeri o kadar fazla olmaktadır. Çünkü besleme suyunun konsantrasyonunda meydana gelen artma aynı zamanda osmotik basınçta artış meydana getirmekte ve buda membrana uygulanan net basıncı azaltmaktadır. Dolayısıyla akı değerinde de azalma meydana gelmektedir [16].

Aynı zamanda besleme suyunda çözünen maddelerin konsantrasyonunda meydana gelen artış membranın işletilmesi süresince membran üzerindeki çözünmüş madde konsantrasyonu artırmakta ve artan viskozite sonucu akı değerinde azalmaya neden olan konsantrasyon polarizasyonu meydana gelmektedir [16].

3.2.4. Hız

Yatay hız membran yüzeyinde meydana gelen konsantrasyon polarizasyonu etkisini azaltan en önemli faktörlerden birisidir. Yatay hız arttıkça membran yüzeyinde türbülans artmakta buda membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının hidrolük direncini ve konsantrasyon polarizasyon tabakasının kalınlığını azaltmaktadır [16].

3.2.5. Sıcaklık

İşletme sıcaklığının artırılması normalde akı değerini de artırmaktadır. Yüksek sıcaklıklar çözünen maddenin difüzyon oranını artırmakta, çözücünün ise viskozitesini azaltmaktadır. Sıcaklıkta meydana gelen 1 °C 'lik artış akı değerinde %3-3.5 civarında bir artış meydana getirmektedir. Çoğu membranda su akısı her °C'de %1 artmakla birlikte membran malzemesine bağlı olarak değişiklik görülebilir. En uygun sıcaklık değeri ekipmanın ve çözünen maddenin müsaade ettiği en yüksek sıcaklık değeridir [16, 17]. Öte yandan artan işletme sıcaklığı Ca tuzlarının, proteinlerin çökmesine ve tabaka oluşumuna neden olan bakteri gelişimine neden olabilir [17].

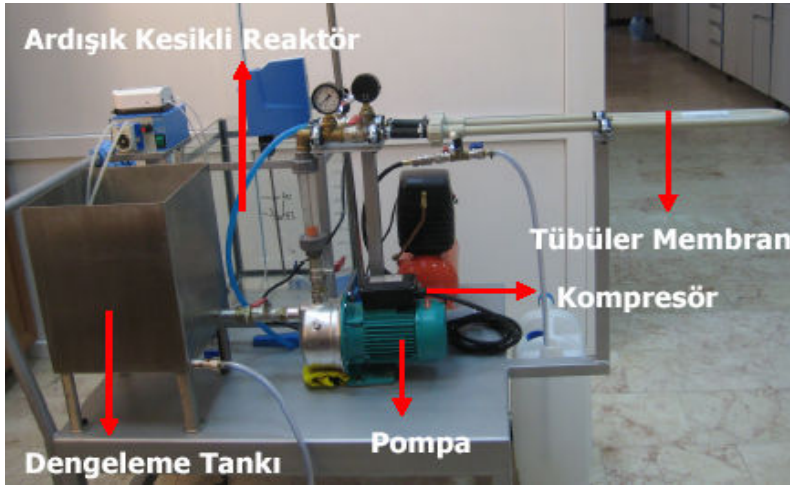
3.2.6. pH

Çözeltinin pH değerinde meydana gelen değişim genellikle çözünen maddelerin çökmesine neden olmaktadır. Buda membranda akı azalmasına neden olan ve istenmeyen bir durumdur. Bunu önlemek için en uygun pH değeri belirlenerek o pH değerinde çalışılmalıdır [16].

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOD

4.1. Laboratuvar Ölçekli Tübüler Membran Biyoreaktör Sistemi

Deneysel çalışmalar, laboratuvar ölçekli çalışma hacmi 40 L olan ardışık kesikli biyoreaktör ile tübüler membranın entegresinden oluşturulan MBR sistemi ile yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan Tübüler Membran Biyoreaktör sistemi Şekil 4.1.' de gösterilmiştir.

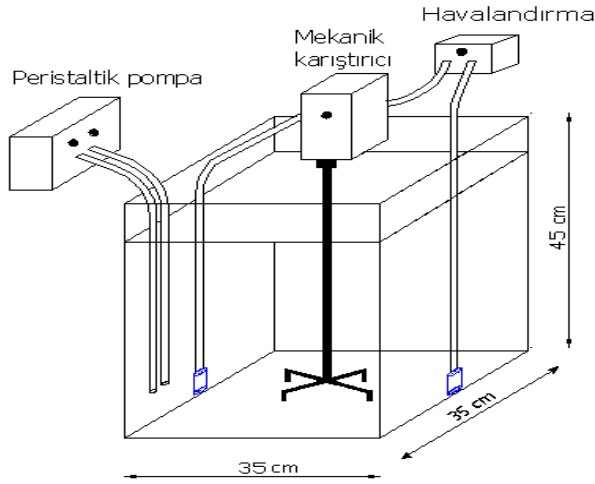


Şekil 4. 1. Tübüler membran biyoreaktör sistemi

4.1.1. Ardışık kesikli biyoreaktör sistemi

Laboratuvar ölçekli ardışık kesikli biyoreaktörün toplam hacmi 55 L çalışma hacmi 40 L'dir. Cam malzemeden yapılan reaktörün taban kenarları 35 cm, yüksekliği 45 cm dir. Havalandırma reaktöre yerleştirilen hava taşlarıyla, reaktör içinde çözülmüş oksijen konsantrasyonu 2 mg/L nin üzerinde olacak şekilde dakikada 2500 cm³ hava

pompalayan çift çıkışlı akvaryum pompası ile sağlanmıştır. Reaktörde karışımı sağlamak amacıyla 1200 devir/dakikada sabit olarak çalıştırılan mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Reaktöre atıksu beslemesi ve boşaltılması peristaltik pompalar ile gerçekleştirilmiştir. AKR'nin şematik gösterimi Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2. Ardışık kesikli biyoreaktörün şematik gösterimi

AKR aktif hacmi 40 L olacak şekilde; 34 L aktif çamur, 6 L atıksu ile beslenerek devreye alınmıştır. Ardışık kesikli reaktör 0.5 saat doldurma, 1.5 saat havalandırma (reaksiyon), 1.5 saat çökeltme, 0.5 saat boşaltma - devreye alma sürelerinde çalıştırılmıştır. Reaksiyon ve çökeltme süreleri 0.5 - 1 - 1.5 - 2 ve 4 saat olarak değiştirilerek deneysel çalışmalar yapılmıştır ve kentsel atıksu için optimum reaksiyon süresi ve optimum çökeltme süresi belirlenmiştir.

4.1.2. Tübüler membran

Çalışmada, Microdyn-Nadir MD 015 TP 2N marka tübüler membran kullanılmıştır. Polipropilenden yapılan Tübüler membranın uzunluğu 1.5 m, gözenek boyutu 0.2 μm , çapı 5.5 mm, efektif filtrasyon alanı 0.025 m^2 , serbest akım alanı 0.24 cm^2 dir. 1m/sn hızındaki besleme suyu debisi ise 85 L/sa'tir [55].

4.2. Atıksu Karakterizasyonu

Deneylerde, Adapazarı Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi kum tutucu çıkışından atıksu ve aynı tesisin aktif çamur çıkışından alınan aktif çamur kullanılmış olup, Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi kum tutucu ve aktif çamur çıkışından bir görünüm Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Kullanılan atıksuyun karakterizasyonu ise Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Karaman Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi kum tutucu ve aktif çamur çıkışından bir görünüm

Tablo 4. 1. Çalışmada kullanılan kentsel atıksuyun karakterizasyonu

Parametre	Birim	Min-Maks	Ortalama (n=18)
pH	-	7.2 - 9.4	8.5
Sıcaklık	°C	20.4 - 21.4	21
İletkenlik	mS	1.3 - 4.2	3.26
KOİ	mg/L	206 - 299	222
BOİ	mg/L	101 - 153	112
TN	mg/L	100 - 174	152
TP	mg/L	4.3 - 6.84	4.86
AKM	mg/L	32 - 277	211
Bulanıklık	NTU	51 - 260	194
Renk	m ⁻¹	22 - 47	41

4.3. Ölçülen Parametreler

Deneysel çalışmalar kapsamında sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik, BOİ, KOİ, TN, TP, AKM, TÇM, Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, renk ve bulanıklık ölçümü yapılmıştır.

pH ve sıcaklık ölçümü Hanna HI 8314, çözünmüş oksijen Hach HQ 30d, iletkenlik Hanna 8633 ve TÇM Hach HQ 14 d modelleri kullanılarak elektrometrik olarak ölçülmüştür.

BOİ ve AKM parametreleri Standart Metotlara göre ölçülmüştür. KOİ, TN ve TP'nin ölçümü ise spektrofotometrik yöntemle Merck hazır reaktifleri kullanılarak Merck Nova 60 spektrofotometresi kullanılarak ölçülmüştür.

Na, Ca ve Mg analizleri ICP OES cihazı kullanılarak Standart Metotlara göre ölçülmüştür.

Renk ölçümlerinde, Shimadzu UV 1700 spektrofotometresi kullanılarak 436, 525 ve 620 nm dalga boylarında adsorbansları okunmuştur ve RES (Renklilik Sayısı) değerleri hesaplanmıştır. Bulanıklık ölçümü, HF Scientific Micro 100 turbidimetresi ile nefelometrik olarak ölçülmüştür.

4.4. Sulama Suyu Sınıfının Bulunması

Atıksuyun içindeki çözünmüş tuzlar, bor, ağır metal ve benzeri toksik maddeler yörenin iklim şartlarına toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine bağlı olarak ortamda birikebilir, bitkiler tarafından alınabilir veya suda kalabilir. Bu nedenle, arıtılmış atıksuların arazide kullanılması ve bertarafı söz konusu ise, suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametreler açısından öngörülen sınır değerlere

uygunluğunun yanı sıra, bölgenin toprak özellikleri de dikkate alınır [56].

Sulama sularındaki çözünmüş tuzların toplam konsantrasyonu, elektriksel iletkenlik (EC) değeri yardımıyla kolaylıkla belirlenebilir. Toplam tuz konsantrasyonu ile elektriksel iletkenlik arasındaki oran katsayısı (M), deneysel çalışmalar sonucunda bir kere belirlendikten sonra sürekli kullanılabilir. Bu katsayı 25 C'deki iletkenlikler (mikromho) ve tuz konsantrasyonları (mg/L) ile ifade edildiğinde 0.6-0.7 arasında bir değer alır [56].

Sulamada kullanılan arıtılmış atıksudaki sodyumun sulanan toprakta tutulması sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) ile tanımlanır. SAR oranı, suyun sodyum (veya benzer alkaliler) açısından zararlılığının bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır.

Sodyum adsorbsiyon oranı aşağıdaki eşitlikle belirlenir;

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

Burada Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} milieşdeğer gram (Meq/l) cinsinden konsantrasyonlardır.

Elektriksel iletkenlik ve sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) esas alınarak sulama sularının sınıflandırılması Ek-1'deki diyagrama göre yapılır. Bu diyagram yardımı ile atıksuyun sınıfını C_1S_1 - C_4S_4 arasındaki sulama suyu sınıfları arasında bulmak mümkündür.

4.5. Mikrobiyolojik İnceleme

Çalışmalar sırasında ardışık kesikli reaktördeki protozoa, metazoalar ve oluşan çamurun flok yapısı mikroskopta incelenmiştir. Bunun için reaktörden karışım anındaki aktif çamurdan ve çökeltme anındaki dip çamurundan numuneler alınarak

incelenmiştir. Alınan görüntüler için OLYMPUS BX51T faz kontrast ışık mikroskobunda 10x, 40x ve 100x' lik büyütme kullanılmıştır. 10x büyütme flok yapılarının incelenmesinde, 40x ve 100x büyütme protozoa ve metazoaların teşhislerinde kullanılmıştır.

BÖLÜM 5. BULGULAR

Tübüler Membran Biyoreaktör sisteminin arıtma verimine etki eden parametreler ardışık kesikli reaktör ve tübüler membranın arıtma verimine etki eden parametreler olmak üzere iki kısımda ele alınmıştır.

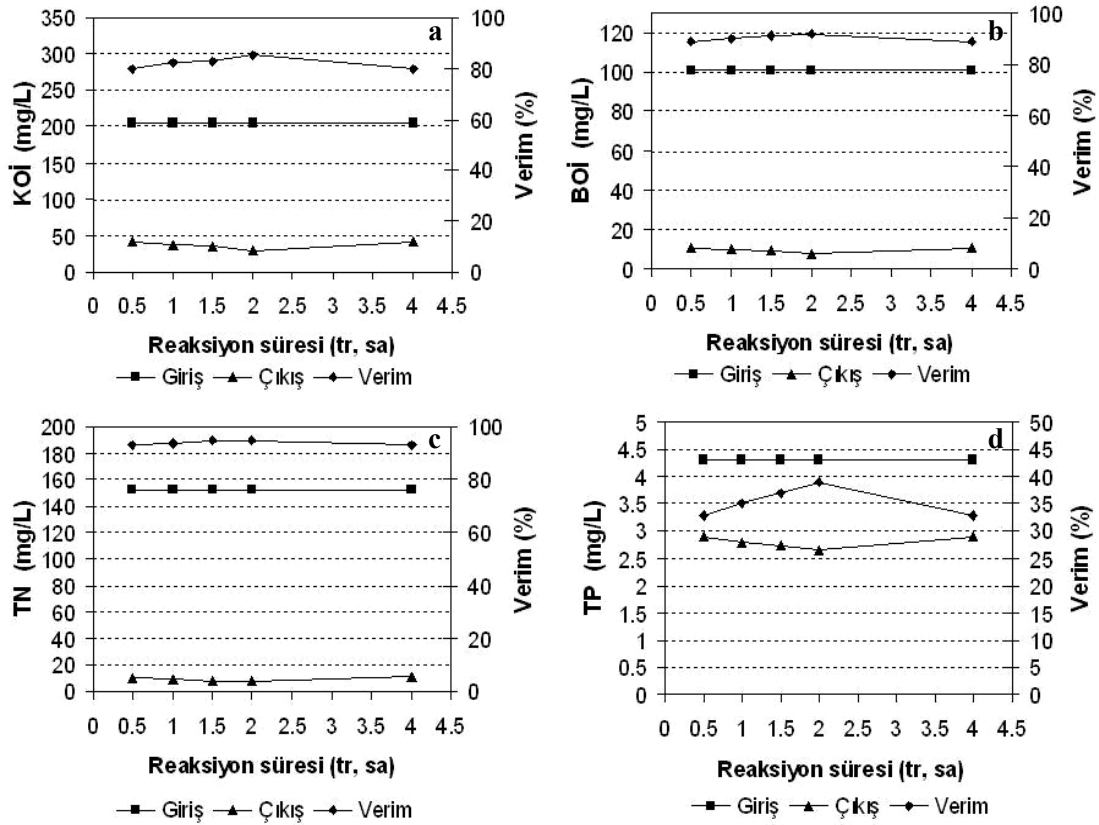
Çalışmalar sırasında KOİ, BOİ, TN, TP, AKM, bulanıklık ve renk parametrelerin ölçümü yapılarak sistemin performansı gözlenmiştir.

5.1. Ardışık Kesikli Biyoreaktör Çalışmaları

5.1.1. Reaksiyon kinetiği

5.1.1.1. Optimum reaksiyon süresinin (t_r) bulunması

Ardışık kesikli biyoreaktörün çalışma süreleri 0.5 sa doldurma, 1.5 sa çökeltme, 0.5 sa boşaltma olacak şekilde sabit tutularak, reaksiyon süresi 0.5 sa, 1 sa, 1.5 sa, 2 sa ve 4 sa olacak şekilde değiştirilmiştir. 1.5 saatlik çökeltme süresinin sonunda üst faz (6 L) peristaltik pompayla çekilmiştir. Bu işlem beş farklı reaksiyon süresi için tekrarlanmıştır ve deneysel çalışmalarla sistemin performansı gözlenerek kentsel atıksu için optimum reaksiyon süresi 1.5 sa olarak belirlenmiştir. Farklı reaksiyon süreleri için KOİ, BOİ, TN ve TP giderim verimleri Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



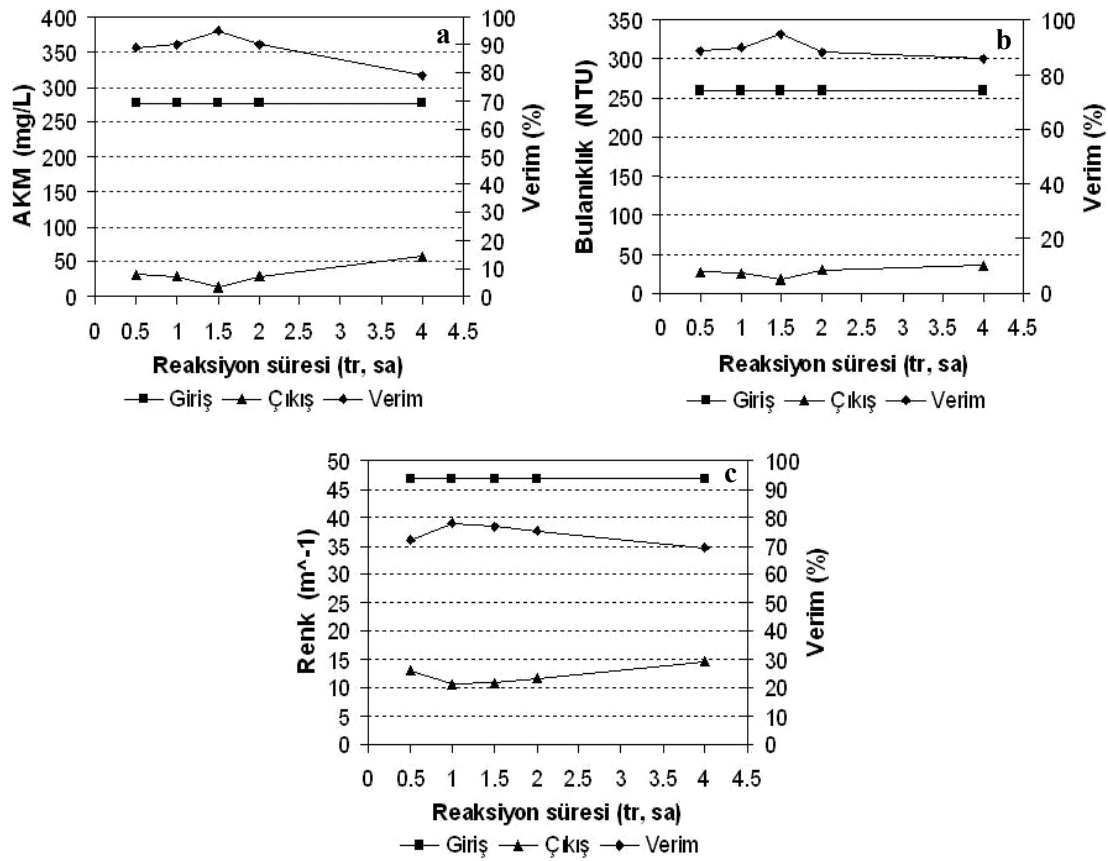
Şekil 5.1. Farklı reaksiyon süreleri için KOİ (a), BOİ (b), TN (c) ve TP (d) giderim verimleri

Şekil 5.1.'e bakıldığında; beş farklı reaksiyon süresi için KOİ giderme verimlerinin %80 ile %85, KOİ çıkış konsantrasyonunun ise 30 - 40 mg/L arasında değiştiği görülmüştür. En düşük KOİ giderme verimi (%80), 0.5 saatlik ve 4 saatlik reaksiyon süresi sonunda elde edilmiştir. En yüksek giderme verimi %85 ile 2 saatlik reaksiyon süresinde elde edilmiştir. 1.5 saatlik reaksiyon süresi sonunda ise KOİ giderim veriminin %83 olduğu görülmektedir. BOİ giderim verimleri incelendiğinde denenen beş farklı reaksiyon süresi içinde oldukça yüksek verimler elde edilmiş ve çıkış konsantrasyonlarının da birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. BOİ giderim verimlerinin %89 ile %92, BOİ çıkış konsantrasyonlarının ise 8 - 11 mg/L arasında olduğu görülüyor. En yüksek giderim verimi (%92) 2 saatlik reaksiyon süresi sonunda elde edilmiştir. 1.5 saatlik reaksiyon süresinin sonunda ise verim %91 dir.

Toplam koliform ve ötrofikasyona yol açan azot ve fosfor alıcı ortamlar için önemli parametrelerdir. TN giderim verimi %93 - 95, TN çıkış konsantrasyonu 8 - 11 mg/L arasında değişmiştir. En yüksek verim (%95) 1.5 ve 2 saatlik reaksiyon süreleri

sonunda elde edilmiştir. TP giderim verimi %33 - 39 arasında çıkış konsantrasyonu ise 2 - 3 mg/L arasında değişmiştir. TP için en yüksek verim %39 ile 2 saatlik reaksiyon süresinde elde edilmiştir. 1.5 saatlik reaksiyon süresinde verim %37 dir

Farklı reaksiyon süreleri için AKM, bulanıklık ve renk giderim verimleri Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Farklı reaksiyon süreleri için AKM (a), bulanıklık (b) ve renk (c) giderim verimleri

Şekil 5.2. incelendiğinde; AKM ve bulanıklık için en iyi giderme veriminin (%95) ile 1.5 saatlik reaksiyon süresinde, en iyi renk giderimi %78 verimle 1 saatlik reaksiyon süresinde elde edilmiştir. 1.5 saatlik reaksiyon süresinde renk giderimi %77 dir.

Yedi ayrı parametrenin giderim verimleri incelendiğinde; en iyi giderim verimi 1.5 saat ile 2 saat arasında değişmektedir ve 1.5 saatlik reaksiyon süresi ile 2 saatlik reaksiyon süresinin sonundaki verimler arasında %1 - 3'lük fark olduğu göz önünde

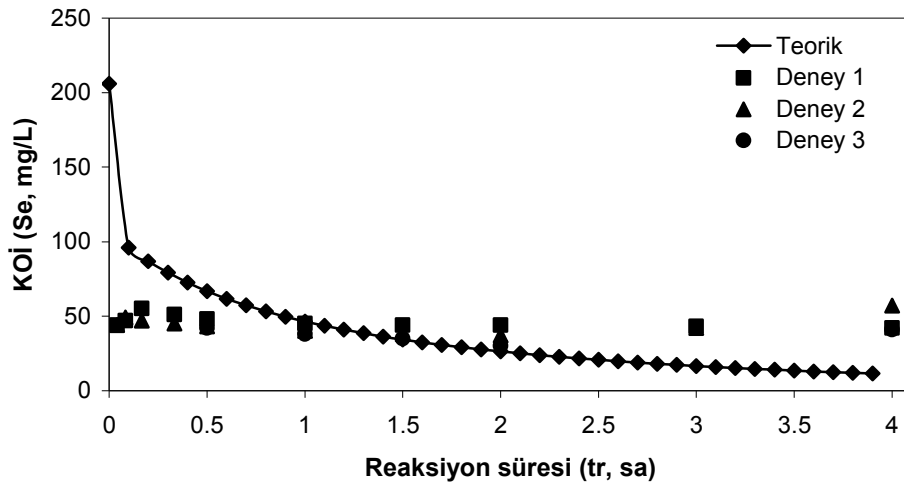
bulundurulduğunda ayrıca sistemin enerji maliyeti de düşünüldüğünden bu çalışma için optimum reaksiyon süresi 1.5 sa olarak belirlenmiştir.

5.1.1.2. Reaksiyon sabitinin (k) bulunması

Organik maddelerin kesikli (batch) sistemlerde biyolojik stabilizasyonu, yalancı-birinci-derece reaksiyonlara güzel bir örnektir. Her ne kadar çözülmüş oksijen konsantrasyonu, organizmaların sayısı, organik maddelerin konsantrasyonları gibi faktörler reaksiyonda bir şekilde rol alıyor olsalar da, reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktör organik maddelerdir. Atıksular ve endüstriyel atıklar gibi karmaşık substratlar başlangıçta yüksek bir toplam giderim hızı gösterirler ve böylece içeriklerini oluşturan değişik maddeleri aynı anda giderirler. Zamanla geride giderilmesi daha zor maddeler kaldığından, reaksiyon hızı düşmeye başlar [57].

Laboratuar ölçekli ardışık kesikli biyoreaktöre ait $Q=12$ L, $S_0=206$ mg/L, $S_e=34$ mg/L, $V_a=34$ L, $V_b=40$ L, $V_{ab}=6$ L ve $t_r=1.5$ sa değerleri (2.14) numaralı denklemde yerine konularak bu çalışmaya ait reaksiyon sabiti (k) 0.30 sa⁻¹ hesaplanmıştır.

Şekil 5.3'te $k=0.30$ sa⁻¹ değeri için teorik olarak hesaplanan KOİ çıkış konsantrasyonlarıyla deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında reaksiyonun başında yüksek bir giderim hızının olduğu ve zamanla reaksiyon hızının azaldığı görülmektedir. Optimum reaksiyon süresinde ($t_r=1.5$ sa) 0.30 sa⁻¹ hesaplanan k değerinin reaksiyonun başında 0.75 sa⁻¹ değerlerinde olduğu görülmektedir. Deneysel KOİ çıkış konsantrasyonlarının teorik olarak hesaplanan KOİ çıkış konsantrasyonlarıyla karşılaştırılması Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.

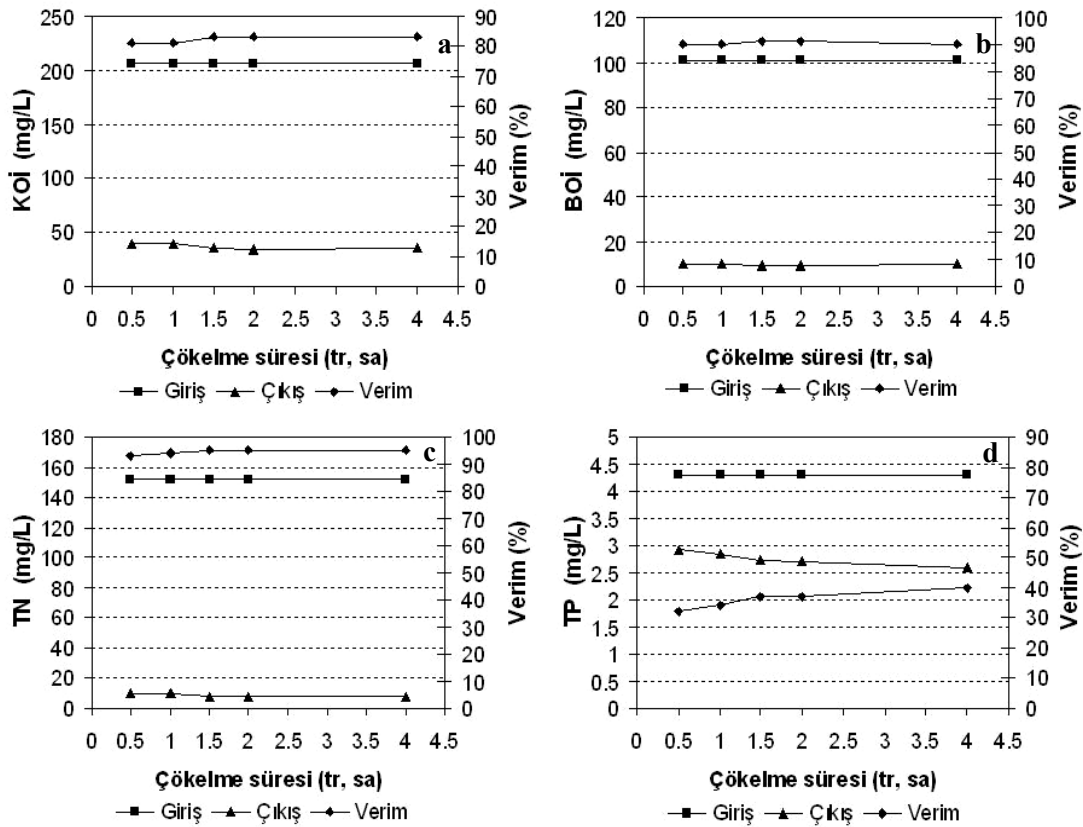


Şekil 5.3. Deneysel KOİ çıkış konsantrasyonlarının teorik olarak hesaplanan KOİ çıkış konsantrasyonlarıyla karşılaştırılması

5.1.2. Çökelme kinetiği

5.1.2.1. Optimum çökelme süresinin (t_c) bulunması

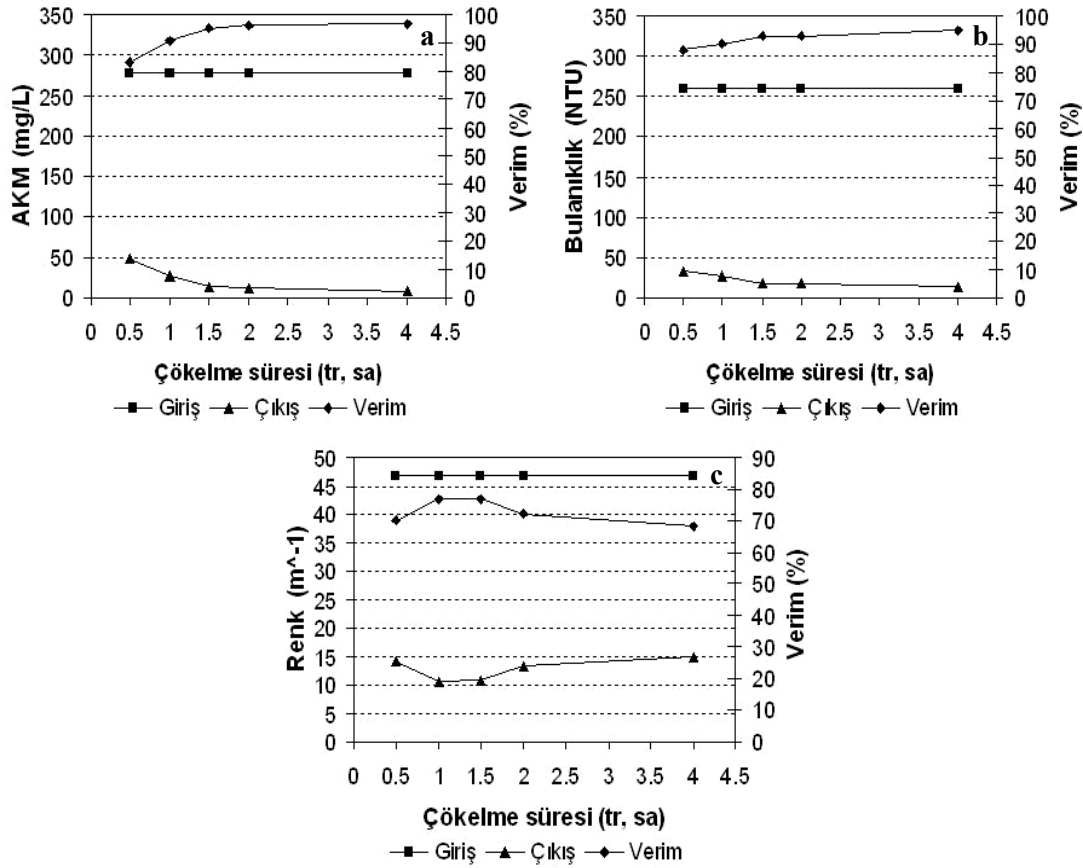
Ardışık kesikli biyoreaktörün çalışma süreleri 0.5 sa doldurma, 1.5 sa reaksiyon, 0.5 sa boşaltma olacak şekilde sabit tutularak, çökelme süresi 0.5 sa, 1 sa, 1.5 sa, 2 sa, ve 4 sa olacak şekilde değiştirildi. Bu işlem beş farklı çökelme süresi için tekrarlanarak deneysel çalışmalar yapılmıştır ve kentsel atıksu için optimum reaksiyon süresi 1.5 saat olarak belirlenmiştir. Farklı çökelme süreleri için KOİ, BOİ, TN ve TP giderim verimleri Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Farklı çökeltme süreleri için KOİ (a), BOİ (b), TN (c) ve TP (d) giderim verimleri

Şekil 5.4.'e göre KOİ giderme verimlerinin %81 ile %83, KOİ çıkış konsantrasyonunun ise 34 - 39 mg/L arasında değiştiği görülmüştür. En düşük KOİ giderme verimi (%81), 0.5 saatlik çökeltme süresi sonunda elde edilmiştir. En yüksek giderme verimi %83 ile 1.5 saatlik çökeltme süresinde elde edilmiştir. BOİ giderim verimlerinin ise %90 ile %91, BOİ çıkış konsantrasyonlarının ise 9 - 10 mg/L arasında olduğu görülüyor. En yüksek giderim verimi (%91), 1.5 ve 2 saatlik reaksiyon süresi sonunda elde edilmiştir. TN giderim verimine bakıldığında verimin %93 - %95, TN çıkış konsantrasyonunun 8-10 mg/L arasında değiştiği görülüyor. En yüksek verim (%95) 1.5 ve 2 saatlik çökeltme süreleri sonunda elde edilmiştir. TP giderim verimi %32 - %40 arasında çıkış konsantrasyonu ise 2.6 - 3 mg/L arasında değişmiştir. TP için en yüksek verim %40 ile 4 saatlik reaksiyon süresinde elde edilmiştir. 1.5 saatlik reaksiyon süresinde verim %37 dir.

Farklı reaksiyon süreleri için AKM, bulanıklık, renk giderim verimleri Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı çökelme süreleri için AKM (a), bulanıklık (b) ve renk (c) giderim verimleri

Şekil 5.5.'e göre AKM giderim verimleri incelendiğinde AKM giderim verimlerinin %83 - %97 arasında AKM çıkış konsantrasyonunun 8 – 10 mg/L arasında görülüyor. Denenen beş farklı çökelme süresi içinde en iyi giderme verimi (%97) ile 4 saatlik çökelme süresinde elde edilmiştir. 1.5 saatlik çökelme süresi sonunda AKM giderim verimi %95 dir. Bulanıklık giderim verimlerine bakıldığında verimin %88 - %95, çıkış konsantrasyonunun ise 13-32 NTU arasında değiştiği görülüyor. Maksimum giderme verimi 4 saatlik çökelme süresinde elde edilmiştir. 1.5 saatlik çökelme süresinde ise verim %93 tür. Renk giderim verimleri incelendiğinde verimin %68- %77, çıkış konsantrasyonunun ise 11- 15 m⁻¹ arasında değişmiştir. Maksimum giderim verimi 1 ve 1.5 saatlik çökelme sürelerinde elde edilmiştir.

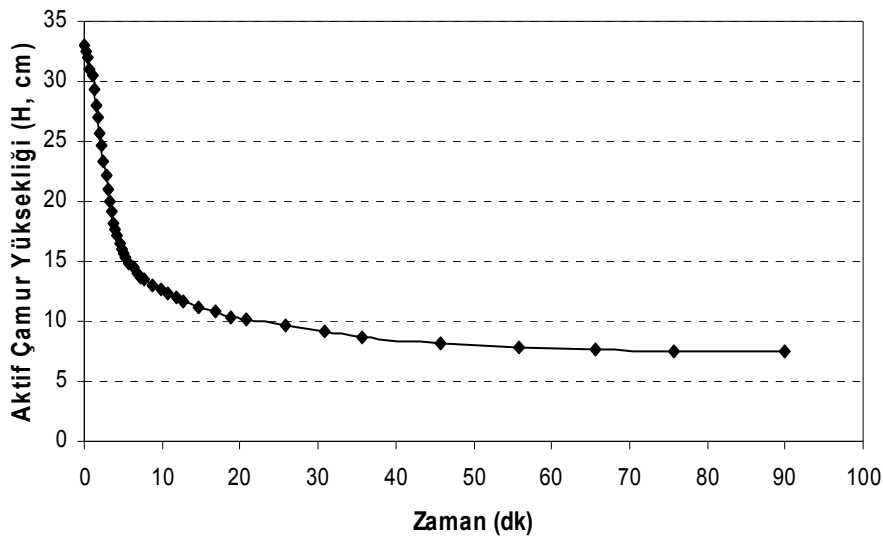
Yedi ayrı parametrenin çökelme süreleri için giderilme verimleri gözlemlendiğinde en iyi giderim verimi 1.5 saat ile 2 saat arasında değişmektedir ve 1.5 saatlik çökelme süresi ile 2 saatlik çökelme süresinin sonundaki verimler arasında %1 - 3'lük fark

olduğu göz önünde bulundurulduğunda optimum çökeltme süresi 1.5 sa olarak belirlenmiştir.

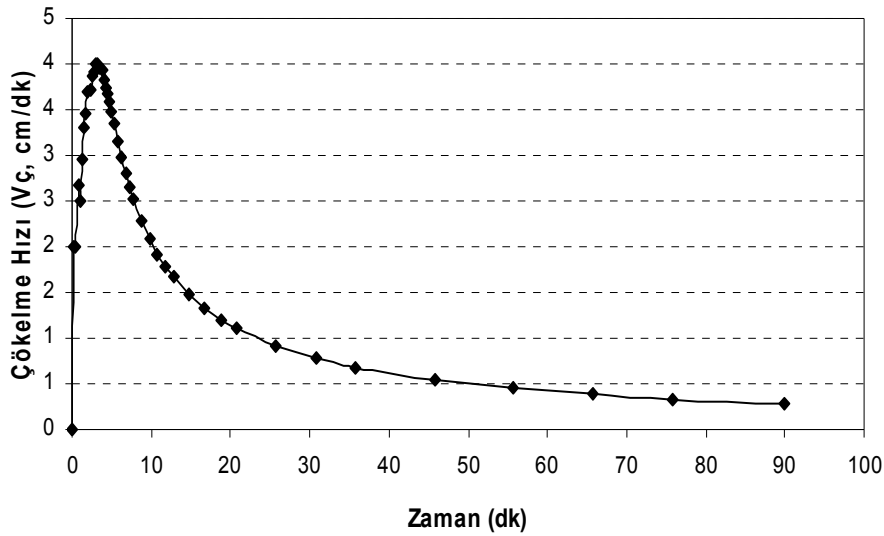
5.1.2.2. Çökeltme hızı

1.5 saatlik karıştırma süreci sonunda laboratuvar ölçekli ardışık kesikli biyoreaktördeki ve beherdeki aktif çamur yüksekliği 1.5 saat boyunca ölçülerek yükseklik-zaman, çökeltme hızı-zaman grafikleri oluşturulmuştur.

Laboratuvar ölçekli ardışık kesikli biyoreaktör ile yapılan deneylerde mevcut sıvı yüksekliği 33 cm'dir. Mevcut sıvı yüksekliği referans alınarak hesaplanan aktif çamur çökeltme yükseklik değerleri ve çökeltme hızı-zaman grafikleri Şekil 5.6.ve Şekil 5.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Çökeltme süresi boyunca aktif çamur yüksekliğinin değişimi

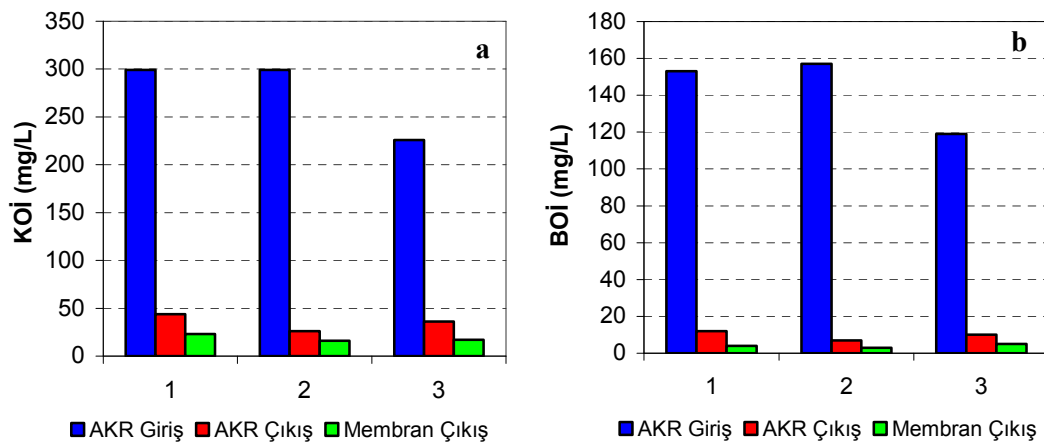


Şekil 5.7. Çökme süresi boyunca çökme hızının değişimi

5.2. Membran Biyoreaktör Çalışmaları

5.2.1. Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyu kalitesi ve giderme verimi

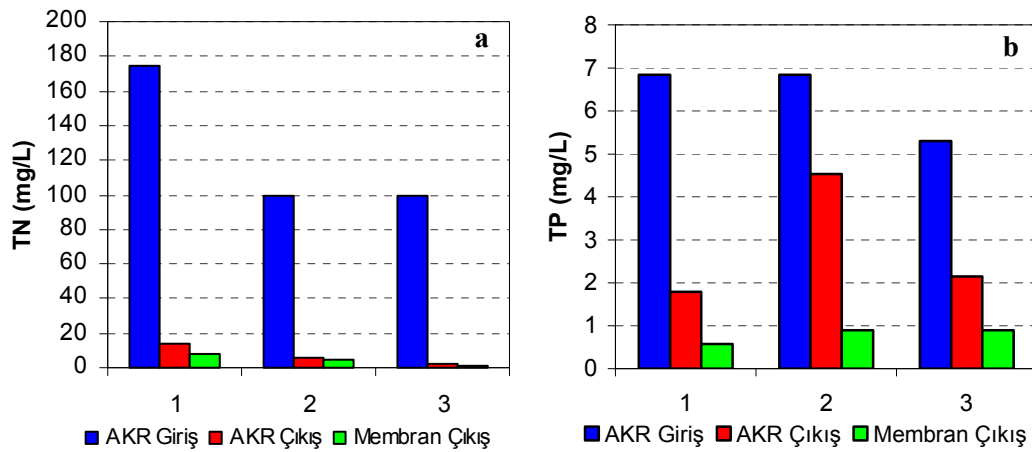
Tübüler membran biyoreaktördeki KOİ ve BOİ konsantrasyonlarının giriş ve çıkış konsantrasyonları Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Tübüler membran biyoreaktördeki KOİ (a) ve BOİ (b) konsantrasyonlarının değişimi

Şekil 5.8. incelendiğinde; tübüler membran biyoreaktörde KOİ ve BOİ için yüksek oranlarda giderme verimleri elde edilmiştir. Ortalama KOİ girişinin 275 mg/L olduğu sistemde tübüler membran biyoreaktör çıkışında ortalama KOİ konsantrasyonu 19 mg/L'dir. BOİ için ise; ortalama giriş konsantrasyonunun 143 mg/L olduğu tübüler membran biyoreaktör sisteminde, ortalama çıkış BOİ konsantrasyonu 4 mg/L'ye kadar inmiştir. Elde edilen deneysel bulgular sonucunda tübüler membran biyoreaktör sisteminin ortalama KOİ giderme verimi %93, ortalama BOİ giderim veriminin ise %97 olduğu bulunmuştur.

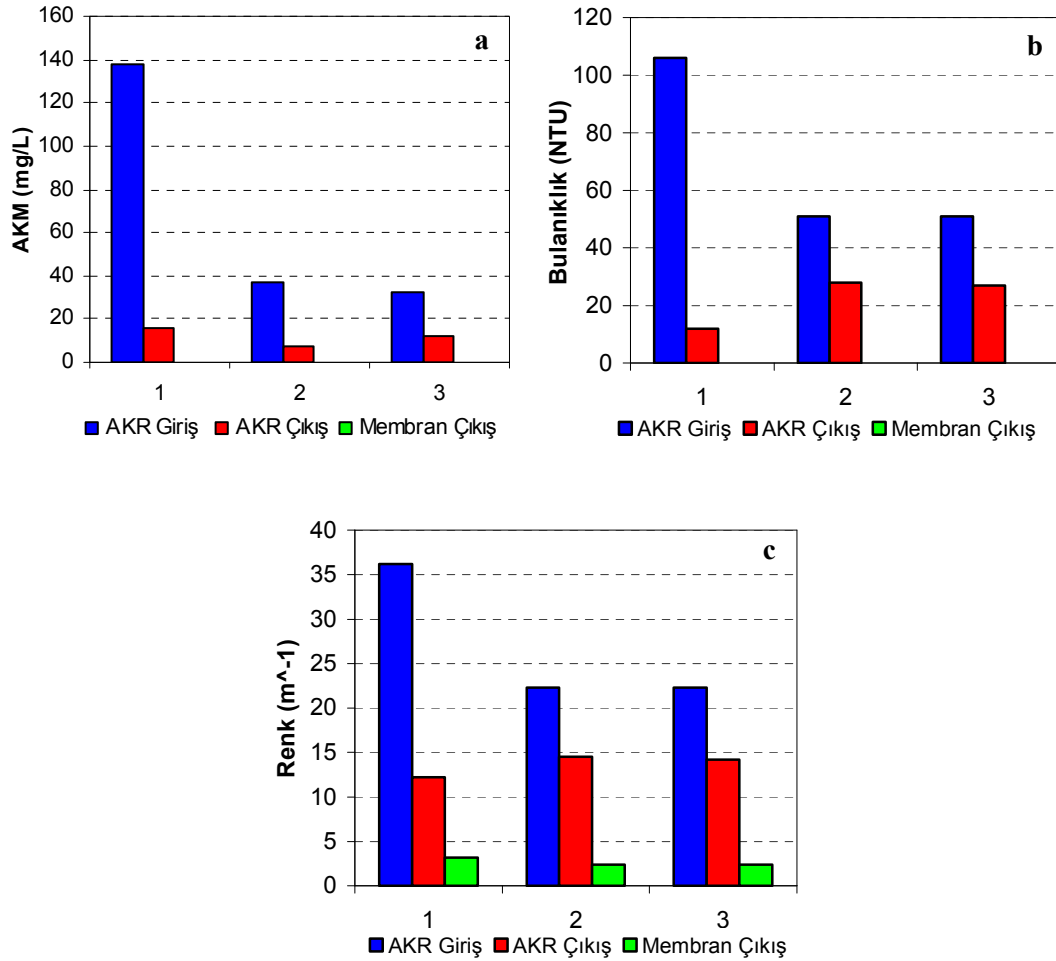
Tübüler membran biyoreaktördeki TN ve TP konsantrasyonlarının giriş ve çıkış konsantrasyonları Şekil 5.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Tübüler membran biyoreaktördeki TN (a) ve TP (b) konsantrasyonlarının değişimi

Şekil 5.9.'a göre; ortalama giriş TN konsantrasyonunun 125 mg/L olduğu tübüler membran biyoreaktör sisteminde, ortalama TN konsantrasyonunun tübüler membran biyoreaktörün çıkışında 4.3 mg/L olduğu görülmektedir. Tübüler membran biyoreaktör girişinde 6.3 mg/L olan ortalama TP konsantrasyonu tübüler membran biyoreaktörün çıkışında 0.78 mg/L'dir. Tübüler membran biyoreaktör sisteminin ortalama TN giderme verimi %97, ortalama TP giderim verimi ise %88 bulunmuştur.

Tübüler membran biyoreaktördeki AKM, bulanıklık ve renk parametrelerinin giriş ve çıkış konsantrasyonları Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Tübüler membran biyoreaktördeki AKM (a), bulanıklık (b) ve renk (c) parametrelerinin değişimi

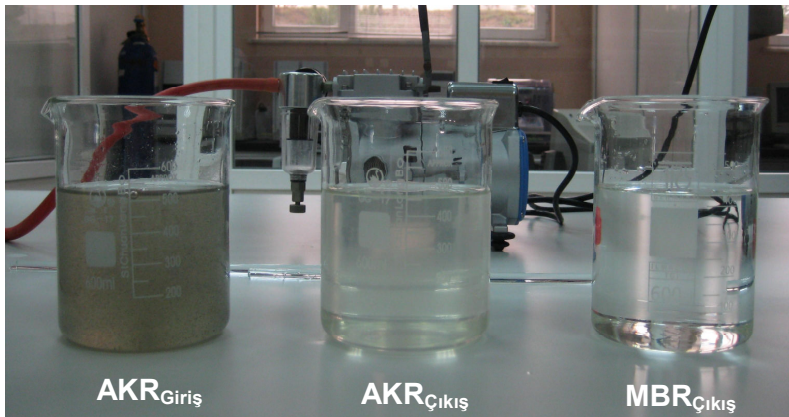
Şekil 5.10. incelendiğinde; ortalama AKM girişinin 134 mg/L olduğu tübüler membran biyoreaktör sisteminde AKM %100'lük giderim verimiyle artırılarak giderilmiştir. Tübüler membran biyoreaktör girişinde 134 NTU olan bulanıklık ise %99.9'luk bir giderim verimiyle artırılarak tübüler membran biyoreaktör çıkışında 0.02 NTU'ya düşmüştür. Ortalama giriş değeri 26.9 m⁻¹ olan renk ise %90 giderim verimiyle tübüler membran biyoreaktör çıkışında 2.6 m⁻¹ değerine düşmüştür.

Tübüler membran biyoreaktör sisteminin giriş ve çıkış konsantrasyon değerleri ile giderim verimi Tablo 5.1.'de özetlenerek verilmiştir.

Tablo 5.1. Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyu kalitesi ve giderme verimi

Parametre	Ortalama AKR Girişi	Ortalama AKR Çıkışı	Ortalama Tübüler Membran Çıkışı	Ortalama AKR Verimi (%)	Ortalama Tübüler Membran Verimi (%)	Ortalama Toplam MBR Verimi (%)
BOİ (mg/L)	143	9.36	4	93	59	97
KOİ (mg/L)	275	35	19	87	47	93
TN (mg/L)	125	7.43	4.36	94	41	97
TP (mg/L)	6.32	2.82	0.78	55	72	88
AKM (mg/L)	134	11.6	0	91	100	100
Renk (m ⁻¹)	26.9	13.6	2.6	49	80	90
Bulanıklık (NTU)	136	22.3	0.02	84	99.9	99.9

Yeryüzündeki kullanılabilir su kaynaklarının giderek azaldığı, ileri arıtma teknolojilerinin kullanılmasının ve arıtılmış atıksuların geri kazanımının önem kazandığı günümüzde, Tablo 5.1.'den de görüleceği üzere tübüler membran biyoreaktör sistemiyle yüksek kalitede çıkış suyu elde edilebileceği görülmektedir. Yedi ayrı parametrenin (KOİ, BOİ, TN, TP, AKM, bulanıklık ve renk) giderim veriminin incelendiği tübüler membran biyoreaktör sisteminde minimum ve maksimum giderim verimleri sırasıyla TP (%88) ve AKM (%100) parametrelerinde elde edilmiştir. Bulanıklık gideriminde %99.9 ve AKM giderimindeki %100 oranındaki yüksek giderme verimleri dikkati çekmektedir. Tübüler membran biyoreaktör giriş ve çıkış suyu kalitelerinin karşılaştırılması Şekil 5.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Tübüler membran biyoreaktör giriş ve çıkış suyu kalitelerinin karşılaştırılması

5.2.2. Sulama suyu sınıfının belirlenmesi

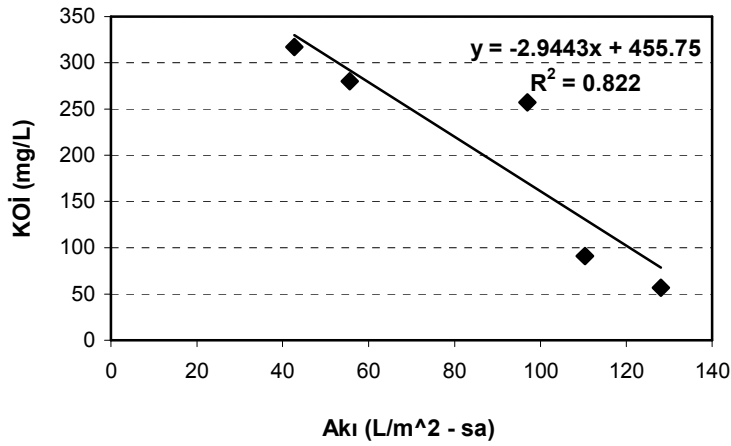
Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyunun sulama suyu olarak kullanılmasının amaçlandığı bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar SKKY Teknik Usüller Tebliği sulama suyu kriterleri açısından incelenerek tübüler membran biyoreaktör sisteminin çıkış suyunun sulama suyu sınıfı (C₃S₁); III. sınıf kullanılabilir su olarak bulunmuştur. Tübüler membran biyoreaktör sisteminin çıkış suyunun sulama suyu kriterleri açısından incelenmesi Tablo 5.2.'de özetlenerek verilmiştir.

Tablo 5.2. Tübüler membran biyoreaktör çıkış suyunun sulama suyu kriterleri açısından incelenmesi

Kalite Kriterleri	Referans Aralığı	Tübüler Membran Biyoreaktör Çıkışı	Durum
EC ₂₅ X 10 ⁶	750 - 2000	1700	III. sınıf (Kullanılabilir)
Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR)	<10	1.60	I sınıf (Çok iyi)
Sulama Suyu Sınıfı	C ₁ S ₃ , C ₂ S ₃ , C ₃ S ₃ , C ₃ S ₂ C ₃ S ₁ ,	C ₃ S ₁	III. sınıf (Kullanılabilir)
Nitrat (NO ₃ , mg/L)	5-10	7.18	II. sınıf (İyi)
Fekal Koliform 1/100 ml	0-2	0	I. sınıf (Çok iyi)

5.2.3. KOİ giriş konsantrasyonu membran süzöntü akısı ilişkisi

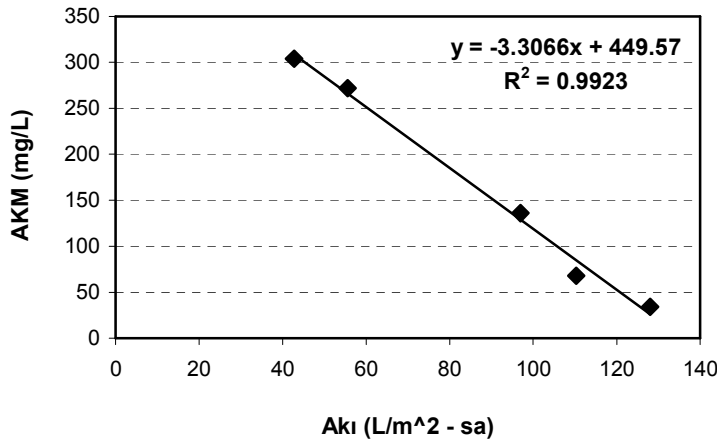
Farklı KOİ giriş konsantrasyonlarıyla tübüler membran süzöntü akısının değişimi Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Şekil 5.12. incelendiğinde; giriş konsantrasyonu arttıkça KOİ giderim verimi, %66'dan %87'ye çıkmıştır. Fakat tübüler membrana giren atıksuyun KOİ konsantrasyonu arttıkça süzöntü akısı azalmaktadır. KOİ giriş konsantrasyonu arttıkça birim zamanda birim membran alanından geçen akım yani sistemin performansı azalmakta, arıtılan atıksu miktarı düşmektedir.



Şekil 5.12. KOİ giriş konsantrasyonu ile tübüler membran süzöntü akısının değişimi

5.2.4. AKM giriş konsantrasyonu membran süzöntü akısı ilişkisi

Farklı AKM giriş konsantrasyonlarıyla tübüler membran süzöntü akısının değişimi Şekil 5.13.'te gösterilmiştir.

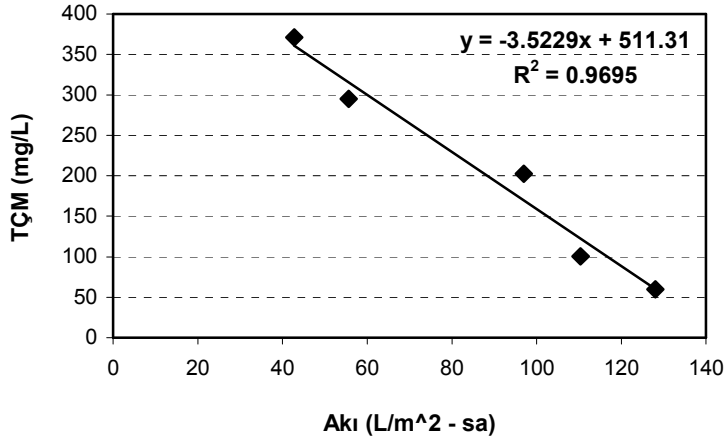


Şekil 5.13. AKM giriş konsantrasyonu ile tübüler membran süzöntü akısının değişimi

Şekil 5.13. incelendiğinde; tübüler membrana giren atıksuyun AKM konsantrasyonu arttıkça süzöntü akısı azalmaktadır. AKM giriş konsantrasyonu arttıkça sistemin performansı azalmakta, arıtılan atıksu miktarı düşmektedir.

5.2.5. TÇM giriş konsantrasyonu membran süzüntü akısı ilişkisi

Farklı TÇM giriş konsantrasyonlarıyla tübüler membran süzüntü akısının değişimi Şekil 5.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. TÇM giriş konsantrasyonu ile tübüler membran süzüntü akısının değişimi

Şekil 5.14. incelendiğinde; tübüler membrana giren atıksuyun TÇM konsantrasyonu arttıkça süzüntü akısı azalmaktadır. TÇM giriş konsantrasyonu arttıkça sistemin performansı azalarak arıtılan atıksu miktarı düşmektedir.

5.2.6. Membran biyoreaktörün temizlenmesi

Tübüler Membran Biyoreaktör sistemiyle yapılan çalışmalar sırasında membranın temizliği için hava ile sıyırma metodu kullanılmış olup hava kompresörü ile sağlanan 6 bar basıncındaki basınçlı hava sisteme dıştan içe doğru verilerek membran yüzeyine tutunmuş materyallerin uzaklaştırılarak gözeneklerin temizlenmesi sağlanmıştır. Hava ile temizleme işlemi yaklaşık 3 dakika sürmüş ve temizleme sonunda 250-300 mL konsantre elde edilmiştir.

5.3. Mikrobiyolojik Çalışmalar

Çalışmalar kapsamında ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamur mikrobiyolojik olarak incelenerek mikrobiyolojik dağılımın ardışık kesikli biyoreaktörün arıtma verimine etkisi araştırılmıştır. Tablo 5.3.'te mikrobiyolojik çalışmada kullanılan kentsel atıksuyun ardışık kesikli biyoreaktöre giriş-çıkış konsantrasyonları ile giderim verimleri verilmiştir.

Tablo 5.3. Mikrobiyolojik çalışmada kullanılan kentsel atıksuyun karakterizasyonu

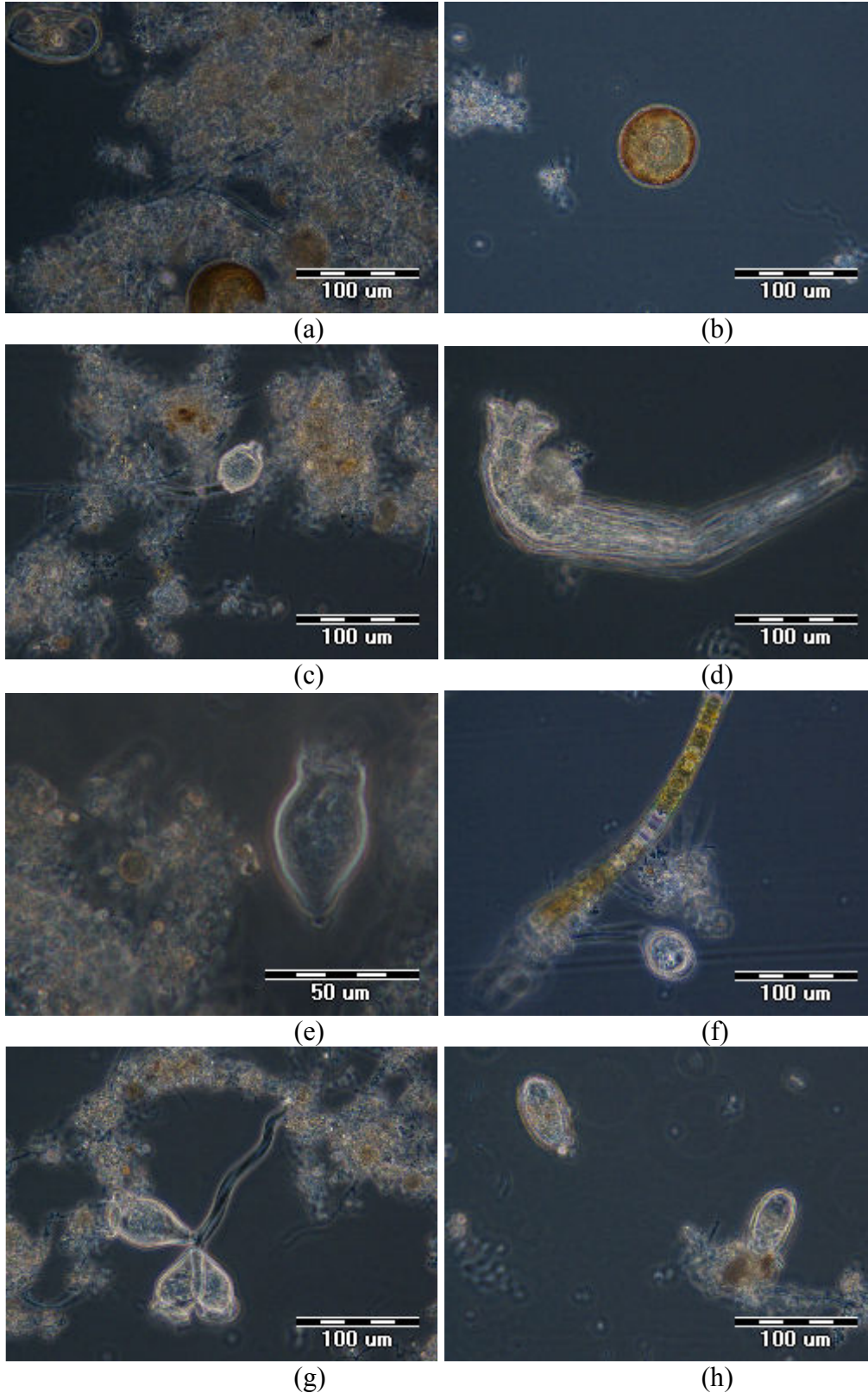
Parametre	Birim	I. Numune			II. Numune			III. Numune		
		AKR _G	AKR _Ç	Verim (%)	AKR _G	AKR _Ç	Verim (%)	AKR _G	AKR _Ç	Verim (%)
Sıcaklık	°C	21.4	22	-	20.6	21	-	22	22.4	-
pH	-	9.4	7.68	-	7.2	7.7	-	7.8	7.6	-
İletkenlik	mS	4.2	4	5	1.3	1.5	-	3.5	3.1	11
KOİ	mg/L	206	35	83	226	35	85	197	38	81
BOİ	mg/L	101	9	91	119	9	92	94	12	87
TN	mg/L	152	7.9	95	174	7.3	96	148	7.6	95
TP	mg/L	4.3	2.73	36	5.3	0.65	88	4.1	0.93	77
AKM	mg/L	277	13	95	138	20	85	127	18	86
Bulanıklık	NTU	260	17	95	106	12	89	104	13	88
Renk	m ⁻¹	46.7	10.7	77	36.2	14.6	60	34.8	14.9	57

Çamur hacim indeksi (SVI)'nin 76 mL/gr olarak ölçüldüğü I. Numunede; hem karışım fazında (Şekil 5.14.a) hem de çökme fazında (Şekil 5.15.a) sıkı bir halde olan flok yapısı bu özellikleri ile Flok Tipi 1'e uymaktadır. İncelenen her iki numunede de *Arcella sp.*'ye yoğun olarak rastlanmıştır (Şekil 5.14.b ve Şekil 5.15.e). *Arcella sp.*'nin en önemli özelliği çamurdaki iyonların çökme miktarına göre sahip olduğu kahverenginin koyulaşmasıdır. Bu koyuluk derecesi çamurdaki iyon çökmesi konusunda bilgi vermektedir. *Arcella sp.*'ye düşük yüklü aktif çamur sistemlerinde ve özellikle nitrifikasyon şartları altında sıkça rastlanmaktadır.

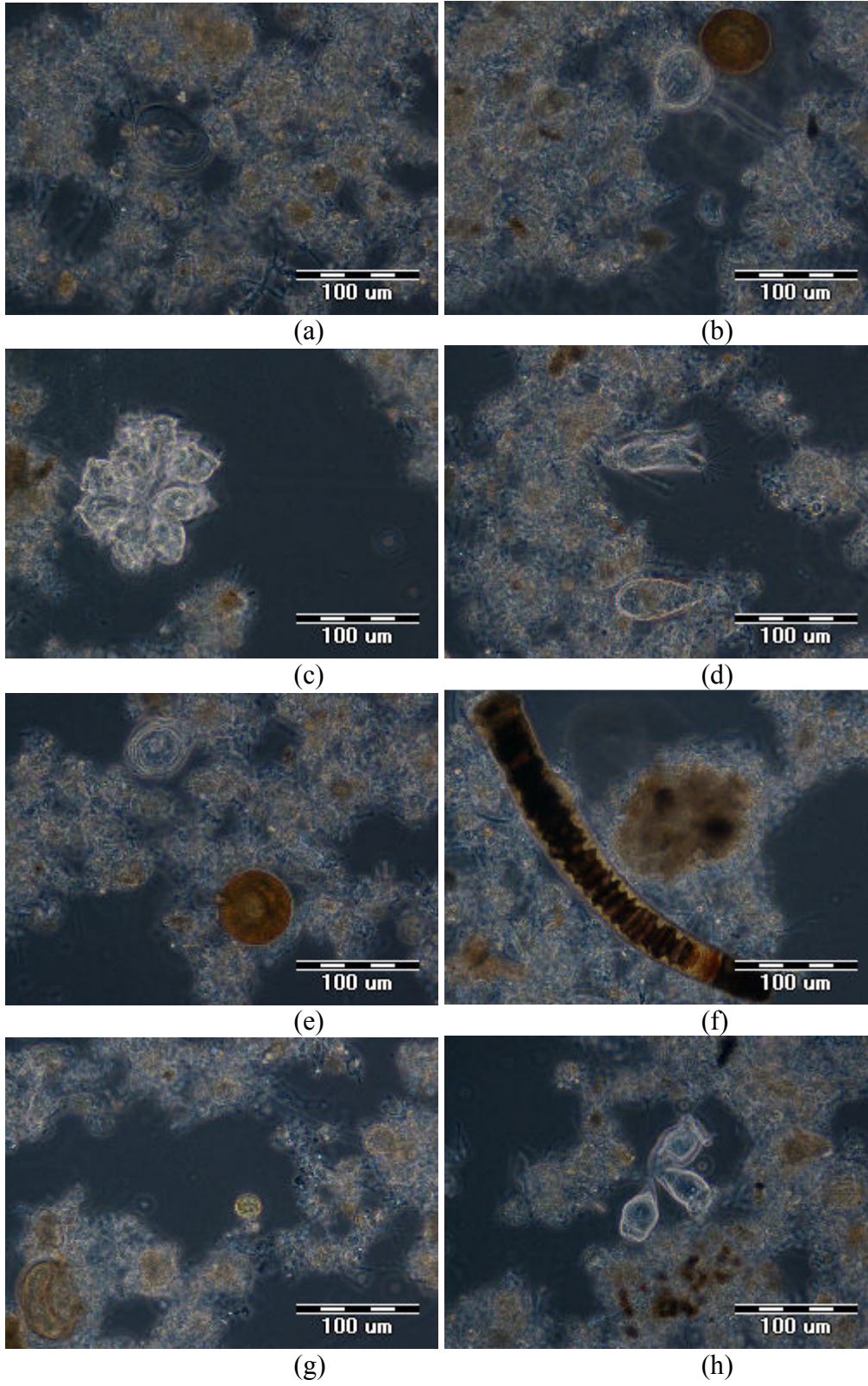
I. Numuneye ait karışım fazındaki aktif çamur fotoğraflarında iyi bir aktif çamurun indikatörü olan *Arcella sp.*, *Epistylis sp.* ve *Carchesium sp.* gibi cinsleri görülmektedir. Ayrıca *Scyphidia sp.*, *Philodina sp.*, *Ulothrix sp.*, *Diffugia sp.* gibi cinslerde aktif çamurda gözlenmiştir (Şekil 5.15.). I. Numunede çökme fazındaki dip çamurundan alınan örneklerde, *Epistylis sp.*, *Carchesium sp.*, *Acineta sp.*, *Arcella*

sp., Ulothrix sp., Rotifer cinslerine rastlanmıştır (Şekil 5.16.). Ulothrix sp. bir algdir ve I. Numunede hem karışım fazında hem de çökelme fazında bu cinse rastlanmıştır (Şekil 5.15..f ve Şekil 5.16.f).

Atıksu kirlilik karakteristiklerindeki verimin yüksekliği de düşünöldüğünde I. Numunedeki çamurun iyi bir arıtımın verimi sağlayan mikroorganizmaları içeren bir çamur olduğundan söz edilebilir.



Şekil 5.15. I. Numunede karışım fazındaki aktif çamurun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 40x, (b) Arcella sp. 40x, (c) Epistylis sp. 40x, (d) Philodina sp 40x, (e) Scyphidia sp. 100x, (f) Ulothrix sp. 40x, (g) Carchesium sp. 40x, (h) Diffflugia sp. 40x.

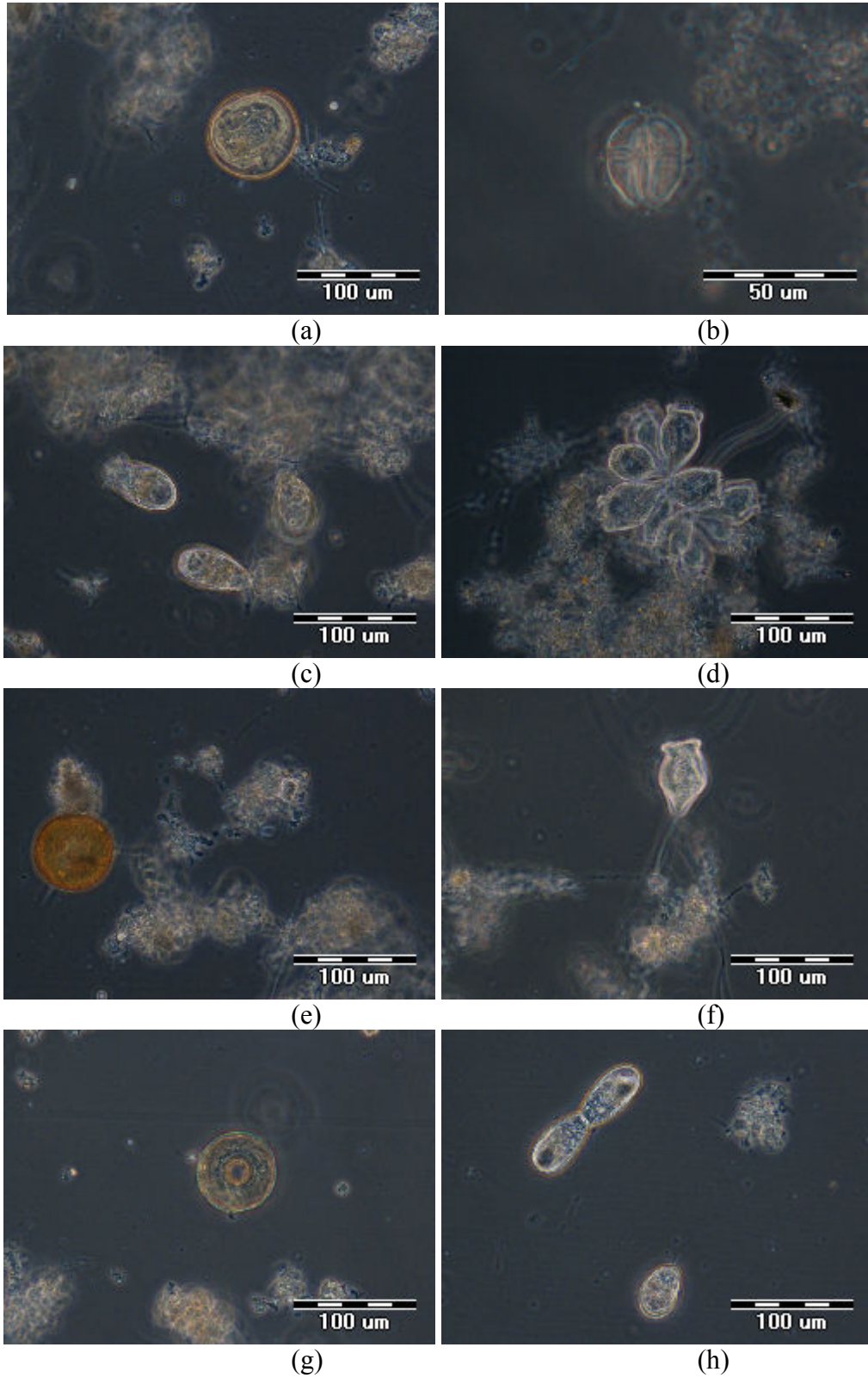


Şekil 5.16. I. Numunede çökme fazındaki dip çamurunun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 40x, (b) *Epistylis* sp. 40x, (c) *Carchesium* sp. 40x, (d) *Acineta* sp. 40x, (e) *Arcella* sp. 40x, (f) *Ulothrix* sp. 40x, (g) Rotifer 40x, (h) *Carchesium* sp. 40x.

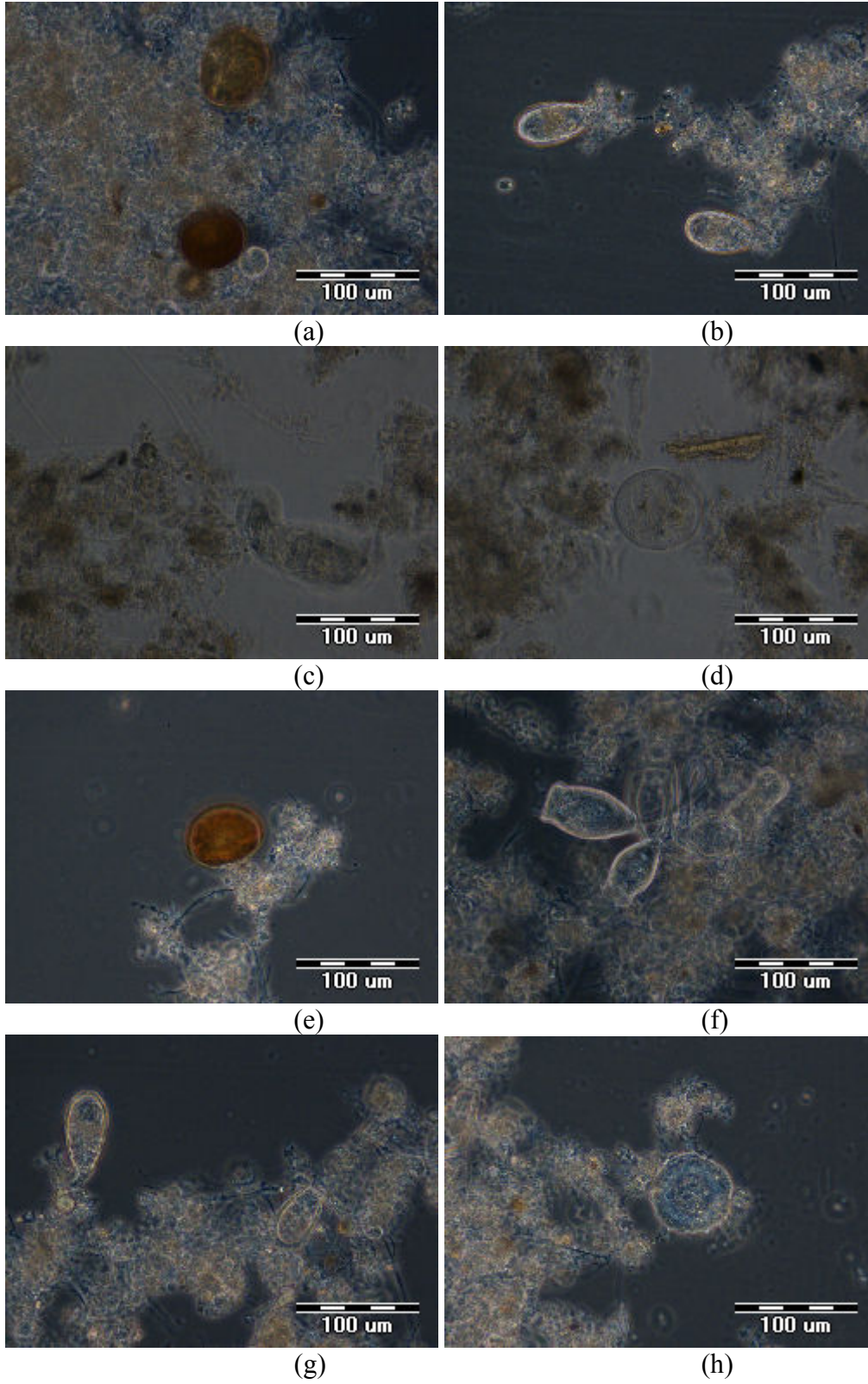
Çamur hacim indeksi (SVI)'nin 75 mL/gr olarak ölçüldüğü II. Numunede; hem karışım fazında (Şekil 5.17.a) hem de çökelme fazında (Şekil 5.18.a) sıkı bir halde olan flok yapısı bu özellikleri ile Flok Tipi 1'e uymaktadır.

II. Numuneye ait karışım fazındaki aktif çamur fotoğraflarında *Arcella* sp., *Cocconeis* sp., *Carchesium* sp., *Diffugia* sp., *Vorticella* sp. cinsleri gözlenmiştir. Bu numunede *Diffugia* sp. miktar olarak artış göstermiştir (Şekil 5.17.h). II. Numunede çökelme fazındaki dip çamurunda *Diffugia* sp., Rotifer, *Volvox* sp., *Carchesium* sp., *Arcella* sp. ortamda hakimdir ve *Diffugia* sp. miktarı I. numuneye oranla fazladır. (Şekil 5.18.b,g). *Cocconeis* sp. bir diatom (Şekil 5.17.b) ve *Volvox* sp. (Şekil 5.18.d). bir algdir. II. Numunede karışım ve çökelme fazındaki dip çamurunda gözlenen *Diffugia* sp. cinsi düşük yüklü aktif çamur sistemlerinde yaygın olarak bulunmaktadır.

Atıksu kirlilik karakteristiklerindeki verimin yüksekliği de düşünüldüğünde I. Numunedeki çamurun iyi bir arıtım verimi sağlayan mikroorganizmaları içeren çamur olduğundan söz edilebilir.



Şekil 5.17. II. Numunede karışım fazındaki aktif çamurun mikrobiyolojik yapısı, (a) *Arcella* sp. 40x, (b) *Cocconeis* sp. 100x, (c) *Diffflugia* sp. 40x, (d) *Carchesium* sp. 40x, (e) *Arcella* sp. 40x, (f) *Vorticella* sp. 40x, (g) *Arcella* sp. 40x, (h) *Diffflugia* sp. 40x.

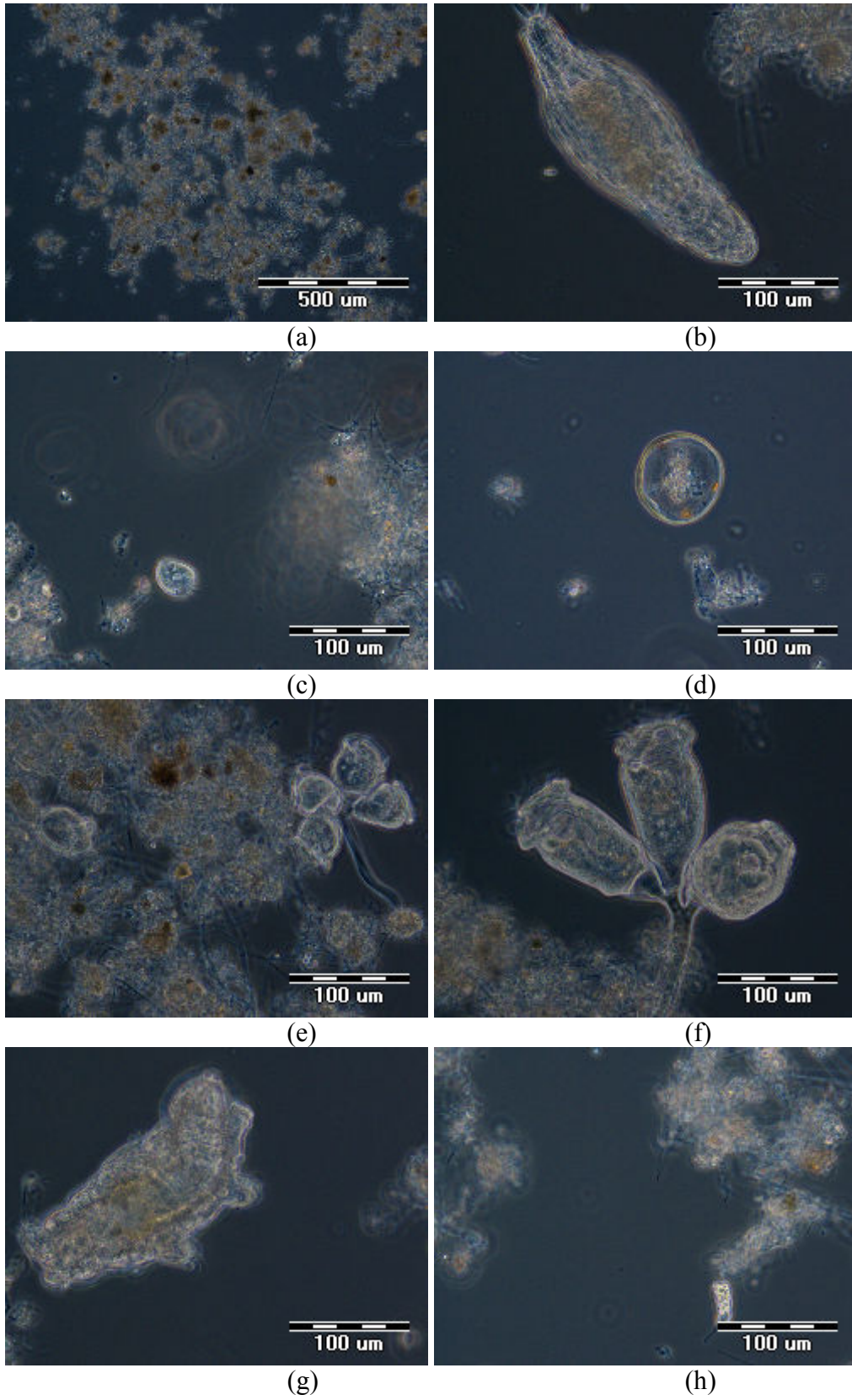


Şekil 5.18. II. Numunede çökeltme fazındaki dip çamurunun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 40x, (b) *Diffugia* sp. 40x, (c) Rotifer 40x, (d) *Volvox* sp. 40x, (e) *Arcella* sp. 40x, (f) *Carchesium* sp. 40x, (g) *Diffugia* sp. 40x, (h) *Arcella* sp. 40x.

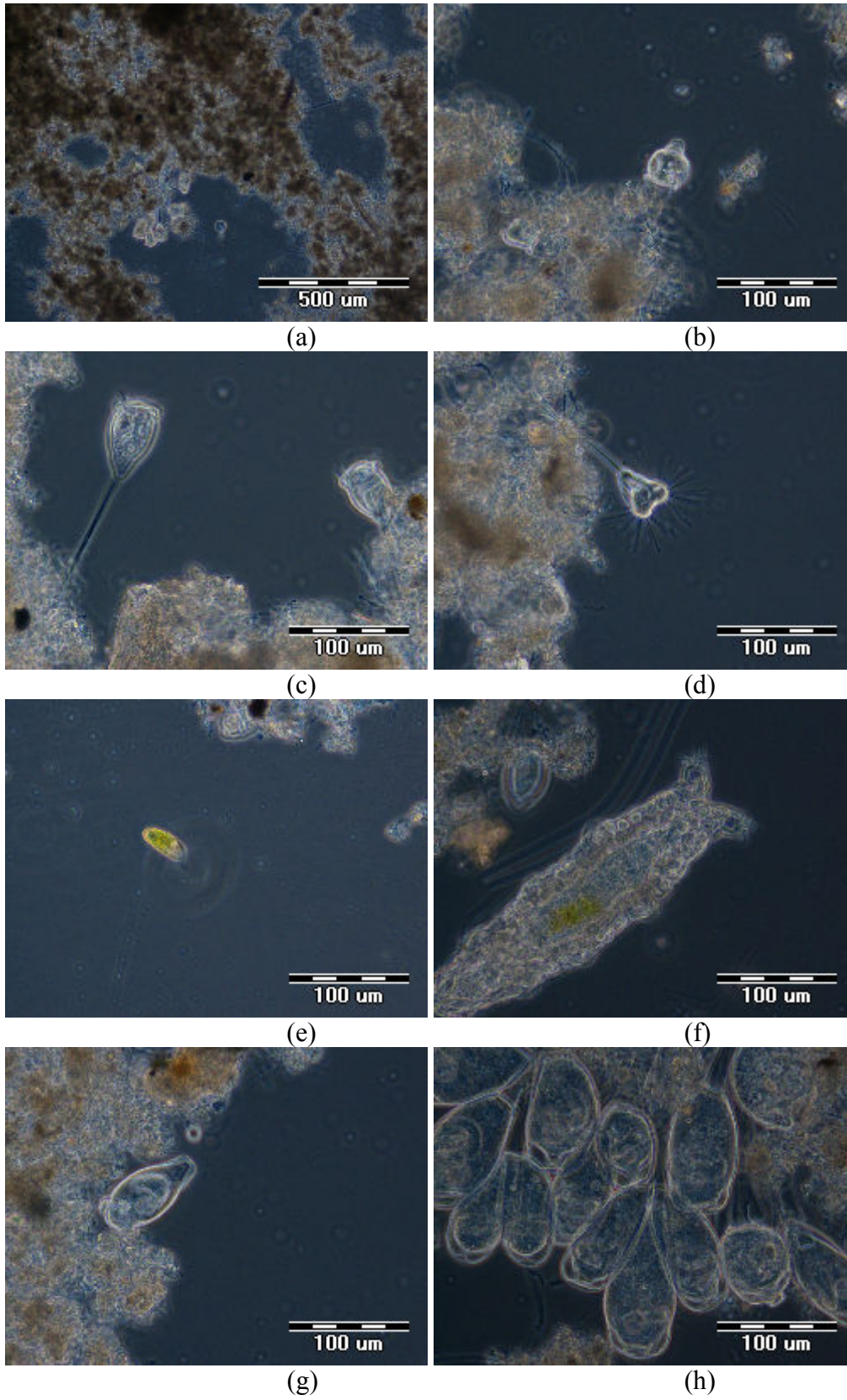
Çamur hacim indeksi (SVI)'nin 92 mL/gr olarak ölçüldüğü III. Numunede; hem karışım fazında (Şekil 5.19.a) hem de çökelme fazında (Şekil 5.20.a) sıkı bir halde olan flok yapısı bu özellikleri ile Flok Tipi 1'e uymaktadır.

III. Numuneye ait karışım fazındaki aktif çamur fotoğraflarında *Habrotrocha* sp., *Aspidisca* sp., *Arcella* sp., *Carchesium* sp., *Epistylis* sp., *Targidrade* sp., *Peranema* sp. cinsleri gözlenmiştir (Şekil 5.19). III. Numunede çökelme fazındaki dip çamurunda *Didinium* sp., *Vorticella* sp., *Acineta* sp., *Peranema* sp., *Targidrade* sp., *Scyphidia* sp., *Epistylis* sp. cinslerine rastlanmıştır (Şekil 5.20).

III. Numunenin her iki fazında da I. ve II. numunelerde gözlenmeyen *Didinium* sp., *Aspidisca* sp., *Targidrade* sp. ve *Peranema* sp. cinslerine rastlanmıştır. Bu cinslere çamur yükünün yüksek olmadığı aktif çamur sistemlerinde sıkça rastlanmaktadır.



Şekil 5.19. III. Numunede karışım fazındaki aktif çamurun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 10x, (b) Habrotrocha sp 40x, (c) Aspidisca sp. 40x, (d) Arcella sp. 40x, (e) Carchesium sp. 40x, (f) Epistylis sp. 40x, (g) Targirade sp. 40x, (h) Peranema sp. 40x



Şekil 5.20. III. Numunede çökeltme fazındaki dip çamurunun mikrobiyolojik yapısı, (a) Flok yapısı 10x, (b) *Didinium* sp. 40x, (c) *Vorticella* sp. 40x, (d) *Acineta* sp. 40x, (e) *Peranema* sp. 40x, (f) *Targidrade* sp. 40x, (g) *Scyphidia* sp. 40x, (h) *Epistylis* sp. 40x.

Mikroorganizmalar depoladıkları bazı maddeler veya varlıklarını tetiklemekte olan maddeler sayesinde tesis su karakteri konusunda oldukça sağlıklı bilgiler vermektedir [58].

KOİ, BOİ, AKM, TN ve TP giderim verimlerinin her üç numunede yaklaşık değişim gösterdiği görülmüştür. I. Numunede oldukça düşük olan TP verimi II. ve III. numunede değişerek yükselmiştir. Ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamurdan hem karışım hem de dip çamurundan alınan örneklerde iyi bir aktif çamurun indikatörü olan cinslere sıkça rastlanmıştır.

I. Numunede *Arcella sp.*' ye baskın olarak rastlanmıştır. *Arcella sp.* görüntüsü saydam olmasına rağmen, aktif çamurda genellikle üzerlerine demir bileşiklerinin çökmesinden ötürü sarı-kahve renkte görülürler. Düşük yüklü aktif çamur sistemlerinde yaygın olarak bulunurlar [59].

II. Numunede *Diffugia sp.* cinsi hücrelerin sayıca artışı gözlenmiştir. Özellikle III numunede; I. numunede baskın olan *Arcella sp.* ve II. Numunede baskın olan *Diffugia sp.* cinsleri baskınlığını yitirmiştir, buna karşın I. ve II. numunelerde gözlenmeyen *Didinium sp.*, *Aspidisca sp.*, *Targidrade sp.* ve *Peranema sp.* cinslerine rastlanmıştır.

Rotifers ve *Targidrades* metazoan gruplarıdır. Rotifers çoğunlukla düşük yüklü aktif çamur proseslerinde rastlanır. Evsel atıksu arıtma tesislerinde sınırlı sayıda gözlenmektedirler [59]. Bu çalışmada da sınırlı sayıda rotifers ve *targidrades* cinslerine rastlanmıştır. Buna karşın hem karışım hem de çökme fazındaki örneklerde *Epistylis sp.*, *Carchesium sp.* ve *Vorticella sp.* ciliates cinsleri sıklıkla gözlenmiştir.

Atıksu arıtma sistemlerinde protozoa ve metazoaların bazı türleri temsil edici özellik taşır. Ayrıca bazı protozoalar atıksu arıtma sistemlerinin kontrolü ve performansının korunmasında önemli araçlardır. Dolayısıyla aktif çamurda bulunan protozoa ve

metezoalar atıksu arıtma tesisinin veriminin günlük olarak kontrol edilmesine imkan sağlarlar [60].

Ardışık kesikli biyoreaktör atıksu giriş çıkış değerleri karşılaştırıldığında ölçülen parametreler için verimin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Buda aktif çamurdaki protozoa ve metezoa popülasyonunun iyi bir aktif çamur için arzu edilen karakterde olduğunu göstermektedir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; kentsel nitelikli atıksuların ileri arıtımı araştırılarak, yeni bir teknoloji olan membran biyoreaktör sisteminin KOİ, BOİ, TN, TP, AKM, renk, bulanıklık giderim verimleri ile ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamurun mikrobiyolojik kompozisyonu incelenerek Tübüler Membran Biyoreaktör sisteminin performansına etki eden faktörler araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen yüksek kalitedeki MBR çıkış suyunun Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği sulama suyu standartlarına göre sulama suyu sınıfı belirlenmiştir.

AKR'deki yedi ayrı parametrenin (KOİ, BOİ, TN, TP, AKM, bulanıklık ve renk) giderim verimleri gözlemlendiğinde; bu çalışma için optimum reaksiyon süresi ile optimum çökeltme süresi sistemin enerji maliyeti de göz önüne alınarak 1.5 sa olarak belirlenmiştir.

Laboratuvar ölçekli AKR'ye ait Q , S_0 , S_e , V_a , V_b , V_{ab} ve t_r değerleri (2.14) numaralı denklemde yerine konularak bu çalışmaya ait reaksiyon sabiti (k) 0.30 sa^{-1} hesaplanmıştır. $k=0.30 \text{ sa}^{-1}$ değeri için teorik olarak hesaplanan KOİ çıkış konsantrasyonlarıyla deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında reaksiyonun başında yüksek bir giderim hızının olduğu ve zamanla reaksiyon hızının azaldığı görülmektedir. Optimum reaksiyon süresinde ($t_r=1.5 \text{ sa}$) 0.30 sa^{-1} hesaplanan k değerinin reaksiyonun başında 0.75 sa^{-1} değerlerinde olduğu görülmektedir.

Yeryüzündeki kullanılabilir su kaynaklarının giderek azaldığı, ileri arıtma teknolojilerinin kullanılmasının ve arıtılmış atıksuların geri kazanımının önem kazandığı günümüzde, Tübüler Membran Biyoreaktör sistemiyle yüksek kalitede çıkış suyu elde edilmiştir. Yedi ayrı parametrenin giderim veriminin incelendiği tübüler membran biyoreaktör sisteminde KOİ %93, BOİ %97, TN %97, TP %88, AKM %100, bulanıklık %99.9 ve renk %90 giderme verimiyle arıtılmıştır.

Bulanıklık ve AKM giderimindeki %100 oranındaki yüksek giderme verimleri dikkati çekmektedir.

Tübüler Membran Biyoreaktör çıkış suyunun sulama suyu olarak kullanılmasının amaçlandığı bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar SKKY Teknik Usüller Tebliği sulama suyu kriterleri açısından incelenerek Tübüler Membran Biyoreaktör sisteminin çıkış suyunun sulama suyu sınıfı (C₃S₁); III. sınıf kullanılabilir su olarak bulunmuştur.

KOİ, AKM ve TÇM konsantrasyonlarıyla tübüler membran süzüntü akısı arasındaki ilişki incelendiğinde; tübüler membrana giren atıksuyun KOİ, AKM ve TÇM konsantrasyonları arttıkça süzüntü akısı azalmıştır. Giriş konsantrasyonu arttıkça birim zamanda birim membran alanından geçen akım azalarak sistemin performansı düşmüştür ve birim zamandaki arıtılan atıksu miktarının azaldığı görülmüştür.

Ardışık kesikli biyoreaktördeki aktif çamurun KOİ, BOİ, AKM, TN ve TP giderim verimlerinin alınan her üç numunede yaklaşık değişim gösterdiği görülmüştür. I. Numunede oldukça düşük olan TP verimi II. ve III. numunede değişerek yükselmiştir. AKR'de karışım anında ve çökeltme anındaki dip çamurundan alınan aktif çamur örneklerinden I. Numunede *Arcella sp.*'ye baskın olarak rastlanmıştır. II. Numunede *Diffugia sp.* cinsi hücrelerin sayıca artışı gözlenmiştir. Özellikle III numunede; I. numunede baskın olan *Arcella sp.* ve II. Numunede baskın olan *Diffugia sp.* cinsleri baskınlığını yitirerek, I. ve II. numunelerde gözlenmeyen *Didinium sp.*, *Aspidisca sp.*, *Targidrade sp.* ve *Peranema sp.* cinslerine rastlanmıştır. AKR atıksu giriş ve çıkış değerleri karşılaştırıldığında ölçülen parametreler için verimin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Buda aktif çamurdaki protozoa ve metezoa popülasyonunun iyi bir aktif çamur için arzu edilen karakterde olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] KİTİŞ, M., Üniversite kampüs atıksuyunun membran biyoreaktörü ile arıtılabilirliğinin araştırılması. Tübitak Proje No 1031033 İÇTAG-Ç086, 2006.
- [2] GÖKÇAY, C.F., KOMESLİ, O.T., Evsel atıksu arıtımında vakum membran biyoreaktörlerin kullanılması. Tübitak Proje No 105Y100, 2007.
- [3] AYDIN, Y., Elazığ İli kentsel atıksularında organik kirlilik yükünün belirlenmesi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [4] EREN, B., SUROĞLU, B., ATEŞ, A., İLERİ, R., KELEŞ, R., Adapazarı kentsel atıksu arıtma tesisi atıksuyunun karakterizasyonunun incelenmesi ve değerlendirilmesi. Üniversite Öğrencileri II. Çevre Sorunları Kongresi, Fatih Üniversitesi, İstanbul, Mayıs, 2007.
- [5] [http:// www.adasu.gov.tr](http://www.adasu.gov.tr), 2009.
- [6] CAO, J. H., ZHU, B. K., LU, H., XU, Y. Y., Study on polypropylene hollow fiber based recirculated membrane bioreactor for treatment of municipal wastewater. Desalination, 2005; 183: 431- 438.
- [7] KİTİŞ, M., YİĞİT, N.Ö., KÖSEOĞLU, H., HARMAN, B.İ., CİVELEKOĞLU, G., SAYILGAN, E., BEKAROĞLU, Ş.Ş., ÇELİK, E., Membran biyoreaktör (MBR) prosesleri – genel değerlendirme. Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, 2009; 39-40.
- [8] CHU, L., LI, S., Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. Separation and Purification Technology, 2006; 51: 173–179.
- [9] FARIZOĞLU, B., KESKINLER, B., Sludge characteristics and effect of crossflow membrane filtration on membrane fouling in a jet loop membrane bioreactor (JLMBR). Journal of Membrane Science. 2006; 279: 578–587.
- [10] GONZALEZ, A. Z., SCHETRITTE, S., ALLIET, M., HAZA, U. J., ALBASI, C., Modelling of submerged membrane bioreactor: Conceptual study about link between activated sludge biokinetics, aeration and fouling process. Journal of Membrane Science, 2008; 325: 612–624.

- [11] DIALYNAS, E., DIAMADOPOULOS, E., Integration of a membrane bioreactor coupled with reverse osmosis for advanced treatment of municipal wastewater. *Desalination*. 2009; 238: 302-311.
- [12] ZHANG, H.M., XIAO, J.N., CHENG, Y.J., LIU, L.F., ZHANG, X.W., YANG, F.L., Comparison between a sequencing batch membrane bioreactor and conventional membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 2006; 41: 87-95.
- [13] WINTGENS, T., ROSEN, J., MELIN, T., BREPOLS, C., DRENSLA, K., ENGELHARDT, N., Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 2003; 216: 55 – 65.
- [14] XING, C. H., TARDIEU, E., QIAN, Y., WEN, X. H., Ultrafiltration membrane bioreactor for urban wastewater reclamation. *Journal of Membrane Science*, 2000; 177: 73-82.
- [15] BADANIA, Z., AIT-AMARA, H., SI-SALAH, A., BRIKC, M., FUCHSC, W., Treatment of textile waste water by membrane bioreactor and reuse. *Desalination*, 2005; 185: 411–417.
- [16] EREN, B., Yapay sinir ağları ile membran proses verimine etki eden parametrelerin analizi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2006.
- [17] ÖZKAN, Ü., Tekstil endüstrisi proses suyu hazırlanmasında membran proseslerin uygulanması. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [18] KALELİ, B., Atıksuların ileri arıtımında membran proseslerin kullanımının araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*; 2006.
- [19] MULDER, M., *Basic principles of membrane technology*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands 1992.
- [20] WISNIEWSKI, C., Membrane bioreactor for water reuse. *Desalination*, 2007; 203: 15-19.
- [21] RADJENOVIC, J., MATOSIC, M., MITAJOVIC, I., PETROVIC, M., BARCELO, D., Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology. *Env. Chem.* 2008; 37-101.
- [22] SUTTON, P.M., *Membrane bioreactors for industrial wastewater treatment: applicability and selection of optimal system configuration*. Water Environment Foundation, 2006.

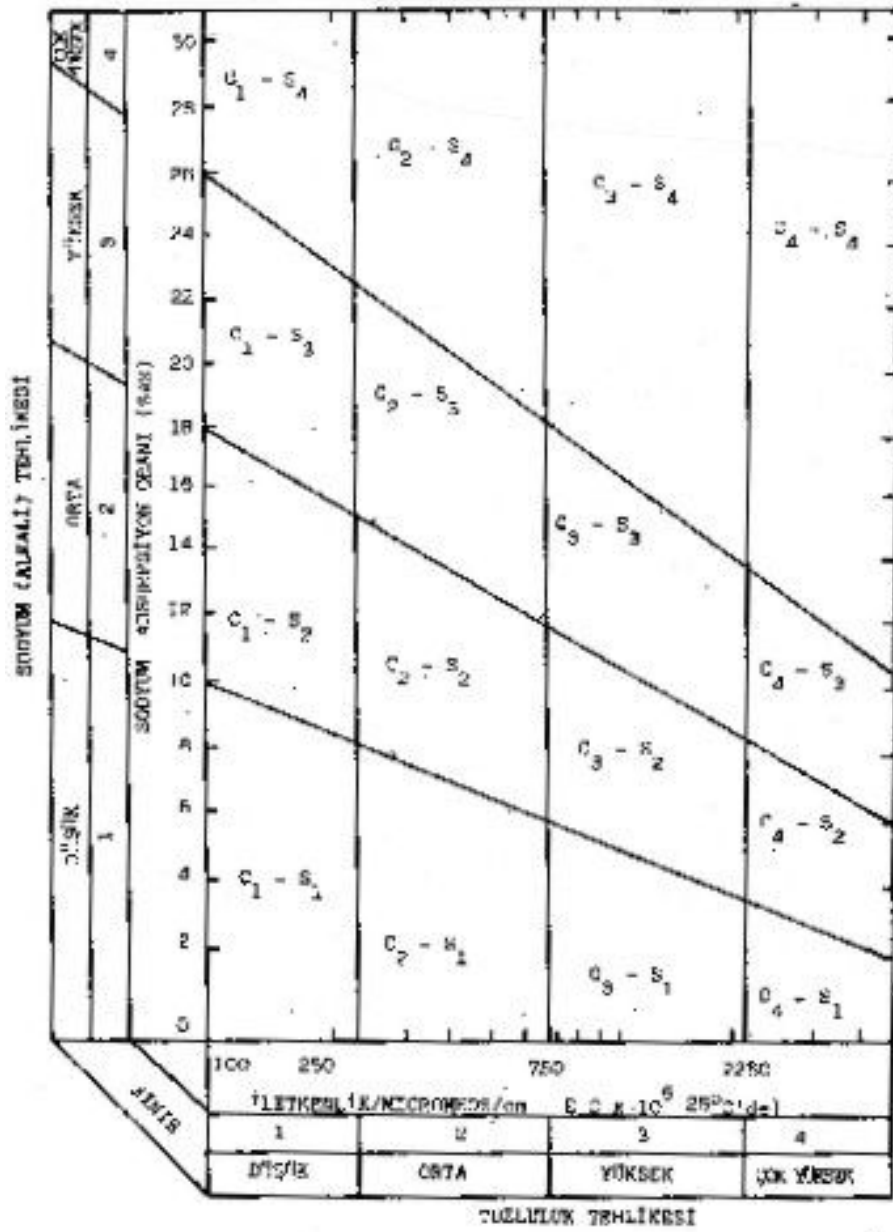
- [23] TEXIER, A.C., GOMEZ, J., Settleability and kinetics of a nitrifying sludge in a sequencing batch reactor. *Can. J. Microbiol*, 2004; 50: 943-949.
- [24] JAMRAH, A., AL-FUTAISI, A., AHMED, M., PRATHAPAR, S., AL-HARRASI, A., AL-ABRI, A., Biological treatment of greywater using sequencing batch reactor technology. *International Journal of Environmental Studies*, 2008; 65: No. 1, 71-85.
- [25] EPA, Wastewater Technology Fact Sheet, Package Plants, 1999, Washington, DC, USA.
- [26] SÖZER, Z.P., Ardışık kesikli reaktörlerde organik madde giderimi. GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [27] MANAV, N., Ardışık kesikli reaktör ile evsel atıksulardan azot ve fosfor giderimi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [28] ERTUĞRUL, T., Ardışık kesikli reaktörlerde (AKR) normal işletme koşullarındaki değişimler ve bunların arıtım verimine etkisi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2004.
- [29] SOUZA, S.M., ARAUJO, O.Q.F., COELHO, M.A.Z., Model-based optimization of a sequencing batch reactor for biological nitrogen removal. *Bioresource Technology* 2008; 99: 3213-3223.
- [30] İLERİ, R., DAMAR, Y., Simulation study on treatment efficiency for textile wastewater by full-scale sequencing batch reactor. *Journal of Nature Science and Sustainable Technology* 2009; Volume 1 Issue 1, 1-13.
- [31] TSANG Y.F., HUA F.L., CHUA H., SIN S.N., WANG Y.J., Optimization of biological treatment of paper mill effluent in a sequencing batch reactor, *Biochemical Engineering Journal* 2007; 34: 193-199.
- [32] DROSTE, R.L., Theory and practice of water and wastewater treatment. Wiley&Sons, New York, 1997.
- [33] TEICHGRABER, B., SCREFF, D., EKKERLEIN, C., WILDERER, P.A., Sequencing batch reactor technology in Germany-in overview. *Water Science and Technology*, 2001; 43: 323-330.
- [34] LIN, S.D., Water and wastewater calculations manuel, McGraw Hill, New York, USA, 2001.
- [35] LEE, C.C. LIN, S.D., Handbook of Environmental Engineering Calculations, McGraw Hill, Newyork, USA, 2000.
- [36] EPA, Wastewater technology fact sheet, package plants, Washington, DC, USA, 2000.

- [37] NOVAK, L., GORONZY, M.C., WANNER, J., Dynamic mathematical modelling of sequencing batch reactor with aerated and mixed filling period. *Water Science Technology* 1997; 35: 105-112.
- [38] KULAC, S., Kesikli biyolojik arıtma tesisinde optimum koşulların araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1997.
- [39] TCHOBANOGLIOUS, G., *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*, Metcalf&Eddy, Inc., New York. 1991.
- [40] IRVINE, R.L., KETCHUM, L.H., Sequencing batch reactors for biological wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Control*. 1988; 18: 255–294.
- [41] KÖSEOĞLU, G., Tekstil endüstrisi atıksularındaki renk sorununun ileri aktif çamurlu ardışık kesikli biyoreaktör ile giderilmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2004.
- [42] ÇETİN, E., YILMAZ, G., TEMIZSOY, A., Removal of nutrient from domestic wastewater by sequencing batch reactor, II. *Engineering Sciences Young Researchers Congress*, 2005.
- [43] DULKADİROĞLU, H., ORHON, D., Hareketli yataklı ardışık kesikli sistemlerde sıcaklığın nitrifikasyon hızı üzerine etkisi. *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 2005; Cilt:4, Sayı:2, 3-10.
- [44] GÜRSOY, F., Tekstil endüstrisi atıksularının ardışık kesikli reaktör ile arıtılması verimine etki eden parametrelerin simülasyonu. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [45] KOYUNCU, İ., , Membran teknolojisinin çevre mühendisliğinde kullanım potansiyeli ve ters osmoz ile amonyum iyonu giderimi. *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 1997.
- [46] ZEMAN, L.J., ZYDNEY, A.L., *Microfiltration and ultrafiltration principles and applications*. Marcel Dekker Inc., Newyork, USA, 1996.
- [47] KIM, S., HOEK, E.M.V., Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes. *Desalination* 2005; 186:111-128.
- [48] PAN, J.R., SU, Y.C., HUANG, C., LEE, H.C., Effect of sludge characteristics on membrane fouling in membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science* 2010; 349: 287–294.
- [49] LI, X.Y., WANG, X.M., Modelling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science* 2006; 278: 151–161.

- [50] WANG, Z., WU, Z., YIN, X., TIAN, L., Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: Membrane foulant and gel layer characterization. *Journal of Membrane Science* 2008; 325: 238–244.
- [51] YIĞİT, N.Ö., Membran biyoreaktörü ile (mbr) evsel atıksu arıtımı. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2007.
- [52] LIU, Y.J., SUN, D.D., Comparison of membrane fouling in dead-end microfiltration of denitrifying granular sludge suspension and its supernatant. *Journal of Membrane Science* 2010; 352: 100–106.
- [53] KÖSEOĞLU, H., HARMAN, B.İ., YIĞİT, N. Ö., Membran biyoreaktör (MBR) proseslerinde yeni tıkanma kontrolü stratejileri. Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, 2009, pp 45-46.
- [54] KOYUNCU, İ., Nanofiltrasyon membranları ile tuz gideriminde organik iyon etkisi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2001.
- [55] MICRODYN-NADIR, MD 015 TP 2N Tubular Membrane Module, User Guide, 2008.
- [56] Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği , 7 Ocak 1991.
- [57] BALMAN, A.H., BALMAN, V., Çevre kirliliği kontrolünde atıksu arıtımı. Atılım Ofset, 2002.
- [58] THARAVATHI, N.C., HOSETTI, B.B., Biodiversity of algae and protozoa in a natural waste stabilization pond:A field study, *Environ. Biol.*, 2003; 24(2): 193-9.
- [59] EIKELBOOM, D., H., Process Control of Activated Sludge Plants by Microscopic Investigation, IWA Publishing, UK, 2000.
- [60] GINORIS, Y.P., AMARAL, A.L., NICOLAU, A., COELHO, M.A.Z., FERREIRA, E. C., Development of an image analysis procedure for identifying protozoa and metazoa typical of activated sludge system. *Water Research*, 2007; 41: 2581-2589.

EKLER

Ek 1 Sulama sularının sınıflandırılmasında kullanılan diyagram



ÖZGEÇMİŞ

Duygu Topaloğlu, 1983 yılında Kocaeli’ de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kocaeli’de tamamladı. 1994 yılında girdiği Oruç Reis Anadolu Lisesi’nde orta ve lise öğretimini tamamlayarak 2001 yılında mezun oldu. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü’nden mezun olarak aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim dalında yüksek eğitime başladı. Yüksek lisans eğitimi süresince Su Kirlenmesi ve Kontrolü, İleri Arıtma Teknolojileri, Biyolojik Arıtma, Membran Biyoreaktörler, Ardışık Kesikli Biyoreaktörler, Su Kalitesi Yönetimi ve Entegre Havza Yönetimi konularında araştırma ve çalışmalar yapan Duygu Topaloğlu şunda 107G013 nolu “Sapanca Gölülü’nün Öncelikli Kirlilik Kaynaklarına Özgü Kontrol Teknolojilerinin Araştırılıp Geliştirilerek Göl Havzası İçin Uyarlanması” adlı TÜBİTAK Projesi’nde çalışmaktadır.