

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANAEROBİK MEMBRAN REAKTÖRLERDE AKIŞ HIZI VE SU SICAKLIĞININ
MEMBRAN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Makina Yük. Müh. Birkut GÜLER

ŞUBAT 2022
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANAEROBİK MEMBRAN REAKTÖRLERDE AKIŞ HIZI VE SU SICAKLIĞININ
MEMBRAN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Makine Yük. Müh. Birkut GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 01 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 02 / 2022

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Atık suların arıtılması, bir taraftan endüstriyel işletme tesisi ve yaşam ortamı kaynaklı atık su miktarının artması, diğer taraftan su kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Arıtma teknolojisinde kullanılan bakterilerin özelliklerine göre, aerobik (havalı) ve anaerobik (havasız) arıtma kademeleri olmak üzere iki aşamalı arıtma sistemi mevcuttur. Atık suyun kirlilik düzeyi havasız kademedeki belli bir değere, havalı kademedeki ise zararsız kabul edilen değerlere kadar düşürülmektedir. Havalı kademedeki bertaraf edilen kirlilik yüküyle doğru orantılı giderilen gram KOI başına 0,25 gram bakteri üremektedir. Sağlıklı bir arıtmanın gerçekleşmesi için bir miktar bakterinin günlük olarak sistemden uzaklaştırılması gerekir ve işlem, sistemden çamur çekilmesi yoluyla gerçekleşir. Ancak, sistemden çekilen çamurun bertaraf edilmesi işletmeler için sorun olmaktadır. Bu nedenle, havalı kademenin ortadan kaldırıldığı anaerobik membran sistemlerin önemi artmaktadır. Bu kapsamda anaerobik membran uygulamaların yüksek performansta olması istenir. Mevcut çalışmada, ileri osmoz prensibi ile çalışan bir membran sisteminde suyun besleme ve emiş taraflarındaki ortalama hızların ve sıcaklığın membran performansı üzerine etkileri incelenmiştir.

Doktora eğitimim süresince desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI'ya, kıymetli yardımlarından ötürü teşekkürlerimi sunarım. İlgili çalışmaların yürütülmesi süreçlerinde büyük katkılar sunarak akademik anlamda gelişmeye yardımlarını yadsıyamayacağım sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında ve her koşulda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşime ve çocuklarıma tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Birkut GÜLER
Trabzon, Ocak 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “ANAEROBİK MEMBRAN REAKTÖRLERDE AKIŞ HIZI VE SU SICAKLIğININ MEMBRAN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI’ nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdığımı, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/02/2022

Birkut GÜLER

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Konusu, Gerekçesi ve Amacı.....	2
1.3. Literatür Özeti.....	4
1.3.1. Geçirgen Yapılı Duvar Üzerinde Yapılan Akış Analizleri.....	5
1.3.2. Membranın İki Yüzeyi Arasındaki Sıcaklık Farkı Etkisinin İncelenmesi	10
1.3.3. Atık Su İçeriğinin Membran Performansına Etkisi	14
1.3.4. Farklı Kontrol Sistemlerinin Membran Performansına Etkileri	44
1.4. Anaerobik Membran Reaktörler.....	50
1.5. Membran Teknolojileri.....	52
1.6. Membran Sistemlerinin Atık su Arıtma Tesislerine Entegrasyonu.....	54
1.7. Geleneksel Arıtma Sistemleri.....	55
1.7.1. Aerobik Reaktörlerin İşletme Zorlukları.....	59
1.7.2. Geleneksel Atık Su Arıtma Tesislerinin İşletilmesi.....	59
1.8. Anaerobik Membran Biyoreaktörler.....	62
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	64
2.1. Sayısal Çalışmalar.....	66
2.1.1. İleri Osmoz Uygulamasında OpenFOAM’da Membran Modeli.....	66
2.1.2. İleri Osmoz Yaklaşımı ile Modelleme.....	67
2.1.3. Open Foam Uygulamalar.....	68
2.1.3.1. İleri Osmoz Membran Filtrasyonu.....	68
2.1.3.2. Zayıf Sıkıştırılabilir Akış Kavramı.....	69
2.1.3.3. Kabuller.....	69

2.1.3.4.Sınır Şartları.....	70
2.1.3.5.Membran Üzerinde Sınır Şartları (ExplicitFOMembraneVelocity).....	72
2.1.4. Basınç- Hız Çözümlemesi.....	74
2.1.5. Çözücü Kod.....	74
2.1.6. Başlatıcı Kod	75
2.1.7. 2-D Geometrik Model.....	76
2.1.8. Sınır Şartlarının Uygulanması	76
2.1.9. Sayısal Kodun Doğrulanması.....	76
2.2. Kodların Açıklanması.....	77
2.2.1. Sınır Şartları.....	77
2.2.2. Çözücü.....	77
2.2.3. Çözücünün Doğrulanması.....	78
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	79
3.1. Farklı Ortalama Giriş Hızlarının Etkisi; Besleme ve Emiş Hızlarının Eşit Olması Durumu.....	80
3.1.1. Ortalama Giriş Hızının 0,001 m/s Olması Durumu.....	80
3.1.2. Ortalama Giriş Hızının 0,01 m/s Olması Durumu.....	84
3.1.3. Ortalama Giriş Hızının 0,1 m/s Olması Durumu.....	87
3.1.4. Ortalama Giriş Hızının 1 m/s Olması Durumu.....	90
3.2. Farklı Ortalama Giriş Hızlarının Su Akısı Üzerine Etkisi; Besleme ve Emiş Hızlarının Eşit Olması Durumu.....	94
3.3. Farklı Ortalama Giriş Hızlarında Membran Üzerinde Eksene Dik Doğrultuda Oluşan Hız Profilleri	96
3.4. Farklı Ortalama Giriş Hızların Hız Profili Üzerine Etkisi; Besleme ve Emiş Hızlarının Farklı Olması Durumu	97
3.4.1. Emiş Hızının Besleme Hızının 3 Katı Olması Durumu.....	97
3.4.2. Besleme Hızının Emiş Hızının 3 Katı Olması Durumu.....	99
3.4.3. Farklı Besleme ve Emiş Hızlarının Su Akısı Üzerine Etkisi.....	101
3.4.4. Farklı Besleme ve Emiş Hızlarının Çözelti Kütle Kesri Üzerine Etkisi.....	101
3.5. Çözelti Kütle Kesrinin Su Akısı Üzerine Etkisi.....	104
3.6. Sıcaklığın Su Akısı Üzerine Etkisi.....	104
4. SONUÇLAR.....	109
5. ÖNERİLER	111
6. KAYNAKLAR	112
7. EKLER.....	122
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

ANAEROBİK MEMBRAN REAKTÖRLERDE AKIŞ HIZI VE SU SICAKLIĞININ MEMBRAN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Birkut GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI
2022, 138 Sayfa

Anaerobik membranbiyoreaktörler (anMBR) atık su arıtmada kullanılan uygulamalardır. Bu reaktörler biyolojik arıtmanın gerçekleştiği tam karışımli bir anaerobik reaktör ve bir ultrafiltrasyon (UF) membranından oluşur. Gözenekli yapıda olan bu membranlar plaka veya boru şeklindedirler ve atık su filtreleme aracı olarak işlev görürler. anMBR uygulamasında yaşanan en önemli sorunlardan biri, membran gözeneklerinden yeterli miktarda su geçişinin olmaması; yani su debisindeki azalmadır. Azalan akış hızı, işlemin kesintiye uğramasına ve arıtma kalitesinin düşmesine neden olabilmektedir.

Mevcut çalışmada, düz plaka şeklindeki membrandaakış hızlarınınmembrandaki su akısı ve çözelti birikimi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla açık kaynak kodlu bir CFD analiz programı olan OpenFOAM yazılımı kullanılmıştır. Analizde, ileri osmoz (FO) olarak bilinen, membranın besleme ve emiş tarafları arasındaki kimyasal potansiyelin neden olduğu itme kuvvetine dayanan yaklaşımdan yararlanılmıştır. Ortalama giriş hızlarının membran performansı üzerine etkileri, emiş ve besleme tarafında hem eşit hem de farklı olması durumları için, hız dağılımı, su akısı ve membranda çözelti birikimi cinsinden gösterilmiştir. Ayrıca, emiş tarafı ile besleme taraflarının birbirleri ile ısı dengede olması durumunda sıcaklığın su akısı üzerine etkisi incelenmiştir.

Sayısal sonuçlar, ortalama giriş hızlarının membran performansı üzerinde etkili bir parametre olduğunu göstermektedir. Artan ortalama giriş hızı ile su akısı arasındaki oransal ilişkinin, ortalama hızın 0,1 m/s değerinden sonra önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Ortalama hızın bu değerinden sonra su akısının ortalama hıza oranı öncesine göre yaklaşık 10 kat azalmaktadır. Ortalama giriş hızlarının farklı olması durumunda yüksek emiş giriş hızının su akısında artışa neden olduğu görülmüştür. Son olarak, fiziksel özelliklerin değişmesi nedeniyle sıcaklıkla birlikte arıtma performansının düştüğü görülmüş, uygulamada halen geçerli olan 35 °C' nin en uygun arıtma sıcaklığı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik membran biyoreaktör, İleri osmoz, Ortalama hız etkisi

Doctoral Thesis

SUMMARY

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FLOW RATE AND WATER TEMPERATURE ON MEMBRANE PERFORMANCE IN ANAEROBIC MEMBRANE REACTORS

Birkut GÜLER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI
2022, 138 Pages

Anaerobic membrane bioreactors (anMBR) are the applications that used in wastewater treatment. These reactors consist of a fully mix anaerobic reactor where biological treatment occurs and an ultrafiltration (UF) membrane. These porous membranes are in the form of plates or pipes and act as water filtering instrument. One of the important difficulties in anMBR application is the insufficient amount of water passing through the membrane; so that is the decrement in water flow rate. The decreased flow rate may cause the process interruption and results in poor treatment quality.

In the present study, the effect of flow velocities on the water flux and on the solute deposits in the flat-plate membrane was numerically investigated. For this purpose, an open source CFD analysis program, the OpenFOAM software, was used. The analysis utilized the approach known as forward osmosis (FO), which relies on the repulsive force caused by the chemical potential between the feed and draw sides of the membrane. Effect of mean inlet velocities both for equal and different feed and draw side velocity values on the membrane performance were presented in terms of velocity distribution, water flux, and solute deposits on the membrane. In addition, for the case of thermal equilibrium between feed and drive side, effect of temperature on water flux was examined.

Numerical findings indicate that the mean inlet velocities are the effective parameters for the membrane performance. It was observed that the proportional relationship between the increasing mean inlet velocity and the water flux changed significantly after the mean velocity of 0.1 m/s. After this mean velocity, the ratio of water flux to mean velocity decreased approximately 10 times compared to before. As the inlet velocities prescribed in different manner it was observed that high draw inlet velocity causes to increase the water flux. Finally, it was observed that the treatment performance decreased with temperature due to the change in physical properties, and it was concluded that 35 °C, which is still valid in practice, is the most appropriate treatment temperature.

Key Words: Anaerobic membrane bioreactor, Forward osmosis, Mean velocity effect

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Havasız reaktörün şematik gösterimi	51
Şekil 2. Membranın yapısal gösterimi	54
Şekil 3. Klasik bir arıtma tesisinin şematik görünümü.....	56
Şekil 4. Anaerobik reaktörün içyapısının şematik gösterimi	56
Şekil 5. Anaerobik reaktörde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar	57
Şekil 6. Anaerobik bakterilerin sıcaklık ve performans ilişkisi	58
Şekil 7. Geleneksel atık su arıtma tesisi için örnek proses akış şeması	60
Şekil 8. Geleneksel atık su arıtma tesisi örnek proses akış şeması (devam)	60
Şekil 9. Membran uygulamasının geleneksel arıtma sistemindeki konumu.....	63
Şekil 10. İleri osmoz membran sistemi	64
Şekil 11. Ters osmoz membran sistemi	65
Şekil 12. İleri osmoz sisteminin şematik gösterimi.....	66
Şekil 13. Akı vektör yönlerinin gösterimi	68
Şekil 14. Sınır şartlarının gösterilmesi	70
Şekil 15. Çalışmada kullanılan geometrinin şematik gösterimi.....	75
Şekil 16. Çözüm Bölgesi Şematik Gösterimi	76
Şekil 17. Kodların kütle kesri cinsinden doğrulanması	77
Şekil 18. Kodların doğrulanması (Farklı giriş hızlarında su akı).....	78
Şekil 19. Ortalama giriş hızı 0,001 m/s için hız profilleri;	82
Şekil 20. Ortalama giriş hızı 0,001 m/s için eksenel hız genliği dağılımı	83
Şekil 21. Çözelti kütle kesrinin membran boyunca değişimi	84
Şekil 22. Ortalama giriş hızı 0,01 m/s için hız profilleri;	85
Şekil 23. Ortalama giriş hızı 0,01 m/s için eksenel eş hız eğrileri	86
Şekil 24. Çözelti kütle kesrinin membran yüzeyinde dağılımı	87
Şekil 25. Ortalama giriş hızı 0,1 m/s için hız profilleri	88
Şekil 26. Ortalama giriş hızı 0,1 m/s için eksenel eş hız eğrileri	89
Şekil 27. Çözelti kütle kesrinin membran yüzeyinde dağılımı	90
Şekil 28. Ortalama giriş hızı 1 m/s için hız profilleri.....	92
Şekil 29. Ortalama giriş hızı 1 m/s için eksenel eş hız eğrileri.....	93
Şekil 30. Çözelti kütle kesrinin membran yüzeyinde dağılımı	94
Şekil 31. Ortalama giriş hızının su akısı üzerine etkisi	95
Şekil 32. Farklı Ortalama Giriş Hızlarında Membran Üzerinde Oluşan Eksenel Hızlar	96
Şekil 33. Emiş hızının besleme hızının 3 katı olması durumunda oluşan hız profilleri.....	98

Şekil 34. Besleme hızının emiş hızının 3 katı olması durumunda oluşan hız profilleri....	100
Şekil 35. Emiş ve besleme hızlarının farklı olması durumunun su akısı üzerine etkisi	101
Şekil 36. Farklı emiş ve besleme hızlarının çözelti kütle kesri üzerine etkisi	103
Şekil 37. Çözelti kütle kesrinin değişimiyle su akısının değişimi	104
Şekil 38. Akış alanı içinde sıcaklık gelişimi.....	107
Şekil 39. Su akısının sıcaklıkla değişimi	108



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Geçirgen yapılı duvar üzerinde akış analizlerinin incelendiği çalışmalar.....	5
Tablo 2.	Sıcaklık farkının membran performansı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar.....	10
Tablo 3.	Atık su içeriğinin membran performansı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar.....	15
Tablo 4.	Farklı kontrol sistemlerinin membran performansı üzerine etkilerinin incelendiği.....	44
Tablo 5.	Farklı sıcaklıklarda suyun fiziksel özellikleri.....	105

SEMBOLLER DİZİNİ

Kısaltmalar

anMBR	Anaerobik membran
KOI	Kimyasal oksijen ihtiyacı
AKM	Askıda katı madde
MBR	Membran
UF	Ultra filtrasyon
MF	Mikro filtrasyon
NF	Nano filtrasyon
RO	Ters osmoz
TOK	Toplam organik karbon
MLSS	Karışık askıda katı madde
UASB	Yukarı akışlı reaktör
LCFA	Uzun zincirli yağ asitleri
EPS	Hücre dışı polimerik maddeler
F/M	Gıda/Mikroorganizma
SanMBR	Batık anaerobik membran
TrOC	Organik kirletici maddeler
FeCl ₃	Demir üç klorür
LMH	Litre metrekare saat
LPM	Dakikadaki litre miktarı
MS-2	Gösterge virüsü
TL	Çift katman
PCM _s	Polisiklik miskler
anBMBR	Aktif karbon ilaveli anaerobik membran
NaClO	Sodyum Hipoklorit
HRT	Hidrolik bekletme süresi
SMA	Spesifik Metanojenik Aktiviteler
T4	Bakteri tipi
HRAS+AD	Anaerobik çürütme ile yüksek oranlı aktif çamur
CAS+AD	Anaerobik çürütme ile geleneksel aktif çamur
AeMBR+AD	Anaerobik çürütme ile aerobik reaktör
FO	İleri Osmoz

TO	İzlenebilir organikler
EGSB	Genişletilmiş granüler çamur yatağı
CFD	Hesaplmalı akışkanlar dinamiğı
MFC	Mikrobiyal yakıt hücresi
MEC	Mikrobiyal elektro-kimyasal hücreler
ARB	Antibiyotiğıe dirençli bakteriler
CSTR	Tam karışımli membran reaktör
GlAnMBR	Gaz karışımli membran reaktör
AM2b	Geliştirilen model
BOI	Biyolojik oksijen ihtiyacı
SMP	Çözölebilen mikrobiyal elementler
PCR SSCP	Analiz metodu
OLR	Organik yükleme oranı
KOI/NO	Kimyasal oksijen ihtiyacı/ Azot oranı
RS-MCPP	Mecoprop etkisi
USanMBR	Ultrasonik anaerobik membran reaktör
gVS/Ld	Organik yükleme oranı
atMBR	Eklenerek büyöülmüş membran reaktör
PEI	Politermit malzeme
SRT	Çamur bekletme süresi
KSanMBR	Kubuta'nın batık anaerobik membran reaktörü
G	Geri çevirme
IFB	Ters akışkan yatak reaktör

Semboller

A	Arıtılmış su geçirgenlik değeri	m/Pa.s
B	Çözelti geçirgenlik değeri	m/s
c	Çözelti konsantrasyon	kg/m ³
D	Difüzyon katsayısı	
D _{AB}	Çözelti difüzyon katsayısı	m ² /s
g	Yerçekimi ivmesi	m/s ²
t	Zaman	s
J _s	Çözelti akısı	kg/m ² s
J _w	Su akısı	kg/m ² h

K	Difüzyon direnci	s/m
m_A	Çözelti kütle kesri	kg/kg
n	Yüzey normal vektörü	
p	Basınç	Pa
Re	Reynolds sayısı	
U	Hız	m/s
$\bar{U}$	Ortalama çapraz akış hızı	m/s
T	Sıcaklık	K
k	Isı iletim katsayısı	W/mK
c	Özgül ısı	J/gK

Alt indisler

i	Aktif katman ve destek arasındaki arayüz
m	Membran yüzeyi
d	Membran emiş tarafı
f	Membran besleme tarafı
D	Vektör yönü membranın emiş tarafı
eff	Efektif

Grek semboller

ρ	Akışkan yoğunluğu	kg/m ³
μ	Viskozite	Pa.s
π	Osmotik basınç	Pa
ϕ	Osmotik basınç ile çözelti konsantrasyonu arasındaki orantı	

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde su kaynaklarının hızla tükenmesi, insanları su kullanımında dikkatli olmaya yöneltmektedir. Su kaynaklarının dikkatli kullanılmasının yanısıra, kaynakların kirletilmemesi de önem taşımaktadır. Bazı işletmeler ve belediyeler atık sularını alıcı ortama belirli kurallar dâhilinde deşarj yapabilmektedir. Ancak, atık su arıtma maliyetinin yüksek olması ve tesis işletme zorlukları, işletmeleri bu konuda isteksiz olmaya yöneltmektedir. Bu nedenle, hem verimli hem de etkin atık su arıtma yöntemlerinin araştırılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

Atık su arıtma tesislerinde alışılmış süreç, ilk olarak istenmeyen yabancı malzemelerin alınması ile başlamaktadır. Sürecin devamında, işlenecek atık su bir ön çöktürme havuzundan geçirilmekte, dengeleme havuzunda bekletilmekte, kimyasal arıtma ve biyolojik arıtmaya tabii tutulmaktadır. Ön çöktürme havuzunda tutulan askıda katı maddeler herhangi bir arıtıma tabi olmadan atık olarak çamur içinde yerini alabilmektedir. Çok kirli sular ise öncelikle anaerobik yani havasız arıtma tesislerinde arıtılarak kirlilik yükü düşük seviyelere indirilmektedir. İlave arıtma ihtiyacı olması durumunda anaerobik arıtmadan çıkan sular stabilizasyon havuzlarında yada ilave edilecek bir aerobik arıtma tesisinde arıtılmaktadır (Carlos, 2007). Günümüzde alıcı ortama deşarj şartlarında istenilen KOI (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) değerleri Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğinde belirlenmiştir. Bu yönetmelikte istenilen değerlerin altına düşebilmek için aerobik arıtma zorunlu olmaktadır.

Atık su arıtma tesisi işletmeciliğinde çıkış değerlerini bozmamanın ve her zaman alıcı ortama deşarj edilebilecek nitelikte arıtım yapabilmenin en temel şartı aerobik arıtmayı etkin bir şekilde yapabilmektir. Etkin bir aerobik arıtma yönetimi ise sistemden düzenli çamur çekmekle olmaktadır. Bu da, çamur yaşının belirli düzeyde tutulmasına yardımcı olmaktadır. Çamur yaşı, bakterilerin havalandırma havuzlarında geçirdikleri ortalama süredir (Joseph, 2019). Ortalama olarak 3.000 metreküp ve 6.000 mg/l kirlilik içeren suyu arıtan bir tesiste günde yaklaşık 10 ton civarında atık çamur oluşmaktadır. Bu çamurun, susuzlaştırma metoduna bağlı olarak % 25 kurulukta olduğu tahmin edilmektedir. Tesislerden çıkan çamurların yönetilmesi ve bertaraf edilmesi zorunluluğundan dolayı atık çamur, ilave susuzlaştırma, çürütme vb. operasyonlara tabi tutulmaktadır. Bütün operasyonların her birinin yatırım ve

işletme maliyetleri oluşturmaları nedeniyle işletmeler açısından önemli bir problem oluşturmaktadır. Anaerobik havuzların çıkışlarına konulacak membranla aerobik aşama atlanarak, hem istenilen çıkış suyu değerlerine inilebilecek hem de işletmeler için sorun oluşturan çamur bertaraf zorunluluğu ortadan kalkmış olacaktır.

Atık su arıtma tesislerinde son yıllarda gelişmekte olan membran uygulamaları ilk olarak düşük kirlilik yüküne sahip biyolojik arıtmanın gerçekleştiği havalandırma havuzlarında kullanılmakta iken son yıllarda yaygın olarak anaerobik arıtmada da kullanılmaya başlanmıştır. Anaerobik arıtmada membran kullanımıyla beraber istenilen kirlilik yüklerine düşülebilmekte ve anaerobik bakterinin reaktör içinde hızlı bir şekilde büyümesi mümkün olabilmektedir.

1.2. Tezin Konusu, Gerekçesi ve Amacı

Havasız biyolojik membran reaktörleri (anMBR) iki ana elemandan oluşur. Bunlardan ilki, biyolojik arıtmanın gerçekleştiği tam karışimli havasız reaktördür. Bu reaktörde mekanik karıştırma ile atıksuyun toz yapıdaki havasız çamurla teması sağlanmaktadır. Böylece, atık sudaki organik maddeler büyük ölçüde biyogaza dönüştürülmektedir. Havasız reaktörden sonra gelen ikinci bölümdeki membran (MBR) kademesinde, özel ultrafiltrasyon (UF)'den geçen atık su süzülerek reaktörden uzaklaştırılmaktadır. Membranlardan geçemeyen havasız mikroorganizmalar tekrar havasız reaktöre geri döndürülerek reaktörde tutabilme oranı arttırılmaktadır. Bu uygulama ile atık sudaki kirliliğin en önemli göstergesi olan KOI parametresinde % 95'e varan giderim sağlanabilir. Söz konusu membranların üzerine zamanla mikroorganizma filmi ve kirleticiler birikir, giderek membranın performansı düşer. Membranın işlevini sürdürülebilmesi için biriken mikroorganizma filminin membran yüzeyinden uzaklaştırılması gerekir. Filmin uzaklaştırılması işlemi, reaktörde oluşan biyogazın alttan verilerek yaratılan türbülansın etkisi ile sağlanabilmektedir. Ayrıca, belli aralıklarla kimyasal madde ilaveli ters yıkama da yapılabilmektedir.

Endüstriyel atık suyunda bulunan yağ ve benzeri maddelerin süreçteki diğer biyolojik yöntemlerin verimli çalıştırılabilmesi için ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli kimyasallar kullanılarak gerçekleştirilen yüzdürme ya da çöktürme gibi ön arıtma işlemleri yapılmaktadır. Bu işlemler sonucunda önemli oranda çamur oluşmaktadır. anMBR uygulamalarında benzerlerinden farklı olarak, atık sular ön arıtma yapılmadan doğrudan anaerobik reaktöre verilerek tüm yağ ve benzeri maddelerin biyogaza dönüşümü sağlanabilmektedir. Anaerobik reaktör sistemlerinin önemli sorunlarından biri de, henüz granül

yapıya ulaşmamış kumsu yapıdaki bakterilerin su ile beraber sistemden kaçmasıdır. anMBR uygulamasında ise bakterilerin membranda tutularak reaktöre geri döndürülmesi sağlanabilmektedir. Böylece, arıtma sürecindeki süreksizlik önlenerek arıtma kalitesi artmaktadır.

Anaerobik membran uygulamalarındaki en büyük zorluk membranda istenilen atık su arıtma debilerine ulaşamaması ve çalışma esnasında oluşan debi düşüşleridir. Belirli periyotlar sonunda debilerde ani düşüşler oluşmakta ve buna bağlı olarak arıtma sürekliliği ve kalitesi kesintiye uğramaktadır. Alıcı ortama deşarj yapan işletmelerde veya yerel yönetimlerde arıtma tesisinin sürekli ve güvenilir bir şekilde yürütülmesi, çevre duyarlılığı ve sürdürülebilir bir yaşam açısından önemli unsurlardır. anMBR uygulamalarında bazı kimyasallar ilave edilerek veya belirli periyotlarla geri yıkama yaparak tıkanmanın önüne geçilmeye çalışılmaktadır ancak, bu uygulamalar hem maliyeti artırmakta hem de süreci kesintiye uğratmaktadır.

Uygulamada farklı membran tipleri olmakla birlikte, en yaygın olarak kullanılan membran tipleri reaktörün içine daldırılmış düz plaka şeklinde membran ve boru şeklinde membrandır. Şekilleri ve yapıları farklı olsa da membranlar geçirgenlik mekanizması ve benzeri bakımdan birbirlerine benzerdirler. Plaka şeklindeki bir membran, makine mühendisliği disiplini olarak ele alındığında geçirgen yapıdaki plaka akışı olarak düşünülebilmektedir. Membran, geçirgen yapıdaki bir plaka olarak düşünüldüğünde incelenecek olan problem bir akış, kütle ve ısı transferi problemidir.

Literatürde konusu membranla ilgili olan hidrodinamik çalışmalarda esas itibarıyla geçirgen duvarda akış problemi incelenmektedir. Emiş ve besleme tarafı hidrodinamik açıdan sadece sınır koşulu olarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada emiş ve besleme tarafı akış problemi çözülmüştür.

Anaerobik membran uygulamasının gelişmesinde ve yaygınlaşmasında en önemli sorunlar, membran üzerinden geçen arıtılmış su debisinin zamanla azalması ve arıtma sürecinin kesintiye uğramasıdır. Bu tez çalışmasında, membranın ayırdığı besleme ve emiş tarafı ortalama akış hızlarının membran üzerinde birikme ve membrandan geçen su akısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Literatürde membranın iki tarafında (besleme ve emiş) oluşturulan sıcaklık farklarının kütle transferini artırdığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Ancak ileri osmoz anaerobik membran uygulamalarında belirli bir çalışma süresi sonunda membranın iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı kalmayacaktır. Bu nedenle çalışma kapsamında ayrıca, membranın besleme ile

emiş tarafının farklı denge sıcaklıklarındaki suyun fiziksel özelliklerinin membrandan geçen su akısı etkisi de incelenecektir.

1.3. Literatür Özeti

Atık su arıtmada kullanılan arıtma teknolojisi son yıllarda membran ve reaktör teknolojisinin hibrid bir şekilde kullanılması ile birlikte gelişme göstermiştir. İlk zamanlarda havalı arıtmaya entegre olarak MBR sistemi kullanılmakta iken, son yıllarda havasız arıtmaya membran entegrasyonun yapılmasıyla anMBR sisteminin kullanılması yaygınlaşmıştır. Yapılan çalışmalar, atık su içeriğinin ve kimyasal ilavelerinin filtreleme performansını nasıl etkilediği üzerine yoğunlaşmıştır.

Konu hakkında yapılan kapsamlı literatür araştırması, incelenen temel değişkenlere bağlı olarak dört ana başlık altında sunulmaktadır. Bunlardan ilki, membranın geçirgen yapılı duvar olarak ele alındığı akış analizleridir. İkincisi, membranın her iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı bulunmasının kütle transferini nasıl etkilediğini gösteren çalışmalardır. Üçüncüsü, atık su arıtma içerisine yapılan kimyasal madde eklemelerinin veya bulunduğu sektöre göre atık su içeriğindeki değişimin membran performansını nasıl etkilediğini gösteren çalışmalardır. Son olarak ise membran üzerinde kirliliği ve tıkanmayı önlemek amacıyla anMBR üzerine ilave ekipmanlar yerleştirilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ya mevcut durumlar ortaya koyularak durum tespiti yapılmış ya da işletmeye ilave maliyet yükü getirecek önerilerde bulunulmuştur. Laboratuvar ortamında yapılan mevcut çalışmaların sahaya uygulamaları maliyet açısından zor görünmektedir. Kaynaklar bölümünde ayrıntılı şekilde ifade edilen ilgili yayınlara ve dergilere dikkat edilirse, anaerobik arıtma uygulamalarıyla beraber boru içindeki akış uygulamalarına yönelik çalışmalara da yer verildiği ve bu çerçevede incelemelerin yapıldığı dikkat çekmektedir. Geçirgen bir duvar üzerinde ısı transferi ve akışkanlar mekaniği problemlerini ele alan dergilerde bu kapsamda incelemeleri içeren yayınlar bulmak mümkündür. Akışın giriş ve çıkış sınır şartlarında tanımlandığı geçirgen yapılı duvar uygulamaları ile ilgili farklı çalışmalar bulunmakla birlikte bu çalışmalar, anaerobik membran uygulamaları açısından bariz yararlılık sağlayacak nitelikte görülmemektedir. İlgili çalışmalar, akışı ve ilişkili süreçleri karakterize eden fiziksel özellikler üzerinden yürütülmekte ve genel yargılar barındırmaktadır. Anaerobik membran uygulamaları konusunda yapılan çalışmalarda ise su içeriğinde meydana gelen değişimlerin arıtma performansı üzerine etkileri incelenmektedir.

1.3.1. Geçirgen Yapılı Duvar Üzerinde Yapılan Akış Analizleri

Makine mühendisliği açısından, ele alınan bir membran üzerinden akış söz konusu olduğunda bu durum geçirgen yapılı duvar olarak tanımlanmaktadır. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar geçirgen yapılı borudaki veya plakalar arasındaki akış problemi olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda daha çok geçirgen yapı içersindeki akış karakteristikleri ve fiziksel özelliklerin değişimine odaklanılmış olup membranın maruz kaldığı besleme ve emiş tarafı akış problemiyle doğrudan ilgilenilmemektedir. Bu kapsamdaki çalışmaların bir özeti Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Geçirgen yapılı duvar üzerinde akış analizlerinin incelendiği çalışmalar

Yazar	Den. (D) Say. (S)	Konu	İncelenen değişkenler	Sonuçlar
Belfort ve Nagata (1985)	S	Akış analizi	Reynold Sayısı	Borulardaki akışta sürtünme katsayısının emiş halinde daha yüksek olduğu; geçirgen yapılı borudaki akışta emiş halinde türbülans başlangıcının Reynolds sayısının 2100’den yaklaşık 4000 değerine çıktığı ortaya koyulmuştur.
Chellam (1995)	S	Partikül ve hidrodinamik analiz	Hız terimleri Sürtünme, Basınç gradyanı	Tek fazlı sıkıştırılmaz kanal akışında, geçirgen tabaka sınır şartlarıyla yatay ve dikey hız terimleri, basınç gradyanı ve sürtünme ifadeleri için benzeşim çözümü yapılmıştır. Çalışmada membranlarda akışın teorik tanımlaması yapılmış, membran üzerindeki partikül boyutunun ve geometrinin etkisi incelenmiştir.

Tablo 1'in devamı

Mondor ve Moresoli. (2000)	D	Basınç düşüşüne bağlı modelleme	Basınç düşümü	Yüzey gerilimi uyarılı, hidrodinamik difüzyon mantığını temel alan ve basınç düşüşüne bağlı olarak eksenel hızdaki düşüşü de içeren çapraz akışlı mikro filtrasyon modülü üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada hem literatürde yer alan önceki çalışmalarla hem de deneysel verilerle karşılaştırmalar ortaya konulmuştur.
Pharoah (2002)	S	Akış analizi	Farklı geometriler	Merkezkaç kuvvetiyle ayırma işlemi yapan yeni bir uygulamanın hangi tip geometride en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.
Tarabara ve Wiesner (2002)	S	Akış analizi	Yüzey gerilimi, Ortalama giriş hızı,	Küçük ölçekli bir membran prosesinin matematik modelini sayısal olarak geliştirmişlerdir. Çalışmada akışın kenarlar dışında laminar olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda yüzey gerilimiyle ortalama giriş hızı arasındaki ilişki verilmiştir.
Kim ve Zydney (2005)	S	Akış analizi	Parçacık etkileşimi, kritik filtreleme hızı	Gözardı edilmiş olan parçacıkların birbiriyle olan etkileşimini göz önüne alarak hidrodinamik olarak sürüklenen parçacıkların birbirlerine elektrostatik olarak geri tepme miktarları hesaplanmıştır. Sürüklenme hızı sonucu gerçekleşen elektrostatik tepme nedeniyle oluşan etkinin yenilebildiği ve aynı zamanda elektrostatik etkileşim nedeniyle parçacıkların kanalın merkezinde simetrik olarak yer aldığı gösterilmiştir. Parçacıkların etkileşimini yenilemek için kritik bir filtreleme hızına ihtiyaç duyulduğu ortaya koyulmuştur.

Tablo 1'in devamı

Moussy ve Snider (2008)	S	Akış analizi	Kanal içine koyulan engeller	Geçirgen yapılı boruda iki boyutlu ve kararlı durumda laminar akışı tanımlayabilmek için farklı Reynolds sayılarında Navier-Stokes denklemlerini çözmüşlerdir. Çalışmada hız ve basınç dağılımlarının davranışı, kanal içine engeller olması durumunda ortaya koyulmuştur
Cogan ve Chellam (2009)	D/S	Akış analizi	Mikroorganizmaların konumu ve adhezyon kuvveti	Hem diferansiyel hücre elemanları hem de bakteri etkileşiminin kirlenmeye olan etkileri belirtilmiştir. Mikroorganizmanın konumsal yapısının da mikroorganizmanın adhezyon yapısından dolayı kirliliğe neden olduğu gösterilmiştir. Bakteri adhezyonunun akışkan dinamiğine göre kirlenme üzerinde daha az etkili olduğu ortaya koyulmuştur.
Mahdavi Far vd. (2013)	S	Akış analizi	Kanal içine koyulan engeller	Araya engel koyulan iki plaka arasında akışı plakalar arasına koyulan engeli kanalın farklı noktalarına konumlandırılarak ve farklı Reynolds sayıları (300-500-800) kullanılarak analizler yapılmıştır. Kanalın tam ortasına, kanala daha yakın ve duvara sıfır olarak konumlandırılan engel durumları incelenmiş ve engelin kanalın tam ortasına yerleştirilmesi durumunda basınç kaybının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1'in devamı

Agasanapura vd. (2013)	S	Akış analizi	Kirleticilerin geometrik yapısı	Membran gözeneklerine yerleşen parçacıkların şeklinin, membranın geçirgenlik oranı üzerine etkilerini incelenmiştir. Daha önce yapılmış olan silindirik kanala koyulmuş küresel biçimli parçacıkların geçirgenlik oranı üzerine etkileri derlenerek, kapsul şeklinde parçacığın etkilerini ortaya koymuşlardır. Çalışma sonunda, kanal ile parçacık arasındaki hidrodinamik etkinin geçirmezlik katsayısının küçük parçalar üzerinde etkisinin çok fazla olduğu ortaya koyulmuştur.
Mojab vd. (2013)	S	Akış analizi	Engelli kanalda akış	Engelli kanalda akış özelliklerini ortaya koymak için hem deneysel hem de teorik çalışma yapmışlardır. Çalışmada spiral sarımlı membran modül kullanılarak, direkt numerik çözüm ve bir hücre içinde hız ölçümü yapılmıştır. Sonuçta akışın engel etrafında döndüğü, dönmenin ise Reynold sayısıyla beraber arttığı ortaya koyulmuştur.
Bernales ve Haldenwang (2013)	S	Akış analizi	Girişteki hız ve basıncın etkisi	Geçirgen bir boruda laminar akış analizi kullanarak basınç analizi yapılmıştır. Geçirgen yapıdaki borunun uygulamada karşılığının geçirgen yapıli membran olduğunu belirterek borunun içindeki iç basıncın, vizkoz basınç düşüşü ve eksenel hızdaki düşüşten dolayı gerçekleşen basınç artışı nedeniyle değiştiğinden bahsedilmiştir. Çalışmada aynı zamanda geçişteki Reynolds sayısının kritik değeriyle beraber basınç ve eksenel hız gibi hidrodinamik özelliklerin değiştiği vurgulanmıştır.

Tablo 1'in devamı

Chueh vd. (2013)	S	Geçirgen yapının geometrik analizi	Delik yapısının geçirgenliğe etkisi	Çalışmada dışa bombeli ve oyuk şeklinde geçirgen yapıların ısı iletkenlikleri araştırılmıştır. Farklı geometriler üzerine denemeler yapılarak, önceki çalışmaları da göz önünde bulundurarak, farklı geçirgenlik oranlarında değişen iletkenlik değerleri ortaya koyulmuştur. Çalışmanın sonunda bombeli yapıdaki geçirgenlik oranının daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.
Kim vd. (2014)	D	Dönen membran uygulaması	Membran akış hızının geçirgenliğe etkisi	Sünger ilaveli anaerobik membranda kirlenmenin önüne geçmek için rotary disk kullanımı denenmiştir. Çalışmada dönen disk şeklinde bir membran kullanılmış ve sünger ve membran yüzeyi arasındaki çarpışmanın etkili olmasını sağlayarak geçirgenliği arttırmak hedeflenmiştir. Diskin dönüş hızı ve membran geçirgenliği arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışma sonunda sentetik atık su ile yapılan araştırmalarda döner membran uygulamasıyla olumlu sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir.
Fimbres-Weihs ve Wiley (2010)	S	Akış analizi	Membranın geometrik yapısı	CFD teknolojisinin membran sistemlerine uygulanmasıyla başlangıçta 2-D devamında da 3-D membran akış analizleri yapılarak ve membranın geometrik yapısı üzerine odaklanılarak kütle transfer mekanizmasının daha iyi anlaşılabilirdiğinden bahsedilmiştir. Sonuç olarak membran geometrisinin üzerine CFD ile çalışmalar yapılabileceği ortaya koyulmuştur.

1.3.2. Membranın İki Yüzeyi Arasındaki Sıcaklık Farkı Etkisinin İncelenmesi

Atık su arıtma teknolojisinde kullanılan mevcut havasız reaktörlerde, arıtma performansının artan atık su sıcaklığıyla beraber arttığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Aynı şekilde membranın ya da geçirgen yapıdaki duvarın ayırdığı her iki yüzey arasında meydana gelen sıcaklık farkının da kütle transferini artırdığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Literatürdeki çalışmalarda anMBR reaktörlerde artan atık su sıcaklığıyla bakteri verimliliği artmakta ve böylece membran performansının iyileştiği görülmüştür. Performanstaki bu iyileşmenin hangi mekanizmalardan kaynaklandığı ilgili yayınlarda tam olarak netlik kazanmamıştır. Bu durumda, sıcaklık artışıyla bakteri performansının iyileştiği düşüncesine dayanarak sıcaklığı da membran performansı üzerinde etkili bir parametre olarak değerlendirmek uygun olacaktır. Sıcaklık etkisinin incelendiği çalışmaların bir özeti Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Sıcaklık farkının membran performansı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar

Yazar	Den. (D) Say. (S)	Konu	İncelenen değişkenler	Sonuçlar
Ugrozov ve Kataeva (2004)	D	Membran Performansı	Pompalama gücü	Sıvı boşluklu membran damıtıcının matematik modellenmesi üzerine bir çalışma yürütülmüş ve membran performansı ile gerekli güç arasında ilişki kurulmuştur. Çalışmada bir adet ısıtıcı, ısı değiştirici ile sıvı boşluklu membran filtre tasarımı yapılmıştır. Çalışma sonunda gerekli güç miktarının su debisi ve membrana girişteki sıcaklık farkıyla orantılı olarak arttığı ve verimliliğin ve güç ihtiyacının membran yüzey alanıyla orantılı olarak düştüğü ortaya konulmuştur.

Tablo 2'nin devamı

Glavatskiy vd. (2012)	D/S	Sıcaklık farkı	Sıcaklık farkının kütle transferine etkisi	Membranın içinden su ve ısı geçerken meydana gelen birleşik etkinin hesaplamaları dengesizlik termodinamiği teorisi kullanılarak yapılmıştır. Membranda sıcaklık farkından dolayı kütle transferi gerçekleşeceği veya tam tersi olarak kütle transferinden dolayı ısı transferinin gerçekleşeceği ortaya koyulmuştur.
Özgün vd. (2015)	D	Sıcaklık farkı	Sıcaklığın arıtma performansına etkisi	UASB anMBR'de su sıcaklığının arıtma performansını belirlemek amacıyla 15 °C ve 25 °C'lerde denemeler yapılmıştır. Sonuç olarak 25 °C'de atık su ile membran tıkanıklığının daha az, arıtma performansının ise daha iyi olduğu görülmüş, direkt olarak membran üzerine yapılan ısıtmanın arıtma performansı ve membran kirliliği üzerine ise etkisi görülmemiştir.
Ding vd. (2014)	D	Farklı membranlar	Farklı sıcaklıklarda farklı membran tiplerinin karşılaştırılması	35 °C ve 15 °C'de çalışan mezofolik ve atmosferik bakterili anMBR'nin çıkışına osmoz geçirgenlik düzeyinde aerobik MBR koyularak azot ve fosfat giderimi üzerine çalışmıştır. Çalışma sonunda mezofolik anMBR çıkışında debi düşümünün fazla olduğu ve su içeriğinin neden olduğu membran kirlenmesinin mezofolik anMBR'de daha fazla olduğu ortaya koyulmuştur.

Tablo 2'nin devamı

Phattaranawik vd. (2003)	D	Sıcaklık farkı	Sıcaklık farkının kütle transferine etkisi	Membran üzerindeki ısı transferine kütle transferinin etkileri araştırılarak çeşitli sıcaklık farklarındaki toplam ısı transfer katsayıları belirlemiştir. Membran boşluklarının ısı transferine etkileri ortaya koyulmuştur. Deneysel çalışmalar, kütle transferinin ısı transfer oranına ve film tabakası üzerindeki ısı transfer katsayısına etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir. Giriş sıcaklığının, membrandaki buhar fazını ve ısı transferi miktarını artırdığı ve bu nedenle önemli bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.
Alkudhiri vd. (2012)	S	Membran performansı	Girişteki sıcaklık ve basınç etkisi	Membran prosesinin sıcaklık ve basınç farkıyla çalışan ve buhar molekülleri tarafından taşınan bir proses olduğunu gösteren çalışmalar derlenmiştir.
Gryta vd. (1997)	D	Sıcaklık etkisi	Membran performansı	Plaka membran performansını laminar akışta araştırmışlardır. Araştırma sonucunda membran performansında ısı transferi etkisinin çok önemli bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.
Gryta Tomaszewska (1998)	D	Sıcaklık etkisi	Membran performansı	Laminar akışta tüp modül membran performansını araştırmışlardır. Isı transferini temsil eden denklemler yazılarak deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sıcaklık farkının membran performansında önemli bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.

Tablo 2'nin devamı

Aravinth (2000)	S	Sıcaklık etkisi	Isı transferi Kütle transferi	Uniform duvar sıcaklığı ve tam gelişmiş türbülans akışta, membran üzerinde kütle ve sıcaklık transferini araştırmak amacıyla bir model oluşturmuştur. Fanning sayısından yararlanarak ısı, kütle ve momentum transferi arasında karşılaştırma yapılmıştır. Radyal sıcaklık ve konsantrasyon profilinin tahmininde kullanılan Eddy diffüzyivite ifadesiyle deneysel çalışmalardaki Schmidt ve Prandtl sayısı arasında uyum olduğunu ortaya koyulmuştur.
Qtaishat vd. (2008)	D/S	Sıcaklık etkisi	Isı transferinin kütle transferi üzerine etkileri	Membran üzerinde ısı transferini detaylı olarak araştırmak amacıyla, kütle transferinin ısı transfer akısı üzerine olan etkilerini besleme suyunun ısı sınır tabaka ve membran geçişi ve sızıntı suyunun ısı sınır tabakası üzerinden tanımlamışlardır. Matematik bir model tanımlayarak bu modeli MATLAB paket programı aracılığıyla çözmüşlerdir. Elde edilen sonuçlarda kütle transferinin toplam ısı transferi üzerine etkilerinin sadece membran bölgesinde etkili olduğunu, besleme ve sızıntı suyunun ısı sınır tabaka üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ortaya koymuşlardır.
Buia vd. (2010)	D/S	Sıcaklık etkisi	Isı transferi ve kütle transferi arasındaki ilişki	Membran üzerinde etkileşimli ısı ve kütle transferini modellemek amacıyla, boyutsuzluk analizini yarı ampirik modellere uygulayarak ısı ve kütle transferi arasında bir benzerlik bulmak üzere çalışma yapmışlardır. Çalışma sonunda yeni modellerle ısı ve kütle transferi arasında lineer ilişki olduğu ortaya koyulmuştur

Tablo 2'nin devamı

Charfi vd. (2010)	D/S	Membran üzerinde ısı ve kütle transferi	Isı ve kütle transferi	Gaz süpürmeli membran üzerinde ısı ve kütle transferini araştırmak amacıyla deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Sayısal çalışmada, enerji, kütle ve momentumun korunumu denklemlerini besleme, membran ve sızıntı suyu tarafı için yazarak, Navier Stokes denklemleriyle, Darcy Brinkmann Forcheimer formülünü zaman bağımlı ve iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Elde edilen sayısal verileri deneysel verilerle karşılaştırarak ısı ve kütle transferi arasında uyum olduğunu ortaya koymuştur.
Gao vd. (2014)	D	Aritma performansı	Sıcaklık etkisi	Evsel atık suların akışkan yataklı anMBR ile arıtılması esnasında sıcaklığın kademeli olarak düşürülmesinin arıtma performansını nasıl etkilediğini ortaya koyabilmek amacıyla çalışma yapılmıştır. Sıcaklık düşürüldüğünde KOI gideriminin ve metan üretiminin azaldığı, membran kirlenmesinin ise parçalanmayan proteinler nedeniyle arttığı görülmüştür.

1.3.3. Atık Su İçeriğinin Membran Performansına Etkisi

Klasik arıtma teknolojilerinde var olan anaerobik ve aerobik arıtma sistemlerinde çamur yaşını belirli bir değerde tutabilmek için sistemden sürekli çamur çekilmesi bir zorunluluktur. İşletmelerin sistemden çekilen çamurun bertarafı için problemler oluşabilmektedir. Bu nedenle, literatürde anaerobik reaktörde havalı kademeden çekilen atık çamurun arıtılmasına yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur. Aynı şekilde, anaerobik reaktör birçok işletme kolunda uygulanabilirliği bulunan bir arıtma teknolojisidir. Bu nedenle farklı karakteristikteki su içerikleri de çalışmaların konusunu oluşturmaktadır. Bu kapsamdaki çalışmaların özeti Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Atık su içeriğinin membran performansı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar

Yazar	Den. (D) Say. (S)	Konu	İncelenen değişkenler	Sonuçlar
Van Den Berg ve Smolders (1990)	D	Membran kirlenmesi	Atık su içerikleri	Çalışmada, membran filtrasyonunda kirlenme ve birikim sonucu debi düşüşünden, basınç artışından ve kirlenmeye neden olan mekanizmalardan bahsedilmiştir. Sonuç olarak sudaki karışımın (birtakım enzimlerin, proteinlerin) debideki azalma için önemli bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur. Kirlenmeyi azaltmak için alınabilecek önlemlerden bahsedilmiştir.
Fan (2005)	D	Membran kirlenmesi	Atık su İşletme Parametreleri	Atık su arıtma tesisi işletmeciliğinde önemli rol oynayan parametrelerin, membran bio-reaktör performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada 3 farklı kirlenme modelinden bahsedilerek havalandırma performansının ve çamur içeriğinin membran performansı üzerine etkileri ortaya koyulmuştur. Membran üzerinde birikimi önlemeye yönelik kimyasal ilavelerinden ve bu kimyasal ilavelerin, çamur içeriğine ve arıtma performansına etkilerinden bahsedilmiştir. Sonuç olarak farklı çamur karakteristiklerine rağmen TOK (toplam organik karbon) değerinin filtre performansında önemli bir parametre olduğu ve TOK miktarının suya eklenen bazı kimyasallarla düşürülebileceği bunun da tıkanmayı azaltacağı ortaya koyulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Arabi (2009)	D	Membran kirlenmesi	Atık su içerikleri	Atık suyun karakteristik değerlerinin hem filtreleme performansı hem de birikim üzerine etkilerini araştırmıştır. Mg/Ca ve protein/karbonhidrat, oranları gibi atık su özelliklerinin pH, MLSS gibi çıkış suyu özelliklerine etkileri incelenmiştir. Hangi oranlara sahip suyun tıkanmaya ve daha az kirlenmeye neden olduğu ortaya koyulmuştur.
Hout ve Federspiel (2003)	D	Membran performansı	Enzimlerin filtrelenmesi	Saf kanın içinden hücresel kan içeriklerini ayırtırmadan antikorlu ayırtıracak bir filtre sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Damköhler sayısına göre model oluşturularak zaman bağımsız kütlenin korunumu denklemi yazılmıştır. Kanın içindeki birtakım enzimlerin filtrelenebileceği gösterilmiştir.
Kun vd. (2015)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Düşük kirlilik yüküne sahip 2-Ch içeren atık suyun arıtımında hibrid anMBR performansını belirlemek amaçlı çalışma yapılmıştır. Membran girişine ağ filtre eklenerek askıda katı madde miktarı düşürülmüş, reaktörün içine ise granül yapıda aktif karbon koyarak biofilm yatağı oluşturulmuştur. Çalışma laboratuvar ölçeğinde olmakla birlikte %98 KOI ve %82 2-Cp giderimi sağlanmıştır.

Tablo 3'ün devamı

Xiao vd. (2015)	D	Membran Performansı	Aritma İşletmeciliği	Çamur içerikli evsel atık suların arıtımı yapılırken peryodik olarak reaktörden çamur çekmenin anMBR performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışma pilot ölçekli kurulan tesiste yapılarak günde 20 lt düzenli çamur çekilmesi sonucunda reaktörde biriken LCFA ve Ca elementlerinin de uzaklaştığı ve arıtma kalitesinin arttığı görülmüştür.
Ng vd. (2015)	D	Membran Performansı	Farklı tip Membranlar	Tıbbi atık suların arıtımında kullanılan iki tip anMBR performansı karşılaştırılmıştır. Klasik anMBR ile içindeki bakteri etkinliği ve miktarı artırılan yeni tip anMBR karşılaştırıldığında yeni nesil biyolojik artırılmış reaktörün daha etkin arıtma yaptığı görülmüştür.
Smith vd. (2015)	D	Membran Performansı	Biyofilm uygulaması	15 °C de çalışan fizikolik bakterili anMBR'de biyofilmin arıtma kalitesi üzerine etkilerini ortaya koymak amaçlı çalışma yapılmıştır. Çalışmada yüksek membran kirliliğinin çıkış suyu kalitesini azalttığı ayrıca sudaki çözünmüş metan miktarının da çok arttığı görülmüştür. Reaktör içine eklenen birtakım enzim ve bakterilerle oluşturulan biyofilm tabakasının arıtma kalitesini arttırdığı ve kirliliği önlemeye yönelik yapılan geri yıkamadan etkilenmediği ortaya koyulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Yeo vd. (2015)	D	Membran performansı	Arıtma işletmeciliği	Sentetik atık suyun anMBR ile arıtımında çözünmüş metan miktarını kontrolüne yönelik hem deneysel hem de teorik çalışma yapmışlardır. anMBR'de çözünmüş metan miktarının klasik yöntemle göre çok yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmada üretilen metan miktarının arıtılan KOI ile doğru orantılı olduğu, çözünmüş metan miktarının arıtılan KOI ile orantılı olmadığı görülmüştür. Bunun nedeninin arıtılan KOI miktarının kütle transferini hızlandırması ve çözünmüş metanın gaz fazına geçişini kolaylaştırması olduğu görülmüştür.
Ding vd. (2015)	D	Membran kirlenmesi	Atık su içerikleri	Çamur ve kekin içindeki EPS oranlarının ve farklı EPS yapılarının anMBR teknolojisi üzerine etkileri ortaya koyulmuştur.
Yurtsever vd. (2015)	D	Membran performansı	Farklı teknolojilerin karşılaştırılma	Sentetik tekstil suyunun arıtımında aerobik ve anaerobik MBR'nin performansları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak anMBR filtrasyon direncinin yüksek olduğu, renk gideriminde anMBR kullanımında daha iyi sonuçlar elde edildiği ve aynı kimyasalların iki durumda da temizlik açısından olumlu sonuç verdiği görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Kang vd. (2001)	D	Membran performansı	Membran malzemesi	anMBR'de kullanılan inorganik ve organik membran filtrasyon karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada kek oluşumu, geri yıkama ve geri besleme parametreleri kullanılarak inorganik membranda tıkanmanın gözeneklerde gerçekleştiği, organik membranda ise kek oluşumu gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada tıkanmaların önüne geçmek için her iki membranda da farklı kimyasallar ve farklı geri yıkama teknikleri denenmiştir.
Kimura vd. (2005)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Pilot ölçekli bir anMBR kullanarak şehir kanalizasyon suyunun arıtımında olası tıkanma sebepleri araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda çözünmüş organik madde ve MLSS'nin tıkanma ile net bir ilişkisinin olmadığı, membran kirlenme karakteristiğini besin/mikroorganizma oranının belirlediği ortaya koyulmuştur.
Lin vd. (2010)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Laboratuvar ölçekli SanMBRhazırlanarak 7 ay boyunca yapılan deneyler ile kek çamur ve yığın çamur yapılarının sabit operasyonlar esnasında membran kirlenme üzerine nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Ölçümler sonucunda kek çamurun yüksek filtrasyon direncine ve daha küçük parçacık boyut dağılımına sahip olduğu ortaya koyulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Clech vd. (2006)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Atık su arıtmada kullanılan MBR teknolojisinde, kirlenme mekanizmasında hangi parametrelerin etkili olduğunu ortaya koymak için çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada EPS içeriğinin ve en az EPS içeriği kadar da protein içeriklerinin kirlenmede etkili olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca EPS ve protein içeriklerinin yanı sıra hidrodinamik parametreler, debi ve optimal modül dizaynlarının da kirlenmede önemli parametreler olduğu ortaya koyulmuştur.
Dong vd. (2005)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	FeCl ₃ ilavesinin anMBR performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Sonuç olarak FeCl ₃ ilavesiyle KOI gideriminin iyileştiği ancak metan üretiminin değişmediği filtreleme performansının arttığı görülmüştür.
Wijekoon vd. (2015)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği	anMBR'de TrOC'nin giderilmesine ilişkin tahmini bir öngörü yapmak amaçlı çalışma yapılmıştır. Sıvı ve çamur fazındaki TrOC sistematik olarak araştırılarak hidrolik akış düzeni, TrOC giderimi ve spesifik moleküler özellikler arasında ilişki olduğu ortaya koyulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Gouveia vd. (2015)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği	Pilot ölçekli anMBR kullanarak şehir atık suyunun psikrofil şartlar altında arıtımı üzerine uzun vadeli operasyonlarla deneme yapılmıştır. Denemeler 3 yıl 18 °C±2'de yapılmıştır. Çalışmada UASB ve çıkışında UF'nin en uygun çalışma şartlarının ortaya koyulması hedeflenmiş ve üretilen metan, giderilen KOI ve arıtılan debi bilgileri ortaya koyulmuştur.
Li vd. (2015)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği	Propiyonat azaltımı ve metan üretimi üzerine sülfat etkisinin etkisini araştırmak amacıyla termofilik özellikli bakteri ile süt ve atıktan oluşan çamurlu anMBR üzerine sülfat ekleyerek denemeler yapılmıştır. Çalışma sonundauzun vadede sülfat eklemenin hem arıtma performansı hem de metan gazı üretimi üzerine olumlu etkileri olduğu görülmüştür.
Jensen vd. (2015)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği	Mezbahane atık suyunun arıtımında anMBR uygulaması denenmiştir. Yüksek derecede partikül içeren mezbahane suyu gibi atık suların arıtımında yaşanan sorunların önüne geçebilmek amacıyla 200 litrelik bir anMBR ile denemeler yapılarak %95 oranında KOI giderimi gerçekleştiğini ve arıtılan bütün KOI miktarının metan gazına dönüştüğü ortaya koyulmuştur. Ayrıca çalışmada yoğun partikül nedeniyle belirli bir yük değerinin üzerine çıkılamadığı görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Fox ve Stuckey (2015)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	anMBR tasarımına yol göstermek amaçlı yapılan durum çalışmasında, endüstriyel ölçekli membran üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiş ve hidrolik bekleme, katı bekleme, MLSS oranı, metrekare başına metan üretimi, tanka geri döndürülen bakteri gibi anahtar parametrelerle 15 °C ve 30 °C şartlarında sülfat açısından zengin ve fakir olan atık suda denemeler yapılmıştır. Çalışma sonunda arıtma maliyeti sırasıyla 0,097 ve 0,070 euro/m ³ olarak belirlenmiştir.
Ramos vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Çalışmada yağ içerikli atık suların kalıcı ve kalıcı olmayan kirlilik üzerine etkileri incelenmiştir. Sonuç kısmında çeşitli yağ oranlarına sahip atık suların ne kadarlık kalıcı ve geçici kirlenmeye neden olduğu ortaya koyulmuştur.
Wang vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Ev temizlik maddelerinde yaygın olarak bulunan PCMs maddesinin anMBR'de arıtımı üzerine çalışma yapmıştır. Laboratuvar ölçekli çalışmada hem sıvı hem de katı parçacıklı olarak belirtilen maddenin arıtımını denemişlerdir. Çalışma sonunda bütün PCMs maddesi türevlerinin anMBR'de etkin olarak giderildiği görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Aslan ve Saatçi (2013)	D	Membran performansı	Membran yapısı	Farklı yapıdaki anSMBR modüllerini performans açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda TOK ve KOI gideriminin membran şekline göre değişmediği, sülfat gideriminin silindir yapıdaki modülde daha etkin olduğu ve geleneksel yöntemle kıyasla anSMBR de metan üretimini fazla olduğu görülmüştür.
Jin vd. (2014)	S	Arıtma teknikleri	Arıtma performansları	Çin'de mevcut durumda lağım suyunun nasıl arıtıldığı, kullanılan arıtma teknikleri ve birbirlerine göre üstünlükleri gibi verileri derleyerek ortaya koyulmuştur.
Ng vd. (2014)	D	Arıtma teknikleri	Reaktör yapıları	Kimya ve sentetik endüstrisinin atık suyunun arıtımında anMBR ve biyofilm ve aktif karbon ilaveli anBMBR performansları laboratuvar ölçekli deney düzeneğinde karşılaştırılmıştır. Çalışmada reaktör içine koyulan Biyolojik top sayesinde daha düşük protein ve karbonhidrat içeriği olduğundan ve buna bağlı olarak daha uzun filtreleme periyotları ve daha iyi arıtma kalitesinin sağlandığından bahsedilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Wei vd. (2014)	D	Arıtma perfromansı	Reaktör işletilmesi	Mezofolik anMBR'de sürdürülebilir organik yüklemeyi ve enerji geri kazanım potansiyelini bulmak için şehir atık suyuyla denemeler yapılmıştır. Çalışmada sabit debi ve kirlilik yüklemesinde %98 arıtım kalitesi olduğu ortaya koyulmuştur. Farklı debiler ve farklı yüklemeler ile denemeler yapılarak metan gazı üretim miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ısıtma yapılması ve ileri osmoz eklenmesi halinde anMBR'nin çok etkin bir arıtma sistemi olabileceği ve enerji geri kazanımı açısından klasik yöntemle göre daha uygun bir arıtma sistemi olduğu ortaya koyulmuştur.
Wallaceve Safferman (2014)	D	Arıtma perfromansı	Atık su içeriği	Pilot ölçekli anMBR ile büyükbaş hayvan idrarının arıtımı esnasında metan üretimi, akış hızı ve biyokütle konsantrasyonunun arıtma kalitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada arıtma öncesi kum filtresi koyarak farklı akış hızlarında ve farklı hidrolik bekletme sürelerinde denemeler yapılarak bunların arıtma kalitesi üzerine sonuçları ortaya koyulmuştur.
Ramos vd. (2014)	D	Arıtma perfromansı	Atık su işletmeciliği	Yüksek yağ içerikli gıda endüstrisi atık suyunun anMBR ile arıtılması esnasında membranlarda oluşan kirliliği gidermeye yönelik olarak farklı kimyasallarla farklı yoğunluklarda ve farklı geri yıkama peryotlarında denemeler yapılmıştır. Özellikle NaClO ile denemeler yapılarak farklı yoğunluk ve farklı peryotlarda olumlu sonuçlar alındığı ortaya koyulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Pretel vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği (Sülfat)	Sülfatça zengin atık suyun anMBR ile arıtılması esnasındaki operasyon maliyetlerini araştırmak amaçlı 17 °C ile 33 °C sıcaklıklarda denemeler yapılmıştır. Sonuç olarak gaz çıkışının, artırılmış su debisinin ve çamur bekleme zamanının enerji tasarrufu açısından önemli parametreler olduğunu ortaya koyulmuştur. Çalışma sonunda atık su içerisinde bulunan sülfat içeriğinin hem arıtma kalitesini hem de enerji tasarrufunu etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.
Kijjanapanich, vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Bina yıkıntı ve enkazlarında oluşan kalsiyum ve sülfatın giderimine yönelik olarak UASB, IFB, GL-anMBR membran arıtma teknolojileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada her üç reaktörde de olumlu sonuçlar alınarak 15,5 saat hidrolik bekletme süresinde fosfat gideriminin en yüksek % 80 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Çalışma sonunda, sudaki 1000 mg/l'te kadar olan kalsiyum oranlarının sülfat giderimine olumsuz bir etki yapmadığı görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Gao vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Şehir atık suyunun arıtılmasında granül aktif karbon ilave edilmiş ve akışkan yataklı anMBR ile enerji tasarufu yapmak amacıyla çalışma yapılmıştır. Çalışmada 300 mg/lt kirlilik yükünde farklı hidrolik bekleme zamanlarında denemeler yapılarak, HRT ile metan gazı, üretimi, KOI giderimi ve membranlarda kirlenme arasında bir ilişkinin kurulması amaçlanmıştır. Çalışma sonunda kısa bekletme sürelerinde membran kirlenmesinin daha fazla olduğu, reaktöre ilave edilen aktif karbonun da sudaki protein içeriğini azaltarak kirlenmeyi azalttığı belirlenmiştir.
Smith vd. (2014)	D	Membran performansı	Farklı membran tiplerinin karşılaştırılması	anMBR arıtma teknolojilerinin çevreye emisyon değerleri ve geri kazanılabilecek metan gazı üretimleri açısından değerlendirmek amacıyla bir çalışma yürütmüştür. Çalışma özeti olarak anMBR'nin hem enerji tüketimi hem de emisyon değerleri açısından diğer arıtma teknolojileriyle karşılaştırıldığında, kirlenme probleminin çözülmesi halinde anMBR'nin hızlı gelişmeye açık, ekonomik ve etkin arıtma sağlayan bir sistem olduğu görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Buntner vd. (2014)	D	Arıtma performansı	Atık su işletmeciliği	Aerobik çamurdan geri kazanılmış ve hidroliz endüklenmiş polimerlerin anMBR'de spesifik metajonik aktivite üzerine etkilerini incelemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Denemeler sonucunda biyopolimer kümelerinin koloidal fraksiyonu ile filtrasyon direnci arasında pozitif, süpernatant filtrelenebilirliği (SF) ile negatif korelasyon olduğu ortaya koyulmuştur.
Bakonyi vd. (2014)	S	Arıtma performansı	Atık su işletmeciliği	Reaktör tasarımında önemli bir rol oynayan fermentasyon sonucu hidrojen oluşumunu belirlemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Çalışmada son on yılda farklı reaktör dizaynları yapılsa da temel amacın H ₂ üretimini temel parametre olarak ele almak olduğunu belirterek tam karışimli reaktörün hala en yaygın tasarım olarak kullanıldığından, ancak günümüzde onun yerini hibrid anMBR'nin almaya başladığından bahsedilmiştir. Çalışmada anMBR'de biyohidrojen üretimi üzerine anahtar parametreleri kullanarak diğer reaktörlerle karşılaştırma yapıldığında hibrid anMBR'nin ön plana çıktığı görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Chen vd. (2014)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği	Atık suyun arıtımına SanMBR ile ileri osmoz ilaveli reaktörün performansını incelemek amacıyla belirtilen çalışma yürütülmüştür. Çalışmada su debisinin kirlenme ve tuzluluk oranıyla düştüğü, reaktördeki tuzluluk seviyesinin reaktördeki biyolojik kirlenmeye veya kısıtlamaya etkisi olmadığı görülmüştür. Çalışma sonucunda ileri osmoz ilaveli anMBR'nin % 96 organik karbon, % 100 toplam fosfat ve % 62 amonyum nitrojen gidererek anMBR'den daha üstün performans gösterdiği görülmüştür.
Diez vd. (2014)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği	Sıkıştırma ve kek oluşumunu farklı kirlenme şartları altında tanımlayarak MBR'de kirlenme mekanizmasını daha iyi anlaşılmasını sağlayacak veriler sunulmuştur.
Monsalvo vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	anMBR'de organik izlerin (parmatik endokrin) giderilmesine ilişkin çalışma yapmışlardır. Çalışmada organik izlerin giderilmesinde kullanılan farklı mekanizmalar hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada membran üzerinde kirlenme sonucu oluşan organik izlerin üzerinde yoğunlaştığında %38 içeriğin sadece 9'unun %90 oranında giderildiği, 23 içeriğin gideriminin %50'den daha az olması nedeniyle bir kısmının yığın halinde kaldığı, bir kısmının da membranda biriktiği görülmüştür. Çalışma sonunda toplamda metre başına 288 gr organiğin biriktiği görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Gahleitner vd. (2014)	D	Membran temizlik	Köpük performansı	Kimyasal temizlik ihtiyacını azaltmak amacıyla kullanılan köpük temizlik metodunun çapraz akışlı ultrafiltrasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen 2 saatlik filtrasyon sonuçlarına göre köpük temizliği 2 kademeli hipoklorit ve sitrik asit temizliğiyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada köpük yoğunluğu, köpük kalitesi ve köpürme parametre olarak belirlenmiş, kimyasal temizliğin çevresel etkilerini azaltmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla kimyasal temizliğe alternatif olarak köpük kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
Shoener vd. (2014)	D	Atık su arıtma	Genel bakış	Yaptıkları çalışmada atık su arıtımında negatif enerji dengesinin ortadan kaldırılması ve organik karbon oksidasyonu için anaerobik teknolojinin uygulanması ve içeriklerin geri kazanılması için (fototrofik) teknolojinin kullanılmasının mümkün olabileceği ortaya koyulmuştur. Çalışmada bahsedilen uygulamalar ile atık su arıtımının daha fazla enerji kazanan bir hal alacağı belirtilmiştir. Çalışmada literatür derlenerek arıtma maliyeti açısından yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3'ün devamı

Díaz vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Topaklaştırıcı ilavesiyle arıtılan atık su debisini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada uc uca filtrasyon yönteminde 6 farklı ürün test edilerek sonuçta 2 ürünü çapraz akış membranda denenmeye uygun görülmüş, Nalco MPE-50 laboratuvar ölçeğinde sürekli test edilmiş ve topaklaştırıcı ilavesinin atık su debisini artırdığı ve etkisinin uzun süre sürdüğü belirlenmiştir.
Mayur vd. (2014)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Akışkan yatak anMBR'nin çözünmüş posa üretim endüstrisindeki su buharının arıtımında kullanılabilmesi araştırılmıştır. Çalışmada şeker, asitik asit, furfural ve lignin içeren su buharının 100 mg/l KOI kirliliğe sahip olduğu tespit edilerek prehidroliz sıvı olarak adlandırılmış, çalışmalarda 8-10 kg/günlük KOI yüklemesiyle % 85 KOI giderimi ve 0,35 m ³ /kgKOI metan üretimi görülmüştür. Yapılan çalışmada düz plaka membran kullanılmış, çıkış suyunda şeker ve furfural bulunmadığı, ligninin ise %60 ile %90 arasında giderildiği görülmüş ve 400 günlük operasyon boyunca sadece 1 kez kirlenme yaşanmıştır.

Tablo 3'ün devamı

Qiao vd. (2013)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Kahve çekirdeklerinin SanMBR'de termofolik bakterilerle arıtılmasına yardımcı olarak aktif çamur kullanımının uygunluğunu belirlemek amacıyla aktif çamur ilaveli ve aktif çamur ilavesiz performansları araştırmak üzere bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada kahve çekirdeklerinin termofilik anMBR'de arıtılmasının zor olması nedeniyle 7lt'lik laboratuvar ölçekli anMBR ile 82 günlük çalışma yapılmıştır. Çalışmada katı konsantrasyonunun 75 g/l olmasına rağmen 5,1 l/m ² h debi ile filtre performansının etkilenmediği ancak çözünmüş karbon, yağ ve proteinin membrandan geçemeyerek kaldığı görülmüştür.
Wang vd. (2013)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Organik madde içeriği nedeniyle arıtılması problem olan bambu endüstrisi atık suyunun anMBR'de arıtılmasına çalışılmıştır. Çalışma sonunda, kesintili dur-kalk çalışmada %91 KOI giderimi sağlanırken sürekli çalışmada %45 membran kirlenmesi yaşandığı görülmüştür. Membran temizliği için azotpüskürtme uygulanarak, hidrolik bekletme zamanının membran kirlenmesinde önemli bir parametre olduğu, 5 günlük hidrolik bekletme ile membran kirlenmesinin önüne geçildiği görülmüştür. Yapılan ölçümlerde membran üst yüzeyinin en çok kirlendiği, en fazla organik içerik gideriminin ise anMBR'de sağlandığı görülmüştür. Çalışma sonunda çıkış suyunda benzen ve fuora içerikleri görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Dagnew vd. (2012)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	anMBR performansını, oluşturdıkları pilot ölçekli içi boş ve dıştan geçirimli membran üzerinde 15 günlük hidrolik bekletme 30 günlük çamur bekletme ve 1,2-1,3 kg/m³ gün katı yükleme değerleriyle denemeler yapılmıştır. Sonuçlara göre oluşturulan her iki membran tipinde de toplam KOI gideriminin yaklaşık olarak aynı oranda gerçekleştiği ve sırasıyla % 47 ve % 49 katı madde giderimi sağlandığı görülmüştür. Çalışmada tam karışimli membran tipinden (CSTR) iki kat fazla işlem hacmi gerçekleştirilerek 30 günlük çamur bekletme süresinde CSTR ile aynı performans sağlanabilmektedir. 160 gün sürdürülen çalışma sonunda anMBR'de kayda değer bir membran kirliliği ve temizlik gereksinimi yaşanmadığı belirtilmiştir.
Liu, Y. (2013)	D	Membran performansı	Farklı reaktörler	Düşük kirlilik yükü olan atık suların arıtılmasında UASB reaktöre membran ekleyerek performansını artırmak amaçlı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada UASB reaktör iki belirleyicili yükleme oranlarıyla, yani membranlı ve membransız olarak test edilmiştir. Çalışmanın sonunda sürekli olarak %90 ve üzerinde KOI giderimi sağlayarak membranın UASB reaktörün performansını ve stabilitesini arttırdığı ortaya konulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Prieto vd. (2013)	D	Membran performansı	Farklı reaktörler	Laboratuvar ölçeğinde oluşturdukları gaz karıştırmalı anMBR ile lağım suyunun geri kazanımını araştırmak amacıyla çalışma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan gaz karışımı anMBR ve GlanMBR kullanımı ile % 98 civarında organik içerik, % 95 KOI ve TOK giderimi sağlanırken 4,5 lt/gün metan gazı üretimi sağlandığı görülmüştür. Yapılan 100 günlük çalışma sonunda yüksek berraklık sağlanırken, toplam azot ve toplam fosfatın geri kazanılabileceği belirtilmiş, GlanMBR'nin atık suyun yeniden kullanımı ve enerji geri kazanımı açısından parlak bir yöntem olduğu ortaya koyulmuştur.
Hemilmann vd. (2013)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Tuzlu ve yüksek protein içerikli atık suyun arıtımında anMBR kullanımının sonuçları araştırılmıştır. Tuzlu su nedeniyle oluşan biyofilm, bakterinin granülleşemeyişi ve buna bağlı olarak biyokütleinin bekleme zamanının düşmesi gibi nedenlerle tuzlu su arıtımının anMBR'de problem olarak gözüktüğü belirtilmiştir. Çalışmada anMBR'de tuzlu su arıtımını gerçekleştirebilmek için biyokütleyi tutabilmek amacıyla anMBR içine seramik boru membran ilave ederek 2 yıl boyunca laboratuvar ölçeğinde denemeler yapılmıştır. Seramik membran ilavesiyle sonuçların iyileştiği görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Smith vd. (2013)	D	Membran performansı	Atık su içeriği	Oluşturdukları laboratuvar ölçeğinde düz membranlı anMBR ile hem gerçek hem de simülasyon atık su deneyi yapan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sentetik atık sularla yapılan çalışmalarda % 92±5 KOI giderimi ve çıkış suyunda 36±21 mg/lt KOI görülürken, çıkış suyunda Henry kanununa göre fizikolik şartlarda üretilebilecek maksimum metan debisinin yaklaşık % 50'sinin çıkış suyunda çözünmüş olarak bulunduğu görülmüştür. Gerçek atık su ile yapılan çalışmalarda ise 69±10 KOI giderimi, 76±10 mg/lt çıkış suyu KOI'si ve 24±3 mg/lt çıkış suyunda BOI görülmüştür. Çalışmada ayrıca bakteri ve arke popülasyonunun anMBR içindeki oranlarının arıtma ve KOI giderimi üzerine etkileri de ortaya koyulmuştur.
Sanchez vd. (2013)	D	Atık su arıtılması	Membran performansı	Çok soğuk iklim şartlarına sahip olmayan ülkelerde anaerobik arıtma ve aerobik membran teknolojisinin alternatif arıtma teknolojisi olabilme ihtimalini araştırmak amacıyla çalışma yapılmıştır. Çalışma sonunda aerobik çamurun anaerobik kademeye geri basılması sonucu meydana gelen hidrolizden dolayı biopolimer oluştuğu ve biomass konsantrasyonuna bağlı olarak arıtma performansının da düştüğü görülmüştür. Sistemde çözünebilen mikrobiyel ürünler ile içindeki karbohidrat oranı ve mikrobiyel parçacık konsantrasyonlarının kirlenme ile aralarında çok güçlü bir ilişki olduğu ortaya koyulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Stuckey (2012)	D	Anaerobik Rektörler	Genel Bakış	Geliştirilen anMBR'nin dıştan veya reaktörün içine batmış bir şekilde membran ilavesiyle kurulduğunda 3 saatten daha az hidrolik bekletme sürelerinde dahi % 98 ve üstü KOI giderimi sağlandığından bahsedilmiştir. Çalışmada membrandan biyokütle kaçışının engellenmesiyle hem termofilik hem de fizyolojik şartlarda anaerobik arıtımın performansının artırılabilirdiğinden iyi bir kütle ve enerji dengesinin oluşturulması konularının çalışılması ile daha iyi bir ilerleme sağlanabileceği belirtilmiştir.
Smith vd. (2012)	D	Anaerobik Rektörler	Genel Bakış	Su yönetiminin sürekliliğinin artırılmasına olan ilginin ev atık suyunun arıtma uygulamalarının yeniden değerlendirilmesine yol açtığından bahsedilecek temel amacın enerji tüketimini azaltmak, geri kazanım ile çevresel etkileri azaltmak olduğu vurgulanmıştır. Karşılaştırıldığında aMBR ile aynı kapasitede su üretme kapasitesine sahip olan anMBR, yararlı enerji üretmesi ve daha az kalıntı bırakması nedeniyle daha önde bir arıtma yöntemi olduğu görülmüştür. Çalışmada domestik atık suya yapılan anMBR uygulamasında operasyonel gereksinimler üzerine yoğunlaşarak membran kirlenmesi, düşük HRT, yeterli arıtma için daha düşük sıcaklık gereksinimi, metan geri kazanımı, besin giderimi gibi konuların çalışılması gereken önemli noktalar olduklarından bahsedilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Dereli vd. (2012)	D	Anaerobik Rektörler	Genel Bakış	Endüstriyel atık suların arıtımında anMBR kullanımını araştırmak amacıyla, anMBR uygulamalarında arıtılabilirlik ve filtre edilebilirliği de içeren geniş bir perspektiften bakış açısı sunmak amaçlı çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların çoğunun laboratuvar ölçeğinde olduğundan bahsederek, membran kirliliğinin halen çalışılmaya açık bir konu olduğu vurgulanmıştır. Kirlenme ve debi düşüşü gibi olumsuzluklardan yola çıkarak hem laboratuvar ölçekli hem de pilot ölçekli yapılan çalışmalardaki mevcut sorunları, gelecekteki yaklaşımlara bakış açısı kazandırması açısından değerlendirerek sunulmuştur.
Mnif vd. (2012)	D	Anaerobik reaktör	Reaktör işletilmesi	Tunus'ta bir çöp dökme alanı olan olan JebelChakir'in kirli suyunu arıtmak amacıyla anMBR geliştirilmiştir. Geliştirilen reaktördeki teorik yük oranını kademeli olarak 4 gKOI/l/gün'den 10 grama çıkartarak mikrobik topluluklardaki muhteviyatlar, yoğunluk ve değişimleri PCR SSCP parmalizi metoduyla yorumlayarak OLR artışı hesaplamasında kullanmışlardır. Sonuç olarak optimal OLR'deki (7 gKOI/l/gün) bakteri ve arke popülasyonlarının türleri bulunarak, farklı miktarda mikrobiyal varlığı barındıran sızıntı suya anMBR uygulamışlar ve sürecin daha iyi anlaşılması için gerekli verileri elde edilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Visvanathan ve Abeynayaka (2012)	D	Anaerobik membran reaktörler	Genel Bakış	Anaerobik arıtım ve membran teknolojisinin birleşimiyle, atık su arıtımı sonucunda mükemmel şekilde katı madde giderimi ve biyokütle alıkoymasının sağlanabildiği ortaya konularak, bu entegrasyon ile biyolojik arıtma sonucunda elde edilen biyogaz sayesinde enerji geri kazanımı sayesinde daha verimli atık su arıtımı yapılabildiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca anaerobik atık su arıtma sürecinde mevcut durumu özetlenerek anMBR'de eğilimler ve anMBR gelişimi için çalışılması gereken konuları ortaya koyulmuştur.
Yuzir vd. (2012)	D	Arıtma performansı	Atık su içeriği (Nitrat)	anMBR'nin farklı atık sularda kullanımını araştırmıştır. Çalışmada yüksek KOI/NO oranlarında çalışıldığında yüksek seviyede çözünebilir KOI giderimi (%80-%93) sağlanabildiği görülmüştür. Ancak, nitrat giderim verimliliğinin %37 olduğu, bir damlaya rastlayan yüksek nitrat konsantrasyonlarda KOI giderimin azalmaya başladığı (%15), nitrat baskın elektron alıcısı durumundayken denitrifikasyon seviyesinin düştüğü ve bunun da anMBR performansını etkilediği görülmüştür. Buna ek olarak (RS)-MCPD'nin belirli kullanım oranı (SUR) KOI/NO ile ters orantılı iken (RS)-MCPD kaldırma verimliliğindeki artış KOI/NO oranlarındaki azalmayla beraber %2'den %47'ye çıktığı, daha düşük KOI/NO oranının (RS)-MCPD SUR üzerine olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Nitrat metan üretimi için ana belirleyici parametre olmasına rağmen metanın %23 veya daha fazla KOI/NO oranı %80 seviyelerinde olduğu görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Salazar-Peláez vd. (2012)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Hidrolik bekletme süresi	Biyopolimerik maddelerin üretimi ve kirlenmeyi de göz önüne alarak, ayrıca strüvit çökmesini çözülebilir ürün denklemine dayandırarak, hidrolik bekletme zamanının anaerobik membran biyoreaktör üzerinde etkisini değerlendirmek amacıyla çalışma yapılmıştır. Ultrafiltrasyon eklenmiş laboratuvar ölçekli UASB reaktöründe iki deneysel bloklar halinde fosfat ilave edilerek ve edilmeden 4,8 ve 12 saatlik üç farklı bekletme zamanlarında sentetik su ve belediye atık suyuyla deneme yapılmıştır. Çalışmada reaktör içindeki biopolimerik madde konsantrasyonunun muhtemelen daha düşük bekletme zamanlarında oluşan daha yüksek yüzey gerilimleri, hem de daha yüksek akış hızlarında geçiş koşullarının ortadan kalkması nedeniyle hidrolik bekletme zamanının azalmasıyla arttığı görülmüştür.
Torres vd. (2011)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Dalgali Akış	Boru tip membran içeren anMBR ile yüksek organik katı madde içeren atık suların arıtımında iki aşamalı dalgali akış rejimini incelemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Çalışmada katı madde konsantrasyonunu artırmak için üretim fazlası maya ile takviye yapılmış, bira atık suyunun dışarıda boru tip membran içeren laboratuvar ölçekli anMBR ile arıtımı denenmiştir. Çalışma sonunda reaktör işlemi sırasında, muhtemelen gaz dağıtımı nedeniyle, tek hücrelilerin birikimini engelleyen ve biyokütle süspansiyonunu sağlayan gerekli yüzey gerilimi oluşmaması nedeniyle düşük debi düzeylerinin (<10 l/m ² h) elde edildiği görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Chilli vd. (2011)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Farklı membran tipleri	Üç farklı membran performansını değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmada su sürdürülebilirliğinin insan ihtiyaçlarını karşılamak, temizlik ve içme suyu açısından gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde önemli olduğu vurgulanmıştır. Yeni gelişen ve bu amaçlar doğrultusunda oluşturulan MBR teknolojisinin performanslarını ortaya koymak aynı çalışma koşulları altında evsel atık suyun arıtılmasında laboratuvar ölçeğinde aMBR, anMBR ve atMBR sistemleri değerlendirilmiştir. Çalışmada atMBR sisteminde reaktör içine operasyonel değişikliklerden etkilenmeyen yüksek yoğunluklu mikroplar koyarak, her üç sistemde de uzun vadeli KOI ve TOK gideriminin %80'den fazla olduğunu izlemişlerdir. Çalışmada anMBR'nin sonsuz katı tutma zamanında sabit MLSS konsantrasyonu sergilediği (artış olmadığı) MBR'de ise giderilen gram KOI başına 0,25 gram atık çamur oluştuğunu, buna göre anMBR ile daha ekonomik bir katı yönetim sistemi olabileceğini ortaya koymuşlardır.
Gao vd. (2010)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Farklı membran malzemeleri	anMBR'de kirlenmeyi araştırmak için laboratuvar ölçekli 10 lt hacimli iki membranlı anMBR'yi 30°C'de %30 protein içeren yapay kanalizasyon suyu ile 5,1 kg/m³ gün KOI yükleme sonrasında çalıştırılmıştır. Biyokütlenin membran yüzeyine bağlandığı ve kirlatici bir katman oluşturduğu görülmüştür. Sonuçta PEI malzemedan olan membranın daha hızlı kirlendiğini ortaya koyarak membran malzemesinin de kirlenmede önemli bir parametre olduğu ortaya konulmuştur.

Tablo 3'ün devamı

Baek vd. (2010)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Farklı çalışma rejimleri	Çalışmada anMBR kullanarak önceden kurulmuş olan belediye atık su arıtma tesisinden alınan atık su seyreltilerek deneysel çalışmaya uygun hale getirilmiş ve laboratuvar ölçekli anMBR üzerinde çalışma yapılmıştır. EPS konsantrasyonunun hidrolik bekletme esnasında 42 mg/l'ten 22 mg/l'te düşmesiyle biyokütle konsantrasyonunun arttığı ve daha düşük bekletme sürelerinde EPS içeriğinin azaldığı ortaya koyulmuştur. Çalışma seyreltik atık sular için azot ve fosfat giderimi gibi konularda anMBR'nin uygun bir arıtma seçeneği olduğunu sonucuna varılmıştır.
Zayen vd. (200)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Farklı çalışma rejimleri	Jebel Chakir'in kontrollü olarak araziye tahliyesinden oluşan atık suyun herhangi bir kimyasal ya da fiziksel ön arıtmaya tabi tutulmadan anMBR'de arıtma potansiyelini belirlemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada organik yükleme oranını 1 g KOI/gün'den ortalama 6,27 g KOI/güne doğru gittikçe artırılmış, en yüksek organik yükleme oranında biyogaz üretiminin yaklaşık üç katına çıktığını ve uçucu askıda katı madde değerinin 3g/l'te değerine çıktığını ortaya koyulmuştur. Sabit arıtma şartlarında %90 KOI giderimi ve giderilen mg KOI başına 0,46 lt metan üretimi ile arıtma verimliliğinin yüksek olduğunu görülmüştür.

Tablo 3'ün devamı

Ho ve Sung (2010)	D	Anaerobik membran biyoreaktör	Farklı çalışma rejimlerinin karşılaştırılması	Membran içindeki metajonik faaliyetleri incelemek amacıyla anMBR1 ve anMBR2 adı verilen iki laboratuvar ölçekli anaerobik membran biyoreaktörü sırasıyla 25 °C ve 15 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmada KOI giderimi verimliliğinin sırasıyla anMBR1 ve anMBR 2'de sırasıyla %95 ve %85 olarak gerçekleştiği ortaya koymuşlardır. Her ne kadar membran yüzeyindeki fiziksel giderim anMBR2'deki düşen biyolojik giderimi telafi etse de anMBR1'de KOI gideriminin çoğunlukla biyolojik olarak gerçekleştiği görülmüştür anMBR'deki membran sistemlerinin sadece biyokütlenin reaktörde tutulmasını sağlamadığı aynı zamanda düşük sıcaklıktaki çözünebilir organikleri de geçirmeyerek biyolojik arıtma verimliliğinin tamamlayıcısı olduğu ortaya konulmuştur.
----------------------	---	-------------------------------------	---	--

Tablo 3'ün devamı

Kanai vd. (2010)	D	Membran Reaktörler	Genel bakış	Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı, sabit sıvılaştırılmış yatak ve membran biyoreaktör gibi yeni teknoloji girişimlerinin anaerobik arıtmadaki dezavantajını ortadan kaldırmak için önlemler olduğu belirtilmiştir. Kubota'nın son on yıldaki gelişme sürecinde geliştirilen batık anMBR'si (SanMBR)'nin bir dizi tam ölçekli gıda ve içecek sanayisinde başarıyla uygulandığından bahsedilmiştir. Kubota'nın anMBR'sinin çözünürleştirme tankı (ön arıtma) termofilik reaktör ve membranların entegrasyonu şeklinde olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada daha fazla arıtılmış su ve atık çamurun atık su arıtma tesislerinde işlenmesiyle elde edilen metan gazının kazanlar ve ısıtıcılarda faydalı hale gelebileceğinden bahsedilmiştir. Çalışmada KSanmBR'nin hem metan gazından maksimumda yararlanmak için en iyi çözümün hem de membran teknolojisiyle fermentasyon prosesinin veriminin artması nedeniyle atık su arıtma prosesinde en iyi çözüm olduğu sonucuna varılmıştır.
---------------------	---	-----------------------	-------------	---

Tablo 3'ün devamı

Dagnew vd. (2010)	D	anaerobik Membran Biyoreaktör	Farklı çalışma rejimleri	Bu çalışmada pilot olarak ve kısa vadeli yapılan 15 günlük hidrolik bekletme ve 30 günlük çamur bekletme süreli anMBR ile hidrolik bekletme ve çamur bekletme sürelerinin eşit olduğu 15 ve 30 günlük bekletme zamanlı klasik çürütücüler karşılaştırılmış ve filtrasyon çalışmasının sonuçları sunulmuştur. Çalışmada sabit şartlarda anMBR %48 gibi bir oranla, sırasıyla % 44 ve % 35 oranlarında gerçekleşen 30 ve 15 günlük bekletme süreli klasik çamur çürütücüler ile karşılaştırıldığında daha yüksek uçucu katı gideriminin sağlandığı görüldüğü belirtilmiştir. Çalışma sonucunda iyi bir arıtma için anMBR'nin kullanımının uygun olduğu açık olarak gösterilmiştir.
El-Bourawivd. (2006)	D	Membran Reaktörler	Genel Bakış	1960 yılı sonlarında başlayan ve 1980'lerde gelişme gösteren membran teknolojisinin düşük atık ve alternatif enerji kaynaklarıyla beraber kullanılabilmesinden dolayı öne çıkan bir yöntem olduğundan bahsedilerek, genel çerçevede gelişim sürecini ortaya koymuşlardır. Çalışmanın membran teknolojisinin genel hatlarıyla anlaşılması ve ihtiyaç duyulan eksikliklerinin belirlenmesi bakımından kaynak niteliğinde olduğu görülmüştür.

1.3.4. Farklı Kontrol Sistemlerinin Membran Performansına Etkileri

anMBR'de işletme maliyetlerini düşürmek amacıyla bazı kontrol stratejileri geliştirilmektedir. Aynı zamanda arıtmanın kesintiye uğramaması için membran üzerinde oluşan kirliliğin sistemi kesintiye uğratmadan giderilmesi gerekmektedir. Bu ise yapılacak olan geri yıkama veya kirliliği kırarak (kirlilik nedeniyle membran üzerinde oluşan kabukların kırılması) oluşan bir takım çalışmalar ile mümkün olmaktadır. Literatürde bu kirliliği kırmaya ve en uygun geri yıkama periyotlarını belirlemeye yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların özeti Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Farklı kontrol sistemlerinin membran performansı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar

Yazar	Den. (D) Say. (S)	Konu	İncelenen değişkenler	Sonuçlar
Chellamve Cogan (2011)	D	Membran kirlenmesi	Bakteri salgıları	Sabit akış elde edebilmek için yüksek basınç gerektiğini belirterek birleşik matematik ve geleneksel tıkanma kuralları ile sabit akı operasyonları esnasında elde edilen laboratuvar verileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada sıkıştırılabilir kek oluşturan bakterilerin tek bir türü ve eriyik maddeleri incelenmiştir. Prensip olarak bireysel hücrelerin gözeneklerinin tıkanmasından oluşan kirlenmelerin kek oluşumu ve bakteri salgısı kaynaklı olduğu ortaya koyulmuştur.
Liu vd. (2011)	D	Membran kirlenmesi	Elektrik alanı	Membran biyoreaktörlerde kirlenmeyi azaltmak için yeni bir kontrol stratejisi ortaya konulmuştur. Paslanmaz çelik anot üzerine 0,2 v/cm elektrik alanı uygulanarak elektroforez ile birikintilerde azalma ve sızıntı debisinde artış sağlanmıştır.

Tablo 4'ün devamı

Agashichev (2011)	D	Membran modellenmesi	Genel bakış	Membranların modellenmesi ile ilgili yapılan eski çalışmalar derlenmiş ve modelleme yaklaşımları yorumlanmıştır.
Coganve Chellam (2014)	D	Membran modellenmesi	Geri yıkama periyotları	Çalışmada geliştirilmiş bir membran modeli yaparak, ileri ve geri yıkama periyotlarını belirlemek üzere yaklaşımlar yapılmıştır. Belirli zaman aralıklarında hız, basınç ve akış miktarına bağlı olarak geri yıkama yapılması gerektiği ortaya konulmuştur.
Lü vd. (2015)	D	Membran modellenmesi	Lineer modelleme	anMBR'de EPS'nin proton bağlayıcı karakteristiğini ortaya koymak amacıyla sentetik bira suyuyla araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada kimyasal analiz ve titrasyon verilerinin lineer programlaması yapılarak daha etkin bir arıtma yapılacağı gösterilmiştir.
Fox ve Stuckey (2015)	D	Membran performansı	Uygun geri yıkama periyotları	Geri yıkamanın membran basınç oranına ve kritik debiye olan etkileri incelenmiştir. Çalışmadan MBR'nin düşük kirlilik yükünde etkin bir arıtma olduğu fakat yüksek kirlilik yüklerinde kirlenme nedeniyle kesintisiz bir anMBR için en uygun geri yıkama süresi ve miktarının belirlenmesi gerektiğinden bahsedilerek bu doğrultuda denemeler yapılmıştır. Çalışmada optimal geri yıkama miktarı olarak 7,2 LMH debide 4 LPM değeri belirlenmiştir.

Tablo 4'ün devamı

Robles vd. (2014)	S	Membran performansı	Kontrol sistemi tasarımı	anMBR'de işletme maliyetlerini düşürmek amacıyla modele dayalı bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Morris Screening ve Monte Carlo metodu kullanılarak optimizasyon algoritmasıyla gaz ile geri yıkama yaparak enerji maliyetlerinin %25, fiziksel yıkama gereksiniminin %2,4 ve işletme maliyetlerinin % 53 azatılabileceği ortaya konulmuştur.
Robles vd. (2014)	D/S	Membran performansı	Membranı sistemi modellenmesi	SanMBR'de global duyarlılık analizi yaparak model tanımlamada daha az etkili parametreleri ortaya koymuş ve modelleme yaklaşımını doğrulamak amacıyla çalışma yürütülmüştür. Çalışmada Morris Screening metoduyla endüstriyel ölçekli tesisten uzun vadeli veriler toplanarak model tanımlamada kullanılan 14 faktörün 6' sının daha etkili olduğu ortaya koyulmuştur. Çalışma sonucunda membran performansına etki eden model parametrelerini tahmin etmeye yönelik veriler oluşturulmuştur.
Tian vd. (2014)	D	Membran performansı	Microbiel Fuel Cell Uygulaması	Atık su arıtmada çok etkin bir yol olan fakat çıkış suyunda tatminkar sonuç vermeyen mikrobiyel yakıt hücre uygulamasının anMBR ile birleştirildiğinde alınabilecek sonuçları görmek amacı güden çalışma yapılmıştır. Çalışmada 600 saat 100 ohm dirençli sürekli 0,132 V gerilimli sistem sayesinde %91,6 KOI ve %94,8 nitrat giderimi sağlanmıştır. Çalışma yapılan uygulama klasik anMBR ile karşılaştırıldığında kirlenmenin azaldığı görülmüştür. Çalışma sonunda anMBR ile MFC birleştirildiğinde ekonomik ve etkin bir arıtmanın sağlanabileceği vurgulanmıştır.

Tablo 4'ün devamı

Dhar vd. (2013)	D	Membran performansı	Mikrobiyel Elektrokimyasal Hücre Uygulaması	Mikrobiyel elektrokimyasal hücre öncesine ön arıtma amacıyla anMBR koyularak enerji tasarrufu sağlamak amaçlanmıştır. Çalışmada MEC ile 1-8 gün arası hidrolik bekletme zamanı ile çalışılmış, HRT artırılarak yoğunluk 7,5-14 A/m² arası değiştirilmiştir. anMBR çıkışında elde edilen çıkış suyunda ağırlıklı olarak propiyonat ve asetat içerikleri görülmüştür. Çalışmada sızıntı suyunun fermentasyona uğradığı, asetat, hidrojen gazı ve anot solunum bakterileri oluştuğu görülmüştür. Membran filtrasyonu ile oluşan fermenterler ve metagonlar MEC'ten ayrı tutulduğundan MEC'te metan üretimi oluşmamış, fermenterlerin eksikliği nedeniyle asit tuzu ve fermentasyon oranı düşse de MEC üzerinde yoğunluğun artmaması sağlanmıştır. Çalışma sonunda fermenterler, H₂ tüketicileri ve ARB'yi biyofilm içinde dengede tutmanın, yoğunluğu arttırmak ve KOI giderimi için çok önemli bir parametre olduğu ortaya konulmuştur.
--------------------	---	------------------------	---	--

Tablo 4'ün devamı

Xu vd. (2013)	D	Membran performansı	Ses aparatı Uygulaması	Aktif çamurun anMBR'de arıtılması amacıyla, yüksek frekanslı ses aparatıyla birleştirilmiş anMBR'de 54 günlük çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada ultrason, yüksek uçucu katı içerikli suyla yapılan denemelerde hem filtreleme performansını artırmak hem de membran kirliliğini önlemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada kek katmanının kontrolünde sonuç alınmasına rağmen membran filtrasyonunda etkin bir sonuç görülmemiştir. Membran yüzeyinde kalan EPS'nin yayılı kısmı ses aparatı ile giderilirken yüksek EPS içerikli kısmının kaldığı görülmüştür. Çalışma sonunda ses uygulamasının jel tabakasını çok az etkilediği, bu uygulamayla katman içerisindeki çözünebilir organik materyallerin büyük oranda giderildiği, fakat inorganik partiküllü katmanın zor kontrol edildiği görülmüştür.
Benyahia vd. (2013)	S	Membran performansı	Model geliştirilmesi	anMBR'nin optimal şartlarda işletilmesini sağlayabilmek için matematik bir model geliştirmek amaçlanmıştır. Çalışmada membran kirlenmesinde önemli bir rol oynayan çözünebilir mikrobiyal ürünlerin üretimi ve azaltılması parametrelerini model içine entegre ederek, başlangıçta AM2b adını verdikleri bir model geliştirmişler ve bu modeli iki aşamada iyileştirerek çalışma sonlandırılmıştır. Çalışma sonunda yeni önerdikleri model ile etkin bir arıtma performansı olabileceği gösterilmiştir.

Tablo 4'ün devamı

Yu vd. (2012)	D	Membran performansı	Ses aparatı uygulaması	Çevrimiçi membran kirlenme kontrolü için gerekli ultrason ekipmanı ve ekipman kullanmaksızın oluşturulan iki paralel anMBR'yi aktif çamuru arıtmak amacıyla kurulmuştur. EPS ve sistemdeki bakteri topluluklarının özelliklerini, membran kirlenme mekanizmasını daha iyi anlaşılması üzere incelenmiştir. Ultrasonun kek tabakası direncini azaltmak için etkili bir yöntem olduğundan ve kek tabakasında görece olarak yüksek miktarda bağlı EPS bulunduğu vurgulanmıştır. Ultrasona maruz kalmış filtrelenen kısım reaktöre geri gönderildiği için biyokütle içindeki bakteri popülasyonuna etki yaptığı görülmüştür.
Charfi vd. (2012)	D/S	Membran kirlenmesi	Model geliştirilmesi	Delik yapısı, kek yapısı, komple tıkanma ve yarım tıkanma adı verilen ve 1982 yılında Hermia tarafından teklif edilen bir kirlenme modelini kullanarak mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon anMBR'lerin kirlenme mekanizması hakkında çalışma yapılmıştır. Optimizasyon temeline dayandırdıkları ve literatürden aldıkları deneysel verileri kullanarak oluşturdukları kirlenme yapısına ilişkin bir model geliştirilmiştir. Membran kirlenmesi üzerine inorganik parametrelerin etkilerini inceleyerek, kek oluşumunun membran kirlenmesinde en önemli parametre olduğu ortaya konulmuştur.

Tablo 4'ün devamı

Xu vd. (2012)	D	Membran performansı	Ultrason cihazı eklenmesi	Membranın filtreleme performansını artırarak aktif çamurun uzun vadede giderilmesi amacıyla anaerobik membran biyoreaktör ve ultrason cihazını birleştirerek hibrit bir sistem üzerinde çalışılmıştır.. Ultrasonik anMBR de 1,1-3,7 gVS/l'de yükleme oranlarıyla çalıştırılarak arıtma performansı ve kirlenme mekanizmasının kontrolü üzerine yürütülen kapsamlı çalışmalar sonunda % 51,3'lük uçucu katının yok olması nedeniyle 2,7 gVS/l'de lik yükleme oranının optimal olduğu görülmüştür. Çalışmada metanojenik etkinlik nedeniyle ultrason uygulamasının anaerobik mikroorganizmalar üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı, ayrıca membran biyoreaktör işlemi esnasında ultrasonun etkin bir şekilde uygulanmasının membran kirlilik kontrolünü başarıyla kolaylaştırdığı ortaya konulmuştur.
------------------	---	------------------------	------------------------------	--

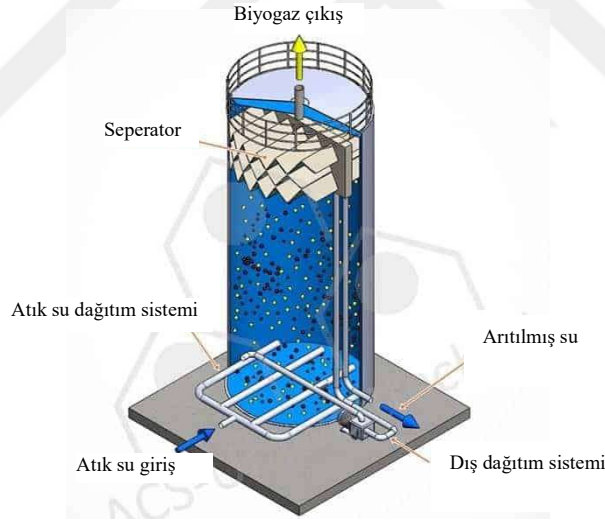
1.4. Anaerobik Membran Reaktörler

Anaerobik arıtma teknolojisi günümüzde endüstriyel atık suların arıtımında kullanılmaktadır. Anaerobik arıtma süreçleri, yüksek miktarda organik kirlilik içeren atık suların arıtılmasında oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur. Yüksek kirlilik düzeyine sahip atık suların arıtılmasında anaerobik arıtma süreçlerinin aerobik arıtma proseslerine kıyasla çok daha ekonomik olduğu kabul görmüştür ve anaerobik arıtım prosesleri son yıllarda evsel atık su arıtımında da kullanılmaktadır.

Membran biyoreaktörü, mevcut durumda kullanılan anaerobik arıtma teknolojileriyle (UASB, EGSB vb.) membran teknolojisinin birleştirilmesidir. Tesislerden çıkan kullanılmış su, içerisinde anaerobik bakteri bulunan reaktör içinde arıtılmaktadır. Bu reaktör tesisin yapısına göre yukarı akışlı, bekletmeli ve benzeri özelliklerde olabilir. Reaktör içerisinde bulunan metan bakterileri kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) adı verilen kirlilik yapılarını

kimyasal yapı taşlarına parçalayarak metan gazına dönüştürür ve bunun sonucunda atık su arıtımı gerçekleştirilmiş olur.

Atık su içerisindeki organik maddelerin havasız ortamda ayrışması en basit haliyle iki temel aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada (hidroliz ve asit fermentasyonu) organik maddelerin asit bakterileri tarafından organik asitlere, alkollere ve CO_2 'ye dönüşümü gerçekleşmektedir. İkinci aşama (metan oluşumu) ise asit bakterilerinin parçalama reaksiyonları sonucunda oluşan ürünlerin metanojenler tarafından metan, CO_2 ve suya dönüştürülmesini içermektedir. Bu işlemlerin verimli bir şekilde gerçekleşmesi atık su ve metan bakterilerinin uygun sürelerde bir araya gelmiş olması ve bakterilerin büyüme evrelerini tamamlamış olması gibi faktörlere bağlı olmaktadır. Çalışma prensibi anlatılan böyle bir anaerobik reaktörün katı model, çalışma prensibi Şekil 1'de verilmiştir. (<http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana58/bolum07.pdf>).



Şekil 1. Havasız reaktörün şematik gösterimi
(<https://www.muhendisbeyinler.net/uasb-kolon-reaktorler/>)

Anaerobik arıtma havuzundan çıkan ve yapı taşlarına ayrılmış olan atık su, membran üzerinden geçirilerek ikinci kez arıtmaya tabi tutulmaktadır. Membran, havasız kademedeki bakteriler ve arıtılmış su arasında bir geçiş bariyeri oluşturmaktadır. Membranlarda geçiş mekanizması kullanılan sisteme göre hidrolik basınç veya yoğunluk farkı dolayısıyla oluşturulacak ozmotik basınç ile olmaktadır.

Arıtılmış su “süzüntü” olarak adlandırılmaktadır ve bu su tesisin durumuna göre bir takım tali işlerde (bahçe sulama, yangın söndürme vb.) kullanılabilceği gibi tesisin bulunduğu konuma göre doğrudan alıcı ortama da bırakılabilmektedir.

Membranların fiziksel ayırma yeteneği sayesinde henüz büyüme aşamasını tam anlamıyla tamamlamamış küçük bakterilerin sistem içerisinde tutulması, geleneksel arıtma sistemlerine göre büyük avantaj sağlamaktadır. Anaerobik membran uygulamalarında henüz büyüme evresini tamamlamamış kumsu yapıdaki bakterilerin atık su ile sürüklenmesi büyük sorunlardan biri olmaktadır. Membran kullanımı ile bu sorun da giderilmiş olacaktır.

Havasız arıtma sonrasında membran kullanımının avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir.

- Çıkış suyunun KOI değerleri oldukça düşük olmaktadır.
- Sistemlerinin çıkış suyunda bakteri bulunmamaktadır.
- Çıkış suyunda bakteri bulunmaması ve suyun belirli kirlilik değerinin düşük olması suyun kullanılabilirliği açısından önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.
- anMBR sistemlerinde biyolojik arıtma kademesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu da işletmeler için daha az alan ihtiyacı anlamına gelmektedir.
- Havalı kademenin olmayışı beraberinde atık çamur oluşmayışı ve son çöktürme havuzu olmayışı anlamına gelmektedir.
- Atık su arıtma tesislerinde işletilmesi ve yönetilmesi zor olan havalı kademenin yerini membranın almasıyla hem ekonomik hem de kolay yönetilebilen tesisler oluşturulabilmektedir.

1.5. Membran Teknolojileri

Membranlar çok ince deliklere veya gözeneklere sahip olan ve farklı malzemelerden imal edilmiş geçirgen bir tabaka olarak düşünülebilir. Membranların geçirgenlik düzeyi, başka bir ifadeyle üzerindeki gözeneklerin büyüklüğü, kullanıldığı sürece göre değişmektedir. Temiz su eldesi için kullanılan membran türleri mikro gözenekli membranlar (MF), ultra filtrasyon membranları (UF), nano filtrasyon membranları (NF) ve ters osmoz (RO) membranları olarak sınıflandırılmaktadır.

Atık su arıtma teknolojisinde kullanılan membranlar ultra filtrasyon membranlarıdır ve bunların geçirgenlik düzeyi ters osmoz (RO) ve nano filtrasyon (NF) membranlardan daha fazla

olmaktadır. Membranların çalışma prensibi oldukça basittir, askıda katı madde ve diğer maddeleri yakalarken suyun diğer yüzeyden geçmesine izin vermektedir.

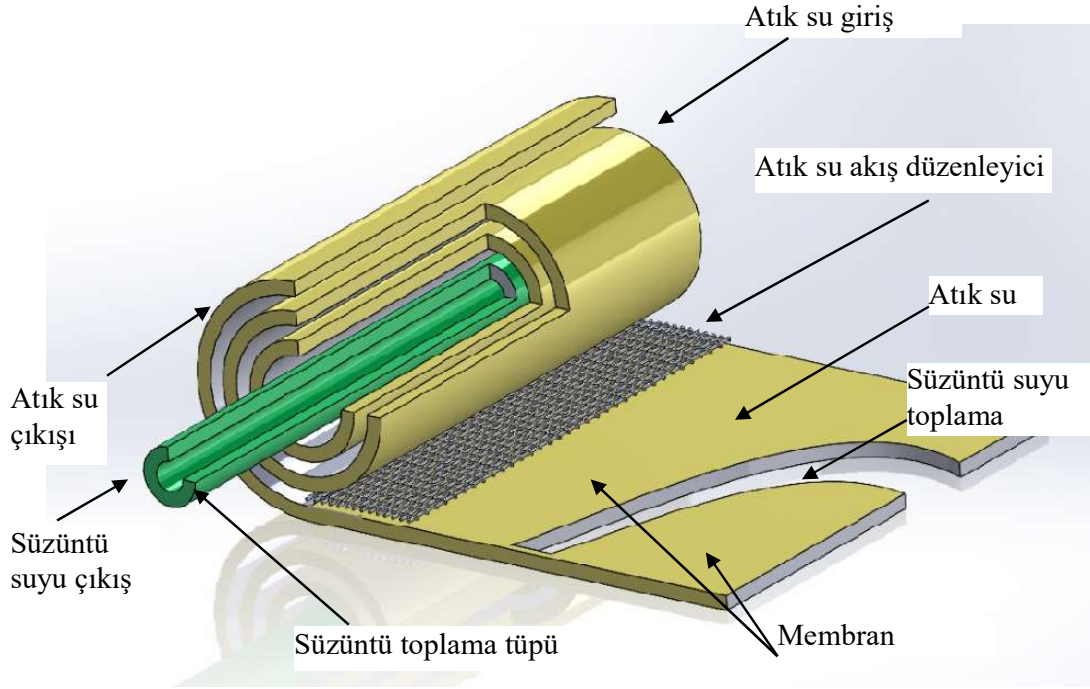
Membranların çalışması esnasında verimli çalışma durumu iki parametreyle ifade edilebilir; bunlardan birincisi seçicilik, diğeri ise sürekliliktir. Seçicilik membran yüzeyinden istenilen fazın diğeri tarafa geçmesine izin verilirken, istenmeyen türlerin ise geri döndürülmesini tanımlamaktadır. Süreklilik ise akı olarak ifade edilebilmektedir. Birimi ise $\text{kg/m}^2\text{h}$ olarak gösterilmektedir.

Membranlar düz plaka, içi boşluklu fiber, tübüler ve çoklu delik olmak üzere yaygın olarak dört farklı şekilde üretilmekte ve kullanılmaktadırlar. Düz plaka membranlar, levha şeklindedirler. Membranların bir yüzeyi aktif ayırma gerçekleştiren tabaka olup, diğeri yüzeyinden membrandan süzülen su alınmaktadır. Düz plaka membranlar genellikle destek malzemesi üzerine polimer kaplanmasıyla üretilmektedir. Böylece, membranın mekanik mukavemeti dokuma olmayan kumaş ile sağlanırken, ayırma özelliği polimer tabaka ile gerçekleşmektedir. İçi boşluklu fiber membranlar, silindir şeklinde olup ya içten dışa ya da dıştan içe çalışabilmektedir. Yani ayırma işleminin gerçekleştiği tabaka iç yüzeyde veya dış yüzeyde olabilecek şekilde üretilmektedirler.

Askıda katı madde konsantrasyonunun yüksek olduğu süreçlerde aktif tabakanın dışta olduğu membranlar, yani dıştan içe çalışan içi boşluklu membranlar tercih edilmektedir. Ayrıca bu membranlar, mekanik dayanımlarının artması amacıyla içi boş örgü ip üzerine polimer kaplanması yöntemiyle de üretilmektedirler. Bu tür membranlar güçlendirilmiş içi boşluklu fiber membran olarak adlandırılmaktadırlar.

Tübüler membranlar, silindirik şekilde olup çapları biraz daha geniştir. Özellikle yüksek askıda katı madde içeren sularda tercih edilmektedirler. Tübüler membranlar silindirik dokuma olmayan kumaşın iç yüzeylerinin polimer kaplanması ile üretilirler. Aktif tabakanın iç yüzeyde bulunduğu bu membranlar içten dışa çalışmaktadırlar.

Çok delikli membranlar, yapısında birden çok su akış kanalı içeren membranlar olarak tanımlanırlar ve içten dışa prensibi ile çalışmaktadırlar. Bu membranlar polimerik veya seramik olabilir. Fakat genellikle seramik membranlar bu tipte üretilmektedirler. Membranın yapısal gösterildiği bir çizim Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Membranın yapısal gösterimi (<https://www.antiskalant.net/>).

1.6. Membran Sistemlerinin Atık su Arıtma Tesislerine Entegrasyonu

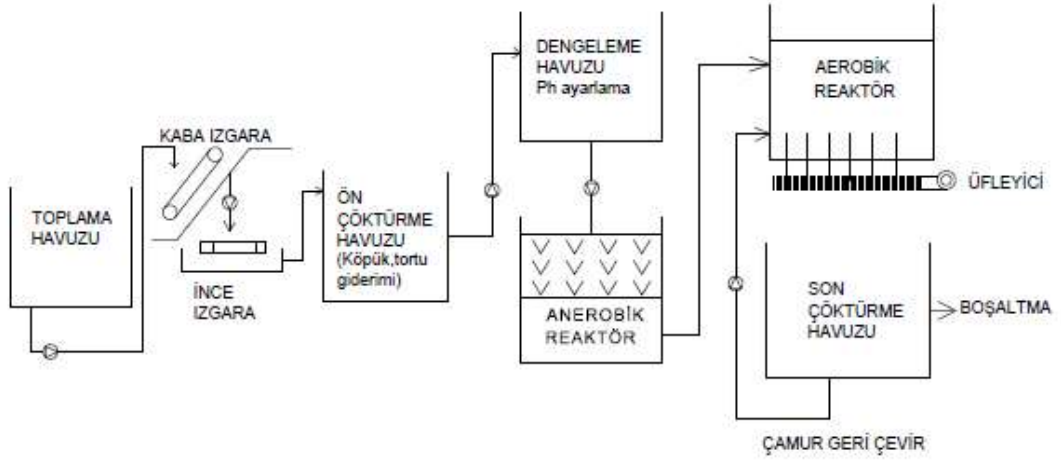
anMBR'ler havasız reaktörler ile membran teknolojisinin birleştirilmiş şeklidir. Kimyasal ve biyolojik arıtmadan sonra, havalandırma havuzu yerine ultrafiltrasyon (UF) veya mikrofiltrasyon (MF) membranları kullanılarak ikinci kademe arıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. anMBR'ler ile azot giderimi de yapılabilmektedir. Geleneksel arıtma metodlarının bazı dezavantajlarını ortadan kaldıran bu sistemler geleceğin ileri arıtım teknolojileri arasında önemli bir yere sahip olmaya aday gözükmemektedir. anMBR arıtma teknolojisi, geleneksel biyolojik ve kimyasal arıtma prosesleri ile karşılaştırıldığında düşük biyolojik parçalanabilirliğe sahip olan atıklar için yüksek KOI giderme verimliliğine sahiptir. Ayrıca anMBR sistemleri geleneksel sistemlerden çok daha az yer kaplamaktadırlar. Özellikle anMBR tekniğinin kullanıldığı durumlarda yüksek arıtma verimliliği sağlanacak ve havasız reaktöre gerek kalmayacaktır. Böylece toplam yerleşim ve inşaat alanında % 70'in üzerinde tasarruf sağlanabilecektir. Aynı zamanda havasız arıtmaya ihtiyaç olmaması nedeniyle hava üfleyicilerin tüketileceği elektrikten ve arıtma çamuru bertaraf maliyetlerinden de kurtulmuş olacaktır. Anaerobik reaktörde negatif basınçta çalışan daldırma tip membran filtreler veya pozitif basınçta çalışan filtreler uygulanabilirken, atık su 0,2 mikron büyüklüğünde gözenekleri

olan filtre dokusundan geçirilmektedir. Atık suda bu büyüklüğün üzerinde bulunan tüm katı maddeler tutulurken hemen hemen hiçbir katı madde ve mikroorganizma içermeyen atık su geri kazanılmaktadır. Membran filtre dokusu üzerinde biriken atıklar, arıtılmış atık suyla yapılan periyodik ters yıkama ve kimyasal temizleme süreçleriyle fiziksel ve kimyasal olarak filtreden temizlenmektedir. Filtre üzerinde tutulan atık ve büyümekte olan bakteriler tekrar sisteme geri döndürülmektedirler. Bu atıklar tekrar biyolojik arıtma sürecine alınmaktadırlar.(<https://aosmith.com.tr/teknolojiler/membran-teknolojileri/>)

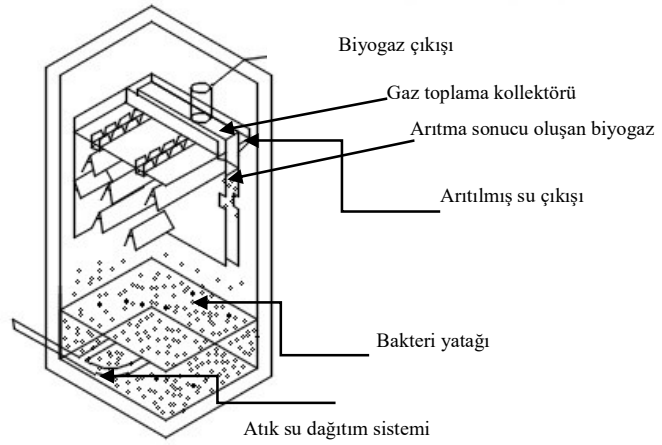
1.7. Geleneksel Arıtma Sistemleri

Klasik bir arıtma sistemi için şematik resim Şekil 3'te görülmektedir. Şematik resimde de görüldüğü gibi klasik arıtma sistemlerinde istenmeyen maddelerin tesise girişini engellemek için kaba ızgara ve devamında ince ızgara ile ön arıtma işlemi gerçekleştirilir.

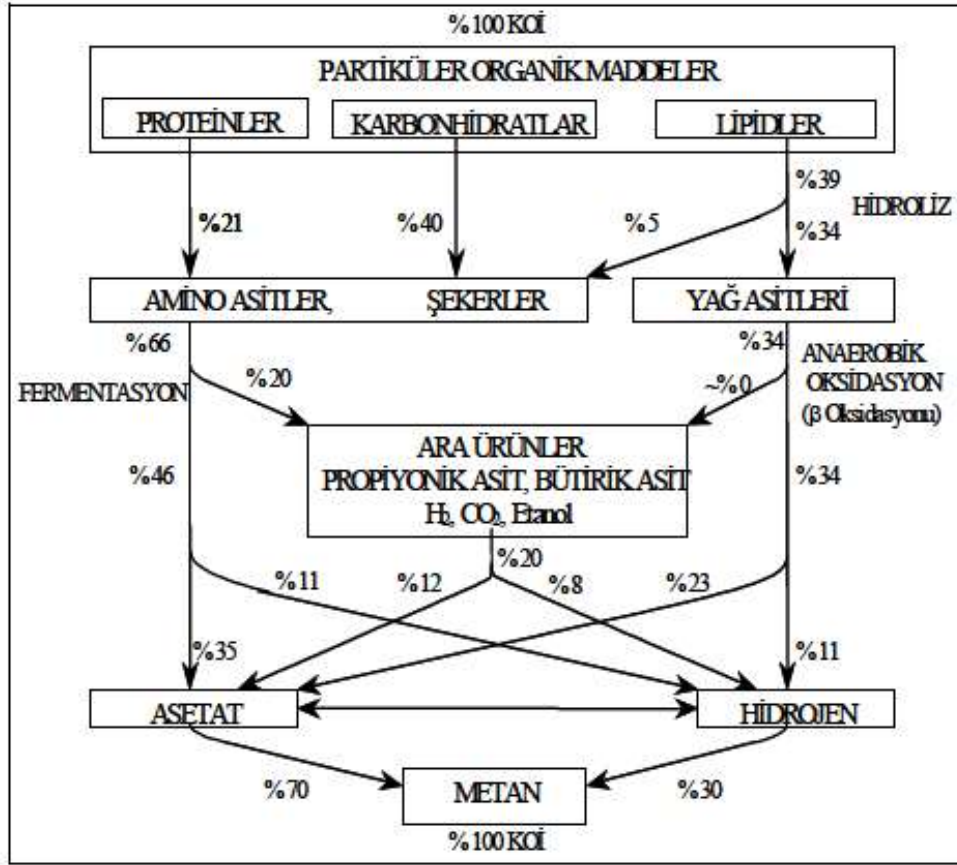
Büyük debilerde atık suyu olan tesislerde anaerobik reaktöre gelen yükü azaltmak için ön çökeltme havuzu kullanılır. Atık su ön çökeltme havuzunda kaba partiküller ve köpük, yağ istenmeyen fiziksel yapılardan arındırılır. Anaerobik reaktörlerde uygun bakteri gelişimini sağlamak ve yüksek verim almak için suyun karakteristiklerini nötr hale getirmek gerekmektedir. Bu nedenle atık su ön çökeltme havuzundan sonra dengeleme havuzuna alınır ve uygun kimyasal eklenerek istenilen pH değerine (6-8) getirilmeye çalışılır. Nötrleştirme işlemi için genel kabul görmüş bir kimyasal olan ve "kostik" olarak bilinen sodyum hidroksit kullanılır. Uygun pH aralığına getirilen atık su Şekil 4' de görüldüğü gibi santrifüj pompalarla anaerobik reaktöre beslenerek atık su ile anaerobik bakterinin teması sağlanır. Bu temasta atık su içinde bulunan bileşikler metan bakterisi tarafından yapı taşlarına ayrılarak Şekil 5'te gösterilen reaksiyon gerçekleşir.



Şekil 3. Klasik bir arıtma tesisinin şematik görünümü



Şekil 4. Anaerobik reaktörün içyapısının şematik gösterimi

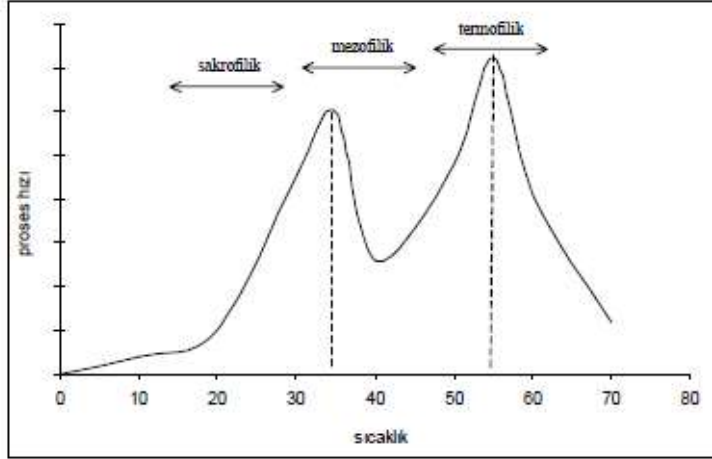


Şekil 5. Anaerobik reaktörde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar (Batstone vd., 2002) (<http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana58/bolum07.pdf>)

Bu kimyasal parçalanma sonucunda CO₂, CH₄ ve H₂S gibi gazlar oluşmaktadır. Oluşan bu gazlar reaktörün üst kısmında bulunan plastik esaslı bir modülde atom ağırlıkları farkı esasına dayalı bir uygulamaya ile atık sudan ayrıştırılır.

Havasız arıtma kademesinde sistemin performansını belirlemek için kullanılan parametrelerden biri, oluşan metan miktarıdır. Üretilen metan miktarına bakılarak arıtma sürecinin verimli çalışıp çalışmadığına karar verilebilmektedir. Havasız arıtma sürecinde son ürün olarak üretilen metanın KOI eşdeğeri $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ bağıntısı yardımı ile hesaplanmaktadır. Denklem göre standart şartlar altında (0°C, 1 atm basınçta) 1 mol CH₄'ın (22.4 litre) oksidasyonu için 2 mol (64gr) O₂ gereklidir. Standart şartlarda giderilen 1 gr KOI için 0.35 lt CH₄ üretilmektedir. Bu miktar, 35°C sıcaklık ve 1 atm basınçta 0,395 lt CH₄/gr KOI giderimine karşılık gelmektedir. Aynı zamanda geleneksel bir arıtma tesisinde üretilen CH₄ oranı arıtmanın kalitesi ve kimyasal arıtma performansı hakkında bilgi de vermektedir (Franklin ve Stensel 2002).

Anaerobik reaktörün içinde bulunan metan bakterileri çalışma sıcaklıklarına ve bulunduğu iklim koşullarına göre farklı özellikte olabilmektedir. Her bir bakterinin en verimli çalıştığı sıcaklık aralığı değişmektedir. Yaygın olarak kullanılan bakteri türünün mezofolik (35⁰ C ye kadar verimliliği sıcaklıkla artan) bakteri olduğu bilinmektedir.



Şekil 6. Anaerobik bakterilerin sıcaklık ve performans ilişkisi (Joseph, 2019)

Burada oluşan metan gazının kirleticiliği CO₂ gazına oranla 5 kat daha fazladır. Bu nedenle bu metan gazı istenirse gerekli saflaştırma işlemlerinden geçirilerek yakıt olarak kullanılabilir. Yatırım maliyet yüksek olan saflaştırma işlemini yapmak istemeyen işletmeler oluşan metan gazını gaz yakma bacalarında yakarak atmosfere yanma ürünleri olarak vermektedirler. Diğer gazlar ise varsa havalı arıtma kademesine verilerek havalı arıtma aşamasında katalizör etkisi göstermeleri beklenmektedir. Havalı arıtma olmayan işletmelerde ise gerekli saflaştırma işlemleriyle bertaraf etmek zorunluluğu oluşmaktadır. Anaerobik reaktöre beslenecek olan suyun pH değerinin asidik ya da bazik yapıda olması reaktörün içerisindeki bakteri dengesinin bozulmasına, arıtma kalitesinin düşmesine ve devamında bakterilerin ölmeye başlamasına neden olabilmektedir. Reaktörde ölmeye başlayan bakteriler suyla beraber sürüklendiği için kolayca gözlemlenebilmektedir. Anaerobik membranların işletilmesi birkaç basit parametrenin kontrolüyle kolay olabilmekte iken çok fazla bakterinin bir arada bulunduğu havalı kademenin işletilmesi ve kontrolü çok daha zor ve maliyetlidir.

1.7.1. Aerobik Reaktörlerin İşletme Zorlukları

Aerobik reaktörlerin, uygun mikroorganizma gelişimini ve çamur özelliklerinin oluşumunu sağlamak için aktif çamur sistemleri (MLSS) konsantrasyonları 2.000 – 4.000 mg/l, F/M oranı ise dizayna bağlı olarak 0,03-0,4 (kgBOI₅/(kgMLSS·gün)) olacak şekilde işletilme zorunluluğu bulunmaktadır. Reaktör içinde gelen atık su ve aktif çamur karıştırılarak ve uygunkoşullar sağlanarak reaktörün verimli bir şekilde çalışması sağlanmaktadır. Örneklendirmek gerekirse bu koşullar karbon ve amonyum giderimi için oksik/aerobik veya denitrifikasyon için anoksik/anaerobik olmalıdır. Havalı reaktör adımında atık su bileşiklerinin indirgenmesi sağlanmaktadır. Biyolojik(havalı) arıtmadan sonra karışım, çamurun arıtılmış sudan sedimentasyon ile ayrıldığı son çöktürme tankına beslenmektedir. Çökeltme tankında çamur ve su fazının ayrılması sağlandıktan sonra çökelmiş çamur aktif çamur reaktörüne geri devrettirilerek çamurun sistemde kalması ve atık suyun istenilen çıkış değerlerinde boşaltılması sağlanmaktadır. (KOI, BOI ve Top-P konsantrasyonlarının arıtılması ile)(Kaleli vd.,).

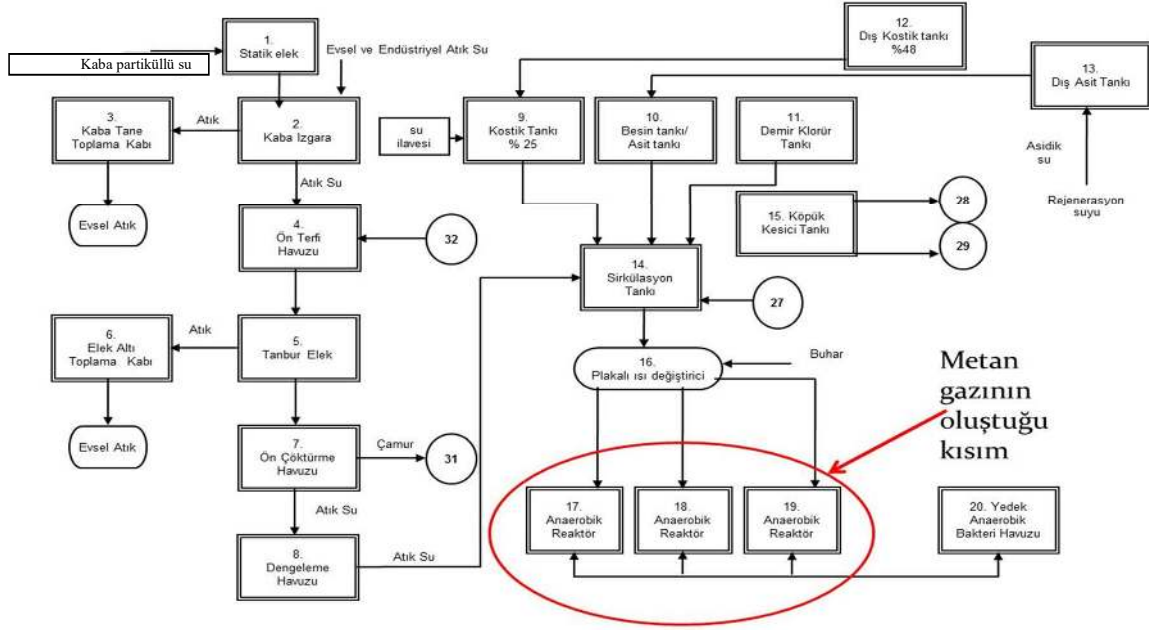
Sürecin devamında çok çeşitli ileri arıtma yöntemleri uygulanabilmektedir. Çamur şartlarının ideal olmaması durumunda, çamurun düzgün bir şekilde çökmemesi sorunuyla karşılaşılır ve bu durum çıkış suyunun bozulması sonucunu doğurur. Böylece, resmi kurumlar tarafından müsaade edilen boşaltım değerleri sağlanmamış olacaktır.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda anlaşılabileceği üzere havalı kademe arıtma reaktörünün işletilmesi zor ve maliyetli bir süreçtir. Havalı arıtma kademesinin bertaraf edilmesinin işletmelere hem maliyet hem de esneklik açısından büyük miktarda fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

1.7.2. Geleneksel Atık Su Arıtma Tesislerinin İşletilmesi

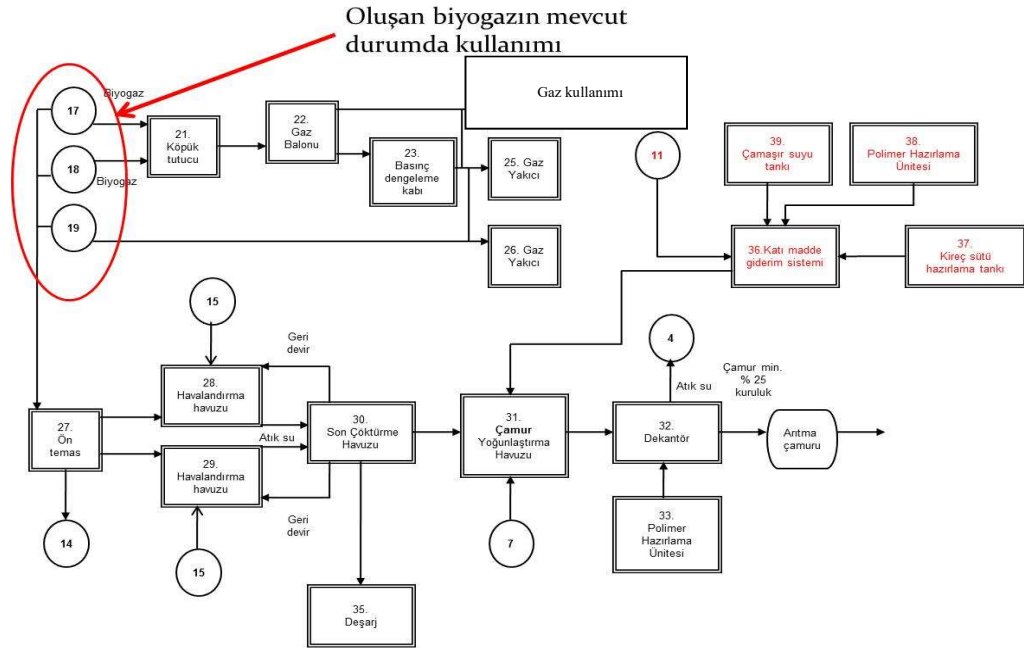
Günümüz şartlarında çok sayıda işletme kolunun atık suyu oluşmaktadır. Oluşan bu atık sular işletmenin yapısına ve konumuna bağlı olarak bazen alıcı ortama (dere, deniz, göl vb.) bazen de kanalizasyona bırakılmaktadır. Kanalizasyona bırakılan atık sular ise yerel yönetimlerce arıtmadan geçirilerek alıcı ortama bırakılmaktadır. Alıcı ortama deşarj limitleri bazı yönetmelik ve kanunlarca belirlenmiştir. Atık su içindeki kirlilik düzeyini tanımlayan bazı parametreler vardır. Bunlardan en sık kullanılan ve belirleyici olan üçü, sırasıyla kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOI) ve askıda katı madde miktarıdır (AKM).

Şekil 7 ve Şekil 8'deki akım şemalarında klasik bir atık su arıtma tesisinin akış diyagramı görülmektedir.



3

Şekil 7. Geleneksel atık su arıtma tesisi için örnek proses akış şeması



4

Şekil 8. Geleneksel atık su arıtma tesisi örnek proses akış şeması (devam)

Şekilde belirtildiği gibi alıcı ortama deşarj yapılabilecek bir atık su arıtma tesisinde havalı ve havasız arıtma kademeleri olması bir zorunluluk haline gelmektedir. Havalı arıtma kademesi, işletmesi zor ve sürekli kontrol altında tutulması gereken bir süreçtir.

Bu sistemin düzgün işletilebilmesi için yalnızca çamur yaşının kontrol edilmesi yeterli değildir. Bunun yanında F/M oranı, hacimsel yükleme, oksijen çözünürlükleri ve mikrobiyolojik inceleme de gerekmektedir. Literatürde çamur yaşı havalandırma tankındaki toplam çamur miktarının, geri devir ile atılan çamur miktarı ve çıkışta sistemden uzaklaştırılan AKM değerinin toplamına bölümü ile hesaplanmaktadır. Ancak çıkış AKM değerinin 50 mg/L civarında olduğu kabul edilirse 3.000 m³/gün debi ile atılan toplam AKM 150 kg olmaktadır. 20.000 kg AKM girişinin bulunduğu ve geri devir ile yaklaşık 2000-2500 kg çamur uzaklaştırıldığı bir sistemde çıkış AKM değeri ile atılan 150 kg göz ardı edilebilir bir büyüklük olmaktadır.

Sistem dengesinin hiç değiştirilmemesi ve rutin çamur atma işine devam edildiğinde sistemin doğru çalışabilmesi için havasız kademedeki gelen bakteri kaçaklarının önlenmesi de gerekmektedir.

Havalı arıtma kademesinde F/M oranının 0,1-0,3 aralığında tutulma zorunluluğu bulunmaktadır. İstenmeyen bir bakteri türü olan ipliksi bakterilerin gelişmesi için 0,1'in altındaki F/M oranları ile birlikte ortamda organik asit ve basit şekerlerin bulunması, oksijen konsantrasyonunun düşük olması ve azot eksikliği gibi şartların bir arada olması gerekmektedir. Bununla birlikte, havalandırma tanklarına yüksek kirlilik yüküne sahip su beslenmemesi gerekmektedir. Buradan yola çıkarak sanayi tesislerinde havalı ve havasız kademelerin bir arada bulunmasının zorunlu olduğu söylenebilmektedir. Havalı kademeye yüksek kirlilik yüküne sahip atık su beslemesi yapıldığında atık su özelliğinden dolayı organik asitler ve basit şeker havalandırma tankına girmektedir. Ancak bu atık suyun bir anaerobik kademeye girmesiyle bu yapılar giderilmekte ve bu sayede ipliksi bakterinin artması riski ortadan kalkmaktadır. Havalı kademe için çok önemli bir parametre olan oksijen çözünürlükleri de artmaktadır. Ayrıca sistemlerin yüksek F/M oranı ile çalıştırılması çamur üreme hızını yüksek besin girişi oluşması nedeniyle yükseltmekte ve artık çamur miktarının artmasına sebep olmaktadır.

Anaerobik reaktör suyu çıkış değerlerinde uçucu asit değerlerinin 2'den küçük olması gerektiği bilinmektedir. Uçucu asit değerlerinin 2'den büyük olması veya büyüme eğilimine girmesi durumunda reaktörlerin verimli çalışma özelliklerini kaybettiği yorumu yapılabilmektedir. Anaerobik reaktör çıkış suyunda VFA değerinin artması durumunda yüklerin azaltılmasının da doğru bir yaklaşım olmadığı bilinmektedir. Böyle bir durumda

VFA/KOI oranına bakmak gerekmektedir. VFA/KOI oranı 0,35 değerinden yüksek 0,15'den de düşük olmaması gerektiği bilinmektedir. VFA/KOI değeri 0,25 civarlarında tutulmaya çalışılır. VFA/KOI değerinin düşük ya da yüksek olması bir süre sonra reaktörlerdeki granül yapı bozulması ve kumsu bir yapının oluşması aşamasının başladığını göstermektedir. Atık sudaki azot ve fosfat değerlerinin sırasıyla 15 mg/l'te ve 25 mg/l'te değerlerinin altına düşmesi durumunda belirli aralıklarla dengeleme havuzuna azot ve fosfat takviyesi yapılarak reaktörlerin istikrarlı çalışması sağlanabilmektedir.

Anaerobik reaktöre beslenen suyun pH'ı 6,5 değerlerinde olması gerektiği bilinmektedir. Bu sayede metan bakterisi ile karşılıklı fayda sağlayan bir yaşam içinde olan asit bakterisi için uygun ortam oluşmaması sağlanmaktadır. Asit bakterileri için en uygun ortamın pH 7 ila 7,5 arasında olduğu vereaktöre beslenen suyun pH'ının 7-7,5 aralığına getirilmesi halinde asit bakterilerinin faaliyetlerinin desteklendiği bilinmektedir.

Atık su arıtma performansında ön çöktürme tankının verimi de çok önemli parametre olmaktadır. Reaktörlere beslenen suyun AKM'sinin 1000 mg/l'te değerini üzerinde olması halinde her AKM henüz büyümemiş bakterilerin kaçmasına neden olabilmektedir. Aynı şekilde reaktörlerin içinde akış hızının 1,2 m/s nin üzerine çıkması durumu üreme halindeki bakteriler sistemden kaçabilmektedir.

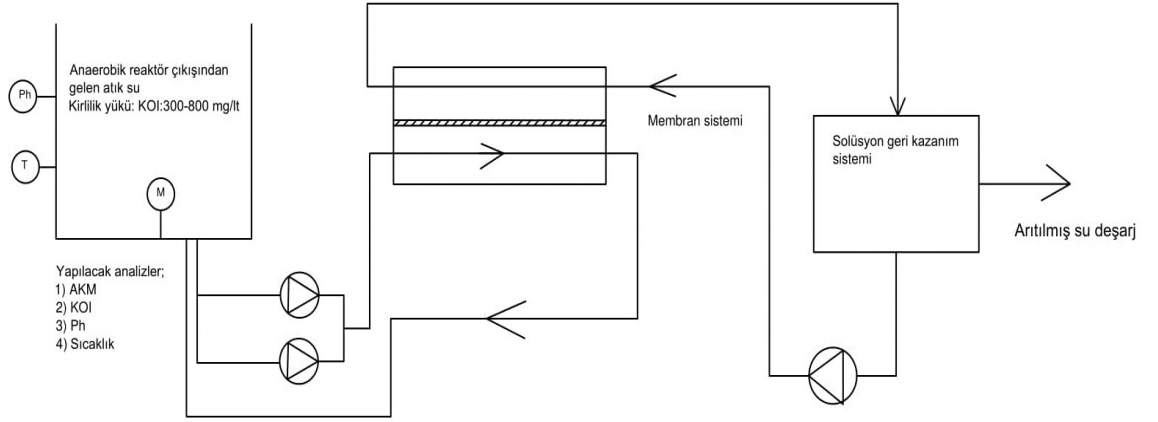
Bütün atık su arıtma işletmeciliği verilerine bakıldığında anaerobik ve aerobik kademelerin bir arada etkin bir şekilde kullanılmasının zor bir süreç olduğu görülür. Anaerobik reaktör çıkışına koyulacak membran uygulaması ile aerobik arıtma aşaması bertaraf edilerek, sürecin basitleştirilmesine ilave olarak arıtma kalitesinde önemli bir rolü olan anaerobik reaktördeki kumsu yapıdaki metan bakterilerinin sistemde tutulması sağlanabilmektedir.

1.8. Anaerobik Membran Biyoreaktörler

Daha önce Şekil 3'te de görüldüğü gibi klasik arıtma sistemlerinde yer alan ön arıtma ve dengeleme süreçleri anMBR uygulamalarında da bulunmaktadır ve membran sistemlerinin ön arıtma prosesleri klasik aktif çamur sistemleriyle farklılık göstermemektedir. Anaerobik bakterilerin sürünmesine neden olabilecek ve ayrıca membrana zarar verebilecek büyüklükteki parçaları uzaklaştırmak amacıyla ikinci ince bir ızgara olması sistem açısından olumlu olmaktadır.

Membran modüllerinin atık su arıtma tesislerine uygulanmasında iki tip yaklaşım olabilmektedir. Bunlardan biri doğrudan anaerobik reaktör içine daldırma yapmak, diğeri ise harici bir tankı sisteme entegre etmektir.

Şekil 9’da basit anlamda membran uygulamasının sistemdeki yeri görülmektedir.



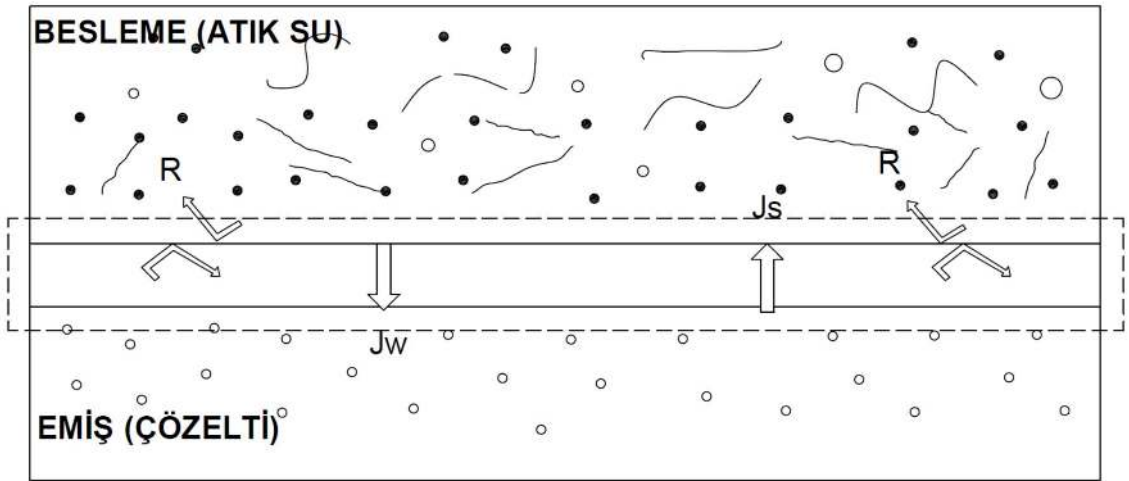
Şekil 9. Membran uygulamasının geleneksel arıtma sistemindeki konumu

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Endüstriyel atık suların arıtılmasında günümüzde en önemli sorunlardan biri kirliliğin arıtılması esnasında oluşan atık çamur oluşumudur. Mevcut uygulamalarda anaerobik reaktör ve devamında aerobik reaktör ile izin verilen alıcı ortam deşarj kirlilik değerlerine inilebilmektedir. Son yıllarda hem çamur oluşumunu azaltmak hem de anaerobik reaktörün etkinliğini artırmak için anaerobik membran uygulaması yapılmaktadır. Anaerobik membranda atık su içinde kirlilik oluşturan bazı unsurlar tutularak kirlilik değeri düşürülmektedir.

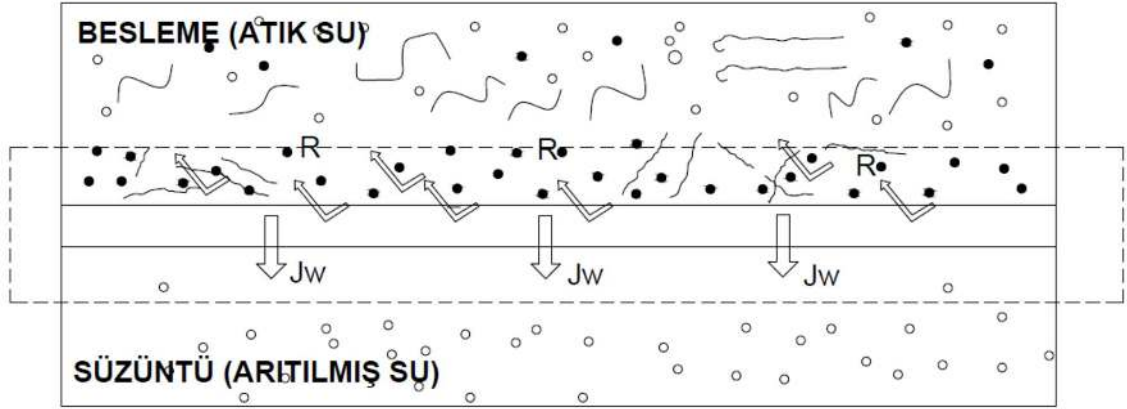
Atık su arıtma sistemi uygulamalarında kullanılan iki tür membran yaklaşımı vardır. Bunlardan ilki Şekil 10'da sistem şeması gösterilen ileri osmoz uygulamasıdır.

Bu membran uygulaması yoğunluk farkı ile oluşan ozmotik basınç ilkesine göre çalışır. Bu sistemde membranın bir tarafından atık su, diğer tarafından ise çözelti suyu akmaktadır. Yoğunluk farkı nedeniyle atık su çözelti tarafına geçerken kirlilik oluşturan unsurlar membran tarafından tutulur. Aynı şekilde atık su tarafına geçmek isteyen çözelti yine membran tarafından tutulur.



Şekil 10. İleri osmoz membran sistemi

İkincisi ise Şekil 11'de sistem şeması gösterilen ters osmoz uygulamasıdır. Bu membran uygulamasında atık su arka tarafta kullanılan bir pompa sistemiyle basınçlandırılarak membran üzerinden geçmeye zorlanır. Dışarıdan oluşturulan bir basınç yardımıyla atık su membran üzerinden diğer tarafa geçerken kirlilik oluşturan unsurlar membran tarafından tutulur.



Şekil 11. Ters osmoz membran sistemi

Gerek literatürde yapılan çalışmalar gerekse saha uygulamaları anMBR uygulamalarında karşılaşılan en büyük sorunun membran üzerinden yeterli miktarda süzüntü suyunun geçirilemeyişi ve arıtma performansında yaşanan düşüşler olduğu ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasında, anMBR performansına akış hızlarının ve sıcaklığın etkisini araştırmak ve en uygun çalışma aralıklarını belirlemek hedeflenmiştir. Atık suyun membran üzerinden, membranın her iki tarafında oluşturulan farklı yoğunluktaki akışlar nedeniyle oluşan ozmotik basınç yardımıyla geçirildiği bir sistem tasarlanmıştır. Sistem analizi, membranın iki plaka arasındaki akış olarak kabul edilmesi esasına dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çözümlemelerde, membranın ayırdığı besleme ve emiş tarafı ortalama giriş hızları ve denge durumundaki sıcaklıklar değiştirilerek membrandan geçen akış debisi ve dolayısıyla membran performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Problem zaman bağımlı çözülerek problemin yakınsaması beklenmiştir. Problemden su akışı, $\text{kg/m}^2\text{h}$ biriminde elde edilmiştir. Çalışmada su akışı sürekli izlenerek, su akışının son iki değeri arasındaki değişim, farklı akış analizleri için de kabul gören 10^{-6} değerinin altına düşünce problem yakınsadığı kabul edilerek iterasyon sonlandırılmıştır.

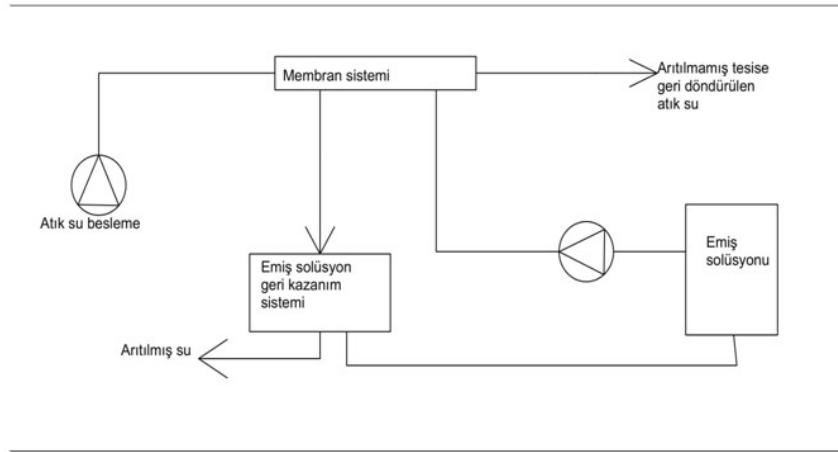
2.1. Sayısal Çalışmalar

Bu çalışmada, atık su arıtmada uygulamada karşılığı olan İleri Osmoz sistemi OpenFOAM açık kaynak kodu kullanılarak modellenmiştir.

2.1.1. İleri Osmoz Uygulamasında OpenFOAM’da Membran Modeli

Bu çalışmada açık kaynak kodlu OpenFOAM® programı kullanılmıştır. Çözümleme için OpenFOAM kaynak araç takımından yararlanılmıştır. OpenFOAM, OpenCFD Limited’in tescilli ticari markası olup CFD paketleri geliştirmektedir. Son on yılda önemli ölçüde ve geniş bir özellik yelpazesi ile kolayca genişletilebilir çerçevede ve sağlam çözüm algoritmaları sunmaktadır.

FO membran uygulaması için şematik resim Şekil 12’de görülmektedir. Buradaki membranın işlevi, istenen fazla istenmeyen fazı, istenmeyeni sınırlandırarak istenenin geçmesine izin verme yolu ile birbirinden ayırmaktır. Buradaki membran sistemler analiz edilirken bu alandaki genel terminolojiden faydalanılmıştır. Membrandan geçerek atık su ile kirlilik unsurlarının birbirinden ayrılması beklenen kısma “besleme” (feed), başlangıç çözeltisi ile birlikte ilave parçacıklar içeren kısma “emiş” (draw) denilmektedir. Atık suyun membrandan geçmesini sağlayan itici gücün türü, kullanılacak olan filtreleme süreci ile ilgilidir. Eğer itici güç kimyasal potansiyel fark nedeniyle oluşan basınçtan kaynaklanıyorsa buna FO denilmektedir. Bu nedenle FO olduğu zaman uc-uca filtrasyon yerine karşıt yönlü paralel akışlı filtrasyon tercih edilmektedir.



Şekil 12. İleri osmoz sisteminin şematik gösterimi

2.1.2. İleri Osmoz Yaklaşımı ile Modelleme

Şekil 13'teki şematikte görüldüğü gibi besleme tarafı ile emiş bir membranla ayrılmaktadır. Atık su besleme tarafından akarken istenmeyen kısımlar membran tarafından tutulmaktadır ve emiş tarafına sadece J_w (göreceli olarak temiz olan su) geçmektedir.

Besleme ve emişin kimyasal potansiyellerinin (ilave edilen kimyasalların oransal değeri) çözelti-membran arayüzündeki membranda denk olduğu varsayımına dayanarak analitik bir model kullanılmıştır. Bu modelde her bileşene ait taşınım denklemi Fick yayılım ifadesini de içermektedir. Buradaki mekanizma şöyle işlemektedir: membranın ayırdığı her iki tarafta yoğunluk farkı nedeniyle karşı tarafa geçmeye çalışan unsurlar bulunmaktadır. Ancak, membranın geçirgenlik düzeyi sadece suyun geçişine izin verdiği için, çözelti ve atık suyun içindeki kirletici unsurlar membran tarafından geri çevrilmektedir. Bu mekanizmanın şematik gösterimi Şekil 10'da verilmiştir.

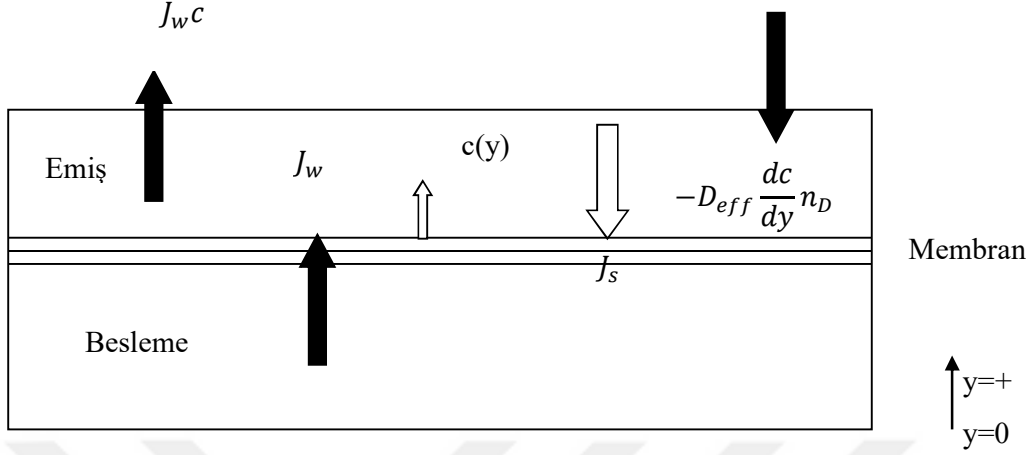
Çözünendeki kimyasal bileşenin kütle kesri m_A için taşınım ve kütle transferi ifade eden denklemler Gruber ve arkadaşları tarafından aşağıda verilmiştir (Gruber vd. 2011).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot [\mu (\nabla U + \nabla U^T)] - \nabla p + \rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho m_A}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U m_A) - \nabla \cdot [\rho D_{AB} \nabla m_A] = 0 \quad (3)$$

Şekil 13'te sayısal çözüm bölgesiyle ilgili akı vektörleri görülmektedir. Burada membranın ayırdığı besleme ve emiş bölgelerindeki oklar; membrandan emiş tarafına geçen göreceli olarak temiz su J_w , çözelti tarafından besleme tarafına geçmeye zorlayan J_s 'yi temsil etmektedir. Ayrıca çözünen kimyasal molar değişimlerinin yönleri de oklarla gösterilmiştir.



Şekil 13. Akı vektör yönlerinin gösterimi

Membran boyunca basınç farkı $\Delta P = 0$ kabul edilmiş ve su ve çözelti için taşınım denklemleri elde edilmiştir. Böylece, membrandan geçen akı, membran boyunca sıfır basınç düşüşü nedeniyle taşınım-yayılm terimleriyle dengelenerek hesaplanmıştır. Bu çalışmada membranın mekanik özelliklerinin homojen olduğu ve çözelti-çözücü eşleşmesinin olmadığı kabul edilmiştir. Membrandan geçen su akısı aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır(Koch, 2015).

$$J_w = A(\pi_I - \pi_{F,m})n_D \quad (4)$$

$$J_s = -B(c_I - c_{F,m})n_D \quad (5)$$

Burada J_w , membrandan emiş tarafına geçen göreceli olarak temiz su akısı, J_s ise emiş tarafından besleme tarafına geçmeye zorlayan ancak membran tarafından engellenen çözelti akısıdır. A ve B katsayıları deneysel olarak elde edilmiştir ve katsayıları veren ifadeler 11, 12 denklemleriyle hesaplanmaktadır

2.1.3. Open Foam Uygulamalar

2.1.3.1. İleri Osmoz Membran Filtrasyonu

Problem için geçerli denklemler daha önce (1), (2) ve (3) denklemlerinde sırasıyla süreklilik denklemi, momentum denklemi ve kütle transferi denklemi şeklinde verilmiştir. Bu

çalışmada geliştirilen kod, sisteme dışarıdan etki eden kuvveti sadece yer çekimi kuvveti, akışı laminer sıkıştırılamaz akış ve çözümü izotermal koşullarda kabul etmektedir. Çözücü kod, bu ana denklemler ile birlikte bölüm 2.1.3.5.'te verilen membran problemine özgü yardımcı denklemleri ve sınır şartlarını birlikte kullanarak çözümü gerçekleştirmektedir (Gruber vd. 2011).

Daha önce belirtildiği gibi, uygulanan model besleme ve emişin molar konsantrasyon seviyesinin, çözelti-membran arayüzünde ve ilgili membran yüzeyi ile dengede olduğu varsayılarak geliştirilmiştir. Burada, membranın bir yüzeyi besleme tarafına, diğer yüzeyi de emiş tarafına bakmaktadır. Şekil 10'da gösterildiği gibi bir tarafta atık su, diğer tarafta çözelti vardır. Membrandan geçen su akışı, daha önce ifade edilen koşullar altında kütle transferi denkleminin çözülmesiyle elde edilmektedir. Çalışmada literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi membran mekanik özelliklerinin homojen ve kimyasallarla su arasında herhangi bir kimyasal etkileşimin olmadığı kabul edilmiştir.

2.1.3.2. Zayıf Sıkıştırılabilir Akış Kavramı

İleriosmoz sistemin modellenmesinde, atık suyun ağırlıklı olarak su içerdiği kabul edilir. Bu su içeriğinde istenmeyen kirlilik unsurları bulunmaktadır ve bu unsurlar akışla birlikte membran yüzeyi boyunca akmaktadır. Mevcut çözümde membran içindeki akış modellenmemekte ancak, membran boyunca çözünen konsantrasyon ve ozmotik basınçla ilgili verileri oluşturan sınır şartları kullanılmıştır. Akışın sıkıştırılamaz, izotermal ve laminer olduğu kabul edilmiştir. Yoğunluk ile basınç birbiriyle ilişkilendirilmemektedir.

Membran üzerinden geçerken partikül veya çözünen kısmın ayrışması nedeniyle kimyasal içerikte konsantrasyon farkı oluşur. Bu nedenle yoğunluk, viskozite ve difüzyon katsayısı gibi fiziksel özellikler membranın iki tarafında farklılık gösterir. Buradan anlaşılabileceği gibi akış sıkıştırılamaz akış olmasından bağımsız olarak kimyasal içerik değişimine bağlı olarak yoğunluk değişimi söz konusudur. Bu durum zayıf sıkıştırılabilir akış olarak değerlendirilir. Bu yoğunluk farkı, çözünen kısmın membranın bir tarafında tutulmasından kaynaklanmaktadır. Membranda tutulan bu suyun fiziksel özelliklerinin sürekli değişimi sonucunu doğurmaktadır.

2.1.3.3. Kabuller

Önceki çalışmalarda yoğunluk, viskozite, kütle difüzyon katsayısı ve ozmotik basıncın çözünen kütle kesrine bağlı olduğunu gösterilmiştir (Gruber vd. 2011). Çözünen kütle kesrinin

bu değişkenlere bağlı olduğunu göstermek için ampirik denklemler aşağıda (6)'den (9)'e kadar olan denklemlerde gösterilmiştir (Gerald vd. 2001). Kabuller şöyle sıralanmaktadır.

1. Sıvı üzerine etki eden ana kuvvet sadece yerçekimi kuvvetidir.
2. Basınç gradyanı membran boyunca sıfırdır.
3. Çözelti miktarı sabit kalmaktadır.
4. Yoğunluk, viskozite ve difüzyon katsayısı, çözünen kütle kesrine bağlı olarak değişmektedir.

$$\rho = 997.1 + (694)m_A \quad (6)$$

$$\mu = 0,89 \cdot 10^{-3} + (1,45 \cdot 10^{-3})m_A \quad (7)$$

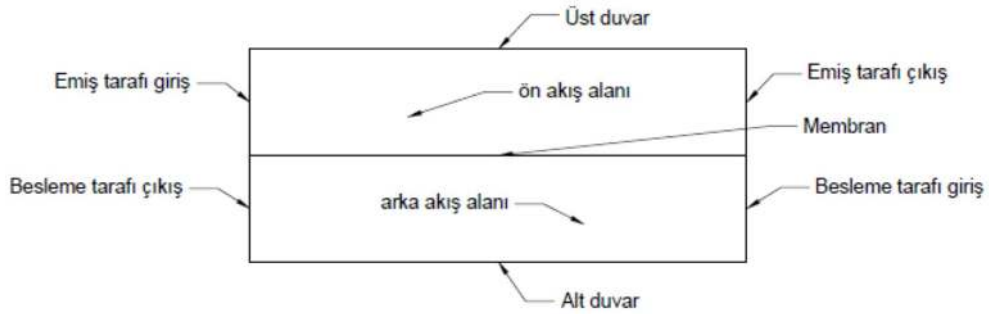
$$D_{AB} = \max(1,61 \cdot 10^{-9}(1 - 14m_A), 1,45 \cdot 10^{-9}) \quad (8)$$

$$\pi = (805,1 \cdot 10^5)m_A \quad (9)$$

2.1.3.4. Sınır Şartları

Yapılan çalışmada sınır şartları aşağıdaki alt başlıklarda verilen şekilde uygulanmıştır.

2.1.3.4.1. Hız Sınır Şartları



Şekil 14. Sınır şartlarının gösterilmesi

Besleme girişi: $u(y) = 6U \frac{y}{h} (1 - \frac{y}{h})$, parabolik giriş hız profili (“Groovy” sınır koşulu)

Besleme çıkışı: $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$, çıkışta tam gelişmiş hız profili (“Zero gradient” sınır koşulu)

Emiş girişi: $u(y) = 6U \frac{y}{h} (1 - \frac{y}{h})$, parabolik giriş hız profili (“Groovy” sınır koşulu)

Emiş tarafı çıkışı: $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$, çıkışta tam gelişmiş hız profili (“Zero gradient” sınır koşulu)

Üst duvar: $u(h) = 0$, kaymama sınır koşulu (“Fixed value” sınır koşulu)

Alt duvar: $u(h) = 0$, kaymama sınır koşulu (“Fixed value” sınır koşulu)

Başlangıçta ön akış alanı: Başlangıçta akış alanı boştur. (“Empty”başlangıç koşulu)

Başlangıçta arka akış alanı: Başlangıçta akış alanı boştur. (“Empty”başlangıç koşulu)

Membrane: Kodlarda verilmiş olan ampirik ifadeler (explicitFOmembraneVelocity sınır koşulu)

Başlangıç ve sınır hız şartlarının openFOAM programında uygulanması ek 8.1 de verilmiştir.

2.1.3.4.2. Basınç Sınır Şartları

Besleme tarafı giriş: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Besleme tarafı çıkışı: $P = 1000 \text{ Pa}$, (“Fixed value” sınır koşulu)

Emiş tarafı giriş: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Emiş tarafı çıkışı: $P = 1000 \text{ Pa}$, (“Fixed value” sınır koşulu)

Üst duvar: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Alt duvar: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Ön akış alanı: Başlangıçta akış alanı boştur. (“Empty”başlangıç koşulu)

Arka akış alanı: Başlangıçta akış alanı boştur. (“Empty”başlangıç koşulu)

Membran: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Başlangıç ve sınır basınç şartlarının openFOAM programında uygulanması ek 8.2 de verilmiştir.

2.1.3.4.3. Sıcaklık Sınır Şartları

Besleme tarafı giriş: $T = 293 \text{ K} - 298 \text{ K} - 303 \text{ K} - 308 \text{ K}$ değerlerinde (“Fixed value” sınır koşulu)

Besleme tarafı çıkışı: $T = 293 \text{ K} - 298 \text{ K} - 303 \text{ K} - 308 \text{ K}$ değerlerinde (“Fixed value” sınır koşulu)

Emiş tarafı giriş: $T = 293 \text{ K} - 298 \text{ K} - 303 \text{ K} - 308 \text{ K}$ değerlerinde (“Fixed value” sınır koşulu)

Emiş tarafı çıkış: $T = 293\text{ K} - 298\text{ K} - 303\text{ K} - 308\text{ K}$ değerlerinde (“Fixed value” sınır koşulu)

Üst duvar ; $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Alt duvar ; $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (“Zero gradient” sınır koşulu)

Ön akış alanı: Başlangıçta akış alanı boştur.(“Empty”başlangıç koşulu)

Arka akış alanı: Başlangıçta akış alanı boştur.(“Empty”başlangıç koşulu)

Başlangıç ve sınır sıcaklık şartlarının openFOAM programında uygulanması ek 8.3’ te verilmiştir.

2.1.3.5. Membran Üzerinde Sınır Şartları (ExplicitFOMembraneVelocity)

Burada membranın fazların ayrılması üzerine etkisi, iç akış alanı olarak düşünülmemiştir. FO için, membran boyunca sıfır bir net basınç farkının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle, hız ve çözelti konsantrasyonu sınır şartları sadece membran yüzeyi için tanımlanmıştır.

2.1.3.5.1. Hız Sınır Şartı

Membran sınır şartlarında belirtildiği gibi mevcut modelde, membran ayrı bir akış alanı olarak değerlendirilmemektedir. Membran yüzeyi için hız ve çözünen konsantrasyon sınır şartları için ampirik denklemler kullanılarak çözüm elde edilmiştir.

Burada openFOAM özelinde, ve. H ve. C dosyaları, kullanıcı tarafından belirlenen bir kitaplıkta derlenmekte ve bu dosya daha sonra bir OpenFOAM dosya sistemine aktarılmaktadır.

Membrandan geçen su akısı, çözünen konsantrasyonu ile ozmotik basınç arasındaki doğrusal ilişki kullanılarak modellenmiştir. Su akısı denklemi şu şekilde verilmiştir.

$$J_w = \frac{1}{K} \ln \left[\frac{B + A\pi_{d,m}}{B + |J_w| + A\pi_{f,m}} \right] n_d \quad (10)$$

Burada,

A: Saf su geçirgenlik katsayısı.

B: Çözelti geçirgenlik katsayısı.

K: Membran arayüz difüzyon direnç katsayısı.

$\pi_{d,m}$: Gözenekli yüzey ile membranın aktif tabakası arasındaki ozmotik basınç.

$\pi_{f,m}$: Besleme tarafındaki membrandaki ozmotik basınç.

n_d : Gözenekli sınırdaki birim normal vektör.

Bu katsayıların içinise Grubervd. 2011'de verilensayısal değerler kullanılmıştır.

$$A = 1.10^{-12} \left[\frac{m}{s.Pa} \right] \quad (11)$$

$$B = 1.10^{-12} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (12)$$

$$K = 0.5 \left[\frac{s}{\mu m} \right] \quad (13)$$

2.1.3.5.2. Çözelti Sınır Şartları

Membrandaki su akısı bu şekilde ifade edilirse, FMembran uygulaması için çözelti akısını su akısının fonksiyonu olarak yazılabilmektedir. (Koch, 2015).

$$J_s = - \left[\frac{B}{\varphi.A} \right] J_w \quad (14)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{c} = 805.10^2 \quad (15)$$

Burada φ , membran yapısı içindeki osmotik basınç ve çözelti konsantrasyonu arasındaki lineer oransallığı ifade etmektedir. Bu durumda çözelti kütle kesri için karışık sınır şartları ("Robin BC") yazılabilmektedir(Lee vd. 1981). Ayrıca kütle dengesini korumak için konvektif akı ve diffüzyif çözelti akısını dengede tutulmalıdır. Bu nedenle membrandaki çözelti sınır koşulu için Denklem (16)'daki sınır koşulunu kullanmak daha uygundur.

$$\rho_m \left(-D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial n_D} n_D + m_{A,m} J_w \right) = J_s \quad (16)$$

Bu durumda membrana göre normal basınç gradyan bileşeni sıfır alınmaktadır.

2.1.4. Basınç- Hız Çözümlemesi

Yoğunluk ve viskozitedeki farklılıklar nedeniyle, zayıf-sıkıştırılabilir model kullanılmıştır. Basınç-hız çifti için, çoğunlukla zaman bağımlı çözümlerde tercih edilen edilen standart PISO algoritması kullanılmıştır (Issa, 1984).

PISO Algoritması

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + p_k g. \quad (17)$$

$$\left[\frac{1}{\Delta t} + \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^i - u_{i-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} \right) \right] \Delta V u_i^* + \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} \right) \Delta V u_{i+\frac{1}{2}}^* - \left(\frac{u_{i-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} \right) \Delta V u_{i-\frac{1}{2}}^* = \frac{u_i^n}{\Delta t} \Delta V - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \int_i^n \Delta V + (p_k g) \int_i^n \Delta V$$

$$\left[\frac{1}{\Delta t} + \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^i - u_{i-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} \right) \right] u_i^* + \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} \right) u_{i+\frac{1}{2}}^* - \left(\frac{u_{i-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta x} \right) u_{i-\frac{1}{2}}^* = \frac{u_i^n}{\Delta t} - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \int_i^n + (p_k g) \int_i^n. \quad (18)$$

$$Cu^* = r - \nabla p^n + p_k g^n \quad (19)$$

$$Au^* + H'u^* = r - \nabla p^n + p_k g^n, \quad (20)$$

$$\left[\frac{1}{\Delta t} + \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^n - u_{i-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta r} \right) \right] u_i^{**} + \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^n}{2\Delta r} \right) u_{i+\frac{1}{2}}^* - \left(\frac{u_{i-\frac{1}{2}}^n}{2\Delta r} \right) u_{i-\frac{1}{2}}^* = \frac{u_i^n}{\Delta t} - \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \int_i^n + (p_k g) \int_i^n. \quad (21)$$

$$Au^* + H'u^* = r - \nabla p^* + p_k g^n \quad (22)$$

$$H = r - H'u^* \quad (23)$$

$$u^{**} = A^{-1}H - A^{-1}\nabla p^* + A^{-1}p_k g^n \quad (24)$$

$$\nabla^2(A^{-1}P^*) = \nabla \cdot (A^{-1}H + A^{-1}p_k g^n) \quad (25)$$

$$\nabla^2(A^{-1}P^{**}) = \nabla \cdot (A^{-1}H + A^{-1}p_k g^n) \quad (26)$$

$$u^{***} = A^{-1}H - A^{-1}\nabla p^{**} + A p_k g^n \quad (27)$$

2.1.5. Çözücü Kod

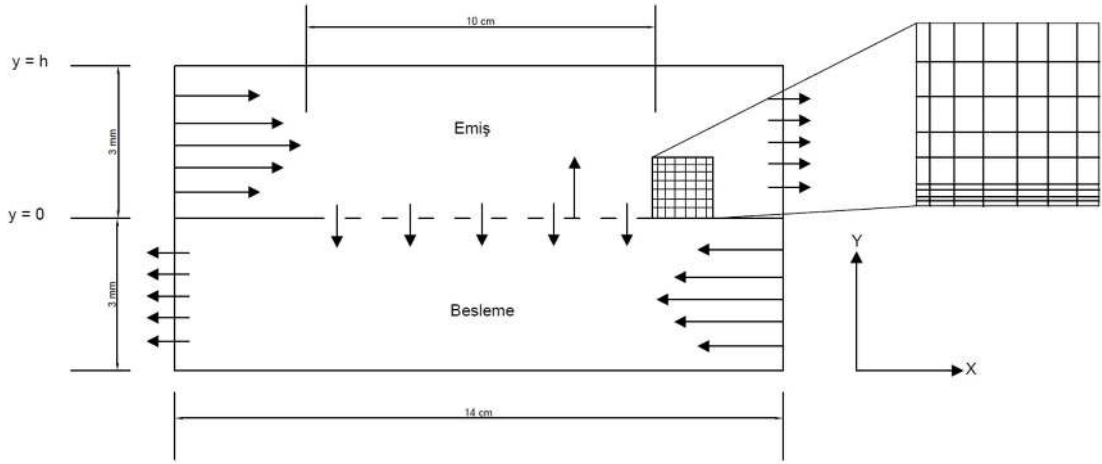
Program ile uyarlanan çözücüsü, difüzyon-konveksiyon denklemini iteratif bir şekilde **pimpleFoam**'a (open foam kütüphanesinde yer alan çözücü) benzer şekilde uygulayan şablon yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. **TwoLiquidMixingFoam** çözücüsünde kullanılan basınç, hız ve akı ilişkisine bağlı kütle fraksiyonu bu akış değişkeni hesaplamalarının bölümlerini sıkıştırılabilir olarak ele almak için uyarlanmıştır.

Çözücü yedi ana dosya içermektedir. Ana çözücü. C dosyası, temel iteratif prosedür algoritmasını içermektedir ve belirli hesaplamalar için gerekli diğer başlık dosyalarını çağırılmaktadır.

CreateFields.H dosyası basınç, hız, çözünen kütle oranı, yoğunluk, akı, gerekli sabitler ve benzeri gibi alanların iterasyonunu başlatmaktadır.

Burada gerekli olan temel destek dosyaları, basınç denklemini (**pEqn.H**), hız denklemini (**UEqn.H**) çözmek için kullanılan **pimpleFoam** ile aynıdır. Çözölmüş kütle kesrini çözen ekstra dosya **m_AEqn.H**'dir.

Yapılan çalışmalarda ele alınan membranın şematik gösterimi Şekil 15'de verilmiştir. Membrana yakın noktalarda ağ yapısı sıkılaştırılmıştır. Uygun ağ yapısı elde edilerek çözüm elde edilmiştir. Membran ayrı bir akış alanı olarak tanımlanmayarak, sadece geçiş noktası olarak tanımlanmıştır. Membran için kalınlık tanımlanmamıştır ve membran şekilde kesikli çizgi ile belirtilmiştir. Membran Denklem 16'da verilen ampirik ifadeyle tanımlanmıştır.



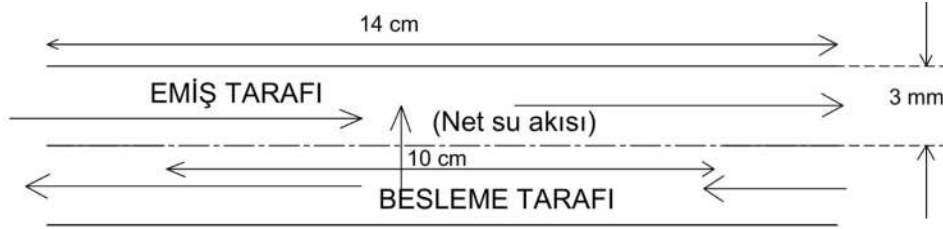
Şekil 15. Çalışmada kullanılan geometrinin şematik gösterimi (Gruber vd., 2011)

2.1.6. Başlatıcı Kod

PotentialInitalizer, başlatıcı olarak kullanılan standart **potentialFoam**'a benzemektedir. **PotentialInitalizer** kullanılarak hız, basınç, yoğunluk ve akı alanı değerleri başlatılmaktadır. PotentialInitalizer'ın ana amacı **FOMembraneFoam** tarafından istenen süreyi en aza indirmektir. Fluent programındaki Hybrid Initialization ile aynı görevi yapmaktadır.

2.1.7. 2-D Geometrik Model

Doğrulama yapabilmek amacıyla Gruber vd. 2011’de kullanılan geometrinin aynısı burada da kullanılmıştır. Çözüm bölgesi için geometri Şekil 15’te görülmektedir.



Şekil 16. Çözüm Bölgesi Şematik Gösterimi

2.1.8. Sınır Şartlarının Uygulanması

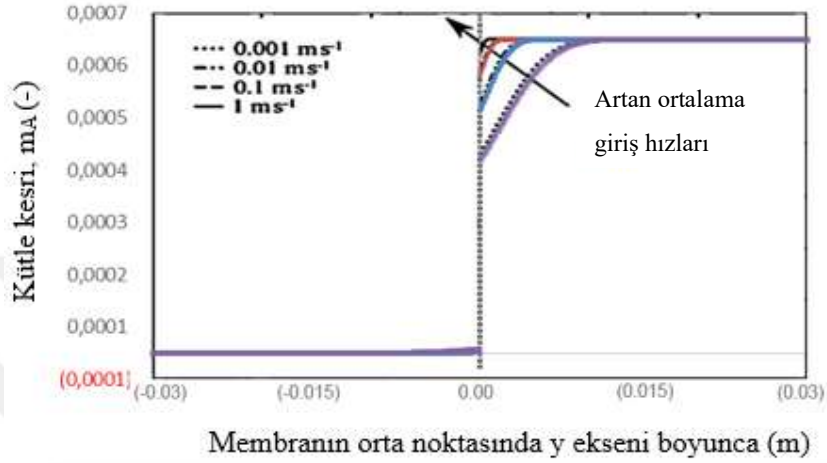
Çalışmada kodların güvenilirliğini sağlamak amacıyla göz önüne alınan Gruber ve arkadaşlarının makalesinde (Gruber vd. 2011) verildiği haliyle, parabolik giriş hızı, ortalama giriş hızının farklı değerleri için uygulanarak, akış hızının su akısı üzerine etkileri incelenmiştir. Parabolik sınır koşulunun uygulanması için, Python tabanlı kod, OpenFOAM komplikasyonlarını basitleştirmek için geliştirilen yardımcı program olan *swak4Foam* başlığı altında uygulanmıştır. Çıkış sınır şartları, hız için sıfır gradyan ve basınç için sıfır gösterge basıncıdır. Tüm duvarlar sıfır hız sınır şartlarındadır. Parabolik giriş hız profili daha önce sınır şartları başlığı altında da ifade edildiği şekliyle Denklem (28)’de verilmiştir.

$$u(y) = 6U \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (28)$$

2.1.9. Sayısal Kodun Doğrulanması

Geliştirilen kod Gruber ve arkadaşları tarafından üretilen verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Söz konusu çalışmada FO membran ayırıştırması ile ilgili sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 16’da y eksenini doğrultusu boyunca membranın ortasında m_A çözücü kütle kesrinin değişimini veren grafik görülmektedir. Grafikteki siyah çizgiler farklı ortalama giriş hızı değerleri için Gruber’in sonuçlarını, renkli çizgiler ise aynı ortalama giriş hızı değerleri

için mevcut çalışmada elde edilen sonuçları göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi dört farklı ortalama giriş hızında da sonuçların Gruber'in sonuçlarıyla tam bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Kodların kütle kesri cinsinden doğrulanması (Gruber vd. 2011)

2.2. Kodların Açıklanması

2.2.1. Sınır Şartları

İleri Osmoz membranı için çözelti ve hız sınır şartları, bir durum dosya sistemi içerisinde çağrılan ayrı bir kütüphane olarak derlenmektedir. Sınır şartlarının her biri ayrı C ve .H (başlık) dosyası kullanılarak uygulanmaktadır. Başlık dosyası, sınır şartlarının değişkenlerini ve işlevlerini başlatmak için kullanılmaktadır.

2.2.2. Çözücü

Bu çözücü içinde ilave 7 adet klasör içermektedir. Bunlar aşağıdaki klasörlerdir.

FOMembraneFoam.C: Ana çözücü klasörü

createFields.H: Akış alanını oluşturan klasör

m_AContinuity.H: Kütle korunumunu cozen klasör

mAEqn.H: Difüzyon-Konveksiyon denklemini membrane boyunca cozen klasör

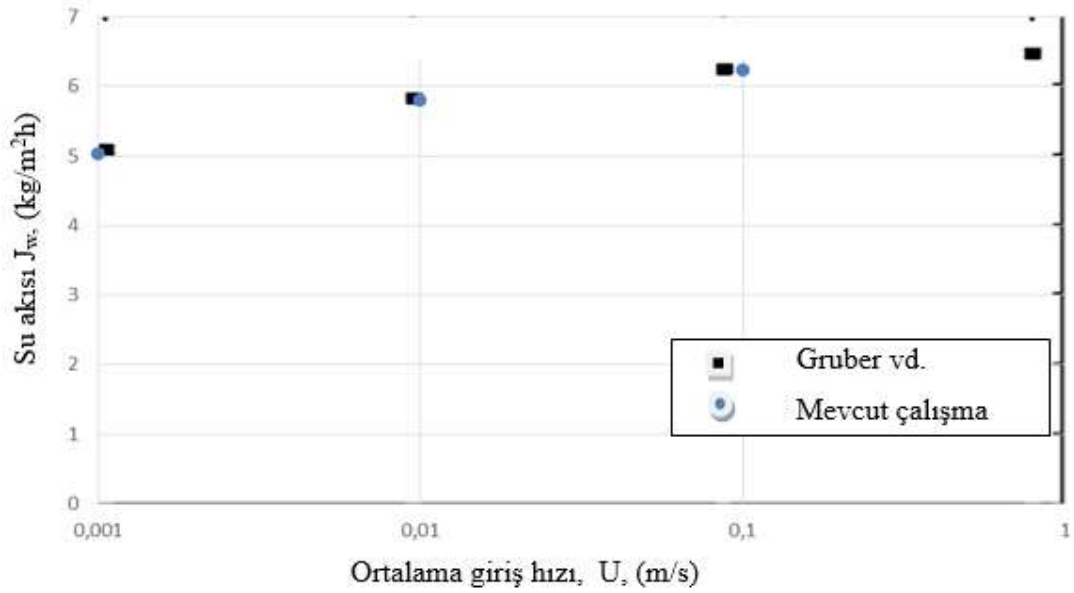
mAInitialContinuity.H: Hesaplama alanındaki başlangıç kütlelerini bulan klasör

pEqn.H: PISO algoritmasına göre düzeltme adımlarını yapan klasör

Ueqn.H: Navier-Stokes denklemlerini çözen klasör

2.2.3. Çözücünün Doğrulanması

Burada da kodun doğrulanması için kullanılan Şekil 16'daki grafikten farklı olarak kütle akısı cinsinden doğrulama yapılmıştır. Şekil 17'deki grafikte, Gruber ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sırasıyla 0.001, 0.01, 0.1 ve 1 m/s ortalama giriş hızlarında elde ettikleri su akıları ile birlikte mevcut çalışmadada aynı hızlar için elde edilen su akıları verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi, mevcut çalışmanın su akıları cinsinden sonuçlarının kütle kesri cinsinden karşılaştırmada olduğu gibi literatürdeki sonuçlarla uyumlu oldu görülmektedir.



Şekil 18. Kodların doğrulanması (Farklı giriş hızlarında su akısı)

3. BULGULAR VE İRDELEME

Yapılan çalışmada OpenFOAM yazılımı kullanılarak, membran üzerinden FO yaklaşımıyla akış şartlarının oluşturulduğu bir sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan düzlem membranın besleme ve emiş traflarındaki giriş hızları Denklem (28)'de verilen parabolik hız profili şeklinde tanımlanmış ve buralardaki ortalama hızlar problem için hidrodinamik parametre olarak kullanılmıştır. Hidrodinamik parametre olarak basınç yerine ortalama hızların kullanılması, problemin FO yaklaşımı ile çözülmesi yani ozmotik basınca dayalı problem olmasından kaynaklanmaktadır.

Problem zaman bağımlı olarak çözülmüştür. Problemin yakınsama kriteri olarak su akısının değişim miktarının 10^{-6} değerinden daha az olması durumu kabul edilmiştir. Problemin yakınsaması durumunda elde edilen su akısı, hız profilleri değerleri çözüm kabul edilmiştir.

Kim ve Zidney, 2005 yılında yaptıkları çalışmada parçacıkların birbiriyle olan etkileşimini yenebilmek için kritik bir filtreleme hızına ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır. Mevcut çalışmada, hızın membran performansı üzerine etkisini görebilmek için farklı emiş ve besleme ortalama hızları için sayısal inceleme çalışması gerçekleştirmişlerdir.

Özgün vd. 2015 Upflow Anaerobik Sludge Blanket (UASB) reaktörlerde artan sıcaklık değeriyle membran üzerinde oluşan tıkanmanın azaldığını ortaya koymuşlardır. Çalışmada reaktördeki sıcaklık artışının tıkanmanın azalmasına katkı sağladığı deneysel olarak ortaya konulmuştur.

Aritma teknolojisinde kullanılan metajonik bakterilerin en uygun çalışma sıcaklığının 35°C olduğu bilinmektedir. Atık suyun 35°C 'ye kadar ısıtılması durumunda bakterilerin faaliyetleri ve çalışma verimi %90 düzeyine çıkmaktadır. Mevcut sayısal incelemede, su sıcaklığının membran üzerine olan etkisini görebilmek için suyun 15°C , 20°C , 30°C ve 35°C 'deki vizkozite ve yoğunluk değerleri programa tanıtılarak sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada enerji denklemi dördüncü temel denklem olarak çözüm algoritmasına eklenmiş ve belirtilen sıcaklıklar için giriş dosyası oluşturulmuştur. Alınan sonuçlar, sıcaklık değerlerinin artırılmasıyla su akısında belirgin bir değişim olmadığını göstermektedir. Ancak, sıcaklık artışının bakteri çalışma verimi (kirlilik giderim oranı) üzerindeki olumlu etkisi nedeniyle dolaylı olarak membran performansı üzerinde olumlu etkisinin olduğu ayrıca incelenmelidir.

3.1. Farklı Ortalama Giriş Hızlarının Etkisi; Besleme ve Emiş Hızlarının Eşit Olması Durumu

Atık su arıtımında yaygın olarak kullanılan anaerobik reaktörlerde atık su ile bakterilerin uygun süre boyunca temas etmesini sağlayarak metajonik faaliyetler sonucu parçalanmanın ve böylece arıtma işleminin gerçekleşmesi hedeflenir. Yapılan çalışmalarda akış hızının çok düşük olması halinde gerekli arıtma kapasitelerine ulaşamadığı, akış hızının çok yüksek olması durumunda ise henüz gelişme sürecini tamamlamamış kumsu yapıdaki bakterilerin su ile beraber süreklenerek reaktörü terkettiği görülmüştür.

Anaerobik reaktör çıkışına konulan bir membran yardımı ile reaktörden kaçması muhtemel olan kumsu yapıdaki bakterilerin de sistemde tutulması sağlanır. Bu durumda, membrandan en fazla su geçişinin hangi besleme ve/veya emiş hızlarında sağlanacağını bilmesi önem kazanmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda (Bernales ve Haldenwang, 2014) geçirgen bir boruda yapılan akış analizlerinde Reynolds sayısının, yani ortalama akış hızının değişmesi ile basınç ve eksenel hız gibi bazı hidrodinamik büyüklüklerin de değişeceğine vurgu yapılmakta ve giriş hızlarının filtreleme performansı açısından önemli bir parametre olduğu vurgulanmaktadır.

Mevcut sayısal analizde, parabolik hız giriş şartlarındasirasıyla 0,001; 0,01; 0,1; 1 m/s ortalama hız değerleri için sonuçlar elde edilerek irdelenmiştir.

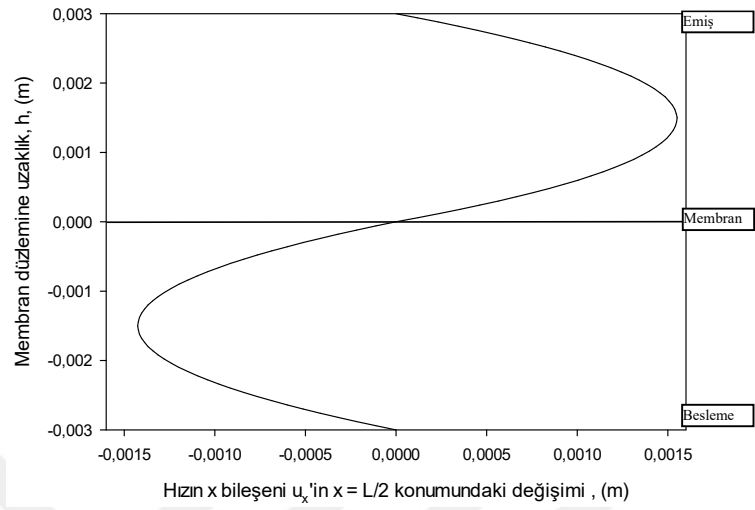
3.1.1. Ortalama Giriş Hızının 0,001 m/s Olması Durumu

Ortalama giriş hızı, emiş ve besleme taraflarında 0,001 m/s tanımlanarak problemin kararlı duruma gelmesinden sonra oluşan hız profilleri incelenmiştir. Şekil 18 (a)'da membranın orta noktasındaki eksenel hız profili görülmektedir. Bu ortalama hız değeri için maksimum hızın emiş tarafında daha yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Şekil 18 (b) 'de y doğrultusundaki hız bileşeninin besleme tarafı girişinden itibaren 0,25 L; 0,50 L; 0,75 L konumlarındaki profilleri görülmektedir. Her üç konumda da eksene dik doğrultudaki hız bileşeni membran üzerinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Ortalama giriş hızının bu değerinde, eksene dik doğrultudaki hızın besleme tarafından membrana doğru arttığı, membrandan itibaren emiş tarafının duvarına yaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, ortalama giriş hızının bu değerinde eksenel hız profilinin ozmotik basınç farkının baskın olması nedeniyle emiş güçlenmekte ve bunun sonucu olarak da emiş tarafındaki eksenel hızın arttığı anlaşılmaktadır. Akış eksenine dik doğrultudaki hız bileşeninin

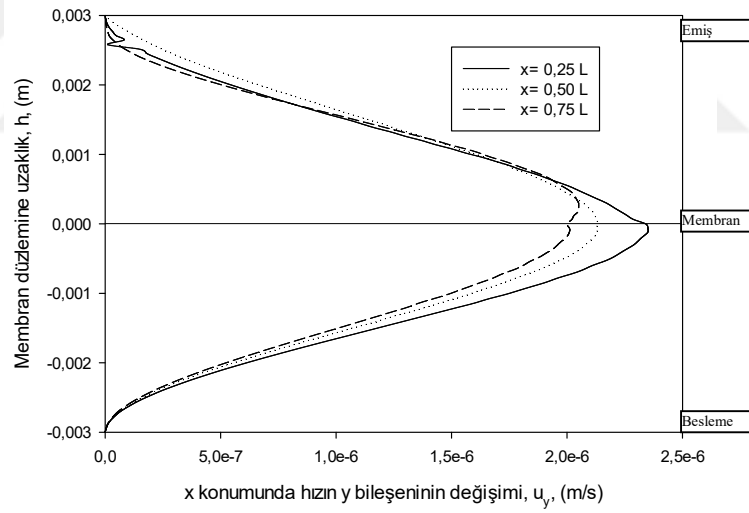
farklı konumlarda benzer eğilimi göstermesine, yani membran ekseninde maksimum değeri almasına bakıldığında membran üzerindeki birikimi azaltacağı yönünde öngörülebilir.

Şekil 19’da eksenel doğrultuda oluşan eş hız için genliğin değişimi görülmektedir. Burada, Şekil 18’deki eksenel hız profilinin davranışı ile de uyumlu olarak, kanala sabit hızla giren atık su ve çözeltinin yüzeyle temas ettiği noktalarda sürtünme nedeniyle hızın sıfır olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 19 a’daki profil ile Şekil 20’deki genlikler bir arada değerlendirildiğinde eksenel doğrultudaki farklı konumlarda hız profillerinin benzer eğilim gösterdiği ve genliklerinin değişmediği görülür.





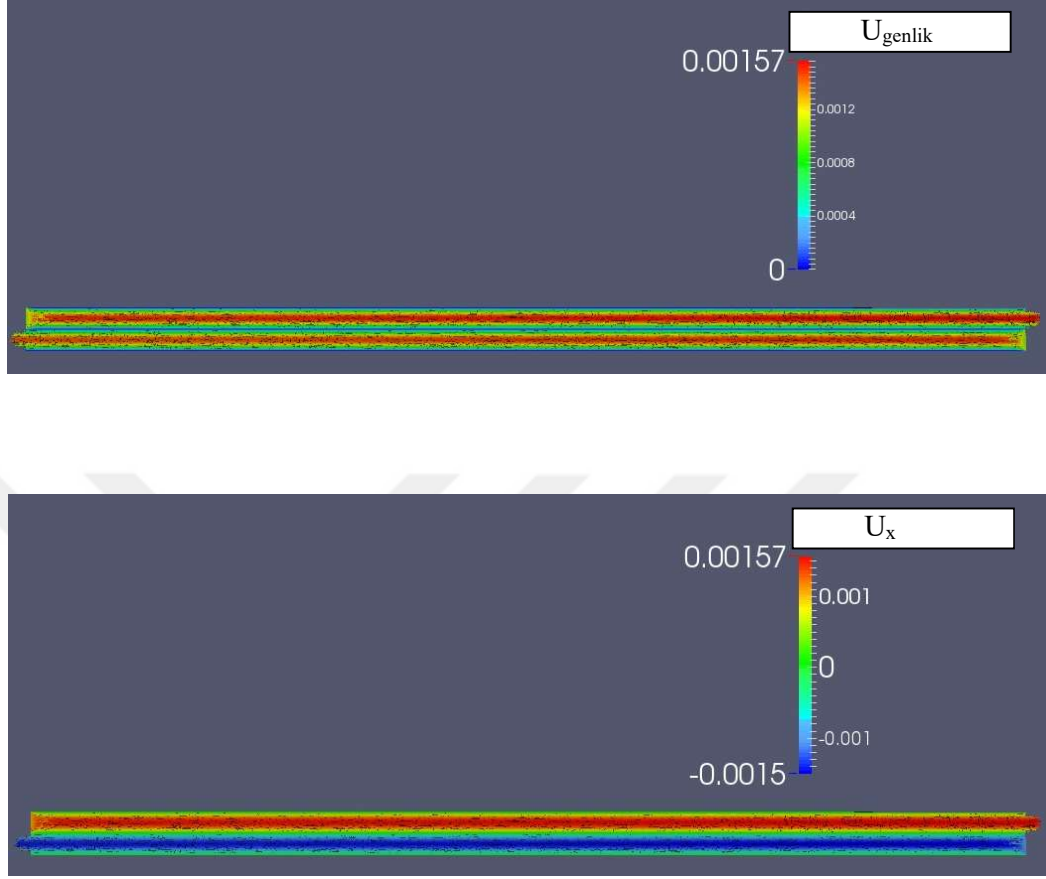
a)



b)

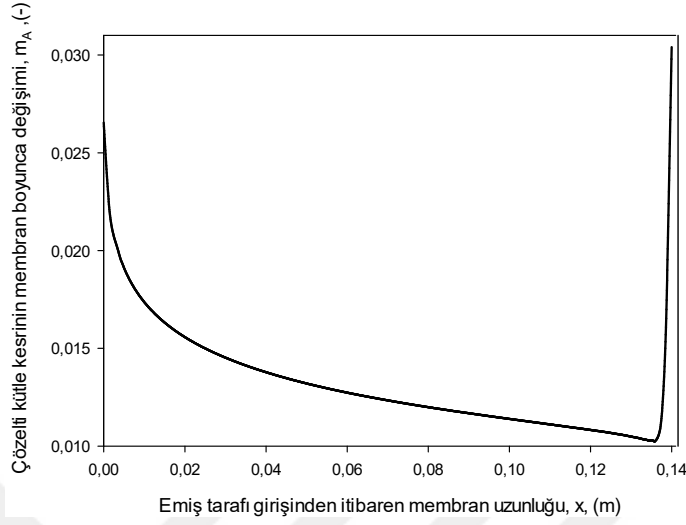
Şekil 19. Ortalama giriş hızı 0,001 m/s için hız profilleri;

(a) Eksenel hız bileşeni (b) Eksene dik doğrultudaki hız bileşeni



Şekil 20. Ortalama giriş hızı 0,001 m/s için aksel hız genliği dağılımı

Membran üzerinde emiş tarafı girişinden itibaren oluşan çözelti kütle kesri dağılımı m_A Şekil 21 'de verilmiştir. Burada, membran üzerinde biriken çözelti kütle kesri emiş başlangıcından itibaren hızla düşmekte, membranın ortasına doğru düşüş hızı yavaşlamakta ve emiş tarafının çıkışı, yani besleme tarafının girişinde hızla yükselmektedir. Emiş ve besleme tarafı girişlerinde m_A çözelti kütle kesri yüksek olmaktadır ve böylece düşük aksel hız nedeniyle membranın orta bölgesine taşınamamaktadır. Bu durum, 0,001 m/s ortalama giriş hızında membranın orta bölgesinde birikim miktarının düşük olacağı hakkında ipucu vermektedir.

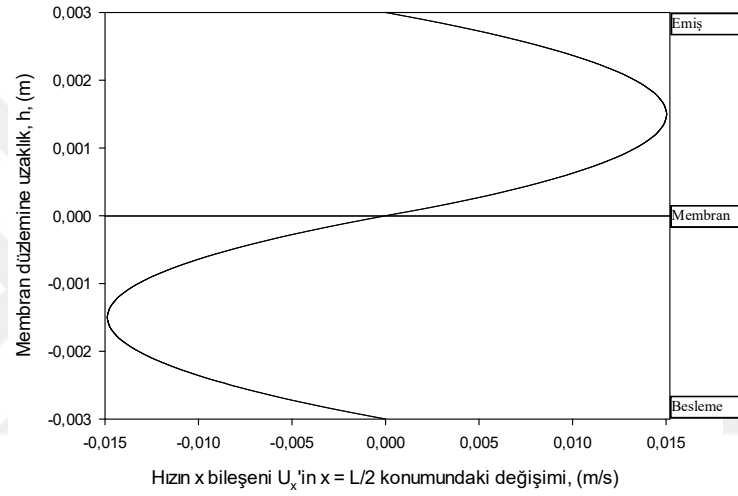


Şekil 21. Çözeltili kütle kesrinin membran boyunca değişimi

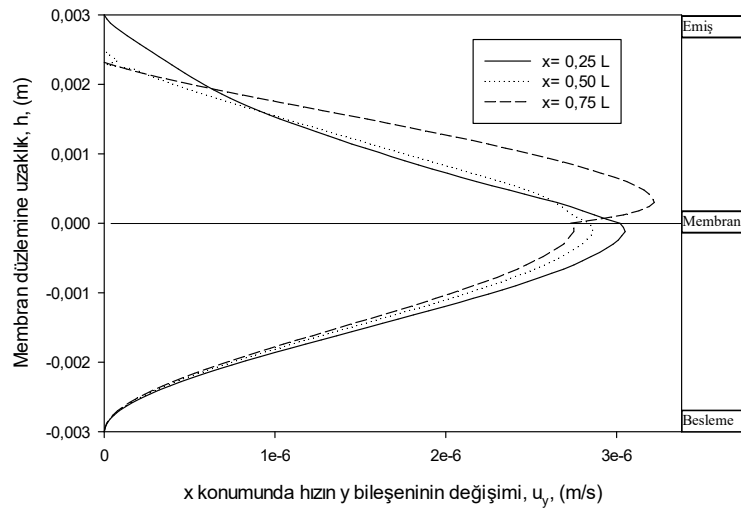
3.1.2. Ortalama Giriş Hızının 0,01 m/s Olması Durumu

Ortalama giriş hızı emiş ve besleme taraflarında 0,01 m/s tanımlanarak problemin kararlı duruma gelmesinden sonra oluşan hız profilleri incelenmiştir. Şekil 22 (a)'da eksenel doğrultuda oluşan hız profillerine bakıldığında; maksimum hızın emiş tarafında daha yüksek değere ulaştığı, ancak 0,001 m/s giriş hızında oluşan hız profiliyle karşılaştırıldığında emiş ve besleme tarafında oluşan maksimum değerler arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Şekil 22 (b) 'de görüldüğü gibi, eksene dik doğrultudaki hız membran üzerinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Eksene dik doğrultudaki hızın besleme tarafından membrana doğru arttığı, membrandan itibaren emiş tarafının duvarına doğru azaldığı, membran üzerindeki simetri davranışının 0,001 m/s ortalama giriş hızı durumundan farklı olarak eksen boyunca korunmadığı görülmektedir. Bu iki grafik birlikte değerlendirildiğinde ortalama giriş hızının düşük olması durumunda eksenel hız profilinin ozmotik basınç nedeniyle oluşan emişten etkilendiği, ancak bu etkinin ortalama giriş hızı değerinin 0,001 m/s olduğu duruma göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ortalama giriş hızının 0,001 m/s durumundaki hız profiline benzer şekilde eksene dik hızın membrana doğru artması, daha sonra simetri oluşturmaması ve emiş tarafının dış duvarına doğru azalması membran üzerinde birikmenin az olacağı sonucunu doğurur.

Şekil 23’de aksel doğrultuda oluşan eş hız için genliğin değişimi görülmektedir. Burada da, ortalama giriş hızının 0,001 m/s olduğu durumdakine benzer davranışlar izlenmektedir. Şekil 22’deki aksel hız profilinin davranışı ile de uyumlu olarak, kanala sabit hızla giren atık su ve çözeltinin yüzeyle temas ettiği noktalarda sürtünme nedeniyle hızın sıfır olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 22 a’daki profil ile Şekil 24’deki genlikler bir arada değerlendirildiğinde aksel doğrultudaki farklı konumlarda hız profillerinin benzer eğilim gösterdiği ve genliklerinin değişmediği görülür.



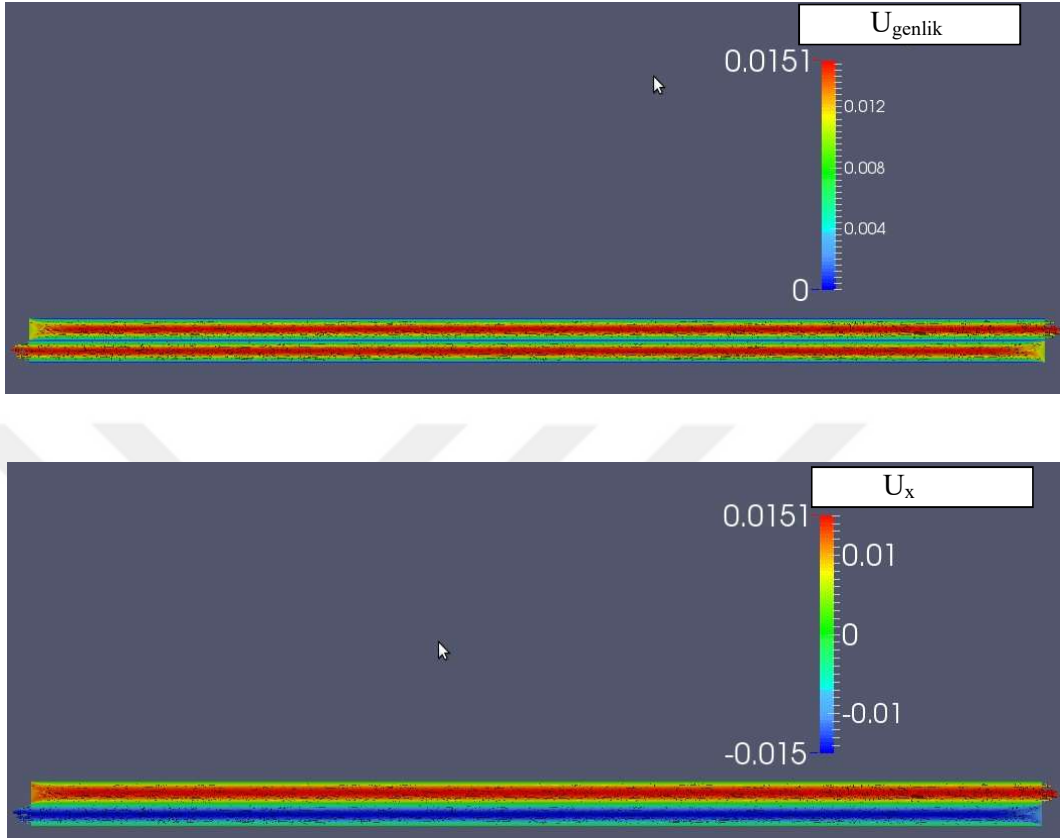
a)



b)

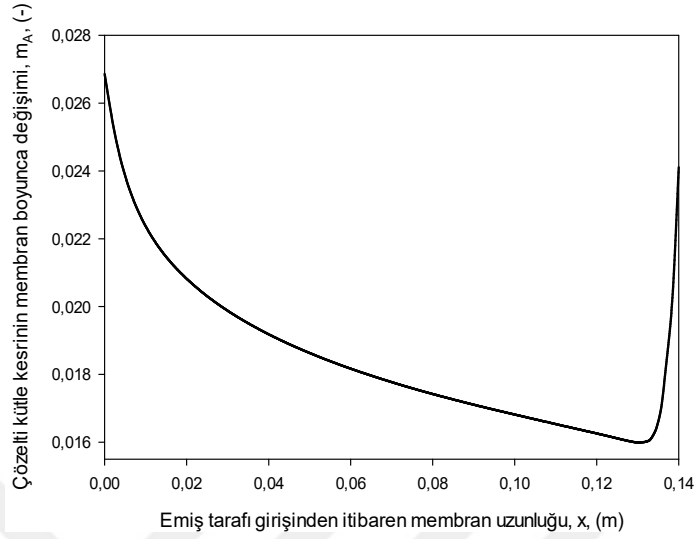
Şekil 22. Ortalama giriş hızı 0,01 m/s için hız profilleri;

(a) Aksel hız bileşeni (b) Eksene dik doğrultudaki hız bileşeni



Şekil 23. Ortalama giriş hızı 0,01 m/s için eksenel eş hız eğrileri

Membran üzerinde x doğrultusunda oluşan çözelti kütle kesri dağılımı Şekil 23 'te verilmiştir. Şekildeki eğrinin davranışına bakıldığında, Şekil 21'deki eğri ile benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Çözelti kütle kesrinin membran üzerinde dağılımı emiş başlangıcından itibaren hızla düşmekte, membranın ortasına doğru düşüş hızı yavaşlamakta ve emiş tarafının çıkışı, yani besleme tarafının girişinde hızla yükselmektedir. Ortalama giriş hızının 0,01 m/s değerinde olması durumunda, hızın 0,001 m/s değerine göre 10 kat artmış olmasına rağmen membran boyunca çözelti kütle kesrindeki artışın 1,5 kat olarak gerçekleştiği görülmektedir. Ortalama giriş hızının 0,01 m/s olması durumunda oluşan çözelti dağılımı, 0,001 m/s ortalama giriş hızında oluşan dağılıma benzer şekilde, emiş ve besleme tarafı girişlerinde yüksek olmaktadır. Düşük eksenel hız ve oluşan düzgün dağılımlı hız profili nedeniyle membranın orta bölgesinde çözelti birikimi daha düşük çıkmaktadır. Benzer şekilde, 0,01 m/s ortalama giriş hızında membranın orta bölgesinde birikim miktarının düşük olacağı hakkında ipucu vermektedir.



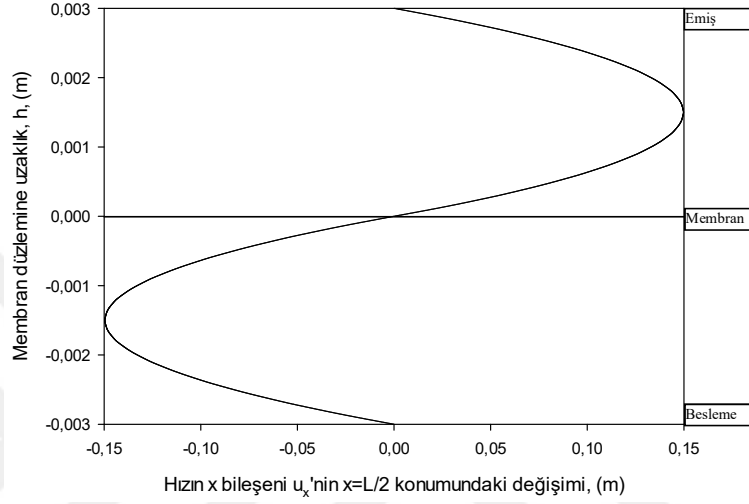
Şekil 24. Çözelti kütlesinin membran yüzeyinde dağılımı

3.1.3 Ortalama Giriş Hızının 0,1 m/s Olması Durumu

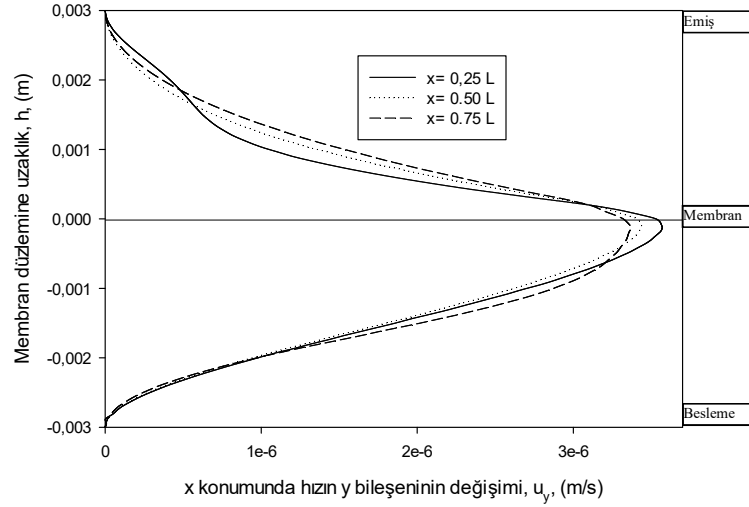
Ortalama giriş hızı emiş ve besleme taraflarında 0,1 m/s tanımlanarak problemin kararlı duruma gelmesinden sonra oluşan hız profilleri incelenmiştir. Şekil 25 (a)'da eksenel doğrultuda oluşan hız profillerine bakıldığında; maksimum hızın emiş ve besleme tarafında incelenen önceki hız değerleri sonuçlarından farklı olarak tamamen aynı değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 25 (b) 'de görüldüğü gibi eksene dik doğrultuda farklı konumlardaki hızların membran üzerinde en yüksek değeri aldığı görülmektedir. Burada da, eksene dik doğrultudaki hızların besleme tarafından membrana doğru arttığı, membrandan itibaren emiş tarafının duvarına doğru azaldığı, tam membran üzerinden itibaren simetrik olarak gerçekleştiği görülmektedir. Her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, eksenel hızların besleme ve emiş taraflarındaki maksimum değerlerinin aynı olduğu ve buradan da hızların ozmotik basınç farkı nedeniyle emişten etkilenmediği sonucuna varılmaktadır. İncelenen diğer hız profillerine benzer şekilde, eksene dik hız profilinin membrana doğru artması, daha sonra simetri oluşturması ve emiş tarafının duvarına doğru azalması membran üzerinde birikmenin az olacağını göstermektedir.

Şekil 26'te eksenel doğrultuda oluşan eş hız için genliğin değişimi görülmektedir. Burada da, önceki ortalama giriş hız değerlerinde olduğu gibi davranışlar izlenmektedir. Şekil 25'teki eksenel hız profilinin davranışı ile de uyumlu olarak, kanala sabit hızla giren atık su ve çözeltinin yüzeyle temas ettiği noktalarda sürtünme nedeniyle hızın sıfır olduğu görülmektedir.

Benzer şekilde Şekil 25 a'daki profil ile Şekil 26'teki genlikler bir arada değerlendirildiğinde eksenel doğrultudaki farklı konumlarda hız profillerinin benzer eğilim gösterdiği ve genliklerinin değişmediği görülmektedir. Diğerlerinden farklı olarak burada, Şekil 25 (a)'nın de vurgulandığı gibi besleme ve emiş tarafı hız genliklerinin eşit olduğu görülür.



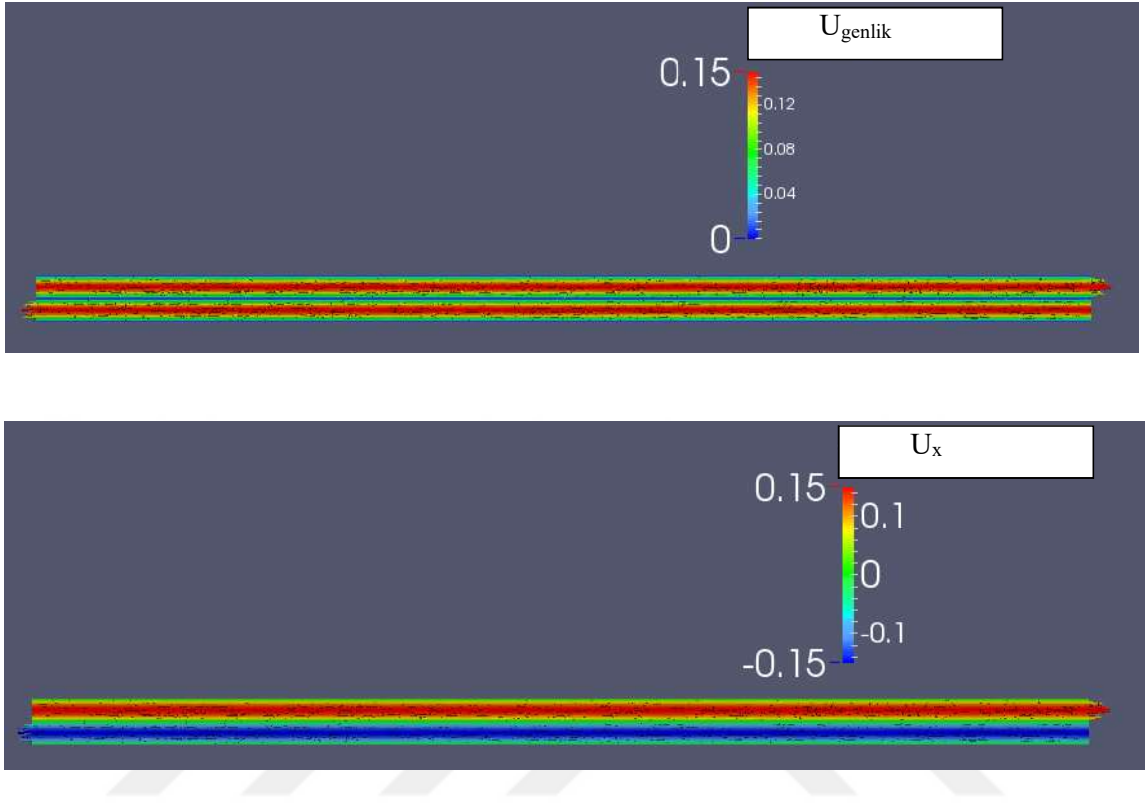
(a)



(b)

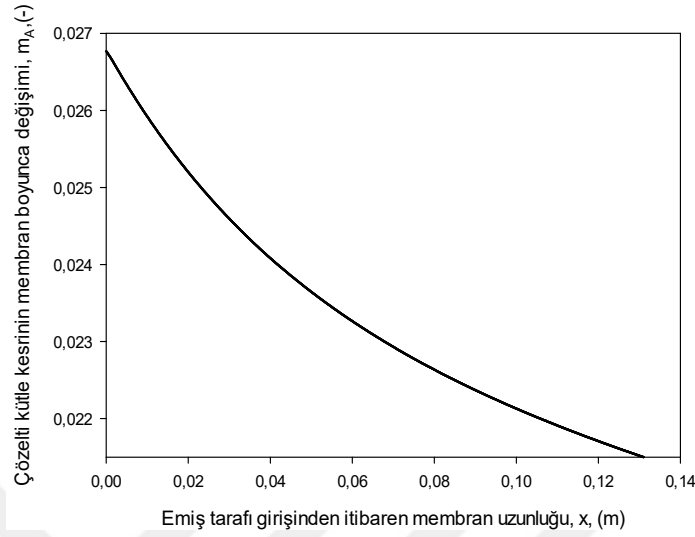
Şekil 25. Ortalama giriş hızı 0,1 m/s için hız profilleri

a) Eksenel hız bileşeni b) Eksene dik doğrultudaki hız bileşeni



Şekil 26. Ortalama giriş hızı 0,1 m/s için aksenal eş hız eğrileri

Membran üzerinde x doğrultusunda oluşan çözelti kütle kesri dağılımı Şekil 27 'de verilmiştir. Çözelti kütle kesrinin membran üzerinde dağılımı emiş başlangıcından itibaren hızla düşmektedir. Bu düşüş eğilimi, önceki durumlardan farklı olarak besleme tarafının çıkışına kadar devam etmektedir. Bu durumun, membran üzerinde birikmenin artması sonucunu doğuracağı beklenir. Mevcut durumda 0,1 m/s olan ortalama giriş hızının 0,001 m/s olan ortalama giriş hızına göre 100 kat artmış olmasına rağmen membran boyunca oluşan çözelti kütle kesrinin yaklaşık 2-3 kat arttığı görülmektedir.



Şekil 27. Çözelti kütle kesrinin membran yüzeyinde dağılımı

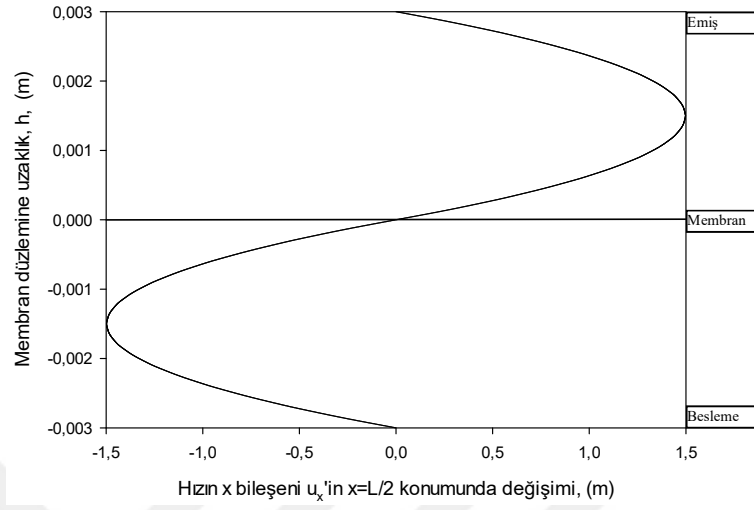
3.1.4. Ortalama Giriş Hızının 1 m/s Olması Durumu

Ortalama giriş hızı emiş ve besleme taraflarında 1 m/s tanımlanarak problemin kararlı duruma gelmesinden sonra oluşan hız profilleri incelenmiştir. Şekil 28 (a)'da aksel doğrultuda oluşan hız profillerine bakıldığında, maksimum hızın emiş ve besleme tarafında yaklaşık aynı değerlerde olduğu görülmekte ve bu durumun aksel doğrultuda oluşan hız profilinin yüksek akış hızı nedeniyle ozmotik basınçtan etkilenmediği anlaşılmaktadır. Şekil 28 (b) 'de ise eksene dik doğrultudaki hız membran üzerinde en yüksek değerine ulaşmadığı görülmektedir. Şekil 28 (b)'de eksene dik doğrultudaki hızın besleme tarafından membrana doğru artmakta, ancak bu artış eğilimi membran düzlemine kadar korunamamaktadır. Eksene dik doğrultudaki hızın membrandan hemen sonra hızlı bir şekilde düşmekte, membrandan sonra tekrar artmaktadır. Her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, ortalama giriş hızının bu değerinin hız profili üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi burada ortalama giriş hızının 0,001 m/s, 0,01 m/s, ve 0,1 m/s değerlerinden farklı olarak eksene dik doğrultudaki hız profili membran boyunca simetri oluşturamamaktadır. Bu durumun, yüksek ortalama giriş hızlarında membran üzerinde kirlenme ve bu kirlenmeden kaynaklanan tıkanma nedeniyle profildeki simetrinin bozulduğu sonucuna varılır.

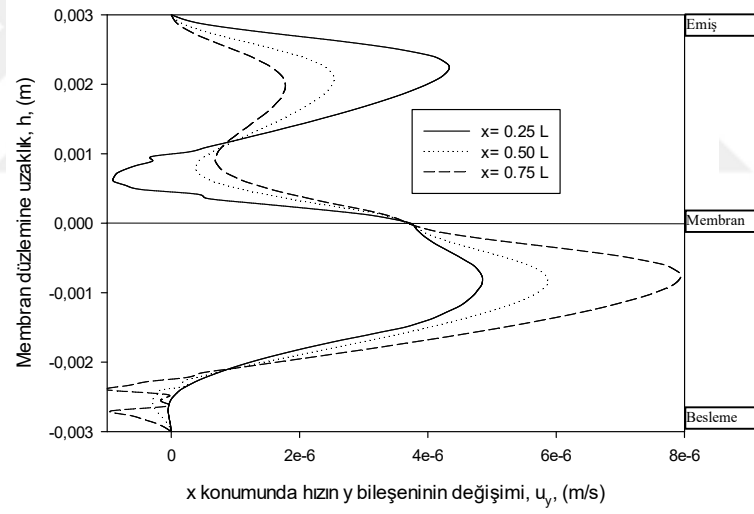
Şekil 28'de aksel doğrultuda oluşan eş hız için genliğin değişimi görülmektedir. Burada da, önceki ortalama giriş hız değerlerinde olduğu gibi davranışlar izlenmektedir. Şekil 28'deki aksel hız profilinin davranışı ile de uyumlu olarak, kanala sabit hızla giren atık su ve

Çözeltinin yüzeyle temas ettiği noktalarda sürtünme nedeniyle hızın sıfır olduğu görülmektedir. Benzer şekilde  ekil 28(a)'daki profil ile  ekil 29'daki genlikler bir arada değerlendirildiğinde eksenel doğrultudaki farklı konumlarda hız profillerinin benzer eğilim gösterdiği ve genliklerinin değişmediği görülmektedir. Diğerlerinden farklı olarak burada,  ekil 28 (a)'için de vurgulandığı gibi besleme ve emiş tarafı hız genliklerinin eşit olduğu görülür.  nceki düşük ortalama giriş hızlarıyla 1 m/s ortalama giriş hızıkar ıla tırıldığında artanortalama giriş hızının eksene dik doğrultuda hız profilinin membran üzerindeki simetrisinin bozulduğu görülmektedir. Ortalama giriş hızının 1 m/s değeri ile $u(y)$ 'nin membran üzerinde aldığı değer oranlandığında, $u(y)$ 'nin beklenen değerine ulaşmadığı sonucuna varılır.





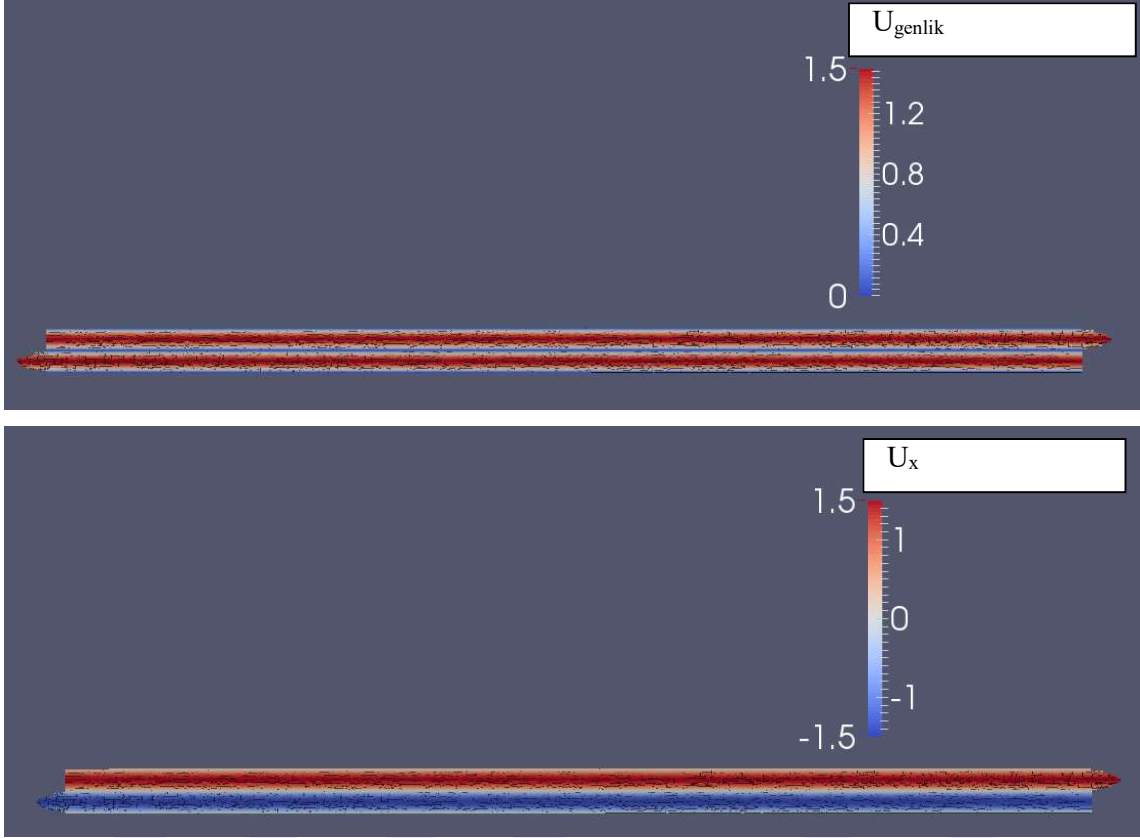
a)



b)

Şekil 28. Ortalama giriş hızı 1 m/s için hız profilleri

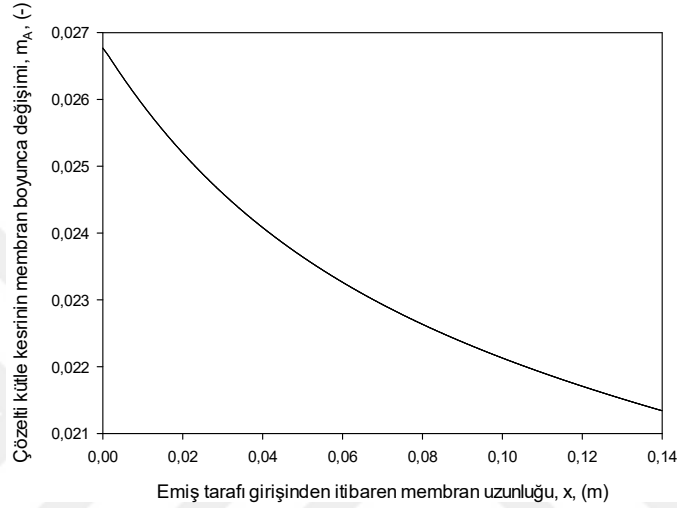
a) Eksenel hız bileşeni b) Eksene dik doğrultudaki hız bileşeni



Şekil 29. Ortalama giriş hızı 1 m/s için aksenal eş hız eğrileri

Membran üzerinde x doğrultusunda oluşan çözelti kütle kesri dağılımı Şekil 29 'de verilmiştir. Çözelti kütle kesrinin membran üzerinde dağılımı emiş başlangıcından itibaren hızla düşmekte ve bu düşüş eğilimi emiş tarafının çıkışına kadar devam etmektedir. Bu durumun membran üzerinde oluşan birikimin doğal sonucu olarak ortaya çıktığı değerlendirilmektedir. Ortalama giriş hızının 0,001 m/s' değerinden 1 m/s değerine çıkarıldığında, membran boyunca çözelti oluşan kütle kesri artışında şu ilişki dikkat çekmektedir. Ortalama giriş hızı 0,001 m/s'den 0,01 m/s'ye kadar 10 kat arttırıldığında çözelti kütle kesrindeki artış 1,50 kat; ortalama giriş hızı 0,01 m/s'den 0,1 m/s' ye kadar 10 kat arttırıldığında çözelti kütle kesrindeki artış 1,27 kat; ortalama giriş hızı 0,1 m/s'den 1 m/s'ye kadar 10 kat arttırıldığında çözelti kütle kesrindeki artış 1,13 kat olarak gerçekleşmektedir. Buradan, ortalama giriş hızı ile çözelti kütle kesri arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığı, yüksek ortalama giriş hızlarında çözelti kütle kesri artışının azaldığı görülmektedir. Bu durum özellikle 1 m/s hız değerinde $u(y)$ hız profili simetrisinin bozulmasından da anlaşılmaktadır.

Besleme ve emiş hızlarının eşit olması durumları için sayısal bulgular bir arada değerlendirildiğinde, ortalama giriş hızının 0,1 m/s olan değerlerine kadar artırılabilceği, bu değerden sonraki ortalama giriş hızlarının beklenen su akısı artışının sağlanamayacağı sonucuna varılır.



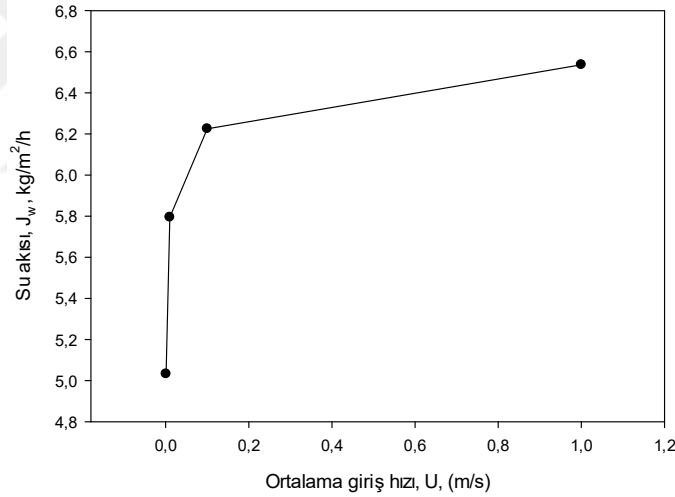
Şekil 30. Çözelti kütle kesrinin membran yüzeyinde dağılımı

3.2. Farklı Ortalama Giriş Hızlarının Su Akısı Üzerine Etkisi; Besleme ve Emiş Hızlarının Eşit Olması Durumu

Yukarıda verilen grafiklerde gösterildiği gibi, membranın emiş girişinden itibaren farklı konumlarında (y) hızının düşük değerlerinde en yüksek değerini membran üzerinde aldığı ve böylece simetrik hız dağılımının gerçekleştiği görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda, parçacıkların birbiriyle etkileşim nedeniyle membranın orta kısımlarında kirlilik unsurlarının birikme eğilimi gösterdiği belirtilmektedir (Kim ve Zidney 2005). Bu nedenle membran üzerinden geçiş esnasında homojen ve düzgün bir hız dağılımının oluşmasının kirlenmeye bağlı olarak uzun sürede filtreleme performansını artıracak düşünülmemektedir. Önceki başlıkta, 0,1 m/s ortalama giriş hızında membran üzerinde yüksek bir geçiş hızı gerçekleştiği ve membranın simetri eksenini oluşturduğu vurgulanmıştır. Ortalama giriş hızı 1 m/s'ye çıktığında ise simetri ekseninin bozulduğu ve böylece artan ortalama giriş hızıyla membranın orta kısımlarında çözelti kütle kesrinin arttığı anlaşılmıştır. Bu nedenle yüksek akış hızlarının membran üzerinde

kirlenme süresini artıracakı ön görülmektedir. Diğer taraftan ortalama giriş hızının 0,1 m/s' ye kadar olan değerlerinde membran üzerinden geçen su akısı artarken bu hızların simetri oluşumu üzerinde olumsuz etki yapmadığı görülmüştür. Ancak bu değerlerin üzerindeki hızlarda her ne kadar membran üzerinden geçen su akısı artıyor olsa da, membran üzerinde kısa sürede kirlenme olacağı beklenebilir.

Şekil 30'da verilen grafikte artan ortalama giriş hızı ile birlikte membran üzerinden geçen su akısının da arttığı görülmektedir. Bu artışın ortalama hızın 0,1 m/s değerine kadar çok hızlı olduğu ve daha sonra artış hızının yavaşladığı görülmektedir. Buradan, 0,1 m/s değerine kadar olan ortalama giriş hızlarında membrandan geçen su miktarının, besleme tarafından akan su miktarına oranının yüksek hızlardakinden çok daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Böylece, anılan hızlarda yani ortalama giriş hızının 0,1 m/s'den yüksek değerlerinde membran performansının düşeceği sonucuna varılır.



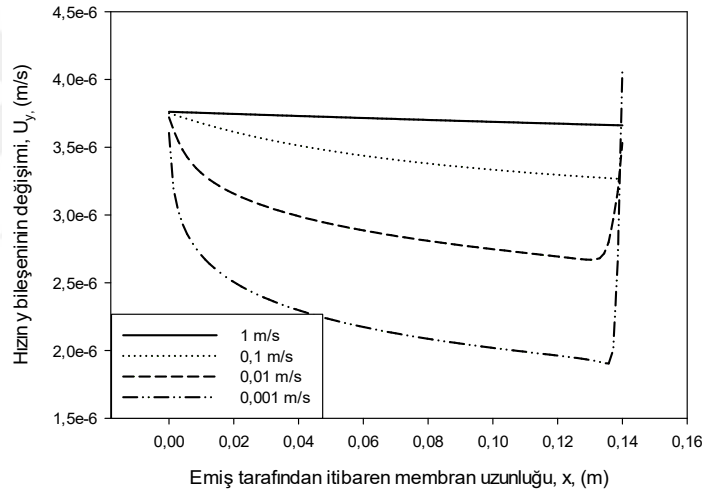
Şekil 31. Ortalama giriş hızının su akısı üzerine etkisi

Atık su arıtma teknolojisinde yüksek kirlilik yüklerinde kimyasal parçalanmanın gerçekleştiği anaerobik reaktörlerde, akış hızı yani besleme debisi yüksek iken reaktörde atık suyu bakteri yatağında belirli bir süre bekletmek gerekmektedir. Reaktör çıkış hızının 1 m/s üzerindeki değerlerinde arıtma kalitesinin düştüğü bilinmektedir. Yapılan simülasyonlar da, ortalama giriş hızının 1 m/s' ye kadar olan değerlerinde kadar membran üzerinden geçen su akısının arttığını göstermektedir (Gruber vd., 2011). Ortalama giriş hızının 1 m/s üzerindeki

değerler, hem akış rejimi geçiş bölgesinde olacağı hem de uygulamada karşılığı olmadığı için bu çalışma kapsamında incelenmemiştir.

3.3. Farklı Ortalama Giriş Hızlarında Membran Üzerinde Eksene Dik Doğrultuda Oluşan Hız Profilleri

Şekil 32’de farklı ortalama giriş hızlarında membran üzerinde oluşan, eksene dik doğrultudaki hızlar verilmiştir. Membranın üzerinde oluşan eksene dik doğrultudaki hızlar, membran üzerinde oluşan m_A çözelti kütle kesri dağılımıyla benzer bir profil oluşturmuştur. Bunun nedeni, çözümün osmotik basınca, osmotik basıncın da çözelti kütle kesrine bağlı olmasıdır.



Şekil 32. Farklı ortalama giriş hızlarında membran üzerinde oluşan aksenal hızlar

3.4. Farklı Ortalama Giriş Hızlarının Hız Profili Üzerine Etkisi; Besleme ve Emiş Hızlarının Farklı Olması Durumu

Anaerobik reaktör çıkışında membran kullanılması halinde emiş ve besleme pompalarının seçimi ve aynı şekilde borulama ve montaj işlerindeki çap seçimi besleme ve emiş hızlarında değişime neden olacaktır. Yapılan sayısal çalışmada, emiş hızının besleme hızına göre yüksek olması durumunda da su akışında dikkate almaya değer artışlar olduğu görülmüştür.

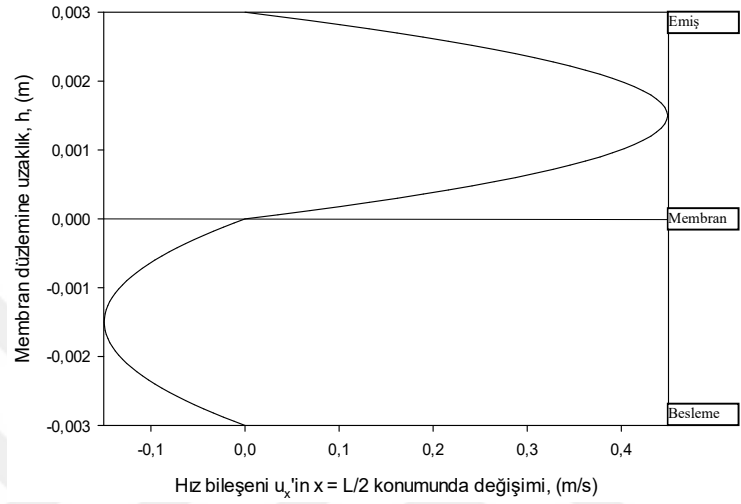
Bu durum, bir membran uygulamasında her iki taraftaki pompaların hız kontrollerinin yapılması ve bu pompalarla bağlantılı boru sistemlerinin koşullu tasarlanması yolu ile daha etkin bir membran yönetiminin sağlanması mümkün görünmektedir.

Gerçekleştirilen sayısal çalışmanın bu bölümünde emiş ve besleme taraflarında farklı ortalama giriş hızı değerleri için işlemler tekrarlanmıştır. Önceki bölümde de vurgulandığı gibi ortalama giriş hızının 0,1 m/s değeri membran performansı açısından en uygun değer olduğu görülmüştür. Bu kapsamdaki çalışmalar emiş ve besleme ortalama giriş hızlarının 0,1 m/s değerleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Şöyle ki; her defasında bir tarafın ortalama giriş hızı değeri 0,1 m/s olarak sabit tutulurken diğer taraf bu değer in göreceli olarak 2 ve 3 katı olması durumları için sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir.

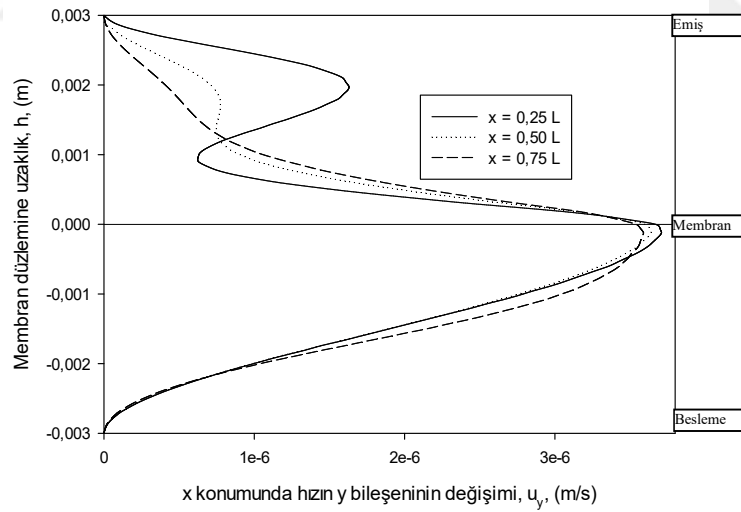
3.4.1.Emiş Hızının Besleme Hızının 3 Katı Olması Durumu

Şekil 33' te besleme tarafı ortalama giriş hızının 0,1 m/s, emiş tarafı ortalama giriş hızının 0,3 m/s olması durumu için kararlı durumdaki (a) eksenel ve (b) eksene dik doğrultudaki hız profilleri görülmektedir. Şekil 33 (a)'da görüldüğü gibi hızların maksimumları her iki tarafın da tam ortasında gerçekleşmektedir. Diğer taraftan hızların maksimum değerleri de ortalama giriş hızlarının 1,5 katı olarak gerçekleşmektedir. Bu durum Denklem (29) 'da verilen hız profili ifadesinden elde edilen sayısal sonuçla da uyumludur. Şekil 33 (b)' de ise eksene dik doğrultudaki hız bileşeninin emiş tarafı girişinden itibaren 3 farklı konumdaki profilleri görülmektedir. Emiş girişi yakınında $u(y)$ hızı emiş bölgesinde yeniden artış gösterme eğilimindedir. Bu eğilim emiş çıkışına doğru (0,75 L' de) kaybolmaktadır. $u(y)$ hızının bu davranışının, aynı hız profilinin membran üzerinde en yüksek değeri almasından bağımsız olarak geliştiği ve herhangi bir ters akış durumu söz konusu olmadığı için kirlenme üzerinde olumsuz etkisi olmamaktadır. Besleme ortalama hızının 0,1 m/s ve emiş ortalama hızının 0,3 m/s olduğu durum için elde edilen $u(y)$ hız profillerinin söz konusu olan bu davranışı dışında,

membran eksenindeki davranışı emiş ve besleme hızlarının 0,1 m/s değerinde olması durumuyla benzer eğilim göstermektedir. Ancak hızların membran eksenindeki sayısal değerleri beklenildiği gibi daha yüksek çıkmaktadır.



(a)

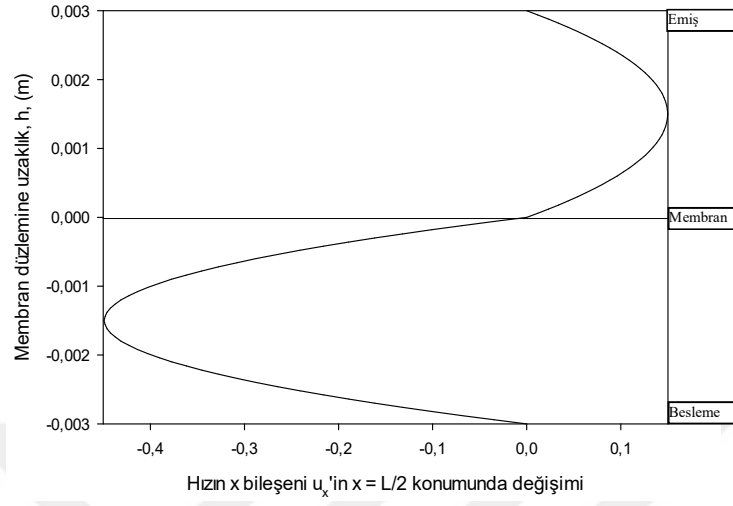


(b)

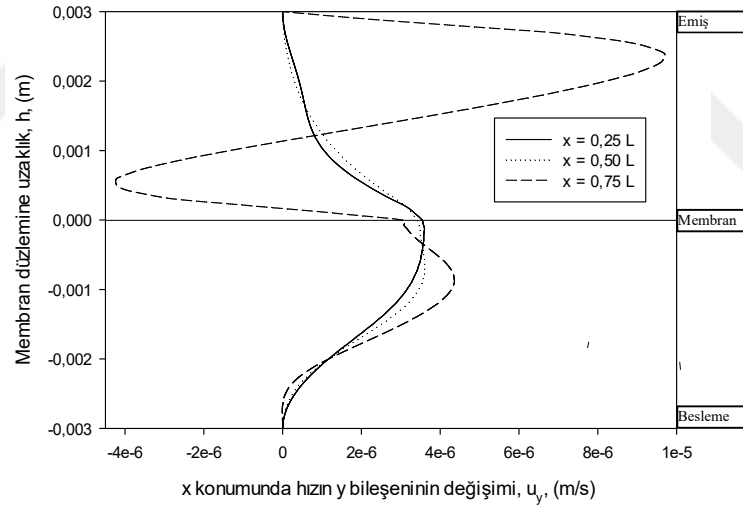
Şekil 33. Emiş hızının besleme hızının 3 katı olması durumunda oluşan hız profilleri a) Eksenel hız bileşeni b) Eksene dik doğrultudaki hız bileşeni

3.4.2. Besleme Hızının Emiş Hızının 3 Katı Olması Durumu

Şekil 34' te emiş tarafı ortalama giriş hızının 0,1 m/s, besleme tarafı ortalama giriş hızının 0,3 m/s olması durumu için kararlı durumdaki (a) aksenel ve (b) eksene dik doğrultudaki hız profilleri görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 33 (a)' daki gibi Şekil 34 (a)'da da hızların maksimumları her iki tarafın da tam ortasında gerçekleşmektedir. Aynı şekilde hızların maksimum değerleri ortalama giriş hızlarının 1,5 katı olarak gerçekleşmektedir. Şekil 34 (b)' de ise eksene dik doğrultudaki hız bileşeninin emiş tarafı girişinden itibaren 3 farklı konumdaki profilleri görülmektedir. Emiş girişinden itibaren oluşan $u(y)$ hız profilleri önceki durumlarda olduğu gibi membran ekseninde en yüksek değerleri almaktadır. Ancak membran çıkışına yaklaştıkça (0,75 L'de) hız profilinin karakteri değişmektedir. Emiş girişinden itibaren 0,25 L ve 0,5 L 'deki profillerdekinden farklı olarak 0,75 L'deki hız profilinin en yüksek değeri membran ekseninde oluşmamaktadır. Bu konumdaki hız profilinin en yüksek değeri besleme ve emiş bölgelerinde olmak üzere iki ayrı noktada gerçekleşmektedir. $u(y)$ hızının bu konumdaki profilinde dikkat çeken bir başka noktaysa emiş bölgesinde membran düzlemine yakın noktada ters akış oluşturmastır. Burada, besleme debisi emişten 3 kat daha yüksek olduğu için emiş çıkışına yaklaştıkça çözelti akışı membrandan besleme tarafına geçmeye zorlanacağı açıktır. Ancak, membranın yapısı bu geçişe engel olacağı için emiş tarafında ters akışın gerçekleşmesi kaçınılmazdır.



(a)

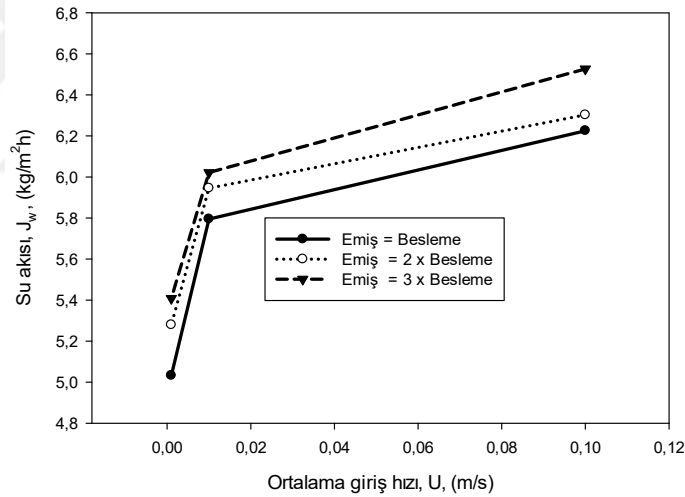


(b)

Şekil 34. Besleme hızının emiş hızının 3 katı olması durumunda oluşan hız profilleri a) Eksenel hız bileşeni b) Eksene dik doğrultudaki hız bileşeni

3.4.3. Farklı Besleme ve Emiş Hızlarının Su Akısı Üzerine Etkisi

Gerçekleştirilen sayısal analizde emiş ve besleme hızlarının farklı değerlerinde membrandan geçen su akıları elde edilmiştir. Emiş hızının besleme hızına eşit, iki ve üç katı olması durumlarında membrandan geçen su akısının besleme ortalama giriş hızıyla değişimi Şekil 35' te görülmektedir. Burada emiş hızı besleme hızına göre arttıkça su akısının da arttığı görülmektedir. Daha önce de, emiş besleme hızlarının eş olması durumlarında görüldüğü gibi buradaki farklı emiş ve besleme hız değerlerinde de ortalama giriş hızlarının yaklaşık 0,1 değerine kadar su akısında artışın çok hızlı, daha sonraki ortalama hız değerlerinde ise artışın yavaşladığı görülmektedir. Buradan, besleme ve emiş tarafı akış debilerinin ayarlanması yoluyla membrandan geçecek su akısının kontrol edilebileceği anlaşılmaktadır.

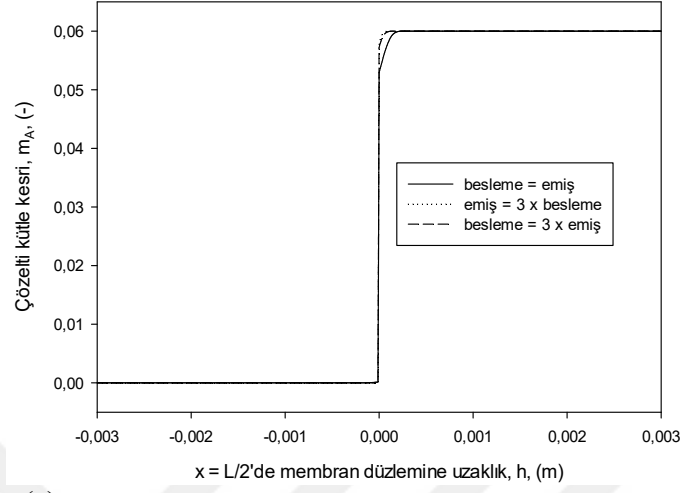


Şekil 35. Emiş ve besleme hızlarının farklı olması durumunun su akısı üzerine etkisi

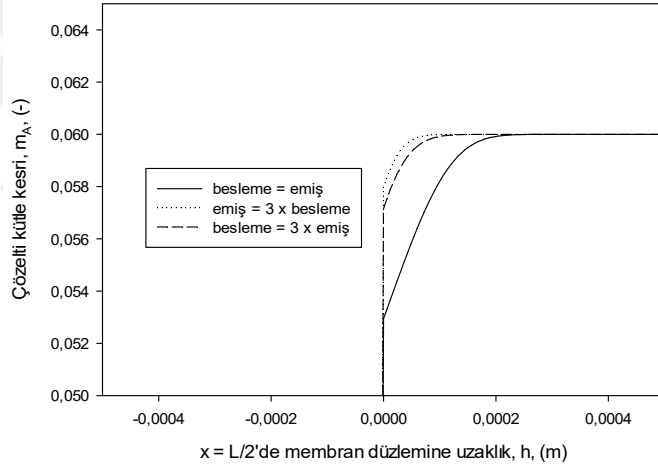
3.4.4. Farklı Besleme ve Emiş Hızlarının Çözelti Kütle Kesri Üzerine Etkisi

Sayısal analizin bu bölümünde, literatürde daha önce çalışılmamış olan emiş ve besleme hızlarının farklı olmasının akışa dik doğrultudaki hız profilleri ve membrandan geçen su akıları üzerine etkileri incelenmiştir. Bu etkiler 3.3.1, 3.3.2 ve 3.3.3 alt başlıklarında irdelenmiştir. Yapılan bu irdelemelere ilave olarak, Şekil 17'deki gösterime benzer şekilde çözelti kütle kesrinin membran eksenini boyunca değişimi Şekil 36'da verilmiştir.

Şekil 36 (a)' da farklı emiş ve besleme hızlarında oluşan çözelti kütle kesri(m_A)' nın membranın orta noktasında akışa dik doğrultudaki dağılımı görülmektedir. Şekil 36 (b)' de ise bu dağılımın membrana yakın bölgelerindeki davranışını değerlendirebilmek için büyütülmüş görseli yer almaktadır. Şekil 36 (b), daha önce Şekil 17' deki sayısal kodu doğrulamak amacıyla çizilen grafikte birlikte değerlendirilebilir. Söz konusu olan ve kodu doğrulamak amaçlı kullanılan bu grafikte artan ortalama giriş hızıyla membran üzerinde çözelti kütle kesrinin arttığı, bir bakıma kimyasal çözelti kaynaklı sıvanmanın olduğu görülmüştür. Benzer yaklaşımla Şekil 36 (b) de değerlendirildiğinde her iki durumda da yani hem emiş giriş hızının besleme giriş hızının 3 katı hem de besleme giriş hızının emiş giriş hızının üç katı olması durumlarında membran üzerinde çözelti kütle kesri birikiminin ortalama giriş hızlarının eşit olması durumundan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunlar arasında çözelti kütle kesrinin membran üzerinde en yüksek birikim oluşturduğu durum emiş ortalama giriş hızının besleme ortalama giriş hızının üç katı olması durumudur. Buradan, daha önce literatürde yapılmamış olan, ortalama giriş ve besleme hızlarının farklı olması durumlarının membran üzerine çözelti kütle kesri birikimi üzerine etkili olduğu sonucu çıkmaktadır. Böylece, anMBR uygulamalarında artan su akısıyla beraber membran üzerinde çözelti kütle kesri birikiminin de arttığı anlaşılmaktadır. Buradan, ortalama giriş hızı değerine ve oluşan hız profillerine bakılarak, geri yıkama sürelerinin ve geri yıkama noktalarının belirlenebileceği anlaşılr.



(a)

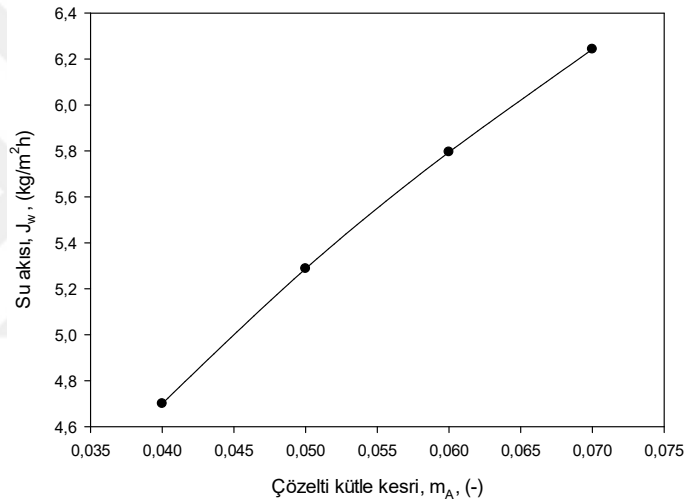


(b)

Şekil 36. Farklı emiş ve besleme hızlarının çözeltili kütle kesri üzerine etkisi a) Kütle kesrinin y eksenine boyunca değişimi b) Kütle kesrinin membran yakınlarındaki davranışı

3.5. Çözelti Kütle Kesrinin Su Akısı Üzerine Etkisi

Bilindiği gibi FO, emiş ve besleme taraflarındaki konsantrasyon farkından kaynaklanmaktadır. Sınır şartlarında da verildiği gibi mevcut çalışmada yapılan analizlerin tamamı girişte ortalama çözelti kütle kesrinin 0,06 değeri için gerçekleştirilmiştir. Farklı ortalama giriş kütle kesirlerinin ozmotik basınç ve dolayısıyla su akısı üzerinde etkisi Şekil 37 'de görülmektedir. Burada, beklenildiği gibi artan ortalama çözelti kütle kesriyle su akısı arasında artan bir ilişki ortaya çıkmaktadır.



Şekil 37. Çözelti kütle kesrinin değişimiyle su akısının değişimi

3.6. Sıcaklığın Su Akısı Üzerine Etkisi

Anaerobik reaktörde kullanılan bakterilerin çalışma sıcaklıkları bakterilerin türüne göre değişmektedir. Ülkemizde kullanılan bakteriler genelde mezofolik yapıda olup daha önce de belirtildiği gibi bu bakterilerin en yüksek verimde çalıştığı sıcaklık 35 °C olduğu bilinmektedir. Yine daha önce belirtildiği gibi literatürde, sıcaklıktaki her 1°C'lik artışın bakterilerin arıtma giderim performansını %5 artırdığı bilinmektedir. Ayrıca, su sıcaklığındaki değişimle birlikte fiziksel özelliklerin de değişeceği açıktır.

Atık su arıtma işleminde pompalama için gerekli güç miktarının reaktöre giriş-çıkış sıcaklık farkıyla ters orantılı olarak arttığı yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur (Ugrozov

ve Kataeva 2004). Yine yapılan çalışmalarda sıcaklık farkı nedeniyle oluşan ısı transferinin kütle transferini, kütle transferinin de ısı transferini olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir (Glavatskiy vd., 2013). Bu kapsamda yapılan çalışmalarda geçirgen boru ya da plaka arasında akışlarda, membranın ayırdığı iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının artmasıyla ısı transferi miktarının arttığı, bunun da kütle transferini artırdığı gösterilmiştir (Phattaranawik vd., 2003; Gryta vd., 1997; Qtaishat vd., 2008; Buia vd., 2010). Atık suyun ısıtılması halinde bakterilerin performans artışına bağlı olarak, arıtma performans artmakta ve arıtma maliyetleri olduğu rapor edilmektedir (Ferrer.vd.,2015). Buradan da görüleceği gibi membran sistemlerinde ve membran ilavesiz anaerobik reaktörlerde atık suyun ısıtılmasıyla arıtma kapasitesinin artacağı anlaşılmaktadır.

Mevcut çalışmada elde edilen hız dağılımları, çözelti kütle kesri dağılımları ve su akıları suyun 20 °C'deki fiziksel özellikleri kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında farklı sıcaklıklar için momentum, kütle transferi ve enerji denklemleri eş zamanlı çözülerek farklı sıcaklıklardaki ısıl denge durumlarında sıcaklığın su akısı üzerinde etkisi incelenmiştir. FO uygulanan sistemlerde, Şekil 9'da da gösterildiği gibi belli bir süreden sonra çözelti geri kazanım tankından ısı çekilmediği sürece besleme ve emiş taraflarının belli bir süre sonra ısıl dengeye ulaşacağı ve her iki taraftaki sıcaklığın eşit olacağı açıktır. Bu nedenle yapılan çalışmada, membranın her iki tarafı için aynı olmak üzere sırasıyla 10°C-20°C-30°C-35°C sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerlerindeki suyun fiziksel özellikleriyle enerji denklemi çözümü gerçekleştirilmiştir. Suyun söz konusu olan bu sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. Yukarıda Şekil 9'a da atıfta bulunarak ifade edilen fiziksel durum için membran üzerindeki ısıl sınır koşulu türev sınır koşulu, yani eksene dik doğrultuda sıfır sıcaklık gradyanı olarak değerlendirilmiştir.

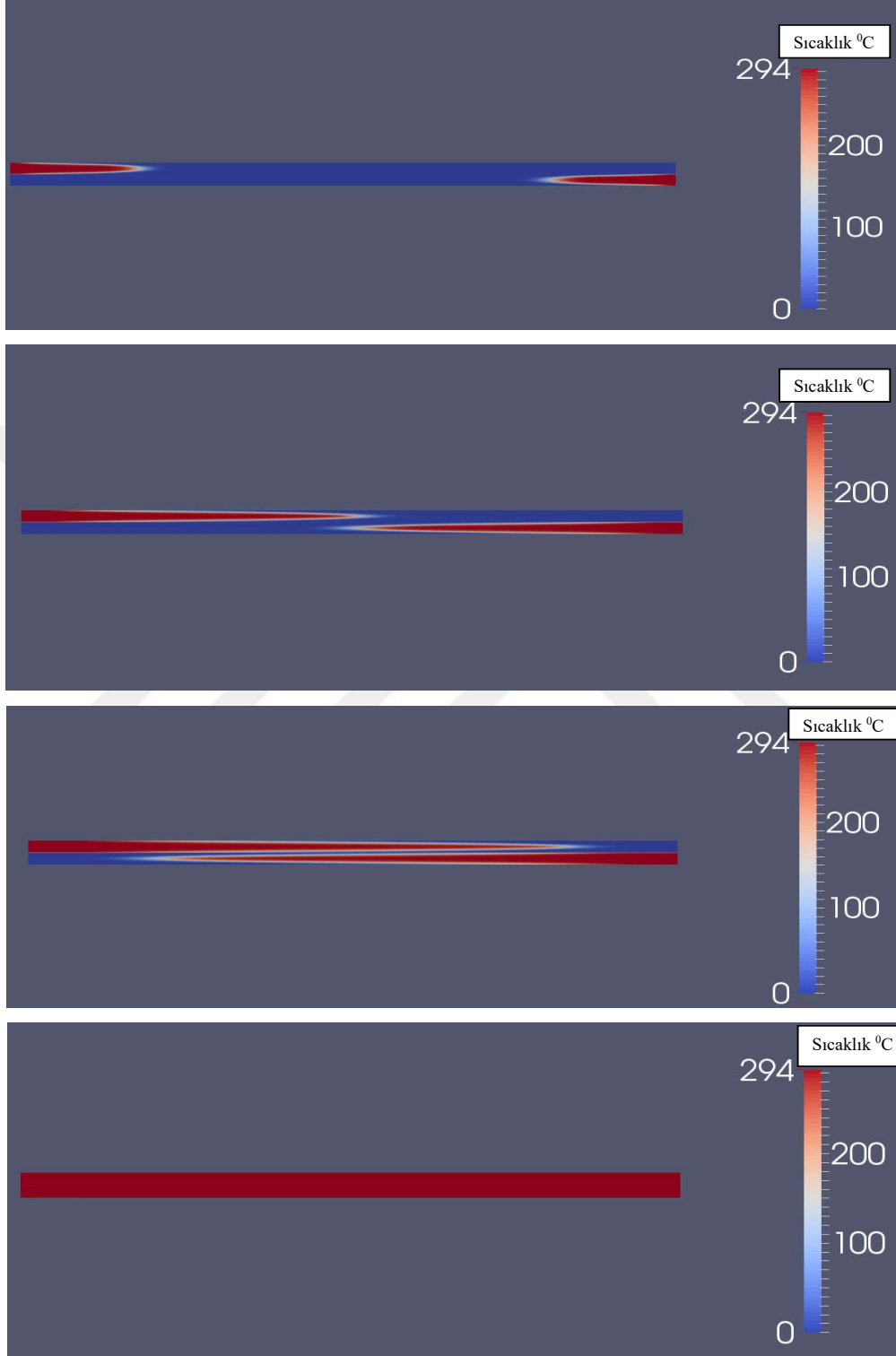
Tablo 5. Farklı sıcaklıklarda suyun fiziksel özellikleri

FizikselÖzellik Sıcaklık	Yoğunluk (ρ) (kg/m ³)	Dinamik vizkozite(μ) (kg/ms)	Kinematik vizkozite(ν) (m ² /s)	Isıl yayılma katsayısı(α) (m ² /s)
10 ° C	999,65	0,0013076	0,0000013081	1,38.10 ⁻⁷
20 ° C	998,19	0,001005	0,0000010023	1,43.10 ⁻⁷
30 ° C	995,67	0,000797	8,005.10 ⁻⁷	1,47.10 ⁻⁷
35 ° C	994,06	0,0007198	7,24.10 ⁻⁷	1,49.10 ⁻⁷

Membran üzerinde söz konusu sınır koşulunu Denklem (29)'daki enerji denkleminde uygulanarak belli bir süreden sonra besleme ve emiş tarafının ısı dengeye ulaştığı yani sıcaklıkların eşitlendiği görülmüştür. Enerji denkleminin çözümünden elde edilen bu sonuç Şekil 38'de görülmektedir.

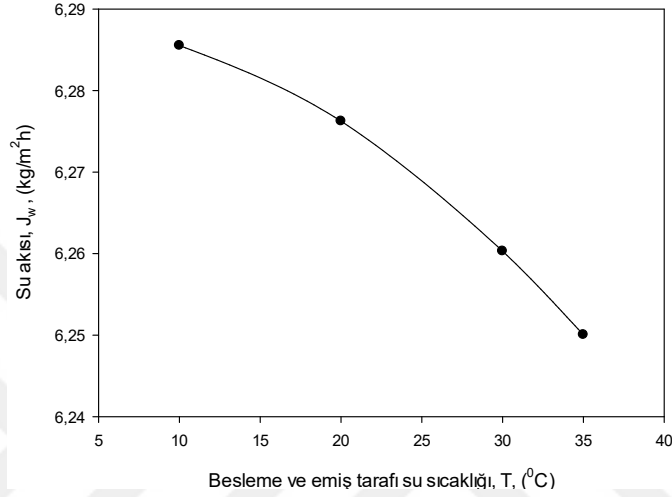
$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla(\rho UT) = \nabla(\rho \alpha \nabla T) \quad (29)$$

Çalışmanın bu bölümünde amaç, besleme ve emiş tarafının kararlı durumda ısı dengeye ulaştığını göstermek ve ayrıca sıcaklığın suyun fiziksel özellikleri üzerine olan etkisiyle ilişkili olarak momentum denklemini çözmek ve dolayısıyla sıcaklığın su akısı üzerine etkisini ortaya koymaktır. Su akısının sıcaklıkla değişimi Şekil 39'da verilmiştir.



Şekil 38. Akış alanı içindeki sıcaklık gelişimi

Sayısal sonuçlar sıcaklık artışıyla birlikte su akısında bir düşüş olduğunu ancak bu düşüşün dramatik düzeyde olmadığını göstermektedir. Şekil 39' daki grafikten ayrıca, 20 °C için gerçekleştirilen bu tez çalışmasındaki su akısı değeriyle örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 39. Su akısının sıcaklıkla değişimi

Diğer taraftan yapılan çalışmalar, anMBR'lerde kullanılan bakterilerin artan sıcaklıkla birlikte arıtma performanslarını iyileştirdiği bilinmektedir (Özgün vd. 2005). Literatürde, su sıcaklığında 1°C' lik artışın bakteri arıtma performansını %5 artırdığı belirtilmektedir. Mevcut çalışmadaki sayısal sonuçlardan ise 10 °C'lik sıcaklık artışının su akısını % 0,15 kadar düşürdüğü görülmüştür. Bu durumda, artan sıcaklığın bakteri performansı üzerine olan olumlu etkisinin sıcaklığın fiziksel özellikler üzerine etkisinden kaynaklanan su akısı düşüşünden çok daha önemli olduğu açıktır. Sonuç olarak arıtma işleminin literatürde de önerildiği gibi 35 °C' de gerçekleştirilmesinin uygun olacağı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Son yıllarda kullanımı yaygınlaşan anMBR'lerde membran performansı ile ilgili bazı sorunlarla karşılaşilmektedir. Arıtılacak suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerinin membran performansını etkilediği bilinmektedir. Literatürde bu konuyla ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır ve bu çalışmalarda, uygulamadan gelen verilerin sudaki enzim miktarının, (mg/Ca) ve EPS yapısı gibi faktörlerin membran performansı üzerinde etkili olduğunu gösterdiği vurgulanmaktadır. Bazı çalışmalarda atık suya yapılan FeCl_3 gibi kimyasal ilavelerin membran performansını artırdığı, ancak yine kimyasallarla yapılan geri yıkama işeminin farklı kimyasallarla değişik sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Mevcut çalışmada, atık suyun anaerobik reaktörden çıktıktan sonra membrana girerken sahip olacağı hidrodinamik ve ısı şartların da membran performansı üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- 1- Hem klasik anaerobik reaktörlerde hem de anMBR sistemlerde hızın önemli bir parametre olduğu yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır. Mevcut sayısal analizde de düz plaka şeklindeki membran sistemlerde ortalama giriş hızının 1 m/s'ye kadar olan değerlerinde membran üzerinden geçen su debisinin arttığı görülmüştür.
- 2- Membran üzerinden karşıt akışlı sistemlerde ortalama giriş hızının 0,1 m/s'ye kadar olan değerleri için y eksenini doğrultusundaki hızın en yüksek değerine membran üzerinde ulaştığı ve membranın, oluşan hız profilindeki simetri eksenine örtüştüğü, bu hızın 0,1 m/s değerinin üzerine çıkması durumunda ise y eksenini doğrultusundaki hızın en yüksek değerine membran üzerinde ulaşmadığı ve membranın, oluşan hız profilinin simetri eksenine örtüşmediği görülmüştür. Buradan, membrandan geçen su akısı ile membran üzerinde oluşan çözelti kütle kesri birikimi birlikte değerlendirilerek, 0,1 m/s ortalama giriş hızının en uygun değer olduğu sonucuna varılmıştır.
- 3- Membran üzerindeki çözelti birikiminin, düşük ortalama giriş hızlarında membranın uç kısımlarında ve yüksek ortalama giriş hızlarında ise membranın genelinde yüksek olduğu görülmüştür.
- 4- Emiş ve besleme tarafı hızlarının farklı olması durumunda yüksek emiş hızının su akısını arttırdığı ve böylece emiş tarafı hızının kontrol edilmesi yolu ile membran üzerindeki akının artırılmasının mümkün olabileceği görülmüştür.

- 5- Emiş ve besleme tarafı hızlarının farklı olması durumunda yüksek emiş hızının membran üzerinde çözelti birikimini artırdığı, en az çözelti birikiminin emiş ve besleme tarafı ortalama giriş hızlarının eşit olması durumunda gerçekleştiği görülmüştür.
- 6- Besleme ortalama giriş hızının emiş tarafınının, üç katı olması durumunda emiş çıkışına yaklaştıkça ters akışların oluştuğu ve bunun da çözeltinin besleme tarafına geçmeye zorlanması nedeniyle membran üzerinde oluşacak birikimi arttıracakı görülmüştür.
- 7- Genel olarak, ortalama giriş hızlarının çözelti kaynaklı kirlenme ve membrandan geçen su akısı üzerine etkili parametreler olduğu görülmüştür.
- 8- Sayısal bulgular arıtma sıcaklığının 10 °C' dan 35 °C' a artırılmasının membran üzerinden geçen su akısını her 10 °C'lik artışta su akısını % 0,15 azalttığını, diğer taraftan literatür verileri sıcaklık artışından kaynaklanan bakteri performansının su akısı artışı üzerinde daha etkili bir parametre olduğunu göstermiştir.
- 9- Emiş ve besleme ortalama giriş hızlarının, bu hızların eşit olması durumunda, su akısı üzerinde etkili olduğu, önceki çalışmalarda görüldüğü gibi mevcut çalışmada da görülmüştür.
- 10- Mevcut çalışmada, emiş ve besleme ortalama giriş hızlarının, bu hızların eşit olması durumunda su akısı üzerine olan etkisi yanı sıra membrandaki çözelti birikimi üzerinde de etkili olduğu, artan su akısının membran üzerinde biriken çözelti kütle kesrini de artırdığı görülmüştür.
- 11- Mevcut çalışmada, emiş ve besleme tarafı ortalama giriş hızlarının birbirlerinin katları olması durumunun, membrandan geçen su akısını ve membran üzerinde oluşan çözelti birikimini de artırdığı görülmüştür.

5. ÖNERİLER

Mevcut çalışmada, günümüzde yaygın bir uygulama alanına sahip olan anMBR uygulaması için membranın her iki tarafındaki ortalama akış hızlarının membrandan geçen su akısı ve membranda birikim üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, farklı arıtma sıcaklıklarının ısıl denge şartlarında arıtma performansına etkisi de incelenmiştir. Gerek sayısal sonuçların karşılaştırılması ve gerekse yeni sayısal çalışmaların yönlendirilmesi bakımından şu önerilerde bulunulmuştur:

- 1- Hemen hemen her sayısal çalışmada olduğu gibi bu çalışmanın da deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda yürütülecek bir deneysel çalışmayla farklı ortalama giriş hızlarının membran üzerinde birikimi ve su akısı üzerinde sonuçları mevcut sayısal çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılabilir.
- 2- Uygulamada FO ile RO 'nun arıtma kapasiteleri, mevcut FO analizinde kullanılan, ortalama giriş hızlarının yerine pompalama gücü cinsinden karşılaştırma yapmak amacıyla RO çözümü gerçekleştirilerek FO ile karşılaştırılabilir.
- 3- Membran üzerinde suyun sıcaklık artışının atık su arıtma kapasitesi üzerine etkisini görmek amacıyla bir deneysel çalışma kapsamında elde edilecek sonuçlarla, literatürde halen mevcut olmayan ısıl sınır koşulunun belirlenmesine katkı sağlayacak ifadeler geliştirilebilir.
- 4- Plakalı membran için gerçekleştirilen bu çalışma boru tipi membran uygulaması için de gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- A Chilli, A., Marchand, E.A., ve Childress, A.E., 2011. A Performance Evaluation of Three Membrane Bioreactor Systems: Aerobic, Anaerobic, and Attached-Growth, Water Science- Technology, 63,12, 2999-3006.
- Agasanapura, B., Baltus, R.E., Charan, T., ve Chellam, S., 2013. Membrane Rejection of Nonspherical Particles: Modeling and Experiment, Wiley Online Library, 59, 3863-3873.
- Agashichev, S.P., 2009. Survey of Theoretical Approaches to Modeling Pressure-Driven Membrane Processes (Submodels For Transport In Phases), Encyclopedia of Desalination and Water Resources, Moscow, 2, 125047.
- Alkhudhiri, A., Darwish, N., ve Hilal, N., 2012. Membrane Distillation: A Comprehensive Review, Desalination, 287, 2–18.
- Arabi, S., 2009. Impact of Influent Feed and Mixed Liquor Characteristics on Fouling in Submerged Membrane Bioreactors For Wastewater Treatment, Doktora tezi, TheUniversity of Western Ontario, Department of Chemical and Biochemical Engineering. Canada, 324, 142–150.
- Aravinth, S., 2000. Prediction of Heat and Mass Transfer for Fully Developed Turbulent Fluid Flow Through Tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 1399-1408.
- Aslan, M., ve Saatçi, Y., 2012. Impacts of Different Membrane Module Designs in Anaerobic Submerged Membrane Bioreactors, Clean – Soil, Air, Water, 42, 1759-1764.
- Baek, S.H., Pagilla, K.R., ve Kim, H., 2010. Lab-Scale Study of an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for Dilute Municipal Wastewater Treatment, Biotechnology and Bioprocess Engineering, 15, 704-708
- Bakonyi, P., Nemestóthy, N., Simon, V., ve Bélafi-Bakó, K., 2014. Fermentative Hydrogen Production in Anaerobic Membrane Bioreactors: A Review, Bioresource Technology, 156, 357-363.
- Batstone, D.J., Keller J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist H. ve Vavilin V.A., 2002. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1), Water Science & Technology, 45, 65-73.
- Belfort, G. ve Nagata, N., 1985. Fluid Mechanics and Cross-Flow Filtration: Some Thoughts, Desalination, 53, 57-79.
- Benyahia, B., Sari, T., Cherki, B., ve Harmand, J., 2013. Anaerobic Membrane Bioreactor Modeling in the Presence of Soluble Microbial Products (SMP) – The Anaerobic Model AM2b, Chemical Engineering Journal, 228, 1011-1022.

- Bernales, B. ve Haldenwang, P., 2014. Laminar Flow Analysis in a Pipe With Locally Pressure-Dependent Leakage Through the Wall, European Journal Mechanics B/Fluids, 43, 100-109.
- Buia, V.A., Vub, L.T.T., ve Nguyen, M.H., 2010. Modelling the Simultaneous Heat and Mass Transfer of Direct Contact Membrane Distillation in Hollow Fibre Modules, Journal of Membrane Science, 353, 85–93
- Buntner, D., Spanjers, H., ve Van Lier, J.B., 2014. The Influence of Hydrolysis Induced Biopolymers from Recycled Aerobic Sludge on Specific Methanogenic Activity and Sludge Filterability in an Anaerobic Membrane Bioreactor, Water Research, 51, 284-292.
- Camacho, F., Jurado, E., Luzon, G., ve Vicaria, J.M., 2010. Development and Analysis of an Integral Fluid dynamic Model in Hollow Fibre for Different Operational Modes, Journal of Membrane Science, 347, 116-131.
- Carlos Augusto, L.C., 2007. Anaerobic Reactors. London: IWA Publishing
- Charfi, K., Khayet, M., ve Safi, M.J., 2010. Numerical Simulation and Experimental Studies on Heat and Mass Transfer Using Sweeping Gas Membrane Distillation, Desalination 259, 84–96
- Charfi, A., Amar, N.B., ve Harmand J., 2012. Analysis of Fouling Mechanisms in Anaerobic Membrane Bioreactors, Water Research, 46, 2637-2650.
- Chellam, S., 1995. Laminar Fluid Flow, Particle Transport And Permeate Flux Behavior In Crossflow Membrane Filters, Doktora Tezi, Rice University, Texas,
- Chellam, S. ve Cogan, N.G., 2011. Colloidal and Bacterial Fouling During Constant Flux Microfiltration: Comparison of Classical Blocking Laws with a Unified Model Combining Pore Blocking and EPS Secretion, Journal Of Membrane Science, 382, 148-157
- Chen, L., Gu, Y., Cao, C., Zhang, J., Ng, J., ve Tang, C., 2014. Performance of a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor with Forward Osmosis Membrane for Low-Strength Wastewater Treatment, Water Research 50, 114-123.
- Chueh, C.C., Bertei, A., Pharoah, J.G., ve Nicolella, C., 2014. Effective Conductivity in Random Porous Media with Convex and Non-Convex Porosity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71, 183-188.
- Clech, P., Chen, V., ve Fane, T.A.G., 2006. Fouling in Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment, Journal of Membrane Science, 284, 17-53.
- Cogan, N.G. ve Chellam, S., 2009. Incorporating Pore Blocking Cake Filtration and EPS Production in a model for Constant Pressure Bacterial Fouling During Dead-End Microfiltration, Journal of Membrane Science, 345, 81-89.

- Cogan, N.G., ve Chellam, S., 2014. A Method for Determining the Optimal Back-Washing Frequency and Duration for Dead-End Microfiltration, Journal of Membrane Science, 469, 410-417
- Dagnew M., Pickel J., Parker W., ve Seto P., 2012. Anaerobic Membrane Bio-Reactors for Waste Activated Sludge Digestion: Tubular Versus Hollow Fiber Membrane Configurations, Environmental Progress & Sustainable Energy, 32, 598-604.
- Dagnew, M., Parker, W.J., ve Seto, P., 2010. A Pilot Study of Anaerobic Membrane Digesters for Concurrent Thickening and Digestion of Waste Activated Sludge (WAS), Water Science Technology, 61(6), 1451-1458.
- Dereli, R.K., Ersahin, M.E., Özgün H., Ozturk I., Jeison D., Zee F., ve Lier J. B., 2012. Potentials of Anaerobic Membrane Bioreactors to Overcome Treatment Limitations Induced by Industrial Wastewaters, Bioresource Technology, 122, 160-170.
- Dhar, B. R., Gao, Y., Yeo, H., ve Lee, H.S., 2013. Separation of Competitive Microorganisms Using Anaerobic Membrane Bioreactors as Pretreatment to Microbial Electrochemical Cells, Bioresource Technology, 148, 208-214
- Díaz, H., Azócar, L., Torres, A., Lopes, S.I.C., ve Jeison, D., 2014. Use of Flocculants for Increasing Permeate Flux in Anaerobic Membrane Bioreactors, Water Science And Technology, 69, 11, 2237-2242.
- Diez, V., Ezquerro, D., Cabezas, J.L., García, A., ve Ramos, C., 2014. A Modified Method for Evaluation of Critical Flux Fouling Rate and in Situ Determination of Resistance and Compressibility in MBR under Different Fouling Conditions, Journal Of Membrane Science, 453, 1-11.
- Ding, Y., Tian, Y., Li, Z., Zuo, W., ve Zhang, J., 2015. A Comprehensive Study into Fouling Properties of Extracellular Polymeric Substance (EPS) Extracted From Bulk Sludge and Cake Sludge in a Mesophilic Anaerobic Membrane Bioreactor, Bioresource Technology, 192, 105-114.
- Ding, Y., Tian, Y., Li, Z., Liu, F., ve You, H., 2014. Characterization of Organic Membrane Foulants in a Forward Osmosis Membrane Bioreactor Treating Anaerobic Membrane Bioreactor Effluent, Bioresource Technology, 167, 137-143.
- Dong, Q., Parker, W., ve Dagnew, M., 2015. Impact of FeCl₃ Dosing on AnMBR Treatment of Municipal Wastewater, Water Research So, 80, 281-293.
- El-Bourawi, M.S., Ding, Z., Ma, R., ve Khayet, M., 2006. A Framework for Better Understanding Membrane Distillation Separation Process, Journal Of Membrane Science, 285, 4-29.
- Fan, F., 2005. Fouling Mechanisms and Control Strategies for Improving Membrane Bioreactor Processes, Doktora Tezi, University of Guelph.

- Ferrer, J., Pretel, R., Duran, F., Giménez, J.B., Robles, A., Ruano, V. M., Serralta, J., Ribes., ve J., Seco, A., 2015. Design Methodology for Submerged Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR): A Case Study, Separation And Purification Technology, 141, 378–386
- Fimbres-Weihs, G.A., ve Wiley, D.E., 2010. Review of 3D CFD Modeling of Flow and Mass Transfer in Narrow Spacer-Filled Channels in Membrane Modules, Chemical Engineering And Processing, 49, 759–781.
- Fox, R.A. ve Stuckey, D.C., 2015. The Effect of Sparging Rate on Transmembrane Pressure and Critical Flux in an AnMBR, Journal Of Environmental Management, 151, 280-285.
- Fox, R. ve Stuckey D., 2015. MS-2 and T4 Phage Removal in an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR): Effect Of Gas Sparging Rate, J Chem Techonol Biotechnol, 90(3), 384-390.
- Franklin, L. B. ve Stensel, D.H., 2002. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, Fourth Edition, Mc Graw-Hill Book Co., New York, 95: 5
- Gahleitner, B., Loderer, C., Saracino, C., Pum, D., ve Fuchs, W., 2014. Chemical Foam Cleaning as an Efficient Alternative for Flux Recovery in Ultrafiltration Processes, Journal Of Membrane Science, 450, 433-439.
- Gao, D., Hu, Q., Yao, C., ve Ren, N., 2014. Treatment of Domestic Wastewater by an Integrated Anaerobic Fluidized-Bed Membrane Bioreactor under Moderate to Low Temperature Conditions, Bioresource Technology, 159, 193–198.
- Gao, D., Hu, Q., Yao, C., Ren, N., ve Wu, W., 2014. Integrated Anaerobic Fluidized-Bed Membrane Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment, Chemical Engineering Journal, 240, 362–368.
- Gao, D., Zhang, T., Tang, C.Y., Wu, W., Wong, C., Lee, Y.H., Yeh, D.H., ve Criddle, C. S., 2010. Membrane Fouling in an Anaerobic Membrane Bioreactor: Differences in Relative Abundance of Bacterial Species in the Membrane Foulant Layer and in Suspension, Journal of Membrane Science, 364, 331-338.
- Geraldes, V., Semião, V., ve Pinho, M. N., 2001. Flow and mass transfer modelling of nanofiltration, Journal of Membrane Science, 191, 109–128
- Glavatskiy, K., Pharoah, J.G., ve Kjelstrup, S., 2013. Thermal Phenomena Associated with Water Transport Across a Fuel Cell Membrane: Soret And Dufour Effects, Journal of Membrane Science, 431, 96-104.
- Gouveia, J., Plaza, F., Garralon, G., Fdz-Polanco, F., ve Pena, M., 2015. Long-Term Operation of a Pilot Scale Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for the Treatment of Municipal Wastewater Under Psychrophilic Conditions, Bioresorce Technology, 185, 225-233.

- Gruber, M.F., Johnson C.J., Tang, C.Y., Jensen, M.H., L.Y'de., ve Hélix-Nielsen, C., 2011. Computational fluid dynamics simulations of flow and concentration polarization in forward osmosis membrane systems, Journal of Membrane Science, 379, 488–495.
- Gryta, M., Tomaszewska, M., ve Morawski, A. W., 1997. Membrane Distillation with Laminar Flow, Separation And Purification Technology, 11, 93-101.
- Gryta, M. ve Tomaszewska, M., 1998. Heat Transport in the Membrane Distillation Process, Journal of Membrane Science, 144, 211-222.
- Hemmelmann, A., Torres, A., Vergara, C., Azocar, L., ve Jeison, D., 2013. Application of Anaerobic Membrane Bioreactorsf The Treatment of Protein-Containing Wastewaters under Saline Conditions, Chem Technol Biotechnol, 88(4), 658–663.
- Ho, J., ve Sung, S., 2010. Methanogenic Activities in Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR) Treating Synthetic Municipal Wastewater, Bioresource Technology, 101, 2191-2196.
- Hout, M.S., ve Federspiel, W.J., 2003. Mathematical and Experimental Analyses of Antibody Transport in Hollow-Fiber-Based Specific Antibody Filters, Biotechnol Prog, 19(5), 1553-1561.
- Issa, R. I., 1985. Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator Splitting, Journal of Computational Physics, 62, 40-65.
- Jensen, P.D., Yap, S.D., Boyle-Gotla, A., Janoschka, J., Carney, C., ve Pidou, M., 2015. Anaerobic Membrane Bioreactors Anable High Rate Treatment of Slaughterhouse Wastewater, Biochemical Engineering Journal, 97, 132-141.
- Jin, L., Zhang, G., ve Tian, H., 2014. Current State of Sewage Treatment in China, Water Research, 66, 85-98.
- Joseph, C.A., 2019. Anaerobic Waste Water Treatment and Biogas Plants. London: CRC Press
- Kaleli, B.Ö., Elidüzgün, S., Barlas, H., Bio-Cell Batık Membran Modülü: İşletme Kitapçığı
- Kanai, M., Ferre, V., Wakahara, S., Yamamoto, T., ve Moro, M., 2010. A Novel Combination of Methane Fermentation and MBR-Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor Process, Desalination, 250, 964-967.
- Kang, I., Yoon, S., ve Lee, C., 2002. Comparison of the Filtration Characteristics of Organic and Inorganic Membranes in a Membrane-Coupled Anaerobic Bioreactor, Water Research, 36, 1803-1813.
- Kijjanapanich, P., Do, A.T., Annachhatre, A.P., Esposito, G., Yeh, D.H., ve Lens, P.N.L., 2014. Biological Sulfate Removal from Construction and Demolition Debrisleachate: Effect of Bioreactor Configuration, Journal of Hazardous Materials, 269, 38–44.
- Kim, M.M. ve Zydney, A.L., 2005. Particle-Particle Interactions During Normal Flow Filtration: Model Simulations, Chemical Engineering Science, 60, 4073-4082.

- Kim, J., Shin, J., Kim, H., Lee, J., Yoon, M., Won, S., Lee, B., ve Song, K.G., 2014. Membrane Fouling Control Using a Rotary Disk in a Submerged Anaerobic Membrane Sponge Bioreactor, Bioresource Technology, 172, 321–327.
- Kimura, K., Yamato, N., Yamamura, H., ve Watanabe, Y., 2005. Membrane Fouling in Pilot-Scale Membrane Bioreactors (Mbrs) Treating Municipal Wastewater, Environ. Sci. Technol., 39, 6293-6299.
- Koch, J. R. L., 2015. Genetic Algorithm Based Optimization of Baffle Positions in a Forward Osmosis Draw Channel, Yüksek Lisans Tezi, Washington University, Missouri,
- Kun, Y., Pan, X., Sheng, G., Li, W., Shi, B., ve Yu, H., 2015. Development of an Energy-Saving Anaerobic Hybrid Membrane Bioreactors for 2-Chlorophenol-Contained Wastewater Treatment, Chemosphere, 140, 79-84.
- Lee, K. L., ve Baker, R. W., 1981. Lonsdale, H.K., Membranes for Power Generation by Pressure-Retarded Osmosis. Journal of Membrane Science, 8(2), 141–171,
- Liu, Y., Chang, S., ve Defersha, F.M., 2015. Characterization of the Proton Binding Sites of Extracellular Polymeric Substances in an Anaerobic Membrane Bioreactor, Water Research, 78, 133-143.
- Li, Q., Li, Y., Qiao, W., Wang, X., ve Takayanagi, K., 2015. Sulfate Addition as Effective Method to Improve Methane Fermentation Performance and Propionate Degradation in Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Coffee Grounds Milk and Waste Activated Sludge With AnMBR, Bioresource Technology, 185, 308-315.
- Lin, H., Liao, B., Chen, J., Gao, W., Wang, L., Wang, F., ve Lu, X., 2011. New Insights into Membrane Fouling in a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor Based on Characterization of Cake Sludge and Bulk Sludge, Bioresource Technology, 102, 2373-2379
- Liu, L., Liu, J., Gao, B., Yang, F., ve Chellam, S., 2012. Fouling Reductions in a Membrane Bioreactor Using an Intermittent Electric Field and Cathodic Membrane Modified by Vapor Phase Polymerized Pyrrole, Journal of Membrane Science, 394-395, 202-208.
- Liu, Y., Zhang, K., Bakke, R., Li, C., ve Liu, H., 2013. Membrane Installation for Enhanced Up -Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Performance, Journal of Bioscience and Bioengineering, 116, 357-361.
- Ng, K.K., Shi, X., Ng., ve H.Y., 2015. Evaluation of System Performance and Microbial Communities of a Bioaugmented Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Pharmaceutical Wastewater, Water Research, 81, 311-324.
- Ng, K.K., Shi, X., Tang, M.K.Y., ve Ng, H.Y., 2014. A Novel Application of Anaerobic Bio-Entrapped Membrane Reactor for the Treatment of Chemical Synthesis-Based Pharmaceutical Wastewater, Separation And Purification Technology, 132, 634–643.
- MahdaviFar, A., Pollard, A., Pharoah, J.G., ve Beale, S.B., 2013. Wall Proximity Effects on Flow Over a Simple Membrane Spacer, Computers-Fluids, 88, 180-188.

- Mayur, M., ve Kale-Kripa S. Singh, 2014. Performance of Novel Sludge-Bed Anaerobic Membrane Bioreactor (SB-AnMBR) Treating Prehydrolysis Liquor, Water Science and Technology, 69.4, 796-802.
- Mnif, S., Zayen, A., Karray, F., Bru-Adan, V., Loukil, S., Godon, J.J., Chamkha, M., ve Sayadi, S., 2012. Microbial Population Changes in Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Land Fill Leachate Monitored by Single-Strand Conformation Polymorphism Analysis of 16s rDNA Gene Fragments, International Biodeterioration & Biodegradation, 73, 50-59.
- Mojab, S.M., Pollard, A., Pharoah, J.G., Beale, S.B., ve Hanff, E.S., 2014. Unsteady Laminar to Turbulent Flow in a Spacer-Filled Channel, Flow Turbulence Combust., 92, 563-577.
- Mondor, M. ve Moresoli, C., 2000. Experimental Verification of the Shear-Induced Hydrodynamic Diffusion Model of Crossflow Microfiltration with Consideration of the Transmembrane Pressure Axial Variation, Journal Of Membrane Science, 175, 119-137.
- Monsalvo, M.V., McDonald, J.A., Khan, S.J., ve Le-Clech, P., 2014. Removal of Trace Organics by Anaerobic Membrane Bioreactors, Water Research, 49, 103-112.
- Moussy, Y. ve Snider, A.D., 2009. Laminar Flow Over Pipes with Injection and Suction Through the Porous Wall at Low Reynolds Number, Journal of Membrane Science, 327, 104-107.
- Özgün, H., Tao, Y., Ersahin, M.E., Zhou, Z., Gimenez, J.B., Spanjers, H., ve Van Lier, J.B., 2015. Impact of Temperature on Feed-Flow Characteristics and Filtration Performance of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Coupled Ultrafiltration Membrane Treating Municipal Wastewater, Water Research, 83, 71-83.
- Pharoah, J.G., 2002. Fluid Dynamics and Mass Transport in Rotating Channels with Application to Centrifugal Membrane Separation, Doktora Tezi, University of Victoria, Department of Mechanical Engineering, Canada 176(2), 277-289.
- Phattaranawik, J., Jiratananon, R., ve Fane, A.G., 2003. Heat Transport and Membrane Distillation Coefficients in Direct Contact Membrane Distillation, Journal of Membrane Science, 212, 177-193.
- Pohland, F. 1971. In Anaerobic Biological Treatment Processes. Washington: American Chemical Society
- Pretel, R., Robles, A., Ruano, M.V., Seco, A., ve Ferrer, J., 2014. The Operating Cost of an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Treating Sulphate-Rich Urban Wastewater, Separation And Purification Technology, 126, 30-38.
- Prieto A. L., Futselaar H., Piet N.L. Lens, Bair R., ve Yeh, D.H., 2013. Development and Start Up of a Gas-Lift Anaerobic Membrane Bioreactor (GLAnMBR) for Conversion of Sewage to Energy, Water and Nutrients, Journal Of Membrane Science, 441, 158-167.

- Qiao, W., Takayanagi, K., Shofie, M., Niu, Q., Qing Yu, H., ve Li, Y., 2013. Thermophilic Anaerobic Digestion of Coffee Grounds with and without Waste Activated Sludge as Co-Substrate Using a Submerged AnMBR: System Amendments And Membrane Performance, Bioresource Technology, 150, 249-258.
- Qtaishat, M., Matsuura, T., Kruczek, B., ve Khayet, M., 2008. Heat and Mass Transfer Analysis in Direct Contact Membrane Distillation, Desalination, 219, 272–292.
- Ramos, C., Garcí'A, A., ve Diez, V., 2014. Performance of an AnMBR Pilot Plant Treating Highstrength Lipid Wastewater: Biological And Filtration Processes, Water Research, 67, 203-215.
- Ramos, C., Zecchino, F., Ezquerra, D., ve Diez, V., 2014. Chemical Cleaning of Membranes from an Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Food Industry Wastewater, Journal of Membrane Science, 458, 179–188.
- Robles, A., Ruano, M.V., Ribes, J., Seco, A., ve Ferrer, J., 2014. Model-Based Automatic Tuning of a Filtration Control System for Submerged Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR), Journal of Membrane Science, 465:14–26.
- Robles, A., Ruano, M.V., Ribes, J., Seco, A., ve Ferrer, J., 2014. Global Sensitivity Analysis of a Filtration Model for Submerged Anaerobic Membrane Bioreactors (anMBR), Bioresource Technology, 158, 365–373.
- Salazar-Peláez, M.L, Morgan-Sagastume, J.M., ve Noyola, A., 2011. Influence of Hydraulic Retention Time on Fouling in a UASB Coupled with an External Ultrafiltration Membrane Treating Synthetic Municipal Wastewater, Desalination, 277, 164-170
- Sanchez, A., Buntner, D., ve Garrido, J.M., 2013. Impact Of Methanogenic Pre-Treatment On The Performance of an Aerobic MBR System, Water Research, 47, 1229-1236.
- Shoener, B.D., Bradley, I.M., Cusick, R.D., ve Guest, J.S., 2014. Energy Positive Domestic Wastewater Treatment: The Roles of Anaerobic and Phototrophic Technologies, Environ Sci: Processes Impacts, 16, 1204-1222.
- Smith, A.L., Skerlos, S.J., ve Raskin, L., 2013. Membrane Biofilm Development Improves KOI Removal in Anaerobic Membrane Bioreactor Wastewater Treatment, Microbial Biotechnology, 883-894.
- Smith, A.L., Stadler, L.B., Cao, L., Love, N.G., Raskin, L., ve Skerlos, S.J., 2014. Navigating Wastewater Energy Recovery Strategies: A Life Cycle Comparison of Anaerobic Membrane Bioreactor and Treatment Systems With Anaerobic Digestion, Environ. Sci. Technol., 48, 5972–5981.
- Smith, A. L., ve Skerlos, S. J., Raskin, L., 2013. Psychrophilic Anaerobic Membrane Bioreactor Treatment of Domestic Wastewater, Water Research, 47, 1655-1665.

- Smith, A.L., Stadler, L.B., Love, N.G., Skerlos, S.J., ve Raskin, L., 2012. Perspectives on Anaerobic Membrane Bioreactor Treatment Of Domestic Wastewater: a Critical Review, Bioresource Technology, 122, 149-159.
- Stuckey D.C., 2012. Recent Developments In Anaerobic Membrane Reactors, Bioresource Technology, 122, 137-148.
- Tarabara, V.V. ve Wiesner, M.R., 2003. Computational Fluid Dynamics Modeling of the Flow in a Laboratory Membrane Filtration Cell Operated at Low Recoveries, Chemical Engineering Science, 58, 239-246.
- Tian, Y., Ji, C., Wang, K., ve Le-Clech, P., 2014. Assessment of an Anaerobic Membrane Bio-Electrochemical Reactor (Anmber) for Wastewater Treatment and Energy Recovery, Journal Of Membrane Science, 450, 242-248.
- Torres, A., Hemmelmann, A., Vergara, C., ve Jeison, D., 2011. Application of Two-Phase Slug-Flow Regime to Control Flux Reduction on Anaerobic Membrane Bioreactors Treating Wastewaters with High Suspended Solids Concentration, Separation and Purification Technology, 79: 20-25.
- Ugrozov, V.V. ve Kataeva, L.I., 2004. Mathematical Modeling of Membrane Distiller with Liquid Gap, Desalination, 168, 347-353.
- URL-1, <https://www.muendisbeyinler.net/uasb-kolon-reaktorler/>. 10 Ocak 2021
- URL-2, <https://www.antiskalant.net/>. Membranın yapısı. 10 Ocak 2021
- URL-3, <https://aosmith.com.tr/teknolojiler/membran-teknolojileri>. 10 Ocak 2021
- URL-4, <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana58/bolum07.pdf> 09 Aralık 2021
- Van Den Berg, G.B. ve Smolders C.A., 1990. Flux Decline in Ultrafiltration Processes, Desalination, 77, 101-133.
- Visvanathan, C. ve Abeynayaka, A., 2012. Developments and Future Potentials of Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBRs), Membrane Water Treatment, 1, 1-23.
- Wallace, J.M. ve Safferman, S.I., 2014. Anaerobic Membrane Bioreactors and the Influence of Space Velocity and Biomass Concentration on Methane Production for Liquid Dairy Manure, Biomass and Bioenergy, 66, 143-150.
- Wang, L., Wijekoon, K.C., Nghiem, L.D., ve Khan, S.J., 2014. Removal of Polycyclic Musks by Anaerobic Membrane Bioreactor: Biodegradation, Biosorption, and Enantioselectivity, Chemosphere, 117, 722-729.
- Wang, W., Yang, Q., Zheng, S., ve Wu, D., 2013. Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for Bamboo Industry Wastewater Treatment, Bioresource Technology, 149, 292-300.

- Wei, C., Harb, M., Amy, G., Hong, P., ve Leiknes, T., 2014. Sustainable Organic Loading Rate and Energy Recovery Potential of Mesophilic Anaerobic Membrane Bioreactor for Municipal Wastewater Treatment, Bioresource Technology, 166, 326–334.
- Wijekoon, K.C., Mcdonadld, J.A., Khan, S.J., Hai, F.I., Price, W.E., ve Nghiem, L.D., 2015. Development of a Predictive Framework to Assess the Removal of the Trace Organic Chemicals by Anaerobic Membrane Bioreactor, Bioresource Technology, 189, 391-398.
- Xiao, X., Huang, Z., Ruan, W., Yan, L., Miao, H., Ren, H., ve Zhao, M., 2015. Evaluation and Characterization During the Anaerobic Digestion of High-Strength Kitchen Waste Slurry via a Pilot-Scale Anaerobic Membrane Bioreactor, Bioresource Technology, 193, 234-242.
- Xu, M., Wen, X., Huang, X., Yu, Z., ve Zhu, M., 2013. Mechanisms of Membrane Fouling Controlled by Online Ultrasound in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Digestion of Waste Activated Sludge, Journal of Membrane Science, 445, 119-126.
- Xu, M., Wen, X., Yu, Z., Li, Y., ve Huang, X., 2011. A Hybrid Anaerobic Membrane Bioreactor Coupled with Online Ultrasonic Equipment for Digestion of Waste Activated Sludge, Bioresource Technology, 102, 5617-5625.
- Yeo, H., An, J., Reid, R., Rittmann, B.E., ve Lee, H.S., 2015. Contribution of Liquid/Gas Mass-Transfer Limitations to Dissolved Methane Oversaturation in Anaerobic Treatment of Dilute Wastewater, Environ Sci. Technol., 49, 10366-10372.
- Yurtsever, A., Şahinkaya, E., Aktaş, Ö., Uçar, D., Çınar, Ö., ve Wang, Z., 2015. Performances of Anaerobic and Aerobic Membrane Bioreactors for the Treatment of Synthetic Textile Wastewater, Bioresource Technology, 192, 564-573.
- Yu, Z., Wen X., Xu M., ve Huang X., 2012. Characteristics of Extracellular Polymeric Substances and Bacterial Communities in an Anaerobic Membrane Bioreactor Coupled with Online Ultrasound Equipment, Bioresource Technology, 117, 333-340.
- Yuzir, A., Chelliapan, S., ve Sallis P.J., 2012. Impact of the Herbicide (RS)-MCPP on an Anaerobic Membrane Bioreactor performance under Different KOI/Nitrate Ratios, Bioresource Technology, 109, 31-37.
- Zayen, A., Mnif, S., Aloui, F., Fki, F., Loukil, S., Bouaziz, M., ve Sayadi, S., 2010. Anaerobic Membrane Bioreactor for the Treatment of Leachates from Jebel Chakir Discharge in Tunisia, Journal of Hazardous Materials, 177, 918-923.

7. EKLER

7.1. Hız Sınır Şartları

Parabolik giriş hızı tanımlaması için gerekli kod parçası aşağıda verilmiştir. Bu kod Python tabanlı olarak yazılmıştır. Burada 0'dan 0,003 e kadar olan kısım besleme; 0,003'den 0,006'ya kadar olan kısım ise emiş tarafını oluşturmaktadır.

```
DrawInlet
{
    type                groovyBC;
    valueExpression      "vector( (a*yp*(1-yp/h)),0,0)";
    //pos().y is vertical location (y). DrawInlet starts from 0.003 (not
    //0) to 0.006, therefore we are reducing it by 0.003 to get parabolic
    //velocity profile
    gradientExpression    "vector(0,0,0)";
    fractionExpression     "1";
    evaluateDuringConstruction 0;
    variables              "Vm=0.1;yp=pos().y-
0.003;h=0.003;a=(6*Vm)/h;";
    value                  uniform (0 0 0); //this is average
    velocity
}
FeedInlet
{
    type                groovyBC;
    valueExpression      "vector( (a*yp*(1-yp/h)),0,0)";
    gradientExpression    "vector(0,0,0)";
    fractionExpression     "1";
    evaluateDuringConstruction 0;
    variables              "Vm=-0.1;yp=pos().y;h=0.003;a=(6*Vm)/h;";
    value                  uniform (0 0 0);
}
```

OpenFOAM ortamında oluşturulan hız sınır koşulu dosyası aşağıda verilmektedir.

```

boundaryField
{
    FeedOutlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
    DrawInlet
    {
        type            groovyBC;
        valueExpression  "vector( (a*yp*(1-yp/h)),0,0)";
        //pos().y is vertical location (y). DrawInlet starts from 0.003 (not
        //0) to 0.006, therefore we are reducing it by 0.003 to get parabolic
        //velocity profile
        gradientExpression  "vector(0,0,0)";
        fractionExpression  "1";
        evaluateDuringConstruction  0;
        variables            "Vm=0.1;yp=pos().y-0.003;h=
0.003;a=(6*Vm)/h;";
        value                uniform (0 0 0); //this is average
        velocity
    }
    FeedInlet
    {
        type            groovyBC;

        valueExpression  "vector( (a*yp*(1-yp/h)),0,0)";
        gradientExpression  "vector(0,0,0)";
        fractionExpression  "1";
        evaluateDuringConstruction  0;
        variables            "Vm=-0.1;yp=pos().y;h=
0.003;a=(6*Vm)/h;";
        value                uniform (0 0 0);
    }
    DrawOutlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
    Bottom
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }
    Top
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }
    front&Back
    {
        type            empty;
    }
    Membrane
    {
        type            explicitFOMembraneVelocity;
        A                1.61111e-12;
        B                8.33333e-08;
        K                150666;
        alpha            1;
        eq                advanced;
        aRelax            1;
        forwardDirection (0 1 0);
        slip              noSlip;
        pi_mACoeff        8.051e+07;
        value            uniform (0 0 0);
    }
}

```

7.2. Basınç Hız şartları

OpenFOAM ortamında oluşturulan hız sınır koşulu dosyası aşağıda verilmektedir.

```
boundaryField
{
    FeedOutlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 1000;
    }
    DrawInlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
    FeedInlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
    DrawOutlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 1000;
    }
    Bottom
    {
        type            zeroGradient;
    }
    Top
    {
        type            zeroGradient;
    }
    front&Back
    {
        type            empty;
    }
    Membrane
    {
        type            zeroGradient;
    }
}
```

7.3. Sıcaklık Sınır Şartları

OpenFOAM ortamında oluşturulan hız sınırşarı dosyası aşağıda verilmektedir.

```
boundaryField
{
    FeedOutlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 293;
    }
    DrawInlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 293;
    }
    FeedInlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 293;
    }
    DrawOutlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 293;
    }
    Bottom
    {
        type            zeroGradient;
    }
    Top
    {
        type            zeroGradient;
    }
    front&Back
    {
        type            empty;
    }
    Membrane
    {
        //type            explicitDT;
        //T                U;
        //value            uniform 0;
type            zeroGradient;
    }
}
```

7.4. Kodların Kısa Açıklanması

Aşağıda kodların genel çalışma prensibi açıklanmaktadır.

Sınır Şartlarının Uygulanması

OpenFOAM tarafından kullanılan farklı hesaplama türleri için gerekli başlık dosyalarının dahil edilmesi

```
#include "explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField.H"
#include "addToRunTimeSelectionTable.H"
#include "fvPatchFieldMapper.H"
#include "volFields.H"
#include "surfaceFields.H"
```

```
// * * * * *
```

```
namespace Foam
{
```

```
// * * * * * Member Functions * * * * *
```

//Kendi sınır şartlarımız için fonksiyon oluşturmazdır.

```
explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField
```

```
(
    const fvPatch& p,
    const DimensionedField<scalar, volMesh>& iF
)
```

```
:
    fvPatchScalarField(p, iF),
    transProps_
```

//Tüm özellikleri okuyan ve içinde tanımlanmış sabitleri okuyan, sabit klasörde tanımlanan transport özelliklerini incelemektedir.

```
(
    IOobject
    (
        "transportProperties",
        this->db().time().constant(),
        this->db(),
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::NO_WRITE,
        true
    ),
    UName_("U"),
    A_(readScalar(transProps_.lookup("A"))),
```

```

        B_(readScalar(transProps_.lookup("B"))),
        K_(readScalar(transProps_.lookup("K"))),
        D_AB_Min_(transProps_.lookup("D_AB_Min")),
        D_AB_Coeff_(transProps_.lookup("D_AB_Coeff")),
        D_AB_mACoeff_(transProps_.lookup("D_AB_mACoeff")),
        rho0_(transProps_.lookup("rho0")),
        rho_mACoeff_(transProps_.lookup("rho_mACoeff")),
        pi_mACoeff_(transProps_.lookup("pi_mACoeff")),
        fm_(p.size()),
        VIC_(p.size()),
        VBC_(p.size()),
        GIC_(p.size()),
        GBC_(p.size()),
        curTimeIndex_(-1)
    {
        calcFaceMapping();
    }

explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField
(
    (
        const fvPatch& p,
        const DimensionedField<scalar, volMesh>& iF,
        const dictionary& dict
    )
    :
        fvPatchField<scalar>(p, iF, dict),
        transProps_
        (
            IOobject
            (
                "transportProperties",
                this->db().time().constant(),
                this->db(),
                IOobject::MUST_READ,
                IOobject::NO_WRITE,
                true
            )
        ),
        UName_(dict.lookupOrDefault<word>("U", "U")),    //(Tanımlanmış sabit değerler)
        A_(readScalar(transProps_.lookup("A"))),
        B_(readScalar(transProps_.lookup("B"))),
        K_(readScalar(transProps_.lookup("K"))),
        D_AB_Min_(transProps_.lookup("D_AB_Min")),
        D_AB_Coeff_(transProps_.lookup("D_AB_Coeff")),
        D_AB_mACoeff_(transProps_.lookup("D_AB_mACoeff")),
        rho0_(transProps_.lookup("rho0")),
        rho_mACoeff_(transProps_.lookup("rho_mACoeff")),
        pi_mACoeff_(transProps_.lookup("pi_mACoeff")),
        fm_(p.size()),

```

```

VIC_(p.size()),
VBC_(p.size()),
GIC_(p.size()),
GBC_(p.size()),
curTimeIndex_(-1)
{
    if (dict.found("value"))
    {

    }
    else
    {
// m_A için değer girilmemişse alanı 0.0. olarak başlatmaktadır.
        fvPatchField<scalar>::operator=(pTraits<scalar>::zero);
    }

    calcFaceMapping();
}

explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField
(
    const explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField& empsf,
    const fvPatch& p,
    const DimensionedField<scalar, volMesh>& iF,
    const fvPatchFieldMapper& mapper
)
:
    fvPatchField<scalar>(empsf, p, iF, mapper),
    transProps_
    (
        IOobject
        (
            "transportProperties",
            this->db().time().constant(),
            this->db(),
            IOobject::MUST_READ,
            IOobject::NO_WRITE,
            true
        )
    ),
    UName_(empsf.UName_),
    A_(empsf.A_),
    B_(empsf.B_),
    K_(empsf.K_),
    D_AB_Min_(empsf.D_AB_Min_),
    D_AB_Coeff_(empsf.D_AB_Coeff_),
    D_AB_mACoeff_(empsf.D_AB_mACoeff_),
    rho0_(empsf.rho0_),
    rho_mACoeff_(empsf.rho_mACoeff_),

```

```

    pi_mACoeff_(empsf.pi_mACoeff_),
    fm_(p.size()),
    VIC_(p.size()),
    VBC_(p.size()),
    GIC_(p.size()),
    GBC_(p.size()),
    curTimeIndex_(-1)
{
}

```

```

explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarFie
ld
(
    const explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField& empsf
)
:
    fvPatchField<scalar>(empsf),
    transProps_(empsf.transProps_),
    UName_(empsf.UName_),
    A_(empsf.A_),
    B_(empsf.B_),
    K_(empsf.K_),
    D_AB_Min_(empsf.D_AB_Min_),
    D_AB_Coeff_(empsf.D_AB_Coeff_),
    D_AB_mACoeff_(empsf.D_AB_mACoeff_),
    rho0_(empsf.rho0_),
    rho_mACoeff_(empsf.rho_mACoeff_),
    pi_mACoeff_(empsf.pi_mACoeff_),
    fm_(empsf.fm_),
    VIC_(empsf.size()),
    VBC_(empsf.size()),
    GIC_(empsf.size()),
    GBC_(empsf.size()),
    curTimeIndex_(-1)
{}

```

```

explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarFie
ld
(
    const explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField& empsf,
    const DimensionedField<scalar, volMesh>& iF
)
:
    fvPatchField<scalar>(empsf, iF),
    transProps_(empsf.transProps_),
    UName_(empsf.UName_),
    A_(empsf.A_),
    B_(empsf.B_),

```

```

K_(empsf.K_),
D_AB_Min_(empsf.D_AB_Min_),
  D_AB_Coeff_(empsf.D_AB_Coeff_),
  D_AB_mACoeff_(empsf.D_AB_mACoeff_),
rho0_(empsf.rho0_),
  rho_mACoeff_(empsf.rho_mACoeff_),
  pi_mACoeff_(empsf.pi_mACoeff_),
  fm_(empsf.fm_),
  VIC_(empsf.size()),
  VBC_(empsf.size()),
  GIC_(empsf.size()),
  GBC_(empsf.size()),
  curTimeIndex_(-1)
{}

// ***** Member Functions ***** //
//H dosyasından auto.map I başlatmaktadır.

void explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::autoMap
(
  const fvPatchFieldMapper& m
)
{
  fvPatchField<scalar>::autoMap(m);
}

//H dosyasından ters eşleşmeyi başlatmaktadır.
void explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::rmap
(
  const fvPatchField<scalar>& psf,
  const labelList& addr
)
{
  fvPatchField<scalar>::rmap(psf, addr);
}

void explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::updateCoeffs()
{
  if (this->updated())
  {
    return;
  }
}

// OpenFraction'taki değişikliği her adımda yalnızca bir kez uygulamaktadır
if (curTimeIndex_ != this->db().time().timeIndex())
{
  // geometric yardım değişkenleri
  const vectorField& Sf = patch().Sf();

```

// Her bölgenin skaler katsayısının karşılıklı bir matrisini oluşturmaktadır.

```
tmp<scalarField> temp0 = 1.0/patch().deltaCoeffs();
const scalarField& deltas = temp0();
```

// Yüzey normali boyunca hız alanı.

```
tmp<vectorField> tvfnf = patch().nf();
const vectorField& vfnf = tvfnf();
```

// Yüzey normali boyunca hız alanı.

```
const fvPatchField<vector>& upvf = patch().lookupPatchField<volVectorField,
vector>(UName_);
```

// Velocity field

```
tmp<scalarField> temp1 = max( mag( cmptMultiply(upvf,vfnf) ), VSMALL );
const scalarField magU = temp1();
```

// Used during test of BCs. Only strictly required for debugging

```
const fvPatchScalarField& m_A = patch().lookupPatchField<volScalarField,
scalar>("m_A");
tmp<scalarField> temp2 = m_A.patchInternalField();
const scalarField& m_AInternal = temp2();
```

// Total salt flux and area

```
scalar totalWeightFlux = 0;
scalar totalArea = 0;
```

// Variables used

```
scalar A = 0;
scalar Js = 0;
scalar B = 0;
scalar rho = 0;
```

// Debug variables

```
scalar newGrad = 0;
scalar DrawMassInbalance = 0;
scalar FeedmassInbalance = 0;
```

```
forAll(patch(), facei)
{
```

//Yüzey normallerine ve akış yönüne göre tarafı belirlenmektedir.

//Uygulanmış olan sınır şartlarının takip edilmesi: $D_{AB} \cdot (dM_A/dn) + B \cdot m_A = J_s$

```
rho = rho0_.value() *
( 1.0 + rho_mACoeff_.value()*operator[] (facei) );
A = rho*max(D_AB_Coeff_*
( 1.0 - D_AB_mACoeff_* operator[] (facei)) , D_AB_Min_ ).value();
```

```
if ( (upvff[facei]&Sf[facei]) <= 0.0 )
```

/*Akış yönlerinin doğruluğunu control eder, böylece su membrandan karşı tarafa geçerken çözeltinin membrane tarafından durudurulması sağlanmış olmaktadır.*/

```
{
```

// B ve akılar tanımlanmaktadır.

```
B = rho*magU[facei];
```

```
Js = ( B_ * magU[facei] ) / ( pi_mACoeff_.value() / 1000 * A_ );
```

// katsayıların ayarlanması yapılmaktadır.

```
VIC_[facei] = 1.0 / (1.0 + B*deltas[facei]/A);
```

```
VBC_[facei] = Js / (A/deltas[facei] + B);
```

```
GIC_[facei] = -1.0 / (A/B + deltas[facei]);
```

```
GBC_[facei] = Js/( A + B*deltas[facei] );
```

```
newGrad = GIC_[facei]*m_AInternal[facei]+GBC_[facei];
```

```
DrawMassInbalance = A*newGrad+operator[] (facei)*B - Js;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

// B ve akılar tanımlanmaktadır:

```
B = -rho*magU[facei];
```

```
Js = ( B_ * magU[facei] ) / ( pi_mACoeff_.value() / 1000 * A_ );
```

// Katsayıların ayarlanması yapılmaktadır.

```
VIC_[facei] = 1.0 / (1.0 + B*deltas[facei]/A);
```

```
VBC_[facei] = Js / (A/deltas[facei] + B);
```

```
GIC_[facei] = -1.0 / (A/B + deltas[facei]);
```

```
GBC_[facei] = Js/( A + B*deltas[facei] );
```

/* Hata ayıklama:

Aşağıdaki denklemi test etmektedir.

```
A*(dM_A/dn)+B*m_A = Js
```

```
*/
```

```
newGrad = GIC_[facei]*m_AInternal[facei]+GBC_[facei];
```

```
FeedmassInbalance = A*newGrad + operator[] (facei)*B - Js;
```

// Membran üzerine çözelti akısını eklemektedir.

```
totalWeightFlux += patch().magSf()[facei] * Js;
```

```
}
```

```
}
```

```
totalArea = sum(patch().magSf()) / 2;
```

```
Info << "Salt Flux: "
```

```
<< (totalWeightFlux*1e3*3600/totalArea) << " g/(h*m2) "
```

```
<< " , Draw/Feed Flux Balance Residual: " << DrawMassInbalance << " / "
<<FeedmassInbalance
<< endl;
```

```
// Zaman ayarlaması yapmaktadır.
```

```
    curTimeIndex_ = this->db().time().timeIndex();
}
}
```

```
void explicitFOmembraneSoluteFvPatchScalarField::evaluate(const Pstream::commsTypes)
{
    if (!this->updated())
    {
        this->updateCoeffs();
    }
    operator==(this->patchInternalField() * VIC_ + VBC_);
}
```

```
tmp<Field<scalar>>explicitFOmembraneSoluteFvPatchScalarField::valueInternalCoeffs
(
    const tmp<scalarField>&
) const
{
    return tmp<scalarField>(new Field<scalar>(VIC_));
}
```

```
tmp<Field<scalar>>explicitFOmembraneSoluteFvPatchScalarField::valueBoundaryCoeffs
(
    const tmp<scalarField>&
) const
{
    return tmp<scalarField>(new Field<scalar>(VBC_));
}
```

```
tmp<Field<scalar>>explicitFOmembraneSoluteFvPatchScalarField::gradientInternalCoeffs()
const
{
    return tmp<scalarField>(new Field<scalar>(GIC_));
}
```

```
tmp<Field<scalar>>explicitFOmembraneSoluteFvPatchScalarField::gradientBoundaryCoeffs
() const
{
    return tmp<scalarField>(new Field<scalar>(GBC_));
}
```

```

}

void explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::write(Ostream& os) const
{
fvPatchScalarField::write(os);
    writeEntryIfDifferent<word>(os, "U", "U", UName_);
    writeEntryIfDifferent<word>(os, "m_A", "m_A", UName_);

    this->writeEntry("value", os);
}

void explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField::calcFaceMapping()
{
    // Hücre merkezine göre yüz endeksi eşleşmelerini yapmaktadır.
    const vectorField& cfvf = patch().Cf();
    forAll(cfvf, facei)
    {
        for(label i=0; i<cfvf.size(); i++)
        {
            if (facei!=i)
            {
                if (mag(cfvf[facei]-cfvf[i])<1e-9)
                {
                    fm_[facei]=i;
                    if(debug)
                    {
                        Info << "patch face " << facei << " -> " << i << endl;
                    }
                    break;
                }
            }
        }
    }
}

makePatchTypeField
(
    fvPatchScalarField,
    explicitFOMembraneSoluteFvPatchScalarField
);

// *****
}

```

Çözücü Kodlarının Uygulanması

Kodların açıklanması

```
//OpenFOAM kütüphanesinden gerekli dosyalar çağırılır
#include "bound.H"           //Değerleri sınırlandırır.
#include "fvCFD.H"           //Sonlu hakim yöntemini işlevsel hale getirir.
#include "pimpleControl.H"
#include "fvIOoptionList.H"
#include "IOMRFZoneList.H"
//bu başlık dosyası, basınç gradyanını, sınır üzerindeki akının, hız sınır koşulu tarafından
belirtilen şekilde olacak şekilde ayarlama işlevselliği ekler.
#include "fixedFluxPressureFvPatchScalarField.H"
```

```
// * * * * * //
```

```
int main(int argc, char *argv[])
//c++ ana fonksiyonudur: int argc parameter sayısıdır; 'char *argv[]parametreleri
çalıştırırken oluşan gerçek parametrelerin sayısı.
{
```

```
    #include "setRootCase.H"
    #include "createTime.H"
    #include "createMesh.H"
    #include "readGravitationalAcceleration.H"
    #include "initContinuityErrs.H"
    #include "createFields.H"
    #include "createFvOptions.H"
    #include "m_AInitialContinuity.H"
    #include "readTimeControls.H"
    #include "CourantNo.H"
    #include "setInitialDeltaT.H"
```

```
// * * * * * //
```

```
pimpleControl pimple(mesh);    //Meshten Yakınsama bilgisi sağlamak için PIMPLE
kontrol sınıfı.
```

```
For                                //PIMPLE döngüsü
```

```
Info<< "\nStarting time loop\n" << endl;
```

```
while (runTime.run())
{
    #include "readTimeControls.H"
    #include "compressibleCourantNo.H"
    #include "setDeltaT.H"

    runTime++;
```

```

Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;

// Starting PIMPLE corrector loop
while(pimple.loop())
{
    #include "Ueqn.H"          //Hız denklemini ekler
    //PISO corrector loop
    while (pimple.correct())
    {
        #include "m_AEqn.H"    //Çözelti denklemini ekler.
inner loop
        #include "pEqn.H"      //Basınç denklemini ekliyor.
through inner loop
    }
}

rho = rho0 * (1.0 + rho_mACoeff*m_A);    //Yoğunluğu ayarlıyor ve ekliyor
runTime.write();

runTime.write();

#include "m_AContinuity.H"

//M_A'nın sürekliliğini (kütle dengesi) membranın zıt yüzleri boyunca kontrol ediyor.
// Burada hata olması halinde çözüm durdurulacaktır.

Info << "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s" << "\nClockTime
= " << runTime.elapsedClockTime() << " s" << nl << nl << " _____" << nl <<
endl;

}

Info << "End\n" << endl;
return 0;

}

```

Enerji Denkleminin Çözümüne Dahil Edilmesi

```
Info << "Solving T = " << nl ;  
    fvScalarMatrix TEqn  
    (  
    fvm::ddt(rho0,TTA)  
    + fvm::div(phi,TTA)  
    - fvm::laplacian(DT*rho0, TTA)  
    );  
    TEqn.solve();
```

ÖZGEÇMİŞ

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında bölüm dördüncüsü olarak, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü'nden 2004 yılında üstün başarılı olarak mezun oldu. 2005-2011 yılları arasında Efes Pilsen Ankara fabrikasında Mekanik bakım yöneticisi ve atık su arıtma tesisi yöneticisi olarak çalıştı. 2011-2013 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Eğitimini tamamlayıp Doktora eğitime başladı. 2011 yılı Şubat ayından itibaren Giresun Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı göreve devam etmekte olup, İngilizce bilmektedir.