

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**DÜZ-PANEL HAVA KALDIRMALI FOTOBİYOREAKTÖRDE
BÜYÜTÜLEN MİKROALGLERİN ÇEŞİTLİ MEMBRANLAR İLE
HASATLAMA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Erdal ERCAN
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Melih ONAY
Dr. Erdinç ALADAĞ

VAN – 2021

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**DÜZ-PANEL HAVA KALDIRMALI FOTOBİYOREAKTÖRDE BÜYÜTÜLEN
MİKROALGLERİN ÇEŞİTLİ MEMBRANLAR İLE HASATLAMA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Erdal ERCAN

VAN – 2021

KABUL VE ONAY SAYFASI

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Melih ONAY danışmanlığında, Erdal ERCAN tarafından sunulan "**Düz-Panel Hava Kaldırılmalı Fotobiyoreaktörde Büyütülen Mikroalglerin Çeşitli Membranlar İle Hasatlama Etkisinin Araştırılması**" isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 17/12/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Zehra ŞAPCI AYAS	İmza:
Üye	: Doç. Dr. Edip AVŞAR	İmza:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Melih ONAY	İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 04./01./2021 tarih ve 2021/1-1 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

Erdal ERCAN

ÖZET

DÜZ-PANEL HAVA KALDIRMALI FOTOBİYOREAKTÖRDE BÜYÜTÜLEN MİKROALGLERİN ÇEŞİTLİ MEMBRANLAR İLE HASATLAMA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ERCAN, Erdal

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Melih ONAY

Dr. Erdiç ALADAĞ

Ocak 2021, 69 sayfa

Günümüzde başta enerji olmak üzere birçok alanda hammadde kaynağı olarak kullanılan mikroalglerin en önemli üretim aşamalarından birisi olarak kabul edilen mikroalg hasadı sürecinde çeşitli avantajlara sahip olan membran filtrasyonu sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında, *Gloeocystis vesiculosa* 901 mikroalg türü düz panel tipi fotobiyoreaktörde ve TAP (Tris-Asetat-Fosfat) besi ortamında yetiştirilerek elde edilen mikroalgal biyokütlenin çapraz-akış rejiminde işletilen membran filtrasyon düzeneğinde hasadı gerçekleştirilmiştir. Hasatlama işleminde sırasıyla 0,3 µm ve 50 kDA gözenek çaplarına sahip ve PVDF (Polivinilidin Florür) ve PES (Polisülfon) malzemelerden üretilmiş mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipindeki ticari düz plaka membranlar kullanılmıştır. Çalışmada farklı transmembran basınçları ve akılarda işletilen membranların kritik akı ve basınç değerleri ile birlikte konsantrasyon faktörü, hacimsel azalma faktörü ve mikroalg kazanım oranı belirlenmiştir. Daha sonra saf su kullanılarak yıkama işleminden sonra filtrasyon direnci incelenerek membranlar kıyaslanmıştır. MF ve UF tipi membranlar için kritik akı değeri sırasıyla 101,79 L/m²·saat ve 123,76 L/m²·saat olarak bulunmuştur. En yüksek mikroalg kazanımı ise MF için 1,8 bar'da %98,8 iken UF için 2,4 bar'da %99,2 olarak ölçülmüştür. Filtrasyon direnci açısından membranlar kıyaslandığında MF tipi membranın, UF membranlara göre daha düşük filtrasyon direnci ve kek tabakası meydana geldiği görülmüştür. Sonuç olarak, her iki membran da mikroalg hasatlama işleminde kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Düz-panel fotobiyoreaktör, *Gloeocystis vesiculosa* 901, Mikroalg hasatlama, Mikrofiltrasyon, Ultrafiltrasyon.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF HARVESTING EFFECT OF MICROALGAE GROWN IN THE FLAT-PANEL AIRLIFT PHOTOBIOREACTOR BY USING VARIOUS MEMBRANES

ERCAN, Erdal

Master Thesis, Environmental Engineering Department

I. Advisor: Asst. Prof. Dr. Melih ONAY

Dr. Erdiñ ALADAĞ

January 2021, 69 pages

Membrane filtration, which has various advantages, is often preferred in the process of microalgae harvest, which is considered one of the most important production stages of microalgae, which is used as a raw material source in many fields, especially in energy. In this thesis, microalgae biomass obtained by cultivating *Gloeocystis vesiculosa* 901, microalgae, grown in TAP (Tris-Acetate-Phosphate) medium and flat-panel photobioreactor was harvested in a membrane filtration system operated by means of a cross-flow regime. In the harvesting process, commercial flat-sheet membranes of the microfiltration and ultrafiltration types with pore diameters of 0.3 μm and 50 kDA, made of PVDF (Polyvinylidene Fluoride) and PES (Polysulfone) materials, respectively, were used. In this study, the critical flux and pressure values of membranes operated at various transmembrane pressures and fluxes, as well as the concentration factor, volume reduction factor and microalgae recovery rate were determined. Then, after washing by using distilled water, the membranes were compared by examining the filter resistance. Critical flux values for MF and UF type membranes were 101.79 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{hour}$ and 123.76 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{hour}$, respectively. The highest microalgae recoveries were 98.8% at 1.8 bar for MF and 99.2% at 2.4 bar for UF. When the membranes are compared in terms of filter resistances, MF type membrane has lower filter resistance and the cake layer formation than UF membranes. In conclusion, both membranes can be used for microalgae harvesting.

Keywords: Flat-panel photobioreactor, *Gloeocystis vesiculosa* 901, Microalgae harvesting, Microfiltration, Ultrafiltration.



ÖN SÖZ

Tez çalışması boyunca kıymetli vakitlerini ayırarak önemli katkılarını esirgemeyen; çalışma ve uygulama sürecinde her zaman beni cesaretlendiren danışman hocam; Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melih ONAY, ikinci danışman hocam; Sayın Dr. Erdinç ALADAĞ, çok değerli Tez Savunma Jürisi Üyeleri; Sayın Doç. Dr. Zehra ŞAPCI AYAS ve Sayın Doç. Dr. Edip AVŞAR hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

2020

Erdal ERCAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	5
2.1. Enerji Kaynaklarının Durumu	5
2.1.1. Fosil yakıtlar	7
2.1.2. Yenilenebilir enerji kaynakları	9
2.2. Mikroalgler	11
2.2.1. Mikroalglerin biyoyakıt üretimindeki yeri	14
2.2.2. Mikroalg üretimine etki eden faktörler	16
2.2.3. Mikroalg üretim sistemleri	19
2.2.4. Mikroalg hasat işlemleri	21
2.3. Membran Filtrasyonu	24
2.4. Mikroalg Yetiştiriciliğinde Membran Teknolojisi	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal.....	31
3.1.1. Mikroalg türü	31
3.1.2. Besi ortamı.....	31
3.1.3. Düz Panel tipi fotobiyoreaktör.....	33
3.1.4. Membran düzeneği	35
3.2. Yöntem	37
3.2.1. Optik yoğunluk	37
3.2.2. Akı	38
3.2.3. Kritik akı.....	38
3.2.4. Konsantrasyon faktörü, hacimsel azalma faktörü ve mikroalg kazanım oranı.....	39

	Sayfa
3.2.5. Normalize akı.....	40
3.2.6. Filtrasyon direnci	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1. Mikroalgal Biyokütle Üretimi	43
4.2. Membran ile Hasat Çalışmaları	43
4.2.1. Transmembran basıncının süzüntü akısı üzerine etkisi	44
4.2.2. Kritik akı ve işletme basıncının belirlenmesi	49
4.2.3. Konsantrasyon faktörü ve hacimsel azalma faktörü	51
4.2.4. Mikroalg kazanım verimi	58
4.2.5. Filtrasyon direnci	59
5. SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZ GEÇMİŞ.....	71

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Mikroalglerin içeriklerine göre elde edilen çeşitli ürünler	14
Çizelge 2.2. Biyodizel üretimi için kullanılan çeşitli mikroalgler ve tohumların yağ içeriği.....	15
Çizelge 2.3. Biyoetanol üretimi için kullanılan çeşitli mikroalgler ve tohumların yağ içeriği.....	15
Çizelge 2.4. Sıcaklığın <i>S. platensis</i> 'in içeriğine etkileri	16
Çizelge 2.5. Mikroalgler için optimum üretim şartları	18
Çizelge 2.6. Açık sistemler ve kapalı sistemlerin avantaj ve dezavantajları	20
Çizelge 2.7. Açık sistemlerde biyokütle verimleri.....	21
Çizelge 2.8. Çeşitli fotobiyoreaktörde yetiştirilen bazı mikroalg türlerinin konsantrasyon ve biyokütle verimleri.....	21
Çizelge 2.9. Farklı süreçlerde mikroalg hasat performansların değerlendirilmesi.	24
Çizelge 2.10. Membran sistemlerin avantaj dezavantaj ve performansını etkileyen faktörler.....	25
Çizelge 2.11. Membran sistemlerinde kullanılan çeşitli membran türleri ve özellikleri	26
Çizelge 3.1. Tris-Acetate-Phosphate (TAP) besi ortamının kimyasal kompozisyonu	32
Çizelge 3.2. Membranlara ait özellikler	36
Çizelge 4.1. Membranların akı ve basınç değerleri için uygulanan fonksiyona ait sabitler.....	51
Çizelge 4.2. Kritik akı ve tahmini basınç değerleri.....	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji kaynağına göre küresel enerji tüketiminin yıllara göre dağılımı	5
Şekil 2.2. 2019 yılı itibariyle Türkiye’deki elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı	6
Şekil 2.3. 2019 yılı bölgesel enerji tüketiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı	7
Şekil 2.4. Türkiye’de sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı.	9
Şekil 2.5. Bazı mikroalg türlerine ait yağ, protein ve karbonhidrat içerikleri.	12
Şekil 2.6. Bazı mikroalg türlerinin mikroskopik görüntüleri.	13
Şekil 2.7. Mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan açık sistemler.	19
Şekil 2.8. Mikroalg üretiminde kullanılan çeşitli kapalı sistemler.	20
Şekil 3.1. Gloeocystis vesiculosa 901 mikroskop görüntüsü.	31
Şekil 3.2. İklimlendirme kabini.	32
Şekil 3.3. Düz panel-tipi PBR önden (a) ve yandan (b) görünüşü.	33
Şekil 3.4. Düz panel-tipi fotobiyoreaktöre ait fotoğraflar.	34
Şekil 3.5. Çapraz-akış membran düzeneği.	35
Şekil 3.6. Membran düzeneğinin fotoğrafı.	36
Şekil 3.7. Membran sistemi (a, b), modülü (c) ve besleme pompasının (d) fotoğrafları.	37
Şekil 3.8. Kritik ve limit akının transmembran basıncına göre gösterimi.	39
Şekil 4.1. Mikroalglerin optik yoğunluk değişimi.	43
Şekil 4.2. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 0,3 bar, T = 25 °C, J = 98 L/m ² ·saat).	44
Şekil 4.3. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 0,8 bar, T = 25 °C, J = 252 L/m ² ·saat).	45
Şekil 4.4. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,3 bar, T = 25 °C, J = 324 L/m ² ·saat).	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C, J = 411 L/m ² ·saat).	46
Şekil 4.6. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 0,6 bar, T = 25 °C, J = 152 L/m ² ·saat).	47
Şekil 4.7. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,2 bar, T = 25 °C, J = 355 L/m ² ·saat).	47
Şekil 4.8. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C, J = 501 L/m ² ·saat).	48
Şekil 4.9. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 2,4 bar, T = 25 °C, J = 802 L/m ² ·saat).	48
Şekil 4.10. MF membranda kararlı akı ve transmembran basınçları.	50
Şekil 4.11. UF membranda kararlı akı ve transmembran basınçları.	50
Şekil 4.12. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 0,3 bar, T = 25 °C).	52
Şekil 4.13. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 0,8 bar, T = 25 °C).	52
Şekil 4.14. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,3 bar, T = 25 °C).	53
Şekil 4.15. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C).	53
Şekil 4.16. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 0,6 bar, T = 25 °C).	54
Şekil 4.17. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,2 bar, T = 25 °C).	55
Şekil 4.18. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C).	55
Şekil 4.19. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 2,4 bar, T = 25 °C).	56
Şekil 4.20. Mikrofiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki hacimsel azalma faktörü.	57

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.21. Ultrafiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki hacimsel azalma faktörü.	57
Şekil 4.22. Mikrofiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki mikroalg kazanım verimi.	58
Şekil 4.23. Ultrafiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki mikroalg kazanım verimi.	59
Şekil 4.24. Mikrofiltrasyon membran direnci.	60
Şekil 4.25. Ultrafiltrasyon membran direnci.	61





SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
%	Yüzdelik
°C	Sıcaklık (Santigrat)
A	Aktif membran alanı (m ²)
C	Konsantrasyon (mg/L)
cm	Santrimetre
cm ²	Santimetrekare
dak	Dakika
E	Enerji
g	Gram
J	Akı (L/m ² ·saat)
kDa	Kilodalton
kWsa	Kilovat saat
L	Litre
lt	Litre
Lux	Lüks (Işık şiddeti)
M	Kütle
m ²	Metrekare
mg	Miligram
mL	Mililitre
mm	Milimetre
Mtoe	Milyon ton eşdeğer petrol (Million Tonnes of Oil Equivalent)
nm	Nanometre
R	Membran direnci (1/m)
t	Zaman
V	Hız

Simgeler	Açıklama
----------	----------

μ	Spesifik büyüme hızı
μg	Mikrogram
μm	Mikrometre
μmol	Mikromol
μT	Vizkozite

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ark.	Arkadaşları
CCALA	Culture Collection of Autotrophic Organisms (Ototrofik organizme kültür koleksiyonu)
FBR	Fotobiyoreaktör
HAF	Hacimsel azalma faktörü
KF	Konsantasyon faktörü
LED	Light Emitting Diod (Işık Yayan Diyot)
MF	Mikrofiltrasyon
NF	Nanofiltrasyon
OY	Optik yoğunluk
PES	Polisülfon
pH	Power of hydrogen (Hidrojen gücü)
PVC	Polivinil Klorür
PVDF	Polivinilidin Florür
rcf	Rölatif santrifüj gücü
RGB	Kırmızı, Yeşil, Mavi
RO	Reverse Osmos (Ters osmos)
rpm	Dakikadaki dönüş hızı (devir/dakika)
sp.	Species (Tür)
TAP	Tris-Asetat-Fosfat

Kısaltmalar**Açıklama****TMP**

Transmembran basıncı (bar)

UF

Ultrafiltrasyon





1. GİRİŞ

Son zamanlarda yaşanan ekonomik gelişmeler ve nüfus artışı, hızlı tüketim alışkanlığı ile birleşince enerji talebinde kaçınılmaz bir yükselmeye neden olmuştur. Kontrolsüz enerji tüketimi ise çevre kirliliği ve küresel ısınma ile dışa bağımlılık gibi önemli ekonomik sorunları birlikte getirmiştir. Geçtiğimiz yüzyılda meydana gelen ozon tabakasının delinmesi, kuraklık, dev seller, baskınlar ve su çekilmeleri gibi feci sonuçlar doğuran iklimsel felaketlerden sorumlu tutulan küresel ısınma kaynaklı iklim değişikliği, gezegende bildiğimiz anlamdaki yaşamı tehdit eden en önemli unsurlardan birisidir. Küresel ısınmanın temel nedeni ve ana tehdidi olarak görülen sera gazları, gezegenin genel sıcaklığını artıran ısıyı hapsederek ortamdan uzaklaşmasını engellemektedir. Milyonlarca yıl önce yaşanan iklim değişikliklerinin aksine günümüzde yaşanan; özellikle endüstrileşmenin bir sonucudur. Fosil yakıtların yakılması sonucunda termik santraller ve fabrikalardan yükselen dumanlar, ulaşım ve nakliyat amacıyla kullanılan sıvı yakıtlar ile ormanların hızla tüketilmesi gibi insan faaliyetleri, öncelikle karbondioksit, azot oksit ve metan gazları başta olmak üzere sera etkisi yapan gazların yüksek konsantrasyonlara ulaşmasına neden olmaktadır. Ülkemizde sera gazı salınımında ilk sırada enerji sektörü gelmektedir. Enerji üretimi, endüstriyel işlemler, ürün kullanımı, tarım ve atık kaynaklı sera gazı emisyonunun toplamından çok daha fazla hava kirleticisinin atmosfere yayılmasından sorumlu tutulmaktadır.

Yenilenebilir enerji politikaları, ekonomik kalkınma ve sosyal gelişim hedeflerinin sürdürülebilirliği ve küresel ısınmanın baş aktörü kabul edilen sera gazı salınımlarının azaltılması ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle; özellikle son yıllarda birçok ülkenin öncelikli gündemi haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji; enerji arz güvenliğinin korunması, dışa bağımlılığın azaltılması, çevre kirliliğine ve iklim değişikliğine karşı mücadelede etkinliğin arttırılmasının sağlanması yönünden kilit rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından önemli bir potansiyele sahip olan ülkemizde; sıfır atık, enerji tasarrufu ve verimliliği ile birlikte yenilenebilir enerji sektörüne yapılan yatırımlara da gittikçe daha fazla önem verilmektedir.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin büyük bölümü akarsu ve barajlar üzerine kurulu hidroelektrik santrallerinden sağlanmaktadır. Ayrıca güneş, rüzgâr ve modern biyokütle gibi temiz ve yenilikçi enerji kaynaklarına da ilgi duyulmaktadır. Biyokütle üretiminde özellikle mera, köy ve tarım arazilerinde geleneksel yöntemler yaygın olsa da son yıllarda, atık yağ geri dönüşümünün yapıldığı ve çeşitli tarım ürünleri veya mikroalglerden elde edilen yağların kullanıldığı modern biyoyakıt üretim tesislerinin sayısı hızla artmaktadır.

Çoğunlukla tatlı su ve deniz sistemlerinde bulunan ve atmosferdeki oksijen üretiminde önemli bir paya sahip olan mikroalgler, günümüzde biyoyakıt üretiminin yanı sıra ilaç, kozmetik, besin takviyesi, balık yemi gibi birçok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. Besin zincirinin en alt basamağında yer alan bu tek hücreli canlılar; karbondioksit ve suyu güneş enerjisi ile organik maddelere dönüştürebilmektedir. Mikroalglerin enerji ve sanayi sektörlerinde kullanılmadan önce hammadde haline getirilebilmesi için tür seçimi, büyüme optimizasyonu, seri üretim ve hasat süreçlerinden geçmesi gerekmektedir. Yaygın olarak santrifüj, flokleştirme, flotasyon, elektrokoagülasyon ve filtrasyon gibi yöntemlerin kullanıldığı mikroalgal biyokütle hasadı, üretim aşamaları arasında en fazla enerji tüketiminin gerçekleştiği ve en maliyetli aşamadır. Mikroalglerin hasadı ve susuzlaştırılması, biyoyakıt üretiminde mikroalglerin daha fazla tercih edilmesini engelleyen en önemli süreç olarak görülmektedir.

Su ve atıksu arıtımı, biyoteknoloji, ilaç, kimya ve enerji başta olmak üzere birçok sektörde özellikle yoğunlaştırma ve susuzlaştırma aşamalarında uzun yıllardır kullanılan membranlar; mikroalg yetiştiricilerinin de dikkatini çekmeyi başarmıştır. Katı-sıvı ayırma sürecinde kullanılan ve konsantrasyon, basınç veya elektriksel bir sürücü kuvvet yardımıyla gözenek boyutu ya da elektriksel yük gibi belirli bir seçici özelliğe sahip bir zardan kütle taşınması ilkesine dayanan membran filtrasyonu, diğer ayırma teknolojilerine göre basit işletme, kolay ölçek büyütme, düşük enerji tüketimi ve kimyasal kullanılmaması gibi önemli avantajlara sahiptir. Membran filtrasyonu teknolojisindeki olumlu gelişmelerin de etkisiyle mikroalg hasadında ve susuzlaştırılmasında daha fazla tercih edilen bir yöntem haline gelmesine neden olmuştur. Diğer yöntemlere göre daha ucuz olan membran filtrasyonu, yüksek verimlilikte biyokütle hasadının yapılmasına imkân vermektedir. Ayrıca son yıllarda

Çapraz-akış ve batık membran gibi geleneksel işletme rejimlerine ek olarak ileri ozmos ve dinamik filtrasyon gibi farklı konfigürasyonlarda da çalışmalar yapılmaktadır. Membranın yapısı, gözenek çapı, ortam şartları, filtrasyon konfigürasyonu ile konsantrasyon, akı, transmembran basıncı, çapraz-akış hızı ve sıcaklık gibi işletme parametreleri; membran kirlenmesi ve filtrasyon verimini üzerinde için kilit rol oynamaktadır.

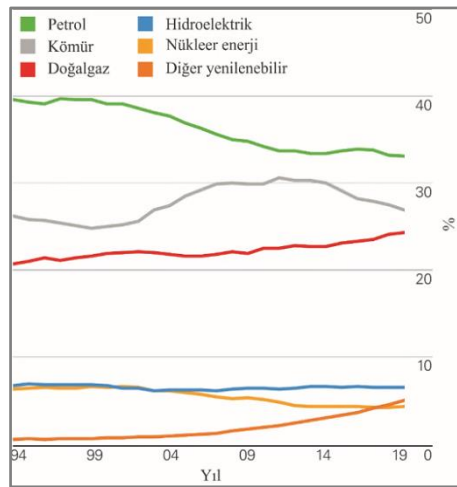
Bu çalışmada, düz panel tipi fotobiyoreaktörde yetiştirilen mikroalgler; çapraz-akış membran filtrasyon sisteminde çeşitli materyallerden üretilmiş farklı gözenek çaplarına sahip membranlar kullanılarak hasat edilmiştir. Farklı transmembran basınçlarında işletilen membranların kritik akı ve işletme transmembran basıncı belirlenmiştir. Ayrıca membranlar filtrasyon direnci, mikroalg kazanım verimi, hacimsel azalma ve konsantrasyon faktörleri açısından kıyaslanmıştır.



2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

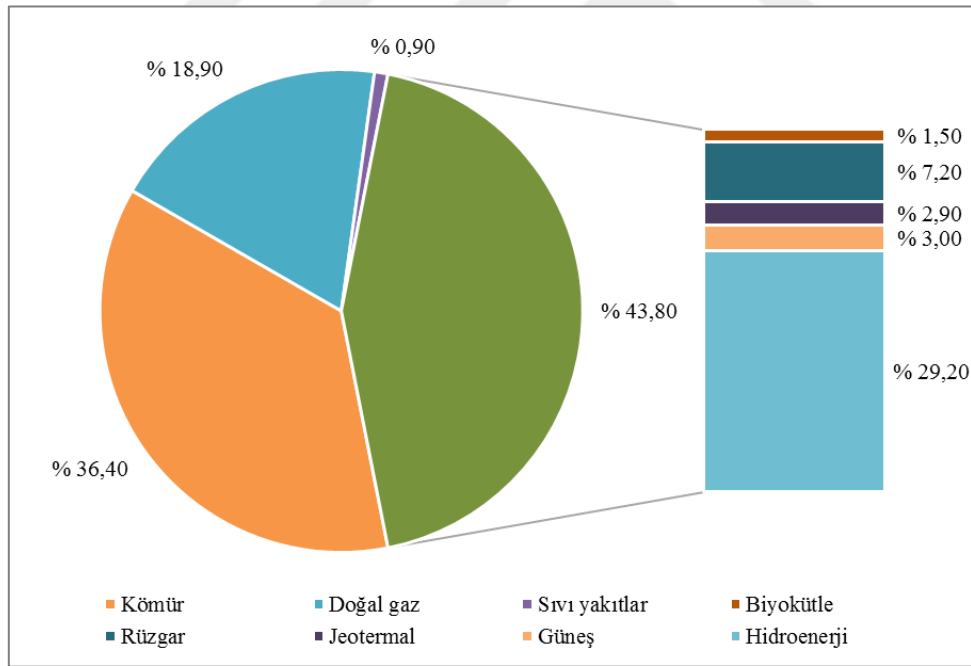
2.1. Enerji Kaynaklarının Durumu

Hızlı nüfus artışı ve endüstriyel devrim ile birlikte gelişen sanayi büyük bir enerji ihtiyacının açığa çıkmasına neden olmuştur. Dünyadaki kısıtlı kaynaklarla enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark her geçen gün açılmaktadır. Yapılan araştırmalara göre Dünya'nın 2010-2040 yılları arasındaki birincil enerji tüketiminin %56 oranında artacağı öngörülmektedir. Sanayi devriminden sonra yaygınlaşan ve aşırı bir şekilde kullanılan fosil yakıtlar çevresel olumsuzlukları kendisiyle beraber getirmiştir. Bu olumsuzluklar özellikle ozon tabakası delinmesi, asit yağmurları ve küresel ısınma gibi geri dönüşü zorlaştıran etkiler bırakmıştır (Bayram ve ark., 2000). Enerji ihtiyacının her geçen gün hızla artması, fosil yakıtlarının rezerv ömürlerinin kısa olması ve ayrıca bu yakıtlar beraberinde çevre problemlerini getirmesi insanoğlunu alternatif bir enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Son yıllarda birçok alternatif, yenilenebilir ve yenilikçi enerji kaynağı ile bu sorunun üstesinden gelinmesi planlanmaktadır. Ancak önümüzdeki 30 yıl içerisinde birincil enerji kaynaklarının kullanımının azalacağı lakin önemini kaybetmeyeceği yönünde çeşitli raporlamalar mevcuttur (Yüksel ve Kaygusuz, 2011). 1994-2019 yılları arasındaki küresel enerji tüketiminin enerji kaynaklarına göre oranlarına ait grafiğe Şekil 2.1'de yer verilmiştir (Dudley, 2020).



Şekil 2.1. Enerji kaynağına göre küresel enerji tüketiminin yıllara göre dağılımı (Dudley, 2020).

Türkiye’de bulunan mevcut enerji kaynakları ülkemizin enerji ihtiyacını istenilen düzeyde karşılayamamaktadır. Enerji talebinin yerine getirilmesi için toplam enerji tüketiminin %49’u ithal edilmektedir. Türkiye’deki petrol ve doğal gaz üretimi, doğal kaynakların sınırlı olması nedeniyle yerli, milli ve alternatif enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Bu enerji kaynağının büyük bölümünü ise %19,9 kömür ve %18,9 doğalgaz oluşturmaktadır (TÜİK, 2020a). Ayrıca linyit %15,4; taş kömürü %1,1; asfaltit %0,8; fuel oil ve motorin ise %0,1 oranında toplam elektrik üretimine katkı sağlamaktadır. Türkiye yenilenebilir enerji (güneş, rüzgâr, biyokütle, vb.) kaynakları açısından oldukça yüksek potansiyele sahip bir ülkedir. Günümüzde ülkemizin ana enerji ihtiyacı; %56,2 oranında çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın baş aktörü olarak kabul edilen fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanmasına rağmen alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. 2019 yılında Türkiye’ye ait elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 2.2’de gösterilmiştir (TÜİK, 2020a).



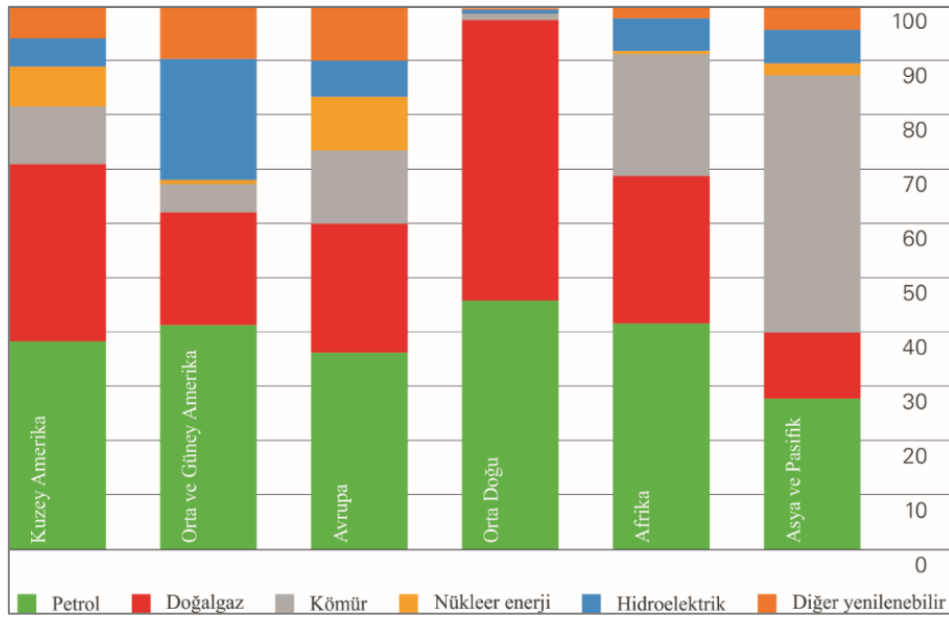
Şekil 2.2. 2019 yılı itibariyle Türkiye’deki elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı (TÜİK, 2020a).

Ülkemizde 2019 yılı itibariyle toplam elektrik enerjisi üretimi ve tüketimi sırasıyla 303.897.560.424 kWsa ve 303.320.399.534 kWsa olarak gerçekleşmiştir. Toplam elektrik üretiminin %43,8’i yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilirken

akarsu (%7,5) ve barajlar (%21,7) üzerinde kurulu hidroelektrik santralleri toplam %29,2 ile yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sırada yer almaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları ise (%7,2 ile rüzgâr, %3 güneş, %2,9 jeotermal, %1,5 biyokütle ve atıklar olmak üzere) toplam üretimin %14,6'sını sağlamaktadır.

2.1.1. Fosil yakıtlar

Fosil yakıtlar, yüksek miktarda karbon içeren ölen organizmaların milyonlarca yıl boyunca oksijensiz ortamda çürümesi ile oluşan ve sınırlı miktarda bulunan bir enerji kaynaklarıdır. Başlıca fosil kaynaklı yakıtlara; kömür, petrol ve doğal gaz örnek verilebilir. Bu yakıtların kullanılmasıyla yanma gazları olarak ifade edilen CO₂, NO_x, SO₂ gazları açığa çıkar. Bunun yanında nikel, kadmiyum, kurşun, arsenik gibi toksin maddeler de atmosfere karışmaktadır. Şekil 2.3'te 2019 yılı bölgesel enerji tüketiminin enerji kaynaklarına göre dağılımına yer verilmiştir (Dudley, 2020). Şekilden de anlaşılabileceği gibi günümüzde küresel enerji tüketiminin büyük payını fosil kaynaklı yakıtlar oluşturmaktadır. Ortadoğu, Afrika, Asya ve Pasifik bölgelerinde enerji talebinin %85'den fazlası fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanırken Amerika ve Avrupa ülkelerinin de hala büyük oranda fosil kaynaklı yakıtlara bağımlı olduğu görülmektedir.

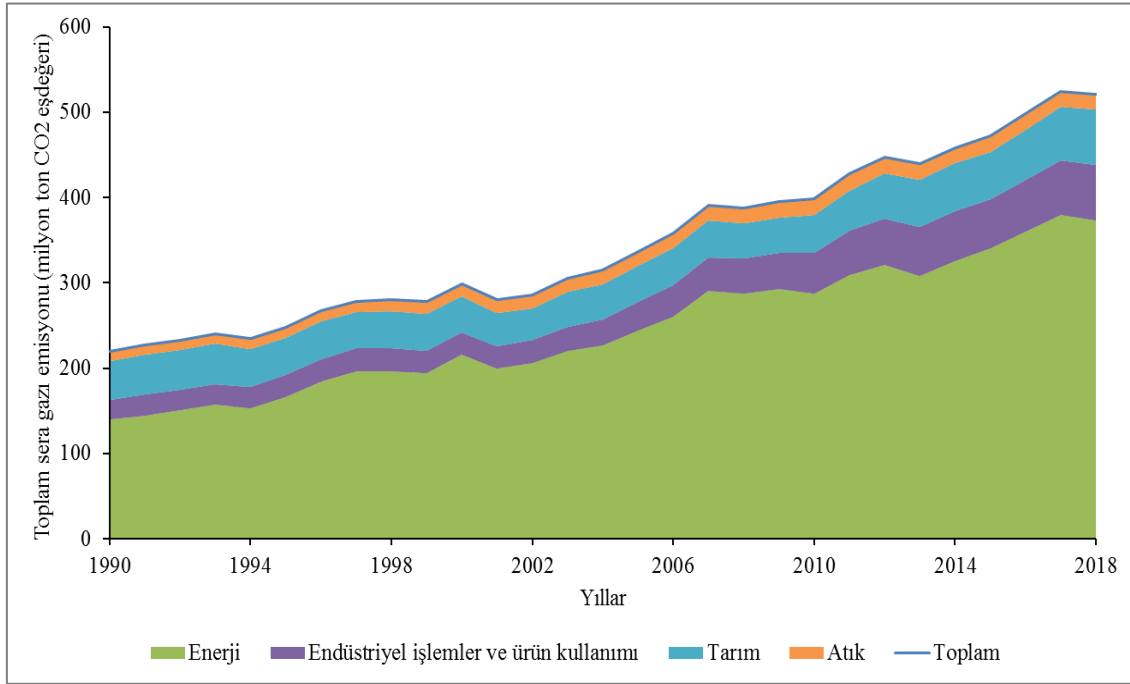


Şekil 2.3. 2019 yılı bölgesel enerji tüketiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı (%).

Fosil enerji kaynakları, Türkiye'nin enerji potansiyelinde de önemli bir yere sahiptir. Türkiye'nin mevcut durumda bulunan fosil enerji kaynakları içinde en önemli payı kömür oluşturmaktadır. Üretilen kömür, genellikle termik santrallerde, demir çelik fabrikalarında, çimento fabrikalarında ve konutların ısıtılmasında kullanılmaktadır. Dünya enerji konseyinin verilerine göre küresel kömür rezervi 861 milyar tondur (WEC, 2012). Türkiye 15,2 milyar ton ile Dünya rezervinin %1,7 oluşturmaktadır. Türkiye'nin en büyük kömür rezervleri ise Zonguldak havasında bulunmaktadır (Karabulut, 2000). Fosil yakıtların bir diğer çeşidi ise dünya tüketiminin ilk sırasında yer alan petroldür. Türkiye'nin petrol rezervi 42 milyon ton olup 2012 verilerine göre tüketilen petrol miktarı 29 milyon ton civarındadır ve bu tüketilen petrolün %7,9'u yerli üretimdir (TPAO, 2019). Hava kirliliği yönünden incelendiğinde en çevreci olarak tanımlanan fosil yakıt ise doğal gazdır. Türkiye enerji pazarında büyük bir ivme kazanan doğal gaz 1976 yılında Trakya bölgesinde elde edilmeye başlanmış ve üretilen doğal gaz üretim bölgesindeki sanayi kuruluşlarına aktarılmıştır. Yerli kaynaklarıyla Türkiye doğal gaz ihtiyacının %1,5'ini karşılamaktadır geri kalanı ise ithal etmek zorundadır.

Fosil yakıtlarının kullanılmasıysa başta CO₂ olmak üzere diğer yanma gazları olan NO_x, SO₂ gibi gazlar da atmosfere salınmaktadır. Atmosfere salınan bu gazlar, güneş ışınlarının yer yüzeyinden geri yansımaları engelleyerek ısının atmosfer içerisinde kalmasına neden olmakta ve böylece sera etkisi meydana gelmektedir. Bu durumun gezegenimize verdiği en belirgin hasar ise kutupların hızla erimesidir. Bu hızla fosil yakıtların tüketimleri devam ederse önümüzdeki 50 yıl içinde dünya sıcaklığı 5 derece artarak daha büyük felaketlere yol açılacağı ön görülmektedir. Fosil yakıtların kullanımı sonucu oluşan gazların atmosferde birikip yağmur sularıyla tepkimeye girerek yeryüzüne sülfürik asit, nitrik asit ve karbonik asit olarak yağmasına asit yağmurları denir. Asit yağmurları sadece orman yangınları gibi olumsuzluklar ile kalmayarak canlı varlıklar ve tarihsel kalıntılar üzerinde de tahribatlara neden olur (Tezcan, 1997). Fosil kaynaklı yakıtların sınırlı olması, sadece belirli bölgelerde elde edilebilmesi, taşınımı ve alıcı ortama verdiği zararlar gibi önemli olumsuzluklardan dolayı Dünya; kendini yenileyebilen, çevreci ve günümüz yakıt türlerine alternatif oluşturabilecek bir yakıt kaynağı arayışına girmiştir. Özellikle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem verilmektedir. Şekil 2.4'te ülkemizdeki toplam sera gazı emisyonlarının

sektörlere göre dağılımına yer verilmektedir. 2018 yılı itibariyle toplam 521 milyon ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonunun %71,6'sı enerji, %12,5'i endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı, %3,4'ü atıklar ve %12,4'ü ise tarımsal faaliyetler sonucunda meydana gelmektedir (TÜİK, 2020b).



Şekil 2.4. Türkiye’de sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı.

2.1.2. Yenilenebilir enerji kaynakları

Genel olarak bir yenilenebilir enerji kaynağının tüketimine göre daha hızlı kendini yenileyebilmesi beklenir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir olmasının yanında enerji kaynağının temiz ve kolay ulaşılabilir olması da büyük önem arz etmektedir. Genellikle çevresel etkileri bakımından yenilenemeyen enerji kaynaklarına nazaran daha çevreci yakıtlar olduğu söylenebilir. Her geçen gün türleri artan yenilebilir enerji kaynakları, başlıca hidro, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, deniz ve hidrojen enerjisi olarak ayırmak mümkündür.

Hidroenerji; suyun akış hızının yüksek olduğu yerlerde su türbinlerinin dönmesi sağlanarak suyun potansiyel enerjisini kinetik enerjiye çevirmesi ile oluşan enerji türüdür. Bu enerji türü, yeryüzüne yağmur, kar, dolu olarak inen su kütlesinin

buharlaşarak döngüyü tamamlaması sonucu yenilebilir enerji kapsamına girmektedir. Hidroenerji dünya elektrik enerjisinin %17'sini oluşturmaktadır. Hidroelektrik santrallerinin inşa edileceği bölge belirlenirken uygun coğrafik koşulların göz önüne alınması gerekmektedir. Ülkemizde hidroelektrik santrallerin potansiyeline en uygun coğrafik alan Doğu Anadolu ve Doğu Karadeniz'dir. Çevre ile etkileşimi göz önüne alındığında sera gazları, SO₂, partikül emisyonlarının oluşmaması gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu olumlu yönlerle karşın flora fauna üzerindeki olumsuz etkisi, köy, mera, tarla gibi binlerce hektarlık alanın ve tarihi yapıların sular altında kalması ve baraj diplerinde metan gazının oluşması gibi önemli dezavantajlara da sahiptir (Yılmaz, 1997).

Dünyadan 149 milyon km uzaklıkta bulunan ve milyarlarca yıl boyunca enerji üretmeye devam edecek olan güneş; atmosfer içine 1100 W/m²'ye kadar enerji iletebilen bir yenilenebilir enerji kaynağı çeşididir. İlk olarak ısınma amacıyla kullanılan Güneş enerjisi, günümüzde ısıtma, soğutma, iklimlendirme tarımsal teknolojisinde ve elektrik üretiminde kontrollü bir şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizin güneş enerjisi bakımından zengin bir konuma sahip olması; bu enerji türüne yatırım yapılmasında önemli bir etkindir. Ülkemiz yıllık ortalama 2640 saat gibi bir güneşlenme süresine sahiptir. Ülkemizde en çok güneşlenme süresi 362 saat ile temmuz ayında ve en düşük güneşlenme süresi ise 98 saat ile aralık ayında gerçekteşmektedir (Alaçakır, 2001). Yenilebilir enerji kaynağının bir diğer çeşidi olan rüzgâr enerjisi basınç farklarından dolayı oluşan hava akımı ile gerçekteşmektedir. Yel değirmenleriyle hayatımıza giren ve günümüzde rüzgâr türbinleriyle elektrik enerjisi elde etmemize yarayan sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Emisyonunun bulunmaması, doğal kaynakların tüketimine mahal vermeyen, küresel ısınmaya sebep olacak herhangi bir yan ürün olmayan çevre dostu bir enerji kaynağı olarak ifade edilebilir (Özdamar, 2000; Alaçakır, 2001).

Jeotermal enerji; kaynağı dünyanın merkezinde 4200 °C sıcaklıkta bulunan magma ile meydana gelmektedir. Yerkürenin katmanlarında bulunan suyun magma etkisi ile ısınması sonucu kırık ve çatlaklar boyunca süzülen suların yeryüzüne ulaşması ile elde edilen enerjiye jeotermal enerji denir. Başta elektrik üretimi olmak üzere ısınma ve tedavi gibi amaçlar için de kullanılabilir. Ülkemiz jeotermal enerji

potansiyelince Dünya’da önde gelen ölkeler arasında gösterilmektedir (Drahor ve ark., 2001).

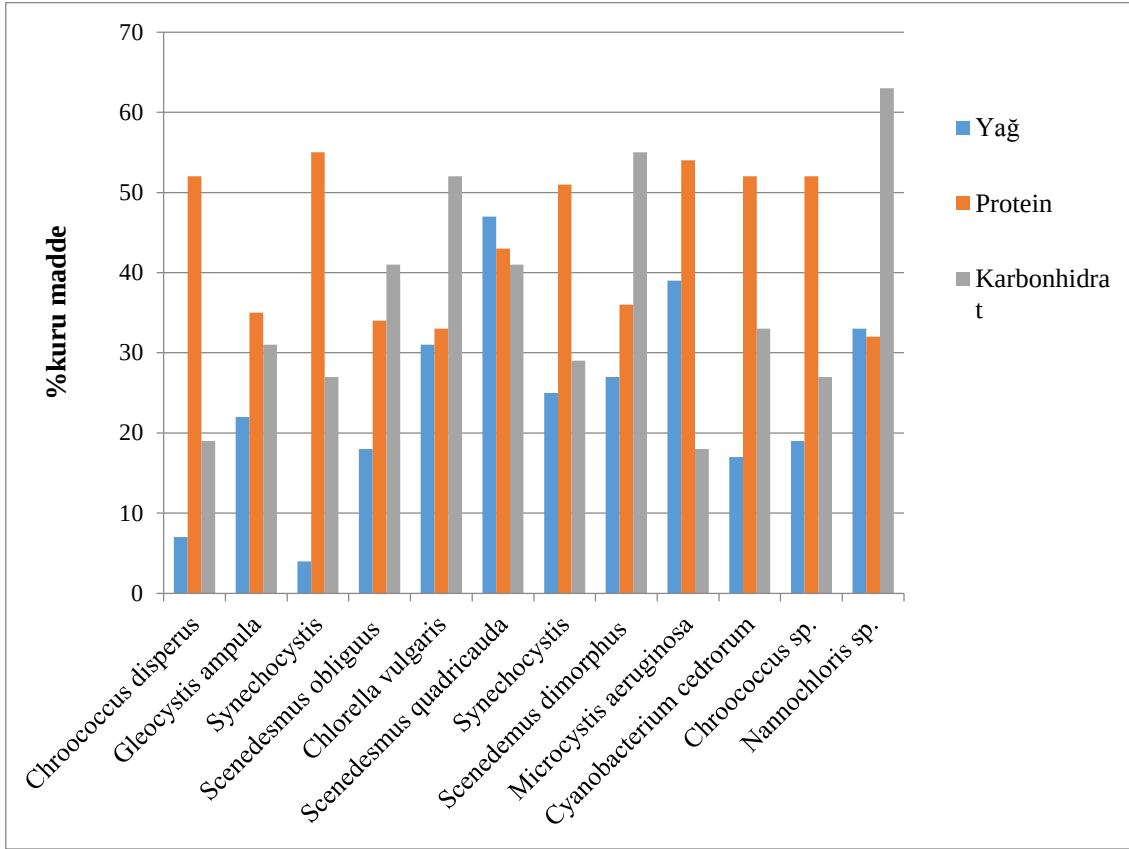
Hidrojen enerjisi iki şekilde kullanılabilir bunlardan ilki yakıt pili olarak değerlendirilmesidir. Bu yöntem ile konutların ısınma problemleri giderilebilir, doğrudan elektrik enerjisi olarak değerlendirilebilir. Diğer bir seçenek ise doğrudan yanmalı motor teknolojilerinde yakıt olarak değerlendirilmesidir. Hidrojen enerjisinin portatif kullanım alanlarına cep telefon bataryaları ve diz üstü bilgisayar bataryaları örnek verilebilir. Doğada serbest halde bulunmayan hidrojen doğal bir enerji kaynağı değildir. Yapısında karbon olmadığından ve son ürün olarak su buharı meydana geldiğinden çevre dostu olarak nitelendirilebilir (Ültanır, 1997).

Biyokütle enerjisi, biyolojik faaliyetler sonucu oluşup yapısında karbon, hidrojen, oksijen ve azot içeren, fosil yakıtlara nazaran yenilenebilir olan organik maddelerden oluşan bir yakıt türüdür. Organik maddelerden elde edilen biyoyakıtları birincil biyoyakıtlar (odun, hayvan atığı, mahsul atıkları, çöp gazı) ve ikincil biyoyakıtlar (biyoetanol, biyodizel, biyohidrojen) olmak üzere iki sınıfta incelemek mümkündür.

Sınıflandırılan bu biyoyakıt türleri birinci, ikinci ve üçüncü nesil olarak gruplara ayrılmıştır. Birincil nesil biyoyakıtlara odun, tarım atıkları, ikincil nesil biyoyakıtlara hayvansal ve bitkisel atıklar, üçüncü nesil biyoyakıtlara ise mikroalgler örnek verilebilir. Yenilebilir enerji kaynakları arasında gösterilen 3. nesil biyoyakıtların hammaddesi mikroalglerden oluşmaktadır.

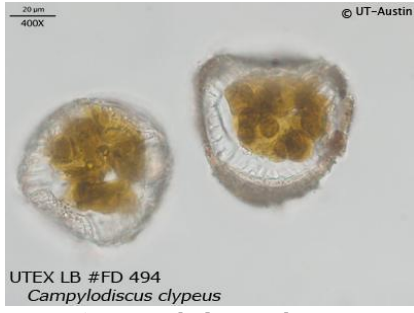
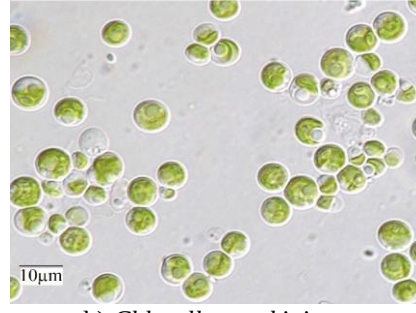
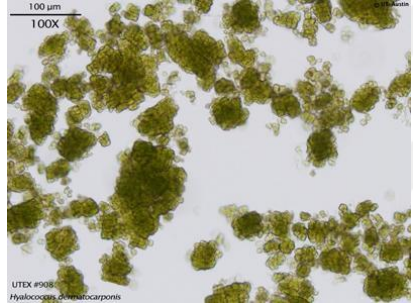
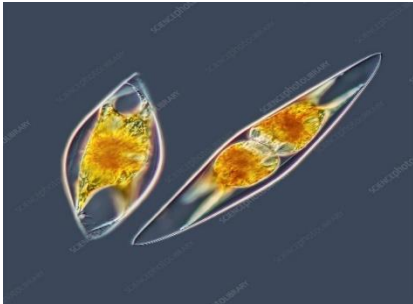
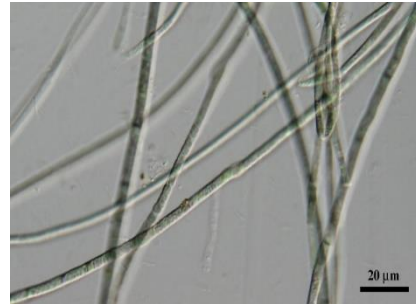
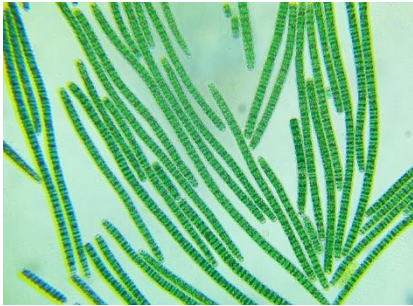
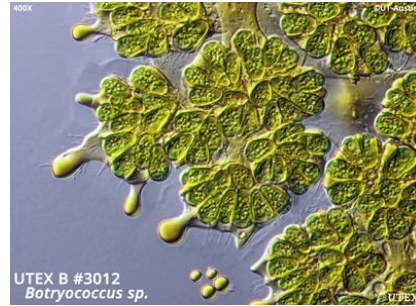
2.2. Mikroalgler

Mikroalgler, tek hücreliden çok hücreliye kadar farklılık gösteren ve yapılarında karbonhidrat, yağ ve protein içeren güneş ışığına karşı duyarlı genellikle ototrofik özellik gösteren mikroorganizmalardır. Şekil 2.5’de bazı mikroalglerin içerikleri yüzdelik olarak gösterilmektedir (Sisman-Aydin, 2019).



Şekil 2.5. Bazı mikroalg türlerine ait yağ, protein ve karbonhidrat içerikleri.

Mikroalglerin türlerine göre farklılık göstermelerine rağmen %15-77 arasında yağ içermektedirler. Diğer yağ bitkilerine kıyasla yapılarında daha fazla yağ içermektedirler. Alan başına fazla yağ üretme yeteneklerine sahip olan mikroalgler; biyodizel, biyoetenol ve biyogaz üretimi için cazip hale gelmektedirler. Şekil 2.6'da yağ içerikleri fazla olan farklı mikroalg türlerinin mikroskobik görüntüleri gösterilmektedir (UTEX, 2020).

a) *Campylodiscus clypeus*b) *Chlorella sorokiniana*c) *Chlorella vulgaris*d) *Griffithsia pacifica*e) *Hyalococcus dermatocarponis*f) *Pleurosira laevis*g) *Pyrocystis lunula*h) *Scytonema sp.*i) *Spirulina platensis*j) *Botryococcus sp.*

Şekil 2.6. Bazı mikroalg türlerinin mikroskopik görüntüleri.

Mikroalglerden biyoyakıt üretilmesinin asıl amacı her geçen gün artan küresel enerji ihtiyacını karşılamak ve azda olsa fotosentez yardımıyla havada bulunan karbondioksiti oksijene çevirerek küresel ısınmanın engellenmesine katkıda bulunmaktır (Singh ve ark., 2011).

2.2.1. Mikroalglerin biyoyakıt üretimindeki yeri

Mikroalglerin yapısında bulunan zengin içerikleri sayesinde biyodizel, biyohidrojen, biyogaz üretimini mümkün olmaktadır. Hammadde olarak kullanılan mikroalglerin içeriklerine göre elde edilen çeşitli biyoenerji ürünleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Khan ve ark., 2018).

Çizelge 2.1. Mikroalglerin içeriklerine göre elde edilen çeşitli ürünler

Mikroalg içeriği	Elde edilen ürün
Mikroalg kalıntısı	Biyoetanol, Biyogaz
Yağ	Biyodizel
Karbonhidrat	Biyoetanol
Protein	Biyogaz
H ₂ O	Biyohidrojen

a) Biyodizel

Biyodizel genellikle hayvansal ve bitkisel atık yağlardan, yağ oranı yüksek tarımsal ürünlerden seyreltme yöntemi, mikro emülsiyon oluşturma yöntemi, piroliz yöntemi ve transesterifikasyon yöntemi ile yağların biyoyakıta dönüştürülmesi işlemidir. Biyodizel üretimi için tarım alanlarında yağlı tohumların üretimi, yüksek alan ihtiyacı, yüksek maliyet ve sürekli bakım gerektiren bir süreç olması nedeniyle alternatif hammadde arayışı büyük önem kazanmaktadır. Bu süreçte maliyet ve zamandan tasarruf sağlayan mikroalgler devreye girmektedir.

Hücre içerisinde %80’e kadar yağ depolayabilen mikroalgler biyodizel üretimi için elverişli bir hammadde kaynağıdır. Özellikle günümüzde mikroalglerden yağ ekstraksiyonu ile yağ elde edilmektedir ve elde edilen bu yağ çeşitli yöntemlerle biyodizele dönüştürülmektedir. Çizelge 2.2’de biyodizel üretiminde kullanılan çeşitli hammadde kaynaklarının yağ oranlarına yer verilmiştir (Mata ve ark., 2010).

Çizelge 2.2. Biyodizel üretimi için kullanılan çeşitli mikroalgler ve tohumların yağ içeriği

Mikroalg türü	Mikroalg Yağ İçeriği (%)	Tohum	Tohum Yağ İçeriği (%)
<i>Chlorella sp.</i>	28-32	Yer fıstığı	35-55
<i>Botryococcus brauni</i>	25-75	Soya	13-25
<i>Nanochloropsis sp.</i>	31-68	Kanola	40-45
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54	Ayçiçeği	40-50
<i>Schizachytrium sp.</i>	50-57	Mısır	17-18
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	84	Zeytin	15-35
<i>Prymnesium parvum</i>	22-38	Palm	35-55

b) Biyoetanol

Selülöz, hemiselülöz ve nişastanın çeşitli yöntemler ile parçalanarak glikoz, galaktoz vb. şekerlere dönüştürülmesi ve oluşan bu şekerlerin mikroorganizma yardımı ile fermantasyon ile biyoetanol elde edilmesi işlemidir. Biyoetanol işleminde sıklıkla şeker kamışı, mısır, yaprak, talaş gibi bitkiler kullanılmaktadır. Yalnız zor ve oldukça maliyetli bir süreç olduğundan maliyeti düşük ve hızlı büyüme yeteneğine sahip mikroalgler son yıllarda daha fazla tercih edilmektedir. Mikroalg kütlelerinin yaklaşık %65'i biyoetanole dönüşebilen polisakkaritlerden oluşmaktadır (Sun ve Cheng 2002). Biyoetanol işlemi temelde iki adımda gerçekleşmektedir. Bunlar: mikroalglerin üretimi ve hasatlama ile fermantasyon ve alkol distilasyonu olarak sıralanabilir. Çizelge 2.3'te çeşitli mikroalg türleri ve tohumların biyoetanol üretme potansiyeli karşılaştırılmıştır. Çizelgede görüldüğü dibi mikroalglerin biyoetanol üretme potansiyelleri yüksek olup biyoetanol üretimi için yeni bir enerji ham madde kaynağı olarak değerlendirilebileceği görülmektedir (Johnson, 2009).

Çizelge 2.3. Biyoetanol üretimi için kullanılan çeşitli mikroalgler ve tohumların yağ içeriği

Mikroalg türü	Biyoetanol üretim verimi (%)	Tohum	Biyoetanol üretim verimi (%)
<i>Chloro vulgaris</i>	23	Şeker pancarı	11
<i>Chlorococum sp.</i>	38	Tatlı patates	12.5
<i>Chlorococum humicola</i>	52	Mısır	36
<i>Chlorococum infusiomum</i>	26	Arpa	25
<i>Scenedesmus obliquus</i>	20	Posa	18
<i>Chlomydomonos reinhartil</i>	29	Şeker kamışı	7

2.2.2. Mikroalg üretimine etki eden faktörler

Mikroalg üretiminde biyolojik ve biyolojik olmayan faktörlerin etkili olduğu görülmüştür. Biyolojik olmayan etkilere ışık, sıcaklık, besin ortamı, pH ve toksik etki oluşturan kimyasallar örnek gösterebilir. Bakteri, virüs, fungi ve alglerin rekabet ortamı oluşturmaları gibi örnekler biyolojik etkenlere örnek verilebilir (Ribeiro ve ark., 2015).

a) Sıcaklık

Mikroalglerin gelişimi üzerindeki etkisi azımsanamayacak kadar güçlü olan ortam sıcaklığının metabolizma üzerinde büyük etkileri vardır. Gross M. yaptığı çalışmada mikroalg üretiminde yüksek sıcaklığın hücredeki protein içeriğinin azalmasına yağ ve karbonhidrat içeriğinin ise artmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Bir diğer çalışmada ise protein içeriğinin azalmasının yanı sıra yağ ve karbonhidrat değerlerinin de azalmasına neden olduğu görülmüştür. Farklılık gibi görünen bu olayın sebebi ise sıcaklığın farklı mikroalgler üzerinde değişkenlik gösteren etkilere sahip olmasıdır. Çizelge 2.4'te farklı sıcaklıkların *S. platensis*'in içeriğine olan etkisini göstermektedir (Koru ve Cirik, 2003).

Çizelge 2.4. Sıcaklığın *S. platensis*'in içeriğine etkileri (Koru ve Cirik, 2003).

Sıcaklık (°C)	Protein (%)	Karbonhidrat (%)	Yağ (%)
28	59.0	30.2	7.4
30	58.3	29.7	7.8
35	57.5	28.9	8.0
38	55.8	30.5	8.2
40	54.6	32.1	9.5
43	45.7	37.6	11.3

b) Işık

Mikroalglerin üretiminde verim sağlanabilmesi için ışık şiddetinin en uygun düzeyde tutulması gerekmektedir. Mikroalg üretim verimi ışık döngüsü ve ışık miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Çok düşük şiddette verilen ışık alg büyüme hızını düşürmektedir. Işık şiddetinin yoğun olması durumunda ise kloroplastlarda bulunan ışık reseptörlerine zarar vererek fotoinhibisyon olarak adlandırılan olay meydana gelmekte ve bu durum fotosentez hızını düşürmektedir (Masojídek ve ark., 2004).

c) pH

Mikroalglerin üretiminde önemli bir parametre olan pH'ın etkisi; mikroalglerin türlerine göre değişkenlik göstermektedir. Genel olarak optimum pH aralığı 7-9 arasında değişkenlik göstermektedir. pH değişimi besin ortamıyla doğrudan da ilişkilendirilebilir. Karbondioksit ve nitrat alımında pH artarken amonyak kullanımında ise pH değeri azalmaktadır (Rashid ve ark., 2014).

d) Besin ortamı

Mikroalgler yapısında %50 karbon, %10 azot ve %2 fosfor içermektedir. Yapılarında bulunan bu maddelerin hücreye alınabilmesi için besin ortamlarında azot, fosfor ve karbonun majör nutrientler olarak yer alması gerekmektedir. Buna ek olarak besleyici özelliği olan demir, çinko, magnezyum, kalsiyum gibi iz elementlere de ihtiyaç duymaktadır (Christenson ve Sims, 2011). Özellikle azot mikroalg büyümesi için kritik besin maddesi olarak gösterilmektedir. Mikroalgler genellikle azotu sırasıyla amonyum, üre, nitrat ve nitritten almaktadır. Fosfor genellikle mikroalglerin metabolik faaliyetlerini yürütülebilmesi ve hücre gelişimi için kilit bir besin maddesidir. Enerji transferi ve fotosentez gibi hücre içi aktivitelerde de yardımcı rol üstlenmektedir. Fosforun metabolizma hızını artırma etkisinden dolayı fazla kullanımı, biyokütle üretimini arttırırken yağ oranını ve yağı üretme hızlarını düşürmektedir.

e) Tuzluluk

Mikroalg biyokütle üretiminin gerçekleşebilmesi adına tuzluluk parametresi önemli bir faktördür. Optimum tuzluluk oranı diğer parametrelerde olduğu gibi her mikroalg türü için değişkenlik göstermektedir. Örnek olarak *Synechococcus sp.*, *Nannochloropsis salina*, *Chlorococcum littorale* ve *Botryococcus braunii* gibi deniz mikrolagleri yüksek tuzluluk oranlarında büyümelerini daha kolay sağlayabiliyorken *Chlorella vulgaris* ve *Microcystis aeruginosa* gibi tatlı su mikroalgleri daha az tuzluluk oranına sahip ortamlarda gelişimlerini sürdürebilmektedirler (Schenk ve ark., 2008).

f) Karıştırma

Işık, sıcaklık ve gazların homojen olarak dağılmasını sağlayan mikroalglerin büyümesinde önemli bir yere sahip olan diğer bir parametre ise karıştırma hızı ve karıştırma yöntemidir. Yüksek yoğunluklu mikroalg kültüründe ışık iletimi azalır; karbondioksit ve sıcaklık miktarı ise artar. Bu noktada bu problemlerin ortadan kaldırılması adına karıştırma işlemi devreye girmektedir. Karıştırma işlemi ile

ortamdaki maddelerin homojen olarak dağılması sağlanır, ayrıca mikroalgal hücrelerin çökmesi engellenir ve ısınin reaktörün her yerine eşit olarak iletilmesi sağlanır. Dikkat edilmesi gereken husus karıştırma hızını istenilen değerde tutmaktır. Karıştırma hızının fazla olması durumunda kesme geriliminden kaynaklı mikroalglerin hücre duvarı zarar görebilir. Yavaş olması durumunda ise kültür içerisindeki karanlık bölgelerin artmasına ve flokların oluşmasına neden olarak anaerobik bir reaktör ortamının meydana gelmesi ile mikroalg gelişimi olumsuz yönde etkilenebilir (Eriksen, 2008).

g) Biyolojik faktörler

Mikroalg yetiştiriciliğinde kültür ortamının maya, bakteri, küf mantar ve istenmeyen algler gibi farklı türlerle paylaşılması, hedeflenen mikroalglerin büyümesini engelleyici bir ortamın oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum kontaminasyon olarak ifade edilmektedir. Azot, fosfor gibi besin maddelerin bu organizmalar tarafından tüketilmesi mikroalglerin büyümesini kısıtlamaktadır. Zamanla istenmeyen türün biyokütle miktarı, mikroalg kültürünü geçerek ortamı domine etmektedir. Bu olumsuzluğun giderilmesi için pH, sıcaklık, ışık gibi dış parametrelerin geçici bir süreliğine değiştirilmesi yardımcı olabilir. Örnek olarak *Chytridium sp.* türü ile yapılan çalışmalarda yüksek aerobik koşullarda meydana gelen kontaminasyonların önüne geçilmesi için oksijen miktarını 1 saat boyunca kritik seviyelere düşürerek kontaminasyonun önlenmesinin mümkün olabileceğini raporlanmıştır (Munoz ve Guieysse, 2006).

Mikroalg üretimine etki eden parametreler incelendiğinde birçok mikroalg türü üzerinde yapılan çalışmalar ile optimum şartlar belirlenmiş olup bu şartlar Çizelge 2.5'te gösterilmiştir (Gezici ve ark., 2012).

Çizelge 2.5. Mikroalgler için optimum üretim şartları (Gezici ve ark., 2012)

Parametre	Uygun şartlar
Sıcaklık (°C)	18 – 24
Tuzluluk (g/l)	20 – 24
Işık yoğunluğu (lux)	2000 – 5000
pH	8.2 – 8.7
Aydınlık/Karanlık döngü	16/8

2.2.3. Mikroalg üretim sistemleri

Petrol fiyatlarının uzun yıllar nispeten daha uygun olmasından dolayı 1950’li yıllara kadar mikroalg yetiştiriciliğine gereken önem verilmemiştir. Günümüzde ise ham petrol fiyatlarının hızla yükselmesinden dolayı mikroalgal biyoenerji, özellikle dizel, benzin ve gaz gibi fosil kaynaklı yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı olarak görülmeye başlanmıştır. Mikroalgler, açık havuz sistemleri ve kapalı fotobiyoreaktörler olmak üzere yaygın olarak iki farklı ortamda yetiştirilebilirler (Nwoba ve ark., 2016).

a) Açık havuz sistemleri

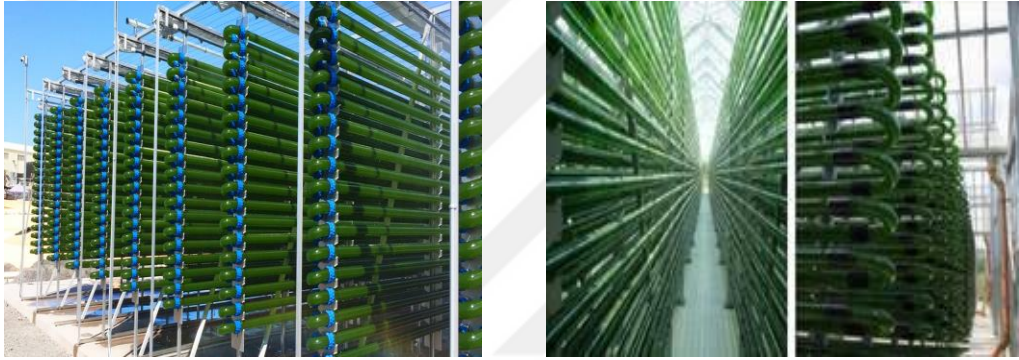
Ticari anlamda açık havuzlarda mikroalg yetiştiriciliği en eski ve basit yöntemdir. Açık sistemlerde mikroalg yetiştiriciliği dairesel, karıştırmasız, eğimli, yarış pisti gibi havuzlarda yapılmaktadır. Nispeten daha düşük işletme maliyetine sahip olmasına rağmen açık sistemler, iklim koşullarından büyük oranda etkilenmektedir. *Chorella sp.*, *Spiriluna platensis* *Hematoccus sp.* ve *D. salina* yarış tipi havuzlarda üretilen ve doğal yaşamlarına nispeten benzeyen bir ortamda yetiştirilen en yaygın mikroalg türleri arasında gösterilmektedir (Ben-Amotz, 2009). Açık sistemler çeşitli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. İşletme maliyetinin düşük olması, besin kaynağına ulaşılabilirliğinin kolaylığı (atıksular besin kaynağı olarak kullanılabilir), ekstra bir soğutma işlemine ihtiyaç duyulmaması (buharlaştırma) ve tarıma elverişsiz alanlarda kullanılabilirliği gibi avantajlara sahipken sistem kontrolünün zor olmasından kaynaklanan yüksek kontaminasyon riski, sıcaklığın mevsimsel değişikliklerinden etkilenmesi, nispeten fazla alan gereksinimi ve ışığın sınırlayıcı etkisi gibi dezavantajlara sahiptir. Şekil 2.7’de mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan çeşitli açık sistemlere ait resimlere yer verilmiştir (Oktor, 2018).



Şekil 2.7. Mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan açık sistemler.

b) Kapalı sistemler

Bu sistemlerinin kurulmasındaki amaç açık sistemlerin dezavantajlarını giderebilmektir. Kapalı sistemler mikroalg yetiştirilmesinde kullanılan reaktörün geometrik şekline göre adlandırılmaktadır. Mikroalgler yatay, tübüler, düz plaka, sarmal ve tübüler gibi fotobiyoreaktörlerde yetiştirilmektedirler. Fotobiyoreaktörler açık sistemlere göre sıcaklık, pH, ışık, buharlaşma kayıpları olmaması ve daha fazla biyokütle üretiminin yapılması gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Şekil 2.8’de mikroalg üretimi için kullanılan bazı fotobiyoreaktörlere ait resimler gösterilmiştir (Grima ve ark., 2003).



Şekil 2.8. Mikroalg üretiminde kullanılan çeşitli kapalı sistemler.

Çizelge 2.6’da açık ve kapalı sistemlerin bazı avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir (Grobbelaar, 2009). Fotobiyoreaktörler; düşük kontaminasyon riski ile yüksek kalitede biyokütle üretimi, çevresel koşullardan etkilenmeme ve daha az alan ihtiyacı gibi önemli avantajlara sahip olsa da açık sistemlerin de nispeten daha düşük işletme maliyetine sahip olması ve atık su arıtımında alternatif bir yöntem olarak kullanılabilmesi öne çıkan bazı üstünlükleri bulunmaktadır (Harun ve ark., 2010).

Çizelge 2.6. Açık sistemler ve kapalı sistemlerin avantaj ve dezavantajları (Carvalho ve ark., 2006)

Parametreler	Açık sistem	Kapalı sistem
Biyokütle üretimi	Düşük	Yüksek
Alan kullanımı	Çok	Az
İşletim maliyeti	Az	Çok
Kontaminasyonu riski	Yüksek	Az
Buharlaşma ile su kaybı	Yüksek	Düşük
Biyokütle verimi	Kontrol zor	Kontrol kolay
Yetiştirme süresi	Uzun	Kısa

Açık sistemler ve kapalı sistemlerde biyokütle verimi; mikroalg türüne ve ortam şartlarına göre farklılık göstermektedir. Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8’de sırasıyla açık ve kapalı sistemlerde çeşitli mikroalg türlerinin biyokütle verimlerine yer verilmiştir.

Çizelge 2.7. Açık sistemlerde biyokütle verimleri (Çalışkan-Elener ve Öner, 2019)

Konfigürasyon	Mikroalg türü	Maksimum biyokütle konsantrasyonu (g/L)	Maksimum biyokütle verimi (g/L·gün)
Açık havuz	<i>Phaeodactylumtricornutum</i>	1,0	0,10
	<i>Phaeodactylumtricornutum</i>	0,3	0,15
	<i>Nannochloropsis sp.</i>	-	0,16
	<i>Nannochloropsis oculata</i>	1,0	-
	<i>C. vulgaris</i>	-	0,35
Eğimli ince plaka	<i>Chlorella sp.</i>	>40	3,0
	<i>Chlorella sp. P12</i>	>40	3-4
	<i>Chlorella spp.</i>	>40	1,46
Dairesel	<i>Nannochloropsis sp.</i>	>2, 0	0, 18

Çizelge 2.8. Çeşitli fotobiyoreaktörde yetiştirilen bazı mikroalg türlerinin konsantrasyon ve biyokütle verimleri (Huntley ve Redalje, 2007)

Konfigürasyon	Mikroalg türü	Maksimum biyokütle konsantrasyonu (g/L)	Maksimum biyokütle verimi (g/L·gün)
Yatay tübüler fotobiyoreaktör	<i>Phaeodactylumtricornutum</i>	2, 3	1,2
	<i>Porphyridium cruentum</i>	3, 0	-
	<i>UTEX 161 w</i>		
	<i>Muriellopsis sp.</i>	2,0	-
	<i>D. salina UTEX 2538</i>	0,6	0,10
	<i>P. tricornutum</i>	1,4	0,3
	<i>S. platensis M2</i>	-	0,52
	<i>P. tricornutum</i>	0,6	0,50
Düz plaka fotobiyoreaktör	<i>Spirulina platensis M2</i>	2,3	0,6
Sarmal tübüler	<i>S. platensis</i>	1,2	-
Sarmal tübüler	<i>P. tricornutum</i>	> 3,5	1,40

2.2.4. Mikroalg hasat işlemleri

Biyokütle üretimi için önemli bir basamak olan hasat işlemi katı-sıvı süspanse halde bulunan mikroalg çözeltisinden suyun uzaklaştırılarak mikroalgin katı hale dönüştürme işlemi olarak tanımlanabilir. Hasat işlemi başlıca filtrasyon, flokülasyon, sedimentasyon, santrifüj gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Bu yöntemlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler arasında mikroalg türü, verim kalitesi, ürünün kalitesi ve maliyet gösterilebilir. Mikroalg hasadı üretim maliyetinin %30’luk kısmını

oluşturduğu için üretim verimini direkt etkileyen bir işlemdir. İdeal bir hasat işleminde enerji sarfiyatının az olması, hızlı sonuç elde edilmesi, maliyetinin uygun ve hasat veriminin yüksek olması beklenmektedir. Hasat işleminde yaygın olarak kullanılan yöntemlere aşağıda yer verilmiştir.

a) Sedimentasyon

Hasat işleminde kullanılan en kolay yöntemlerin arasında sedimentasyon gelmektedir. Büyük ölçekli üretimlerde kullanılan bu yöntem yer çekimin etkisiyle mikroalgleri kültürasyon ortamından ayırma esasına dayanmaktadır. Düşük maliyetli ve düşük enerji sarfiyatının olduğu bu yöntem; özellikle büyük boyutlu mikroalglerin hasadında etkilidir. Çökelme hızı; kullanılan mikroalg türüne, hücre boyutuna, kültür yoğunluğuna, ışık ve besin maddelerine bağlıdır (Milledge ve Heaven, 2013).

b) Flokülasyon

Sedimentasyon yönteminin geliştirilmiş hali olarak açıklanabilir. Mikroalglerin çökelme hızını arttırmak için ilave olarak flokülant eklenerek yapılan işlemdir. Sistemin çalışma prensibi mikroalg hücrelerinin yüzeyleri negatif olup pozitif yüklü flokülantlarla flok oluşturarak çökme hızını artırma mantığına dayanmaktadır. Optimum bir flokülasyon yöntemi için dikkat edilmesi gereken husus eklenen flokülantların toksik etki oluşturmaması, düşük maliyetli olması, düşük konsantrasyonlarda bile etki olmasıdır. Flokülasyon yönteminde sık kullanılan flokülantlar; alüminyum sülfat, demir klorür, polielektrolitlerdir (Rawat ve ark., 2013).

c) Flotasyon

Sedimentasyon yönteminin aksine küçük boyutlu mikroalglerin hasadı için yaygın olarak flotasyon kullanılmaktadır. Uygulanabilirliği basit olan bu yöntemde sisteme hava kabarcıkların verilerek mikroalglerin yüzeye ulaşması hedeflenmektedir. Hava kabarcıklarıyla yüzeye çıkan mikroalgler, bir ayırıcı ile sulu ortamdan ayrılarak hasat edilirler. Sisteme hava kabarcıklarının verilmesi için yüksek basınç gerektirmektedir bu sebepten dolayı enerji sarfiyatı yükselmektedir (Rawat ve ark., 2013). Flotasyon işlemi; çözünmüş hava flotasyonu, dağılık hava flotasyonu, ozon flotasyonu ve elektroflotasyon olarak dört temel flotasyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

d) Santrifüj

Sıvı içerisinde bulunan mikroalglerin merkez kaç kuvvetinden yararlanarak susuzlaştırma işlemine dayanmaktadır. Hızlı ve yüksek bir mikroalg hasatlama yöntemi olmasına rağmen yüksek enerji sarfıyatı ve işletme maliyeti sebebiyle daha az tercih edilen bir yöntemdir (Rawat ve ark., 2013).

e) Ozon yöntemi

Kuvvetli bir elektron alıcısı olan ozonun mikroorganizmaların hücre yapısını parçaladığı bilinmektedir. *Microcysis* mikroalg türü üzerinde yapılan çalışmada düşük ozon dozu kullanımı ile koagülasyon veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak düşük ozon konsantrasyonlarında mikroalglerin sudan ayrıştırarak hasat işleminin yapılabileceği kanıtlanmıştır (Benoufella ve ark., 1994). Yalnız ozon yöntemini tek başına uygulanan bir yöntem olarak değerlendirmekten ziyade koagülasyon, flokülasyon ve flotasyon yöntemlerine yardımcı olacak şekilde değerlendirmek daha düzgün bir tabir olur (Moraine ve ark., 1979; Bosma ve ark., 2003; Farooq ve ark., 2013).

Flotasyon işleminde kullanılan hava, mikroalg hücre yüzeyinde yük değişikliğine yol açarak bir fark oluşturmaktadır. Hava yerine ozon kullanılmasıyla yüzey yükünün değiştirmesinden kaynaklı olarak %95 oranında hasat verimi sağlanmaktadır (Nguyen ve ark., 2013). *Scenedesmus quaricauda* mikroalg türü üzerinde yapılan çalışmada ozonla ön oksidasyon işleminin uygulanmasından sonra hasat veriminin %75'ten %95'e kadar ulaştığı gözlemlenmiştir (Henderson ve ark., 2010). Ayrıca ozon kullanımının çözeltide oluşan bulanıklığın giderilmesinde de etkili olduğu kanıtlanmıştır (Pranowo ve ark., 2013).

f) Ses dalgaları ile hasatlama

Çözelti içerisinde ses dalgalarının titreşim oluşturarak hücrelerin birbirine yaklaştığı gözlemlenmiş ve birbirine yaklaşan bu hücrelerin suda ayrılmasını kolaylaştırmıştır (Lee ve ark., 2001). *Monodus subterraneus* türü mikroalg üzerinde denen ses dalgaları mikroalg hücrelerin yumaklaşmasıyla daha kolay çökmesini sağlamıştır. Çöken bu yumaklar kolaylıkla sudan ayrılmaktadır (Bosma ve ark., 2003). Ses dalgaları kullanılarak yapılan hasat çalışmalarında 4 saat gibi bir sürede %95 oranında hasat verimi elde edildiği bildirilmiştir (Lecina ve ark., 2015).

g) Filtrasyon

Mikroalgleri filtre yüzeyine tutundurarak ayırma işlemi olarak adlandırılabilir. Filtrasyon yönteminde mikroalglerin boyutları önem arz etmektedir. Boyutlarına göre; makrofiltrasyon ($>10 \mu\text{m}$), mikrofiltrasyon ($0.1-10 \mu\text{m}$), ultrafiltrasyon ($0.02-0.2 \mu\text{m}$) ve ters osmoz ($<0.001 \mu\text{m}$) filtrasyon yöntemleri tercih edilir. Filtrasyon yönteminde karşılaşılan en büyük problemler arasında membran tıkanıklığı, enerji sarfiyatının yüksek oluşu ve kesme geriliminden kaynaklanan mikroalg stresi gösterilebilir. Çizelge 2.9'da çeşitli hasat yöntemlerine ait bazı özelliklere yer verilmiştir (Rashit ve ark., 2014).

Çizelge 2.9. Farklı süreçlerde mikroalg hasat performansların değerlendirilmesi

Hasat prosesi	Verim %	Enerji sarfiyatı	Gözlemler
Elektrokimyasal hasat	94,52	1,6	Düşük elektrik tüketimi, uzun elektrot ömrü
Akış Filtrasyonu	89	3,58	Yüksek enerji girişi Filtrelerin periyodik olarak kontrolü ve değişimi
Polimer Flokülasyon	80	36,81	Flokülanların yüksek maliyeti Kontaminasyon riski
Basınç filtreleri	99	0,18	Filtrelerin periyodik olarak kontrolü ve değişimi
Vakum filtreleri	99	1,23	Filtrelerin periyodik olarak kontrolü ve değişimi
Santrifüj	99	16	Yüksek enerji girişi
Koagülasyon/Flokülasyon (Fe ve Al elektrotları)	92	2	Elektrotların periyodik olarak değişimi ve kontaminasyon sorunları
Elektrokoagülasyon	90	1,08	Elektrotların periyodik olarak değişimi ve kontaminasyon sorunları

2.3. Membran Filtrasyonu

Membran, faz ve ortamları birbirinden ayıran maddelerin karşıya seçici bir şekilde geçişini sağlayan tabaka olarak adlandırılabilir. Tüm membran sistemlerinde istenilen maddenin geçişini sağlayan bir itici kuvvet ve istenilmeyen maddenin karşı tarafa geçmesini engelleyecek ayırma faktöründen meydana gelmektedir. Madde transferi; konsantrasyon farkı, basınç farkı ve elektriksel fark gibi itici kuvvetlerle sağlanır. Membran proseslerinde yaygın olarak kullanılan itici kuvvet basınçtır. Membranlar geçirdikleri molekülün ağırlığına ve gözenek boyutlarına göre dört farklı sınıfta incelenebilir. Bunlar mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters

osmoz'dur. Membran sistemlerini etkileyen faktörler Çizelge 2.10'da gösterilmiştir (Baker, 2004).

Çizelge 2.10. Membran sistemlerin avantaj dezavantaj ve performansını etkileyen faktörler

Avantaj	Dezavantaj	Performansı etkilenen faktörler
• Biyokütlenin tamamını tutmaktadır. • Virüs ve bakteriler için dezenfektan görevi üstlenmektedir • Maliyet düşüktür • Enerji sarfıyatı düşüktür. • Alan ihtiyacı düşüktür. • İlave madde gereksinimi yoktur. • Kültür ortamı geri beslenebilmektedir.	• Membran kirlenmesi • Membran tıkanıklığı	• pH • Sıcaklık • Bekleme süresi • İşletme parametreleri • Membran Maliyeti • Enerji maliyeti • Basınç

a) Mikrofiltrasyon

Genellikle polipropilen, akrilaitril, naylon ve polietilenoetilene malzemeden üretilen, por aralığı 0,01-10 mikron arasında olan düşük basınçta ve çapraz akışlı olarak kullanılan bir membran prosesidir. Düşük basınçta çalıştığı için enerji sarfıyatı oldukça azdır. Gözenek açıklığı mikroalg boyutundan daha küçük olduğundan mikroalglerin tümünü tutmakta ve verimi oldukça yüksek olmaktadır. Büyük partiküller/mikroalgler por açıklığından geçemediğinden zamanla gözenek içinde ve yüzeyinde tıkanmaya neden olmaktadır. Haliyle bu durum membran ömrünü kısaltmakta ve verimini oldukça düşürmektedir. Böyle bir durumda membran temizleme ya da değiştirme işleminin yapılması gerekmektedir. Bu işlemler ise bu proses için maliyeti en çok arttıran aşamalar arasında sayılmaktadır. Günümüzde bunun önüne geçilmesi adına çapraz akışlı membran sistemleri kullanılmaya başlanmıştır (Aslan, 2016).

b) Ultrafiltrasyon

Çözülmüş veya kolloidal halle bulunan yüksek molekül ağırlığına sahip partikül maddeleri ve mikroorganizmaları ayırma işleminde tercih edilen 0,1-0,01 µm'luk por aralığına sahip 1-5 bar basınç aralığında işletilen membran prosesidir. Ultrafiltrasyon membranları genellikle nanofiltrasyon ve ters osmoz membranları için ön arıtma adımıdır. Ultrafiltrasyonda temel etken olarak molekül ağırlığının yanı sıra molekül

şekli ve molekül yükü de rol oynamaktadır. Ultrafiltrasyonda itici yükü tamamen basınç oluşturmaktadır. Tıkanma film üzerinde gerçekleşmektedir.

c) Nanofiltrasyon

Özellikle düşük molekül ağırlıklı organik bileşiklerin ayırımında kullanılan Ters ozmos ile ultrafiltrasyon arasında yer alan asimetrik yapıya sahip, por aralığı 0.5-2 nm ve 5-40 bar basınç arasında değişkenlik gösteren membran ayırma prosesidir. Çalışma prensibi ters ozmosla hemen hemen aynıdır, aralarındaki tek fark işletme basıncıdır. Ters ozmosa göre nispeten daha az basınç uygulandığından enerji sarfiyatı nispeten düşüktür (Liailin ve ManachemElimelech, 2004). Genellikle virüs, bakteri ve organik kalıntıların giderimde kullanılmaktadır. Nanofiltrasyonun önemli bir diğer özelliği ise iyon seçici bir yapıda olmasıdır. +2 değerlikli iyonlar tutulurken +1 değerlikli iyonlar membran sisteminden geçebilmektedir.

d) Ters ozmos

Ters ozmos; ozmotik basınç prensibine göre çalışmaktadır. Ozmotik basın düşük konsantrasyonlu suyun yüksek konsantrasyonlu su tarafına geçmesini önleyebilmek adına konsantre su tarafına yapılan basınç olarak tanımlanabilmektedir. Ozmotik basınç çözünmüş madde yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Hiperfiltrasyon olarak da bilinen ters ozmos yöntemi en çok diyaliz sistemlerinde kullanılmaktadır. Ters ozmos membranlarına yüksek basınç uygulanmaktadır. Bu basınç pompalar yardımıyla sisteme verilmektedir. Sisteme verilen basın 10-200 bar arasında değişkenlik gösterebilir.

Por açıklığı 1-10 angstron arasında değişiklik göstermektedir. Gözenek boyutları çok küçük olduğundan membran daha çabuk tıkanma meyilindedir. Bu tıkanıklığın önüne geçilmesi için iyi bir ön arıtma yapılması şarttır (Ho ve Sirker, 1992). Ters ozmos işeminin başlıca kullanım alanları arasında deniz suyunun içme suyu olarak kullanımı, sulardaki sertliğin giderimi ve atık su arıtımı örnek gösterilebilir. Çizelge 2.11'de membran sistemlerinde kullanılan çeşitli membran türleri, özellikleri ve kullanım alanlarına yer verilmiştir.

Çizelge 2.11. Membran sistemlerinde kullanılan çeşitli membran türleri ve özellikleri (Aslan, 2016)

Membran Türü	Gözenek Çapı (µm)	Basınç (Bar)	Kullanılan Membran	Kullanılan Alanlar
Mikrofiltrasyon	0,1-10	0,1-2	Selüloz asetat (CA) Polisülfan (PS) Polieter sülfan (PES) Poliakrilonitril (PAN) Polivinildin florid (PVDF) Polipropilen (PP) Poliyeten (PE) Polivinilklorid (PVC) Paliamid (PA) Politetrafloroetilen (PTFE)	Atık su arıtımında NF ve RO ön arıtma prosesi olarak Organik madde giderimde
Ultrafiltrasyon	0,1-0,01	1-5	Selüloz asetat (CA) Polieter sülfan (PES) Poliyeten (PE) Poliakrilonitril (PAN) Polivinildin florid (PVDF) Polivinilklorid (PVC) Poliakrilonitril (PAN)	Virüs gideriminde Atıksularda yağ gideriminde Mikroorganizmalar gideriminde İlaç ve Gıda sektöründe
Nanofiltrasyon	0,5-2	5-40	Polisülfan (PS) Poliamid (PA) İnce film kompozit membranlar	Peynir altı su arıtımında Kan arıtımı Peynir suyu arıtımı Süt endüstrisi atıksu arıtımında
Ters ozmos	0,001	30-100	Selüloz asetat (CA) Selüloz tri asetat (CTA) Poliamid (PA) Polisülfan (PS) polieter sülfan (PES) Polivinilklorür (PVC) Polivinildin florür (PVDF) Kompozit membranlar	Peptisit gideriminde Deniz suyunun tatlı suya çevrilmesinde Atık su ve çöp sızıntı sularının arıtımında tercih edilir.

2.4. Mikroalg Yetiştiriciliğinde Membran Teknolojisi

Basit ve eski bir fiziksel ayırma yöntemi olan membran teknolojisi, su ve atıksu arıtma, biyoteknoloji, farmasötik, kimya ve enerji endüstrilerinde yoğunlaştırma amacıyla uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Membran filtrasyonu, diğer ayırma teknolojilerine (santrifüj, flokülasyon ve flotasyon) kıyasla basit çalıştırma,

kolay ölçek büyütme, düşük enerji tüketimi ve kimyasal kullanılmaması gibi belirgin avantajlara sahiptir. Bu nedenle, membran teknolojisinin mikroalg biyokütle üreticiliğinde yetiştirme, hasat ve susuzlaştırma dahil olmak üzere tüm yoğunlaştırma aşamalarında hayati bir rol oynayabileceği düşünülmektedir (Bilad ve ark., 2014; Mo ve ark., 2015). Membran sistemlerinin kullanımı dört ana konfigürasyona ayrılabilir. Genellikle UF ve MF tipindeki membranlar kullanılarak bir pompa yardımı ile akışın membran yüzeyine teğet olarak yönlendirildiği çapraz-akış, vakum pompası kullanılarak oluşturulan basınç farkı ile süzülen su ile hidrolik kalış süresinin belirlenebildiği batık membran filtrasyonu, yüksek kesme kuvvetinin oluşturularak kirlenmenin ve tıkanmanın önüne geçilmesini amaçlayan dinamik filtreleme ve kimyasal bir potansiyel gradyan oluşturmak için deniz suyu tahrikli ileri ozmos başta olmak üzere mikroalg susuzlaştırma amacıyla birçok membran konfigürasyonu uygulanmaktadır (Mo ve ark., 2015).

Çapraz-akış rejiminde *Chlamydomonas sp.* türü ile MF ve UF tipindeki 0,2 bar ve 3 bar TMP'de işletilen düz levha membranlar kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada %91,1 ve %99 oranında mikroalg kazanım verimi elde edilmiştir (Susanto ve ark., 2017). *Chlorella vulgaris* türü kullanılarak 0,3-2,4 bar TMP'de işletilen MF ve 0,2-1,6 bar TMP'de işletilen UF tipindeki membranlar ile 118-170 L/m²·saat arasında kritik akı değerlerine ve %100 mikroalg kazanımına ulaşılmıştır (Elcik ve Cakmakci, 2017). Yine aynı tür ile 1 bar TMP'de hollow fiber membran ile gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise ortalama 100 L/m²·saat akıda %99,5 membran kazanımı elde edilmiştir (Kim ve ark., 2019).

Dinamik filtrasyon modunda *Chlorella vulgaris* türü kullanılarak 0,98 bar TMP ve 57-381 L/m²·saat akıda işletilen MF tipindeki membran ile %99,3 mikroalg kazanımı sağlanmıştır (Kim ve ark., 2019). Aynı tür ile 2,07 bar TMP ve 8-100 L/m²·saat akıda işletilen MF tipindeki membran ile yapılan başka bir çalışmada ise %99,5'ten daha yüksek mikroalg susuzlaştırma verimi elde edilmiştir (Slater ve ark., 2015). Batık membran modülü kullanılarak *Chlorella pyrenoidosa* türü ile gerçekleştirilen çalışmada 15-35 °C sıcaklık aralığında 27-42 L/m²·saat arasında kritik akı değerlerine ulaşılmıştır. (Chu ve ark., 2016). Ayrıca *Chlorella vulgaris* türü kullanılarak 0,15 bar TMP'de

işletilen başka bir batık membranda ise 32,5 L/m²·saat akı değerine ulaşılmıştır (Bilad ve ark., 2014). Yine aynı tür ile 35 g/L deniz suyu kullanılarak ileri ozmos filtrasyon sisteminde yapılan bir başka çalışmada 12.5-18.6 L/m²·saat akıda yaklaşık %80 mikroalg kazanım verimi elde edilmiştir (Onyshchenko ve ark., 2020).

Bu  alışmada *Gloeocystis vesiculosa* 901 mikroalg türü düz panel tipi fotobiyoreaktörde yetiştirilerek elde edilen mikroalgal biyokütlenin çapraz-akış membran filtrasyon düzeneğinde mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipindeki membranlar ile hasadı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı transmembran basınçlarının s z nt  akısına etkisi incelenerek membran için kritik akı ve işletme transmembran basın ı değerleri belirlenmiştir. Mikroalg kazanım verimi, hacimsel azalma ve konsantrasyon faktörleri hesaplanarak membranlar kıyaslanmıştır. Ayrıca membran filtrasyon direnci  l  l rek membranların kirlenme türleri ve miktarları belirlenmiştir.

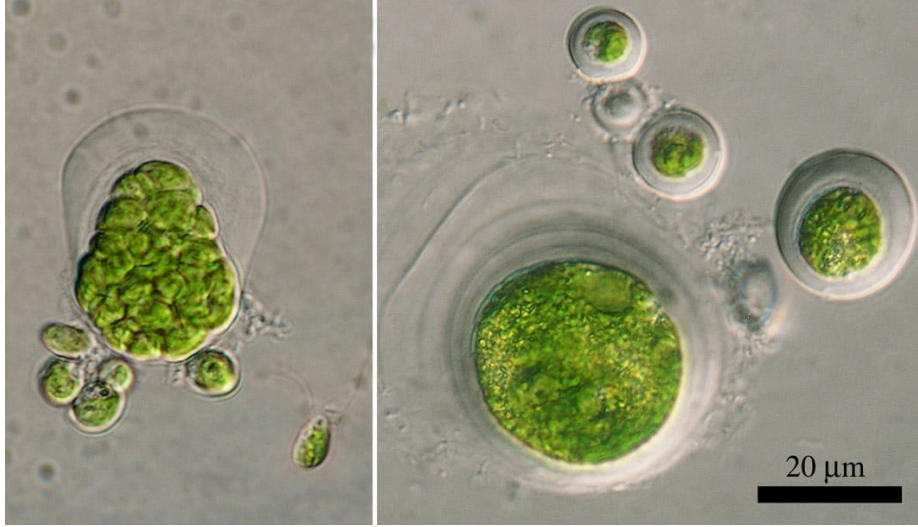


3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Mikroalg türü

Çalışmada kullanılan *Gloeocystis vesiculosa* 901 mikroalg türü Çekya Ototrofik Organizma Kültür Koleksiyonu (CCALA) bünyesindeki mikroalg kültür koleksiyonundan temin edilmiştir. Şekil 3.1’de *Gloeocystis vesiculosa* 901 türünün mikroskop görüntülerine yer verilmiştir (CCALA, 2020).



Şekil 3.1. *Gloeocystis vesiculosa* 901 mikroskop görüntüsü.

3.1.2. Besi ortamı

Çalışmada mikroalg yetiştiriciliğinde sıklıkla tercih edilen Tris-Acetate-Phosphate (TAP) besi ortamı kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de TAP besi ortamının kimyasal bileşimine yer verilmiştir. Hazırlanan besi ortamı, kullanılmadan önce 121 °C sıcaklıkta 1 atm basınçta 15 dakika boyunca otoklavlanarak steril edilmiştir. Çalışma boyunca iklimlendirme kabininde 25±1 °C sıcaklıkta, 100 µmol foton/m²·s ışık akısında ve 16:8 saat aydınlık: karanlık oranında büyütülen mikrolag kültürü kullanılmıştır. Stok kültürü düzenli olarak 250 ml hacmindeki sıvı besiyerinde üretilerek reaktör ortamına

aktarılmıştır. Şekil 3.2’de iklimlendirme kabinindeki çalkalamalı inkübatöre ait görsele yer verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tris-Acetate-Phosphate (TAP) besi ortamının kimyasal kompozisyonu

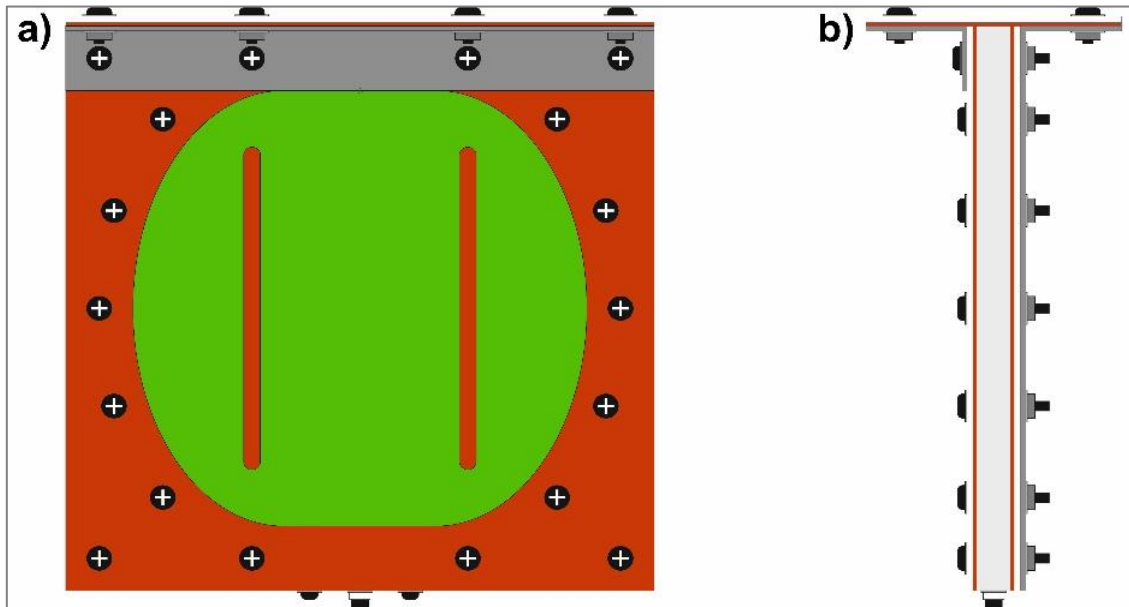
Kimyasal adı	TAP (mg/L)
$\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{OH})_3$ (Tris base)	2420
NH_4Cl	375
K_2HPO_4	288
KH_2PO_4	144
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	100
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	22
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1,6
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1,6
H_3BO_3	11
$(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_3$	1,1



Şekil 3.2. İklimlendirme kabini.

3.1.3. Düz Panel tipi fotobiyoreaktör

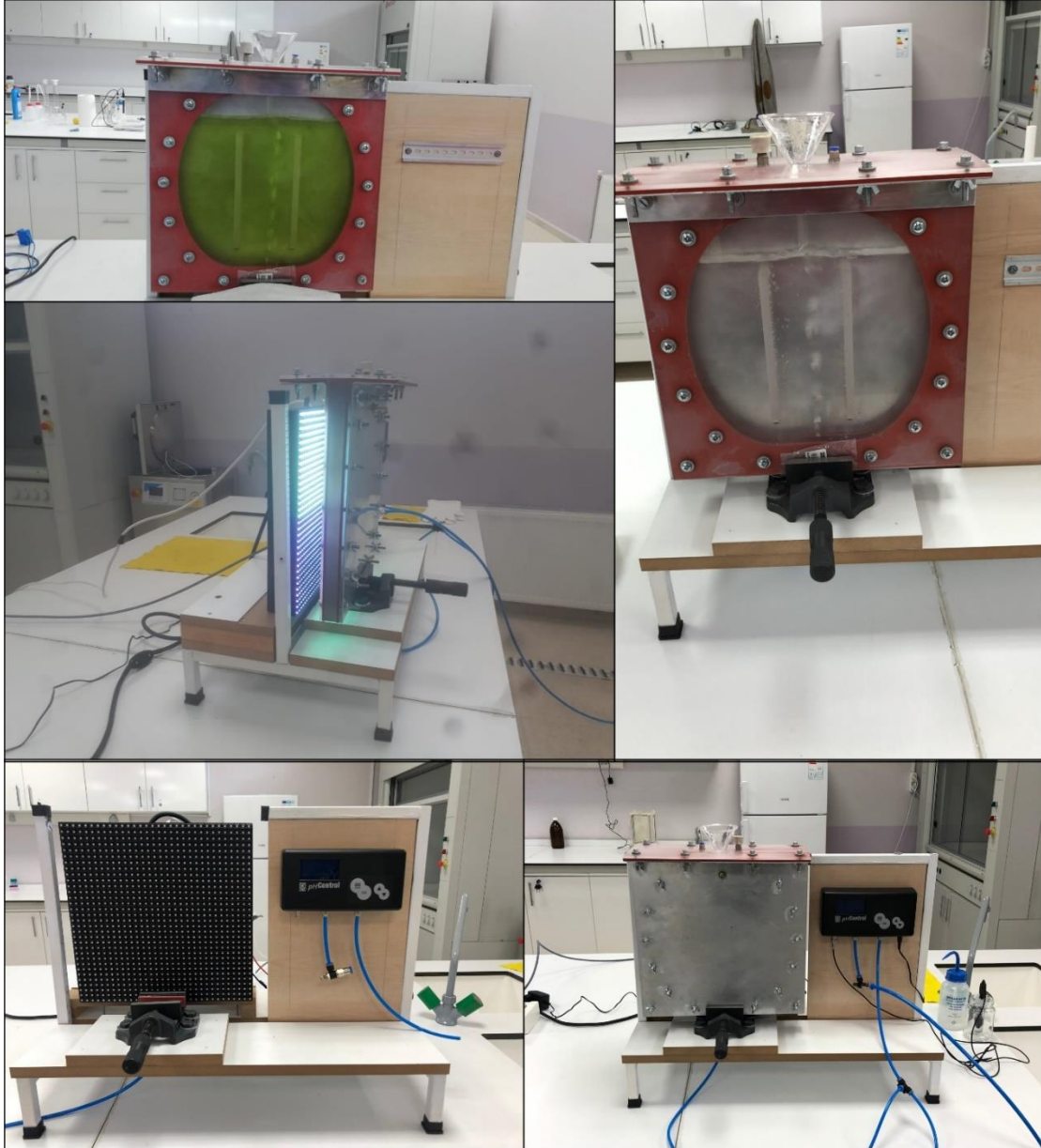
Bu çalışmada mikroalglerin yetiştirilmesi, toplam 1,3 L hacmindeki düz panel tipi fotobiyoreaktör ile gerçekleştirilmiştir. Reaktörün aydınlatılması için ön yüzüne P10 tipi RGB LED panel kullanılmıştır. Toplam 256 adet (16x16) diyota sahip olan panel, TF-AU marka LED sürücü ile çalıştırılmıştır. LED panelin arka yüzeyinde ise sıcaklık dağılımının ve kontrolünün sağlanması için alüminyum malzemeden soğutucu bir panel yerleştirilmiştir. Ayrıca sürücünün soğutulması için bir adet 8 cm çapındaki fan kullanılmıştır. Şekil 3.3'te düz panel-tipi fotobiyoreaktörün önden ve yandan çizimlerine yer verilmiştir. Reaktörün işletme hacmi 1 L'dir. Havalandırma, reaktör tabanındaki hava deliğinden %99 saflıktaki karbondioksit gazı ve havalandırma pompasından verilen hava karışımı ile sağlanmıştır. Reaktör ortamındaki CO₂ miktarı, JBL Flora marka pH kontrolcü ile sürekli olarak kontrol edilerek (pH = 7,0) sabit tutulmuştur. pH kontrolcü, ortamın pH değerini ölçerek ayarlanan pH değerine göre karbondioksit tüpündeki gazın sisteme verilmesini selenoid valf vasıtasıyla kontrol etmektedir.



Şekil 3.3. Düz panel-tipi PBR önden (a) ve yandan (b) görünüşü.

Mikroalglerin büyümesini kontrol et optik yoğunluk ölçümü ve kuru madde tayini yöntemleri ile günlük olarak takip edilmiştir. Optik yoğunluk ölçümü için 680 nm

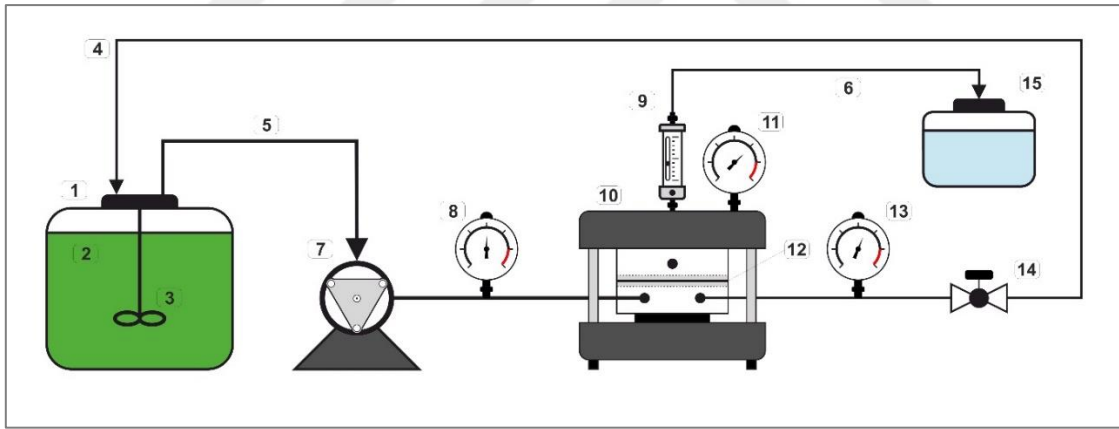
dalga boyunda Merck marka spektrofotometre kullanılmıştır. Kuru madde tayini ise iki saat süre ile 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulup tartılan filtre kağıdından belli miktardaki mikroalgal süspansiyonun süzülüp tekrar 105 °C sıcaklıkta iki saat boyunca kurutulup tartılması ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan düz panel tipi fotobiyoreaktöre ait bazı görsellere Şekil 3.4'te yer verilmiştir.



Şekil 3.4. Düz panel-tipi fotobiyoreaktöre ait fotoğraflar.

3.1.4. Membran düzeneği

Mikroalg hasatında eğer sadece katı/sıvı faz ayrımı amaçlanıyorsa genellikle ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon tercih edilmektedir. Bu çalışmada da iki farklı filtrasyon tipi ile mikroalg hasatı gerçekleştirilmiştir. Membran düzeneğinde düz plaka tip membran kullanılmıştır. Akış rejimi olarak çapraz akışta işletilmiştir. Çalışmada ticari olarak temin edilen bir adet mikrofiltrasyon ve bir adet ultrafiltrasyon türünde sırasıyla 0,3 µm ve 50 kDA gözenek çaplarına sahip, PVDF ve PES malzemelerden üretilmiş membranlar kullanılmıştır. Şekil 3.5'te gösterilen membran düzeneğinde; 1. Besleme tankı, 2. Mikroalg kültürü, 3. Mekanik karıştırıcı, 4. Konsantre sıvı hattı, 5. Sıvı basınçlandırma hattı, 6. Süzüntü sıvı hattı, 7. Basınçlı sirkülasyon pompası, 8. Manometre, 9. Debimetre, 10. Membran test hücresi, 11. Manometre, 12. Membran modülü, 13. Debimetre, 14. Geri basınç çekvalfi 15. Süzüntü sıvı toplama tankını ifade etmektedir.



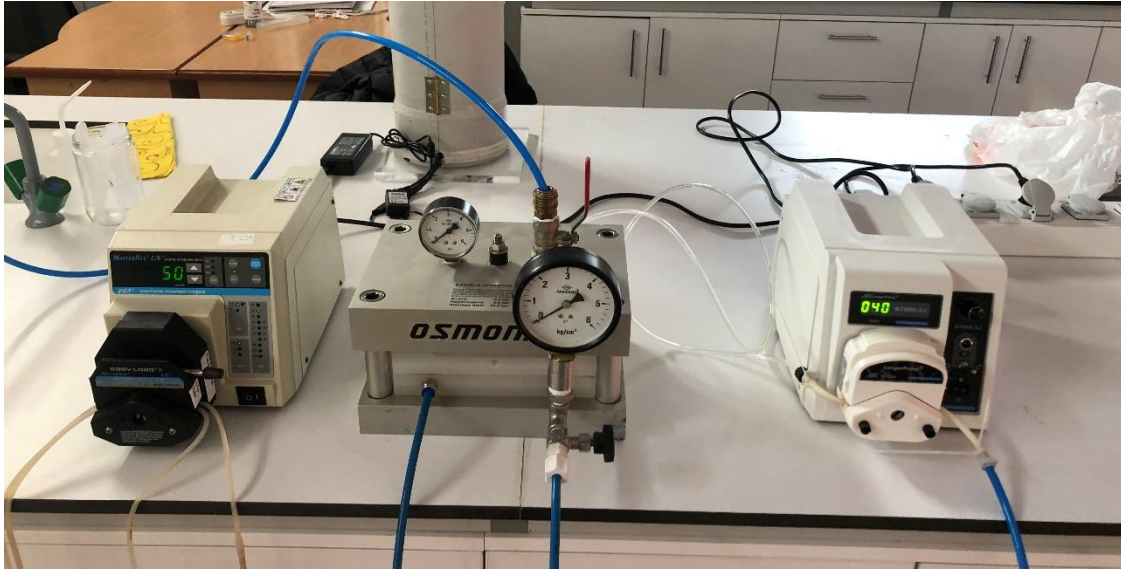
Şekil 3.5. Çapraz-akış membran düzeneği.

Membranın aktif yüzey alanı $0,138 \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Membran düzeneğinde konsantre akım (4), besleme tankına (1) geri gönderilirken; süzüntü akım (6) ise bir beherde (15) toplanarak her 5 dakikada bir mezür ile ölçülüp süzüntü hacmi belirlenmiştir. Çapraz akış hızı debimetre (13) ile ölçülürken, transmembran basıncı ise manometre (8) ile ölçülerek belirlenmiştir. Besleme tankı (1) içerisindeki sıcaklık 25 ± 1 °C'de sabit tutulmuştur. Çizelge 3.2'de çalışmada kullanılan membranlara ait özelliklere yer verilmiştir.

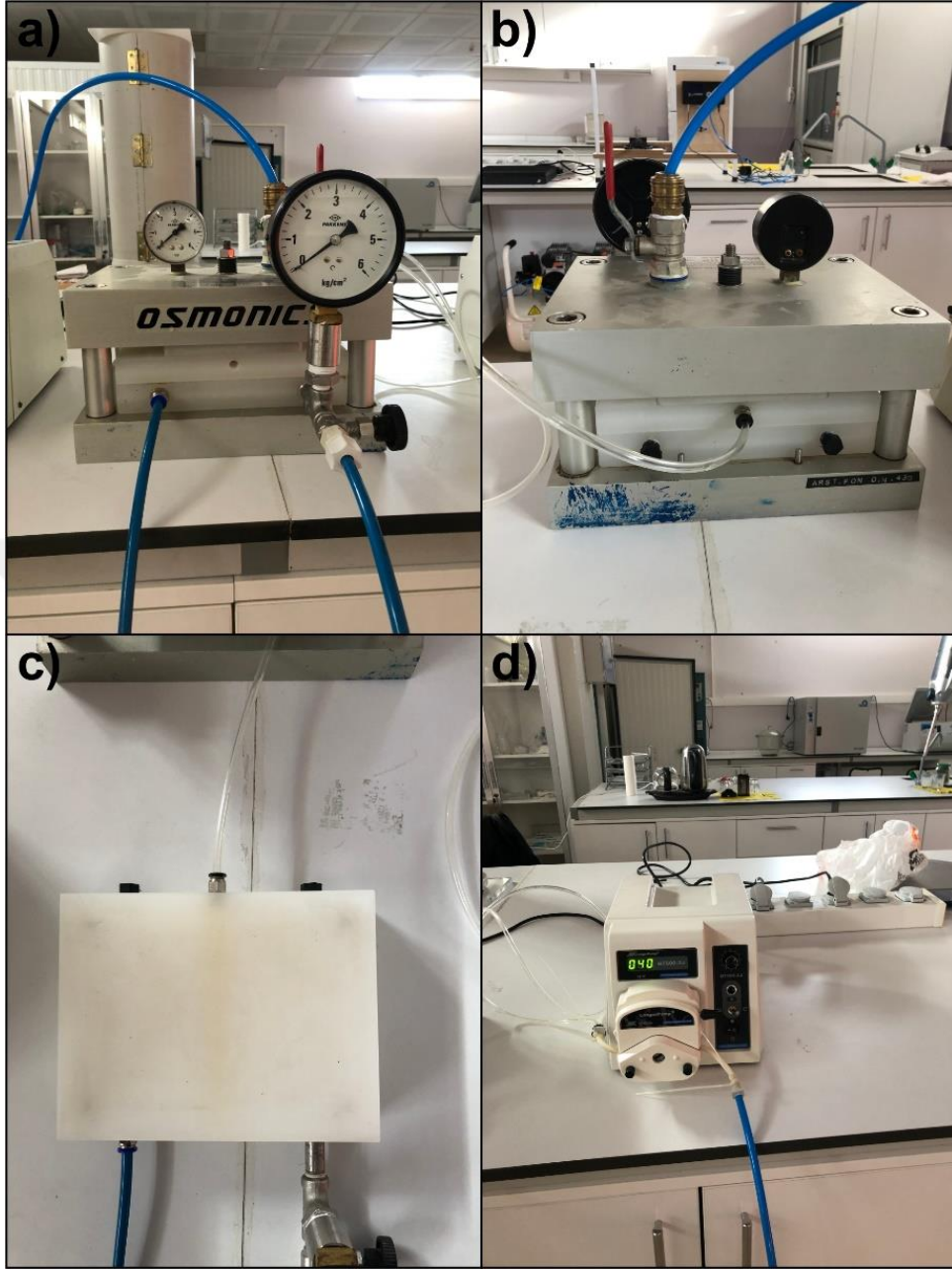
Çizelge 3.2. Membranlara ait özellikler

Membran	Synder MQ	LennTech GE JX
Filtrasyon	Ultrafiltrasyon	Mikrofiltrasyon
Materyal	Polietersülfon (PES)	Polivinilidin Florür (PVDF)
Gözenek boyutu	50000 Da	0,3 µm
pH aralığı	1-11	2-10
İşletme sıcaklığı (°C)	<50	50
İşletme basıncı (bar)	8	6,9
İşletme akısı (L/m²·saat)	299-459	>221

Mikroalg hasatlama işleminde her bir filtrasyon döngüsü; 1. Mikroalg filtrasyonu, 2. Membran temizleme işlemi, 3. Saf su ile filtrasyon olarak 3 adımdan meydana gelmektedir. Mikroalg filtrasyonu işleminde MF için 0,3; 0,8; 1,3 ve 1,8 bar ve UF için 0,6; 1,2; 1,8 ve 2,4 bar işletme basınçları altında çalışılmıştır. Membranların temizleme işlemi, 60 dakika boyunca 0,5 bar basınç altında saf su ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra saf su ile tekrar filtrasyon yapılmıştır. Şekil 3.6'da membran düzeneğinin fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil 3.7'de membran düzeneğinin önden (a), arkadan (b), membran modülünün (c) ve besleme pompasının fotoğraflarına yer verilmiştir.



Şekil 3.6. Membran düzeneğinin fotoğrafı.



Şekil 3.7. Membran sistemi (a, b), modülü (c) ve besleme pompasının (d) fotoğrafları.

3.2. Yöntem

3.2.1. Optik yoğunluk

Reaktör içerisinde yetiştirilen mikroalglerin büyüme miktarlarının belirlenebilmesi için optik yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Optik yoğunluk, reaktör ortamından homojen olarak alınan yaklaşık 1 ml örnek kuarz küvete aktarılarak 680 nm

dalga boyunda WTW marka 6100 VIS model spektrofotometre ile günlük olarak ölçülmüştür.

3.2.2. Akı

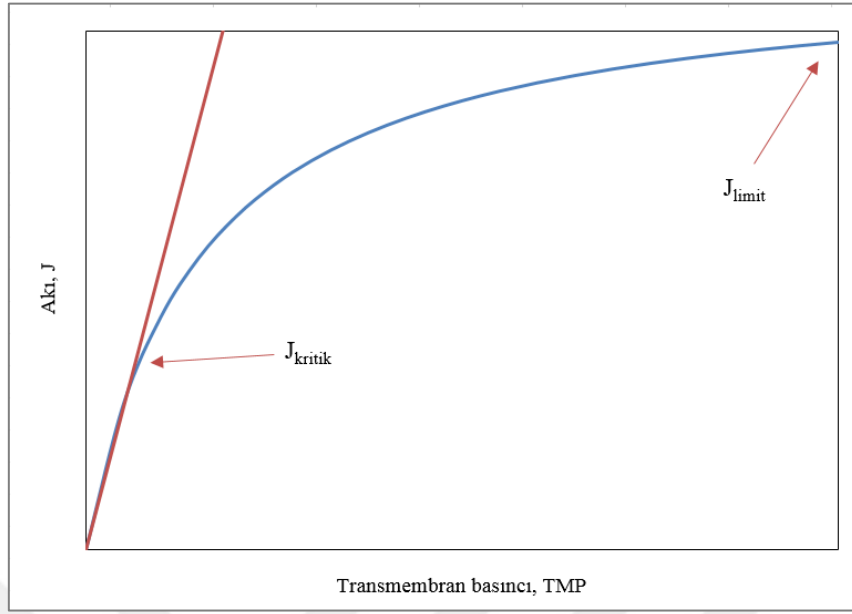
Birim zamanda membranın aktif yüzeyinden geçen süzüntü akımdaki hacim miktarı akıyı ifade etmektedir. Akı değerini belirlemek için “Eş. 3.1” göre belirlenmiştir.

$$J = \frac{V_s}{A \times (t_2 - t_1)} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte; J akı değerini (L/m²·saat), V_s t₂ (saat) zamanı ile t₁ (saat) zamanı arasında ölçülen süzüntü hacmini (L) ve A ise aktif membran yüzey alanını (m²) ifade etmektedir.

3.2.3. Kritik akı

Akı, membran filtrasyonundaki en önemli işletme parametresidir. Sürdürülebilir bir akı değerinin sağlanması için tıkanmanın en az olduğu kritik akı değerinin bilinmesi çok önemlidir. Kritik akı değerinin üzerindeki akı değerlerinde işletilen membranlar daha çabuk ve daha fazla tıkanma eğilimi göstermektedir. Kritik akı değerinin hesaplanması için birçok farklı yöntem önerilmektedir. Bu çalışmada kritik akı değerini belirlemek için öncelikle limit akı değerinin ölçülmesi gerekmektedir. Transmembran basıncına bağlı olarak zamana göre dengeye gelen maksimum akı değeri limit akı olarak ifade edilmektedir (Tiranuntakul ve ark., 2011). Kritik akı değeri ise, TMP-akı grafiğinde doğrusallığın bozulduğu noktaya ve limit akı değerinin yaklaşık olarak 2/3’ü oranına denk gelmektedir (Bacchin, 2004). Şekil 3.8’de transmembran basıncı, limit ve kritik akı ilişkisine yer verilmiştir (Bacchin, 2004).



Şekil 3.8. Kritik ve limit akının transmembran basıncına göre gösterimi.

3.2.4. Konsantrasyon faktörü, hacimsel azalma faktörü ve mikroalg kazanım oranı

Mikroalg hasat işleminde membranların verimini belirlemek için aşağıdaki gösterilen “Eş. 3.2”, “Eş. 3.3”, ve “Eş. 3.4” kullanılarak konsantrasyon faktörü (Chen ve ark., 2012), hacimsel azalma faktörü (Rossi ve ark., 2004) ve mikroalg kazanım oranı (Hwang ve ark., 2015) hesaplanmıştır.

$$\text{Konsantrasyon faktörü (KF)} = \frac{C_t}{C_0} \quad (3.2)$$

$$\text{Hacimsel azalma faktörü (HAF)} = \frac{V_0}{V_f} \quad (3.3)$$

$$\text{Mikroalg kazanım oranı} = 1 - \frac{OY_{680 \text{ süzüntü}}}{OY_{680 \text{ besleme}}} \times 100 \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, C_f t anındaki mikroalg konsantrasyonu (g/L), C_0 başlangıçtaki mikroalg konsantrasyonu (g/L), V_0 başlangıçtaki mikroalg kültür hacmi (L), V_f nihai mikroalg kültür hacmi (L), $OY_{680 \text{ süzüntü}}$ süzüntünün 680 nm dalga boyundaki optik yoğunluğu, $OY_{680 \text{ besleme}}$ başlangıçtaki mikroalg kültürün 680 nm dalga boyundaki optik yoğunluğu ifade etmektedir.

3.2.5. Normalize akı

Başlangıç akısının zamana göre orantısal olarak değişimini ifade etmektedir. Aşağıda yer verilen “Eş. 3.5” ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Normalize akı} = \frac{J_t}{J_{m(0)}} \times 100 \quad (3.5)$$

Eşitlikte, J_t t anındaki akı ($L/m^2 \cdot \text{saat}$) miktarını ve $J_{m(0)}$ mikroalg filtrasyonunun başlangıcındaki akı ($L/m^2 \cdot \text{saat}$) miktarını ifade etmektedir.

3.2.6. Filtrasyon direnci

Filtrasyon direnci, transmembran basıncı ve süzüntü akısına bağlı olarak membranın ve membran yüzeyindeki kek tabakasının filtrasyona karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Mikroalg filtrasyon işleminden sonra “Eş. 3.6” ile toplam filtrasyon direnci hesaplanmaktadır.

$$J = \frac{TMP}{R_{Top} \times \mu_T} \quad (3.6)$$

Burada; TMP transmembran basıncını (Pa), R_{Top} toplam filtrasyon direncini ($1/m$) ve μ_T viskoziteyi ($Pa \cdot s$) ifade etmektedir. Toplam filtrasyon direnci, membran iç direnci, kek tabakasının direnci ve gözeneklerin tıkanması sonucu oluşan tıkanma direncinin toplamını ifade etmektedir ve aşağıdaki “Eş. 3.7” ile hesaplanmaktadır.

$$R_{Top} = R_M + R_K + R_T \quad (3.7)$$

Eşitlikte, R_{Top} toplam filtrasyon direnci ($1/m$), R_M membran iç direnci ($1/m$), R_K kek tabaka direnci ve R_T tıkanma direnci olarak gösterilmiştir. Filtrasyon işlemine başlamadan önce membranların saf su akısı 60 dakika boyunca ölçülerek elde edilen değer J_0 olarak adlandırılmıştır. Mikroalg filtrasyonuna başlamadan önce her membranın saf su akısı ölçülerek membran iç direnci (R_M) belirlenmiştir. Daha sonra mikroalg filtrasyonu yapılarak toplam filtrasyon direnci (R_{Top}) hesaplanmıştır. Ardından membran yüzeyindeki kek tabakası basınçlı su ile temizlendikten sonra saf su ile tekrar filtrasyon işlemi yapılarak membran iç direnci ve tıkanma direnci ($R_M + R_T$)

belirlenmiştir. “Eş. 3.8”, “ Eş. 3.9” ve “Eş. 3.10” ile bu çalışmada hesaplanan filtrasyon dirençlerine yer verilmiştir.

$$R_M = \frac{TMP}{J_0 \times \mu_T} \quad (3.8)$$

$$R_T = \frac{TMP}{J_s \times \mu_T} - R_M \quad (3.9)$$

$$R_K = \frac{TMP}{J_m \times \mu_T} - R_M - R_T \quad (3.10)$$

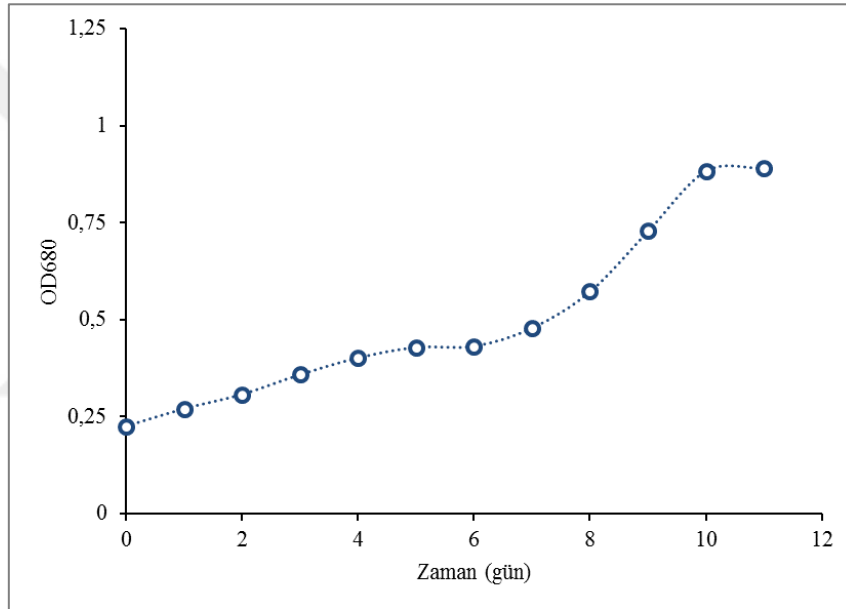
Yukarıdaki eşitliklerde, J_0 saf su akısı, J_s kek tabakası giderildikten sonraki saf su akısı, J_m dengedeki mikroalg akısı olarak ifade edilmektedir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Mikroalgal Biyokütle Üretimi

Çalışmada düz panel tipi fotobiyoreaktörde TAP besi ortamına, 100 μmol foton/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ışık akısında ve 16:8 aydınlık karanlık oranında beyaz ışık verilerek 25 ± 1 °C sıcaklıkta *Gloeocystis vesiculosa* 901 mikroalg türü yetiştirilmiştir. Günlük olarak ölçülen optik yoğunluk değerlerine ait büyüme grafiğine Şekil 4.1’de yer verilmiştir.



Şekil 4.1. Mikroalglerin optik yoğunluk değişimi.

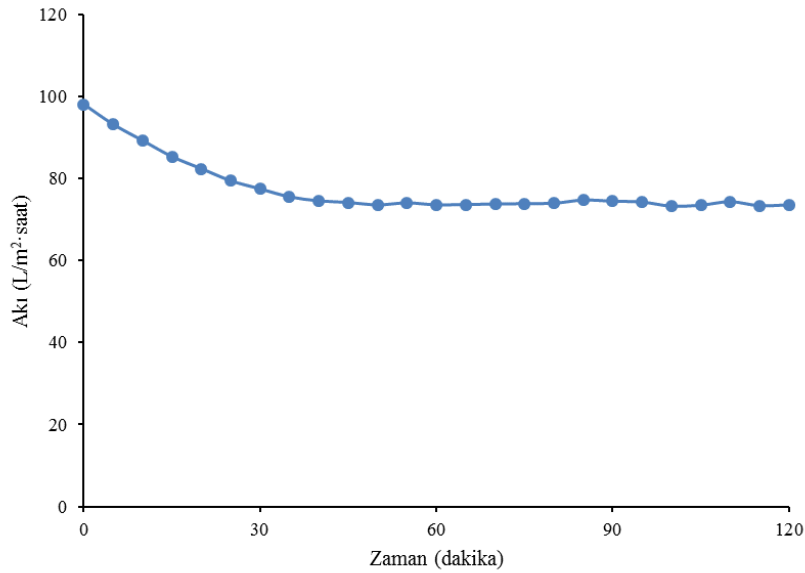
6. güne kadar oldukça yavaş büyüme gösteren mikroalg kültürünün 7 ve 10. gün arasında hızla artarak 10. gün sonunda durgun fazla ulaştığı gözlemlenmiştir. 11. gün itibariyle mikroalgler reaktörden alınarak hasat işlemi için biriktirilmiştir.

4.2. Membran ile Hasat Çalışmaları

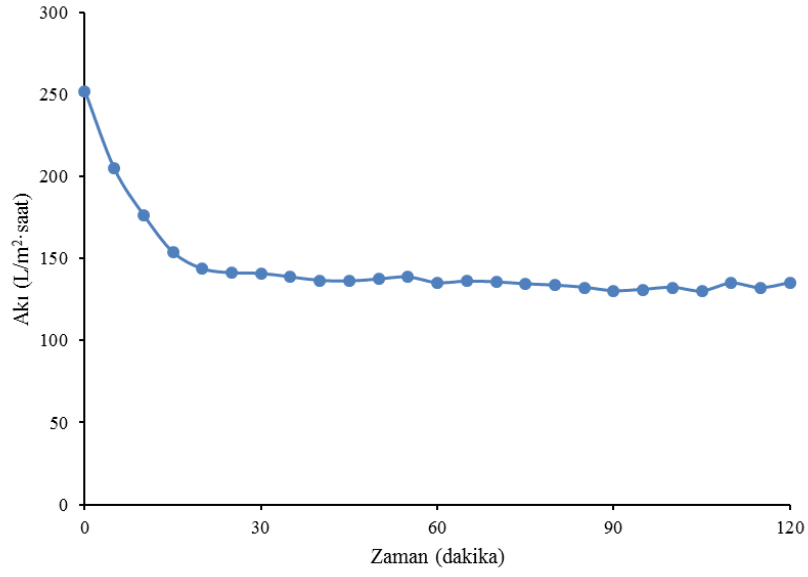
Hasatlama işlemi için toplanan mikroalgler; filtrasyon işlemi için yaklaşık olarak 0,7 g/L biyokütle konsantrasyonuna ayarlanmıştır.

4.2.1. Transmembran basıncının süzöntü akısı üzerine etkisi

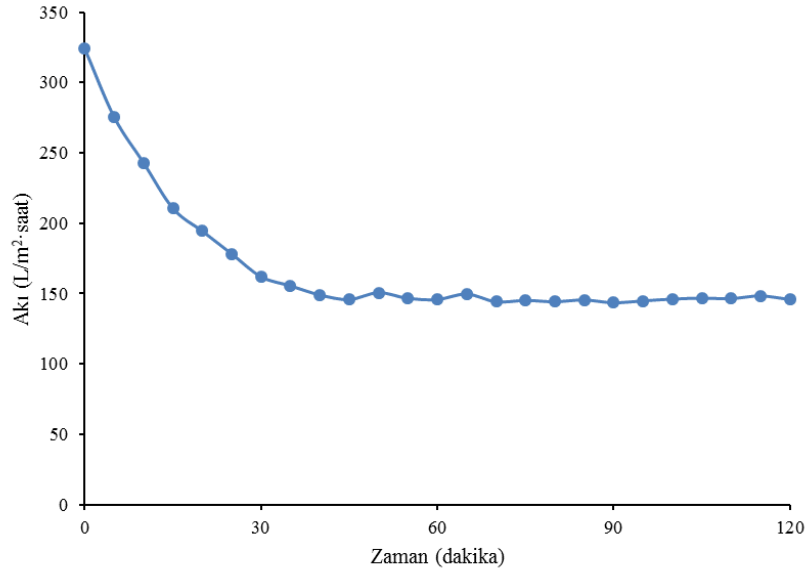
Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te sırasıyla 0,3 bar, 0,8 bar, 1,3 bar ve 1,8 bar transmembran basınçlarında işletilen mikrofiltrasyon tipindeki membrana ait akı değerlerine yer verilmiştir. 0,3 bar transmembran basıncında 120 dakika boyunca gerçekleştirilen filtrasyon işlemi sonucunda süzöntü akısı $98 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ 'ten $73,50 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ değerine düşmüştür. Yaklaşık olarak %25 oranında akı düşüşü gözlemlenmiştir. 0,8 bar transmembran basıncında yapılan filtrasyon sonucunda ise başlangıç akısına göre %46,40 oranında bir düşüş meydana gelerek kararlı akı $135,07 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ olarak hesaplanmıştır. 1,3 bar transmembran basıncında başlangıç akısı $324 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ iken deney süresi sonunda %55 oranında düşerek $145,80 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ değerine ulaşmıştır. 1,8 bar transmembran basıncında ise $411 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ başlangıç akısı %64,70 oranında azalarak $145,08 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$ olarak ölçülmüştür. Mikrofiltrasyon tipindeki membranda gerçekleştirilen filtrasyon denemelerinde genellikle 30. dakikadan sonra akı değeri kararlı bir hal almaktadır.



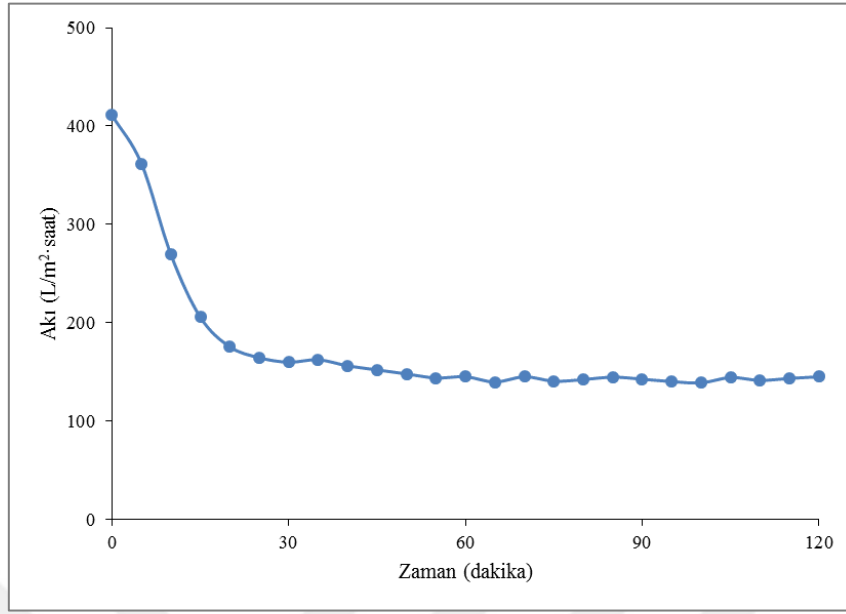
Şekil 4.2. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 0,3 bar, T = 25 °C, J = $98 \text{ L/m}^2\cdot\text{saat}$).



Şekil 4.3. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 0,8 bar, T = 25 °C, J = 252 L/m²·saat).

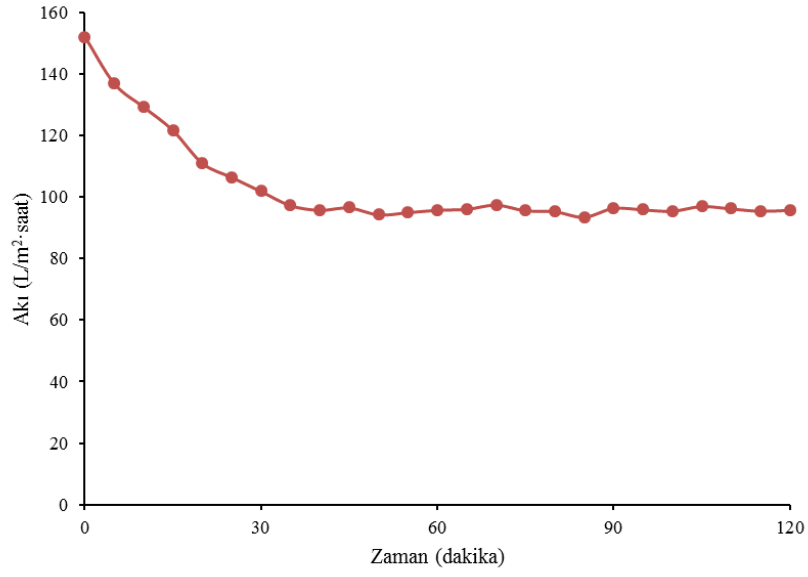


Şekil 4.4. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,3 bar, T = 25 °C, J = 324 L/m²·saat).

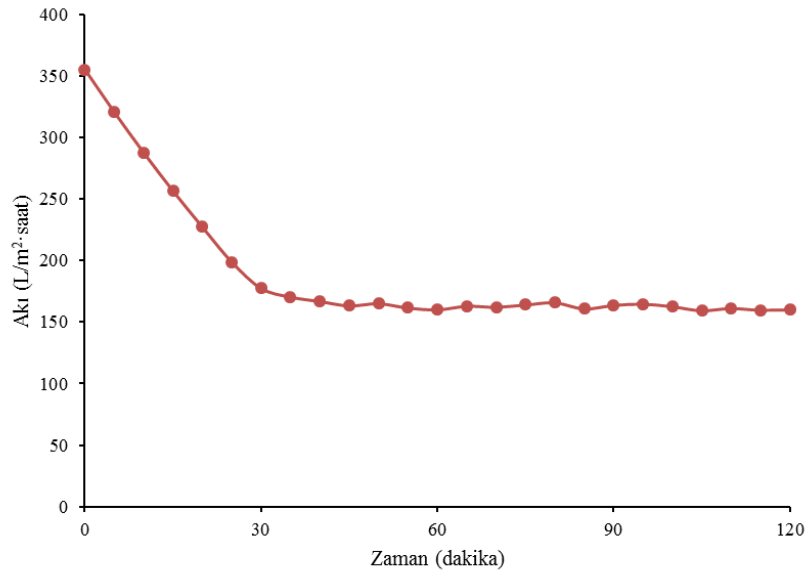


Şekil 4.5. Mikrofiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C, J = 411 L/m²·saat).

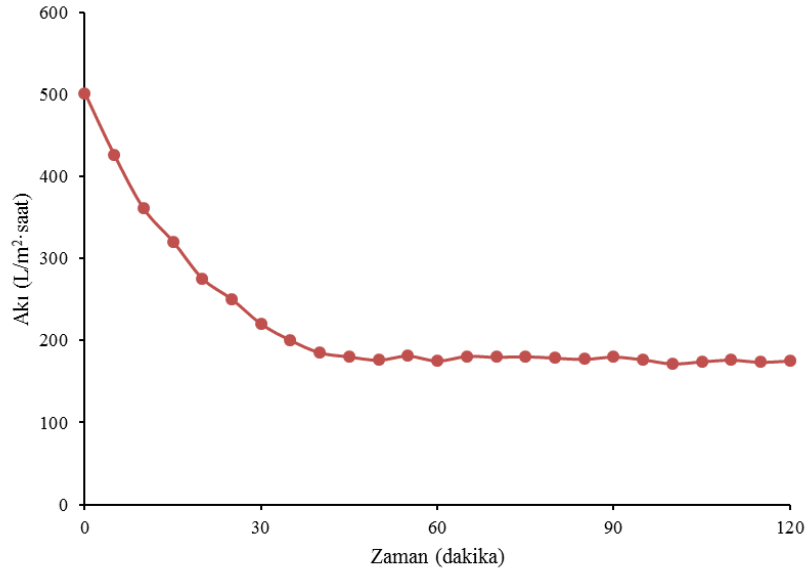
Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sırasıyla 0,6 bar, 1,2 bar, 1,8 bar ve 2,4 bar transmembran basınçlarında işletilen ultrafiltrasyon tipindeki membrana ait akı değerlerine yer verilmiştir. 0,6 bar transmembran basıncında 120 dakika boyunca gerçekleştirilen filtrasyon işlemi sonucunda süzüntü akısı 152 L/m²·saat’ten 95,76 L/m²·saat değerine düşmüştür. Yaklaşık olarak %37 oranında akı düşüşü gözlemlenmiştir. 1,2 bar transmembran basıncında yapılan filtrasyon sonucunda ise kararlı akı başlangıç akısına göre %54,9 oranında azalarak 160,11 L/m²·saat olarak hesaplanmıştır. 1,8 bar transmembran basıncında başlangıç akısı 501 L/m²·saat iken deney süresi sonunda yaklaşık olarak %65 oranında düşerek 175,35 L/m²·saat değerine ulaşmıştır. 2,4 bar transmembran basıncında ise 802 L/m²·saat başlangıç akısı %77,90 oranında azalarak 177,24 L/m²·saat olarak ölçülmüştür. Ultrafiltrasyon tipindeki membranda gerçekleştirilen filtrasyon denemelerinde akı değerinin çoğunlukla 60. dakikadan sonra kararlı bir hal aldığı görülmektedir.



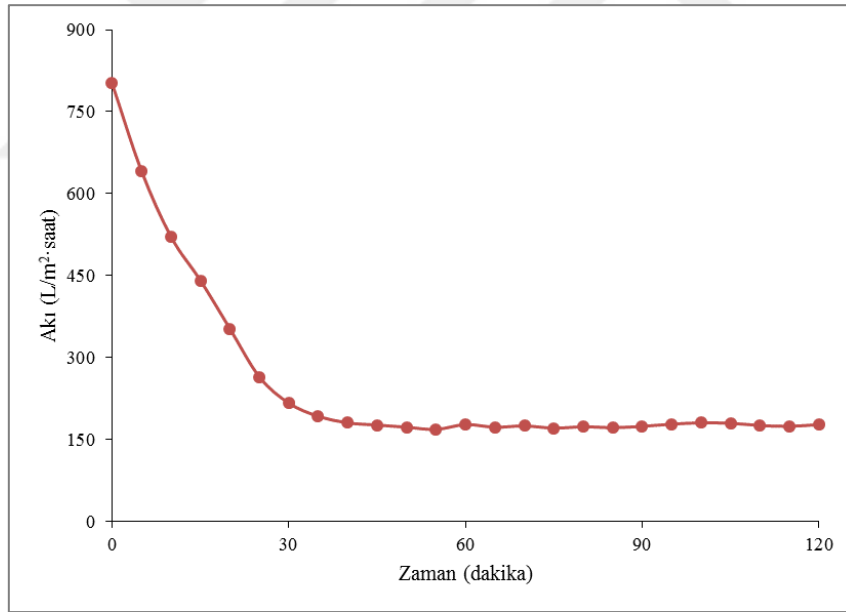
Şekil 4.6. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 0,6 bar, T = 25 °C, J = 152 L/m²·saat).



Şekil 4.7. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,2 bar, T = 25 °C, J = 355 L/m²·saat).



Şekil 4.8. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C, J = 501 L/m²·saat).



Şekil 4.9. Ultrafiltrasyon membran akı – zaman grafiği (TMP = 2,4 bar, T = 25 °C, J = 802 L/m²·saat).

Chlamydomonas sp. türü ile çapraz-akış membran düzeneğinde MF ve UF tipi membranlar kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada 40. dakikada ulaşılan kararlı akı değerinin başlangıç akısına göre MF tipi membranda %12-60, UF tipi membranda ise %8-58 arasında azaldığı gözlemlenmiştir (Susanto ve ark., 2017). *Chlorella vulgaris*

türü ile yapılan bir başka çapraz akış filtrasyon çalışmasında MF tipi membran ile 1,6 bar TMP'de 30 dakika sonundaki kararlı akı değeri $140 \text{ L/m}^2 \cdot \text{saat}$ olarak hesaplanmıştır. UF tipindeki membranda ise $280 \text{ L/m}^2 \cdot \text{saat}$ akı değerine kadar ulaşıldığı kaydedilmiştir (Elcik ve Cakmakci, 2017).

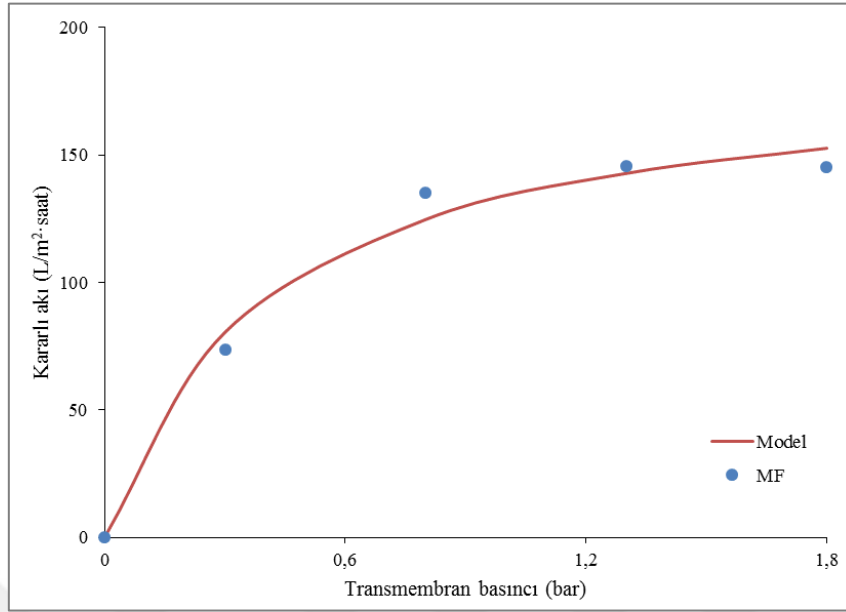
Zamana göre akı değişimi incelendiğinde filtrasyonun ilk aşamalarında süzüntü akının hızlıca değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, mikroalg hücrelerinin hızlı bir şekilde membran gözeneklerini tıkaması olarak açıklanabilir. Filtrasyon işleminin ilerleyen aşamalarında ise kararlı bir akı değeri oluşmakta ve çok daha yavaş bir hızla azalmaktadır. Bu yavaş azalma durumu ise membran yüzeyinde oluşan kek tabakasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu kek tabakası ikinci bir membran gibi davranarak süzüntünün azalmasına neden olmaktadır.

Her iki membran için transmembran basıncının akı üzerindeki etkisi incelendiğinde MF membranda UF membrana göre tıkanmanın daha çabuk gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumun ana sebebi ise mikrofiltrasyon membranlarının gözenek çaplarının ultrafiltrasyon membranlarına göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Filtrasyon işleminin başlangıcında büyük gözenekler mikroalg hücreleri tarafından tıkanarak süzüntü akısının azalmasına neden olmaktadır.

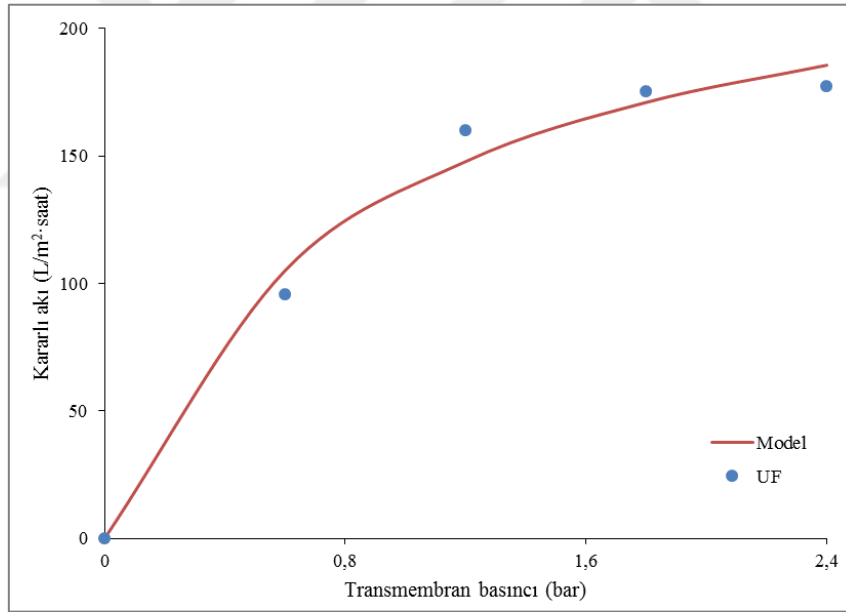
4.2.2. Kritik akı ve işletme basıncının belirlenmesi

Kritik akı değerinin bilinmesi, tersinmez tıkanma hızının azaltılarak membranın kullanım süresinin arttırılmasına imkân vermektedir. Bununla birlikte tıkanma miktarının azalması süzüntü akısındaki azalmanın da minimuma düşürülmesini sağlamaktadır. Ayrıca yüksek işletme basıncından kaynaklanan enerji maliyeti azaltılacaktır ve yüksek basınç altında işletilen membranın daha çabuk tıkanması önlenerek membran ömrünün uzatılması hedeflenmektedir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sırasıyla mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon membranları için kararlı haldeki akı ve transmembran basınçları gösterilmektedir.



Şekil 4.10. MF membranda kararlı akı ve transmembran basınçları.



Şekil 4.11. UF membranda kararlı akı ve transmembran basınçları.

Kararlı akı değerleri ile transmembran basıncı arasındaki ilişki, aşağıdaki fonksiyon ($f(x)$) kullanılarak modellenmiştir. Hiperbolik regresyon analizine göre elde edilen A, B ve regresyon katsayısına (R^2) ait değerlere Çizelge 4.1 'de yer verilmiştir.

$$f(x) = \frac{A \times x}{B + x} \quad (11)$$

Çizelge 4.1. Membranların akı ve basınç değerleri için uygulanan fonksiyona ait sabitler

Membran tipi	A	B	R ²
Mikrofiltrasyon	186,095	0,394	0,986
Ultrafiltrasyon	249,350	0,824	0,985

Model tarafından hesaplanan değerler ile deneysel olarak elde edilen değerlerin arasındaki ilişkiyi gösteren determinasyon katsayıları (R²) her iki membran için %98'in üzerinde bulunmuştur. Mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipi membranlarda limit akı değerleri sırasıyla 152,68 L/m²·saat ve 185,64 L/m²·saat olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak kritik akı değerleri MF için 101,79 L/m²·saat, UF için ise 123,76 L/m²·saat olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.2'de kritik akı ve tahmini basınç değerleri gösterilmektedir. Membranlar için belirlenen kritik akı değerlerinde filtrasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için sisteme uygulanması gereken tahmini işletme basıncı yukarıda belirtilen fonksiyon kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Kritik akı ve tahmini basınç değerleri

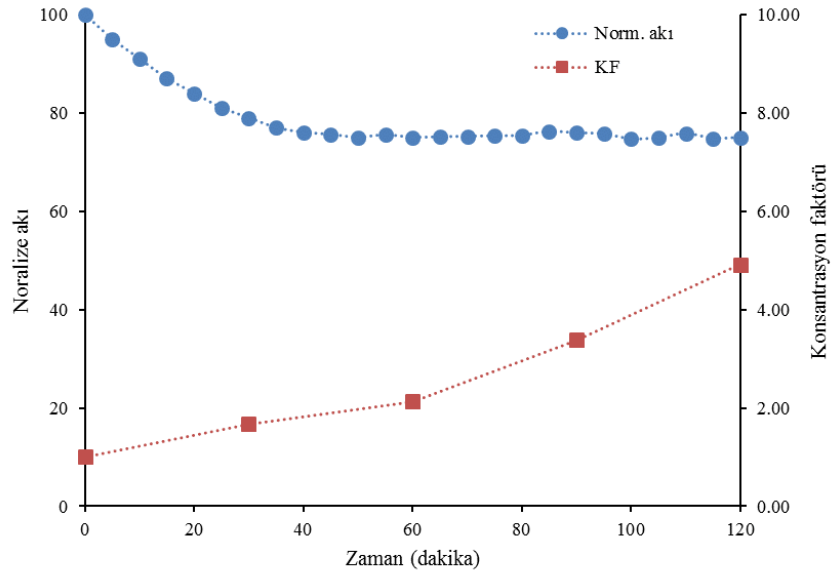
Membran tipi	Kritik akı (L/m ² ·saat)	Tahmini basınç (bar)
Mikrofiltrasyon	101,79	0,47
Ultrafiltrasyon	123,76	0,78

Arthrospira platensis ile UF tipinde yapılan çapraz-akış filtrasyon çalışmasında 80 L/m²·saat kritik akı değeri elde edilmiştir (Rossi ve ark., 2008). Çapraz-akış membran düzeneği kullanılarak ve *Chlorella vulgaris* türü ile yapılan bir çalışmada MF tipi için 118 L/m²·saat ve UF tipi için 170 L/m²·saat kritik akı değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir (Elcik ve Cakmakci, 2017).

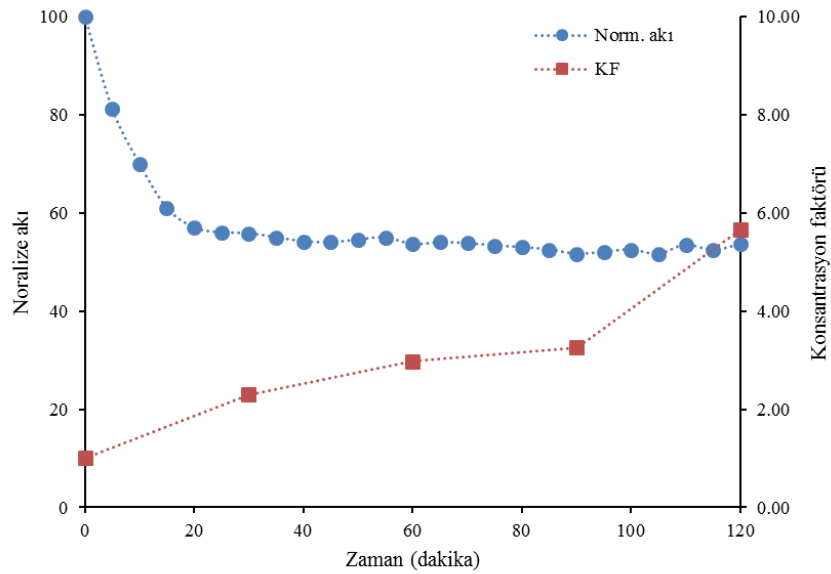
4.2.3. Konsantrasyon faktörü ve hacimsel azalma faktörü

Filtrasyon işleminin mikroalg hasat verimlerini belirlemek için konsantrasyon faktörü, hacimsel azalma faktörü ve mikroalg kazanımı parametreleri incelenmiştir. Konsantrasyon faktörü ve hacimsel azalma faktörü değerleri akı miktarı ve zaman ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek akı ve uzun zaman sonucunda bu iki parametrenin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sırasıyla 0,3 bar, 0,8 bar, 1,3 bar ve 1,8 bar transmembran basıncında işletilen mikrofiltrasyon tipindeki membrana ait normalize akı ve konsantrasyon faktörünün zamana karşı değişimi

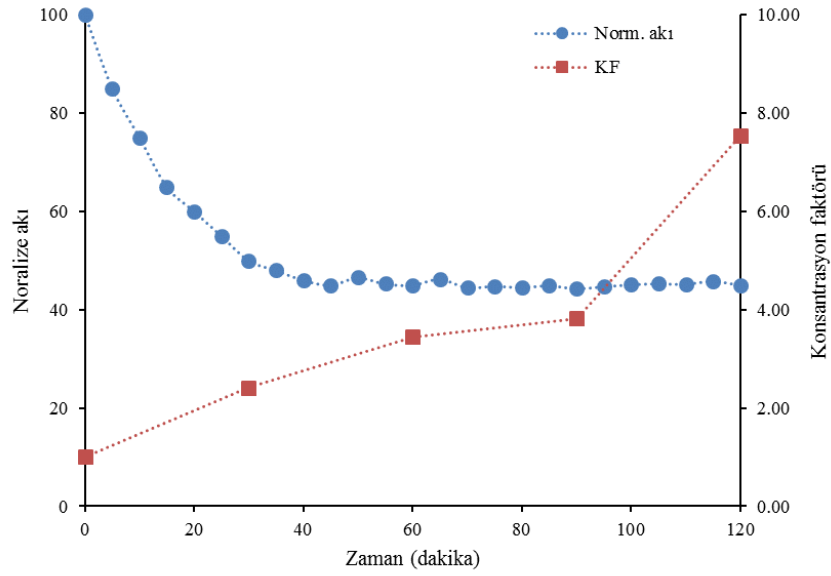
gösterilmiştir. Mikrofiltrasyon işlemi sonunda 0,3 bar, 0,8 bar, 1,3 bar ve 1,8 bar transmembran basıncında konsantrasyon faktörü sırasıyla 4,92; 5,66; 7,53 ve 9,36 olarak hesaplanmıştır. Normalize akı değişimi ise sırasıyla %75,00; %53,60; %45,00 ve %35,30 olarak ölçülmüştür.



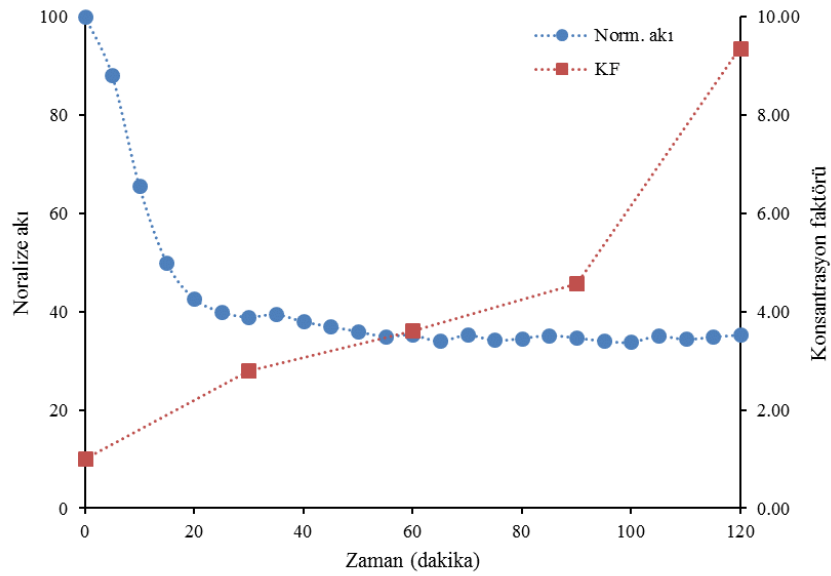
Şekil 4.12. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 0,3 bar, T = 25 °C).



Şekil 4.13. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 0,8 bar, T = 25 °C).



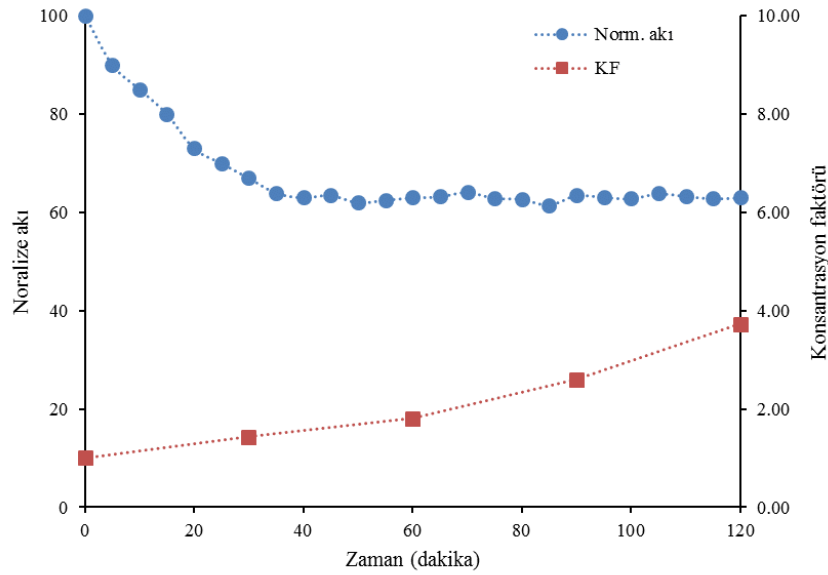
Şekil 4.14. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,3 bar, T = 25 °C).



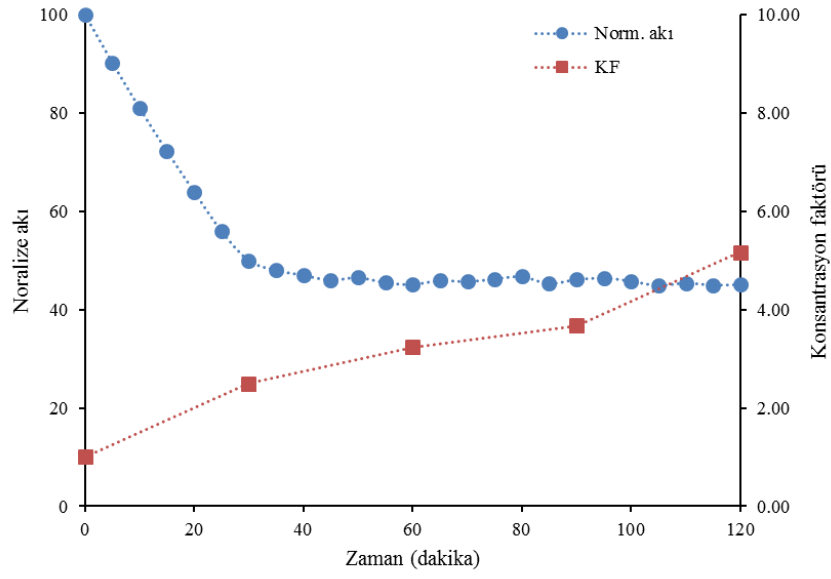
Şekil 4.15. Mikrofiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C).

Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da sırasıyla 0,6 bar, 1,2 bar, 1,8 bar ve 2,4 bar transmembran basıncında işletilen ultrafiltrasyon tipindeki membranın normalize akı ve konsantrasyon faktörünün zamana karşı değişimi görülmektedir. Filtrasyon işlemi 0,6 bar, 1,2 bar, 1,8 bar ve 2,4 bar transmembran basıncı için

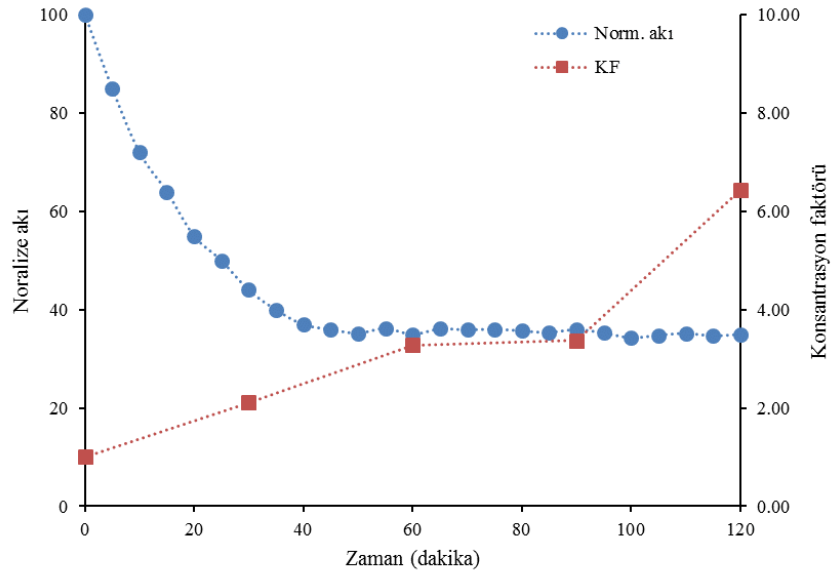
konsantrasyon faktörü sırasıyla 3,72; 5,17; 6,42 ve 8,15 olarak hesaplanmıştır. Normalize akı değişimi ise sırasıyla %63,00; %45,10; %35,00 ve %22,10 olarak ölçülmüştür. *Chlorella sp.* türü ile yapılan bir çalışmada 1,6 g/L başlangıç mikroorganizma konsantrasyonunda ve 17-119 L/m²·saat akı aralığında 25-77 kat arasında konsantrasyon farkı değerleri elde edilmiştir (Hwang ve ark., 2013). *Scenedesmus quadricauda* türü ile çapraz-akış filtrasyon düzeneğinde ortalama 45,5 akıda 150 kat konsantrasyon faktörü elde edildiği bildirilmiştir (Zhang ve ark., 2010). *Scenedesmus sp.* ile yapılan bir çalışmada ise 40 L/m²·saat akıda yaklaşık 5,4 kat konsantrasyon faktörüne ulaşılmıştır (Chen ve ark., 2012).



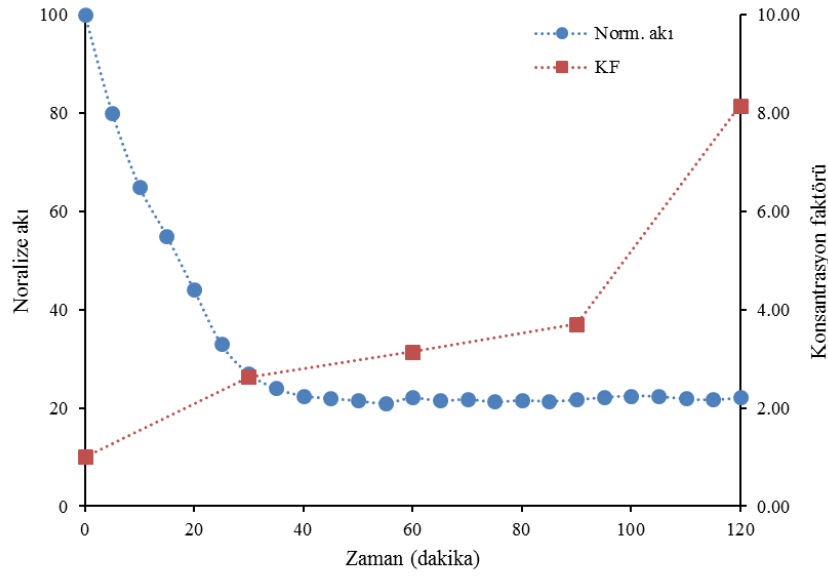
Şekil 4.16. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 0,6 bar, T = 25 °C).



Şekil 4.17. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,2 bar, T = 25 °C)

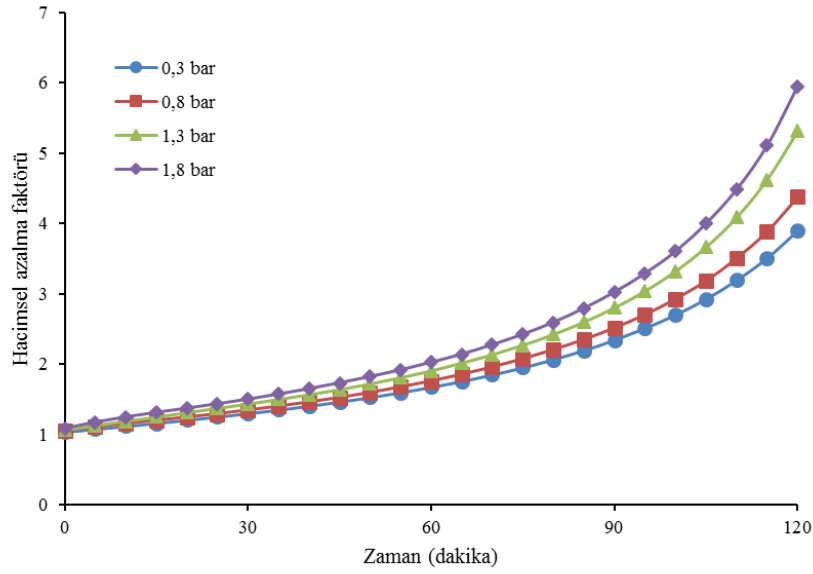


Şekil 4.18. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 1,8 bar, T = 25 °C).

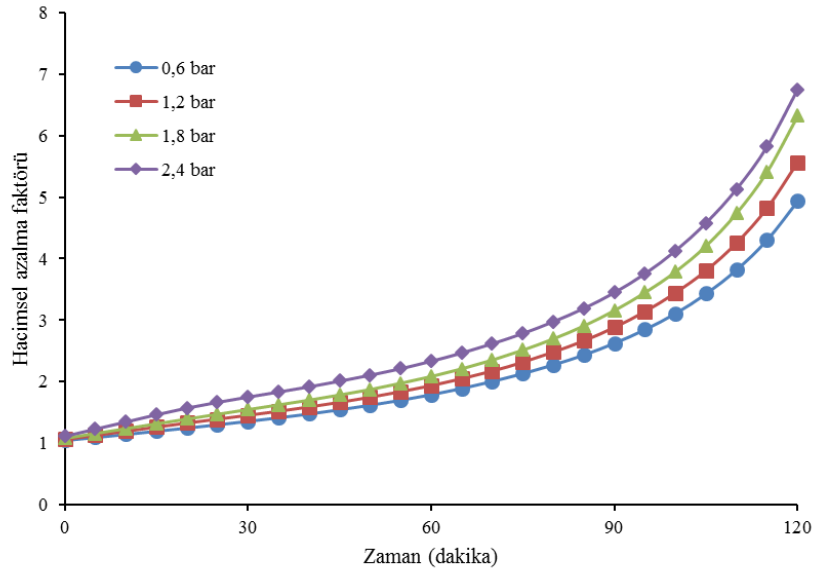


Şekil 4.19. Ultrafiltrasyon membran normalize akı ve konsantrasyon faktörü (TMP = 2,4 bar, T = 25 °C).

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de sırasıyla mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipindeki membranlara ait farklı transmembran basınçlarındaki hacimsel azalma faktörünün zamana karşı değişimine yer verilmektedir. Mikrofiltrasyon tipi membran ile 0,3; 0,8; 1,3 ve 1,8 bar transmembran basıncında gerçekleştirilen deneyler sonucunda hacimsel azalma faktörü sırasıyla 3,90; 4,38; 5,31 ve 5,95 olarak hesaplanmıştır. 0,6; 1,2; 1,8 ve 2,4 bar transmembran basıncında yapılan ultrafiltrasyon işlemi sonucunda ise hacimsel azalma faktörü sırasıyla 4,94; 5,57; 6,32 ve 6,75 olarak belirlenmiştir. Membranların hasat performansı incelendiğinde hasat işleminin sonlarına doğru besleme hacminin azalmasına bağlı olarak konsantrasyon faktörünün hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20. Mikrofiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki hacimsel azalma faktörü.



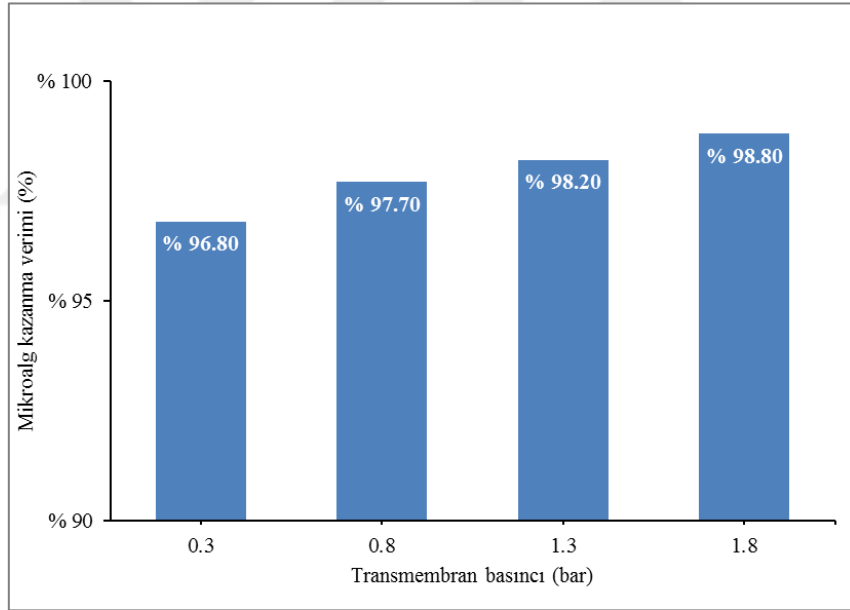
Şekil 4.21. Ultrafiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki hacimsel azalma faktörü.

Arthrospira platensis türü kullanılarak çapraz-akış membran düzeneğinde yapılan bir çalışmada 35-55 akıda 5-10 hacimsel azalma faktörü elde edilmiştir (Rossi ve ark., 2004). *Scenedesmus sp.* türü ile yapılan bir çalışmada ise yaklaşık 10 kat hacimsel azalma faktörü değeri elde edildiği bildirilmiştir (Chen ve ark., 2012). Hwang

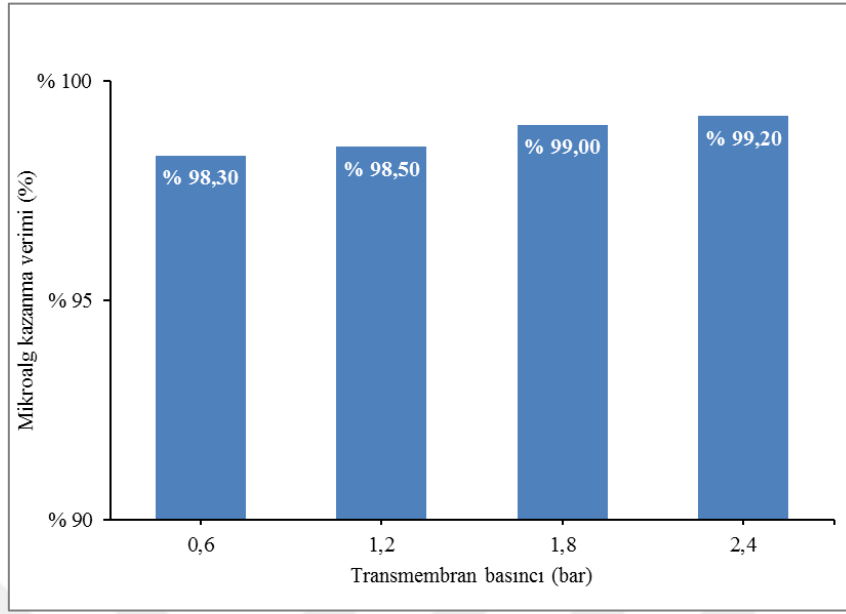
ve ark. tarafından 2013 yılında yapılan bir çalışmada çapraz akış düzeneğinde ve *Chlorella sp.* türü ile 1,6 g/L başlangıç mikroalg konsantrasyonunda 78 kata kadar hacimsel azalma faktörüne ulaşıldığı bildirilmiştir.

4.2.4. Mikroalg kazanım verimi

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te sırasıyla mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipindeki membranın filtrasyon işlemi sonundaki mikroalg kazanım oranları ve biyokütle konsantrasyonundaki artış oranları gösterilmektedir. Filtrasyon işlemi sonucunda mikroalg kazanımı mikrofiltrasyon için en yüksek 1,8 bar %98,8 ve en düşük 0,3 bar %96,8 iken ultrafiltrasyon için en yüksek 2,4 bar %99,2 ve en düşük 0,6 bar %98,3 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.22. Mikrofiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki mikroalg kazanım verimi.



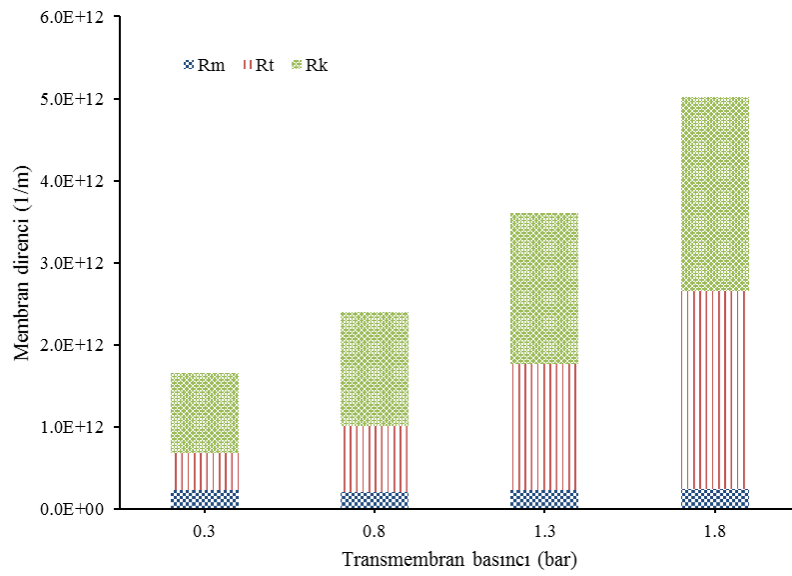
Şekil 4.23. Ultrafiltrasyon membranının farklı transmembran basınçlarındaki mikroalg kazanım verimi.

Susanto ve ark. tarafından 2017 yılında *Chlamydomonas sp.* ile çapraz-akış düzeneğinde MF ve UF tipinde membranlar kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada sırasıyla %86,8-91,1 ve %99 mikroalg kazanım verimleri elde edilmiştir. Mikroalg türü ve başlangıç konsantrasyonu, kullanılan membran materyali, transmembran basıncı, akış hızı ve akı başta olmak üzere mikroalg kazanım veriminde birçok parametre etkili olmaktadır (Susanto ve ark., 2017). *Chlorella vulgaris* ile yapılan başka bir çalışmada ise mikroalg kazanımının %100'e kadar ulaşıldığı bildirilmiştir (Elcik ve Cakmakci, 2017). *Scenedesmus acuminatus* türü ile yapılan bir çalışmada ise UF tipi membran ile yaklaşık %93 mikroalg kazanım verimi elde edilmiştir (Wang ve ark., 2019).

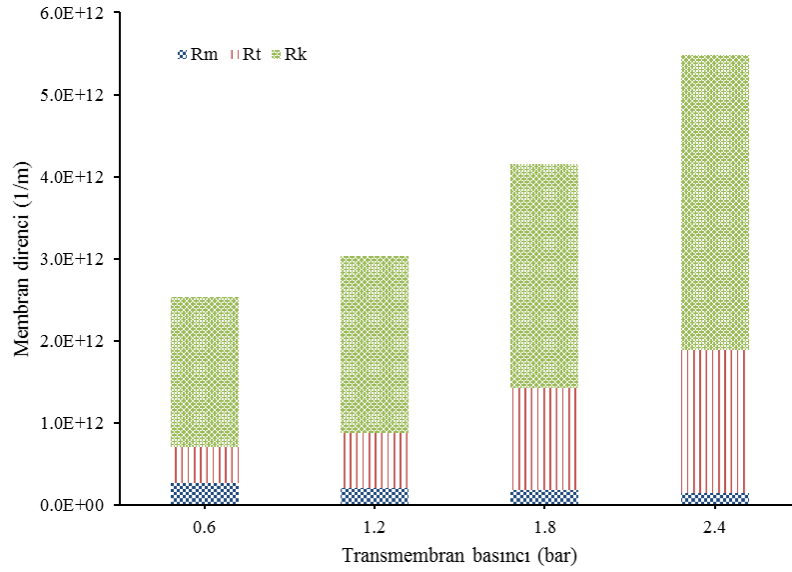
4.2.5. Filtrasyon direnci

Çapraz-akış membran filtrasyonunda akı azalmasının ve tıkanmanın nedenlerini anlayabilmek için membranların mikroalg filtrasyonu esnasında gösterdikleri direnç mekanizmalarının daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Membran filtrasyon direncini tanımlamak için genellikle üç temel direnç mekanizmadan söz edilmektedir. Bunlar, membran iç direnci (R_M), membran gözeneklerinin tıkanması (R_T) ve membran yüzeyinde kek oluşumu (R_K) olarak sıralanabilir. Bu mekanizmalar, membran

yüzeyindeki filtrasyon direncinin artmasına neden olmaktadır. Membrandan kaynaklanan iç direnç membranların saf sudaki dirençleri olduğu için ihmal edilecek kadar küçük değerlerdir. Ancak kek tabakası ve gözenek tıkanması toplam tıkanmanın büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Kek tabakası temizlenerek membranların ömürlerini uzatmak mümkün olsa da gözenek tıkanmasındaki artış çoğu zaman kalıcı tıkanmayı işaret etmektedir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te sırasıyla mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipindeki membranlara ait filtrasyon direnç profillerine yer verilmiştir.



Şekil 4.24. Mikrofiltrasyon membran direnci.



Şekil 4.25. Ultrafiltrasyon membran direnci.

Toplam membran direnci MF için 0,3; 0,8; 1,3 ve 1,8 bar TMP’de sırasıyla $1,65 \times 10^{12}$; $2,40 \times 10^{12}$; $3,61 \times 10^{12}$ ve $5,02 \times 10^{12}$ 1/m; UF için 0,6; 1,2; 1,8 ve 2,4 bar TMP’de sırasıyla $2,53 \times 10^{12}$; $3,03 \times 10^{12}$; $4,15 \times 10^{12}$ ve $5,48 \times 10^{12}$ 1/m olarak ölçülmüştür. Mikrofiltrasyon tipi membranda kek direnci 0,3; 0,8; 1,3 ve 1,8 bar TMP için sırasıyla $9,76 \times 10^{11}$; $1,38 \times 10^{12}$; $1,84 \times 10^{12}$ ve $2,37 \times 10^{12}$ 1/m olurken toplam direnç içindeki oranı sırasıyla %59,09; %57,80; %51,06 ve %47,17 olarak hesaplanmıştır. Ultrafiltrasyon tipi membranda ise kek direnci 0,6; 1,2; 1,8 ve 2,4 bar TMP için sırasıyla $1,82 \times 10^{12}$; $2,15 \times 10^{12}$; $2,72 \times 10^{12}$ ve $3,59 \times 10^{12}$ 1/m olarak hesaplanmıştır. Toplam dirence göre oranı ise sırasıyla %72,00; %71,05; %65,60 ve %65,51 olarak bulunmuştur. İki membran için kek direnci transmembran basıncı ile birlikte artarken toplam direnç içerisindeki oranının azaldığı görülmektedir.

Chlamydomonas sp. türü ile 0.22 μm gözenek çapına MF membran kullanılarak yapılan bir çalışmada toplam direncin başlangıç direncine ($4,0 \times 10^{10}$ 1/m) göre 100 kata kadar arttığı ($5,1 \times 10^{12}$ 1/m) ve yıkama işleminden sonra membran direncinin yaklaşık %80 oranında düştüğü bildirilmiştir. Bu durum, membran üzerinde veya muhtemelen membran içinde biriken birincil kirleticinin nispeten küçük bir kısmının basit hidrokinamik bir temizleme aşaması ile gidebildiğini göstermiştir (Rickman ve ark., 2012).

Her iki membran incelendiğinde mikrofiltrasyon tipindekinde membranda daha az direnç meydana gelmesine rağmen kalıcı tıkanmanın işareti olan gözenek tıkanma direnci ultrafiltrasyon tipindeki membrana göre daha yüksektir. En yüksek gözenek tıkanma direnci, mikrofiltrasyon için 1,8 bar TMP'de $2,41 \times 10^{12}$ 1/m iken ultrafiltrasyonda 2,4 bar TMP'de $1,75 \times 10^{12}$ 1/m olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre MF membranların, UF membranlara kıyasla daha düşük bir membran direnci oluşturduğu görülmektedir. Bu durumun muhtemelen hücre dışı salgılanan organik madde ile doğrudan etkileşimde olan zar gözenekleriyle doğrudan ilişkili olduğu raporlanmıştır (Elcik ve Cakmakci, 2017). Benzer şekilde membran ve hücre dışı organik madde arasındaki hidrofobik etkileşimin daha yüksek geri dönüşü olmayan kirlenmeye yol açtığını belirtilmiştir (Qu ve ark., 2014). Büyük gözenek çapına sahip membranlarda mikroalg hücreleri yüzeye daha fazla tutunarak kalıcı tıkanmanın daha hızlı meydana gelmesine neden olmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, öncelikle laboratuvar ortamında tasarlanan düz panel tipi hava kaldırmalı fotobiyoreaktörde *Gloeocystis vesiculosa* 901 mikroalg türü yetiştirilmiştir. Akrilik malzemeden üretilen ve toplam 1,3 L hacme sahip olan reaktör 1 L hacimde işletilmiştir. Reaktörün sıcaklık kontrolünün sağlanması için bir yüzeyi alüminyum levha ile kapatılmıştır. Saydam yüzeyi ise P10 levha tipi RGB LED kullanılarak 100 $\mu\text{mol foton/m}^2\cdot\text{s}$ ışık şiddetinde ve 16:8 saat aydınlık: karanlık oranında beyaz ışık ile aydınlatılmıştır. TAP besisi ortamında işletilen reaktörü havalandırmak için pH kontrolcüsü vasıtasıyla pH değeri sabit tutularak hava ve karbondioksit karışımı kullanılmıştır. Günlük olarak optik yoğunluk ve biyokütle ölçümü yapılarak 11. günün sonunda durgun faza geçtiği anlaşılan mikroalgler; çapraz-akışlı membran filtrasyon düzeneğinde mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon tipindeki ticari membranlar ile hasatlanmıştır. Membran filtrasyonu sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 0,3 bar, 0,8 bar, 1,3 bar ve 1,8 bar transmembran basınçlarında işletilen MF tipindeki membranda en yüksek akı düşüşü 1,8 bar TMP'de %64,70; 0,6 bar, 1,2 bar, 1,8 bar ve 2,4 bar transmembran basınçlarında işletilen UF tipindeki membrana ise 2,4 bar TMP'de %77,90 olarak hesaplanmıştır. Kararlı akı değerleri ise MF tipinde 145,08 $\text{L/m}^2\cdot\text{saat}$ UF tipinde ise 177,24 $\text{L/m}^2\cdot\text{saat}$ olarak ölçülmüştür.
- Farklı transmembran basınçlarında 120 dakika boyunca sürdürülen filtrasyon işleminde düzenli aralıklarla akı değeri ölçülerek kritik akı ve işletme basıncı parametreleri belirlenmiştir. MF tipi membran için kritik akı değeri ve işletme basıncı sırasıyla ve 101,79 $\text{L/m}^2\cdot\text{saat}$ ve 0,47 bar; UF tipi membran için ise 123,76 $\text{L/m}^2\cdot\text{saat}$ ve 0,78 bar olarak bulunmuştur.
- Mikrofiltrasyon işlemi sonunda 0,3 bar, 0,8 bar, 1,3 bar ve 1,8 bar TMP'de konsantrasyon faktörleri sırasıyla 4,92; 5,66; 7,53 ve 9,36 olarak hesaplanmıştır. Normalize akı değişimi ise sırasıyla %75,00; %53,60; %45,00 ve %35,30 olarak ölçülmüştür. UF tipinde ise 0,6 bar, 1,2 bar, 1,8 bar ve 2,4 bar TMP için konsantrasyon faktörü sırasıyla 3,72; 5,17; 6,42 ve 8,15 olarak hesaplanmıştır. Normalize akı değişimi ise sırasıyla %63,00;

%45,10; %35,00 ve %22,10 olarak ölçülmüştür. Mikrofiltrasyon tipi membranda hacimsel azalma faktörü sırasıyla 3,90; 4,38; 5,31 ve 5,95 olarak UF tipinde ise sırasıyla 4,94; 5,57; 6,32 ve 6,75 olarak hesaplanmıştır.

- Filtrasyon işlemi sonucunda mikroalg kazanımı mikrofiltrasyon için en yüksek 1,8 bar %98,8 ve en düşük 0,3 bar %96,8 iken ultrafiltrasyon için en yüksek 2,4 bar %99,2 ve en düşük 0,6 bar %98,3 olarak ölçülmüştür.
- Toplam membran direnci MF için 0,3; 0,8; 1,3 ve 1,8 bar TMP'de sırasıyla $1,65 \times 10^{12}$; $2,40 \times 10^{12}$; $3,61 \times 10^{12}$ ve $5,02 \times 10^{12}$ 1/m; UF için 0,6; 1,2; 1,8 ve 2,4 bar TMP'de sırasıyla $2,53 \times 10^{12}$; $3,03 \times 10^{12}$; $4,15 \times 10^{12}$ ve $5,48 \times 10^{12}$ 1/m olarak hesaplanmıştır. Mikrofiltrasyon tipi membranda kek direnci 0,3; 0,8; 1,3 ve 1,8 bar TMP için sırasıyla $9,76 \times 10^{11}$; $1,38 \times 10^{12}$; $1,84 \times 10^{12}$ ve $2,37 \times 10^{12}$ 1/m olurken toplam direnç içindeki oranı sırasıyla %59,09; %57,80; %51,06 ve %47,17 olarak hesaplanmıştır. Ultrafiltrasyon tipi membranda ise kek direnci 0,6; 1,2; 1,8 ve 2,4 bar TMP için sırasıyla $1,82 \times 10^{12}$; $2,15 \times 10^{12}$; $2,72 \times 10^{12}$ ve $3,59 \times 10^{12}$ 1/m olarak hesaplanmıştır. Toplam dirence göre oranı ise sırasıyla %72,00; %71,05; %65,60 ve %65,51 olarak bulunmuştur. Kek direncinin transmembran basıncı ile birlikte artarken toplam direnç içerisindeki oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

Her iki membran kıyaslandığında MF membranların, UF membranlara göre daha düşük bir membran direnci oluşturduğu görülmüştür. Daha büyük gözenek çapına sahip olan membranlarda mikroalg hücrelerinin membran yüzeyine daha fazla tutunma eğiliminde olduğu ve kalıcı tıkanmanın daha hızlı meydana gelmesine neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Alaçakır F. B., 2001. Ülkemizde elektrik üretimini destekleyen bir çözüm: Güneş pilleri. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*. 4 Aralık 2001, İzmir. 182-185.
- Aslan, M., 2016. *Membran Teknolojileri*, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Çevre Koruma Vakfı. 286.
- Bacchin, P. 2004. Koloidal sistemler için kritik ve sınırlayıcı akış arasında olası bir bağlantı: bir zar boyunca kritik tortu oluşumunun değerlendirilmesi. *Membran Bilimi Dergisi*, **228** (2): 237-241.
- Bayram, A., 2000. Nükleer enerji ve Türkiye 2000. *GAP Çevre Kongresi Bildiriler Kitabı*. Şanlıurfa, 617-624.
- Ben-Amotz, A., 2009. Bio-fuel and CO₂ Capture by micro-algae. *In Wind, Sea and Algae Conference Presentation*. 20-22 April 2009. Maribo, Denmark. 20-22.
- Benoufella, F., Laplanche, A., Boisdon, V. and Bourbigot, M. M., 1994. Elimination of Microcystis cyanobacteria (blue-green algae) by an ozoflotation process: a pilot plant study. *Water Science and Technology*, **30** (8): 245.
- Bilad, M. R., Arafat, H. A. and Vankelecom, I. F., 2014. Membrane technology in microalgae cultivation and harvesting: a review. *Biotechnology Advances*, **32** (7): 1283-1300.
- Bosma, R., van Spronsen, W. A., Tramper, J., and Wijffels, R. H., 2003. Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae. *Journal of Applied Phycology*, **15** (2-3): 143-153.
- Carvalho Ana P, Luís a Meireles ve F Xavier Malcata 2006. Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. *Biotechnology Progress*, **22** (6): 1490– 1506.
- CCALA, 2020. Gloeocystis vesiculosa mikroalg türünün özellikleri ve fotoğrafı. <https://ccala.butbn.cas.cz/en/type-classis-order/algae?search=&page=8>. Ototrofik Organizmaların Kültür Koleksiyonu, Çekya. Erişim Tarihi: 01.11.2020.
- Chen, X. Huang, C. and Liu, T., 2012. Harvesting of microalgae Scenedesmus sp. using polyvinylidene fluoride microfiltration membrane. *Desalination and Water Treatment*, **45** (1-3): 177-181.
- Christenson, L. ve Sims, R., 2011. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels and bioproducts, *Biotechnology Advances*, **29** (6): 686-702.
- Chu, H., Zhao, F., Tan, X., Yang, L., Zhou, X., Zhao, J. and Zhang, Y., 2016. The impact of temperature on membrane fouling in algae harvesting. *Algal Research*, **16**: 458-464.
- Çalışkan-Eleren, S., ve Öner, B., 2019. Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi: Mikroalgler. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*: 25(3).
- Drahor, M. G, Kumlutaş, D., Göktürkler, G., 2001. Dünya’da ve Türkiye’de jeotermal enerji ve kullanımı. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*. İzmir. 61-68.

- Dudley, B., 2020. BP statistical review of world energy. **BP Statistical Review**. London, UK, accessed Aug, 6, 2020.
- Elcik, H. and Cakmakci, M., 2017. Harvesting microalgal biomass using crossflow membrane filtration: critical flux, filtration performance, and fouling characterization. **Environmental Technology**, **38** (12): 1585-1596.
- Eriksen, N. T., 2008. Biyoloji, biyoteknoloji, gıda ve tıp alanlarında uygulamaları olan bir pigment olan fikosiyanin üretimi. **Uygulamalı Mikrobiyoloji ve Biyoteknoloji**, **80** (1): 1-14.
- Farooq, W., Lee, Y. C., Han, J. I., Darpito, C. H., Choi, M. and Yang, J. W., 2013. Efficient microalgae harvesting by organo-building blocks of nanoclays. **Green chemistry**, **15** (3): 749-755.
- Gezici, M., Eliçin, K., ve Gürhan, R., 2012. Biyoyakıt amaçlı mikroalg üretimi için bazı yetiştirme parametrelerinin belirlenmesi. **Tarım Makinaları Bilimi Dergisi**, **8** (2): 223-231.
- Grima, E. M., Belarbi, E. H., Fernández, F. A., Medina, A. R. ve Chisti, Y., 2003. Mikroalgal biyokütle ve metabolitlerin geri kazanımı: proses seçenekleri ve ekonomi. **Biyoteknoloji Gelişiyor**, **20** (7-8): 491-515.
- Grobbelaar, J. U., 2009. Fotobiyoreaktörlerde alg büyümesini yöneten faktörler: "açık" ve "kapalı" tartışması. **Uygulamalı Psikoloji Dergisi**, **21** (5): 489.
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. M. and Danquah, M. K., 2010. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **14** (3): 1037-1047.
- Henderson, R. K., Parsons, S. A. and Jefferson, B., 2010. The impact of differing cell and algogenic organic matter (AOM) characteristics on the coagulation and flotation of algae. **Water Research**, **44** (12): 3617-3624.
- Ho W. S. and Sirker K. K., 1992. **Membrane Handbook**. Chapman & Hall, New York, USA. 954.
- Huntley, M. E., and Redalje, D. G., 2007. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, **12** (4): 573-608.
- Hwang, T. Kotte, M.R. Han, J.-I. Oh, Y.-K. and Diallo, M. S., 2015. Microalgae recovery by ultrafiltration using novel fouling-resistant PVDF membranes with in situ PEGylated polyethyleneimine particles. **Water Research**. **73**, Korea.181-192.
- Hwang, T., Park, S. J., Oh, Y. K., Rashid, N. and Han, J. I., 2013. Harvesting of Chlorella sp. KR-1 using a cross-flow membrane filtration system equipped with an anti-fouling membrane. **Bioresource Technology**. **139**, Korea. 379-382.
- Johnson, M. B., 2009. **Microalgal Biodiesel Production Through a Novel Attached Culture System and Conversion Parameters** (master thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg VA.
- Karabulut, Y., 2000. **Türkiye Enerji Kaynakları**. Ankara Üniversitesi Basımevi. Ankara. 33-54.
- Khan, M. I., Shin, J. H. and Kim, J. D., 2018. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. **Microbial Cell Factories**, **17** (1): 36.

- Kim, D., Kwak, M., Kim, K. and Chang, Y. K., 2019. Turbulent jet-assisted microfiltration for energy efficient harvesting of microalgae. **Journal of Membrane Science**, 575: 170-178.
- Koru, E., ve Cirik, S., 2003. Spirulina platensis (Cyanophyceae) Mikroalg'ının büyümesine ve bazı biyokimyasal özelliklerine sıcaklığın etkisi. **Su Ürünleri Dergisi**, 20 (3): 419-422
- Lecina, M., Prat, J., Paredes, C. J. and Cairó, J. J., 2015. Non-disruptive sonication of A. fusiformis (A. platensis) cultures facilitates its harvesting. **Algal Research**. Universitat Autònoma de Barcelona, Departament d'Enginyeria Química, volume 7, Barcelona.1-4.
- Lee, T. J., Nakano, K. and Matsumara, M., 2001. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control. **Environmental Technology**, 22 (4): 383-390.
- LiAilin and ManachemElimelech., 2004. OrganicFouling and Chemical Cleaning of Nanofiltrasyon Membrans: **Measurements and Mecha- Nisms. Environmental Science Technology**, 38 (17): 4683-4693.
- Mata, T. M., Martins, A. A. and Caetano, N. S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14 (1): 217-232.
- Masojidek, J., Koblizek, M. ve Torzillo, G., 2004. Mikroalglerde fotosentez. **Mikroalgal Kültürü El Kitabı: Biyoteknoloji ve Uygulamalı Psikoloji** (Editor: Amos Richmond). USA. 577.
- Milledge, J. J. ve Heaven, S., 2013. Biyoyakıt üretimi için mikro alg hasadı üzerine bir inceleme. **Çevre Bilimi ve Biyo / Teknoloji İncelemeleri**, 12 (2): 165-178.
- Mo, W., Soh, L., Werber, J. R., Elimelech, M. and Zimmerman, J. B., 2015. Application of membrane dewatering for algal biofuel. **Algal Research**. University of New Hampshire, Department of Civil Environmental Engineering , volume 11,USA. 1-12.
- Moraine, R., Shelef, G., Meydan, A., and Levi, A., 1979. Algal single cell protein from wastewater treatment and renovation process. **Biotechnology and Bioengineering**, 21 (7): 1191-1207.
- Munoz, R. ve Guieysse, B., 2006. Tehlikeli kirletici maddelerin arıtılması için alg-bakteriyel süreçler: bir inceleme. **Su Araştırması**, 40 (15): 2799-2815.
- Nguyen, T. L., Lee, D. J., Chang, J. S. and Liu, J. C., 2013. Effects of ozone and peroxone on algal separation via dispersed air flotation. **Colloids And Surfaces B: Biointerfaces**. National Taiwan University of Science and Technology, Department of Chemical Engineering, 105,Tayvan. 246-250.
- Nwoba, E. G., Ayre, J. M., Moheimani, N. R., Ubi, B. E., & Ogbonna, J. C., 2016. Growth comparison of microalgae in tubular photobioreactor and open pond for treating anaerobic digestion piggery effluent. **Algal Research**. Murdoch University, Department of Biotechnology, Volume 17, Australia. 268-276.
- Oktor, K., 2018. **II- AR-GE Çalışmaları-Mikroalglerin Çevre Teknolojilerindeki Yeri**. Environment-Science and Technology. Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları. İstanbul. 330-343.
- Onyshchenko, E., Blandin, G., Comas, J. and Dvoretzky, A., 2020. Influence of microalgae wastewater treatment culturing conditions on forward osmosis concentration process. **Environmental Science and Pollution Research**, 27 (2): 1234-1245.

- Özdamar, A., 2000. Dünya ve Türkiye’de rüzgar enerjisinden yararlanılması üzerine bir araştırma. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **6** (2):133-145.
- Pranowo, R., Lee, D. J., Liu, J. C. and Chang, J. S., 2013. Effect of O₃ and O₃/H₂O₂ on algae harvesting using chitosan. *Water Science and Technology*, **67** (6): 1294-1301.
- Qu, F., Liang, H., Zhou, J., Nan, J., Shao, S., Zhang, J. and Li, G., 2014. Ultrafiltration membrane fouling caused by extracellular organic matter (EOM) from *Microcystis aeruginosa*: effects of membrane pore size and surface hydrophobicity. *Journal of Membrane Science*. Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, China. 58-66.
- Rashid, N., Rehman, M. S. U., Sadiq, M., Mahmood, T. and Han, J. I., 2014). Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. COMSATS Institute of Information Technology, Department of Environmental Sciences, Volume 40, Pakistan. 760-778.
- Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T. and Bux, F., 2013. Biodiesel from microalgae: a critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, Durban University of Technology, Institute for Water and Wastewater Technology, South Africa. 444-467.
- Ribeiro, L. A., da Silva, P. P., Mata, T. M. ve Martins, A. A., 2015. Prospects of using microalgae for biofuels production: Results of a Delphi study. *Renewable Energy*. University of Porto, Faculty of Engineering, Portugal. 799-804.
- Rickman, M., Pellegrino, J. and Davis, R., 2012. Fouling phenomena during membrane filtration of microalgae. *Journal of Membrane Science*. University of Colorado, Department of Mechanical Engineering, USA. 33-42.
- Richard W. Baker. 2004. *Membran Technology and Applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- Rossi, N. Jaouen, P. Legentilhomme, P. and Petit, I., 2004. Harvesting of *Cyanobacterium Arthrospira Platensis* Using Organic Filtration Membranes. *Food and Bioproducts Processing*, **82**: 244-250.
- Rossi, N., Derouiniot-Chaplain, M., Jaouen, P., Legentilhomme, P. and Petit, I., 2008. *Arthrospira platensis* harvesting with membranes: fouling phenomenon with limiting and critical flux. *Bioresource Technology*, **99** (14): 6162-6167.
- Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., Kankamer, B., 2008. Second generation biofuels: high efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Resources*, **1**: 20–43.
- Singh, A., Nigam, P. S. ve Murphy, J. D., 2011. Alglerden elde edilen yenilenebilir yakıtlar: tartışmalı kara bazlı yakıtlara bir yanıt. *Bioresource Teknolojisi*, **102** (1): 10-16.
- Sisman-Aydin, G., 2019. Mikroalg teknolojisi ve çevresel kullanımı. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **4** (1): 81-92.
- Slater, C. S., Savelski, M. J., Kostetsky, P. and Johnson, M., 2015. Shear-enhanced microfiltration of microalgae in a vibrating membrane module. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **17** (7): 1743-1755.

- Sun, Y. and Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review **Bioresour Technology**. North Carolina State University, Department of Biological and Agricultural Engineering, volume 83, USA. 1–11
- Susanto, H., Fitrianingtyas, M., Kurniawan, L., Rusli, S. and Widiyasa, I. N., 2017. Performance evaluation of flocculation and membrane filtration for microalgae harvesting. **Pertanika Journal of Science & Technology**, 25 (4): 1159 – 1172.
- Tezcan, G., Araştırma-Geliştirme, T., ve Müdürlüğü, E. İ. G., 1997. Çevre ve enerji. **Çevre ve Enerji Kongresi Bildiriler Kitabı**. Haziran. 99-106.
- Tiranuntakul, M. Schneider, P.A. and Jegatheesan, V., 2011. Assessments of critical flux in a pilot-scale membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, 102: 5370-5374.
- TPAO, 2019. Türkiye'nin petrol rezervleri. <https://www.tpao.gov.tr/file/2005/2019-tpao-sektor-raporu-3185ed3b4af5442c.pdf>. Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Ankara. Erişim tarihi: 10.07.2020
- TÜİK, 2020a. Elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı. https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara. Erişim tarihi: 06.07.2020
- TÜİK, 2020b. Türkiye'de sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Istatistiklerle-Cevre-2018-33675>. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara. Erişim tarihi: 07.07.2020
- UTEX, 2020. Mikroalg türleri ve yaşayan sucül algler. <https://utex.org/collections/living-algal-strains>. Texas Üniversitesi Alg Kültür Koleksiyonu, Austin. Erişim tarihi: 15.11.2020
- Ültanır M. Ö., 1997. Hidrojenin yakıt olarak kullanımları ve özellikleri. **Çevre ve Enerji Kongresi Bildiriler Kitabı**. Haziran 1997, 295-315.
- Wang, L., Pan, B., Gao, Y., Li, C., Ye, J., Yang, L. and Zhang, X., 2019. Efficient membrane microalgal harvesting: Pilot-scale performance and techno-economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, 218: 83-95.
- WEC, 2012. Dünya enerji raporu. <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2017/11/enerjirapor2012.pdf>. Dünya Enerji Konseyi, Londra. Erişim tarihi: 10.07.2020
- Yılmaz, Ö., 1997. Hidroelektrik enerji üretiminin çevresel boyutları. **Çevre Enerji Kongresi Bildiriler Kitabı**. Haziran. 421-4216.
- Yuksel, I., and Kaygusuz, K., 2011. Renewable energy sources for clean and sustainable energy policies in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15 (8): 4132-4144.
- Zhang, X., Hu, Q., Sommerfeld, M., Puruhito, E. and Chen, Y., 2010. Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes. **Bioresource Technology**, 101 (14): 5297-5304.



ÖZ GEÇMİŞ

1990 yılında Van ilinde doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Van'da tamamlamıştır. Mersin'de bulunan Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünden 2015 yılında mezun olmuştur. 2017 yıl'ı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.



T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 30/12/2020

Tez Başlığı / Konusu: **Düz-Panel Hava Kaldırmalı Fotobiyoreaktörde
Büyütülen Mikroalglerin Çeşitli Membranlar İle Hasatlama Etkisinin Araştırılması**

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 30/12/2020 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinalite raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5 (beş) dir.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinalite Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

30/12/2020

Adı Soyadı: Erdal ERCAN

Öğrenci No:17910001050

Anabilim Dalı:Çevre Mühendisliği ABD

Programı: Tezli Yüksek Lisans

Statüsü: Y. Lisans ☐

Doktora ☐

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR
Dr.Öğr.Üyesi Melih ONAY

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR