



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANABİLİM DALI

ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**BİRA ATIK SUYUNDAN ELDE EDİLEN MİKROALG TABANLI ÜRÜNLERİN
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ BOYUTUNDA
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERAP YILDIRIM

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. BURÇİN ATILGAN TÜRKMEN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ECEM MÜGE ANDOĞLU ÇOŞKUN

BİLECİK, 2026

10792483

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**BİRA ATIK SUYUNDAN ELDE EDİLEN MİKROALG TABANLI ÜRÜNLERİN
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ BOYUTUNDA
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERAP YILDIRIM

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. BURĐIN ATILGAN TÜRKMEN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ ECEM MÜGE ANDOĞLU ÇOŞKUN

BİLECİK, 2026

10792483

BEYAN

“Bira Atık suyundan Elde Edilen Mikroalg Tabanlı Ürünlerin Sürdürülebilirliğinin Yaşam Döngüsü Boyutunda Değerlendirilmesi” başlıklı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tezimi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122N016 nolu proje ile desteklenmiştir.

Serap YILDIRIM

.../.../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yol gösterici yaklaşımı, yönlendirmeleri ve eleştirileriyle çalışmama katkı sağlayan tez danışmanım Doç. Dr. Burçin ATILGAN TÜRKMEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca akademik rehberliğinin yanı sıra her zaman ulaşılabilir, destekleyici ve samimi yaklaşımıyla yanımda olan, arkadaşça desteğini her zaman hissettiren ikinci tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ecem Müge ANDOĞLU ÇOŞKUN'a teşekkür ederim.

Bu tez, ERA-NET SUSFOOD2 ve FOOSC Ortak Programı kapsamında TÜBİTAK (Proje No: 122N016) tarafından desteklenen "Bira fabrikası atık ürünlerinin omega-3 açısından zengin hayvan yemi ve gübreye dönüştürülmesi için mikroalglerin potansiyelinin ortaya çıkarılması- AlgaeBrew" projesi kapsamında yürütülmüştür. Proje sürecindeki katkıları için AlgaeBrew ekibine ve sağladığı imkanlar için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimde manevi desteğini her zaman hissettiğim, teşvik edici yaklaşımı ve değerli önerileriyle yanımda olan Doç. Dr. Rahmiye Zerrin YARBAY'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez süreci boyunca sabırları, anlayışları ve sevgileriyle en büyük motivasyon kaynağım olan eşim Zeki YILDIRIM ve kızım Eda YILDIRIM'a, varlığıyla bana güç veren, her zaman yanımda olan kız kardeşim Sinem DURAL'a sonsuz teşekkür ederim. Onların desteği olmadan bu çalışmanın tamamlanması mümkün olmazdı.

Bu çalışmanın, ilgili alanda yapılacak gelecekteki araştırmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Serap YILDIRIM

2026

ÖZET

Gün geçtikçe artan çevresel kirlilik, iklim krizi ve doğal kaynaklardaki azalma, gıda ve yem endüstrisinde sürdürülebilir çözüme olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bakımdan, mikroalgler önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkarken, balık yemlerindeki balık unu kullanımının doğal balık stokları üzerinde oluşturduğu baskı nedeniyle, mikroalg bazlı balık unu sürdürülebilir bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, atık sudan elde edilen mikroalg biyokütlesi ile bu biyokütlenin balık yemi üretiminde balık unu yerine kullanılmasının çevresel etkilerini analiz ederek iyileştirme olanaklarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, mikroalg bazlı balık ununun balık yemi üretiminde kullanılmasının çevresel sürdürülebilirliği geleneksel balık yemleriyle karşılaştırılmıştır. Fonksiyonel birim olarak mikroalg eldesi için 1,941 kg kuru biyokütle, nihai uygulama safhası için ise 1 kg balık yemi esas alınmıştır. Çevresel sürdürülebilirlik analizi, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun olarak Yaşam Döngüsü Analizi ile gerçekleştirilmiş olup, çevresel etkiler CML metodolojisi çerçevesinde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikroalg biyokütlesinin üretiminde atık su ve karbondioksit kullanımı ile çevresel etkilerde %18'e kadar azalmanın iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlar, mikroalg kaynaklı balık ununun ise belirli çevresel etki kategorilerinde ticari balık ununa kıyasla daha düşük çevresel yüke sahip olabileceğini göstermektedir. Bu durum, mikroalglerin balık yemlerinde sürdürülebilir bir alternatif ham madde olarak değerlendirilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Çalışma sonuçları, su ürünleri yetiştiriciliğinde çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık su, balık yemi, biyokütle, dögüsel ekonomi, mikroalg, sürdürülebilirlik, yaşam döngüsü analizi.

ABSTRACT

Increasing environmental pollution, the climate crisis, and the depletion of natural resources are driving the need for sustainable solutions in the food and feed industry. In this regard, microalgae emerge as an important alternative, and microalgae-based fish meal is recognized as a sustainable resource given the pressure that fish meal use in fish feed exerts on natural fish stocks. This study aims to analyze the environmental impacts of using microalgae biomass obtained from wastewater and of using this biomass in fish feed production instead of fish meal, and to evaluate opportunities for improvement. In addition, the environmental sustainability of using microalgae-based fish meal in fish feed production has been compared with traditional fish feeds. As the functional unit, 1,941 kg of dry biomass was used for microalgae production, and 1 kg of fish feed was used for the final application stage. The environmental sustainability analysis was performed using Life Cycle Analysis in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, and environmental impacts were evaluated within the framework of the CML methodology. The results obtained demonstrate that the use of wastewater and carbon dioxide in microalgae biomass production has the potential to reduce environmental impacts by up to 18%. The results also indicate that microalgae-derived fish feed may have a lower environmental impact than commercial fish feed in certain environmental impact categories. This highlights the potential for microalgae to be considered a sustainable alternative raw material in fish feed. The results of this study contribute to the development of strategies to reduce environmental impacts in aquaculture.

Keywords: Biomass, circular economy, fish feed, life cycle analysis, microalgae, sustainability, wastewater.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| ÖN SÖZ..... | i |
| ÖZET | ii |
| ABSTRACT | iii |
| TABLolar LİSTESİ..... | vii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ | viii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. MİKROALG BİYOKÜTLESİ | 4 |
| 2.1. Mikroalglerin Üretim Sistemleri | 5 |
| 2.2. Mikroalglerin Kullanım Alanları | 9 |
| 2.2.1. Gıda sektöründe mikroalgler..... | 10 |
| 2.2.2. Yem sektöründe mikroalgler | 11 |
| 2.2.3. Sağlık ürünlerinde mikroalgler | 12 |
| 2.2.3.1. Farmasötik ve nutrasötik bileşenler | 13 |
| 2.2.3.2. Aşı | 13 |
| 2.2.3.3. Vitamin..... | 13 |
| 2.2.4. Kozmetik sektöründe mikroalgler | 13 |
| 2.2.5. Enerji sektöründe mikroalgler | 15 |
| 2.2.5.1. Katı ürünler | 15 |
| 2.2.5.2. Sıvı ürünler | 16 |
| 2.2.5.3. Gaz ürünler..... | 16 |
| 2.2.6. Tarım sektöründe mikroalgler | 17 |
| 2.2.6.1. Biyogübre | 17 |
| 2.2.6.2. Biyopestisit | 18 |
| 2.2.7. Kimya sektöründe mikroalgler..... | 19 |
| 2.2.7.1. Boya | 19 |
| 2.2.7.2. Biyoplastik | 19 |
| 2.2.8. Mikroalglerle remediasyon..... | 20 |
| 2.3. Mikroalg Kullanımının Zorlukları | 20 |
| 3. MİKROALG BAZLI BALIK YEMİ..... | 24 |
| 4. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ YÖNTEMİ..... | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1. Yaşam Döngüsü Kavramı ve Önemi..... | 28 |
| 4.2. Yaşam Döngüsü Analizi Çerçevesi..... | 29 |
| 4.2.1. Amaç ve kapsam tanımı..... | 30 |
| 4.2.2. Envanter verilerinin belirlenmesi | 31 |
| 4.2.3. Etki kategorilerinin belirlenmesi | 32 |
| 4.2.4. Sonuçların yorumlanması..... | 35 |
| 5. GÜNCEL LİTERATÜR ÖRNEKLERİ..... | 37 |
| 6. MATERYAL VE YÖNTEM | 43 |
| 6.1. Amaç ve Kapsam | 43 |
| 6.1.1. Mikroalg biyokütlesi üretimi..... | 44 |
| 6.1.2. Balık yemi üretimi | 46 |
| 6.2. Envanter Verileri | 49 |
| 6.2.1. Mikroalg biyokütlesi üretimi envanter verileri | 49 |
| 6.2.2. Balık yemi üretimi envanter verileri..... | 53 |
| 6.3. Etki Kategorileri ve Hesaplama | 56 |
| 7. BULGULAR | 57 |
| 7.1. Mikroalg Biyokütlesi Yaşam Döngüsü Çevresel Etkileri..... | 57 |
| 7.1.1. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli | 58 |
| 7.1.2. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli fosil | 59 |
| 7.1.3. Asidifikasyon potansiyeli | 59 |
| 7.1.4. Ötrofikasyon potansiyeli | 59 |
| 7.1.5. Tatlı su ekotoksitesitesi potansiyeli | 59 |
| 7.1.6. Küresel ısınma potansiyel | 60 |
| 7.1.7. İnsan toksisitesi potansiyeli | 60 |
| 7.1.8. Deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli | 60 |
| 7.1.9. Ozon tabakasının incelmeye potansiyeli..... | 60 |
| 7.1.10. Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli | 60 |
| 7.1.11. Kara ekotoksitesitesi potansiyeli | 61 |
| 7.2. Balık Yemi Yaşam Döngüsü Çevresel Etkileri..... | 61 |
| 7.2.1. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli element | 67 |
| 7.2.2. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli fosil | 67 |
| 7.2.3. Asidifikasyon potansiyeli | 68 |
| 7.2.4. Ötrofikasyon potansiyeli | 69 |

| | |
|--|----|
| 7.2.5. Tatlı su ekotoksitesitesi potansiyeli | 69 |
| 7.2.6. Küresel ısınma potansiyel | 70 |
| 7.2.7. İnsan toksitesitesi potansiyeli | 70 |
| 7.2.8. Deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli | 71 |
| 7.2.9. Ozon tabakasının incilmesi potansiyeli..... | 71 |
| 7.2.10. Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli | 72 |
| 7.2.11. Kara ekotoksitesitesi potansiyeli | 72 |
| 8. TARTIŞMA | 74 |
| 8.1. Sonuçların Literatür ile Validasyonu | 75 |
| 8.2. Kritik Noktalar ve İyileştirme Önerileri..... | 79 |
| 8.2.1. Ekipman iyileştirmeleri..... | 79 |
| 8.2.2. Yenilenebilir enerji kullanımı | 81 |
| 9. SONUÇ VE ÖNERİLER | 83 |
| KAYNAKÇA | 85 |

TABLULAR LİSTESİ

| | |
|--|-----------|
| Tablo 4.1. Örnek çevresel etki kategorileri ve birimleri..... | 33 |
| Tablo 6.1. Mikroalg biyokütlesi üretim sistemi tasarım verileri | 52 |
| Tablo 6.2. Çipura için üretilen geleneksel ve mikroalg bazlı balık yemlerinin ham madde girdileri | 55 |
| Tablo 8.1. Mikroalg biyokütlesinin üretiminde oluşan çevresel etkilerin literatür karşılaştırması | 76 |
| Tablo 8.2. Mikroalg biyokütlesinin üretiminde oluşan çevresel etkilerin literatür karşılaştırması | 77 |
| Tablo 8.3. Mikroalg bazlı balık ununun çevresel etki sonuçlarına etkisi | 78 |
| Tablo 8.4. Mikroalg bazlı balık yeminin biyokütlesinin üretiminde oluşan çevresel etkilerin literatür karşılaştırması | 78 |
| Tablo 8.5. Ekipman iyileştirmeleri | 79 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Biyoreaktör tasarımları | 6 |
| Şekil 2.2. Biyoreaktör tiplerinin görselleri..... | 8 |
| Şekil 2.3. Mikroalglerin kullanım alanları | 10 |
| Şekil 4.1. YDA çerçevesi | 29 |
| Şekil 4.2. Envanter verilerinin belirlenmesi akış diyagramı | 31 |
| Şekil 6.1. AlgaeBrew projesi iş akış diyagramı | 44 |
| Şekil 6.2. Mikroalg biyokütlesi üretim prosesi | 46 |
| Şekil 6.3. Geleneksel balık yemi üretim süreci..... | 48 |
| Şekil 6.4. Mikroalg bazlı balık yemi üretim süreci..... | 49 |
| Şekil 7.1. Mikroalg biyokütlesi üretiminin toplam yaşam döngüsü çevresel etkileri..... | 58 |
| Şekil 7.2. Mikroalg biyokütlesi üretiminin toplam yaşam döngüsü çevresel etkilerinin üretim basamaklarına olan yüzdesel dağılımı..... | 58 |
| Şekil 7.3. Geleneksel balık yemi ile mikroalg bazlı balık yemi üretiminin toplam yaşam döngüsü çevresel etkileri..... | 61 |
| Şekil 7.4. Geleneksel balık yeminin yaşam döngüsü basamaklarının çevresel etkileri..... | 62 |
| Şekil 7.5. Mikroalg bazlı balık yeminin yaşam döngüsü basamaklarının çevresel etkileri | 63 |
| Şekil 7.6. Geleneksel balık yemi üretimine giren her bir ham maddeden kaynaklanan çevresel etki sonuçlarının yüzdesel dağılımı..... | 65 |
| Şekil 7.7. Mikroalg bazlı balık yemi üretimine giren her bir ham maddeden kaynaklanan çevresel etki sonuçlarının yüzdesel dağılımı..... | 66 |
| Şekil 8.1. Ekipman iyileştirmeleri..... | 80 |
| Şekil 8.2. Şebeke elektriği ile rüzgar enerjisinin çevresel etkilerinin karşılaştırması..... | 81 |

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

AP: Asidifikasyon Potansiyeli

ATP Element: Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli Element

ATP Fosil: Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli Fosil

C₂H₄: Etilen

CFC-11 eşd.: Kloroflorokarbon-11 Eşdeğeri

CML: Çevre Bilimleri Merkezi

CO₂: Karbondioksit

CO₂ eşd.: Karbondioksit eşdeğeri

Co-60 eşd.: Kobalt 60 Eşdeğeri

Cu eşd.: Bakır Eşdeğeri

DCB: Diklorobenzen

DCB eşd.: Diklorobenzen Eşdeğeri

DDT: Diklorodifeniltri-kloroetan

DHA: Dokosahekzaenoik Asidi

DSEP: Deniz Suyu Ekotoksitesitesi Potansiyeli

EPA: Eikosapentaenoik Asit

Eşd.: Eşdeğeri

FB: Fonksiyonel Birim

FBR: Fotobiyoreaktör

g: Gram

GJ: Gigajoule

GRAS: Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen (Generally Recognized As Safe)

ISO: Uluslararası Standardizasyon Örgütü

İTP: İnsan Toksikitesitesi Potansiyeli

kBq: Kilobecquerel

KEP: Kara Ekotoksitesitesi Potansiyeli

Kg: Kilogram

KIP: Küresel Isınma Potansiyeli

kWh: Kilowatt saat

L: Litre

m²: Metrekare

m³: Metreküp

MJ: Megajoule

mg: Miligram

Mt: Megaton

NaClO: Sodyum Hipoklorit

NaH₂PO₄.2H₂O: Sodyum Fosfat

NaNO₃: Sodyum Nitrat

NO: Azot Monoksit

NO₂: Azot Dioksit

NO_x: Azot Oksit Bileşikleri

NO_x eşd.: Azot Oksit Bileşikleri Eşdeğeri

OTİP: Ozon Tabakasının İncelmesi Potansiyeli

ÖP: Ötrofikasyon Potansiyeli

P: Fosfor

P eşd.: Fosfor Eşdeğeri

PM_{2,5} eşd.: 2,5 Mikrometreden Küçük Partikül Madde Eşdeğeri

PO₄: Fosfat

FOOP: Fotokimyasal Ozon Oluşum Potansiyeli

R-11: Refrigerant-11

ROT: Reaktif Oksijen Türleri

Sb: Antimon

SO₂: Kükürt Dioksit

SO₂ eşd.: Kükürt Dioksit Eşdeğeri

SOFIA: Dünya Balıkçılık ve Su Ürünleri Durumu Raporu

TSEP: Tatlı Su Ekotoksitesitesi Potansiyeli

TÜBİTAK: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

UV: Ultraviyole

YDA: Yaşam Döngüsü Analizi

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze insan nüfusundaki yoğunlaşma, aşırı kentleşmenin ve sanayileşmenin, arazilerin dengesiz bir biçimde imara açılmasının ve fosil kaynaklardaki yoğun kullanımın ana sebebidir. Bunların sonucunda ise ham madde kıtlığı, iklim krizi, su ve fosil kaynaklarının tükenmesi gibi tehlikeli boyutlara ulaşan sürdürülebilirlik sorunları günümüzde yaşanmaktadır (Vieira de Mendonça vd., 2021). Değişen iklim şartları, doğal kaynakların tükenmesi ve yaşanan tüm çevresel krizler, üreticileri yeni, alternatif ve daha sürdürülebilir kaynaklara yöneltmektedir (Perdan & Azapagic, 2010). Bu alandaki en başarılı örneklerden biri olan mikroalg üretimi, atık su arıtımı ile biyokütle üretimini entegre ederek döngüsel bir üretim modeli sunmaktadır (Brooke, Ma, vd., 2025).

Günümüzde küresel tarım ve gıda sistemleri de toprak verimliliğinin azalması, su kaynaklarının tükenmesi ve iklim krizi sonucunda ciddi sürdürülebilirlik sorunları ile yüzleşmektedir. Mevcut sistemler bir yandan çevresel limitleri zorlarken, diğer yandan da toplumsal taleplerin artarak çeşitlenmesiyle karşı karşıyadır (Yuan vd., 2024). Toplumun gıda ve gıda ham maddesine yönelik artan talebi, mevcuttaki üretim sistemlerinin hem çevresel hem de ekonomik olarak yeniden gözden geçirilmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu şartlarda, daha az doğal kaynak kullanarak besin değeri yüksek alternatif protein kaynaklarının üretimi gündeme gelmekte, özellikle hayvansal protein bakımından düşük çevresel ayak izine sahip üretim sistemlerine olan talep giderek artmaktadır. Bu nedenle, insanların sağlıklı besinlere yönelik farkındalığının artmasıyla kaliteli protein ve sağlıklı yağ açısından zengin değerlere sahip balık ve su ürünleri önemli bir besin kaynağı olarak tercih edilmektedir. Buna paralel olarak, su ürünleri yetiştiriciliğine ve bu sektörde kullanılan balık yemlerine olan ihtiyaç da küresel ölçekte hızla artmaktadır (Cedeno vd., 2025; Yarnold vd., 2019).

2018-2020 yılları arasında ortalama 178 milyon ton olan küresel balık avlanma ve su ürünleri yetiştiriciliğinin 2030 yılına kadar 201 milyon ton seviyelerini bulması beklenmektedir, bu da toplamda %12,8 düzeyinde bir artış meydana geleceğini göstermektedir (OECD & Nations, 2021). Su ürünlerine olan talep ile çiftlik yetiştiriciliği ve kullanılan yem miktarları da artış göstermiştir. Küresel yem üretimi 2022 yılında %2,7'lik bir artışla 52,9 milyon tona ulaşmıştır (Dikel & Demirkale, 2024). Ancak yemlerin üretimi için avlanan hamsi, sardalya, uskumru, ringa gibi pelajik balık türleri üzerindeki baskının artması çiftçileri daha sürdürülebilir yemlere itmektedir (Yarnold vd., 2019). Hem besinsel hem de çevresel avantajlar sağlanması ve sürdürülebilir bir kaynak olması nedeniyle de mikroalglerin bu soruna çözüm bulmada kritik bir rol oynaması beklenmektedir (Vieira de Mendonça vd., 2021). Mikroalgler

yapısındaki kaliteli ve yüksek protein, omega-3 yağ asitleri, vitaminler ve diğer kritik bileşikler sayesinde su ürünlerinde olumlu büyüme ve üreme performansı sergileyerek geleneksel yemlere iyi bir alternatif olmakta ve yemlerdeki balık unu ve balık yağının yerini alması beklenmektedir (Balasubramaniam vd., 2025).

Üretim sistemlerinin sürdürülebilir hale getirilmesi günümüzde büyük önem taşımaktadır. Bu noktada uygulanacak sürdürülebilirlik analizinin temel yapı taşı, bir ürünün ham maddeden nihai bertarafına kadar olan tüm aşamalarının yaşam döngüsü perspektifiyle değerlendirilmesidir (Babuna vd., 2023). Yaşam döngüsü analizi (YDA), bir ürünün veya sürecin beşikten mezara kadar olan ömrü boyunca iş akışına girişi ve çıkışı olan basamaklardan kaynaklanan tüm çevresel etkileri ölçen ve değerlendiren bir yöntemdir (Abd Rashid & Yusoff, 2015).

Mikroalglerin atık sudan besin maddesi olarak geri kazanımı ve sürdürülebilir yem üretimi üzerindeki kritik rolü göz önüne alındığında, bu sürecin yaşam döngüsü boyutunda çevresel sürdürülebilirliğinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, çalışmanın amacı, pilot ölçekli bir mikroalg üretim sisteminin tüm girdi ve çıktılarıyla çevresel etkilerini analiz ederek en fazla çevresel etkinin geldiği basamakları bulmak ve iyileştirme alternatiflerini değerlendirmektir. Ayrıca mikroalglerin balık yemi üretiminde kullanılmasının çevresel sürdürülebilirliğini yaşam döngüsü boyutunda inceleyerek sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliği uygulamalarına katkı sağlamaktır.

Hazırlanan tez çalışmasında ilk olarak mikroalglerin genel özellikleri ve üretim sistemleri ile mikroalglerden elde edilen yüksek değerlikli ürünlere ait bilgi sunulmuş, mikroalg bazlı üretim süreçlerinin sürdürülebilirliği önündeki temel kısıtlamalar ve uygulama zorluklarına da yer verilmiştir. İkinci olarak ise geleneksel balık yemi ve mikroalglerin balık yemi üretiminde kullanılmasıyla ilgili bilgi sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışmada değerlendirilen üretim süreçlerinin çevresel performansı için kullanılan YDA yöntemi tanımlanarak YDA'nın metodolojisi açıklanmıştır. Literatür incelemesi kısmında ise mikroalg biyokütlesi üretiminin çevresel etkilerinin değerlendirildiği çalışmalarla birlikte mikroalg biyokütlesi kullanılarak üretilen balık yemleriyle ilgili daha önce yapılmış yaşam döngüsü boyutunda çevresel sürdürülebilirlik çalışmalarına yer verilmiştir. Tez çalışmasının Materyal ve Yöntem kısmında YDA çerçevesine uygun olarak çalışmanın amaç ve kapsamı, modellenen sistemlere ait envanter verileri sunulmuştur. Sonuç kısmında ise mikroalg biyokütlesi ile geleneksel ve mikroalg bazlı dört farklı balık yemi reçetesi için yaşam döngüsü yaklaşımı ile hesaplanan 11 adet çevresel etkiye ait sonuçlar sunulmuştur. Çalışmanın son

kısmında ise elde edilen bulgular tartışılarak literatürle karşılaştırılmış ve sürecin sürdürülebilirliğini arttırabilecek alternatifler için öneriler sunulmuştur.

Tez çalışmasında kullanılan tüm veriler, ERA-NET SUSFOOD2 ve FOSC Ortak Programında yer alan “Bira fabrikası atık ürünlerinin omega-3 açısından zengin hayvan yemi ve gübreye dönüştürülmesi için mikroalglerin potansiyelinin ortaya çıkarılması-AlgaeBrew” Projesinde yer almaktadır. 122N016 nolu Proje, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından finanse edilmektedir.

2. MİKROALG BİYOKÜTLESİ

Biyokütle; biyolojik süreçlerin sonucunda elde edilen bitki, hayvan ve mikrobiyal kaynaklı tüm organik maddeleri kapsayan yenilenebilir bir enerji kaynağı ve ham madde olarak tanımlanmaktadır (Fantini, 2017). Tarım, hayvancılık, ormancılık ve su ürünleri yetiştiriciliği dahil olmak üzere ilgili sektörlerden kaynaklanan biyolojik kökenli ürünlerin ve atıkların, sanayi ve belediye atıklarının biyolojik olarak parçalanabilir kısımları biyokütle kaynakları arasında yer almaktadır (Union, 2009). Bu kaynaklar içinde, fotosentetik organizmalar, özellikle karbon tutma kapasiteleri ve hızlı büyüme özellikleri sayesinde, sürdürülebilir üretim sistemlerinde önemli bir konuma sahiptir (Sánchez vd., 2019). Fotosentetik biyokütle kaynaklarından biri olan algler, gelişmiş biyoyakıtlar ve diğer faydalı ürünlere dönüştürülebilen, yüksek oranda yağ ve protein içeren, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir kaynaktır. Algler, mikroalgler ile deniz ve tatlı su makroalgleri olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Adeniyi vd., 2018; Michalak & Chojnacka, 2018). Makroalgler yani deniz yosunları, deniz ortamlarında yaşayan, çıplak gözle görülebilen, çok hücreli organizmalar olarak ifade edilirken, mikroalgler hem tatlı su hem de deniz ortamlarında yetişen mikroskobik algler olarak tanımlanmaktadır (Bala vd., 2016).

Mikroalgler; karbondioksit (CO₂), azot (N), fosfor (P) gibi inorganik maddeler ve organik maddeleri özümseyerek yüksek değerlikli maddelere dönüştürebilen, fotosentetik ve ökaryotik organizmalardır (Matos, 2019). Fotosentetik yapıları sayesinde dünyada fotosentez yolu ile var olan oksijenin yaklaşık %50'sini üretmektedirler (Vuppaladadiyam vd., 2018). Dünyadaki keşfedilmiş ve resmileştirilmiş tüm mikroalglerin sayısı 72.500'dür ve bu sayı bilinen tüm mikroalg türünün sadece %70'ini temsil etmektedir (Borowitzka, 2013).

Mikroalgler, tek hücreli ve çok hücreli bir yapıya sahip olabilir ve büyüme hızları oldukça yüksektir. Bir mikroalgin boyutu bir mikrometreden 200 mikrometrelere kadar çıkabilmektedir (Cancela vd., 2019; Vuppaladadiyam vd., 2018). Mikroalgler, zorlu koşullara kolaylıkla adapte olabilmekte, mikroalg biyokütlesi, yoğun organik ve inorganik kirliliğe sahip bir ortamda, değişiklik gösteren ortam koşulları altında dahi çok rahat büyüebilmektedir (Borowitzka, 2013).

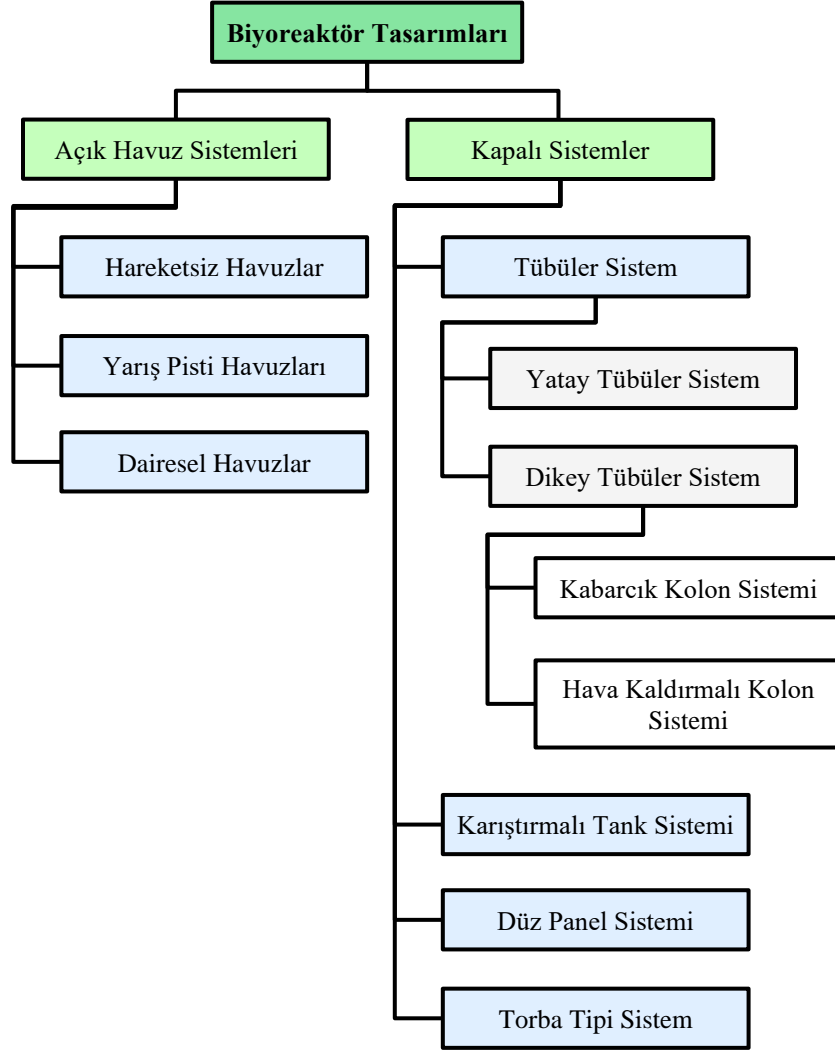
Mikroalgler, genetik çeşitlilikleri, sentezledikleri yüksek katma değerli bileşenler, farklı ortamda yetişebilmeleri ve bu ortamlara adaptasyon yetenekleri sayesinde endüstriyel boyutta çok yönlü bir ham madde kaynağı sunmaktadır. Mikroalglerin bünyelerinde yağ, protein, karbonhidrat, antioksidan gibi yapı taşları ve diğer bileşenler bulunmaktadır (de Souza vd.,

2019; Samoraj vd., 2024). Ayrıca bu organizmalar, hava koşulları, sıcaklık, tuzluluk, arazi ortamı ve kirlilik değişkenlerinden bağımsız olarak yetişebilmektedir (Mobin vd., 2019). Mikroalgler, besinleri doğrudan çevresinden alırlar. Sahip oldukları bu özellik onların metabolik esnekliğini vurgulamaktadır. N ve P gibi makro besinler ile büyüme ve metabolik süreçleri için gerekli olan çeşitli iz elementleri de dahil olmak üzere geniş bir besin yelpazesini özümseyebilirler. Bu besin alım mekanizması, değişken besin mevcudiyeti olan ortamlarda bile gelişmelerine olanak tanır ve onların olağanüstü uyum sağlama yeteneklerini ve dayanıklılıklarını gösterir (Dolganyuk vd., 2020).

Mikroalglerin tüm bu biyolojik özelliklerinin verimli bir şekilde değerlendirilmesi, en uygun mikroalg üretim sisteminin seçilerek tasarlanmasını gerekli kılmaktadır.

2.1. Mikroalglerin Üretim Sistemleri

Mikroalglerin hızlı gelişme yetenekleri, güçlü fotosentez özelliği, geniş adaptasyon yetenekleri ve farklı çevresel faktörlere uyum sağlayabilme özellikleri, bu canlıların farklı üretim teknikleri ile yetiştirilebilmesini sağlar. Mikroalglerin biyolojik potansiyelinin etkili ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ise mikroalg üretim sistemlerinin yapısı ve tasarımına bağlıdır. Bu nedenle, mikroalg üretimi için kullanılan temel sistemleri ve bu sistemlerin çalışma prensiplerini anlamak büyük önem taşımaktadır (Carvalho vd., 2006). Mikroalg biyokütlesi üretimi, üretilecek mikroalg türünün gereksinimleri ile parametrelerin optimize edildiği sistemlerde gerçekleştirilmektedir. Günümüzde bu sistemler, güneş enerjisi ve atmosferik koşullardan doğrudan yararlanan açık sistemler ile parametrelerin kontrol edilebildiği kapalı sistemler yani fotobiyoreaktörler (FBR) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.1). Mikroalg üretim sisteminin seçiminde ürün kalitesi, maliyetler ve çevresel etkiler etkilidir (Türkmen vd., 2025).



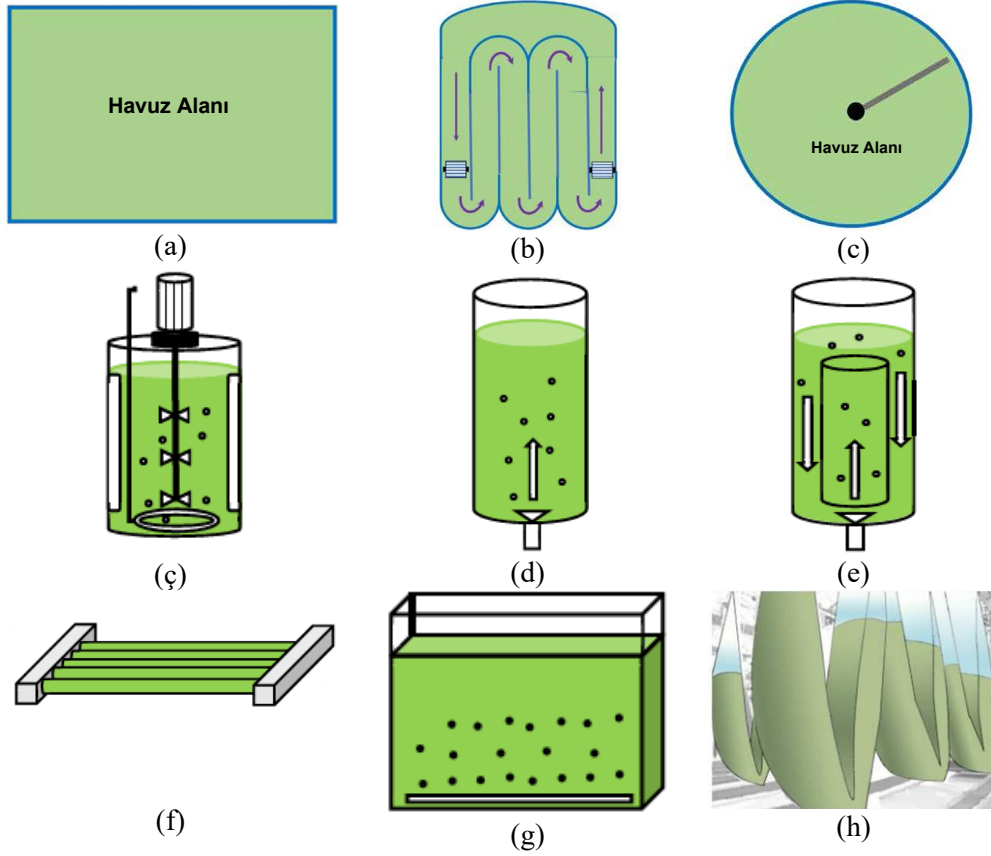
Şekil 2.1. Biyoreaktör tasarımları (Abdur Razzak vd., 2024; Abreu vd., 2022; Chew vd., 2018; Vuppaladadiyam vd., 2018; Zhan vd., 2017)

Gölet reaktörleri olarak da geçen açık havuz sistemleri doğal yapıları sistemlerdir (Zhan vd., 2017). Açık havuz sistemleri, düşük inşaat, bakım ve işletme maliyetleri, verimli enerji tüketmeleri nedeniyle büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliğinde ticari amaçlı olarak en sık kullanılan sistemlerdir (Costa vd., 2019; Qin vd., 2019). Mikroalgler kompleks olarak tasarlanan biyoreaktör sistemlerinde üretilmektedirler. Biyoreaktörler, mikroalglerin büyümesi ve üremesi için gerekli biyomekanik ve biyokimyasal ortamı sağlayan ünitelerdir (Geada vd., 2024). Biyoreaktörler, yüksek biyokütle üretimi yapmak ve kültür hacmini geniş bir alana yaymak için sığ kap, konteyner, havuz, kanal şeklinde tasarlanmaktadır, bu nedenle açık havuz sistemlerinde geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır (Narala vd., 2016). Bu sistemler doğrudan çevreye maruz kalacak şekilde tasarlandığı için ise kontaminasyona ve değişken hava koşullarına karşı hassastır (Borowitzka, 2013). Aynı zamanda, *Chlorella* sp. ve *Dunaliella* sp. gibi yüksek alkalilik, yüksek besin konsantrasyonları ve yüksek tuzluluk gibi aşırı çevresel

şartlara uyum sağlamış mikroalglerle sınırlıdır (Costa vd., 2019). Açık havuz sistemleri kendi içinde; hareketsiz göletler, yarış pisti havuzları/göletleri, dairesel havuzlar/göletler olarak üçe ayrılmaktadır (Abdur Razzak vd., 2024).

Mikroalg yetiştirmek için kullanılan diğer bir sistem, kapalı sistemler yani fotobiyoreaktörler olarak adlandırılan karmaşık yapıli sistemlerdir (Madhubalaji vd., 2019). Fotobiyoreaktörler, içerisine ışık alacak şekilde şeffaf malzemeden oluşan ya da aydınlatma sistemi içeren, mikroalglerin fotosentez yaparak yetiştirilmesine yarayan biyoreaktörler olarak tanımlanmaktadır (Leong vd., 2023). Fotobiyoreaktörlerde; aydınlatma, karıştırma ve sıcaklık gibi optimize edilmiş koşullar sayesinde büyüme koşulları kontrollü ilerlemektedir, kirlilik yükü minimum düzeyde olduğu için kontaminasyon riski çok azdır ve daha uzun yıllık mikroagler yetiştirilmesi mümkündür. Bu nedenle verim açık havuz sistemlerine göre 3 kat daha fazladır (I. Ahmad, Abdullah, vd., 2021; Carvalho vd., 2006; Vuppaladadiyam vd., 2018).

Fotobiyoreaktörler; tübüler sistem, karıştırmalı tank sistemi, düz panel sistemi ve torba tipi sistemi olmak üzere dörde ayrılmaktadır (Abdur Razzak vd., 2024; Chanquia vd., 2022). Tübüler sistem reaktörleri şeffaf malzemelerden inşa edilmektedir, bu da ışıktan maksimum seviyede yararlanmayı mümkün kılmaktadır. Tübüler sistem, reaktörlerin yerleştirilme yönüne bağlı olarak yatay ve dikey olabilir. Dikey yönde yerleştirilen tübüler sistemin kabarcık kolon ve hava kaldırmalı kolon sistemleri olmak üzere iki çeşidi vardır. En çok tercih edilen sistem, kabarcık kolon sistemidir. Tüp ortamını karıştırmak için, tüp zemininden içeriye CO₂ kabarcıkları verilir (Vuppaladadiyam vd., 2018). Hava kaldırmalı kolon sistemlerinde ise karışım verimlidir, enerji tüketimi azdır, işletimi kolaydır ancak, tasarımı zordur (Abdur Razzak vd., 2024). Düz panel sistemli reaktörler, ışık alma konusunda en verimli yüzeye sahiptir. Temizliği kolaydır, oksijen düşük seviyelerde birikir (Yousuf, 2020). Karıştırmalı tank sistemlerindeyse pervane yardımıyla ortam sürekli karıştırılmakta, bu sayede alttan verilen CO₂ kabarcıkları tankın her yerine ulaşmaktadır (Vuppaladadiyam vd., 2018). Torba tipi sistemler daha ekonomik ve steril olduğu için tercih edilmektedir. Aydınlanan yüzey alanı da fazla olduğu için verimi yüksektir. Ancak torbaların sık değiştirilme ihtiyacı çevre açısından sınırlamalar getirmektedir (Chanquia vd., 2022). Reaktörlere ait görseller Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Biyoreaktör tiplerinin görselleri (a) hareketsiz havuzlar (b) yarış pisti havuzları (c) dairesel havuzlar (ç) karıştırılmalı tank sistemi (d) kabarcık kolon sistem (e) hava kaldırmalı kolon (f) yatay tübüler sistem (g) düz panel sistemi (h) torba tipi sistem (Abdur Razzak vd., 2024; Öncel vd., 2016)

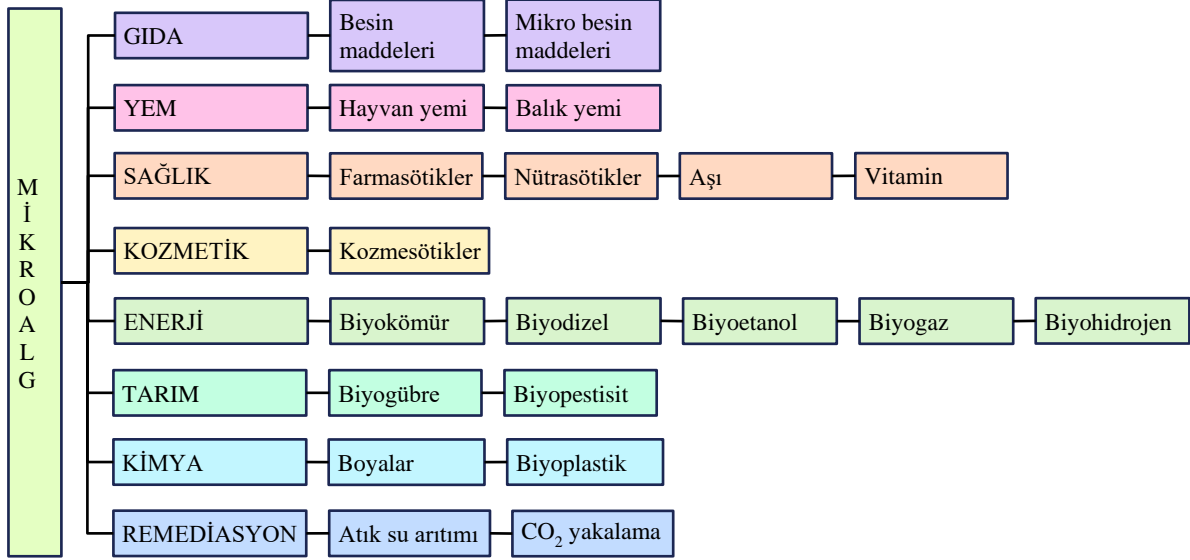
Fotobiyoreaktör tasarımında, sistem verimliliğini doğrudan etkileyen parametreler bulunmaktadır. Mikroalgler fotosentez yaptıklarından dolayı etkili bir ışık kaynağına ihtiyaç duyarlar ve ışığı açıkta kalan yüzeylerinden alırlar. Işığın her alana etki etmesi için ise reaktörlerde ince yapılı tasarım kullanılmalıdır. Havanın, sıcaklığın, pH'nın dengelenmesi, topaklanmanın önlenmesi, ölü yapıların reaktör duvarına yapışmanın engellenmesi ve ışığın kültürün her yerine ulaşması için reaktörün iyi karıştırılması bunun için ise iyi bir karıştırma sisteminin olması gerekir. Sıvı ve gaz fazları arasında etkin bir madde transferi olmalıdır (Huang vd., 2017; Tan vd., 2020). Yüksek hücre yoğunluğuna sahip verimli bir reaktörde oksijen üretimi de yüksek olacaktır ancak yüksek oksijen seviyesi mikroalg kültürü için zehir etkisi oluşturmaktadır. Bu durumun çözümü için yüksek akış hızlarına sahip çoklu dikey reaktörler tercih edilebilir (Lee, 2016; Vuppaladadiyam vd., 2018). Örneğin Wei vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, reaktörde karıştırılmalı bir sistem kullanılarak hasat veriminin %97'nin üzerine çıktığı analiz edilmiştir. Biyokütle veriminin bağlı olduğu bir diğer parametre sıcaklıktır. Gaz çözünürlüğü ve kimyasal yapının da dengede kalması için mikroalglerin yaşayabileceği optimal sıcaklık 20-24°C arasında sabit tutulmalıdır. Hatta birçok mikroalg türü

16-35°C aralığında hayatta kalabilir. Aynı şekilde pH'ın da mikroalg yaşamı için uygun olan 8,2-8,7 aralığında tutulması gerekmektedir (Huang vd., 2017). Ancak her mikroalg türünün farklı büyüme koşullarına sahip olabileceği unutulmamalıdır. Örneğin, Kalinina vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, *Chlorella vulgaris* en yüksek CO₂ tutulumu ve biyokütle artışı sağladığı optimum koşulların 29-32°C sıcaklık ve 8,4 pH olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kontaminasyonun olmaması için reaktörlerin sık sık temizlenmesi gereklidir (Tan vd., 2020). Soriano-Jerez vd. (2024) tarafından, reaktörlerdeki kirlilik biyokirlilik olarak tanımlanmıştır ve organik, inorganik malzemelerin ve mikroalglerin hem birbirine hem de reaktör yüzeylerine yapışması olarak tanımlanmıştır. Biyokirliliğin ışık geçirgenliğini azalttığı ve fotosentez verimini düşürdüğü, mikroalg kültürünün kalitesini bozduğu, daha sık temizlik gerektiği ve reaktörde duruş gerektirdiği, bunun da hem işletme maliyetlerini hem de çevresel etkiyi arttırdığı belirtilmiştir. Düşük üretim ve düşük işletim maliyetine, araziye en verimli şekilde kullanacak bir tasarıma, tesisin basit işletim sürecine de dikkat edilmesi, reaktör işletiminde verimi artıracaktır (Huang vd., 2017; Tan vd., 2020).

Mikroalglerin yetiştirme ve üretim sistemlerinin tasarımı ve uygulama koşulları, sadece biyokütle verimini değil, aynı zamanda biyokütlenin karbonhidrat, protein ve lipid içeriğini de belirlemektedir. Bu yapı taşları, mikroalglerin çeşitli sektörlerde ürün bazında değerlendirilmesine de imkan sağlayan temel bileşenleri oluşturmaktadır.

2.2. Mikroalglerin Kullanım Alanları

Mikroalg biyokütlesinin insanlar tarafından kullanımı çok eski zamanlara dayanmakta, bu tarih milattan önce 1500'lerin başına kadar uzanmaktadır (Birinci & Çil, 2023). Mikroalgler, bünyelerinde bulunan yağ, protein, karbonhidrat, antioksidan gibi yapı taşları ve diğer bileşenler sayesinde Şekil 2.3'te gösterildiği gibi çeşitli biyoyakıt türlerine, beslenme ürünlerine, kozmetik gibi farklı ve katma değerli ürünlere dönüşebilmektedir (de Souza vd., 2019; Samoraj vd., 2024). Buna ek olarak, biyodizel ve biyoetanol de dahil olmak üzere mikroalg türevi biyoyakıtlar, yenilenebilir ve karbon-nötr yapıları nedeniyle fosil yakıtlara umut verici bir alternatif teşkil etmektedir (Yu vd., 2024). Yeşil biyoteknoloji, tarımda biyogübre üretimi ve fitoremediasyon, toprak düzenleyici ve iyileştirici etkisi için sürdürülebilir bir kaynak olarak mikroalglerin kullanılması, mikroalglerin çok yönlülüğünü ve tarım uygulamalarında sürdürülebilirliği vurgulamaktadır (Osorio-Reyes vd., 2023). Mikroalgler fotosentetik yapıları sayesinde CO₂'yi tüketerek baca gazı arıtımı ve bu sayede sera gazı azaltımı sağlamakta, atık sulardaki kirleticileri aynı anda indirgeyerek atık su arıtımı, arıtım sırasında da biyokütle artışını gerçekleştirebilmektedir (Brooke, Eckhardt, vd., 2025).



Şekil 2.3. Mikroalgelerin kullanım alanları (Chisti, 2020; Gao vd., 2024; Khavari vd., 2021; Madeira vd., 2017; Martínez-Ruiz vd., 2025; Okeke vd., 2022)

Mikroalgelerin ham madde ya da katkı maddesi olarak kullanıldığı temel sektörler ve bu uygulama alanlarında elde edilen ürünler aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

2.2.1. Gıda sektöründe mikroalgler

Kaynakların tükenmeye başlaması, insanların besin değeri yüksek, daha kaliteli ve daha lezzetli gıdalara yönelmesi, arz talep dengesinde yaşanan krizler, enerji maliyet ve çevresel sorunlar, sektörü ve araştırmacıları gıda kaynağı konusunda yeni alternatif arayışına itmiştir. Fotosentetik mikroorganizmaların çeşitli bir grubu olan mikroalgler, çeşitli endüstrilerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Yüksek protein içeriği, üretim maliyetlerindeki kontrol güveni ve çevre dostu olmasından dolayı son zamanlarda umut verici ve güvenilir bir gıda kaynağı olmuştur (Gao vd., 2024; Tan vd., 2020)

Mikroalgler başlangıçta tıpta hem diyet hem de tıbbi bir bileşen olarak kullanılmıştır. Raporlara göre, mikroalgler 2000 yıl önce açlık hastalığını tedavi etmek için geliştirilmiştir (Khatoun & Pal, 2015). Çin'de, insanlar kıtlık zamanında hayatta kalmak için ipliksi bir mavi-yeşil alg türü olarak bilinen *nostoc* yedikleri bilinmektedir. Afrika ve Meksika gibi ülkelerde de *Aphanizomenon* türü yıllardır yiyecek olarak tüketilmektedir (Ryu vd., 2015).

İçerdikleri protein, sağlıklı lif, polisakkarit, doymamış yağ asitleri, A, B, C, D, E vitamini, kalsiyum, potasyum gibi mineral içerikleri ve esansiyel yağlardan dolayı süper gıda olarak nitelendirilen mikroalgler insan sağlığına yönelik kanıtlanmış faydalarıyla gıda endüstrisinde stratejik bir öneme sahiptir (Fitzgerald vd., 2011).

Ayrıca mikroalglerin besin maddeleri ve biyoaktif bileşikleri, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve gıdaların dokusunu, rengini ve besin değerini iyileştirmek için doğal gıda katkı maddesi olarak kullanılır. Bazı mikroalg türleri ayrıca toz, tablet veya kapsül formunda doğrudan alınabilen gıda takviyesi olarak da kullanılır (Lafarga, 2019). Gıdalara ilave edilen ya da direk olarak gıda olarak kullanılan bazı mikroalg türleri aşağıdaki gibidir (A. Ahmad & Ashraf, 2023; Birinci & Çil, 2023; Gao vd., 2024; Lafarga, 2019; Sasa vd., 2020):

- *Chlorella* türündeki mikroalgler (*Chlorella* sp. *Chlorella vulgaris* vb.), aromalı krakerlerde, glutensiz ve soya içeriksiz ürünlerde, meyve sularında, yoğurt, peynir gibi gıda ürünlerinde kullanılmaktadır.
- *Arthrospira* sp. ve *Chlorella* sp. vegan protein kaynağı olarak piyasaya sürülmektedir. Vegan somon adıyla gıda içeriğinde yer almaktadır.
- *Nannochloropsis oculata* isimli mikroalg dondurmalara gıda takviyesi olarak ilave edilmektedir.
- *Chlamydomonas reinhardtii*, *Arthrospira platensis*, *Auxenochlorella protothecoides*, *Dunaliella bardawil*, *Euglena gracilis* isimli mikroalgler aminoasit yapıları sayesinde GRAS¹ olarak tanımlanmaktadır.
- *Staurosira* sp. isimli mikroalg eikosapentaenoik asit (EPA) ve dokosaheksaenoik asidi (DHA) katkılı takviyelerde görülmektedir.
- *Dunaliella salina* ve *Lobosphaera incisa* çocuklar için üretilen gıda takviyelerinde bulunmaktadır.

Gıda sektörü için mikroalg bazlı ürünler her ne kadar geleceğin çözümcül yaklaşımı olarak nitelendirilse de bazı etkiler mikroalglerin gıda olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Kirleticiler ve ölçek problemleri gibi üretimsel sıkıntılar, üretim süreçlerindeki yüksek maliyetler, çevresel açıdan kaynak tüketimi, alglerden gelebilecek toksisite ya da alerjik etkiler, ürünün tüketimi ve ticari olarak piyasaya arzı için yasal süreçler, tüketicilerdeki renk, koku, tat gibi ön yargılar bu darboğazlardan bazılarıdır (Mendes vd., 2022).

2.2.2. Yem sektöründe mikroalgler

Hayvanların beslendikleri yemin içeriği ve kalitesi, hayvanların büyüme hızlarını, gelişimlerini, üreme kalitesini, et ve süt verimini etkiler (Mobin vd., 2019). Mikroalglerden elde

¹ Genel olarak güvenli kabul edilen

edilen proteinler, çoklu doymamış yağ asitleri ve biyoaktif bileşikler, birçok sucul tür, geniş getiren hayvanlar, domuzlar ve kümes hayvanları için hayvan yemini desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Mikroalgler özellikle, gıda ve yem üretiminde genellikle yağlı balıklardan elde edilen omega-3 yağlarının alternatif kaynakları olarak hizmet vermektedir (A. Ahmad & Ashraf, 2023).

Mikroalg bazlı lipit kapsüllerinin takviye olarak hayvancılıkta kullanılması süt içeriğindeki omega-3 yağ asidini arttırmaktadır. Çoklu doymamış yağ asitlerinin ineklerdeki süt verimini arttırdığı görülmüştür. *Gracilaria* sp., *Kappaphycus* sp., *Laminaria* sp., *Undaria* sp., *Porphyra* sp., gibi mikroalg türleri hayvan yeminde sıklıkla kullanılan kırmızı ve kahverengi alg türleridir. Hatta *Porphyra* sp. türünün yıllık hasadı yaklaşık olarak 2,5 milyar dolar değerindedir. *Laminaria digitata* türünün ise domuzların günlük ölçülen ağırlıklarında %10'a yakın artış sağladığı görülmüştür (Madeira vd., 2017; Yaakob vd., 2014).

Porphyridium sp. tür mikroalg, tavuklarda kullanıldığında yumurta sarılarındaki kolesterolün %10'u düşmektedir. Karotenoid artışından dolayı da yumurta sarıları daha belirgin olmaktadır. Almanya'da *Chlorella* sp. ve *Arthrospira* sp. mikroalglerini içeren doğal yem markası bulunmaktadır. Mikroalg biyokütlesinin kümes hayvanlarında yem kaynağı olarak kullanılması %5-10 seviyesine kadar güvenlidir. Daha fazla kullanımı hayvanlar üzerinde olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir (Souza vd., 2021; Yaakob vd., 2014)

Mikroalglerin su ürünlerinin yem sektöründe de kullanımı oldukça yaygındır. Mikroalgler, yapılarındaki kaliteli protein, lipit, vitamin ve karotenoidler sayesinde kabuklu deniz ürünleri ve balıkların birincil besin kaynağı haline gelmiştir. *Nannochloropsis* sp., *Isochrysis* sp., *Pavlova* sp. mikroalgleri bunların başında gelmektedir. *Cryptocodinium cohnii* yüksek DHA ve *Nannochloropsis* sp. yüksek EPA içeriği ile ticarileştirilmiştir (Yaakob vd., 2014).

2.2.3. Sağlık ürünlerinde mikroalgler

Mikroalgler; antibiyotik, antiviral ve anti inflamatuvar ilaçların geliştirilmesinde kullanılan polifenoller, vitaminler, biyoaktif peptitler, karotenoidler ve omega-3 yağ asitleri gibi biyoaktif metabolitleri içerdikleri için bu tür ilaçların içeriğinde kullanılabilirler. Ayrıca yüksek amino asit, mineral, tuz ve vitamin içerikleri nedeniyle kozmetik ve cilt bakım ürünlerinde de popülerdirler. Bunların yanında mikroalgler monoklonal antikolar ve diğer terapötik proteinler üretme yetenekleri açısından da incelenmektedir, bu da tıbbi tedaviler için yeni yollar açabilir (Khavari vd., 2021).

2.2.3.1. Farmasötik ve nütrasötik bileşenler

Mikroalglerden elde edilen çeşitli bileşikler ilaç sanayinde tümör ve kanser önleyici, antiviral, anti inflamatuvar, antibakteriyel vb. sebeplerle kullanılmaktadır. Kullanılan bu yapıların başında syanovirin, oleik asit, linoleik asit, palmitoleik asit, vitamin E, vitamin B12, beta karoten, fikosiyanın, lutein ve zeaksantin gelmektedir. Fonksiyonel gıda takviyeleri olarak omega-3 yağ asitleri, linoleik asitler, fitosteroller, prebiyotikler, probiyotikler, karotenoidler, polifenoller, vitaminler vb. bileşenler mikroalglerden elde edilmektedir (Mobin vd., 2019).

2.2.3.2. Aşı

Mikroalglerde tek bir kloroplast bulunmaktadır ve yüksek protein biriktirme özelliği sayesinde rekombinant proteinlerin güvenli bir şekilde üretilmesini sağlar. *Chlamydomonas reinhardtii* türü mikroalgde de aşı üretimi için gerekli olan uygun kloroplast bileşeni bulunmaktadır. Domuz ateşi virüsünde kullanılan E2 proteinli aşılarda, *S. aureus*'a karşı yapılan D2-CTB füzyon proteini içeren aşılarda, HPV virüsünde uygulanan E7 onkoproteini içeren aşılarda bu rekombinant proteinlere örnek verilebilir (Khavari vd., 2021; Sathasivam vd., 2019).

2.2.3.3. Vitamin

Mikroalgler, sentetik vitaminlere alternatif olabilecek geniş bir doğal vitamin spektrumuna sahiptir. Örneğin beta-karoten önemli bir A vitamini kaynağıdır ve *Dunaliella* türü mikroalglerden elde edilebilir (Rahman, 2020). *Chlamydomonas* sp., *Chlorella* sp., *C. vulgaris*, *S. quadricauda*, *C. reinhardtii*, *P. moriformis.*, *S. acutus*, *S. obliquus*, *C. pyrenoidosa*, *C. sorokiniana*, *D. tertiolecta*, *T. Suecica* gibi mikroalglerden B, C ve E vitaminleri özütlenilmektedir. Bu vitaminler piyasada doğrudan cilt koruması, yaşlılık önleme, göz ve kalp hastalıkları, sinir sistemi hastalıkları gibi kozmetik ve sağlık amaçlı kullanılmaktadır (Del Mondo vd., 2020; Sathasivam vd., 2019).

2.2.4. Kozmetik sektöründe mikroalgler

Kozmetik sektörü her geçen gün hızla büyümekte olan ve sürekli daha iyisini arayan bir sektör haline gelmiştir. Tüketiciler, özellikle nemlendiren, cilt beyazlatan, hücre yaşlanmasını geciktiren, ultraviyole (UV) koruma sağlayabilen, antimikrobiyal ürünler konusunda sektörden fazlasını beklemektedir. Bu nedenle sektörde bunları sağlayacak ve sentetik pigmentlerin yerine geçebilecek hem daha sağlıklı hem de daha verimli aktif pigment arayışındadır. Aktif pigmentler konusunda birçok türü bulunan mikroalglerin kozmetik sektöründe kullanımı bu ihtiyaçlardan dolayı yaygınlaşmaya başlamıştır (Couteau & Coiffard, 2018; Yarkent vd., 2020).

Kozmetik sektöründe kullanılan mikroalgler hızlı büyüme ve yüksek getiri elde etme potansiyeline sahip olduğundan, mikroalglerin katkısıyla yeni kozmesötik ürünler ticarileştirilmektedir. Kozmesötik terimi için “nütrasötik” teriminden esinlenilmiştir. Bu kozmetik ürünler; yaşlanma karşıtı, kırışıklık azaltma, güneş ışınlarına karşı koruma gibi farmakolojik aktiviteye sahip olduğundan dolayı bu ismi almıştır (Borowitzka, 2018; Chisti, 2020).

Karotenoidler, polisakkaritler, mikosporin benzeri aminoasitler, astaksantin, fikosiyenin, beta karoten, fukoksantin vb. aktif yapılar kozmetik endüstrisinde kullanılan bazı mikroalg bazlı biyoürünlerdir (Katiyar vd., 2017; Morançais vd., 2018; Nishshanka vd., 2022). Özellikle *C. vulgaris*'ten elde edilen karotenoidler; UV koruması, kolajen üretimi ve kırışıklık önlemek için ürünlere eklenmektedir (Katiyar vd., 2017; Ryu vd., 2015). *Porphyridium cruentum* türü mikroalglerden ise polisakkaritler elde edilmektedir (Paniagua-Michel, 2015). Fukoksantin ise *Tisochrysis lutea* ve *Phaeodactylum tricornutum* isimli mikroalglerden elde edilmektedir ve antioksidan özelliklere sahiptir (Morochó-Jácome vd., 2020; Nishshanka vd., 2022). *Dunaliella salina* isimli mikroalgden üretilen beta karoten, cilt yenilenmesine katkı sağlayan pigmentlerdendir (Ryu vd., 2015).

Cildin kuruması ve nemli kalmasını sağlamak adına cilt üzerinde hidrofobik yapıyı oluşturacak ve suyun kaçmasını önleyecek bir tabaka oluşturulmalıdır. Nemlendirmeye yardımcı olacak bu maddenin bitkisel ve hayvansal ürünlerden tedarik edilmesi maliyetli olmaktadır. *Chlorella* ve *Porphyra* türü mikroalgler bu nemi sağlayacak bileşenler üretmektedir (Uthaiyah vd., 2019).

Zamanla hücrelerde biriken ROT² bileşeni cildin yaşlanmasını hızlandırır. UV ışınları da ROT oluşumunu tetiklemektedir. Mikroalgler ise ciltteki ROT oluşumunu engelleyen pigmentler üretebilmektedir. Bu nedenle kozmetik firmaları güneş kremleri ve diğer kozmetiklerde kullanılan sentetik kimyasallara alternatif olarak mikroalgleri kozmetik sektöründe kullanmaya başlamıştır (Uthaiyah vd., 2019).

Haematococcus pluvialis ve *Chlorella zofingiensis* mikroalglerinden elde edilen astaksantin, *Aphanizomenon* mikroalglerinden elde edilen mavi ve kırmızı renge sahip fikosiyenin doğal pigmentasyon özelliğine sahip olduğundan kozmetiğin önemli ürünlerinden olan ruj, göz kalemi, göz farı gibi ürünlere renk verici olarak kullanılmaktadır (Chhandama vd., 2023; Morançais vd., 2018). Bu renk verici pigmentler özellikle Japonya ve Çin'de oldukça

² Reaktif oksijen türleri

popülerdir (Sousa vd., 2008). Astaksantin aynı zamanda güneş koruyucu özelliğinden dolayı güneş kremlerinde yer almakta ve nemlendiricilere ilave edilmektedir (Morocho-Jácome vd., 2020; Ryu vd., 2015).

Güçlü bir yeşil renge sahip olan klorofil pigmenti özellikle *Chlorophyta* türlerinden elde edilebilmektedir. Klorofil maddesi kozmetik dahil ilaç ve gıda sanayiinde de renklendirme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Klorofilin bir diğer özelliği ise kokuları absorbe edebilmesidir. Bu özelliğinden dolayı da deodorant, diş macunu gibi hijyen ürünlerinde kullanılmaktadır (Chhandama vd., 2023; Morocho-Jácome vd., 2020).

2.2.5. Enerji sektöründe mikroalgler

Hızla artan nüfus ve aşırı tüketim eğilimi, sınırlı olan fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesine neden olmaktadır (IEA, 2025). Aynı zamanda fosil yakıtlar çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir değildir ve karbondioksit, azot bileşikleri, metan ve kükürt dioksit gibi sera gazlarına sebep olmaktadır. Bu gazlar da iklim değişikliğine sebep olan sera etkisini ortaya çıkarmaktadır. Artan küresel enerji güvenliği endişeleri ve fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan çevresel bozulma, sürdürülebilir ve yenilenebilir alternatifler üzerinde yapılan araştırmaları artırmıştır (IEA, 2023). Biyoyakıtlar fosil türevi yakıtlara göre toksik değildirler, biyolojik olarak parçalanabilirler ve kükürt oranları daha düşüktür. Bunun yanında biyoyakıtlar kısa işleme süreleri ve ham maddelerinin sürekli yenilenebilirliği sayesinde sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak kabul edilmektedirler, karbon nötr potansiyeline sahip olduğu için fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilirler (Adesanya vd., 2014).

Çevreye zararı olmayan, sürdürülebilir ve biyokimyasal türevi bileşenlere dönüşebildikleri için mikroalgler yaşayan biyorafineriler olarak adlandırılmaktadır (I. Ahmad, Yuzir, vd., 2021). Mikroalg biyokütlesi, yapısında bulunan nitelikli lipid, karbonhidrat ve protein yapıtaşları sayesinde çeşitli termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm süreçleri için ideal bir yapıya sahiptir. Bu özelliklere bakıldığında, mikroalgler piroliz, transesterifikasyon, fermantasyon gibi süreçlerle katı, sıvı ve gaz formunda farklı türde biyoyakıt ürünlerine dönüştürülebilmektedir (Adesanya vd., 2014; Arutselvan vd., 2022). Bu nedenle mikroalgler, enerji sektörü için çok taraflı dönüşüm olanakları sunan stratejik bir ham madde kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Wijffels & Barbosa, 2010).

2.2.5.1. Katı ürünler

Biyokömür: Biyokömür, mikroalglerin yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 300-700°C) piroliz edilmesi ile elde edilir (Ali vd., 2022). Elde edilen biyokömür gübre olarak kullanılabilir, aynı

zamanda gözenekli yapısı sayesinde karbon gazını adsorbe ederek CO₂'yi %84 oranlarına kadar azaltabilir (Shahid vd., 2020). Arutselvan vd. (2022)'ne göre piroliz yoluyla *Scenedesmus sp.* türü mikroalgden biyogaz üretim potansiyeli %15-16 civarındadır.

2.2.5.2. Sıvı ürünler

Biyodizel: Biyodizel, iklim değişikliği ve kaynak tükenmesine alternatif olarak geliştirilen ve kolza, soya gibi bitkilerin içeriğindeki yüksek yapılı yağlardan, hayvansal yağlardan ve atık yağlardan halihazırda üretilmektedir. Ancak üretim, bitkilerin mevsimsel gelişimine ve verimine bağlı olarak değiştiğinden ve diğer atıkların arzındaki zorluklardan dolayı biyodizel üretiminin verimi stabil değildir. Mikroalglerin ise yapılarında bulunan yüksek oranda yağ molekülleri ve mevsime bağlı olmayan yetiştiriciliğinden dolayı onları biyodizele dönüşmesi için mükemmel bir ham madde yapmaktadır (I. Ahmad, Yuzir, vd., 2021; Bhalamurugan vd., 2018; Howlader & French, 2020). Mikroalglerden biyodizele dönüşüm işlemi, mikroalglerin yapılarındaki lipitlerin metanol ya da etanol türevi alkol varlığında transesterifikasyon işlemi sonucundan gerçekleşir (Connelly, 2014). Araştırmalar; *Nannochloropsis sp.*, *Chlorella sorokiniana*, *Dunaliella salina*, *Scenedesmus sp.*, *Isochrysis galbana*, *Scenedesmus dimorphus*, *Scenedesmus bijuga*, *Scenedesmus acuminatus*, *Scenedesmus obliquus*, *Pavlova lutheri* türü mikroalglerden yüksek verimli biyodizel üretilbildiğini göstermektedir (Bhalamurugan vd., 2018).

Biyooetanol: Mikroalglerin bünyelerinde bulunan yağ yapıları biyodizele, karbonhidrat yapıları ise fermantasyon ile biyooetanolle dönüşebilmektedir. Biyooetanol bir biyoalkol türevidir ve bazı ülkelerde araçların yakıtlarında belli oranlarda biyooetanol karıştırılması zorunluluk haline getirilmiştir (Connelly, 2014; Voloshin vd., 2016). Mısır, soya fasulyesi, buğday gibi bitki kökenli selülozik yapıların, nişasta ve şeker türevi ham maddelerin fermantasyonuyla elde edilen biyooetanol 1. nesil olarak adlandırılırken mikroalglerden elde edilen biyooetanol yapıları 2. nesil biyokütle olarak adlandırılmaktadır (Connelly, 2014; Rathinavel vd., 2024). *Arthrospira sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas sp.*, *Chlorococcum littorale*, *Chlorella sp.*, *Dunaliella sp.*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Scene desmus sp.*, *Tetraselmis suecia* mikroalglerin karbonhidrat içerikleri yüksek olduğundan biyooetanol üretimi için oldukça uygun olduğu tespit edilmiştir (Connelly, 2014; Moreira vd., 2023; Suganya vd., 2016; Thangam vd., 2021; Voloshin vd., 2016).

2.2.5.3. Gaz ürünler

Biyogaz: Mikroalglerin CO₂ sindirebilme yeteneği sayesinde anaerobik ortamlarda

arıtma sağlanmaktadır. Mikroalglerin anaerobik olarak çürütülmesi ya da ışık almayan ortamda fermantasyona tabi tutulmasıyla CO₂ ve metanı özümsemeleri ile biyogaz üretimi sağlanmış olur (Chia vd., 2018; Giwa vd., 2018).

Biyohidrojen: Hidrojen, enerji kaynağı olarak güvenli sayılsa da verimliliği oldukça düşük bir kaynaktır. Aynı zamanda biriktirilmesi konusunda sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu zorluklar aşıldığında kullanım açısından verimli bir enerji kaynağı haline geleceği tahmin edilmektedir (Oncel vd., 2015). Mikroalglerden elde edilen biyohidrojen, mikroalglerin karanlık ve oksijenli-oksijensiz fermantasyon ya da anoksik ve yüksek ışıklı fotoliz ortamlarında hidrojen molekülünü üretebilme kabiliyetlerine bağlı olarak gelişir (Ali vd., 2022; Chia vd., 2018). *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis gaditana*, *Nannochloropsis oculata*, *Scenedesmus obliquus*, *Ulva reticulate* biyohidrojen sentezi sağlayabilen bazı mikroalg türlerindedir (Ali vd., 2022; Arutselvan vd., 2022).

2.2.6. Tarım sektöründe mikroalgler

Sürdürülebilir bir tarım için hem toprağın kalitesi hem de bitkinin verimi göz önünde bulundurulmalıdır. Mikroalglerin tarım sektöründe sentetik pestisit ve gübrelere alternatif bir malzeme olarak kullanılması, dönüştükleri biyogübre, biyostimulant, biyopestisitler sayesinde toprağa ve suya olan zarar en aza indirilirken kimyasallara olan bağımlılık azaltılabilir. Aynı zamanda bitki büyümesine destek olan mikroalg bazlı gübreler iş gücünden ve zamandan da tasarruf sağlayabilir (I. Ahmad, Yuzir, vd., 2021; Guo vd., 2020).

2.2.6.1. Biyogübre

Tarım sektörü, zamanla artan dünya nüfusu ile gelişen gıda ihtiyacına olan talebe yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle yetiştirilen tarım ürünlerinin yüzde yüze yakın bir verimle piyasaya sürülmesi istenmektedir. Bunun için de geleneksel kimyasal gübrelere olan bağımlılık son yıllarda had safhaya ulaşmıştır (Braun & Colla, 2023). Bitkilerin daha hızlı ve etkin şekilde büyümelerini sağlamak için kullanılan kimyasal gübreler, toprağa ve suya son derece zararlıdır. Kirlenen toprağa ve suya verilen zararları azaltmak ve daha sürdürülebilir bir tarım uygulaması için biyogübreler kullanılmaktadır (Udayan vd., 2021).

Biyogübre; bakteri, mantar, mikroalg gibi mikroorganizmalar kullanılarak elde edilen doğal yapılardır (Sani vd., 2022). Doğal yapıları sayesinde toprağın hem kalitesini hem de doğal özelliklerini geri kazandırmaya yardımcı olurlar (Rupawalla, 2022). Bitki bilimciler bir bitkinin gelişip büyüebilmesi için on üç ayrı kimyasal bileşenin gerekli olduğunu ispatlamışlardır. Bunların en önemlisi ise N olduğu ortaya çıkmıştır. Mikroalgler ise yapılarında zenginçe

bulunan N, P ve K bileşenlerinden dolayı biyogübre üretimi için oldukça uygundur (Romero-García vd., 2022; Rupawalla, 2022).

Farklı mikroalg türlerinden elde edilen farklı yapıdaki biyogübrelerin, ürüne etkileri aynı değildir. Ürünün kök yapısı, ürünün ne kadar uzayacağı ve yaprak verimi, ulaşacağı ağırlık, toprağa verilecek biyogübrenin türüne bağlıdır. Her bir mikroalgin bileşen türleri ve değerleri farklılık göstermektedir. Bilimsel çalışmalar sonucunda, mikroalg bazlı gübrelerin her bitkide aynı etkiyi yaratmadığı tespit edilmiştir. Bu sayede tarımda daha doğru ve etkili gübreleme yöntemleri geliştirilmiştir (Braun & Colla, 2023). Örneğin, laboratuvar koşullarında bamyaya, buğday ve marul yetiştirilen toprağa uygulanan *Chlorella vulgaris* biyokütlesini içeren gübre, bitkilerde sırasıyla çimlenme artışı ve hızlı büyüme, kök ağırlıklarında, N ve P içeriklerinde artışı, protein ve pigmentlerde artışı ve serbest amino asitlerde azalma şeklinde etki etmiştir (Alvarez vd., 2021).

2.2.6.2. Biyopestisit

Mikroalg biyokütlesinden elde edilen biyogübre ve biyopestisit arasındaki fark, gübrenin etkisinin bitkiler üzerine olması, pestisitlerin ise patojenik organizmalar üzerinde etki ediyor olmasıdır (Chhaya, 2021). Günümüzde sentetik pestisitler verimin düşmemesi için düzenli olarak uygulanmaktadır. Ancak kullanılan bu sentetik pestisitler hem çevreye hem de toprağa ve canlılara zarar vermektedir (Kour vd., 2020). Bu sentetik pestisitlerden özellikle diklorodifeniltrikloroetan (DDT) içeriğinde olanlar oldukça zehirlidir (Kashyap vd., 2023). Biyopestisitler, zararlı mikroorganizmalara karşı etkili, oksidatif stresi önleyici ve hücre koruyucu, viral ve fungal enfeksiyonları önleyici özelliğe sahiptir. Sentetik pestisitlere göre zararı yok denecek kadar azdır, hedef mikroorganizma haricindeki diğer canlılara zarar vermez ve sürdürülebilirdir (Chhaya, 2021).

Sentetik pestisitlerde hedefe ulaşma başarısı sadece %5'tir ve geri kalan madde hedef dışı canlılara ulaşmaktadır. Biyopestisitlerde ise hedefteki zararlı canlıya ulaşma başarısı yüzde yüze yakındır ve hedef dışı canlılara etki etmez. Sentetik pestisitler biyolojik olarak parçalanamazlar ve biyobirikimle diğer canlılara ve toprağa zarar verirler. Biyopestisitler ise biyolojik olarak parçalanma özelliğine sahiptirler. Biyopestisitlerin olumsuz yönlerinden biri sentetik pestisitlere göre üretim maliyetlerinin fazla olmasıdır, bu nedenle çiftçiler daha çok sentetik olanları tercih etmektedir (I. Ahmad, Yuzir, vd., 2021). Mikroalgler yapılarındaki allelokimyasallar yani ikincil metabolitler sayesinde, çevresinde gelişen organizmaları kimyasal yollarla etkileyebilmektedir. Bu özellik sayesinde mantar, böcek vb. öldürücü olarak

kullanılmaktadır. Domoik asit, saksitoksin, brevetoksin, vanilik asit, kuersetin bu allelokimyasallara örnek verilebilir. *Chlorella* sp. ve *Nannochloropsis* sp., antibakteriyel ve antifungal etkiye sahiptir. *Dunaliella* sp. ise herbisitlerde en sık kullanılan mikroalg türüdür. *Haematococcus pluvialis* yapısındaki fenolik ve astaksantin bileşikleri antifungal etkiye sahiptir. *Microcystis* sp. ise yapısındaki peptitler sayesinde antifungal ve antibakteriyel özellik sunar (Casanova vd., 2023).

2.2.7. Kimya sektöründe mikroalgler

Mikroalgler klorofil, karotenoid gibi pigmentleri doğal olarak sentezleyebildikleri için kimya alanında da popüler hale gelmiştir (Borowitzka, 2013). Ayrıca son zamanların popüler ürünlerinden ve fosil ham madde bazlı plastiklere alternatif olan, doğada çözünen biyoplastikler de mikroalglerden üretilmektedir (Koller vd., 2014).

2.2.7.1. Boya

Mikroalgler yapılarındaki farklı türdeki bileşenler sayesinde renk pigmentleri oluşturabilirler. Örneğin, klorofil bileşeni yeşil pigmentini oluşturmaktadır. Karotenoidler ise sarı, kırmızı ve turuncu pigmentleri meydana getirmektedir. Renk pigmentleri gıda ve ilaç endüstrisi, kimya ve tekstil sanayi, kozmetik gibi pek çok alanda kullanılmaktadır (Mobin vd., 2019). *Haematococcus* türünden elde edilen astaksantini balık etlerinin daha pembe görünmeleri için kullanılmaktadır. Fikosiyanin gıda, ilaç ve kozmetik endüstrisinde renklendirici olarak kullanılmaktadır (Mobin vd., 2019). *Dunaliella salina* isimli mikroalgden elde edilen karoten ve *Haematococcus pluvialis* isimli mikroalgden elde edilen astaksantin bileşenleri turuncu renge sahiptir, *Muriellopsis* sp. isimli mikroalgden elde edilen lutein bileşeni sarı renge, *Chlorella* sp'den elde edilen klorofiller yeşil, *Arthrospira platensis*'ten elde edilen C-fitosiyanin ve alofikosiyanin mavi, *Porphyridium cruentum*'dan elde edilen fitoeritrin kırmızı ve *Arthrospira* sp'den elde edilen fenolikler karışık renge sahiptir. Bu bileşenler, gıda sanayinde içeceklere, süt ürünlerine, makarna, sakız vb, ilaç sanayinde ilaçlara ve takviyelere renk vermek için kullanılmaktadır (Nwoba vd., 2020).

2.2.7.2. Biyoplastik

Son yıllarda, mikroalg biyokütlesinin biyomalzeme kaynağı olarak kullanılmasına yönelik ilgi giderek artmaktadır. Mikroalglerin; mikroalg polimerleri, birlikte karışımlar ve mikroalgal biyomolekül kombinasyonları gibi yeşil malzemeler üretmek için mükemmel bir alternatif olduğu kanıtlanmıştır (C. Zhang vd., 2019). *Scenedesmus* sp. isimli mikroalg kağıt fabrikası ve gübre tesisi atık suları arıtımı sonrası, *Desmodesmus* sp. isimli mikroalg ise domuz

çiftliği atık sularının arıtımı sonrası biyoplastik üretimi için potansiyeli vardır (Chhandama vd., 2023).

2.2.8. Mikroalglerle remediasyon

İklim değişikliği son yıllarda küresel bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Artan CO₂ gazları küresel dengeyi her geçen gün olumsuz etkilemektedir (Onyeaka vd., 2021). Aynı zamanda günümüz endüstriyel faaliyetlerdeki hızlı artış, atık suların kirlenmesindeki birincil etkindir. Su kirliliği ise insan sağlığı ve ekosistem üzerinde ciddi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bu durum, atık su arıtma teknolojilerinde daha etkin, ekonomik, sürdürülebilir teknolojilere itmektedir. Alıcı ortama deşarj edilen atık sular çok çeşitli organik ve inorganik kirleticileri bünyesinde bulundurabilir. En önemli kirlilik yüklerinden birisi de organik kirleticilerdir (Abidli vd., 2022).

Mikroalgler, nitrat ve fosfat gibi besin maddelerini kullanabildikleri için atık su arıtma sistemlerinde önemlidir, besin kirliliğini azaltırken aynı zamanda biyokütle üretimi için bir alternatif sağlar. CO₂ kullandıkları için baca gazı temizliği gibi diğer çevresel uygulamalarda da kullanılırlar (Abu-Ghosh vd., 2021; Adesanya vd., 2014).

Mikroalg kullanılarak biyolojik CO₂ yakalama işlemi, bu tehditle başa çıkmak için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilen karbon yakalama ve depolama yöntemlerine bir alternatif olarak şu anda büyük ilgi görmektedir. Mikroalgler, fotosentez yoluyla atmosferik karbonu tutma ve bu karbonu yüksek katma değerli biyokütleyle dönüştürebilme potansiyeline sahiptir. Böylece biyoenerji ve diğer katma değerli ürünler için lipit üretmek üzere bir karbon kaynağı olarak kullanılabilir (Onyeaka vd., 2021).

Diğer yandan metallere bağlanma özellikleri sayesinde mikroalgler, ağır metalleri ve diğer kirleticileri absorbe etme kapasiteleri nedeniyle biyoremediasyon için yararlı bir araçtır (Birinci & Çil, 2023; Khan vd., 2018).

2.3. Mikroalg Kullanımının Zorlukları

Gıda, yem, gübre ve diğer katma değerli ürünlerin üretiminde mikroalgler en iyi seçeneklerden biri olmasına rağmen, mikroalglerin ve mikroalg bazlı ürünlerin üretiminde bazı zorluklar mevcuttur (Rahman, 2020). Örneğin, açık havuz sistemlerinde yetiştirilen mikroalg kültürü geniş araziye gereksinim duymaktadır. Bu da arazi maliyetlerini arttırmakta; pompa, su kanalı gibi altyapı yatırımlarının artmasına sebep olmakta, tarım arazileri ile rekabete sebep olabilmektedir. Aynı zamanda yerleşim yerlerine yakın bölgelerde uygun geniş arazi bulma

güçlüğü de mikroalg üretiminin miktarını sınırlamaktadır (Borowitzka, 2018; Chisti, 2020). Ayrıca açık mikroalg yetiştirme sistemlerinde kontaminasyon riski oldukça yüksektir, bu da verimi doğrudan etkileyen bir zorluktur (Novoveská vd., 2023). Bu nedenle mikroalglerin yetiştirilmesinde gerekli olan geniş araziler için okyanus tabanlı prosesler geliştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Khan vd., 2018). Mikroalg yetiştiriciliğinde kapalı sistem reaktörlerindeki cam ya da plastik tüp sistemler, pompalar ve diğer sistemler yatırım maliyetini arttırmaktadır (Norsker vd., 2011). Ayrıca kapalı biyoreaktör sistemlerinde kirlenme, en büyük işletim zorluklarının başında gelmektedir. Reaktör yüzeyinin kirlenmesi ışık geçirgenliğini azalttığından dolayı mikroalg biyokütlesi büyümesini engellemektedir. Reaktörlerin temizlenmesi de yüksek su ve kimyasal tüketimine neden olmakta ve üretimin durmasına sebep olmaktadır (Berner vd., 2015).

Mikroalg sistemleri, yetiştirme ve hasat aşamalarında yüksek enerji ihtiyacından dolayı yüksek işletme maliyetine sahiptir, bu da ticareti açıdan uygulanabilirliği kısıtlamaktadır. Özellikle hasat ve biyokütle susuzlaştırma işlemleri işletim maliyetinin yaklaşık %20-30'una sahiptir (Selvaraj vd., 2025). Örneğin Taelman vd. (2013)'ne göre balık yemi üretim süreçlerinde kurutma ve yetiştirme süreçlerinin verimsiz olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda ilk üretim süreçlerinde yüksek karbon salınımına sebep olduğu görülmüştür.

Mikroalgler, geleneksel ham maddelere oranla daha ekonomik gözüktükçe de araştırma ve geliştirme çalışmaları esnasında yüksek mühendislik giderleri ve işletme esnasında yüksek iş gücü ihtiyacını doğurmaktadır (A. Ahmad & Ashraf, 2023). Mikroalglerin üretilmesinde laboratuvar koşullarından işletme koşullarına geçmek çevresel ve ekonomik zorluklar doğurmaktadır. Bunların başında maliyetin artması ve verimin azalması gelmektedir. Çevresel açıdan ise sera gazı emisyonları, su tüketimi ve ötrofikasyon riski artmaktadır (Novoveská vd., 2023).

Mikroalg bazlı ürünlerin sunduğu yüksek potansiyele rağmen, bu ürünlerin eldesinde de teknik, çevresel ve ekonomik engeller bulunmaktadır. Örneğin, mikroalglerin balık yemi için balık unu yerine kullanılması oldukça çevreci bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu üretimin de bazı zorlukları mevcuttur. Bunlardan birisi, her mikroalg türünün biyolojik yapısının farklı olmasından dolayı ve kalın hücre duvarı yapısından dolayı her balık tarafından sindirilemiyor olmasıdır. Bu nedenle sindirilebilir özellikteki mikroalglerin seçilmesi daha doğrudur. Bazı mikroalgler ise balıkların gelişiminden çok besin emilimini ve büyümesini engelleyecek yapıda olabilir (Nagappan vd., 2021). Mikroalglerin doğada keşfedilmemiş binlerce türü bulunurken, yalnızca birkaç türe odaklanması ve bu mikroalglerle sınırlı

araştırma ve üretim yapılması bu zorluklara sebep olabilir. Doğada keşfedilmeyi bekleyen diğer türlerin de araştırılması ile yeni teknolojiler, yeni ürünler ortaya çıkabilir. Genetik mühendisliğinin yapacağı yoğun çalışmalar ile keşfi yapılan yeni türlerden yeni ürünler elde edilebilir (Abu-Ghosh vd., 2021; I. Ahmad, Yuzir, vd., 2021). Genetik olarak yapılacak araştırmalar sayesinde de kalın yapıdaki mikroalg hücre duvarları, yeme eklenecek enzimler sayesinde daha kolay parçalanabilir ve sindirilebilir hale getirilebilir. Ayrıca yapılacak çeşitli yetiştirme teknikleri ya da genetik değişiklikler ile mikroalglerin lipid, omega-3 vb. yapıları arttırılabilir (Nagappan vd., 2021).

Mikroalg kullanılarak üretilen kozmetik ürünleri, mikroalglerden belirli pigmentlerin çıkarılmasının oldukça maliyetli olmasından dolayı kısıtlanmaktadır. Ekstraksiyon tekniklerindeki yenilikler ile düşük maliyetli çözümler üretilebilir. Ayrıca, elde edilen pigmentlerin saflaştırma süreçleri de üretimi zorlaştırmaktadır (Morocho-Jácome vd., 2020). Ferreira vd. (2024) tarafından, mikroalglerden karotenoid çıkarılması esnasında daha çevreci çözümlerin kullanılmasının, bu çözümler malzemelerin devrederek tekrar tekrar kullanılmasının çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabileceği belirtilmiştir. Mikroalglerin tarım alanında kullanılması için halen uzun araştırmaların gerçekleştirilmesi, hangi mikroalg türünün hangi bitki ve toprak için uygun olduğunun üzerinde çalışmaların yapılması gereklidir (Alvarez vd., 2021). Castro vd. (2020) tarafından, mikroalg bazlı biyogübre üretimi sırasında kullanılan sodyum hidroksit kimyasalının, kimyasal atık üretimine neden olduğu belirtilmiştir. Ancak yerçekimi sedimantasyonu gibi alternatif tekniklerin kullanımı ile sodyum hidroksit bağımlılığı ortadan kalkabilir.

Atık suyun karmaşık kirlilik yapısı ve sonrasında oluşabilecek yeni atık türleri, mikroalglerle yapılan arıtmaların en önemli zorluklarından biridir. Aynı zamanda arıtım sonrasında oluşacak çamur türevi biyokütlenin de yine çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi gerekir (Abidli vd., 2022). Atık su arıtma tesislerinde mikroalg kullanmanın diğer riski ise suyun açık alanda olması ile diğer kirlilik ve mikroorganizmalara açık olması ve iklim koşullarına bağlı olarak buharlaşma riskidir (Ali vd., 2022). Atık su arıtma tesislerindeki işletme maliyetleri de bir diğer zorluktur. Çünkü geniş alan gerektiren atık su tesisleri için arazi satın alma ya da kiralama işlemleri gerekir (Abidli vd., 2022). Tüm bunlara rağmen atık su arıtım sistemlerinde kimyasallar yerine mikroalglerin kullanılması gelecek vadede çevreci bir prosestir (I. Ahmad, Yuzir, vd., 2021).

Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında mikroalg bazlı yakıtların üretimi ve işletimi maliyet açısından yüksek gözükmektedir. Bu durum mikroalg bazlı yakıtların

sürdürülebilir özelliğini gölgede bırakmakta ve talebi azaltmaktadır. Örneğin, Collet vd. (2011) tarafından yapılan araştırmada; karıştırma, pompalama ve arıtma işlemlerinde oldukça yüksek enerji gereksinimi duyulduğu belirtilmiştir. Xu vd. (2025) tarafından biyogaz üretimiyle ilgili yapılan çalışmada karbon emisyonlarının endişe verici olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, mikroalglerden biyogaz elde edilmesinin sürdürülebilirlik açısından iyi bir adım olduğu belirtilmiştir.

Mikroalglerin gıda, sağlık ve kozmetik ürünlerinde kullanılmak istenmesi; Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki uluslararası onay verici kuruluşların güvenlik ve kalite standartları konusunda bazı engellere takılmaktadır. Bu onayların ve belgelendirmelerin kabul görme işlemleri uzun sürdüğünden mikroalg bazlı ürünlerin piyasaya arzı ve ticarileşmesi uzun zaman almaktadır (Abu-Ghosh vd., 2021). Mikroalglerin ürünlerde kullanımı, ağır metallerin varlığı ve diğer zararlı olabilecek metabolitler nedeniyle ürün güvenliği açısından risk teşkil etmektedir (Guillenne vd., 2017).

3. MİKROALG BAZLI BALIK YEMİ

Su ürünleri, özellikle balık, insanların büyük bir bölümü için birincil protein kaynağı olarak tercih edilmektedir. Uygun fiyatlı olmasına rağmen yüksek kaliteye sahip protein ve mikro besin maddelerince zengin olan balık, milyonlarca insan için hayati bir besin kaynağı sunmakta ve gıda güvenliğini sağlamaktadır (FAO, 2024; Yadav vd., 2020). Su ürünlerine olan bu talep, su ürünleri yetiştiriciliğini hızlı büyüme gösteren bir gıda üretim sektörüne dönüştürmektedir (Adegboye vd., 2020). Su ürünleri yetiştiriciliğinde yem ile beslenerek üretilen su ürünleri global sektörün üçte ikisini oluşturmaktadır (FAO, 2024). 1980-2010 yılları arasında su ürünleri üretimi 12 kat artmış ve 2010 yılında 60 milyon tona ulaşmıştır (Yaakob vd., 2014). Yine FAO'nun SOFIA³ sonuçlarına göre ilk kez 2022 yılında su ürünleri yetiştiriciliği avcılığın önüne geçerek ana üretim kaynağı olmuştur (FAO, 2024). Beslenme ihtiyaçlarına olan bu talebi karşılamak adına artan ve büyüyen su ürünü çiftliklerinde, üretimin verimli olması için her bir su ürünü türüne uygun balık yeminin kullanılması, bu kapsamda balık yemlerinin kolay ulaşılabilir ve içeriklerinin zengin olması önem arz etmektedir (Zlaugotne vd., 2023). Türkiye'de de balık yemi sektörü, çiftlik yetiştiriciliğine bağlı olarak büyümektedir. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğü Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü'nün yayınlamış olduğu Su Ürünleri Ürün Raporu 2025'e göre Türkiye'de 2014 yılında 355.571 ton olan balık yemi üretiminin 2024 yılında 868.654 tona çıktığı raporlanmıştır (Tarım & Bakanlığı, 2025). Yıldırım, (2008) tarafından yapılan araştırmada ise Türkiye'de balık yemi üretim sektörünün gelişmesi, su ürünleri yetiştiriciliği ile paralel gittiği vurgulanmıştır.

Balık yemi olarak da bilinen su ürünleri yemleri, çiftlikte yetiştirilen su ürünlerinin normal işlevlerini yerine getirmesi, bağışıklıklarının devam etmesi, büyümesi ve verimli şekilde üremelerinin sağlanması için, çok sayıda organik ve besin dışı yem katkı maddesi kullanılarak tasarlanmış bir yem türüdür (Encarnação, P., 2016; FAO, 2024). Bu karışımın içerisinde su ürünleri canlılarının besin ihtiyaçlarını karşılayacak ham maddeler, yağlar, vitamin ve mineraller, protein ağırlıklı hayvani unlar bulunmaktadır (Hua vd., 2019). Yemler basitçe, bu malzemelerin öğütülmesi, pişirilmesi, kurutulması, preslenmesi ve pelet formuna getirilmesi ile elde edilir. Balık yemleri yarı ticarileşmiş ürünlerdir ve yerel tedarik zincirleri aracılığıyla ticarileştirilir ve piyasaya sürülür (Encarnação, P., 2016; FAO, 2024).

Günümüzde su ürünleri yem endüstrisi; balıklar ve kabuklu su ürünleri tarafından rahat

³ Dünya Balıkçılık ve Su Ürünleri Durumu Raporu

sindirilebilir ve lezzet açısından uygun olduğu, içerik olarak protein, mineral, yağ asidi dengesi yerinde olduğu, su ürünlerinin büyümesinde düşük kütle kayıpları sağladığı ve bağışıklığı güçlendirdiği için balık ununa ve balık yağına bağımlı durumdadır (Mobin vd., 2019). Aynı zamanda çiftlik balıkları ve kabuklu su ürünleri suni ortamlarda yetiştirildiklerinden dolayı denizlerde bulunan her besine ulaşmamaktadır. Çiftlik ürünleri için bu eksik besin maddeleri temin etmenin en ulaşılabilir yolu, yüksek protein ve yağ içeriğinden dolayı balık unu ve balık yağı kullanmaktan geçmektedir (Turchini vd., 2018).

Yem balıklarının tamamının ya da kemik gibi artıkların parçalanarak kurutulmasıyla elde edilen malzeme balık unudur. Balık unu, %60-72 oranında bir protein içeriği sayesinde besleyicilik seviyesi yüksek ve sindirimi kolay olan bir yem bileşendir (Macusi vd., 2023). Yem balıklarının ısıya maruz bırakılması, sıkıştırılması ve santrifüjle posadan ayrılması ile de balık yağı elde edilir. Balık yağı içeriğindeki çoklu doymamış yağ asitleri olan EPA ve DHA sayesinde yemlerdeki yağ ihtiyacını karşılamaktadır. Balık ununun üretimi 30 milyon ton ile 1994 yılı itibariyle zirveyi görmüş ve sonrasında azalmıştır. Toplam balık unu ve balık yağı hacminin %25-35 civarını yem balıkları oluşturmaktadır. Yem balıkları için genellikle pelajik balık türü kullanılmaktadır (FAO, 2018). Ancak bu katkı maddelerinin elde edildiği bazı balık türlerinin nesli, aşırı avlanma nedeniyle tehlikeye girdiğinden sürdürülebilir bir uygulama değildir (Tacon vd., 2022). Vahşi avlanma ile yakalanan pelajik balıkların %30'u yem katkı maddesi olarak balık unu ve balık yağına dönüştürülmek üzere ihraç edilmektedir (Beal vd., 2018). Son zamanlarda bu durum özellikle Batı Afrika gibi ülkelerde gıda talebinin de önüne geçerek gıda güvenliği sorunlarına sebep olmakta, gıda tüketimi için gerekli talebin önüne geçmektedir (FAO, 2024).

Balık unu ve balık yağı, yüksek değerli içeriği sebebiyle yem giderlerinin büyük bir kısmını kapsamaktadır (Costa vd., 2025). Yem üreticileri tarafından, maliyeti düşürmek adına balık ununa alternatif olarak yüksek protein içeriğine sahip bitkileri (kolza, soya, mısır, buğday küspesi gibi) ya da hayvansal bileşenleri de (kümes hayvanlarından elde edilen kemik unu gibi) katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Siddik vd., 2024). Katkı maddeleri içeren ya da yapısı bozulmuş, genetiği değiştirilmiş bileşenleri ya da gübreleri içermeye ihtimali bulunan bu alternatifler, yem endüstrisinin zorlandığı konulardan biridir (Tacon vd., 2022). Bu tür sorunlar yem endüstrisinin daha uygun fiyatlı, geleneksel olmayan, daha sürdürülebilir bir yem kaynağı arayışına girmesine sebep olmaktadır. Bu alternatif bileşenler sadece balıkların temel besin ihtiyaçlarını karşılamakla kalmamalı, aynı zamanda onlar için kolayca erişilebilir ve cazip olmalıdır (Nagappan vd., 2021; Yadav vd., 2020).

Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda mikroalglerin, su ürünü yemlerinde balık unu, balık yağı gibi ham maddelere alternatif bir kaynak olarak kullanılması çevreci ve sürdürülebilirdir, bu da gelecek adına umut vadetmektedir (L. Zhang vd., 2025). Literatürdeki çalışmalar, yüksek protein içeriklerinden dolayı mikroalglerin su ürünleri yem üretiminde geleneksel ham maddelerin yerini alabilecek güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir (Ma & Hu, 2024). İçerdikleri amino asitlerin haricinde fotosentetik pigmentler ve diğer antioksidan bileşikler sayesinde mikroalgler, balık türlerinde bağışıklığın güçlenmesine ve hastalıklara karşı direncin artmasına olanak sağlamaktadır (Qiao vd., 2019). Mikroalglerin su ürünü yemlerinde birincil bileşen olarak kullanılması, suda yaşayan türlerin büyümesini ve refahını iyileştirirken, ticari balık unu ve balık yağına olan ihtiyacın bir kısmını karşılayarak alternatif bir yem kaynağı sunarak sürdürülebilirliği teşvik etmektedir (Shah vd., 2018). Mikroalglerin, yapısındaki protein, vitamin, iz elementler, karotenoidler ve uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitleri sayesinde bu iki ham madde yerine kolaylıkla geçebiliyor olması da yem bileşenlerinde alternatif olarak kullanılma sebepleri arasında yer almaktadır. Ayrıca yapılarındaki karotenoid pigmenti olan astaksantin sayesinde somona kırmızı rengini verdiği için yem olarak tercih edilmektedir (Siddik vd., 2024).

Balıkların ve kabuklu su ürünlerinin larvalık dönemi, yaşam basamağında en hassas dönemdir. Larvalar, bakteri ve parazit bulaşlarına açık bir haldedir, bu da toplu ölümlere neden olmakta, ürün hasadında zarara sebebiyet vermektedir. Bu nedenle mikroalg biyokütlesi, balıkların ve kabuklu su ürünlerinin larvaları için canlı yem olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda mikroalglerin yapılarında bulunan antioksidanlar, vitamin ve mineraller, çoklu doymamış yağ asitleri, amino asit molekülleri balıkların ve kabuklu su ürünlerinin larvaları için bağışıklığı güçlendirme ve büyümede etkin bir rol oynamaktadır (Siddik vd., 2024).

Mikroalglerin su ürünlerinin beslenmesinde alternatif ham madde olarak kullanılması oldukça çevreci bir çözüm olarak karşımıza çıkmasına rağmen üretiminde bazı zorlukları mevcuttur. Bunlardan birisi, her mikroalg türünün biyolojik yapısının farklı olmasıdır. Yapılarındaki protein ve yağ oranları türden türe değişmekle birlikte, kalın hücre duvarı yapısından dolayı bazı mikroalgler her balık tarafından sindirilemediği için sindirilebilir özellikteki mikroalglerin seçilmesi daha doğrudur. Bazı mikroalgler ise balıkların gelişiminden çok besin emilimini ve büyümesini engelleyecek yapıda olabilir (Nagappan vd., 2021).

Mikroalglerin yetiştirme, hasat, kurutma işlemleri enerji gerektiren prosesler olduğu için yem üretim maliyetini yükseltmektedir. Araştırılmaya ve uygulanmaya yeni başlanan bir sektör olduğu için teknolojik olarak stabilite sağlaması da zaman alacaktır. Aynı zamanda su ürünü

yetiştiricileri tarafından mikroalg bazlı balık yemlerine karşı güvensizlik doğabilir (Siddik vd., 2024). Çağımızın en büyük uğraşlarından biri olan sürdürülebilir üretim ve tüketimin sağlanması, bu tür engellerin araştırılarak aşılmasına bağlıdır.

Günümüzde su ürünleri yemi endüstrisinde 40'ın üzerinde farklı mikroalg çeşidi kullanıldığı bilinmektedir. *Nannochloropsis*, *Chlorella*, *Haematococcus*, *Tetraselmis*, *Pavlova*, *Thalassiosira* ve *Scenedesmus* cinsi mikroalgler, birçok kültür balığı ve kabuklu için yem katkı maddesi olarak en sık kullanılan mikroalg türleridir (Mobin vd., 2019; Siddik vd., 2024).

4. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ YÖNTEMİ

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), çevresel sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi konusunda gün geçtikçe önem kazanan bir yöntemdir. YDA; ürünlerin, süreçlerin ya da hizmetlerin ham madde eldesinden ya da hizmete giriş anından itibaren ömrü ya da hizmet süresi bitene kadar olan sürede çevreye verdiği zararları tespit etmek için geliştirilmiş bir analiz yöntemidir (Albertí vd., 2019; Reijnders, 2020). Yöntem kapsamında, sistemin tüm girdi ve çıktıları için detaylı bir envanter oluşturularak, ürünün yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkarabileceği potansiyel çevresel etkiler nicel olarak analiz edilir (Babuna vd., 2023).

Günümüzde artarak devam eden kirlilik, enerji savaşları, ham madde ve fosil kaynakların kıtlığı, geçmişte de endişe verici sorunlar olmuştur. Özellikle üretim faaliyetinden kaynaklanan bu sorunlara çözüm amaçlı olarak geliştirilen yaşam döngüsü odaklı üretimin temelleri ilk olarak 1960'lı yıllarda atılmıştır (Amahmoud vd., 2022). Bilinen ilk YDA odaklı çalışma, 1963 yılında kimyasal ürün üretimindeki enerji girdileri üzerine yapılmıştır. Birleşmiş Milletler, 1972 yılında İsveç'in Stockholm şehrinde ilk kez Stockholm İnsan ve Çevre Konferansı'nı gerçekleştirmiştir. Çevresel etki değerlendirme yöntemi de ilk kez bu konferansta tartışılmıştır. 1989 yılında ise, çevresel etki modelleme yazılımı olan GaBi piyasaya sürülmüştür (Bjørn vd., 2018; Poltronieri vd., 2021). Yaşam döngüsü analizi terimi ilk kez 1990 yılında konuşulmaya başlanmıştır (Liu vd., 2024). 1997 yılında yayınlanan ISO 14040 Çevre Yönetimi-Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi-İlkeler ve Çerçeve Standardı, 2006 yılında ISO 14040 ve ISO 14044 olarak Çerçeve ve Kılavuzlar şeklinde revize edilmiştir (ISO, 2006a, 2006b). ISO, yani Uluslararası Standardizasyon Örgütü, ilk faaliyetine 1947 yılında başlamış, şu anda 160'tan fazla ülke ile iş birliği içerisinde olan bir sivil toplum kuruluşudur. Ürünlerin ya da hizmetlerin daha kaliteli, daha çevreci, daha sağlıklı olmasını sağlamak için belli kıstaslar ortaya koyarak ve bu kıstasları standartlaştırarak gerçekleştirmektedir (Marsden & Shahtout, 2024).

4.1. Yaşam Döngüsü Kavramı ve Önemi

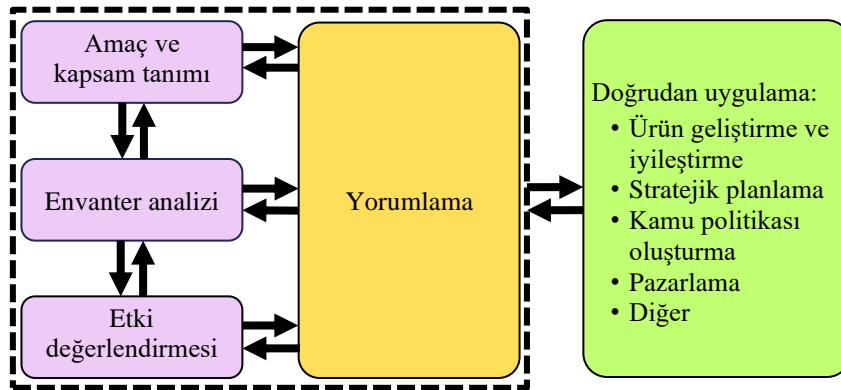
Yaşam Döngüsü Analizi (YDA); bir ürünün veya sürecin ortaya çıkmasından itibaren yani ham madde çıkarımından başlayarak işleme, lojistik, imalat ve kullanım safhalarını kapsamakla birlikte, ürünün ömrünü tamamlamasının ardından gerçekleşen geri kazanım veya nihai bertaraf aşamalarına kadar geçen sürede çevresel olarak verdiği zararın potansiyelinin bir ölçüm yöntemidir (Atılgan Türkmen, 2022). Böylece, değerlendirilen sistemin her aşamasındaki çevresel etkiler ortaya konulur ve sürdürülebilirlik açısından iyileştirmeye açık

noktalar tespit edilir.

YDA, farklı alanlarda kullanılabilir. Stratejik planlamalar yaparak ve sürdürülebilir merkezli politikalar geliştirerek hem devlete hem üreticiye destek sağlar. Bilimsel veriler sunarak performans göstergelerini sunar. Çevresel etki potansiyeli yüksek ürün ve süreçler için daha çevreci, daha temiz, kaynak tüketimi daha verimli olan tasarımların yeniden oluşturulmasında yol gösterir. Ürün tasarımı ve araştırma geliştirme çalışmalarında yol göstericidir. Karbon ayak izi hesaplamaları ve kurumsal sürdürülebilirlik raporlaması gibi farklı alanlarda son yıllarda oldukça fazla kullanılmaktadır. YDA, üreticilerin tüketici karşısında daha güvenilir olmak için tercih ettiği eko etiket, kalite belgelendirmesi gibi politika ve uygulamalarda sisteme şeffaf analizler sunar (Mammadov & Cılız, 2017).

4.2. Yaşam Döngüsü Analizi Çerçevesi

Bu metodolojinin uygulama esasları ve yapısal çerçevesi, uluslararası düzeyde kabul görmüş olan ISO 14040 ve ISO 14044 standartları serisi (ISO, 2006a, 2006b) ile standardize edilmiştir. ISO 14040 ve ISO 14044'e göre YDA; ürünün, sürecin ya da hizmetin beşikten mezara tüm girdi ve çıktılarının çevresel etkilerinin bir araya getirilerek analiz edilmesidir. Kullanılan doğal ya da antropojenik kaynaklar ve enerji girdileri oluştururken; emisyonlar, atık sular, tehlikeli tehlikesiz katı atıklar ise çıktıları oluşturmaktadır. Tüm bu girdi ve çıktılar YDA'nın envanter verilerini oluştururken, girdi ve çıktıların kirlilik potansiyeli YDA'nın çevresel etkilerini oluşturmaktadır. YDA'nın asıl amacı ise bu etkilerin hedeflere göre yorumlanması ve düzeltici adımlar atılmasıdır (Silva, 2021). Şekil 4.1'de gösterildiği gibi ISO 14040 standardına göre YDA süreci; amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlama olmak üzere birbirini tamamlayan dört basamaktan oluşmaktadır. Bu aşamalar aşağıda detaylandırılmıştır:



Şekil 4.1. YDA çerçevesi (ISO, 2006a, 2006b)

4.2.1. Amaç ve kapsam tanımı

Amaç ve kapsamın belirlenmesi YDA sürecinin ilk basamağıdır. ISO 14040'a göre amaç aşağıdaki sorulara yanıt verebilmelidir:

- Çalışmanın sonucunda hedeflenen uygulama nedir?
- Çalışmayı sınırlayan koşullar nelerdir?
- Çalışmanın yapılma nedeni nedir?
- Çalışmanın sonucunun kimlere iletilmesi amaçlanmaktadır?
- Halka açıklanması amaçlanan veriler karşılaştırmalı iddialarda kullanılacak mı?
- Çalışma kime aittir? (Curran, 2017)

YDA'nın kapsamı ise çevresel etki analizi yapılacak sistemi ve sistemin sınırlarını, fonksiyonel birimi, varsayımsal verileri, veri gerekliliklerini, etki kategorilerini ve değerlendirme çerçevesini içerir (Çevre & Bakanlığı, 2024).

Fonksiyonel birim, ISO 14040 ve 14044 standartlarına göre bir ürün, süreç ya da hizmet sisteminin niceliksel tanımıdır. Bir diğer yönüyle bu birim, YDA yapılan ve farklı nicel ya da nitel sonuçlar veren sistemlerin çevresel etkilerinin aynı çatı altında karşılaştırılmasını ve sürdürülebilirliğinin ölçülmesini sağlar. Örneğin, bir kişi aynı konumu ve aynı mesafeyi farklı araçlarla gitmek istediğinde YDA sistemi bu süreçleri modeller ancak bu iki farklı aracı birbiri ile kıyaslayacak olan ve karşılaştırmalı sürdürülebilirlik tanımını gerçekleştiren ölçü, fonksiyonel birimdir. Fonksiyonel birim, çevresel boyutta YDA modellemelerinde referansın dayanağını oluşturur (Frigerio vd., 2023; Goldstein vd., 2013).

Sistem Sınırları: ISO 14040'ta tanımı verilen sistem sınırı, analizi yapılacak sisteme hangi süreçlerin, girdilerin ve çıktıların dahil edilmesi gerektiğinin belirlenmesi demektir. Örneğin, ham madde çıkarımı, üretim, nakliye ya da bertaraf süreci gibi. Netlik sağlamak amacıyla da hangi süreçlerin sistem dışı edildiği belirtilir. YDA'nın bir sonraki aşaması olan envanter verilerinin seçimi de sistem sınırları dahilinde kalan alana göre belirlenir. Sistem sınırlarının belirlenmesindeki asıl amaç, YDA'nın amaç ve kapsamını açıklayıcı bir şekilde belirterek netlik ve kıyaslanabilirlik sağlamaktır (Abu vd., 2021; Braud vd., 2023).

YDA bir ürünün ömrünü dört farklı şekilde ele alarak analiz eder.

Beşikten mezara: Bu yaklaşımda; bir ürünün üretimi için gerekli kaynakların çıkarılması ve üretime dahil edilmesine, ürünün ve yan ürünlerin üretim aşamasından tüketimine,

tüketiminin ardından ömrünün bitimine ve nihai bertaraf aşamasına kadar çevreye verdiği zararın potansiyeli analiz edilir. Hatta üretimden önceki proje aşaması da ele alınmaktadır. Bu nedenle bu analiz yönteminde, bütün basamaklar tamamlanmaktadır. Beşikten beşiğe yaklaşımında ise ürünün bertarafı yerine geri kazanılması ve üretime kazandırılması ya da direkt olarak tekrar kullanılması söz konusudur.

Beşikten kapıya: Bu yaklaşımda da proje aşaması, gerekli yan ürünlerin süreci, diğer kaynaklar sisteme dahil edilmektedir. Ürünün üretim aşamasından fabrika kapısına kadar geçen süreci ele alarak analiz edilir.

Kapıdan kapıya: Bu yaklaşımda sadece üretim aşaması ele alınmaktadır.

Kapıdan mezara: Bu yaklaşımda ürünün fabrika kapısından çıktıktan sonraki süreci ele alınır. Nakliye, tüketim, kullanım, ürünün ömrünün bitimi ve bertarafı analiz edilir (Dijkman vd., 2018; Silva, 2021).

4.2.2. Envanter verilerinin belirlenmesi

Analizin ikinci aşaması olan bu basamakta ürün, süreç ya da hizmetin YDA ile ilgili tüm envanter verilerinin toplanması gerekmektedir. Bunlar; hava emisyonu, atık su bertarafı, katı atık geri kazanımı gibi çevreyi etkileyen veriler, elektrik, doğalgaz gibi enerji tüketim verileri, nakliyesi yapılan bir ürün varsa benzin, mazot gibi yakıt verileri olabilir (Terán-Cuadrado vd., 2024). Envanter verilerinin toplanması sırasında takip edilmesi gereken basamaklar Şekil 4.2'deki gibidir.



Şekil 4.2. Envanter verilerinin belirlenmesi akış diyagramı (Yang, 2020)

4.2.3. Etki kategorilerinin belirlenmesi

YDA'nın üçüncü basamağı olan bu kısımda envanter analizi kısmında toplanan her bir verinin analiz sonucunda oluşması beklenen etkileri ölçülmektedir. Bu etkiler; sınıflandırma, normalizasyon, karakterizasyon ve ağırlıklandırma yöntemleri ile belirlenmektedir (Terán-Cuadrado vd., 2024). ISO 14040 standardına göre etki kategorilerinin basamakları aşağıdaki gibidir:

Sınıflandırma: Envanter verileri başlığında tespit edilen çevresel risk faktörlerinin özelliklerine göre belli kategorilere ayrılması aşamasıdır. Bu aşamada çevresel riskler asidifikasyon, ötrofikasyon, ekotoksisite gibi çevresel etkilerle bağdaştırılmaktadır. Bu çevresel risk faktörleri, potansiyel tehlikelilik durumuna göre birden fazla çevresel etki ile bağdaşabilir. Böylece YDA analizinin sonucundaki karmaşa kalkarak daha anlamlı ve etkilerine göre sınıflandırılmış bir sonuç elde edilmiş olur (Dincer & Bicer, 2018; Pavan & Mendes, 2021).

Karakterizasyon: Etki değerlendirme basamağının en önemli kısmı, envanter verilerinde tanımlanan ve sınıflandırma basamağında sınıflara ayrılan çevresel risklerin nicelik kazanmasıdır. Bu işlem; emisyon, atık su, kaynak kullanımı gibi envanter verilerine karakterizasyon faktörü uygulamakla mümkündür. Bu karakterizasyon faktörü, fonksiyonel birim olarak da geçer. Elde edilen niceliksel veriler, o maddenin çevre kirlilik potansiyeline katkısını verir. Örneğin, CO₂ ve metan emisyonlarının iklim değişikliği potansiyeli karbondioksit eşdeğeri ile ölçülmektedir (Dincer & Bicer, 2018; Pavan & Mendes, 2021).

Normalizasyon: Karakterizasyon adımından sonra gelen normalizasyon, nicel olarak tanımlanan değerleri referans aralığında kıyaslar. Amaç, elde edilen sonuçların etki kategorilerinin önemini belirlemektir. İşlem, karakterizasyon sonuçlarının (CO₂ eşdeğer, P eşdeğeri gibi) normalizasyon faktörüne bölünmesidir. Elde edilen sonuç, envanter verisinin çevresel yükünü temsil eder (Pavan & Mendes, 2021).

Ağırlıklandırma: Ağırlıklandırma adımında, çevresel etki potansiyellerinin kendi arasında önem dereceleri belirlenir. Her bir etki kategorisine, etki ettiği yapının önceliklerine göre bir puan verilir. Örneğin, hükümetin belirleyeceği politika ile iklim değişikliğine ozon tabakasının incelmelerinden daha çok öncelik verilebilir. Etkilerin ilgilendirdiği topluluklar, farklı etkilere farklı ağırlık verebilir (Dincer & Bicer, 2018; Pavan & Mendes, 2021).

Yaşam döngüsü etki kategorisi, çevresel analizi yapılacak olan sistemin toplanan envanter verilerinin işlenerek çevresel etkilerinin hesaplanmasıdır. Bu nedenle bir çevresel etki kategorisi belirlenirken, bu kategoriye katkıda bulunan tüm envanter verisi, o etki kategorisine

ait fonksiyonel birim ile çarpılır. Etki kategorisine ait tüm emisyonlar ve kaynak kullanımları toplanır, böylece çevre etki kategorisi için bir etki puanı elde edilir (Rosenbaum vd., 2018). Her bir çevresel etki kendi içerisinde belirlenmiş bir birim cinsinden ifade edilir. Bu işleme karakterizasyon denir (Hauschild, 2005). Tablo 4.1’de bazı çevresel etki kategorileri ve birimleri yer almaktadır.

Tablo 4.1. Örnek çevresel etki kategorileri ve birimleri (Demir vd., 2024; Haidery & Baş, 2020; Huijbregts vd., 2017)

| Çevresel Etki Kategorisi | Çevresel etki Eşdeğeri (eşd.) |
|--|--|
| Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) | kg CO ₂ eşd. |
| Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli (ATP) | Kg Sb eşd. |
| Asidifikasyon Potansiyeli (AP) | Kg SO ₂ eşd. |
| İyonlaştırıcı Radyasyon Potansiyeli (İRP) | kBq Co-60 eşd. |
| Ozon Tabakasının İncelmesi Potansiyeli (OTİP) | kg CFC-11 eşd. |
| Fotokimyasal Ozon Oluşumu Potansiyeli: İnsanlar (FOOP-İ) | kg NO _x eşd. |
| Fotokimyasal Ozon Oluşumu Potansiyeli: Ekosistemler (FOOP-E) | kg NO _x eşd. |
| Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (PMOP) | kg PM _{2,5} eşd. |
| Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP) | kg SO ₂ eşd. |
| Tatlı Su Ötrofikasyonu Potansiyeli (TSÖP) | kg P eşd. |
| Deniz Suyu Ötrofikasyonu Potansiyeli (DSÖP) | kg N eşd. |
| Kara Ekotoksitesitesi Potansiyeli (KEP) | kg 1,4-DCB |
| Tatlı Su Ekotoksitesitesi Potansiyeli (TSEP) | kg 1,4-DCB |
| Deniz Suyu Ekotoksitesitesi Potansiyeli (DSEP) | kg 1,4-DCB |
| İnsan Toksikitesitesi Potansiyeli-Kanser (İTP-kanser) | kg 1,4-DCB |
| İnsan Toksikitesitesi Potansiyeli Toksikite Potansiyeli (İTP-kanser olmayan) | kg 1,4-DCB |
| Arazi İşgal Potansiyeli (AİP) | m ² × yıl yıllık tarım arazisi eşd. |
| Maden Kaynakları Potansiyeli (MKP) | kg Cu eşd. |
| Fosil Kaynakların Kıtılığı Potansiyeli (FKP) | kg petrol eşd. |
| Su Tüketimi Potansiyeli (STP) | m ³ su eşd. |

Bu tez çalışmasında kullanılan CML etki değerlendirme yönteminde (CML, 2017) hesaplanan 11 adet çevresel etki kategorisine ait bilgi aşağıda sunulmuştur:

Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli (ATP element): Abiyotik kaynak tüketmesinin tanımı, içerisinde dahil edilen risk faktörlerinin tam belli olmamasından dolayı YDA’da net yapılamamaktadır. Kaynak stoklarının kullanılması gelecekteki teknolojik gelişimlerden etkileneneği için bu konu çevresel sistemin dışına çıkmaktadır. Aynı zamanda tüketmenin tanımı net olarak yapılamamaktadır çünkü hiçbir tanım verilerle ve deneylerle kanıtlanamamaktadır. Ancak kısa bir tanım verilecek olursa doğal kaynakların çevresel risk

faktörleri tarafından tükenmesi demektir. ATP element ise fosil kaynaklar hariç doğadaki element ve minerallerin tükenmesi potansiyelidir. Hesaplaması, o elementin yıl bazında ne kadar çıkarıldığı ve doğadaki rezerv miktarı ile bağlantılıdır. ATP element değeri, antimon (Sb) eşdeğeri ile ifade edilir (Oers & Guinée, 2016).

Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli Fosil (ATP fosil): Abiyotik fosil kaynakların tükenmesi; mineraller hariç doğalgaz, kömür, petrol gibi enerji bazlı doğal kaynakların tükenmesi demektir. ATP fosil ise bu fosil yakıtların tükenmesinin potansiyelini ifade eder ve MJ eşdeğeri ile ifade edilir (Oers & Guinée, 2016).

Asidifikasyon Potansiyeli (AP): Kükürt dioksit (SO₂), azot monoksit (NO), azot dioksit (NO₂), azot oksit (NO_x) gibi bileşenlerin zararlarını ifade eden tanım asidifikasyon potansiyelidir (AP). Bu bileşikler genel olarak tarımdan dolayı ve yakıtların yanması sonucunda oluşur ve atmosfere dağılırlar, sonucunda ise en yaygın etki olan asit yağmurları oluşur. Bu da toprak ve suya zarar vererek asitleşmesine neden olur. AP, SO₂ eşdeğeri ile ifade edilir (Dincer & Abu-Rayash, 2019; Murphy vd., 2013).

Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP): Bileşiklerin ve besinlerin sularda ve toprakta aşırı gübre birikimine sebep olma potansiyelidir. Örneğin bu durum, sudaki oksijenin düşmesi ve alg patlamalarının yaşanması ile karakterizedir. Sebebi, su yollarında biriken fosfat, nitrat, amonyak, NO_x'tir. ÖP değeri, fosfat (PO₄) eşdeğerleri cinsinden ifade edilir (Brough & Jouhara, 2020; Murphy vd., 2013).

Tatlı Su Ekotoksitesisi Potansiyeli (TSEP): Kimyasal salınımların tatlı sularda yaşayan canlılar üzerindeki toksik etkilerini ölçen yaşam döngüsü etki kategorisidir. Tatlı sulardaki türlerin besin döngüsünün zarar görmesi, türlerin çeşitliliğinin azalması ya da yok olmasına sebep olabilir. TSEP'te toksik maddeleri ifade etmek amacıyla diklorobenzen (DCB) eşdeğeri kullanılır (Oginah vd., 2023).

Küresel Isınma Potansiyel (KIP): İklim değişikliğine sebep olan sera gazlarının atmosferde tutunma potansiyellerine küresel ısınma potansiyeli (KIP) denir. Bu gazların en önemlileri CO₂, metilen ve NO₂'dir. KIP, CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilir (Murphy vd., 2013).

İnsan Toksisitesi Potansiyeli (İTP): Belli bir insan topluluğunun tamamını etkileyebilecek büyüklükte bir salınım sonucunda oluşacak kimyasal maruziyetin ya da bir ürünün beşikten mezara kadarki ömründe açığa çıkan kimyasallardan kaynaklanan maruziyetin potansiyeline insan toksitesisi potansiyeli (İTP) denir. Çalışanların çalışma ortamından kaynaklanan maruziyet bu kategoride yer almamaktadır. Bu kimyasallar genel olarak

kanserojendir ve maruziyet sonucunda insanlarda kanser dahil çeşitli hastalıklar meydana gelmektedir. İTP’de toksik maddeleri ifade etmek amacıyla DCB eşdeğeri kullanılır (Dincer & Bicer, 2018; Rosenbaum vd., 2018).

Deniz Suyu Ekotoksitesitesi Potansiyeli (DSEP): Kimyasalların ve toksik maddelerin sucul ortamdaki canlılar üzerindeki maruziyet potansiyeline deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli (DSEP) denir. Havadan, sudan ya da topraktan gelebilecek tüm maruziyeti kapsamaktadır. DSEP’te toksik maddeleri ifade etmek amacıyla DCB eşdeğeri kullanılır (Dincer & Bicer, 2018).

Ozon Tabakasının İncelmesi Potansiyeli (OTİP): Bir maddenin atmosfere salınması sonucu stratosferdeki ozon gazının incelmesi ya da yok olmasına sebep olma gücüne ozon tabakasının incelmesi potansiyeli (OTİP) denir. İncelme ya da yok olma sonucunda güneşe ait UV ışınları herhangi bir filtreleme olmadan direkt olarak dünya yüzeyine nüfuz eder. Bunun sonucunda ise karasal ve sucul ekosisteme büyük zararlara neden olmaktadır. OTİP, trikloroflorometan (CFC11 veya R11) eşdeğeri olarak ifade edilir (Dincer & Bicer, 2018; Roy & Halder, 2020).

Fotokimyasal Ozon Oluşum Potansiyeli (FOOP): Uçucu organik kirleticilerin ya da karbonmonoksitin ışık etkisi ile birlikte azotlu bileşikler olan NO, NO₂ ya da nitrojen oksitlerle oksidasyona girmesi ve sonucunda atmosferin troposfer tabakasında foto-oksidanlara dönüşmesi ve bu oluşan reaktif bileşiklerin potansiyeline Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli (FOOP) denir. Bu reaktif yapıları nedeniyle oluşan foto-oksidanlar, canlılarda solunum yolları dokularına zarar vererek solunum yolu hastalığına neden olmaktadır. Bitki ve yaprak yüzeyine hasar vererek fotosentezi etkilemektedir. Diğer organik malzemeler üzerinde de oksidasyona ve aşınmaya sebep olmaktadır. Fotokimyasal ozon oluşumunda zararlı olan bileşik direkt olarak uçucu organik bileşikler değil, uçucu organik bileşiklerin dönüştüğü reaktif kimyasallardır. FOOP, etilen (C₂H₄) eşdeğeri olarak ifade edilir (Dincer & Bicer, 2018; Rosenbaum vd., 2018).

Kara Ekotoksitesitesi Potansiyeli (KEP): Kimyasalların ve toksik maddelerin kara canlıları üzerindeki maruziyet potansiyeline kara ekotoksitesitesi potansiyeli (KEP) denir. Maruziyet süresi sonsuz olarak tanımlanır. KEP’te toksik maddeleri ifade etmek amacıyla DCB eşdeğeri kullanılır (Dincer & Bicer, 2018).

4.2.4. Sonuçların yorumlanması

YDA basamaklarının son aşaması, eldeki nicel verilerin yorumlanmasıdır. Bu

yorumlama, çalışmanın amaç ve hedefleri doğrultusunda daha verimli bir üretim, daha çevreci bir ürün, süreç veya hizmetin elde edilmesini sağlar (Terán-Cuadrado vd., 2024).

5. GÜNCEL LİTERATÜR ÖRNEKLERİ

Çalışmanın bu bölümünde literatürde yer alan mikroalg biyokütlesi üretimi ve bu süreçlerin yaşam döngüsü çevresel performansını değerlendiren çalışmalar derlenerek sunulmuş; ayrıca geleneksel balık yemi ve mikroalglerin balık yeminde kullanımına dair sürdürülebilirlik araştırmalarına yer verilmiştir. Bu çerçevede bölümün temel amacı, tez kapsamında ele alınan mikroalg bazlı süreçlerin literatürde yer alan güncel araştırma çalışmalarını incelemek, çalışmalarda kullanılan yaklaşımları ve elde edilen sonuçları sunmaktır. Ayrıca literatürde tespit edilen eksikliklere yönelik kapsamlı bir perspektif sunarak, bilimsel birikime özgün ve faydalı bir kaynak niteliği kazandırmaktır.

Mikroalglerden elde edilen biyokütle üretiminin yaşam döngüsü boyutunda sürdürülebilirliği ile ilgili olarak literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Örneğin Wang vd. (2025) tarafından yazılan araştırma makalesinde, yüzdürme teknolojisi kullanılarak üretilen *Chlorella vulgaris* cinsi mikroalglerin yetiştiriciliğinden hasadına kadar olan sürecin yaşam döngüsü çerçevesi incelenmiştir. 100 gram kuru mikroalg biyokütlesi için yetiştirme, flokülasyon, flotasyon ve hasat basamaklarının küresel ısınma potansiyeli, ozon tabakasının tükenmesi, karasal ve su ekosistemlerinde ötrofikasyon, insan toksisitesi gibi çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Sonucunda ise maksimum verimin yüzer boncuk flotasyon yönteminde olduğu görülmüştür. Lopes vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, *Nannochloropsis*, *Dunaliella*, *Spirulina* türleri kullanılarak mikroalg üretiminin ekonomik ve çevresel değerlendirmesinin temelini oluşturabilecek matematiksel bir model geliştirilmek istenmiştir. 1 kg kül içermeyen kuru biyokütle üretimi sürecinin iklim değişikliği potansiyeli, insan toksisite potansiyeli, arazi kullanımı, ozon tabakasının tükenmesi, fotokimyasal oksidasyon oluşumu, tatlı su ve deniz ötrofikasyonu gibi çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Süreçteki elektrik ve sodyum klorür kullanımının, karbon emisyonlarının temelini oluşturduğu ve bu emisyonların, deniz suyu veya tuz açısından zengin atık sular ve yenilenebilir enerji kullanılarak azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Napolitano vd. (2022)'nin araştırmalarında, havalandırmalı FBR'ye entegre edilen 3 farklı hasat yöntemi, yaşam döngüsü boyutunda değerlendirilmiştir. Hasat yöntemleri santrifügasyon, flokülasyon-santrifügasyon, flokülasyon-filtrasyon şeklindedir. Çalışmanın fonksiyonel birimi 1 kg kuru mikroalg biyokütlesi, sistem sınırları mikroalg yetiştirme ve hasat işlemleri olarak belirlenmiştir. Çevresel etkiler; küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, abiyotik kaynak tükenmesi-fosil yakıt, tatlı su ekotoksisitesi potansiyeli göstergeleri ile incelenmiştir. Sonuç olarak, flokülasyon-filtrasyon işleminde biyokütlenin hasat verimini arttırdığı, çevresel etkileri

azalttığı tespit edilmiştir.

Araştırmacılar tarafından mikroalg yetiştirme sistemlerinin sürdürülebilirliği yalnızca çevresel boyutta değil ekonomik boyutta da incelenmiştir. Örneğin Romagnoli vd. (2024) tarafından yazılan araştırma makalesinde biyogaz tesislerinin sıvı atıkları ve baca gazları kullanılarak *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, *Chlamydomonas reinhardtii* türü mikroalg yetiştirilmiş, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği analiz edilmiştir. Araştırmada, fonksiyonel birim olarak 5.000 ton sıvı gübre seçilmiş ve ulaşım, anaerobik sindirim, biyogaz ve sindirim artığı yönetimi, mikroalg yetiştiriciliği basamakları ile *Chlorella vulgaris* mikroalgi yetiştirilmiştir. Basamakların insan toksisitesi, iyonlaştırıcı radyasyon, asidifikasyon, küresel ısınma potansiyeli gibi çevresel etkilerle birlikte toplam yatırım sermayesi ve toplam yıllık işletme maliyetinin etkileri de incelenmiştir. Sonuç olarak ise mikroalg bazlı sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu, çevresel etkilerin ise temel senaryoda daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sistemden daha fazla verim alınabilmesi için enerji tüketiminin azaltılması ve daha üretken türlerin seçilmesinin gerektiği bulunmuştur.

Mikroalg biyokütlesinin ham madde olarak kullanıldığı ürünlerin sürdürülebilirliğini değerlendiren çalışmalar da literatürde mevcuttur. Örneğin, Pérez-López vd. (2014)'ne ait makalede laboratuvar ve pilot ölçeklerde *H. Pluvialis* mikroalginden astaksantin üretiminin ve nütresötik ilaç amaçlı kullanımının çevresel etkileri incelenirken, Ahn vd. (2025)'nin araştırmasında, mikroalglerden laktik asit, poliüretan ve azelaik asit üretimi dahil olmak üzere, biyoplastik üretiminin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği incelenmiştir. Pérez-López vd. (2014) tarafından yapılan araştırmada elektrik kullanımının azaltılması ve reaktör verimliliğinin artırılması ile doğal astaksantin üretiminde çevresel etkilerin önemli ölçüde azaltılabildiği tespit edilmiştir. Ahn vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada ise tek işlemin ekonomik olarak avantajlı ancak çevresel etkisinin yüksek olduğu, serbest yağ asitlerinden elde edilen enerjinin en iyi çevresel sonuçları verdiği, ancak daha pahalı olduğu, serbest yağ asitlerinin bertarafının daha düşük ekonomik maliyetlere sahip, ancak çevresel etkilerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Rojo vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, mikroalg bazlı biyostimülanlar için stratejilerin çevresel sürdürülebilirliği değerlendirilmiş ve küresel ısınma potansiyeli olarak santrifüjlerin membranlara kıyasla %30 daha fazla etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Biyostimülanların nakliyesinin ise genel süreç üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Castro vd. (2020) tarafından yürütülen çalışmada mikroalglerden elde edilen biyogübrelerin çevresel etkileri değerlendirilerek ticari gübrelere karşılaştırılmıştır. Mikroalg

bazlı biyogübrenin, tüm etki kategorilerinde üçlü süperfosfattan daha yüksek çevresel etkiye sahip olduğu sonucu elde edilmiştir. Romero-García vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise *Scenedesmus almeriensis*'ten biyogübre üretimi için atık suda mikroalg yetiştiriciliği değerlendirilerek teknik ve ekonomik bir değerlendirme yapılmıştır. Biyogübre üretiminin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu ve Avrupa Birliği gübre düzenlemelerine uygun olduğu tespit edilmiştir.

Mikroalglerden karotenoid üretimine dair Ferreira vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, atık suda yetiştirilen mikroalg biyokütlesinden karotenoid eldesinde en iyi senaryonun, lutein ekstraksiyonu için süperkritik akışkan kullanılan yüksek hızlı bir toplama sistemi olduğu kanıtlanmıştır.

Mikroalg bazlı enerji ürünlerinin üretimi ve sürdürülebilirliğine dair literatürde oldukça fazla araştırmanın yapılmış olduğu görülmektedir. Bradley vd. (2023) tarafından çalışmada, farklı enerji rejimleri altında mikroalg ve petrol dizelinin çevresel etkileri karşılaştırılarak altyapının etkilerinden dolayı mevcut üretim sistemlerinin mikroalg biyodizelini petrol yakıtlarına göre daha az sürdürülebilir hale getirdiği tespit edilmiştir. Branco-Vieira vd. (2020) tarafından, mikroalg biyodizelin endüstriyel üretiminin çevresel etkileri hesaplanmış ve FBR inşaat malzemelerinin ve enerji tüketiminin başlıca çevresel etki sebebi olduğu bulunmuştur. Wu vd. (2018) tarafından, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* ve *Spirulina* 'dan elde edilen mikroalg biyodizelin ve biyoetanolin sera gazı emisyonları ve ekonomik sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir. Mikroalg ürünler için makul yatırım koşulları ve düşük çevresel etkinin optimizasyon yoluyla sağlanabileceği tespit edilmiştir. Adesanya vd. (2014)'nin çalışmasında, *Chlorella vulgaris* ile elde edilen ticari ölçekli mikroalg biyodizel üretiminin çevresel etkileri fosil yakıt dizeli ile karşılaştırılmıştır. Mikroalg biyodizelin fosil yakıt dizeline kıyasla ton başına %42 daha az küresel ısınma potansiyeli ve %38 daha az fosil enerji gereksinimi gösterdiği görülmüştür. Ana darboğazların ise yetiştirme ve kurutma için gereken enerji ile besin ve malzeme maliyetleri olduğu tespit edilmiştir. Collet vd. (2011) ve Ferreira vd. (2019) tarafından, mikroalg bazlı biyometan üretimi üzerine çalışılmıştır. Her iki çalışmada da biyometan üretimi sırasındaki enerji gereksinimlerinin çevresel etkiyi arttırdığı tespit edilmiştir.

Mikroalglerden EPA, DHA toplam yağ asidi çıkarımı ve bunların YDA çalışmaları da literatürde mevcuttur. Davis vd. (2021)'nin çalışmasında, heterotrofik mikroalglerden DHA elde edilmiş ve bu aşamaların çevresel etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmadaki bakteriler fotosentetik olmadığı için ışıkla değil karbonla büyütülmüş, mikroalglerin ihtiyacı olan karbon

kaynağı için şeker kamışından elde edilen şeker kullanılmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimi 1 kg omega-3 yağ asidi ve çevresel etki kategorileri iklim değişikliği, partikül madde, asidifikasyon, ötrofikasyon, arazi kullanımı, su kullanımı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, mikroalg bazlı omega-3'lerin, balık yağlarından daha sürdürülebilir olduğu, iklim değişikliği ve asitlenme etkilerinin daha düşük olmasına rağmen, daha yüksek partikül madde emisyonu ürettiği, şeker kamışının, yaşam döngüsü boyutunda çevresel etki değerlendirilmesinde en yüksek çevresel etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bartek vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, DHA üretimi için mikroalg kullanılmış ve mikroalgal DHA'nın, balık yağlarına göre daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu, küresel ısınma, toprak asitlenmesi ve arazi kullanımı açısından olumlu sonuçlar verdiği raporlanmıştır. Togarcheti & Padamati (2021)'nin çalışmasında, mikroalglerden elde edilen balık yağı ile çiftlik balıklarından elde edilen balık yağının sürdürülebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Makalenin fonksiyonel birimi 1 kg EPA+DHA, sistem sınırları yetiştirme, hasat, kurutma, öz çıkarma, rafinasyon olarak belirlenmiştir. Heterotrofik mikroalglerin EPA+DHA üretiminin, geleneksel balık yağı kaynaklarının yerini alabileceği, balık bazlı EPA+DHA üretiminde en fazla enerji talebinin balık yetiştiriciliğinden geldiği sonucuna varılmıştır. Gaber vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmada, *Nannochloropsis oceanica* kullanılarak toplam yağ asidi üretilmiş ve üretimin ölçeklenmiş sistemlerde ve farklı bölgelerde çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim başına çevresel etkilerin, optimal büyüme alanında yaklaşık %15 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Enerji talebi, altyapı ve besin gereksinimlerinin etkilere %60-80 oranında katkıda bulunduğu raporlanmıştır.

Mikroalglerin gıda, biyogübre, enerji gibi alanlarda kullanılmasının yaşam döngüsü değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde oldukça fazlayken, bu tez çalışmasının da konusu olan ve mikroalglerin balık yemlerinde ham madde olarak kullanılmasının sürdürülebilirliği ile ilgili literatür çalışması kısıtlıdır. Konuyla ilgili literatürde yer alan araştırmalardan bazıları aşağıdaki gibidir.

Camacho-Rodríguez vd. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, *Isochrysis galbana*, *Nannochloropsis gaditana* ve *Scenedesmus almeriensis* olmak üzere 3 farklı mikroalg türü seçilmiş, bu mikroalglerin biyokütleleri %15 oranında balık unu yerine eklenerek balık yemi üretilmiştir. 15 aylık süre boyunca farklı koşullarda saklanan balık yemlerinin dondurularak ve karanlık ortamda 9. ayına kadar kalitelerinin sabit kaldığı görülmüştür. *Nannochloropsis* ve *Isochrysis* katkılı yemlerin ise mikroalg içermeyen yemlere oranla daha yüksek seviyede EPA ve DHA içerdiği görülmüştür. Mikroalglerin yemlerde balık unu ve balık yağlarına alternatif olarak kullanılabilmesi görülmüştür.

Taelman vd. (2013) tarafından yapılan araştırmada balık yeminde kullanılmak üzere yetiştirilen mikroalglerin ekserjisi ve yaşam döngüsünün çevresel sürdürülebilirlikleri analiz edilerek klasik balık yemleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı yıllarda 3 farklı ölçekte üretim tesisi kurulmuş ve mikroalg üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada buralardan toplanan veriler kullanılmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimi, kuru *Nannochloropsis* sp. biyokütlesindeki 1MJ ekserji (23,07 MJ_{ex}/kg kuru madde) olarak seçilmiştir. Sistem sınırları kapıdan kapıya olacak şekilde, mikroalg yetiştirme, hasat, kurutma, ham madde taşımacılığı basamaklarını kapsamaktadır. Sonuç olarak üretimdeki ölçeklerin büyüdükçe verimin arttığı ve karbon ayak izinin %95 seviyelerinde bariz bir şekilde düştüğü gözlenmiştir. Doğal çevreden elde edilen ekserji de ölçek büyüdükçe azalmıştır. Kaynak kullanımında klasik balık yemine göre daha sürdürülebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Rafiq vd. (2025) tarafından yazılan makalede, daha önce yayımlanan makalelerden ve yaşam döngüsü veri tabanlarından veriler temin edilerek senaryolar oluşturulmuş ve yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkileri analiz edilmiştir. Bu çalışmada mikroalg bazlı biyodizel, balık yemi ve biyogübrenin farklı elektrik senaryolarındaki üretiminin çevresel etkileri incelenmiştir. Birinci senaryoda Tayland'ın fosil kaynaklı elektriği kullanılmıştır. İkinci senaryoda bu elektriğini %50'si yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiştir. nc senaryoda ise %100 yenilenebilir elektrik enerjisi kullanılmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimi, 1 milyon ton yakalanmış CO₂ olarak belirlenmiştir. Sonucunda, yenilenebilir enerji kaynağı arttıķa her bir üründe çevresel etkilerin düştüğü gözlenmiştir. Çevresel etkinin en yüksek düzeyde azaldığı ürün ise balık yemi olmuştur. Bir yılda talep edilen 0,4 milyon ton balık yeminde 1,1 milyon ton CO₂ emisyonu azaltılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Maiolo vd. (2020)'nin yaptığı çalışmada 4 ayrı senaryo mevcuttur. İlk iki senaryoda *Tetraselmis suecica* ve *Tisochrysis lutea* mikroalg biyokütleleri kullanılarak üretilen balık unu, nc senaryoda böcek unu ve son senaryoda kümes hayvanı yan ürün unu kullanılarak balık yemleri oluşturulmuş ve bu yemlerin yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. Fonksiyonel birim 1 ton protein olarak seçilmiştir. Sistem sınırları ise ham madde üretimi ve öğütme olacak şekilde beşikten kapıya şeklinde belirlenmiştir. İncelenen evresel etkiler, küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon ve ötrofikasyon potansiyeli, kümülatif enerji kullanımı ve su kullanımındır. Analizin sonucunda ise kümes hayvanı bazlı balık yemi ile böcek bazlı balık yeminin daha sürdürülebilir olduğu görülmüştür. Mikroalg bazlı balık yeminin sadece ötrofikasyon potansiyeli diğer senaryolardan daha çevreci olmuştur. Çünkü mikroalg üretiminde kullanılan enerji ve gübre ihtiyacı, çevresel yükleri arttırmıştır.

McKuin vd. (2023)'nin çalışmasının amacı, *Nannochloropsis* sp. biyokütlesinden elde edilen balık unu ile balıktan elde edilen unun yaşam döngüsü analizlerinin karşılaştırılmasıdır. Çalışmada seçilen fonksiyonel birim 1 kg ham proteindir. Mikroalg bazlı balık unu üretiminin sistem sınırları; kültürlenme, hasat, ayrıştırma, kurutma ve yağsızlaştırma olarak belirlenmiştir. Mikroalg biyokütlesi için 4 farklı senaryo oluşturulmuştur. İlk iki senaryoda, %95 kuru madde seviyesine kadar kurutulan biyokütlenin yağ çıkarımı organik çözücüler ve CO₂ ile yapılmaktadır. Diğer iki senaryoda ise yağ çıkarma işlemi ıslak biyokütleyle uygulanmaktadır. Balık unununun sistem sınırları ise; avlanma, balık unu üretimi, yağsızlaştırma olarak seçilmiştir. Çalışmada değerlendirilen çevresel etki kategorileri; küresel ısınma potansiyeli, su tüketimi, arazi kullanımı, tatlı su ötrofikasyonu potansiyeli, deniz ötrofikasyonu potansiyeli, biyotik kaynak kullanımınıdır. Çalışmanın sonucunda, mikroalg bazlı protein üretiminde en büyük çevresel etki kültürlemeden, balık unu proteini üretiminde ise avcılıktan kaynaklanmaktadır. Arazi kullanımı konusunda balık unu daha fazla avantaja sahiptir. Diğer çevresel etkilerde ise kurutulmuş ve solventle yağ çıkarımı yapılmış biyokütle daha avantajlıdır. Islak biyokütle enerji tüketiminin fazlalığından dolayı çevresel etkisi de fazla gelmiştir.

Literatürde geleneksel balık yemi üretiminin de yaşam döngüsü boyutunda sürdürülebilirliğinin incelendiği araştırmalar mevcuttur. Samuel-Fitwi vd. (2013) tarafından, balık unu, soya unu ve kolza unu kullanılarak farklı protein kaynaklarının alabalık yeminde kullanılmasının çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. 1 ton alabalık yeminin üretiminin küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli ve arazi kullanımı çevresel etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, balık unu bazlı balık yeminin tüm çevresel etki kategorilerinde en yüksek değere sahip olduğu, soya ve kolza bazlı yemlerin çevresel etkileri %40-60 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Zlaugotne & Pubule (2024) tarafından 5 farklı balık yemi formülasyonununun çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlikleri hassaslık analizi ile değerlendirilerek incelenmiştir. Formülasyonların balık yemi girdileri sırasıyla, %100 balık unu, %95 balık unu ile %5 kara sinek, %90 balık unu ile %10 kara sinek, %85 balık unu ile %15 un kurdu, %70 balık unu ile %30 un kurdu şeklindedir. Sonuç olarak, %100 balık unuyla üretilen geleneksel balık yeminin en düşük sürdürülebilirlik puanına sahip olduğu, %100 kara sinek ve %15 un kurdu proteini bulunan yemlerin ise en iyi sürdürülebilirlik puanına sahip olduğu tespit edilmiştir. Yemlere küçük oranlarda dahi böcek unu eklemenin çevresel ve ekonomik olarak faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması, mikroalg üretiminden nihai ürün kullanımına kadar olan süreci iki temel aşamada ele almaktadır. İlk aşamada, bira fabrikası atık suyundan elde edilen mikroalg biyokütlesinin üretimi ve bu üretimde en fazla çevresel etkinin geldiği basamakların belirlenerek iyileştirme olanakları değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise bu mikroalg biyokütlesinin balık yemi katkı maddesi olarak kullanılmasının sürdürülebilirliği incelenmiş ve geleneksel içerikle üretilen balık yemi ile çevresel etkileri karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ön fazı, TÜBİTAK'ın finanse ettiği 122N016 nolu, ERANET-SUSFOOD2-FOSC Ortak Programı kapsamında "Bira fabrikası atık ürünlerinin omega-3 açısından zengin hayvan yemi ve gübreye dönüştürülmesi için mikroalglerin potansiyelinin ortaya çıkarılması-AlgaeBrew" projesine dayanmaktadır. Bu projede, bira fabrikası atık suyundan mikroalg biyokütlesi elde edilmesi ve bu biyokütlenin balık yemi ve gübre üretiminde kullanılması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında ise elde edilen mikroalg biyokütlesinin sadece balık yemi eldesinde kullanılması kısmına odaklanılmıştır. Mikroalg biyokütlesinin bira fabrikası atık suyunda yetiştirilmesi ve yem katkı maddesi haline getirilmesi ile balık yemi üretimi ile ilgili bütün veriler bu projeden sağlanmıştır.

Çevresel etki değerlendirmesi için YDA yöntemi kullanılmış olup, uygulanan bu yöntemde uluslararası kabul gören ISO 14040 ve ISO 14044 standart serisi (ISO, 2006a, 2006b) takip edilmiştir. Sistemin enerji, kimyasal ve altyapı süreçlerine ait arka plan verileri, Ecoinvent v3.11 (Ecoinvent, 2024) veri tabanı temel alınarak modellenmiştir. CML etki değerlendirme yöntemi (CML, 2017) kullanılarak 11 adet çevresel etki kategorisi değerlendirilmiştir.

6.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışma iki temel amaca odaklanmaktadır: İlk olarak, bira fabrikası atık suyundan elde edilen mikroalg biyokütlesinin yaşam döngüsü çevresel etkileri değerlendirilerek en fazla etkinin geldiği basamaklara yönelik iyileştirme modellerinin geliştirilmesi; ikinci olarak ise, mikroalglerin balık yemi katkı maddesi olarak kullanımının geleneksel ticari balık yemi ile karşılaştırmalı sürdürülebilirlik potansiyelinin değerlendirilmesidir. Çalışmada su ürünleri yetiştiriciliğinde yaygın olarak üretimi yapılan çipura ürünü için 2 adet mevcut ticari standartlara uygun olarak üretilen, geleneksel içerikli (balık unu/yağı ağırlıklı) yem ve 2 adet geleneksel balık ununa alternatif veya destekleyici olarak mikroalg biyokütlesi ilave edilen yem olmak üzere toplam 4 farklı formül için çevresel etkiler değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışması, belirlenen sistem sınırları içerisinde değerlendirme yapabilmek

amacıyla iki ayrı fonksiyonel birim üzerinden kurgulanmıştır:

1. Mikroalg biyokütlesi üretim sürecinin çevresel performansını analiz etmek için “1,914 kg kuru mikroalg biyokütlesi”,
2. Elde edilen mikroalg biyokütlesinin balık yemi üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmasının çevresel etkisini değerlendirmek için “1 kg çipura yem üretimi”.

Çalışmanın devam eden bölümlerinde, her iki fonksiyonel birim için belirlenen sistem sınırları ve süreç tanımlamaları ayrı başlıklar altında detaylı bir şekilde sunulmuştur.

6.1.1. Mikroalg biyokütlesi üretimi

AlgaeBrew Projesinin iş akış diyagramı Şekil 6.1’de verilmiştir. Projede, omega-3 açısından yüksek lipit içeriğine sahip mikroalg grubu olan *Nannochloropsis* cinsinden *N. oceanica* türü kullanılmıştır. Besi ortamı için ise N, P ve diğer organik maddeler açısından zengin besin değerlerine sahip bira fabrikası atık suyu seçilmiştir.



Şekil 6.1. AlgaeBrew projesi iş akış diyagramı

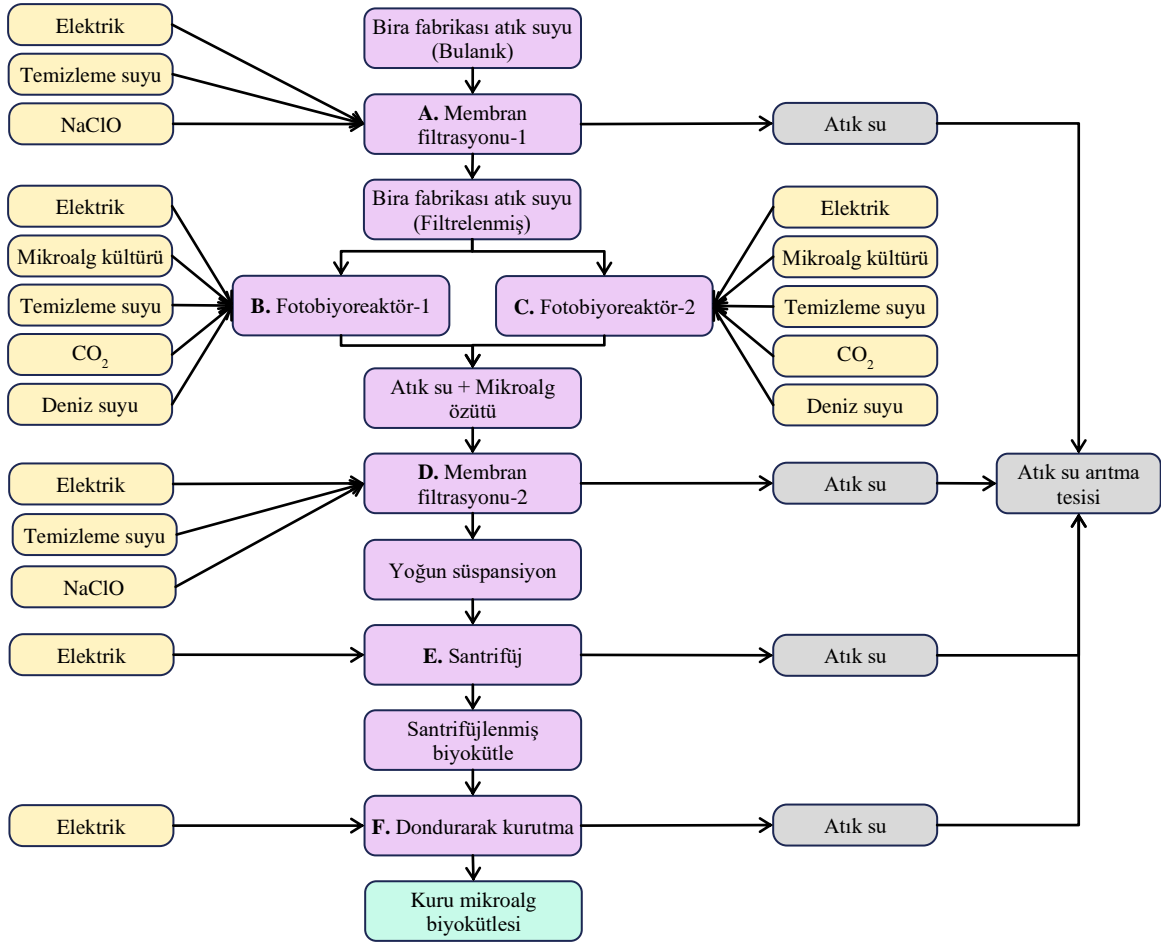
Laboratuvar denemelerinden sonra mikroalg yetiştirme ve çoğaltma işlemleri pilot ölçekli sistemde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada pilot tesisten alınan veriler kullanılmıştır. Atık su arıtımı ve üreme işlemlerini fotosentez yoluyla gerçekleştiren mikroalgler için yüksek katı madde seviyesine sahip bira fabrikası atık suyu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bira fabrikası atık suyu, sisteme atık bir girdi olarak dahil edilmiş ve bu atığın geri kazanımıyla oluşan çevresel faydalar “önlenebilir yük” yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Bu sayede, atık suyun bertarafı yerine bir kaynak olarak kullanımıyla sistem genelinde bir çevresel kredi sağlanmıştır.

Bira üretimi sonrası oluşan atık su membran filtrasyon işlemine tabi tutularak bulanıklık giderilmiştir. Daha sonra yetiştirme işlemi için atık su ve mikroalg kültürü FBR’ye alınmıştır. Çoğalan mikroalg biyokütlesini ve arıtılmış suyu birbirinden ayırmak için karışıma membran filtrasyon ve santrifüj işlemi yapılmış ve sudan ayrılan nemli biyokütle dondurularak kurutulmuştur. Kuru mikroalg biyokütlesi balık yemi katkı maddesi olmak üzere balık yemi

üretim tesisine aktarılmıştır.

Şekil 6.2’de gösterildiği gibi mikroalg biyokütlesi üretim prosesinin yaşam döngüsü analizi için “Beşikten-Kapıya” yaklaşımı baz alınmıştır. Analiz, ham madde tedarikinden başlayarak biyokütle üretimi prosesinin sonuna kadar olan basamakları kapsamaktadır. Projenin amacına uygun olarak, üretim süreçlerinin bira fabrikasıyla entegre bir şekilde yürütüldüğü senaryo temel alınmıştır. Bu kapsamda analizler, tesisin İrlanda’da yer aldığı kabulü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tesisten elde edilen atık suyun doğrudan mikroalg eldesi için üretim alanına iletildiği varsayılmıştır. Süreçte kullanılan bütün kimyasalların eldesi ve ulaşımı sistem sınırlarına dahil edilmiştir. Membran filtrasyon sürecinin bakımı ve temizlenmesinin de çevresel etkileri model içerisine dahil edilmiştir. Sistemde her bir basamakta oluşan atık sular arıtılmıştır. Pilot tesiste kullanılan cihazların yapım aşaması ve kullanım sonrası devreden alınması basamakları veri yetersizliğinden dolayı sistem sınırları dışında bırakılmıştır.

Çalışmada belirlenen fonksiyonel birim, atık sudan elde edilen “1,914 kg kuru mikroalg biyokütlesi” olarak tanımlanmıştır. Mikroalg biyokütlesinin üretimine ait iş akış şeması Şekil 6.3’te yer almaktadır. Çalışmada bu iş akış şemasındaki basamaklara göre mikroalg biyokütle üretiminin çevresel etkileri detaylandırılmıştır. Mikroalg biyokütlesi üretimi için membran filtrasyon 1 (A), fotobiyoreaktör 1 (B) ve fotobiyoreaktör 2 (C), membran filtrasyon 2 (D), santrifüj (E) ve dondurarak kurutma (F) basamakları değerlendirilmiştir.



Şekil 6.2. Mikroalg biyokütlesi üretim süreci

6.1.2. Balık yemi üretimi

Çalışmanın ikinci aşamasında, çipura için geleneksel yöntemlerle ve mikroalg bazlı balık unu kullanılarak reçeteler hazırlanmış ve çipura yem üretiminin sürdürülebilirliği 4 farklı reçete için analiz edilmiştir. Çalışmada belirlenen fonksiyonel birim, her bir senaryo için üretilen “1 kg çipura yemi” olarak tanımlanmıştır. Bu fonksiyonel birim, farklı su ürünleri için farklı oranlar ve reçetelerle hazırlanan balık yemlerinin çevresel etkilerini birbiri ile karşılaştırmak için tercih edilmiştir.

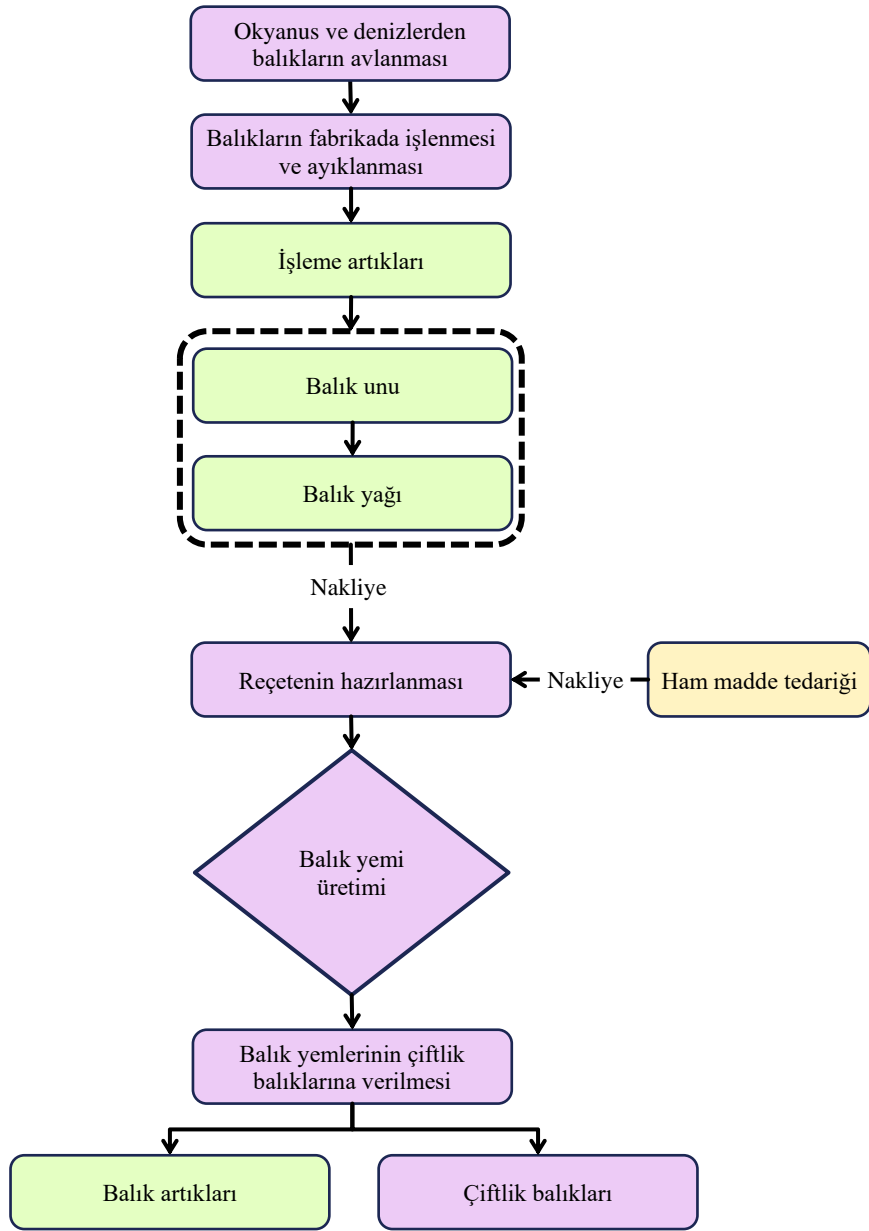
Geleneksel yöntemlerle hazırlanan balık yeminde tesise gelen balık unu ve diğer ham maddeler üretim için hazırlanmış ve makineye alınmıştır, ardından makinede ısıtma, karıştırma ve pişirme işlemleri gerçekleştirilerek balık yemi üretimi gerçekleştirilmiştir. Kuru mikroalg biyokütlesinin balık unu ikamesi olarak kullanıldığı üretim süreci de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Mikroalg biyokütlesi üretim süreci ile elde edilen kuru biyokütle, balık yemi üretim tesisine alınmıştır. Biyokütle ve diğer ham maddeler üretim için hazırlanarak makineye beslenmiştir. Makinede ısıtma, karıştırma ve pişirme işlemlerinin ardından balık yemi üretimi

gerçekleşmiştir.

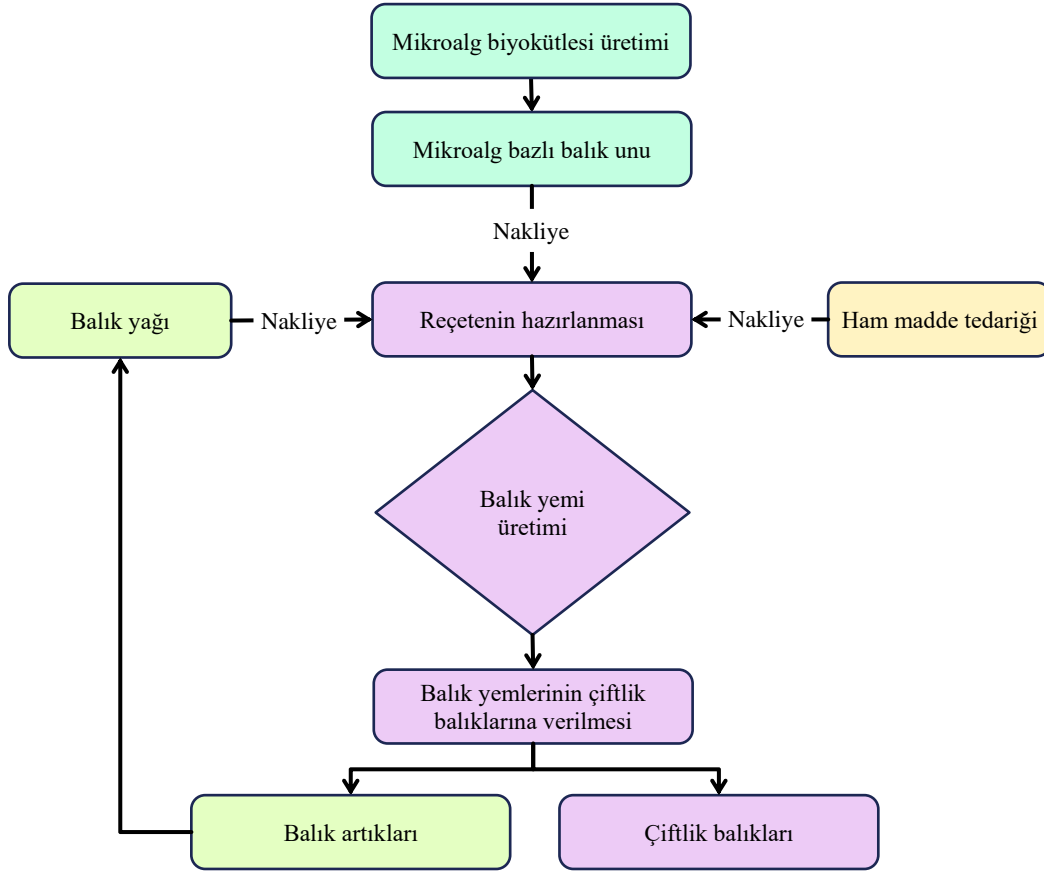
Geleneksel reçetelere uygun olarak 2 adet ve mikroalg biyokütlesinin kullanıldığı reçetelerle 2 adet balık yemi üretilmiştir. Reçeteleri sağlayan üreticiden alınan bilgiye dayanarak bu 4 adet balık yeminin her birine ait üretim prosesinin aynı proses parametreleri ve üretim teknolojisi kullanılarak üretildiği varsayılmıştır. Bu nedenle sadece ham madde içeriği değişen reçetelere göre yaşam döngüsü modelleri oluşturularak çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sistem sınırları, ham madde tedarikinden başlayarak yem üretim sürecinin sonuna kadar olan “Beşikten-Kapıya” yaklaşımını benimsemektedir. “Beşikten-Kapıya” yaklaşımının aşamaları; “yağ değirmeni süreci, ham madde tedariki ve ham maddenin hazırlanarak balık yemi üretimi” basamaklarını kapsamaktadır ve çalışmada bu basamaklara göre etki değerlendirilmesi yapılmıştır. Geleneksel yöntemlerle hazırlanan 2 adet ticari balık yeminin üretim süreci Şekil 6.3’te, mikroalg baz kullanılarak üretilen balık yeminin üretim süreci ise Şekil 6.4’te verilmiştir. Balık yemi üretim tesisinin mikroalg biyokütlesinin üretildiği alan ile aynı yerde olduğu varsayılarak nakliye süreçlerinin çevresel etkileri ihmal edilmiştir. “Beşikten-Kapıya” yaklaşımına uygun olarak yem fabrikasının inşaat aşaması ve işletimi süreci sisteme dahil edilmek istense de veri yetersizliğinden dolayı alternatif bir yol izlenmiştir. Yem fabrikaları; yüzen pelet üretimi için yüksek güçlü ekstrüderler ve yağ kaplama makineleri gibi birkaç iyileştirme içeren basit değirmenlerdir. Bu nedenle, su ürünleri yemi üretimi için gerekli altyapı olarak Ecoinvent veri tabanından jenerik bir yağ değirmeni süreci sisteme dahil edilmiştir. Ecoinvent veri tabanından, yıllık 1.782 ton işleme kapasitesine sahip bir su ürünleri yemi fabrikası seçilmiştir. Bu fabrikanın verileri, yine Ecoinvent veri tabanından seçilen günlük 63 ton kapasiteli ve 50 yıllık ömre sahip bir yağ değirmeni veri seti üzerinden modellenmiştir.

Çalışmanın amacına uygun olarak, üretilen ürünün paketlenmesi ve tüketiciye dağıtımı, ürünün su ürünü türleri tarafından tüketimi, tüketim esnasında oluşacak çevresel etkiler, tüketim sonrasındaki atık yönetimi ile tesisin yıkımı basamakları sisteme dahil edilmemiştir.



Şekil 6.3. Geleneksel balık yemi üretim süreci



Şekil 6.4. Mikroalg bazlı balık yemi üretim süreci

6.2. Envanter Verileri

Çalışmanın bu basamağı; verilerin toplanması, varsayımların belirlenmesi ve hesaplamaların yapılmasından oluşmaktadır. Yaşam döngüsü modellemeleri için gerekli arka plan verileri Ecoinvent v.3.11'den (Ecoinvent, 2024) sağlanmıştır. Veri tabanlarından seçilen veriler ile tesisin sağladığı verilerin birbiri ile örtüşmesine dikkat edilmiştir. Ham madde tedarigi ve ulaşım verileri için veri tabanında kabul edilen değerler sistem içerisinde kullanılmıştır.

6.2.1. Mikroalg biyokütlesi üretimi envanter verileri

Mikroalg biyokütlesi üretim sisteminin yaşam döngüsü modellemesi için gerekli veriler AlgaeBrew projesinden temin edilmiş olup, Tablo 6.1'de verilmiştir. Envanter analizi için gerekli olan veriler, deneysel süreçlerin ardından pilot ölçekli sistem denemelerinden elde edilmiştir. Modelleme sürecinde; kimyasal girdiler, membran ünitesi bakım operasyonları ve atık su yönetimi gibi süreçlerin çevresel envanterleri ile İrlanda şebeke elektriği verileri için Ecoinvent veri tabanından yararlanılmıştır.

Şekil 6.4'te gösterildiği gibi mikroalg biyokütlesi üretmek için kurulan pilot ölçekli

mikroalg üretim sisteminde, ilk adım bulanık haldeki bira fabrikası atık suyunun bulanıklığını gidermek olmuştur. Bu nedenle 2 m³ atık su, membran filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Böylece, atık su ortamı mikroalg kültürünün fotosentez yapabileceği ve üreyebileceği bir ortam haline getirilmiştir. Mikroalglerin ihtiyacı olan besin maddelerini bu atık sudan karşılamaları hedeflenmiştir. Membran filtrasyon ünitesinde 2,23 kW gücünde bir pompa kullanılmaktadır ve pompa saatte 100 litre su taşımaktadır. Bu verilere bağlı olarak ilk membran filtrasyon basamağında toplam 160,57 MJ'lük bir elektrik enerjisi harcanmıştır. Bu enerji pompanın çalıştırılması için kullanılmaktadır. Membran filtrasyonu sonucunda elde edilen ve mikroalg kültürünün yetiştirilmesi için kullanılan atık su miktarı 1,9 m³ tür. Filtrasyon sonucu oluşan 100 kg'lık atık su, atık su arıtımına gönderilmiştir. Ayrıca membran filtrasyonunda tıkanmalar yaşandığında temizlik yapılmaktadır. Bu temizlik için kullanılan su musluk suyu olup, 40 litre kadardır. Filtreler temizlendikten sonra oluşan atık su, atık su arıtımına gönderilmektedir. Membran filtrasyonu sisteminde pompa bakımı, filtre değişimi gibi çalışmaların çevresel etkileri de dahil edilmiştir. Ayrıca filtre temizliğinde çamaşır suyu yani sodyum hipoklorit (NaClO) kullanılmaktadır.

Bira fabrikası atık suyunun mikroalg üretimi için kullanılmaması durumunda bu su fabrikaya bir atık yükü getirecek ve fabrika bu suyu arıtmak isteyecektir. Arıtma işlemlerinden de belli bir miktar çevresel etki potansiyeli oluşacaktır. Ancak 2 m³ lük bira atık suyu, sisteme atık girdisi olarak dahil edilerek mikroalg üretiminde kullanıldığı için ve atık suyun bertarafı yerine bir kaynak olarak kullanıldığı için sistem genelinde bir çevresel kredi sağlanmıştır. Bu işlem modele “önlenebilir yük” olarak girilmiştir. Atık suyun çevresel etki yükü de Şekil 7.2'de gösterildiği şekilde negatif yöndedir. Bu da incelenen sistemin çevreye zarar vermek yerine, mevcut bir çevresel yükü ortadan kaldırdığını veya engellediğini ifade etmektedir.

Filtre edilen 1,9 m³ lük atık su iki ayrı FBR'ye (FBR-1 için 0,7 m³ ve FBR-2 için 1,2 m³) alınmıştır. Mikroalgler fotosentez yaparken ışıklı ortamda N ve P elementlerini indirgeyerek CO₂'yi oksijene çevirmektedir. Bu nedenle bira atık suyunda yeterli besin ortamını sağlayarak fotosentezin gerçekleşmesi için reaktöre sodyum fosfat (NaH₂PO₄.2H₂O) ve sodyum nitrat (NaNO₃) bileşiklerini içeren mikroalg kültürü (FBR-1 için 0,1 kg ve FBR-2 için 0,2 kg) ve sıvı fazda CO₂ (FBR-1 için 2 kg ve FBR-2 için 4 kg) eklenmiştir. Mikroalg kültürü için kullanılan kimyasalların tesise getirilmesi, sistem sınırlarına dahil edilmiştir. Mikroalgler fotosentez yaptıkları süreçte CO₂'yi indirgeyerek oksijene çevirdikleri için, sisteme dahil edilen sıvı fazdaki CO₂, tıpkı atık su prosesinde olduğu gibi sisteme çevresel kredi sağlamıştır. Yine FBR'lere eksilen su yerine musluk suyu ilavesi (FBR-1 için 200 kg ve FBR-2 için 400 kg)

yapılmıştır. FBR'lerde yapay ışıklandırma yerine güneş ışığı kullanılmaktadır. Proje kapsamında yürütülen deneysel araştırmalarda tuzlu su ile alg yetiştirme veriminin daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu sebepten dolayı reaktörlere, yeterli tuzluluğu kontrol etmek ve mineral dengesini sağlamak için deniz suyu (FBR-1 için 0,1 m³ ve FBR-2 için 0,4 m³) eklenmiştir. Ayrıca reaktörlerin çalışması için gerekli toplam elektrik enerjisi sırasıyla FBR-1 için 207,36 MJ, FBR-2 için 466,56 MJ olmuştur. Kültür ve su, mikroalg kültürünün yeterince büyümesi ve üremesi için optimum süre olan 12 gün boyunca reaktörde dinlendirilmiştir. FBR çıkışından alınan su ile karışık haldeki 3 m³ mikroalg özütü (FBR-1'den 1 m³ ve FBR-2'den 2 m³) tekrar membran filtrasyonuna verilmiştir.

Birinci membran filtrasyonu ile aynı işleme sahip olan bu adımda atık su arıtma tesisine gönderilmek üzere 3,2 m³ atık su oluşmuştur. Filtre edilen yoğun süspansiyon (0,06 m³), sıvı ve katı fazlarına ayrılması için santrifüjlenmiştir. 1,91 kW gücünde olan santrifüj cihazı 3 saat boyunca çalışarak 20,628 MJ'lük elektrik enerjisi tüketmiştir. Santrifüjlenmiş biyokütle (20 kg) ıslak yapıda olduğu için dondurarak kurutma işlemi ile kurutulmuştur. 2 kW gücünde olan dondurarak kurutma cihazı 20 l'lik ıslak biyokütle için 20 saat boyunca çalışarak 144 MJ elektrik enerjisi harcamıştır. Bu işlem sonucunda 1,941 kg kuru mikroalg biyokütlesi elde edilmiştir.

Seri üretim koşullarında mikroalg biyokütlesinin ülke içi ve ülke dışına sevkiyatı yapılırken hacimden tasarruf sağlanması, biyokütlenin biyokimyasal bileşenlerinin zarar görmemesi, biyokütlenin uzun süre bozulmaması amaçlandığı için dondurarak kurutma işlemi uygulanmış ve sistem laboratuvar koşullarında bu şekilde tasarlanmıştır. Kuru mikroalg biyokütlesi balık yemi katkı maddesi olmak üzere balık yemi üretim tesisine aktarılmıştır.

AlgaeBrew projesi İrlanda temelli bir proje olduğu için mikroalg biyokütlesi üretim tesisinin İrlanda'da kurulduğu varsayılarak sistem genelindeki enerji tüketiminin modellenmesinde, İrlanda şebeke elektriğini temsil eden Ecoinvent veri seti modeli kullanılmıştır. Modelde 2022 yılındaki İrlanda elektrik üretimi için model oluşturulmuş olup, temel olarak doğalgaz (%64), taş kömürü (%22) ve petrol (%9) gibi fosil kaynaklara dayanmaktadır. Yenilenebilir enerji kanadında en büyük payı rüzgar enerjisi (yaklaşık %2) almaktadır (Ecoinvent, 2024).

Tablo 6.1. Mikroalg biyokütlesi üretim sistemi tasarım verileri

| Proses Adımı | Proses | Girdiler | Miktar | Birim | Çıktılar | Miktar | Birim |
|--------------|-----------------------|---|----------|----------------|---|--------|----------------|
| A | Membran filtrasyonu-1 | Bira fabrikası atık suyu (Bulanık) | 2 | m ³ | Bira fabrikası atık suyu (filtrelenmiş) | 1,9 | m ³ |
| | | Elektrik | 160,57 | MJ | | | |
| | | Ultrafiltrasyon modülü | 7,96E-04 | adet | | | |
| | | Temizleme suyu | 40 | kg | Atık su (Arıtmaya gönderilen) | 140 | kg |
| | | NaClO | 0,18 | kg | | | |
| B | FBR-1 | Bira fabrikası atık suyu (Filtrelenmiş) | 0,7 | m ³ | Atık su + Mikroalg özütü | 1 | m ³ |
| | | Elektrik | 207,36 | MJ | | | |
| | | Temizleme suyu | 200 | kg | | | |
| | | Deniz suyu | 0,1 | m ³ | | | |
| | | Sıvı CO ₂ | 2 | kg | | | |
| | | NaH ₂ PO ₄ .2H ₂ O | 0,006 | kg | | | |
| | | Sodyum nitrat (NaNO ₃) | 0,094 | kg | | | |
| C | FBR-2 | Bira fabrikası atık suyu (Filtrelenmiş) | 1,2 | m ³ | Atık su + Mikroalg özütü | 2 | m ³ |
| | | Elektrik | 466,56 | MJ | | | |
| | | Temizleme suyu | 400 | kg | | | |
| | | Deniz suyu | 0,4 | m ³ | | | |
| | | Sıvı CO ₂ | 4 | kg | | | |
| | | NaH ₂ PO ₄ .2H ₂ O | 0,012 | kg | | | |
| | | Sodyum nitrat (NaNO ₃) | 0,188 | kg | | | |
| D | Membran filtrasyonu-2 | Atık su + Mikroalg özütü | 3 | m ³ | Yoğun süspansiyon | 0,06 | m ³ |
| | | Elektrik | 256,9 | MJ | | | |
| | | Ultrafiltrasyon modülü | 7,96E-4 | adet | | | |
| | | Temizleme suyu | 60 | kg | | | |
| | | Musluk suyu | 200 | kg | Atık su (Arıtmaya gönderilen) | 3,2 | m ³ |
| | | NaClO | 0,27 | kg | | | |
| E | Santrifüj | Yoğun süspansiyon | 0,06 | m ³ | Santrifüjlenmiş biyokütle | 20 | kg |
| | | Elektrik | 20,628 | MJ | Atık su (Arıtmaya gönderilen) | 0,04 | m ³ |
| F | Dondurarak kurutma | Santrifüjlenmiş biyokütle | 20 | kg | Kuru mikroalg biyokütlesi | 1,941 | kg |
| | | Elektrik | 144 | MJ | Atık su (Arıtmaya gönderilen) | 0,02 | m ³ |

6.2.2. Balık yemi üretimi envanter verileri

Çalışmanın bu aşamasında, belirli su ürünleri için balık yemi üretimi gerçekleştirilmiştir. Su ürünü olarak çipura seçilmiş, bu tür için geleneksel reçeteye hazırlanan ve içeriğinde klasik balık unu bulunan balık yeminin reçete bilgisi ve miktarları kullanılmıştır. Diğer tarafta, mikroalg bazlı balık unu ikamesi bulunan balık yeminin verileri kullanılmıştır. Bu iki farklı ürünün yaşam döngüsü modelleri oluşturularak çevresel sürdürülebilirlikleri karşılaştırılmıştır.

Ürün bazında yapılan yaşam döngüsü modellemesi için gerekli balık yemi içeriklerine ilişkin veriler AlgaeBrew projesi kapsamında doğrudan balık yemi üretici firmasından alınmıştır. Geleneksel balık unu ve mikroalg bazlı balık unu kullanılarak üretilen balık yemlerinin malzeme içeriği ve oranları Tablo 6.2’de verilmiştir.

İki adet geleneksel çipura yemi reçetesi, içeriğinde balık unu olacak ve olmayacak şekilde hazırlanmıştır. Çipura-1 olarak adlandırılan balık yemi içerisinde %15 oranında ticari balık unu bulunmaktadır. Yemin içeriğinde ayrıca; balık yağı, protein yemi, kireç taşı, et ve kemik unu, kolza tohumu küspesi, mısır tanesi, sodyum bikarbonat, soya küspesi ve yağı, buğday unu ve buğday tanesi bulunmaktadır. Çipura-2 olarak adlandırılan balık yeminin Çipura-1 isimli balık yeminden farkı, içeriğinde balık unu olmadan üretilmesidir. Ayrıca mısır tanesi de bulunmamaktadır ve girdilerin oranları değiştirilerek üretilmiştir.

Mikroalg bazlı balık unu ile hazırlanan iki adet reçetede ise mikroalg biyokütlesi tamamen balık unu yerine kullanılmıştır ve ticari balık unu reçeteye eklenmemiştir. Bu reçetelerde ise mikroalg bazlı balık ununun reçete içindeki miktarı değerlendirilmiştir. Çipura-3 olarak adlandırılan mikroalg bazlı balık yeminde %2 oranında, Çipura-4 isimli balık yeminde ise %14 oranında mikroalg bazlı balık unu bulunmaktadır.

Elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve tesis kurulum verileri Ecoinvent veri tabanından alınmıştır ve 4 reçete için de aynı değerler kullanılmıştır. Isı enerjisi, balık yemi üretimi makinesinden kaynaklanmaktadır. Tesis kurulumu ise, Ecoinvent veri tabanından sisteme dahil edilen jenerik bir yağ değirmeni sürecidir.

Balık yemi içeriğinin büyük bir kısmını kapsayan ve çalışmanın asıl amacını oluşturan balık unu, %65-72 arasındaki yüksek protein, zengin mineral ve vitamin içeriği ile balıklar için besleyiciliği yüksek bir ham maddedir (Hardy, 2008; Miles & Chapman, 2006). Bu nedenle reçetede balık unu yüzdesi diğer ham maddelerden daha fazladır. Kullanılan balık yağı ise sardalya gibi balıklardan elde edilmektedir. Balık yağının kullanım amacı, balıkların ihtiyacı

olan EPA ve DHA'yı temin etmektir. EPA ve DHA, balıklarda başışıklığı güçlendirerek hasta olmalarını engellemekte, balıkların büyüme ve üreme performanslarına katkı sağlamaktadır (Carr vd., 2023). Ayrıca balık yağı, yemin bağlayıcılığını arttırarak pelet oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Zaabwe vd., 2020). Balık yeminde bulunan bir diğer ham madde ise et ve kemik unudur. Balık ununa eşdeğer içeriğe sahip olan bu ham madde, yem maliyetlerini düşürmek amacıyla kullanılmakta ve atık azaltımına katkı sağlamaktadır (Godoy vd., 2016; Moutinho vd., 2017). Balık yeminde yer alan %100 ham protein yemi, hemoglobin tozundan elde edilmekte ve balıklardaki kan hücresi oluşumunu desteklemesi, oksijen taşınımının kolaylaşması için yeme ilave edilmektedir. Yemlerde kireç taşının kullanılma sebebi, balıklardaki kemik, pul ve diş gelişimini ve yemlerdeki kalsiyum-fosfor dengesini sağlamaktır (Fontagné vd., 2009). Ayrıca kireç taşı yemin dağılmasına engel olur (Goodrich vd., 2022). Balık yemlerinde soya yağı ve küspesi de kullanılmaktadır. Sebebi, soyadaki zengin linoleik asit ve lizin amino asidi içeriğidir (Gatlin III vd., 2007; Y. Zhang vd., 2021). Aynı zamanda soya da yüksek protein içeriğine sahip ekonomik bir alternatiftir (Dersjant, 2021).

Tablo 6.2. Çipura için üretilen geleneksel ve mikroalg bazlı balık yemlerinin ham madde girdileri

| Girdiler | Birim | Çipura-1 (%15 balık unu) | Çipura-2 (%0 balık unu) | Çipura-3 (%2 mikroalg unu %0 balık unu) | Çipura-4 (%14 mikroalg unu %0 balık unu) |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|--|--|
| Elektrik | MJ | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 |
| Isı (Doğalgaz ve diğer) | MJ | 0,591 | 0,591 | 0,591 | 0,591 |
| Tesis Kurulumu | adet | 8,63E-10 | 8,63E-10 | 8,63E-10 | 8,63E-10 |
| Ham Maddeler | | | | | |
| - Mikroalg biyokütlesi | kg | - | - | 0,020 | 0,141 |
| - Balık unu | kg | 0,141 | - | - | - |
| - Balık yağı | kg | 0,037 | 0,049 | 0,046 | 0,073 |
| - Protein yemi | kg | 0,019 | 0,076 | 0,074 | 0,103 |
| - Kireç taşı | kg | 0,005 | 0,005 | 0,011 | 0,001 |
| - Et ve kemik unu | kg | 0,172 | 0,222 | 0,253 | 0,253 |
| - Kolza tohumu küspesi | kg | 0,094 | 0,081 | 0,101 | 0,071 |
| - Mısır tanesi | kg | 0,067 | - | - | - |
| - Sodyum bikarbonat | kg | 0,004 | 0,011 | 0,008 | 0,010 |
| - Soya küspesi | kg | 0,119 | 0,260 | 0,180 | 0,094 |
| - Soya yağı | kg | 0,069 | 0,050 | 0,056 | 0,042 |
| - Buğday unu | kg | 0,094 | 0,101 | 0,101 | 0,101 |
| - Buğday tanesi | kg | 0,178 | 0,146 | 0,150 | 0,111 |
| TOPLAM | kg | 1 | 1 | 1 | 1 |

6.3. Etki Kategorileri ve Hesaplama

Çalışmanın çevresel boyuttaki yaşam döngüsü analizi hem mikroalg biyokütlesi üretimi hem de geleneksel balık yemi ile mikroalg bazlı balık yemi için ham madde tedarikinden başlayarak yem üretim sürecinin sonuna kadar olan “Beşikten-Kapıya” aşamalarını kapsayacak şekilde yapılmıştır. YDA, GaBi v.10.7 (Sphera, 2023) ve LCA veri tabanı olan Ecoinvent v.3.11 (Ecoinvent, 2024) kullanılarak oluşturulmuştur.

GaBi, detaylı karbon ayak izi hesabı yapan, hesaplamalarını çevresel etki değerlendirmeleri ile bağdaştırabilen, Almanya Stuttgart’ta geliştirilmiş bir yaşam döngüsü analizi yazılım aracıdır ve Ecoinvent gibi küresel boyutta kapsamlı ve güncelliğini koruyabilen veri tabanları ile çalışmayı sağlamaktadır (Abu vd., 2021; Tubón-Núñez vd., 2025).

Çevresel etki kategorileri F.1 formülü ile hesaplanmaktadır (Rosenbaum vd., 2018).

$$EP_k = \sum_e (FB_e \cdot E_e) \quad (F.1)$$

k- Etki kategorisi

EP_k- Etki kategorisi için etki puanı

e- tüm emisyonlar ve kaynak kullanımları

FB_e- Fonksiyonel birim

E_e- Etki kategorisi içerisinde sınıflandırılan tüm envanter verileri

7. BULGULAR

Çalışmada, mikroalg biyokütlesi üretimi ve balık yemi üretimi süreçleri için yaşam döngüsü boyutunda çevresel etki değerlendirme modellemesi oluşturulmuştur. Balık yemi yaşam döngüsü analizinde hem geleneksel ticari balık yemi hem de mikroalg bazlı balık yemi için YDA hazırlanmıştır.

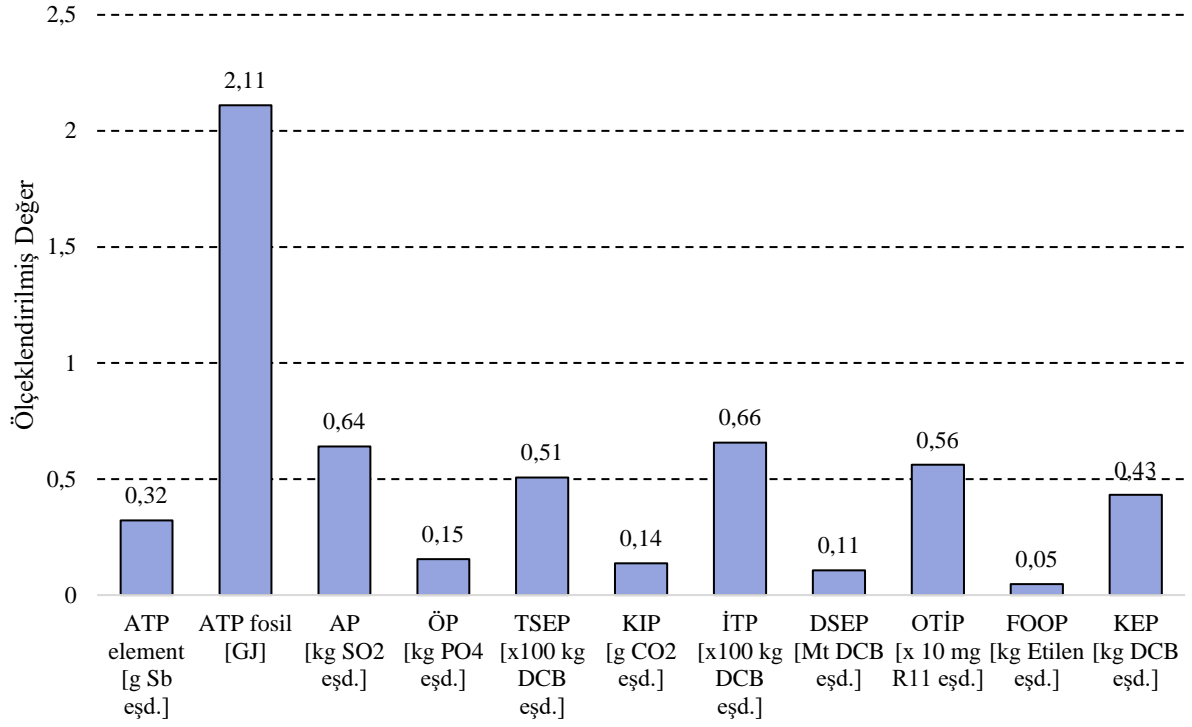
Mikroalg biyokütlesi üretiminin ve mikroalg bazlı balık yemlerinin yaşam döngüsü çevresel etkileri GaBi v.10.7 (Sphera, 2023) yazılımı ve Ecoinvent v.3.11 (Ecoinvent, 2024) veritabanı kullanılarak hesaplanmış ve tüm sonuçlar CML metodu (CML, 2017) kullanılarak 11 adet çevresel etki kategorisinde değerlendirilmiştir.

Mikroalg biyokütlesi üretiminin sistem sınırları; ham madde eldesi, kimyasalların nakliyesi ve biyokütle üretimi olup, sonuçlar “1,941 kg mikroalg bazlı biyokütle” için oluşturulmuştur. Mikroalg bazlı balık yeminin sistem sınırları olan tesis inşaatı, ham madde tedarigi ve ulaşımı, balık yemi üretimi için ise sonuçlar “1 kg çipura yemi” için oluşturulmuştur.

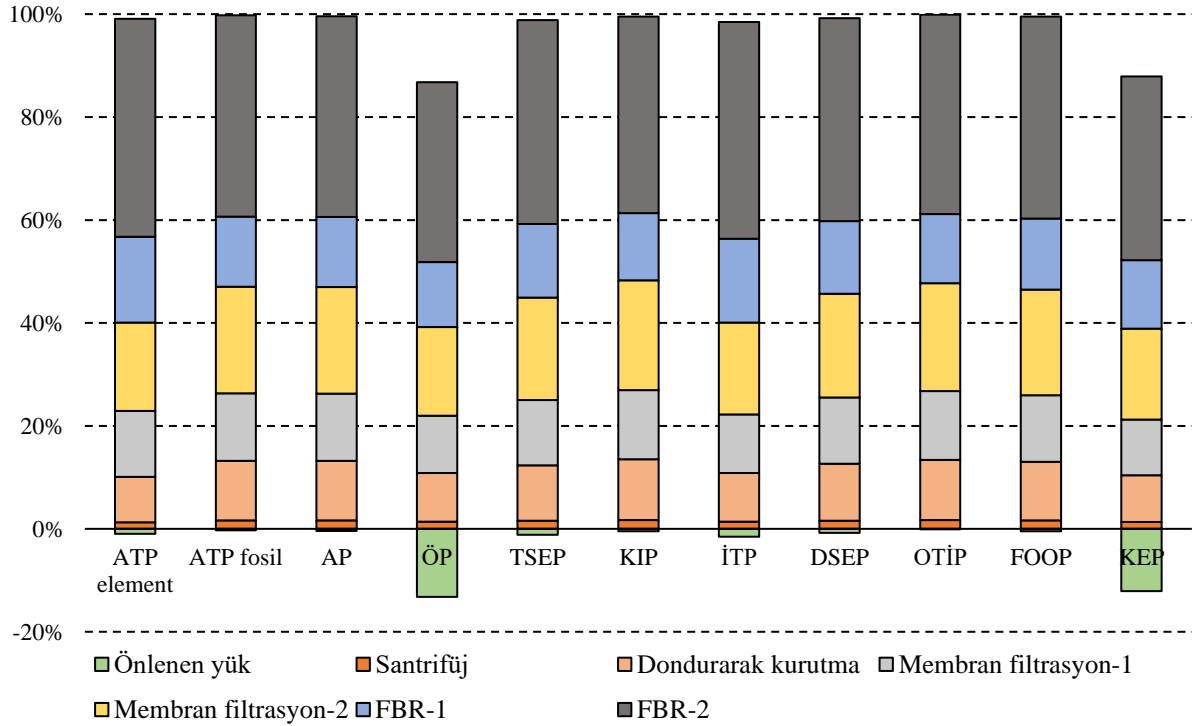
7.1. Mikroalg Biyokütlesi Yaşam Döngüsü Çevresel Etkileri

Bira atık suyundan elde edilen mikroalg biyokütlesi üretiminin yaşam döngüsü çevresel etkileri bu bölümde analiz edilmiştir. Çevresel etki kategorilerinin sonuçları, detaylı olarak her bir üretim basamağı için fonksiyonel birime bağlı olarak verilmiştir.

1,941 kg mikroalg bazlı biyokütle olarak seçilen fonksiyonel birim için toplam çevresel etki değerleri Şekil 7.1’de verilmiştir. Mikroalg biyokütlesinin üretim basamakları; membran filtrasyon-1, FBR-1, FBR-2, membran filtrasyon-2, santrifüj ve dondurarak kurutma olup, her bir üretim basamağından kaynaklanan çevresel etki sonuçlarının yüzdesel dağılımı Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Mikroalg biyokütlesi üretiminin toplam yaşam döngüsü çevresel etkileri (1,914 kg mikroalg biyokütlesi için)



Şekil 7.2. Mikroalg biyokütlesi üretiminin toplam yaşam döngüsü çevresel etkilerinin üretim basamaklarına olan yüzdesel dağılımı

7.1.1. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli

ATP element, üretim sisteminde fosil kaynaklar hariç doğadaki element ve minerallerin

tükenmesi potansiyelini ifade etmektedir. Mikroalg biyokütlesi üretim sisteminde ise ATP element değeri, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 0,32 g Sb eşd. olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.1). ATP elementine en fazla katkısı bulunan üretim basamağı ise yaklaşık %43 ile FBR-2'dir. En düşük etkinin ise yaklaşık %1'lik katkısı ile santrifüjden geldiği görülmektedir. Sistemde arıtmaya gönderilen atık sular için önlenen kirlilik yükü %1'e yakın değer ile karşımıza çıkmaktadır.

7.1.2. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli fosil

ATP fosil değeri, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 2,11 GJ olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.1). Bu değer, doğalgaz, kömür, petrol gibi enerji bazlı doğal kaynakların tükenmesi demektir. Şekil 7.2'de sunulduğu gibi ATP fosile en büyük katkıyı yaklaşık %39 ile FBR-2 ve yaklaşık %21 ile membran filtrasyonu-2 basamağı sağlamaktadır. En düşük etki ise yaklaşık %2'lik etkisi ile santrifüjdür. %0,3 civarında hesaplanan negatif yük, arıtmaya gönderilen atık sulardan kaynaklanmaktadır.

7.1.3. Asidifikasyon potansiyeli

Şekil 7.1'de görüldüğü üzere 1,941 kg mikroalg biyokütlesi üretiminden 0,64 kg SO₂ eşd. sahip AP değeri hesaplanmıştır. AP değeri, kükürtlü ve azotlu bileşiklerin sebep olduğu asit yağmurlarını temsil etmektedir. Katkılarında ise FBR-2 ve membran filtrasyonu-2 baskındır. FBR-2 basamağının katkısı yaklaşık %39, membran filtrasyonu-2'nin katkısı ise %21 civarındadır. En düşük katkı ise %1 ile santrifüjden gelmektedir. AP'deki negatif yönde ilerleyen ve AP değerini düşüren yük %0,4 ile atık su arıtımına gönderilen sulardan kaynaklanmaktadır (Şekil 7.2).

7.1.4. Ötrofikasyon potansiyeli

ÖP, bileşiklerin ve besinlerin sularda ve toprakta aşırı gübre birikimine sebep olma potansiyelidir. ÖP değeri, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 0,15 PO₄ eşd. olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.1). Şekil 7.2'de sunulduğu üzere, FBR-2 basamağı %48'lik değeri ile en fazla katkıyı sağlamaktadır. ÖP'deki negatif yönde ilerleyen değer diğer tüm çevresel etkilerden daha fazla yüzdeye sahiptir. %18'lik bu değer, atık suyun arıtılmasından gelmektedir. ÖP'ye en düşük etki yaklaşık %2 ile santrifüjden gelmektedir.

7.1.5. Tatlı su ekotoksitesi potansiyeli

TSEP, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 51 kg DCB eşd. (Şekil 7.1) ile tatlı su ekosistemlerindeki toksik yükü ifade etmektedir. Etkinin en büyük katkı sağlayanları yaklaşık

%41 ile FBR-2 ve %20 ile membran filtrasyon-2 basamağıdır. Şekil 7.2'den görüleceği gibi en düşük etki ise yine santrifüjden gelmektedir ve yaklaşık %2'lik bir etki mevcuttur. TSEP'teki önlenen yük miktarı yaklaşık %1'dir.

7.1.6. Küresel ısınma potansiyel

Sistemin KIP değeri, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 0,14 g CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.1). Bu değer iklim değişikliğine sebep olan gazların varlığından kaynaklanmaktadır. KIP'e en fazla katkı yaklaşık %39 ile FBR-2 basamağından, arkasından ise yaklaşık %21 ile membran filtrasyon-2 basamağından gelmektedir. FBR-1 ve FBR-2 basamaklarında kullanılan CO₂, etki analizinde negatif yük sağlamıştır (Şekil 7.2). Santrifüj, %2 civarında en düşük etkiye sahiptir.

7.1.7. İnsan toksisitesi potansiyeli

İTP değeri, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 66 kg DCB eşd. olarak hesaplanmış olup, Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Bu değer insan sağlığı üzerindeki toksik etkileri göstermektedir. Etkiye en fazla katkı yaklaşık %44'lük değer ile FBR-2'den gelmektedir. En düşük katkı ise yaklaşık %1 değeri ile santrifüjden gelmektedir. Yaklaşık %2 ile atık su arıtımı bu etki kategorisinde azalmaya sebep olmuştur.

7.1.8. Deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli

Toplam DSEP, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi üretiminde 0,11 Mt DCB eşd. olarak oluşmuştur (Şekil 7.1). DSEP, deniz ekosistemi üzerindeki toksik yükü ifade etmektedir. FBR-2 basamağı (%40) ve membran filtrasyon-2 basamağı (%21) potansiyele olan en büyük katkıya neden olmaktadır. Şekil 7.2'de sunulduğu üzere, en düşük katkı ise yaklaşık %2 ile santrifüj basamağından gelmektedir. DSEP'teki önlenen yük %1'e yakın değer ile atık su arıtımından gelmektedir.

7.1.9. Ozon tabakasının incilmesi potansiyeli

1,941 kg mikroalg biyokütlesi üretimi esnasında 5,6 mg DCB eşd. OTİP etkisi meydana gelmektedir (Şekil 7.1). Etki dağılımına göre en yüksek etki yaklaşık %39 ile FBR-2'den, en düşük etki yaklaşık %2 ile santrifüj basamağından kaynaklanmaktadır. Bu etki kategorisinde %0,1 civarında önlenen bir yük bulunmaktadır (Şekil 7.2). Bu değer, atık su arıtımından gelmektedir.

7.1.10. Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi FOOP değeri, 1,941 kg mikroalg biyokütlesi için 0,05 kg

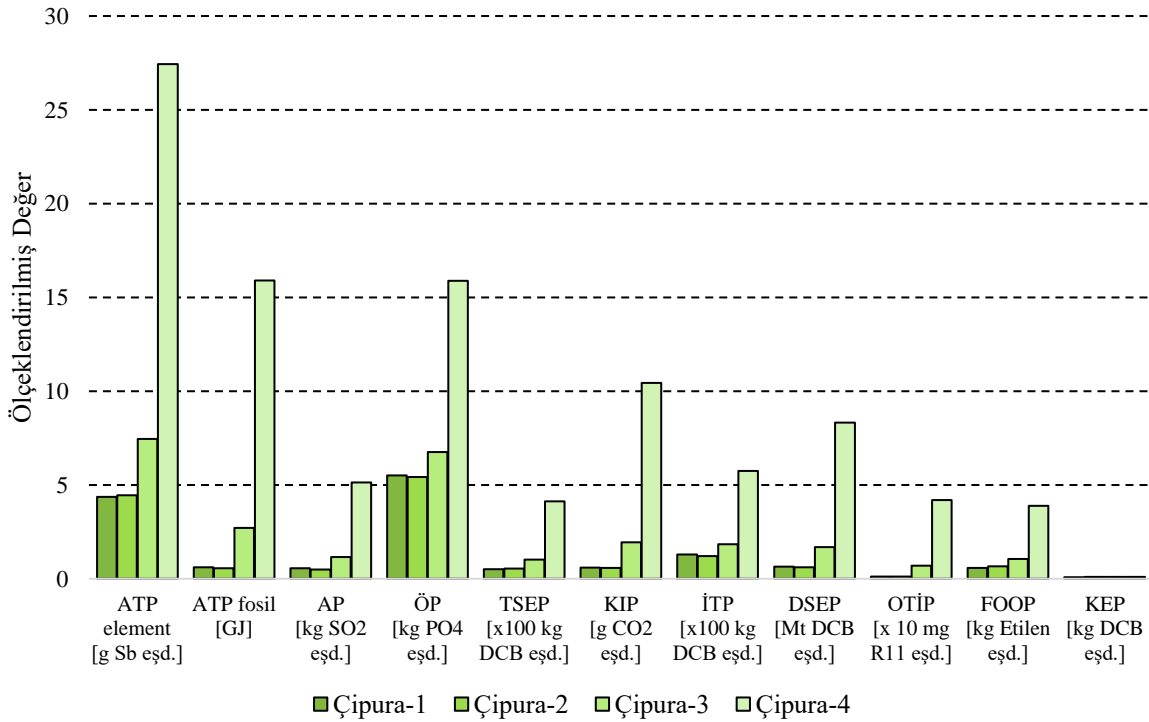
C₂H₄ eşd. olarak hesaplanmıştır. %40 civarındaki sonucu ile FBR-2 basamağı en büyük etkiyi yapmaktadır. Onu %21’lik değeri ile membran filtrasyon-2 basamağı takip etmektedir. En düşük etki ise yaklaşık %2 ile santrifüjden gelmektedir (Şekil 7.2).

7.1.11. Kara ekotoksitesitesi potansiyeli

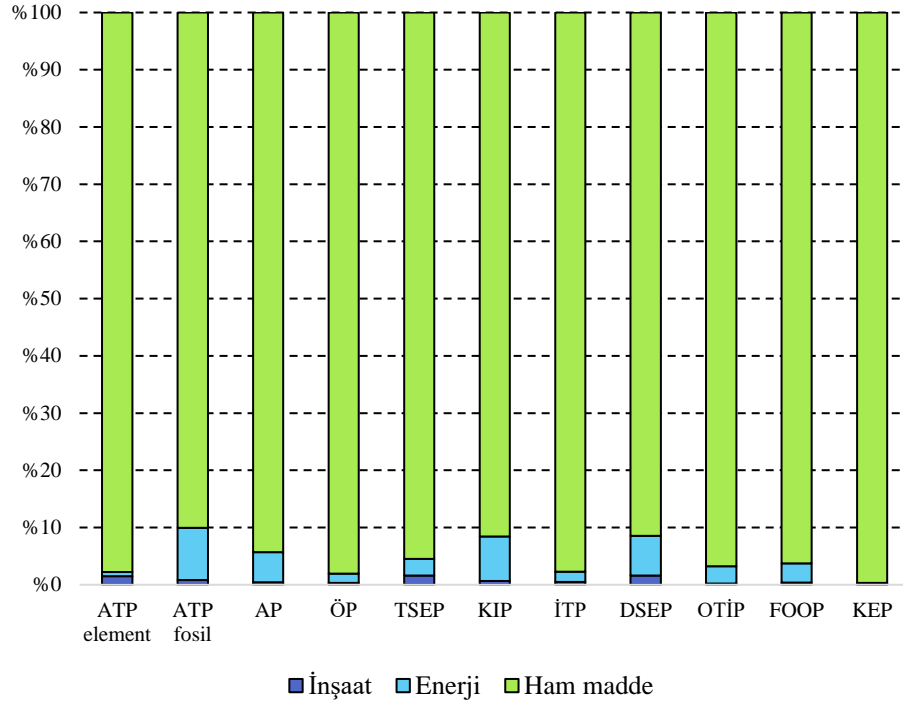
KEP, karasal ekosistem üzerindeki toksik baskıyı ifade etmektedir. Şekil 7.1’de gösterildiği üzere toplam 1,941 kg mikroalg biyokütlesi üretiminde oluşan toplam KEP değeri 0,43 kg DCB eşd. olarak hesaplanmıştır. KEP sonucuna en büyük katkı yaklaşık %47 ile FBR-2’den gelmektedir. En düşük katkı ise yaklaşık %2 ile santrifüjden gelmektedir. Negatif etki sağlayarak bu hesaplamaların değerinin düşmesine neden olan etki, %16’lık değeri ile atık su arıtımıdır (Şekil 7.2).

7.2. Balık Yemi Yaşam Döngüsü Çevresel Etkileri

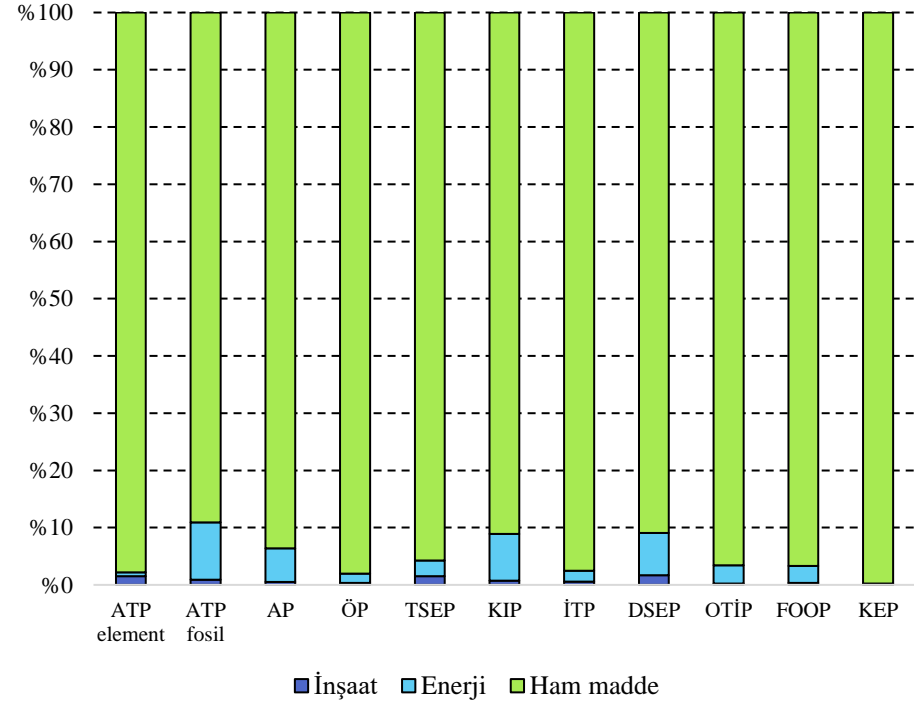
Mikroalg bazlı balık yemlerinin yaşam döngüsü çevresel etkileri bu bölümde değerlendirilmiştir. Çevresel etki kategorilerinin sonuçları, detaylı olarak her bir yaşam döngüsü basamağı ve ham madde için değerlendirilmiş ve fonksiyonel birime bağlı olarak verilmiştir. Geleneksel balık yemi reçeteleriyle hazırlanan Çipura-1 ve Çipura-2 ile mikroalg bazlı balık yemi reçeteleriyle üretilen Çipura-3 ve Çipura-4 yemlerinin toplam yaşam döngüsü çevresel etki değerleri Şekil 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.3. Geleneksel balık yemi ile mikroalg bazlı balık yemi üretiminin toplam yaşam döngüsü çevresel etkileri

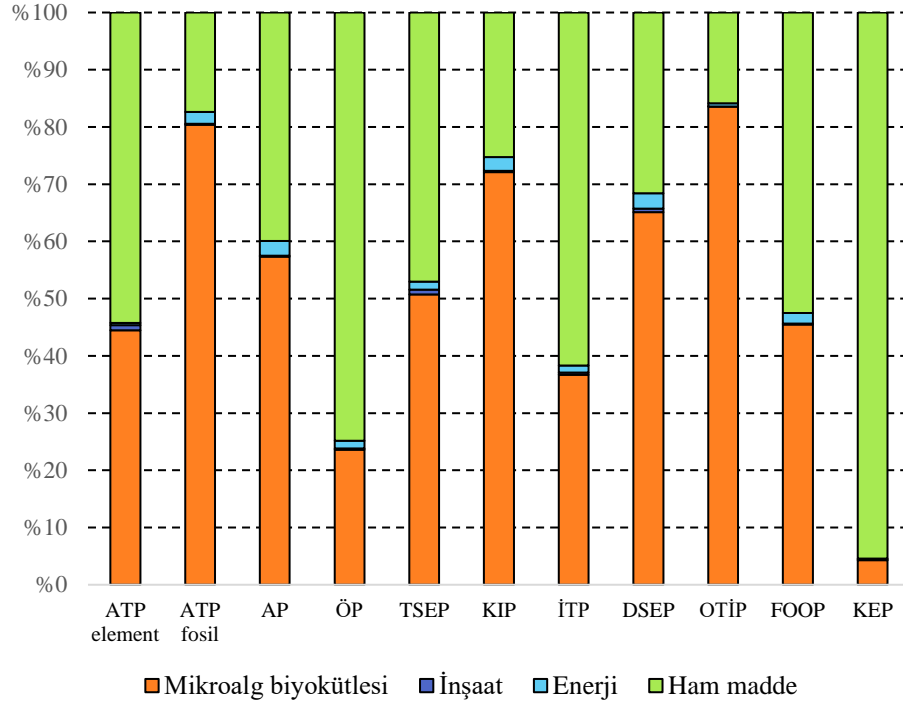


(a) %15'lik Balık Unuyla Üretilen Çipura-1 Balık Yemi

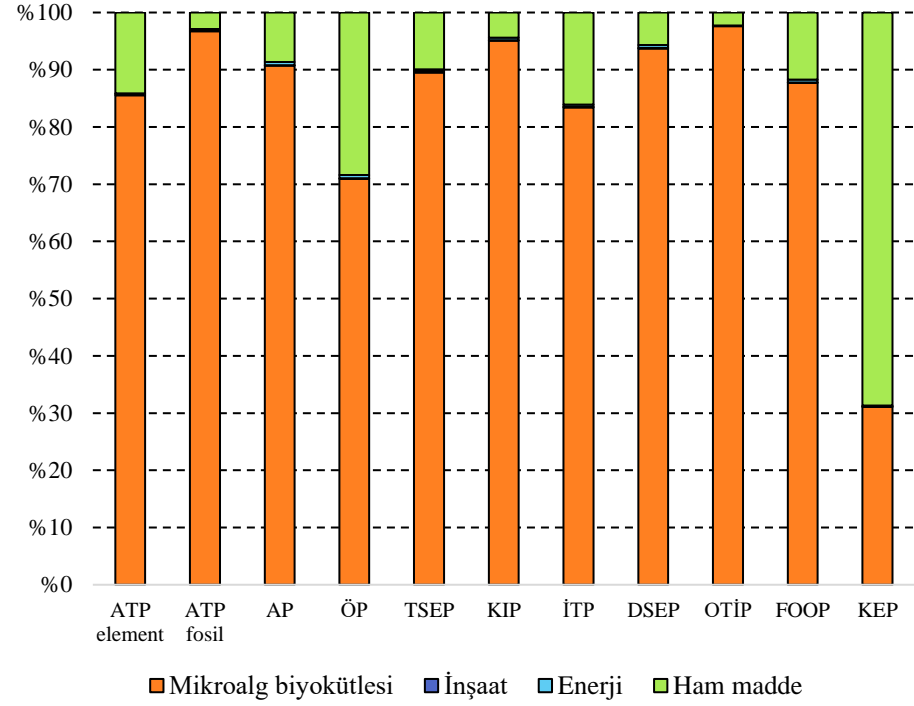


(b) %0'lık Balık Unuyla Üretilen Çipura-2 Balık Yemi

Şekil 7.4. Geleneksel balık yeminin yaşam döngüsü basamaklarının çevresel etkileri



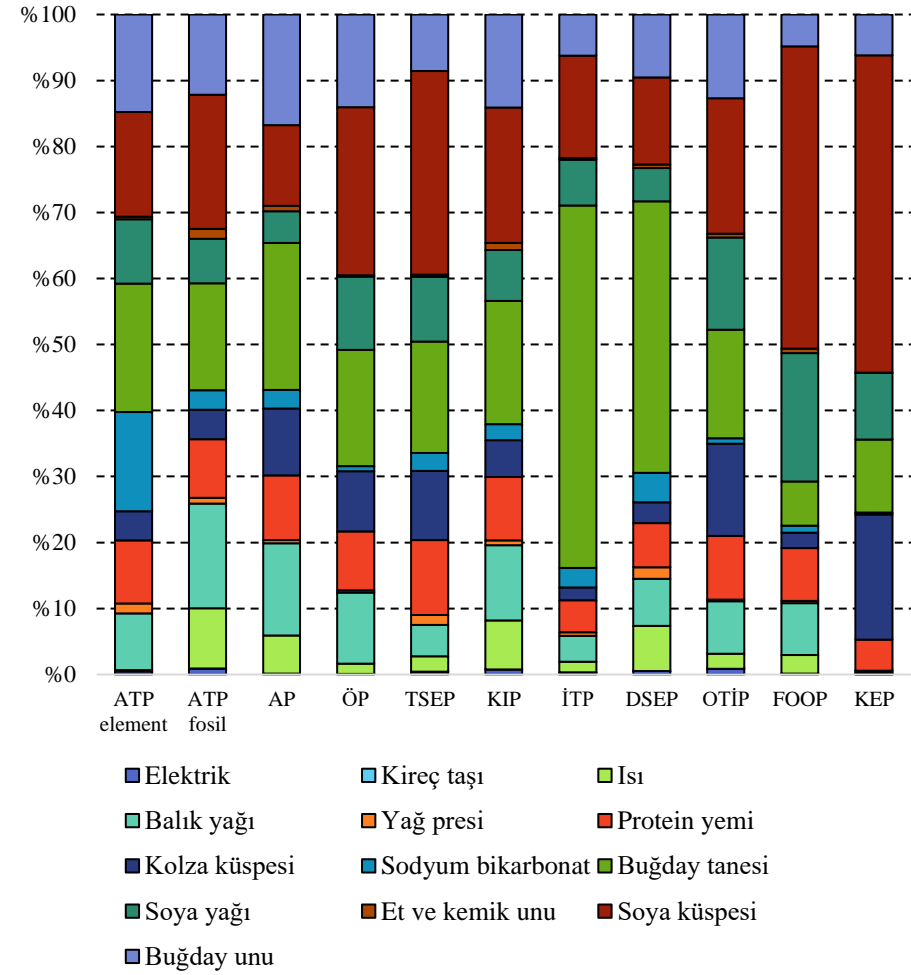
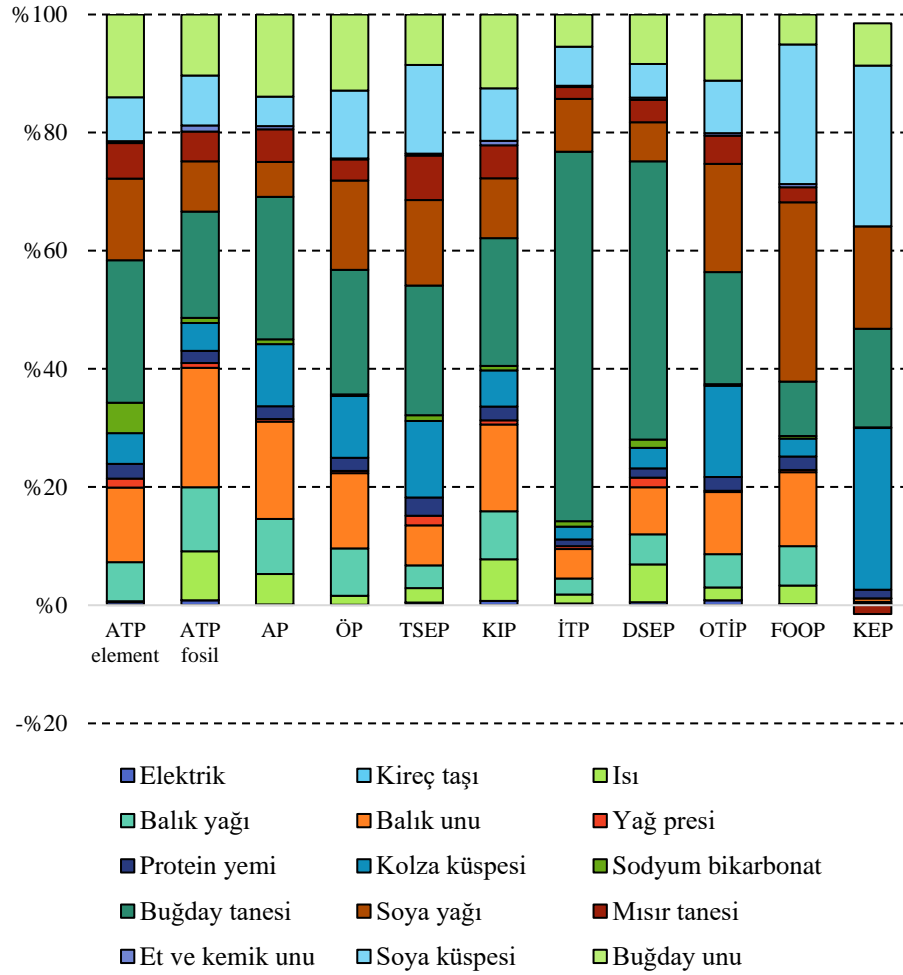
(a) %2'lik Mikroalg Unuyla Üretilen Çipura-3 Balık Yemi



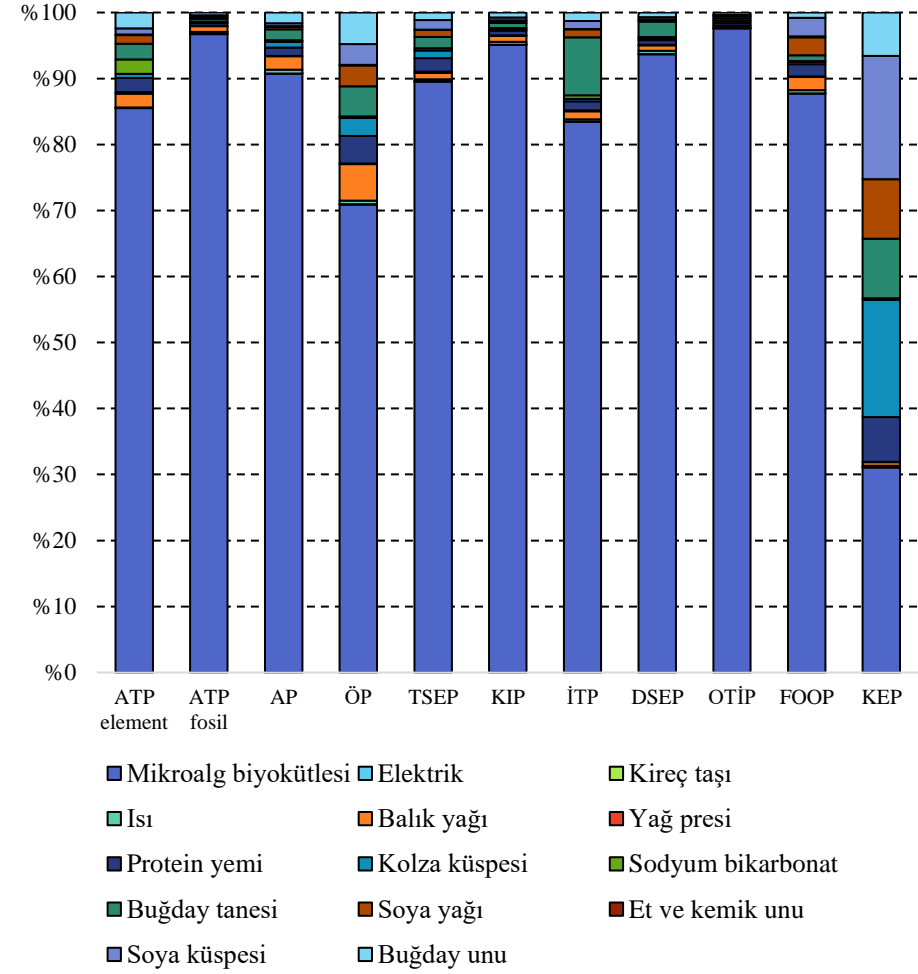
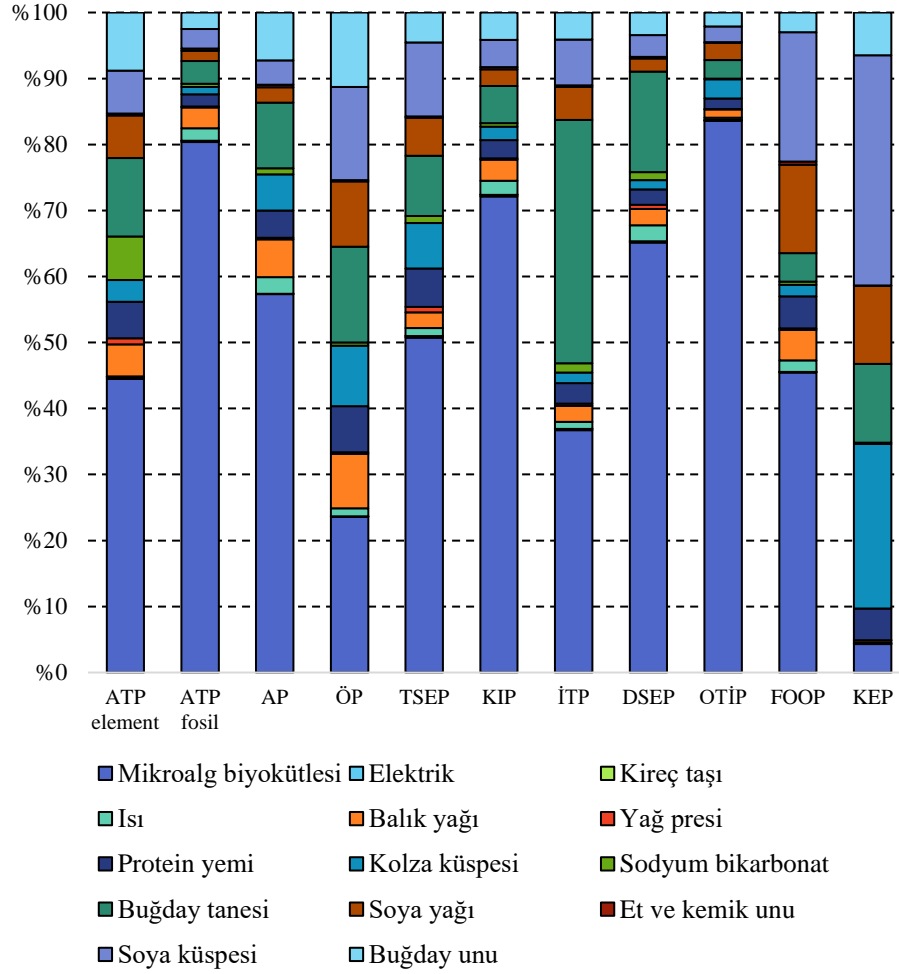
(b) %14'lük Mikroalg Unuyla Üretilen Çipura-4 Balık Yemi

Şekil 7.5. Mikroalg bazlı balık yeminin yaşam döngüsü basamaklarının çevresel etkileri

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de, balık yemi üretim süreçlerinde kullanılan ham maddelerin çevresel etki kategorileri üzerindeki yüzdesel katkı dağılımları grafiksel olarak verilmektedir. Her iki başlıkta sonuçlar iki alt grafik halinde (a) ve (b) olarak verilmiş olup, aynı balık yemi türü kapsamında farklı ham madde oranlarına sahip reçetelerin karşılaştırmalı gösterimi amaçlanmaktadır. Grafikler, ilgili yem bileşimlerinde kullanılan her bir ham maddenin toplam çevresel etki içerisindeki oransal payını göstermektedir. Şekil 7.6, geleneksel balık yemi üretimiyle ilgili sonuçları içermektedir. Bu kapsamda, (a) alt grafiğinde %15 oranında balık unu içeren ve Çipura-1 olarak adlandırılan balık yeminin çevresel etki sonuçlarının yüzde dağılımı gösterilmektedir. Aynı şeklin (b) alt grafiğinde ise %0 oranında balık unu içeren ve Çipura-2 olarak adlandırılan balık yemine ait yüzdesel dağılım yer almaktadır. Her iki alt grafikte de üretime dahil edilen ham maddelerin ilgili çevresel etki kategorilerine katkıları, toplam etkinin yüzdeleri olarak ifade edilmektedir. Böylece, balık unu içeren ve içermeyen reçeteler arasındaki dağılım farklılıkları aynı grafik başlığı altında sunulmaktadır. Şekil 7.7’de ise mikroalg bazlı balık yemi üretimine ilişkin sonuçlar yer almaktadır. Burada da veriler iki alt grafik halinde verilmektedir. (a) alt grafiğinde %2 oranında mikroalg unu içeren ve Çipura-3 olarak adlandırılan balık yemine ait çevresel etki sonuçlarının yüzdesel dağılımı verilirken, (b) alt grafiğinde %14 oranında mikroalg unu içeren ve Çipura-4 olarak tanımlanan balık yemine ait dağılım verilmektedir. Her iki alt grafikte de, toplam çevresel etki içindeki hammaddelerin payları yüzdesel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 7.6. Geleneksel balık yemi üretimine giren her bir ham maddeden kaynaklanan çevresel etki sonuçlarının yüzdesel dağılımı



Şekil 7.7. Mikroalg bazlı balık yemi üretimine giren her bir ham maddeden kaynaklanan çevresel etki sonuçlarının yüzdesel dağılımı

7.2.1. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli element

Çipura-1 isimli reçetede %15 oranında balık unu yer almaktadır. Reçetede ki oranlara göre toplam ATP element değeri, en fazla ham maddeden gelmektedir. İnşaat (%1,52) ve enerjinin (%0,70) etkisi oldukça az iken ham madde %97,8 etkiyle oldukça yüksektir (Şekil 7.4). Ham maddenin dağılımında ise buğday tanesi %24,11'lik sonucuyla en büyük etkiye sahiptir (Şekil 7.6). Buğday unu %14,04, soya yağı %13,79 ve balık unu %12,63 ile onu takip etmektedir. Bu sonuçlar, ATP elementin, özellikle buğday tanesi ve buğday unu bileşenlerinde yoğunlaştığını göstermektedir.

Çipura-2 isimli reçetede de ise balık unu bulunmamaktadır. Çipura-2 reçetesinin sonuçlarına göre, ATP element etkisinin %97,82'si ham maddeden, %1,50'si inşaattan ve %0,69'u enerjiden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt dağılımında buğday tanesi %19,41 oranı ile en yüksek katkıyı sunmaktadır. Bunu sodyum bikarbonat (%15,07), buğday unu (%14,78) ve soya yağı (%9,77) takip etmektedir. ATP element etkisi ham maddenin özellikle buğday tanesi ve sodyum bikarbonat bileşenlerinde yoğunlaşmaktadır.

Çipura-3 reçetesinin sonuçlarına göre, ATP element etkisinin %54,23'ü ham maddeden, %44,47'si mikroalg biyokütlesinde, %0,89'u inşaattan ve %0,41'i enerjiden kaynaklanmaktadır (Şekil 7.5). Ham madde alt kırılımında en yüksek katkı, mikroalglerden sonra buğday tanesi (%11,89) bileşenine aittir (Şekil 7.7). Bunu buğday unu (%8,80), sodyum bikarbonat (%6,59) ve soya yağı (%6,47) izlemektedir. ATP elementin etkisi ham madde içinde özellikle buğday tanesi ve buğday unu bileşenlerinde yoğunlaşmaktadır.

Çipura-4 reçetesinin sonuçlarına göre, ATP element etkisinin %85,51'i mikroalg biyokütlesinden, %14,13'ü ham maddeden kaynaklanmaktadır. İnşaat (%0,24) ve enerji (%0,11) katkıları oldukça düşüktür. Diğer ham madde alt dağılımında buğday tanesi (%2,40) ve buğday unu (%2,39) en yüksek paylara sahiptir. Bunu sodyum bikarbonat (%2,20) ve balık yağı (%2,09) izlemektedir. Bu etki kategorisinde baskın katkı açık şekilde mikroalg biyokütlesidir.

7.2.2. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli fosil

Çipura-1 için ATP fosilin sonucunda da benzer bir yapı söz konusudur. %0,80 ile inşaattan ve %9,14 ile enerjinin katkılarına göre, toplam etkinin %90,06'sı ham maddeden gelmektedir. Ham madde içindeki dağılımda balık unu %20,19 etki ile, buğday tanesi %17,99'luk etki ile en yüksek orana sahiptir. ATP fosil etkisinin ağırlıklı olarak balık unu ve buğday tanesi kaynaklı olduğu görülmektedir.

Çipura-2 için ATP fosil etkisinin %89,07'si ham maddeden, %10,05'i enerjiden ve %0,88'i inşaattan gelmektedir. Ham madde içindeki dağılımda soya küspesi (%20,35) en yüksek paya sahiptir. Bunu buğday tanesi (%16,22) ve balık yağı (%15,83) takip etmektedir. ATP fosil etkisi ağırlıklı olarak soya küspesi ve buğday tanesi bileşenlerinden kaynaklanmaktadır.

Çipura-3 için ATP fosil etkisinde mikroalg biyokütlesi %80,38 ile baskın katkı kaynağıdır. Toplam pay dağılımı incelendiğinde; ham madde %17,35 ile en büyük paya sahipken, bunu %2,09 ile enerji ve %0,18 ile inşaat basamakları takip etmektedir. Diğer ham madde içi dağılımda buğday tanesi (%3,47) ve soya küspesi (%2,92) öne çıkmakta, diğer bileşenlerin katkısı görece daha sınırlı kalmaktadır.

Çipura-4 için ATP fosil etkisinde mikroalg biyokütlesi %96,73 ile belirgin biçimde baskındır. Ham madde %2,89, enerji %0,36 ve inşaat %0,03 paya sahiptir. Diğer ham madde içindeki katkılar sınırlı olup buğday tanesi (%0,44) ve buğday unu (%0,43) en yüksek değerleri göstermektedir.

7.2.3. Asidifikasyon potansiyeli

Çipura-1 reçetesi için üretilen balık yeminde, AP için toplam etkinin %94,30'u ham maddeden, %5,26'sı enerjiden ve %0,43'ü inşaattan gelmektedir. Ham madde alt grupları arasında ise buğday tanesi %24,09 ile en yüksek katkıya sahiptir. Bunu %16,47 ile balık unu ve %13,89 ile buğday unu takip etmektedir. Asidifikasyon etkisi açısından buğday tanesi açık ara baskın konumdadır (Şekil 7.6).

Çipura-2 reçetesi için üretilen balık yeminde, AP etkisinde ham maddenin payı %93,59'dur. Enerji %5,92, inşaat ise %0,49 katkı sağlamaktadır. Ham madde alt kırılımında buğday tanesi (%22,24) en yüksek katkıyı sunmaktadır. Ardından buğday unu (%16,76) ve balık yağı (%13,94) gelmektedir. Asidifikasyon etkisi ham maddenin buğday tanesi bileşeninde yoğunlaşmaktadır.

Çipura-3 reçetesi için üretilen balık yeminde, AP etkisinin %57,31'i mikroalg biyokütlesi, %39,91'i ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt kırılımında mikroalg biyokütlesinden sonra buğday tanesi (%9,93) en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Bunu buğday unu (%7,27) ve kolza küspesi (%5,49) izlemektedir. Şekil 7.7'de görüldüğü üzere, AP etkisi mikroalg biyokütlesi ve ham madde arasında paylaşılmış durumdadır.

Çipura-4 reçetesi için üretilen balık yeminde AP etkisinin %90,74'ü Mikroalg

biyokütlesi aşamasından, %8,63'ü ham maddeden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.4'te görüldüğü üzere, ham madde alt kırılımında mikroalglerden sonra buğday tanesi (%1,65) ve buğday unu (%1,63) en yüksek katkıları sunmaktadır. Diğer bileşenlerin payı daha düşüktür.

7.2.4. Ötrofikasyon potansiyeli

Çipura-1 isimli balık yeminde, ÖP kategorisinde ham maddenin etkisi %98,04 ile oldukça yüksek iken enerji %1,62 ve inşaat %0,33 ile ikincil seviyededir. Ham madde içinde en yüksek katkı buğday tanesinden (%21,08), ardından soya yağından (%15,14), gelmektedir. ÖP'nin etkisi ham maddenin birden fazla alt bileşenine dağılsa da buğday tanesi en yüksek paya sahiptir.

Çipura-2 isimli balık yeminde, ÖP kategorisinde toplam etkinin %98,01'i ham maddeden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.6 incelendiğinde, ham madde içindeki en yüksek katkılar soya küspesi (%25,46), buğday tanesi (%17,58) ve buğday unu (%14,04) şeklindedir. ÖP etkisi özellikle soya küspesi bileşeninde yoğunlaşmaktadır.

Çipura-3 isimli balık yeminde, ÖP kategorisinde en yüksek pay ham maddeye (%74,83) aittir. Mikroalg biyokütlesi %23,58, enerji %1,32 ve inşaat %0,27 katkı sağlamaktadır. Ham madde içindeki dağılımda mikroalg biyokütlesi (%44,47), buğday tanesi (%14,51), soya küspesi (%14,12) ve buğday unu (%11,27) en yüksek katkılara sahiptir.

Çipura-4 isimli balık yeminde, ÖP kategorisinde en yüksek katkı mikroalg biyokütlesine (%70,92) aittir. Ham madde %28,40, enerji %0,56 ve inşaat %0,12 paya sahiptir. Ham madde içinde mikroalgden sonra buğday tanesi (%4,57), buğday unu (%4,79) ve soya küspesi (%3,15) öne çıkmaktadır.

7.2.5. Tath su ekotoksitesitesi potansiyeli

Çipura-1'in sonuçlarına göre, TSEP etkisinin %95,48'i ham maddeden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.4 incelendiğinde, enerji %2,91 ve inşaat %1,61 ile sınırlı bir paya sahiptir. Ham madde içi dağılımda ise buğday tanesi %21,92'lik sonucu ile en yüksek etkiye sahipken, bunu soya küspesi (%15,05) ve soya yağı (%14,49) izlemektedir. TSEP'in etkisi özellikle buğday tanesi ve soya küspesinden gelmektedir.

Çipura-2 için TSEP etkisinin %95,76'sı ham maddeden, %2,74'ü enerjiden ve %1,51'i inşaattan gelmektedir. Ham madde alt gruplarında buğday tanesi (%16,87) en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Bunu soya küspesi (%30,83) ve buğday unu (%8,57) izlemektedir. TSEP etkisi ham maddenin soya küspesi ve buğday tanesi bileşenlerinde öne çıkmaktadır.

Çipura-3'in sonuçlarına göre, TSEP etkisinin %50,76'sı mikroalg biyokütlesi aşamasından, %47,01'i ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt gruplarında buğday tanesi (%9,14), soya küspesi (%11,22) ve buğday unu (%8,52) öne çıkmaktadır. TSEP etkisi M ve ham madde arasında dengeli bir dağılım göstermektedir.

Çipura-4'in için ise TSEP etkisinin %89,53'ü mikroalg biyokütlesinden, %9,91'i ham maddeden gelmektedir. Ham madde alt bileşenleri arasında buğday tanesi (%1,69) ve buğday unu (%1,13) en yüksek paylara sahiptir.

7.2.6. Küresel ısınma potansiyel

Çipura-1 reçetesinin sonuçlarına göre, KIP için toplam etkinin %91,56'sı ham maddeden, %7,75'i enerjiden ve %0,68'i inşaattan gelmektedir. Ham madde alt kırılımında buğday tanesi %21,60'lık etkisi ile en yüksek katkıyı sunarken, buğday unu (%12,48) ve soya yağı (%10,15) önemli diğer pay sahipleridir. Dolayısıyla sera gazı emisyonlarının ana kaynağı ham maddenin buğday tanesi ve buğday unu olduğu görülmektedir.

Çipura-2 reçetesinin şekil 7.4 incelendiğinde, KIP etkisinin %91,10'u ham maddeden, %8,18'i enerjiden ve %0,72'si inşaattan oluşmaktadır. Ham madde içinde buğday tanesi (%18,68) en yüksek paya sahiptir. Ardından buğday unu (%14,11) ve soya yağı (%7,72) gelmektedir. KIP etkisi ham maddenin buğday tanesi bileşeninde yoğunlaşmaktadır.

Çipura-3 reçetesinin sonuçlarına göre, KIP etkisinde mikroalg biyokütlesi %72,13 ile baskındır. Ham madde %25,26, enerji %2,39 ve inşaat %0,21 paya sahiptir. Ham madde içi dağılımda buğday tanesi (%5,63) ve buğday unu (%4,13) en yüksek katkıyı sağlamaktadır.

Çipura-4 reçetesi için, KIP etkisinde mikroalg biyokütlesi %95,11 ile baskın katkı kaynağıdır. Ham madde %4,41, enerji %0,45 ve inşaat %0,04 düzeyindedir. Ham madde içinde buğday tanesi (%0,78) ve buğday unu (%0,77) en yüksek katkıyı sağlamaktadır.

7.2.7. İnsan toksisitesi potansiyeli

Şekil 7.4 incelendiğinde, Çipura-1 için İTP kategorisinde ham maddenin payı %97,69 ile oldukça yüksek iken, enerjinin payı %1,79 ve inşaatın payı %0,51 ile oldukça azdır. Ham madde içindeki dağılımda buğday tanesi %62,55'lik değeri ile açık ara en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Diğer tüm bileşenlerin katkısı buğday tanesine göre oldukça düşük gelmektedir.

Çipura-1 isimli balık yeminin sonuçlarına göre, İTP kategorisinde ham maddenin payı

%97,53'tür. Ham madde içi dağılımda buğday tanesi (%54,91) açık ara en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Diğer tüm bileşenlerin katkısı buğday tanesine kıyasla belirgin şekilde düşüktür.

Çipura-3 isimli balık yemi için, İTP etkisinin %61,67'si ham maddeden, %36,71'i mikroalg biyokütlesinden gelmektedir. Ham madde alt kırılımında buğday tanesi (%36,85) açık ara en yüksek katkıya sahiptir.

Çipura-4 isimli balık yeminin sonuçlarına göre, İTP etkisinin %83,41'i mikroalg biyokütlesinden, %16,07'si ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt dağılımında buğday tanesi (%8,77) açık ara en yüksek katkıya sahiptir. Diğer bileşenlerin katkıları buğday tanesine kıyasla oldukça düşüktür.

7.2.8. Deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli

Çipura-1 reçetesi için Şekil 7.4'te sunulan sonuçlar incelendiğinde DSEP etkisinin %91,48'ini ham maddeden almaktadır. Enerjinin payı %6,92 ve inşaatın payı %1,60 ile sınırlı kalmaktadır. Ham madde alt bileşenleri arasında buğday tanesi %47,13'lük değeri ile baskın durumdadır. DSEP'in çevresel etkisi esas olarak buğday tanesinden kaynaklanmaktadır.

Çipura-2 reçetesinin sonuçlarına göre, MAETP etkisinin %90,93'ü ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt kırılımında buğday tanesi (%41,13) en yüksek paya sahiptir. Bunu buğday unu (%9,54) ve soya yağı (%5,05) izlemektedir. DSEP etkisi belirgin biçimde buğday tanesi bileşeninde yoğunlaşmaktadır.

Çipura-3 reçetesi için DSEP kategorisinde mikroalg biyokütlesi %65,13 ile en yüksek paya sahiptir. Ham madde %31,60, enerji %2,65 ve inşaat %0,61 pay almaktadır. Ham madde içinde buğday tanesi (%15,24) en yüksek katkıyı sağlamaktadır.

Şekil 7.5'ten anlaşılacağı üzere, Çipura-4 için DSEP kategorisinde mikroalg biyokütlesi %93,68 ile en yüksek paya sahiptir. Ham madde %5,65, enerji %0,54 ve inşaat %0,12 katkı sunmaktadır. Ham madde içinde buğday tanesi (%2,30) en yüksek katkıyı sağlamaktadır.

7.2.9. Ozon tabakasının incelenmesi potansiyeli

Çipura-1'in reçete sonuçlarına göre, OTİP'te toplam etkinin %96,78'i ham maddeden gelmektedir. Ham madde dağılımında ise buğday tanesi %18,95 ve soya yağı %18,34'lük sonuçları ile benzer büyüklükte en yüksek katkıya sahiptir.

Şekil 7.4 incelendiğinde Çipura-2 için reçete sonuçlarına göre OTİP etkisinin %96,60'ı ham maddeden gelmektedir. Ham madde içinde soya yağı (%13,98) ve buğday tanesi (%16,41) en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Ayrıca soya küspesi (%20,53) dikkat çeken bir paya sahiptir.

Çipura-3'ün reçete sonuçlarına göre, OTİP etkisinin %83,56'sı mikroalg biyokütlesinden, %12,88'i ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt kırılımında buğday tanesi (%2,82), soya küspesi (%2,37) ve soya yağı (%2,60) benzer büyüklükte katkılar sunmaktadır.

Çipura-4'ün reçete sonuçlarına göre, OTİP etkisinin %97,62'si mikroalg biyokütlesinden, %2,29'u ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt kırılımında buğday tanesi (%0,35), buğday unu (%0,35) ve soya küspesi (%0,21) benzer büyüklükte katkılar sunmaktadır.

7.2.10. Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli

Çipura-1 balık yeminin sonuçlarına göre, FOOP için ham maddenin payı %96,29'dur. Ham madde içinde soya küspesi %23,62'lik etkisi en yüksek katkıyı sağlarken, balık unu %12,54 ve buğday tanesi %9,22 ile onu izlemektedir. Bu kategoride soya küspesi öne çıkan ana bileşendir.

Çipura-2 balık yemi için FOOP etkisinin %96,70'i ham maddeden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt bileşenlerinde soya küspesi (%45,81) açık ara en yüksek katkıyı sunmaktadır. Bunu soya yağı (%19,46) ve buğday tanesi (%6,72) izlemektedir.

Çipura-3 için FOOP etkisinde mikroalg biyokütlesi %45,46, ham madde %52,50 paya sahiptir. Ham madde içi dağılımda soya küspesi (%19,62) en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Bunu buğday tanesi (%4,29) ve buğday unu (%2,99) izlemektedir.

Çipura-4 balık yeminin sonuçlarına göre, FOOP etkisinin %87,74'ü mikroalg biyokütlesinden, %11,70'i ham maddeden gelmektedir. Ham madde içindeki en yüksek katkılar soya küspesi (%2,81), soya yağı (%2,74) ve buğday tanesi (%0,87) şeklindedir.

7.2.11. Kara ekotoksitesitesi potansiyeli

Çipura-1 balık yeminin sonuçlarına göre, KEP etkisinin neredeyse tamamı %99,69 ile ham maddeden gelmektedir. Alt kırılımda ise soya küspesi (%28,08), soya yağı (%17,87) ve buğday tanesi (%17,20) en yüksek katkılara sahiptir. Karasal ekotoksitesite etkisi ham maddenin özellikle soya küspesi ve soya yağı bileşenlerinde yoğunlaşmaktadır.

Şekil 7.4'ten anlaşılacağı üzere Çipura-2 balık yeminin sonuçlarına göre, KEP etkisi neredeyse tamamen ham maddeden oluşmaktadır (%99,75). Ham madde içinde soya küspesi (%48,10) en yüksek paya sahiptir. Ardından soya yağı (%10,12) ve buğday tanesi (%11,07) gelmektedir.

Çipura-3 balık yeminin sonuçlarına göre, KEP etkisinin %95,43'ü ham maddeden, %4,32'si mikroalg biyokütlesinden kaynaklanmaktadır. Ham madde alt bileşenlerinde soya küspesi (%34,90) baskın konumdadır. Bunu soya yağı (%11,81) ve buğday tanesi (%11,95) izlemektedir.

Çipura-4 balık yeminin sonuçlarına göre, KEP etkisinin %68,65'i ham maddeden, %31,08'i mikroalg biyokütlesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.6'dan anlaşılacağı üzere, ham madde alt bileşenlerinde soya küspesi (%18,65) açık ara en yüksek katkıyı sağlamaktadır. Bunu buğday tanesi (%9,02) ve soya yağı (%9,00) izlemektedir.

8. TARTIŞMA

Mikroalg biyokütlesinin üretimi ve balık yeminde balık unu alternatifi olarak kullanımı, yalnızca teknik bir ikame yaklaşımı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi gereken bütünsel bir üretim stratejisidir. Bu nedenle, bu sistemin çevresel etkileri, farklı etki kategorileri üzerinden yaşam döngüsü yaklaşımıyla analiz edilmiştir.

Mikroalg üretim sisteminin; membran filtrasyon 1 ve 2, fotobiyoreaktör 1 ve 2, santrifüj ve dondurarak kurutma olacak şekilde her bir basamağının, yaşam döngüsü kapsamında çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca 2 adet mikroalg bazlı balık yemi ile 2 adet geleneksel balık yeminin üretildiği tesis inşaatı, ham madde tedarik ve kullanımı, enerji basamaklarının yaşam döngüsü çevresel analiz yapılmıştır. Her bir basamağın çevresel etki değeri, belirlenen 11 adet çevresel etki kategorisi üzerinden hesaplanarak incelenmiş ve basamaklar arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Atık sudan elde edilen mikroalg biyokütlesi için değerlendirilen 11 adet çevresel etki kategorisinin sonucuna bakıldığında FBR-2 basamağı %38-48 arasında değişen değerler ile diğer tüm basamaklardan daha fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür. FBR-2'yi membran filtrasyon-2 basamağı takip etmiştir. Etki kategorilerinin değerlerini yükselten ana sebep, biyoreaktörlerde ve membranlardaki elektrik tüketimidir. Sistemin tamamı ele alındığında en fazla elektrik enerjisi tüketimi FBR-2'de gerçekleşmiştir (466,56 MJ). Bunun sebebi, reaktörlerde yüksek güce sahip pompanın kullanılmasıdır. Ayrıca reaktörler, membran filtrasyonu gibi kesikli değil sürekli bir çalışma prensibine sahiptir. Mikroalg kültürünün yetişmesi için 12 gün boyunca aralıksız çalıştığından dolayı reaktörlerin tükettiği elektrik enerjisi yüksektir. Membran filtrasyonu-1 ve membran filtrasyonu-2 adımı da eski ve büyük bir pompa kullanıldığından filtrasyon işlemlerindeki elektrik yükü fazladır. 2,23 kW'lık bir güce sahip olan ve eski sistemli bu pompa sisteme fazla ve hantal gelmektedir. Bu yüzden de tükettiği 160,57 ve 256,9 MJ'lük elektrik ile çevresel etkilerin yükünü arttırmaktadır. İrlanda'nın elektrik üretim yapısı incelendiğinde, sistemin büyük oranda fosil yakıt bağımlı olduğu görülmektedir ve üretimin %64'ü doğalgaz, %22'si taş kömürü ve %9'luk kısmı petrol kaynaklıdır ve bu da elektriğe bağlı çevresel etkileri arttırmaktadır.

FBR-1 ve FBR-2'de mikroalg üretiminde karbon kaynağı olarak CO₂ kullanılmıştır. Normal şartlarda atmosfere yayılıp sera etkisine sebep olacak olan bu 2 kg ve 4 kg'lık CO₂, fotobiyoreaktör sistemindeki fotosentetik reaksiyonlar sayesinde mikroalgler tarafından biyokütleye dönüştürülmüştür. Bu durum, sistem sınırları içinde karbonun tutulmasını sağlamış

ve özellikle küresel ısınma potansiyeli açısından ilgili çevresel etki kategorilerinde azalmaya katkıda bulunmuştur. 2 kg'lık CO₂'nin sistemde tutulması ile KIP yaklaşık %1,5 kadar azalma sağlarken 4 kg'lık CO₂'nin sistemde tutulması ile ise KIP yaklaşık %3 oranında azalma göstermiştir.

Mikroalg bazlı balık yemi üretimi çipura balığı için 4 farklı reçete bazında oluşturulmuştur. Çipura-1 isimli reçetede %15 oranında, 0,141 kg kadar balık unu varken Çipura-2 isimli reçetede balık unu eklenmemiş ve ikame olarak diğer katkı maddelerine ağırlık verilmiştir. Burada görülmek istenen, balık unu olmadan üretilen balık yeminin yaşam döngüsü performansdır. Diğer iki reçetede ise balık unu yerine mikroalg biyokütlesi eklenmiştir. Çipura-3 balık yemindeki biyokütle oranı %2, Çipura-4 isimli yemdeki biyokütle oranı ise %14'tür. 4 reçete birbiri ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlara göre Çipura-1 ve 2'nin çevresel etkileri 11 kategoride de Çipura-3 ve 4'ten daha az gelmiştir. Alt kırılımlarına bakıldığında ise, mikroalg biyokütlesi katkısının çevresel etki değerlerini yükselttiği görülmektedir. Buradan, mikroalg biyokütlesinin arttırılması çevresel açıdan olumlu sonuç vermediği görülmektedir. 1 ve 2 reçetelerinde çevresel etkiler, ham madde üzerinde yoğunlaşmıştır. Enerji ve inşaat basamaklarının etkileri oldukça azdır. Mikroalg bazlı balık yemleri sürdürülebilir bir alternatif olabilir ancak biyokütle seviyesinin optimum koşullarda tutulması gerekmektedir. Ham madde bileşenlerine bakıldığında buğday tanesi ve soya küspesi çoğu etki kategorisinde baskın rol oynamaktadır. Bu da mikroalg bazlı balık yemlerini formüle ederken doğru ham madde seçiminin çevresel etkileri azaltmada önemli rolü olduğunu göstermektedir. Mikroalg bazlı balık yemi üretiminde çevresel etkilerin yalnızca mikroalg biyokütlesinin kullanılıp kullanılmadığına bağlı olmadığını, diğer ham maddelerin seçiminin de önemli olduğunu göstermektedir.

8.1. Sonuçların Literatür ile Karşılaştırması

Bu tez çalışmasında elde edilen yaşam döngüsü çevresel etki sonuçları, doğrulama amacıyla literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, Gurreri vd. (2024)'nin yaşam döngüsü perspektifinde mikroalg üretimi üzerine olan çalışmasının sonuçları ile tez çalışmasının sonuçları karşılaştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda genel olarak 1 kg mikroalg üzerine çalışıldığı için, elde edilen sonuçları literatürle karşılaştırabilmek için tez çalışmasındaki mikroalg üretimi için 1,941 kg üzerinden elde edilen sonuçlar 1 kg mikroalg üretimine dönüştürülerek Tablo 8.1'de sunulmuştur. Bu tabloda tez çalışmasının sonucunda elde edilen 1 kg mikroalg biyokütlesi üretimi sonucunda oluşan çevresel etkiler ve literatürde bulunan 1 kg mikroalg üretimi ile açığa çıkan çevresel etkiler karşılaştırmalı olarak yer

almaktadır.

Tablo 8.1. Mikroalg biyokütlesinin üretiminde oluşan çevresel etkilerin literatür karşılaştırması

| Çevresel Etki Kategorileri (1 kg mikroalg için) | Toplam Çevresel Etki (Tez Çalışması) | Toplam Çevresel Etki (Gurreri vd., 2024) |
|--|---|---|
| ATP element [g Sb eşd.] | 0,17 | 2,39 |
| ATP fosil [GJ] | 1,09 | 1,87 |
| AP [kg SO ₂ eşd.] | 0,33 | 0,63 |
| ÖP [kg PO ₄ eşd.] | 0,08 | 0,21 |
| TSEP [g DCB eşd.] | 0,03 | 0,10 |
| KIP [kg CO ₂ eşd.] | 70 | 153 |
| İTP [g DCB eşd.] | 0,03 | 0,18 |
| DSEP [t DCB eşd.] | 55 | 173 |
| OTİP [mg R11 eşd.] | 2,90 | 37,6 |
| FOOP [kg Etilen eşd.] | 0,02 | 0,033 |
| KEP [kg DCB eşd.] | 0,22 | 0,789 |

Sonuçlar karşılaştırıldığında literatürdeki değerlerin bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Hem tez çalışması hem makaledeki ATP element değerinin ana katkısı FBR'lerdir. ATP değerinde, makale araştırmasında kullanılan FBR'lerin altyapısından kaynaklanan bir farklılık oluşmaktadır. Literatür çalışmasının ATP element değeri 2,39 g Sb eşd. iken tez çalışmasında bu değer 0,17 g Sb eşd. ATP fosil değeri ise literatürde 1,87 GJ iken tezde 1,09 GJ elde edilmiştir. Bu fark temelde literatür çalışmasında fonksiyonel birim başına daha fazla enerji kullanımından kaynaklanmaktadır. Ayrıca çalışmalar farklı ülkeler için gerçekleştirilmiş olup elektrik kaynakları farklıdır. KIP değerinin yüksek olmasının sebebi ise sistemlerinin sürekli olarak çalışması ve besin çözültisi hazırlanması esnasında da elektrik enerjisinin harcanıyor olmasıdır. Tez çalışmasındaki KIP değerinin makaleye göre düşük olmasının sebebi, kimyasal ya da besin çözültülerinin laboratuvarında hazırlanmaması, ticari olarak temin edilmesidir. AP ve ÖP değerlerinde de tez çalışmasının sonuçları daha az etkiye sahiptir. Bunun sebebi İtalya şebeke elektriğinden dolayı SO₂, NO_x ve amonyak emisyonlarının AP'ye katkısının olmasıdır. Ayrıca besi ortamı ve proste kullanılan kimyasallar da bu etki değerine katkı yapmaktadır. ÖP değerindeki farklılığın sebebi, makalede N ve P ağırlıklı bir besin kimyasalının üretimidir. Tez çalışmasında ÖP değerinin ana katkısı %47,50'lik değeri ile FBR-2'dir. İTP değerlerine bakıldığında 0,18'lik etki değeri ile makale araştırması daha yüksek gelmiştir. Bunun temel sebebi enerji üretiminden kaynaklanan metal ve emisyon katkıları olabilir.

Farklı FBR sistemlerinin çevresel etkilerinin incelendiği, Onorato & Rösch (2020)

tarafından yapılan çalışmada düz panel hava kaldırma, yeşil duvar paneli ve tek katmanlı yatay boru sistemi bulunmaktadır. Düz panel hava kaldırma sisteminde Almanya ve Fransa'nın elektriği kullanılarak da 2 ayrı senaryo oluşturulmuştur. Tez çalışmasında İrlanda elektriği kullanıldığından dolayı makale sonucu için de daha yakın ülke olan Fransa'nın elektriği baz alınmıştır. Tablo 8.2'de 1 kg mikroalg biyokütlesi için, tez çalışmasının sonuçları makale çalışmasının sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8.2. Mikroalg biyokütlesinin üretiminde oluşan çevresel etkilerin literatür karşılaştırması

| Çevresel Etki Kategorileri (1 kg mikroalg için) | Toplam Çevresel Etki (Tez Çalışması) | | Toplam Çevresel Etki (Onorato & Rösch, 2020) | | |
|--|---|-------|---|--------------|------------|
| | FBR-1 | FBR-2 | Düz Panel | Duvar Paneli | Yatay Boru |
| TSEP [kg DCB eşd.] | 0,04 | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,02 |
| KIP [g CO ₂ eşd.] | 0,01 | 0,03 | 0,54 | 0,70 | 0,06 |
| İTP [g DCB eşd.] | 0,01 | 0,02 | 0,20 | 0,24 | 0,03 |
| DSEP [Mt DCB eşd.] | 0,01 | 0,02 | 1,83E-06 | 2,17E-06 | 0,25E-06 |

Tablo 8.4, makalenin verileri bakımından incelendiğinde yatay boru sisteminin tüm çevresel etki kategorilerinde en az etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sebebi, sistemde yapay ışık kullanılmadığından elektrik tüketiminin az olmasıdır. Tez çalışmasına bakıldığında ise FBR-1 ve 2'nin arasındaki farkın sebebinin yine enerji kaynaklı olduğu söylenebilir. FBR-2'nin enerji tüketimi 466,56 MJ ile oldukça yüksek bir değere sahiptir. FBR-2'nin TSEP değeri düz panel ve duvar panel sistemlerine yaklaşmıştır. PBR-1 ise panel sistemlerine göre daha avantajlı, yatay boru sistemine göre ise dezavantajlı görülmektedir. Avantajın sebebi olarak, atık suyun kullanılarak besin girdilerini azaltması ve kaçınılan arıtma yükü olarak verilebilir. KIP değerine bakıldığında FBR sistemlerinin, tüm diğer sistemlerden daha az etkiye sahip olduğu görülmektedir. Panel sistemlerinde karıştırma, soğutma vb. işlemlerin varlığı elektrik tüketimini arttırmakta bu da KIP değerini yükseltmektedir. FBR'de ise yüksek enerji girdilerine rağmen atık suyun kullanılması ve CO₂'nin indirgenmesi sisteme çevresel kredi sağlamaktadır. İTP sonuçlarında da KIP'e benzer bir sonuç sergilenmiştir. Panel sistemleri FBR sistemlerine göre oldukça yüksek çevresel etkiye sahiptir. Bunun sebebi olarak panel sistemlerinde elektrik tüketiminden dolayı sistemde oluşan emisyon ve ağır metal yükü verilebilir. DSEP değerlerinde ise sonuç tam tersi yönde değişmektedir. Panel sistemleri ve yatay boru sisteminin FBR sistemlerine göre oldukça az çevresel etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi olarak FBR sistemlerinde enerji yoğun bir üretimin varlığı ve tüketilen kimyasallar verilebilir.

Mikroalg bazlı balık yeminin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin karşılaştırılması istendiğinde benzer çalışmaların literatürde çok kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı da literatürdeki bu eksiği tamamlamaktır. Maiolo vd. (2020)'nin yapmış olduğu çalışma incelendiğinde 2 ayrı mikroalg biyokütlesinin balık unu ikamesi olarak kullanıldığı ve çevresel etki değerlendirilmesinin 1 ton protein için yapıldığı görülmektedir. Tezde 1 kg balık yemi üzerinden çalışıldığı için fonksiyonel birimleri eşitlemek adına %2'lik mikroalg bazlı balık unu katkısının çevresel etkilere olan etkisi hesaplanmış ve Tablo 8.3'te verilmiştir. Tablo 8.4'te 3 ayrı çevresel etki kategorisi değeri literatür çalışması sonuçları ve tez çalışması sonuçları bazında karşılaştırılmıştır. Literatür çalışmasında 2 ayrı mikroalg türü bulunduğundan *Tetraselmis suecica* türünün sonuçları referans alınmıştır.

Tablo 8.3. Mikroalg bazlı balık ununun çevresel etki sonuçlarına etkisi

| Çevresel Etki Kategorileri | Toplam Çevresel Etki (1 kg balık yemindeki 0,02 kg'lık (%2) mikroalg unu) | Toplam Çevresel Etki (1 ton mikroalg unu) |
|-------------------------------|---|--|
| KIP [kg CO ₂ eşd.] | 1,41 | 70.500 |
| AP [g SO ₂ eşd.] | 6,6 | 330.000 |
| ÖP [g PO ₄ eşd.] | 1,6 | 80.000 |

Tablo 8.4. Mikroalg bazlı balık yeminin biyokütlesinin üretiminde oluşan çevresel etkilerin literatür karşılaştırması

| Çevresel Etki Kategorileri (1 ton protein) | Toplam Çevresel Etki (Tez Çalışması) | Toplam Çevresel Etki (Maiolo vd., 2020) |
|---|---|--|
| KIP [kg CO ₂ eşd.] | 70.500 | 38.428 |
| AP [g SO ₂ eşd.] | 330.000 | 97.100 |
| ÖP [g PO ₄ eşd.] | 80.000 | 35.000 |

Sonuçlara bakıldığında tez çalışmasının sonuçlarının literatüre göre daha fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir. KIP değeri tezde 70.500 kg CO₂ eşdeğerine sahip iken bu değer makale çalışmasında 38.428 kg CO₂'ye inmektedir. Bunun için, tez çalışmasında hazırlanan formülasyonda daha yüksek enerji gerektiren bitkisel kökenli katkıların ve işlenmiş ham maddelerin bulunması sebep gösterilebilir. AP değerine bakıldığında makale çalışması sonucunda 97.100 g SO₂ eşdeğeri kirlilik salınmışken tez çalışmasında bu değer 330.000 g SO₂ değerine yükselmiştir. AP değeri, tarımsal faaliyetlerin sonucunda salınan NO_x ve amonyak bileşenleri ile arttığı için, tez çalışmasındaki AP yüksekliği için gübre ağırlıklı yetiştirilen ham maddelerin varlığı sebep gösterilebilir. ÖP değerinde de farklılık mevcuttur. Literatür çalışmasında 35.000 g PO₄ eşd. ve tez çalışmasındaki 80.000 PO₄ eşd. arasındaki farklılığın sebebi olarak tez çalışmasındaki balık yemi reçetesinde kullanılan ham maddelerin azot ve fosfor kayıplarının daha fazla olması gösterilebilir.

8.2. Kritik Noktalar ve İyileştirme Önerileri

Bu çalışma atık su kullanarak mikroalg biyokütlesi üretiminin çevresel etkinliğini ve elde edilen mikroalg biyokütlesinin balık yeminde balık unu yerine kullanılmasının çevresel etkisini değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin özellikle atık su arıtımına ve karbonun biyolojik olarak uzaklaştırılmasına katkısı nedeniyle belirli etki kategorilerinde avantajlar sağladığını göstermektedir. Buna karşın, fotobiyoreaktörün çalışma sürecinde ortaya çıkan enerji tüketimi ve proses girdileri, çevresel etkinin önemli belirleyicileri olarak ön plana çıkmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, sistemin çevresel verimliliğini etkileyen kritik noktalar analiz edilmekte ve sürdürülebilirlik düzeyini artırmak için iyileştirme fırsatları ele alınmaktadır.

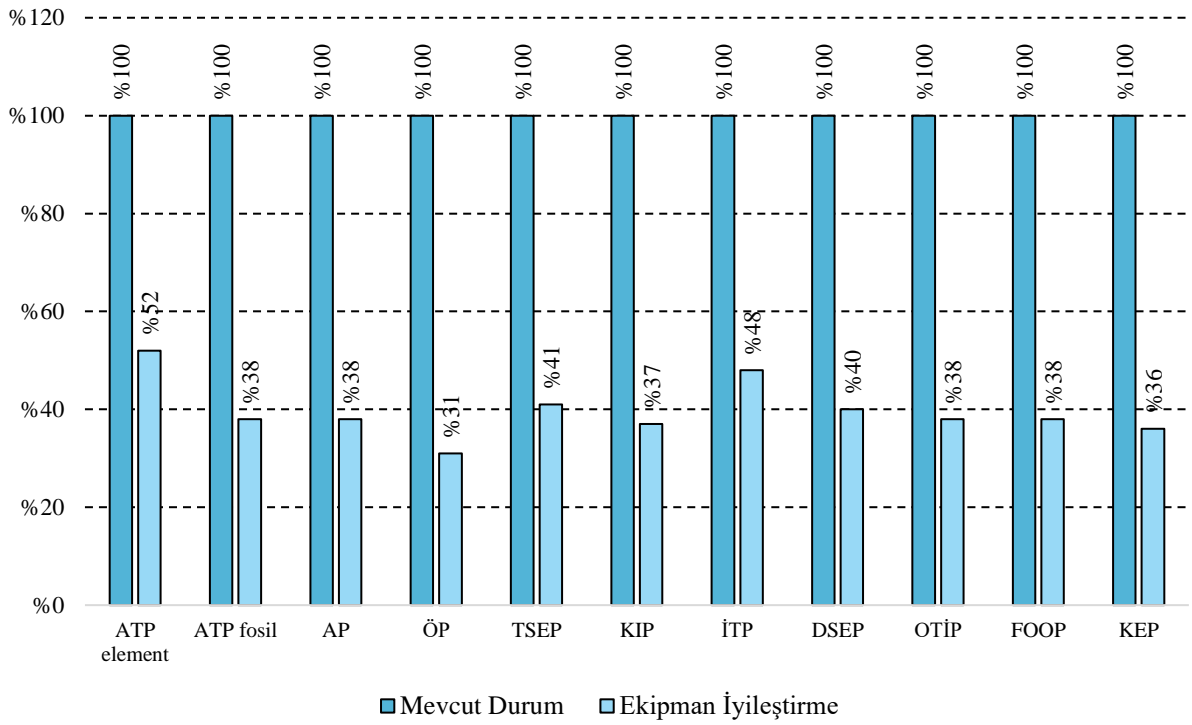
8.2.1. Ekipman iyileştirmeleri

Mikroalg biyokütlesi üretim sisteminde çevresel etkiye en fazla katkısı olan girdi elektrik enerjisidir. Tüm sistem elektrikle çalıştığı için her bir basamakta enerji kullanılması kaçınılmazdır. Membran filtrasyon-1 ve 2 basamaklarında atık su akışını kontrol ederek suyun filtre edilmesini sağlamak amacıyla pompa kullanılmaktadır. FBR-1 ve 2 basamaklarında ise suyu taşımak ve kültür ortamının kontrollü bir şekilde homojenize tutulması amacıyla pompa kullanılmaktadır. Buradaki amaç, ortama verilen CO₂'nin ortama homojen dağılmasını sağlamak, hücrelerde çökelmeyi minimuma indirmek ve ısı dağılımını dengede tutmaktır. Santrifüj ve dondurarak kurutma basamaklarında da yüksek elektrik tüketimi mevcuttur. Ancak sistemdeki, özellikle filtrasyon ve FBR basamaklarındaki çevresel etkinin de artmasına neden olan yüksek enerji tüketimi, eski tip ve verimsiz pompaların kullanımından kaynaklanmaktadır. Kurulan bu pilot sistem yeni olmadığından ve eski tip ekipmanlara sahip olduğundan dolayı, cihazlarda iyileştirme yapılarak elektrik enerjisi tüketimlerinin azaltılması ve bunlara bağlı olarak çevresel etkilerdeki değişim değerlendirilmiştir. Ekipmanlarla ilgili teknik bilgiler ve teknolojik iyileştirmeler Tablo 8.5'te sunulmuştur.

Tablo 8.5. Ekipman iyileştirmeleri

| Proses Basamağı | Mevcut Durum | Optimizasyon | Teknik İyileştirme |
|--------------------|--------------------------------|---|---|
| Membran filtrasyon | Eski pompa (2,23 kWh/100 l) | Yüksek kapasiteli pompa (0,22 kWh/100 l) | Endüstriyel pompalar %90 daha yüksek hidrolik verimlilik sunar. |
| FBR | Verimsiz hava pompası | Yüksek verimli hava pompası | Enerjide %45 oranında azalma |
| Kurutma | Dondurarak kurutma | Sprey kurutma metodu | Termal verimlilik ile kurutma enerjisinde %75 oranında azalma |

Tablo 8.5'te görüldüğü gibi membran filtrasyon basamaklarında kullanılan pompanın gücü 2,23 kWh/100 l'dir. Yerine daha verimli çalışan bir pompa kullanılması çevresel etkilerde bariz iyileşmeye sebep olacaktır. Örneğin, 0,22 kWh/100 l'lik yüksek güce sahip endüstriyel tipli bir pompanın kullanılması %90 daha yüksek bir hidrolik verimlilik sunabilir. Bu da harcanan enerjiye yansır ve paralelinde çevresel etkilerde iyileşme gözlenebilir. Aynı şekilde FBR'lerde kullanılan verimsiz hava pompaları yerine yüksek verime sahip hava pompasının kullanılması enerji tüketimini %45 oranında azaltabilir. Dondurarak kurutma işlemi de enerji tüketimi açısından verimsiz bir basamaktır. Sistem tasarımında spreyci kurutma gibi yeni bir kurutma yöntemine geçiş yapılarak termal verimlilik sayesinde kurutma enerjisinde %75 oranında azaltma sağlanabilir. Ekipmanın iyileştirilmesiyle elde edilen sonuçlar Şekil 8.1'de gösterilmiştir.

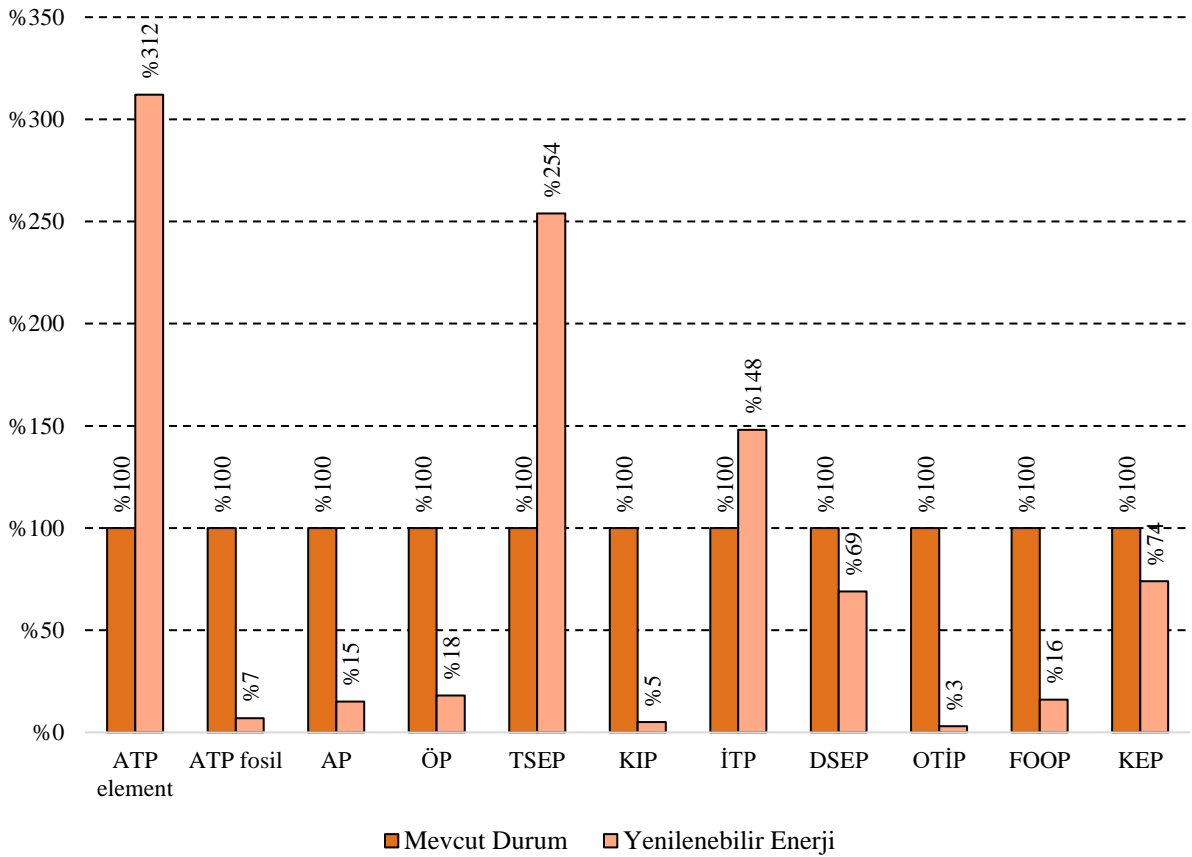


Şekil 8.1. Ekipman iyileştirmeleri

Şekil 8.1'de görüldüğü gibi elektrik tüketiminde sağlanan tasarruf sayesinde üretim sürecinin toplam çevresel yükü minimize edilmektedir. Çevresel etkilerdeki azalma oranları incelendiğinde en yüksek iyileştirme %69 iyileştirme oranı ile ÖP'de sağlanmıştır. Sistemde yapılan teknolojik güncellemelerle çevresel performansın en az %48 oranında iyileştiği tespit edilmiştir. Bu durum, çevresel etkilerin azaltılması noktasında ekipman modernizasyonunun kritik bir öneme sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

8.2.2. Yenilenebilir enerji kullanımı

Bir diğer iyileştirme yapılması söz konusu olan konu, şebeke elektriği kullanılması yerine sistemde yenilenebilir enerji kullanılmasıdır. İrlanda'nın elektrik üretim profili incelendiğinde, doğalgaz %64 ile baskın rol oynarken, bunu %22 ile taş kömürü ve %9 ile petrol izlemektedir. Yenilenebilir enerji segmentinde ise rüzgar enerjisi mevcut durumda %2 gibi bir paya sahip görünse de ülkenin coğrafi konumu ve teknik potansiyeli bakımından en yüksek verimliliğe sahip yenilenebilir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı kullanılan şebeke elektriği yerine karasal rüzgar türbinlerinden elde edilen elektrik kullanılarak yaşam döngüsü modeli tekrar oluşturulmuştur. Sektördeki teknolojik ilerlemelere bağlı olarak, modellemede İrlanda için 3 MW ve üzeri kurulu güce sahip türbin teknolojileri tercih edilmiştir ve tüm arka plan verisi Ecoinvent veri tabanından sağlanmıştır. Şekil 8.2'de mevcut şebeke elektriği ile rüzgar türbini enerjisinin sistemde kullanımından kaynaklanan toplam çevresel etkiler karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.2. Şebeke elektriği ile rüzgar enerjisinin çevresel etkilerinin karşılaştırması

Rüzgar türbininin inşaat aşamasında kullanılan metallere dolaylı olarak ATP element etkisi oldukça yüksektir. Rüzgar türbininin asıl amacı fosil kaynaklara bir alternatif sağlamak olduğu

için ATP fosil değeri rüzgar enerjisiyle birlikte avantaj sağlamıştır. Yine rüzgar türbini kullanımı havaya salınan SO₂ ve NO_x emisyonlarının azalmasını sağladığı için AP değerinde düşme görülmüştür. ÖP'deki düşüşün sebebini ise fosil yakıt kullanımına bağlı salınan PO₄ emisyonlarındaki rüzgar enerji kullanımıyla düşüşüdür. TSEP değerindeki artışın sebebi, türbinlerin inşaatı ve işletmeden kaldırma aşamalarında metallerin tatlı suya verdikleri emisyonlardan kaynaklanmaktadır. Bu emisyonların DSEP'e etkisi negatif yönde ilerlemiştir. KIP etki kategorisindeki düşüşün sebebi ise fosil yakıt kullanımına oranla CO₂ ve CH₄ emisyonlarındaki azalmadır. Rüzgar enerji santrallerinin yapım ve kurulum aşamasında hava ve suya vermiş olduğu krom emisyonları nedeniyle İTP değerinde artış olmuştur. FOOP ve KEP etki kategorilerindeki azalmanın sebebi de şebeke elektriğine göre azalan emisyonlardır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, mikroalg biyokütlesi üretimi ve mikroalg bazlı balık yeminin yaşam döngüsü çerçevesinde çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada “Bira fabrikası atık ürünlerinin omega-3 açısından zengin hayvan yemi ve gübreye dönüştürülmesi için mikroalglerin potansiyelinin ortaya çıkarılması-AlgaeBrew” projesinden alınan veriler kullanılarak yaşam döngüsü boyutunda çevresel etki analizi modellenmiştir. Mikroalg biyokütlesi üretiminin sistem sınırları üretim basamakları olup, fonksiyonel birim 1,941 kg mikroalg biyokütlesidir. Mikroalg bazlı balık yeminin sistem sınırları ise inşaat, ham madde temini ve nakliyesi, enerji basamakları olup, fonksiyonel birimi 1 kg balık yemi olarak belirlenmiştir. Yaşam döngüsü modellenmesi sürecinde GaBi v.10.7 yazılımı (Sphera, 2023) ve Ecoinvent v.3.11 veri tabanı (Ecoinvent, 2024) kullanılmış ve çevresel etkiler, CML metodu (CML, 2017) ile analiz edilmiştir. 11 farklı çevresel etki kategorisinde yapılan hesaplamalar analiz edilerek sonuca katkı sağlayan girdiler ve sebepleri değerlendirilmiştir. Ayrıca sonuçlar, literatürde yer alan benzer kaynaklarla karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, sistemin döngüsel yapısı, iki temel unsur üzerinden çevresel yüklerin azaltılmasını sağlamaktadır. İlk olarak, bira üretimi sonucunda açığa çıkan atık suyun ek bir bertaraf işlemine tabi tutulmaması, atık yönetimi kaynaklı olası çevresel etkileri ortadan kaldırmaktadır. İkinci olarak, mikroalglerin CO₂ gazını fotosentez yoluyla bünyesine alması, karbon tutulumu sağlayarak sistemin toplam emisyon değerlerini düşürmektedir. Bu iki döngüsel mekanizma, sürecin çevresel sürdürülebilirliğini artıran temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, çevresel etkilerin büyük oranda elektrik enerjisi tüketimine bağlı olduğunu göstermiştir. Bunun ana sebepleri sistemin enerji yoğun olması ve İrlanda'nın elektrik üretiminin doğalgaz, taş kömürü ve petrol gibi fosil kaynaklardan sağlanmasıdır. Yoğun enerji tüketimine sebep olan pompa gibi teçhizatların satın alma sürecinde verimi iyi değerlendirilmesiyle enerji tüketiminde, dolayısıyla da çevresel etkilerde azalma sağlanabilir. Bu kritik noktaya bağlı oluşturulan ekipman iyileştirme senaryosu ile çevresel etki değerlerinde %69'a kadar bir iyileştirme sağlanmıştır. Aynı zamanda fosil kaynaklı enerji tüketimi yerine yenilenebilir kaynaklardan tüketimin sağlanması da çevresel etkiler üzerinde olumlu sonuçlar doğurabilir. Şebeke elektriği yerine rüzgar elektriğinin kullanıldığı senaryoda da çevresel etkilerde %97'ye kadar azalma sağlanırken, rüzgar türbinlerinin üretim ve inşaat safhalarından kaynaklanan çevresel yükler nedeniyle ADP element, TSEP ve İTP etki kategorisinde artışlar gözlemlenmiştir.

Sistemin ana bileşenlerinden olan FBR, membranlar ve diğer teçhizatların bakımları ve temizliği sık yapıldığı sürece üretim daha verimli olabilir ve buna bağlı olarak çevresel etkiler azalabilir. Örneğin, FBR yüzeylerinin sık temizlenmesi, fotosentez için gün ışığından yararlanımın daha verimli olmasını sağlarken, yapay bir ışığa olan ihtiyacı, dolayısıyla da enerji tüketimini elimine edebilir. Membran temizliğindeki önem ise gözeneklerinin açık tutulması, bu sayede iyi bir filtrasyon sağlanması ve artılacak atık suyu miktarının, dolayısıyla da arıtmadan kaynaklı çevresel etkilerin azaltılmasından gelmektedir. Sadece iyileştirme ya da bakım ile değil sistemdeki köklü değişikliklerle de çevresel etkilerin azaltılması mümkün olabilir. Örneğin, mikroalg biyokütlesi kurutma basamağı olan dondurarak kurutma yöntemi değiştirildiğinde ve mikroalg biyokütlesi sistemde ıslak olarak kullanılabilmesi durumunda termal verimlilik ve çevresel etkilerde azalma sağlanabilir.

Literatürle kıyaslandığında tez çalışmasının çevresel etki sonuçları çoğu kategoride çevresel etkiler daha düşüktür. Bunun temel sebebi sistem sınırı, veri ve metodolojik farklılıklarla olmakla beraber çalışma kapsamında incelenen sistemin döngüselliklerinin de sonuçlar üzerine olumlu etkisi vardır.

Elde edilen diğer sonuçlar, mikroalglerin balık yeminde ham madde girdilerine kıyasla inşaat ve enerji tüketiminin çevresel etkilerinin oldukça az olduğu görülmüştür. Özellikle mikroalg bazlı balık yemlerinde, mikroalg biyokütlesinin miktarının arttıkça çevresel etkilerin de arttığı görülmüştür. Bu nedenle mikroalg biyokütlesi eldesi basamaklarındaki çevresel etkilerin azaltılması ve mikroalg biyokütle miktarının optimum seviyelerde tutulması gerekmektedir. Geleneksel balık yemlerinde ise çevresel etkilerin artmasına sebep olan ham maddelerin, bu çalışmanın da odak noktası olan balık unu değil buğday ve soya katkılı ham maddeler olduğu görülmüştür. Buğday ve soya bazlı ham maddelere de daha çevreci alternatifler bulunabilir.

Yürütülen bu çalışma, mikroalg üretiminin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmek adına bir temel sunmaktadır. Ancak mikroalg üretiminin sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğinin de analiz edilmesi, bu biyokütle ile üretilecek ürünlerin maliyetinin ve toplumsal faydasının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244-248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- Abdur Razzak, S., Bahar, K., Islam, K. M. O., Haniffa, A. K., Faruque, M. O., Hossain, S. M. Z., & Hossain, M. M. (2024). Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering*, 5(4), 418-439. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>
- Abidli, A., Huang, Y., Ben Rejeb, Z., Zaoui, A., & Park, C. B. (2022). Sustainable and efficient technologies for removal and recovery of toxic and valuable metals from wastewater: Recent progress, challenges, and future perspectives. *Chemosphere*, 292, 133102. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133102>
- Abreu, A. P., Morais, R. C., Teixeira, J. A., & Nunes, J. (2022). A comparison between microalgal autotrophic growth and metabolite accumulation with heterotrophic, mixotrophic and photoheterotrophic cultivation modes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112247>
- Abu, R., Aziz, M. A. A., Hassan, C. H. C., Noor, Z. Z., & Jalil, R. A. (2021). Life cycle assessment analyzing with Gabi software for food waste management using windrow and hybrid composting technologies. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 83(6), 95-108. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v83.17199>
- Abu-Ghosh, S., Dubinsky, Z., Verdelho, V., & Iluz, D. (2021). Unconventional high-value products from microalgae: A review. *Bioresource Technology*, 329, 124895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124895>
- Adegboye, M. A., Aibinu, A. M., Kolo, J. G., Aliyu, I., Folorunso, T. A., & Lee, S. H. (2020). Incorporating intelligence in fish feeding system for dispensing feed based on fish feeding intensity. *IEEE Access*, 8, 91948-91960. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994442>
- Adeniyi, O. M., Azimov, U., & Burluka, A. (2018). Algae biofuel: Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 316-335. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.067>
- Adesanya, V. O., Cadena, E., Scott, S. A., & Smith, A. G. (2014). Life cycle assessment on microalgal biodiesel production using a hybrid cultivation system. *Bioresource Technology*, 163, 343-355. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.051>
- Ahmad, A., & Ashraf, S. S. (2023). Sustainable food and feed sources from microalgae: Food security and the circular bioeconomy. *Algal Research*, 74, 103185. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103185>
- Ahmad, I., Abdullah, N., Koji, I., Yuzir, A., & Eva Muhammad, S. (2021). Evolution of photobioreactors: A review based on microalgal perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1142(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1142/1/012004>
- Ahmad, I., Yuzir, A., Mohamad, S., Iwamoto, K., & Abdullah, N. (2021). Role of microalgae in sustainable energy and environment. *IOP conference series: materials science and engineering*, 1051(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1051/1/012059>
- Ahn, B., Yun, S., Yun, S., Kim, Y. J., & Won, W. (2025). System-level analysis of strategies for biodegradable plastics production from microalgae. *Sustainable Production and Consumption*, 55, 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.02.028>
- Albertí, J., Brodhag, C., & Fullana-i-Palmer, P. (2019). First steps in life cycle assessments of cities with a sustainability perspective: A proposal for goal, function, functional unit, and reference flow. *Science of The Total Environment*, 646, 1516-1527.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.377>
- Ali, S. S., El-Sheekh, M., Manni, A., Ruiz, H. A., Elsamahy, T., Sun, J., & Schagerl, M. (2022). Microalgae-mediated wastewater treatment for biofuels production: A comprehensive review. *Microbiological Research*, 265, 127187. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127187>
- Alvarez, A. L., Weyers, S. L., Goemann, H. M., Peyton, B. M., & Gardner, R. D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54, 102200. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- Amahmoud, A., El Attar, M. M., & Meleishy, A. (2022). The evolution of life cycle assessment approach: A review of past and future prospects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 992(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/992/1/012002>
- Arutselvan, C., Seenivasan, H. K., Lewis Oscar, F., Ramya, G., Thuy Lan Chi, N., Pugazhendhi, A., & Thajuddin, N. (2022). Review on wastewater treatment by microalgae in different cultivation systems and its importance in biodiesel production. *Fuel*, 324, 124623. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124623>
- Atılğan Türkmen, B. (2022). Life cycle environmental impacts of disposable medical masks. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(17), 25496-25506. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17430-5>
- Babuna, F. G., Baş, B., Türkmen, B. A., & Kanat, N. E. (2023). Türk endüstrisi için temiz üretim ve yaşam döngüsü değerlendirmesi örnekleri. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24(2), 55-64.
- Bala, J. D., Lalung, J., Al-Gheethi, A. A. S., & Norli, I. (2016). A review on biofuel and bioresources for environmental applications. *Chapter 13, Renewable Energy and Sustainable Technologies for Building and Environmental Applications: Options for a Greener Future*, M. I. Ahmad, M. Ismail, & S. Riffat (Ed.), Springer International Publishing, Switzerland, s. 205-225. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31840-0_13
- Balasubramaniam, V., Rathi, D. N. G., Mustar, S., & Lee, J. C. (2025). Microalgae as an eco-friendly and functional ingredient for sustainable aquafeed. *Aquaculture Journal*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/aquacj5030014>
- Bartek, L., Strid, I., Henryson, K., Junne, S., Rasi, S., & Eriksson, M. (2021). Life cycle assessment of fish oil substitute produced by microalgae using food waste. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 2002-2021. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.033>
- Beal, C. M., Gerber, L. N., Thongrod, S., Phromkunthong, W., Kiron, V., Granados, J., Archibald, I., Greene, C. H., & Huntley, M. E. (2018). Marine microalgae commercial production improves sustainability of global fisheries and aquaculture. *Scientific Reports*, 8(1), 15064. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33504-w>
- Berner, F., Heimann, K., & Sheehan, M. (2015). Microalgal biofilms for biomass production. *Journal of Applied Phycology*, 27(5), 1793-1804. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0489-x>
- Bhalamurugan, G. L., Valerie, O., & Mark, L. (2018). Valuable bioproducts obtained from microalgal biomass and their commercial applications: A review. *Environmental Engineering Research*, 23(3), 229-241. <https://doi.org/10.4491/eer.2017.220>
- Birinci, C., & Çil, E. A. (2023). Use of microalgae and its importance in Türkiye and worldwide. *Memba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.58626/menba.1294535>
- Bjørn, A., Moltesen, A., Laurent, A., Owsianiak, M., Corona, A., Birkved, M., & Hauschild, M. Z. (2018). Life cycle inventory analysis. *Chapter 9, Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Ed.), Springer

- International Publishing, Cham, s. 117-165. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_9
- Borowitzka, M. A. (2013). High-value products from microalgae-their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25(3), 743-756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
- Borowitzka, M. A. (2018). Biology of microalgae. *Chapter 3, Microalgae in Health and Disease Prevention*, I. A. Levine & J. Fleurence (Ed.), Academic Press, London, s. 23-72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811405-6.00003-7>
- Bradley, T., Rajaeifar, M. A., Kenny, A., Hainsworth, C., del Pino, V., del Valle Inclán, Y., Pova, I., Mendonça, P., Brown, L., Smallbone, A., Roskilly, A. P., Joyce, S., & Heidrich, O. (2023). Life cycle assessment of microalgae-derived biodiesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(5), 590-609. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02140-6>
- Branco-Vieira, M., Costa, D. M. B., Mata, T. M., Martins, A. A., Freitas, M. A. V., & Caetano, N. S. (2020). Environmental assessment of industrial production of microalgal biodiesel in central-south Chile. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121756>
- Braud, L., McDonnell, K., & Murphy, F. (2023). Environmental life cycle assessment of algae systems: Critical review of modelling approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113218. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113218>
- Braun, J. C. A., & Colla, L. M. (2023). Use of microalgae for the development of biofertilizers and biostimulants. *BioEnergy Research*, 16(1), 289-310. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10456-8>
- Brooke, F. J., Eckhardt, H. G., & Halim, R. (2025). Marine and freshwater Nannochloropsis for the bioremediation of brewery wastewater, CO₂ capture, and CO-production of omega-3 lipids. *Algal Research*, 90, 104194. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104194>
- Brooke, F. J., Ma, Q., Rahimi, M., Silkina, A., Constantin, C., Bădulescu, L., La Terza, A., Turkmen, B. A., Bajoub, A., Ajal, E. A., van Mullem, D., & Halim, R. (2025). Nannochloropsis for the bioremediation of brewery side streams and co-production of aquaculture feed and bio-fertiliser: A comprehensive review. *Algal Research*, 89, 104079. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104079>
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1-2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- Camacho-Rodríguez, J., Macías-Sánchez, M. D., Cerón-García, M. C., Alarcón, F. J., & Molina-Grima, E. (2018). Microalgae as a potential ingredient for partial fish meal replacement in aquafeeds: Nutrient stability under different storage conditions. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1049-1059. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1281-5>
- Cancela, Á., Álvarez, X., Sánchez, Á., Ortiz, L., & Somoza, L. (2019). Microalgae cultivation and harvesting for bioenergy production. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100333. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100333>
- Carr, I., Glencross, B., & Santigosa, E. (2023). The importance of essential fatty acids and their ratios in aquafeeds to enhance salmonid production, welfare, and human health. *Frontiers in Animal Science*, 4, 1147081. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1147081>
- Carvalho, A. P., Meireles, L. A., & Malcata, F. X. (2006). Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. *Biotechnology Progress*, 22(6), 1490-1506. <https://doi.org/10.1021/bp060065r>
- Casanova, L. M., Macrae, A., Souza, J. E. de, Junior, A. N., & Vermelho, A. B. (2023). The potential of allelochemicals from microalgae for biopesticides. *Plants*, 12(9).

- <https://doi.org/10.3390/plants12091896>
- Castro, J. S., Calijuri, M. L., Ferreira, J., Assemany, P. P., & Ribeiro, V. J. (2020). Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. *Sci Total Environ*, 724, 138138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138138>
- Cedeno, F. R. P., Olubiyo, O. J., & Ferreira, S. (2025). From microbial proteins to cultivated meat for alternative meat-like products: A review on sustainable fermentation approaches. *Journal of Biological Engineering*, 19(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s13036-025-00509-9>
- Chanquia, S. N., Vernet, G., & Kara, S. (2022). Photobioreactors for cultivation and synthesis: Specifications, challenges, and perspectives. *Engineering in Life Sciences*, 22(12), 712-724. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100070>
- Chew, K. W., Chia, S. R., Show, P. L., Yap, Y. J., Ling, T. C., & Chang, J. S. (2018). Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.039>
- Chhandama, M. V. L., Ruatpuia, J. V. L., Ao, S., Chetia, A. C., Satyan, K. B., & Rokhum, S. L. (2023). Microalgae as a sustainable feedstock for biodiesel and other production industries: Prospects and challenges. *Energy Nexus*, 12, 100255. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100255>
- Chhaya, R. (2021). Microalgae: A revolutionary bio-agents for sustainable agriculture. *IOSR J. Agric. Vet. Sci.*, 14(12), 25-32. <https://doi.org/10.9790/2380-1412012532>
- Chia, S. R., Chew, K. W., Show, P. L., Yap, Y. J., Ong, H. C., Ling, T. C., & Chang, J. S. (2018). Analysis of economic and environmental aspects of microalgae biorefinery for biofuels production: A review. *Biotechnology Journal*, 13(6), 1700618. <https://doi.org/10.1002/biot.201700618>
- Chisti, Y. (2020). Microalgae biotechnology: A brief introduction. *Chapter 1, Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*, E. Jacob-Lopes, M. M. Maroneze, M. I. Queiroz, & L. Q. Zepka (Ed.), IntechOpen, London, s. 3-23.
- CML. (2017). *CML-IA Characterisation Factors, January 2016 Update* [Dataset]. <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R. A., & Steyer, J. P. (2011). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*, 102(1), 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.154>
- Connelly, R. (2014). Second-generation biofuel from high-efficiency algal-derived biocrude. *Chapter 10, Bioenergy Research: Advances and Applications*, V. K. Gupta, M. G. Tuohy, C. P. Kubicek, J. Saddler, & F. Xu (Ed.), Elsevier, Amsterdam, s. 153-170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59561-4.00010-3>
- Costa, D., Júnior, J. P., & Martins, M. (2025). Towards sustainable aquaculture: A review on the use of microalgae as functional feed ingredients. *International Journal of Aquaculture*, 15(0).
- Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Cruz, C. G., Silveira, J., & Morais, M. G. (2019). Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 54(5), 366-375. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1571366>
- Couteau, C., & Coiffard, L. (2018). Microalgal application in cosmetics. *Chapter 15, Microalgae in Health and Disease Prevention*, I. A. Levine & J. Fleurence (Ed.), Academic Press, London, s. 317-323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811405-6.00015-3>
- Curran, M. A. (2017). Overview of goal and scope definition in life cycle assessment. *Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment*, M. A. Curran (Ed.), Springer, Netherlands,

- s. 1-62. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0855-3_1
- Çevre, Ş., & Bakanlığı, İ. D. (2024). Türkiye'nin döngüsel ekonomiye geçiş potansiyelinin değerlendirilmesi için teknik destek projesi. *Döngüsel Ekonomide Entegre Atık Yönetimi Eğitimi Notları*.
- Davis, D., Morão, A., Johnson, J. K., & Shen, L. (2021). Life cycle assessment of heterotrophic algae omega-3. *Algal Research*, 60, 102494. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102494>
- de Souza, M. P., Hoeltz, M., Gressler, P. D., Benitez, L. B., & Schneider, R. C. S. (2019). Potential of microalgal bioproducts: General perspectives and main challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2139-2156. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0253-6>
- Del Mondo, A., Smerilli, A., Sané, E., Sansone, C., & Brunet, C. (2020). Challenging microalgal vitamins for human health. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 201. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01459-1>
- Demir, M. Z., Guven, H., Ersahin, M. E., Ozgun, H., Pasaoglu, M. E., & Koyuncu, I. (2024). Comparative life cycle assessment of four municipal water disinfection methods. *Sustainability*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/su16146104>
- Dersjant-Li, Y. (2021). The use of soya protein in aquafeeds. *Oilseeds Focus*, 7(2), 29-31. https://doi.org/10.10520/ejc-vp_oilseeds_v7_n2_a10
- Dijkman, T. J., Basset-Mens, C., Antón, A., & Núñez, M. (2018). LCA of food and agriculture. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Ed.), Springer, s. 723-754. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_29
- Dikel, S., & Demirkale, I. (2024). Global aquaculture feed market: Trends and challenges. *International Conference on Agriculture, Animal Science & Rural Development*.
- Dincer, I., & Abu-Rayash, A. (2019). *Energy Sustainability*. Academic Press, Netherlands.
- Dincer, I., & Bicer, Y. (2018). Life cycle assessment of energy. *Energy Fundamentals, Part B, Comprehensive Energy Systems*, I. Dincer (Ed.), Elsevier. s. 1042-1084. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00134-6>
- Dolganyuk, V., Belova, D., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Katserov, D., Patyukov, N., & Sukhikh, S. (2020). Microalgae: A promising source of valuable bioproducts. *Biomolecules*, 10(8), 1153.
- Ecoinvent. (2024). *Ecoinvent v3.11* [Dataset]. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>
- Encarnaçao, P. (2016). Functional feed additives in aquaculture feeds. *Aquafeed Formulation*, S. F. Nates (Ed.), Academic Press, Oxford, s. 217-237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800873-7.00005-1>
- Fantini, M. (2017). Biomass availability, potential and characteristics. *Chapter 2, Biorefineries: Targeting Energy, High Value Products and Waste Valorisation*, M. Rabaçal, A. F. Ferreira, C. A. M. Silva, & M. Costa (Ed.), Springer, Cham, s. 21-54. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48288-0_2
- FAO. (2018). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 (SOFIA). Meeting the sustainable development goals*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9540en>
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Ferreira, J., Braga, M. Q., Gama, R. C. N. D., Magalhães, I. B., Marangon, B. B., Castro, J. D. S., Lorentz, J. F., Henriques, B. S., Pereira, A. S. A. D. P., Assemany, P. P., & Calijuri, M. L. (2024). Carotenoids from wastewater-grown microalgae biomass: Life cycle assessment and techno-economical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140526>
- Ferreira, S. F., Buller, L. S., Berni, M., & Forster-Carneiro, T. (2019). Environmental impact

- assessment of end-uses of biomethane. *Journal of Cleaner Production*, 230, 613-621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.034>
- Fitzgerald, C., Gallagher, E., Tasdemir, D., & Hayes, M. (2011). Heart health peptides from macroalgae and their potential use in functional foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 6829-6836. <https://doi.org/10.1021/jf201114d>
- Fontagné, S., Silva, N., Bazin, D., Ramos, A., Aguirre, P., Surget, A., Abrantes, A., Kaushik, S. J., & Power, D. M. (2009). Effects of dietary phosphorus and calcium level on growth and skeletal development in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry. *Aquaculture*, 297(1), 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.09.022>
- Frigerio, V., Casson, A., & Limbo, S. (2023). Comparison of different methodological choices in functional unit selection and results implication when assessing food-packaging environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 396, 136527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136527>
- Gaber, K., Rösch, C., & Biondi, N. (2022). Life cycle assessment of total fatty acid (TFA) production from microalgae *Nannochloropsis oceanica* at different sites and under different sustainability scenarios. *BioEnergy Research*, 15(3), 1595-1615. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10279-z>
- Gao, L., Qin, Y., Zhou, X., Jin, W., He, Z., Li, X., & Wang, Q. (2024). Microalgae as future food: Rich nutrients, safety, production costs and environmental effects. *Science of The Total Environment*, 927, 172167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172167>
- Gatlin III, D. M., Barrows, F. T., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T. G., Hardy, R. W., Herman, E., Hu, G., Krogdahl, Å., Nelson, R., Overturf, K., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., J Souza, E., Stone, D., Wilson, R., & Wurtele, E. (2007). Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: A review. *Aquaculture Research*, 38(6), 551-579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704.x>
- Geadá, P., Vicente, A. A., & Teixeira, J. A. (2024). Bioreactor: General configuration, classification, and bioreactor types. *Chapter 3, Bioreactor Technology in Food Processing*, R. F. Schwan, V. K. Joshi, D. R. Dias (Ed.), CRC Press, s. 36-58.
- Giwa, A., Adeyemi, I., Dindi, A., Lopez, C. G. B., Lopresto, C. G., Curcio, S., & Chakraborty, S. (2018). Techno-economic assessment of the sustainability of an integrated biorefinery from microalgae and *Jatropha*: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 239-257. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.032>
- Godoy, A. C., Fries, E., Corrêia, A. F., Melo, I. W. A., Rodrigues, R. B., & Boscolo, W. R. (2016). Apparent digestibility of fish meat and bone meal in Nile tilapia. *Archivos de zootecnia*, 65(251), 341-348.
- Goldstein, B., Birkved, M., Quitzau, M. B., & Hauschild, M. (2013). Quantification of urban metabolism through coupling with the life cycle assessment framework: Concept development and case study. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035024>
- Goodrich, H. R., Berry, A. A., Montgomery, D. W., Davison, W. G., & Wilson, R. W. (2022). Fish feeds supplemented with calcium-based buffering minerals decrease stomach acidity, increase the blood alkaline tide and cost more to digest. *Scientific Reports*, 12(1), 18468. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22496-3>
- Guillerme, J. B., Couteau, C., & Coiffard, L. (2017). Applications for marine resources in cosmetics. *Cosmetics*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/cosmetics4030035>
- Guo, S., Wang, P., Wang, X., Zou, M., Liu, C., & Hao, J. (2020). Microalgae as biofertilizer in modern agriculture. *Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products*, Md. A. Alam, J. L. Xu, & Z. Wang (Ed.), Springer, Singapore, s. 397-411. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_12
- Gurreri, L., Calanni Rindina, M., Luciano, A., Falqui, L., Fino, D., & Mancini, G. (2024).

- Microalgae production in an industrial-scale photobioreactors plant: A comprehensive life cycle assessment. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101598. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101598>
- Haidery, J., & Baş, B. (2020). Life cycle assessment of construction of water supply pipelines: A case study from Van, Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(1), 23-32. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.687547>
- Hardy, R. W. (2008). Farmed fish diet requirements for the next decade and implications for global availability of nutrients. *Chapter 1, Alternative Protein Sources in Aquaculture Diets*, C. Lim, C. D. Webster, C. Lee (Ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, s. .
- Hauschild, M. Z. (2005). Assessing environmental impacts in a life-cycle perspective. *Environmental Science & Technology*, 39(4), 81A-88A. <https://doi.org/10.1021/es053190s>
- Howlader, M. S., & French, W. T. (2020). Pretreatment and lipid extraction from wet microalgae: Challenges, potential, and application for industrial-scale application. *Biomass Production, Part 5, Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products*, Md. A. Alam, J. L. Xu, & Z. Wang (Ed.), Springer, Singapore, s. 469-483. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_15
- Huang, Q., Jiang, F., Wang, L., & Yang, C. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IEA. (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-c-goal-in-reach>
- IEA. (2025). *World Energy Outlook 2025 – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- ISO, I. (2006a). 14040: 2006. *Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*, 578, 235-248.
- ISO, I. (2006b). 14044: 2006. *Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines*, 1-46.
- Kalinina, A., Naumov, V., Verakhina, A., & Ovchinnikova, S. (2025). Study of the influence of the temperature and time of microalgae cultivation on the reproduction rate of chlorella and scenedesmus microalgae when cultured in a tubular photobioreactor, *Microbiology Research*, 14(4), 2105-2112. <https://doi.org/10.3390/microbiolres14040142>
- Kashyap, B. K., Saran, C., Solanki, M. K., & Divvela, P. K. (2023). Emerging frontiers of microbes as liquid waste recycler. *Introductory Chapters, Part 1, Current Research Trends and Applications in Waste Management*, B. K. Kashyap & M. K. Solanki (Ed.), Springer Nature, Singapore, s. 3-35. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3106-4_1
- Katiyar, R., Gurjar, B. R., Biswas, S., Pruthi, V., Kumar, N., & Kumar, P. (2017). Microalgae: An emerging source of energy based bio-products and a solution for environmental issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1083-1093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.028>
- Khan, M. I., Shin, J. H., & 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. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>

- Khatoon, N., & Pal, R. (2015). Microalgae in biotechnological application: A commercial approach. *Plant Genomics and Biotechnology, Volume II, In Plant Biology and Biotechnology*, B. Bahadur, M. V. Rajam, L. Sahijram, K. V. Krishnamurthy (Ed.) Springer, New Delhi, s. 27-47.
- Khavari, F., Saidijam, M., Taheri, M., & Nouri, F. (2021). Microalgae: Therapeutic potentials and applications. *Molecular Biology Reports*, 48(5), 4757-4765. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06422-w>
- Koller, M., Muhr, A., & Braunegg, G. (2014). Microalgae as versatile cellular factories for valued products. *Algal Research*, 6, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.09.002>
- Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., Vyas, P., Dhaliwal, H. S., & Saxena, A. K. (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>
- Lafarga, T. (2019). Effect of microalgal biomass incorporation into foods: Nutritional and sensorial attributes of the end products. *Algal Research*, 41, 101566. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101566>
- Lee, Y. K. (2016). Microalgae Cultivation Fundamentals. *Algae Biotechnology: Products and Processes*, F. Bux & Y. Chisti (Ed.), Springer International Publishing, Switzerland, s. 1-19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12334-9_1
- Leong, Y. K., Chang, J.-S., & Lee, D. J. (2023). Types of photobioreactors. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, R. Sirohi, A. Pandey, S. Sim, J. Chang, D. Lee (Ed.), Elsevier, s. 33-58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99911-3.00007-5>
- Liu, M., Zhu, G., & Tian, Y. (2024). The historical evolution and research trends of life cycle assessment. *Green Carbon*, 2(4), 425-437. <https://doi.org/10.1016/j.greenca.2024.08.003>
- Lopes, T. F., Ortigueira, J., Matos, C. T., Costa, L., Ribeiro, C., Reis, A., & Gírio, F. (2023). Conceptual design of an autotrophic multi-strain microalgae-based biorefinery: Preliminary techno-economic and life cycle assessments. *Fermentation*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/fermentation9030255>
- Ma, M., & Hu, Q. (2024). Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: Prospects and challenges. *Reviews in Aquaculture*, 16(2), 818-835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>
- Macusi, E. D., Cayacay, M. A., Borazon, E. Q., Sales, A. C., Habib, A., Fadli, N., & Santos, M. D. (2023). Protein fishmeal replacement in aquaculture: A systematic review and implications on growth and adoption viability. *Sustainability*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/su151612500>
- Madeira, M. S., Cardoso, C., Lopes, P. A., Coelho, D., Afonso, C., Bandarra, N. M., & Prates, J. A. M. (2017). Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: A review. *Livestock Science*, 205, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.09.020>
- Madhubalaji, C. K., Shekh, A., Sijil, P. V., Mudliar, S., Chauhan, V. S., Sarada, R., Rao, A. R., & Ravishankar, G. A. (2019). Open cultivation systems and closed photobioreactors for microalgal cultivation and biomass production. *Phycoremediation, Biofuels and Global Biomass Production, Volume 2, Handbook of Algal Technologies and Phytochemicals*, G. A. Ravishankar, A. R. Rao (Ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, s. 179-201.
- Maiolo, S., Parisi, G., Biondi, N., Lunelli, F., Tibaldi, E., & Pastres, R. (2020). Fishmeal partial substitution within aquafeed formulations: Life cycle assessment of four alternative protein sources. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(8), 1455-1471. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01759-z>

- Mammadov, A., & Cılız, N. (2017). Yaşam döngüsü analizi: Tanımı, amacı, sürdürülebilirlik kavramları ile ilişkisi ve sanayideki yeri. *TC Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı "Kalkınmada Anahtar Verimlilik" Dergisi*.
- Marsden, A., & Shahtout, A. (2024). International Organization for Standardization. *Clinical Laboratory Management*, L. S. Garcia (Ed.), John Wiley & Sons, Inc., Washington, s. 271-277. <https://doi.org/10.1002/9781683673941.ch19>
- Martínez-Ruiz, F. E., Andrade-Bustamante, G., Holguín-Peña, R. J., Renganathan, P., Gaysina, L. A., Sukhanova, N. V., & Puente, E. O. R. (2025). Microalgae as functional food ingredients: Nutritional benefits, challenges, and regulatory considerations for safe consumption. *Biomass*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/biomass5020025>
- Matos, Â. P. (2019). Microalgae as a potential source of proteins. *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications*, C. M. Galanakis (Ed.), Academic Press, Chennai, s. 63-96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816695-6.00003-9>
- McKuin, B., Kapuscinski, A. R., Sarker, P. K., Cheek, N., Lim, J., & Sabarsky, M. (2023). Comparative life cycle assessment of marine microalgae, *Nannochloropsis* sp. and fishmeal for sustainable protein ingredients in aquaculture feeds. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 11(1), 00083. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00083>
- Mendes, M. C., Navalho, S., Ferreira, A., Paulino, C., Figueiredo, D., Silva, D., Gao, F., Gama, F., Bombo, G., Jacinto, R., Aveiro, S. S., Schulze, P. S. C., Gonçalves, A. T., Pereira, H., Gouveia, L., Patarra, R. F., Abreu, M. H., Silva, J. L., Navalho, J., ... Speranza, L. G. (2022). Algae as food in europe: An Overview of species diversity and their application. *Foods*, 11(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/foods11131871>
- Michalak, I., & Chojnacka, K. (2018). Introduction: Toward algae-based products. *Algae Biomass: Characteristics and Applications: Towards Algae-based Products*, K. Chojnacka, P. P. Wiczorek, G. Schroeder, & I. Michalak (Ed.), Springer International Publishing, Cham, s. 1-5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74703-3_1
- Miles, R. D., & Chapman, F. A. (2006). The benefits of fish meal in aquaculture diets: FA122/FA122, 5/2006. *EDIS*, 2006(12). <https://doi.org/10.32473/edis-fa122-2006>
- Mobin, S. M. A., Chowdhury, H., & Alam, F. (2019). Commercially important bioproducts from microalgae and their current applications - A review. *Energy Procedia*, 160, 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.183>
- Morançais, M., Mouget, J. L., & Dumay, J. (2018). Proteins and pigments. *Microalgae in Health and Disease Prevention*, I. A. Levine & J. Fleurence (Ed.), Academic Press, London, s. 145-175. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811405-6.00007-4>
- Moreira, J. B., Santos, T. D., Duarte, J. H., Bezerra, P. Q. M., de Moraes, M. G., & Costa, J. A. V. (2023). Role of microalgae in circular bioeconomy: From waste treatment to biofuel production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(2), 427-437. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02149-1>
- Morocho-Jácome, A. L., Ruscinc, N., Martinez, R. M., de Carvalho, J. C. M., Santos de Almeida, T., Rosado, C., Costa, J. G., Velasco, M. V. R., & Baby, A. R. (2020). (Bio)Technological aspects of microalgae pigments for cosmetics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(22), 9513-9522. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10936-x>
- Moutinho, S., Martínez-Llorens, S., Tomás-Vidal, A., Jover-Cerdá, M., Oliva-Teles, A., & Peres, H. (2017). Meat and bone meal as partial replacement for fish meal in diets for gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles: Growth, feed efficiency, amino acid utilization, and economic efficiency. *Aquaculture*, 468, 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.10.024>
- Murphy, F., Devlin, G., & McDonnell, K. (2013). Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 23, 412-420. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.058>
- Nagappan, S., Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., Al-Jabri, H., Vatland, A. K., & Kumar, G. (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of Biotechnology*, 341, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- Napolitano, G., Venditti, P., Agnisola, C., Quartucci, S., Fasciolo, G., Muscari Tomajoli, M. T., Geremia, E., Catone, C. M., & Ulgiati, S. (2022). Towards sustainable aquaculture systems: Biological and environmental impact of replacing fishmeal with *Arthrospira platensis* (Nordstedt) (spirulina). *Journal of Cleaner Production*, 374, 133978. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133978>
- Narala, R. R., Garg, S., Sharma, K. K., Thomas-Hall, S. R., Deme, M., Li, Y., & Schenk, P. M. (2016). Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system. *Frontiers in Energy Research*, 4. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00029>
- Nishshanka, G. K. S. H., Anthonio, R. A. D. P., Nimarshana, P. H. V., Ariyadasa, T. U., & Chang, J. S. (2022). Marine microalgae as sustainable feedstock for multi-product biorefineries. *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108593. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108593>
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., & Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production - A close look at the economics. *Biotechnology Advances*, 29(1), 24-27. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.005>
- Novoveská, L., Nielsen, S. L., Eroldoğan, O. T., Haznedaroglu, B. Z., Rinkevich, B., Fazi, S., Robbens, J., Vasquez, M., & Einarsson, H. (2023). Overview and challenges of large-scale cultivation of photosynthetic microalgae and Cyanobacteria. *Marine Drugs*, 21(8), 445. <https://doi.org/10.3390/md21080445>
- Nwoba, E. G., Ogbonna, C. N., Ishika, T., & Vadiveloo, A. (2020). Microalgal pigments: A Source of natural food colors. *Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products*, Md. A. Alam, J. L. Xu, & Z. Wang (Ed.), Springer, Singapore, s. 81-123. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_3
- OECD, & Nations, F. and A. O. of the U. (2021). OECD-FAO agricultural outlook 2021-2030. *OECD-FAO Agricultural Outlook, 2021*. <https://doi.org/10.1787/19428846-en>
- Oers, L. V., & Guinée, J. (2016). The abiotic depletion potential: Background, updates, and future. *Resources*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/resources5010016>
- Oginah, S. A., Posthuma, L., Maltby, L., Hauschild, M., & Fantke, P. (2023). Linking freshwater ecotoxicity to damage on ecosystem services in life cycle assessment. *Environment International*, 171, 107705. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107705>
- Okeke, E. S., Ejeromedoghene, O., Okoye, C. O., Ezeorba, T. P. C., Nyaruaba, R., Ikechukwu, C. K., Oladipo, A., & Orege, J. I. (2022). Microalgae biorefinery: An integrated route for the sustainable production of high-value-added products. *Energy Conversion and Management: X*, 16, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100323>
- Oncel, S. S., Kose, A., & Faraloni, C. (2015). Genetic optimization of microalgae for biohydrogen production. *Handbook of Marine Microalgae*, S. K. Kim (Ed.), Academic Press, London, s. 383-404. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00025-X>
- Onorato, C., & Rösch, C. (2020). Comparative life cycle assessment of astaxanthin production with *Haematococcus pluvialis* in different photobioreactor technologies. *Algal Research*, 50, 102005. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102005>
- Onyeaka, H., Miri, T., Oibileke, K., Hart, A., Anumudu, C., & Al-Sharif, Z. T. (2021). Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100007>
- Öncel, S. Ş., Köse, A., & Öncel, D. Ş. (2016). Façade integrated photobioreactors for building

- energy efficiency. *Start-Up Creation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00011-X>
- Paniagua-Michel, J. (2015). Bioremediation with microalgae: Toward Sustainable production of biofuels. *Handbook of Marine Microalgae*, S. K. Kim (Ed.), Academic Press, London, s. 471-481. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00031-5>
- Pavan, A. L. R., & Mendes, N. C. (2021). LCA-Product life cycle impact assessment. *Life Cycle Engineering and Management of Products: Theory and Practice*, J. A. de Oliveira, D. A. Lopes Silva, F. N. Puglieri, & Y. M. B. Saavedra (Ed.), Springer International Publishing, Cham, s. 95-119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78044-9_5
- Perdan, S., & Azapagic, A. (2010). Measuring sustainable development: An overview. *Sustainable Development in Practice*, A. Azapagic, S. Perdan (Ed.), John Wiley & Sons, Inc., Washington, s. 26-55. <https://doi.org/10.1002/9780470972847.ch2>
- Pérez-López, P., González-García, S., Jeffryes, C., Agathos, S. N., McHugh, E., Walsh, D., Murray, P., Moane, S., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2014). Life cycle assessment of the production of the red antioxidant carotenoid astaxanthin by microalgae: From lab to pilot scale. *Journal of Cleaner Production*, 64, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.011>
- Poltronieri, C. F., Leite, L. R., & Sousa, S. R. (2021). Environmental management systems and performance measurement. *Life Cycle Engineering and Management of Products: Theory and Practice*, J. A. de Oliveira, D. A. Lopes Silva, F. N. Puglieri, & Y. M. B. Saavedra (Ed.), Springer International Publishing, Cham, s. 255-281. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78044-9_11
- Qiao, H., Hu, D., Ma, J., Wang, X., Wu, H., & Wang, J. (2019). Feeding effects of the microalga *Nannochloropsis* sp. On juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Algal Research*, 41, 101540. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101540>
- Qin, L., Alam, Md. A., & Wang, Z. (2019). Open pond culture systems and photobioreactors for microalgal biofuel production. *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*, Md. A. Alam & Z. Wang (Ed.), Springer, Singapore, s. 45-74. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_3
- Rafiq, A., Morris, C., Schudel, A., & Gheewala, S. (2025). Life cycle assessment of microalgae-based products for carbon dioxide utilization in Thailand: Biofertilizer, fish feed, and biodiesel. *F1000Research*, 13, 1503. <https://doi.org/10.12688/f1000research.159019.3>
- Rahman, K. M. (2020). Food and high value products from microalgae: Market opportunities and challenges. *Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products*, Md. A. Alam, J. L. Xu, & Z. Wang (Ed.), Springer, Singapore, s. 3-27. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_1
- Rathinavel, L., Singh, S., Rai, P. K., Chandra, N., Jothinathan, D., Gaffar, I., Pandey, A. K., Choure, K., Wao, A. A., Joo, J. C., & Pandey, A. (2024). Sustainable microalgal biomass for efficient and scalable green energy solutions: Fueling tomorrow. *Fuels*, 5(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/fuels5040049>
- Reijnders, L. (2020). Life cycle assessment of microalgae-based processes and products. *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*, E. Jacob-Lopes, M. M. Maroneze, M. I. Queiroz, & L. Q. Zepka (Ed.), IntechOpen, London, s. 823-840. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818536-0.00030-0>
- Rojo, E. M., Rossi, S., Bolado, S., Stampino, P. G., Ficara, E., & Dotelli, G. (2024). Life cycle assessment of biostimulant production from algal biomass grown on piggery wastewater. *Science of The Total Environment*, 907, 168083. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168083>
- Romagnoli, F., Spaccini, F., Boggia, A., Paoli, R., Feofilovs, M., Ievina, B., & Rocchi, L. (2024). Microalgae cultivation in a biogas plant: Environmental and economic

- assessment through a life cycle approach. *Biomass and Bioenergy*, 182, 107116. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107116>
- Romero-García, J. M., González-López, C. V., Brindley, C., Fernández-Sevilla, J. M., & Acién-Fernández, F. G. (2022). Simulation and techno-economical evaluation of a microalgal biofertilizer production process. *Biology*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/biology11091359>
- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A. M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., & Vieira, M. (2018). Life Cycle impact assessment. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Ed.), Springer International Publishing, Cham, s. 167-270. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10
- Roy, Z., & Halder, G. (2020). Replacement of halogenated refrigerants towards sustainable cooling system: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100027>
- Rupawalla, Z. (2022). *The development of green microalgae as a biofertiliser and biostimulant to improve Spinacia oleracea crop quality and yield* (PhD Thesis). The University of Queensland. <https://doi.org/10.14264/b9ef2ba>
- Ryu, B., Himaya, S. W. A., & Kim, S. K. (2015). Applications of microalgae-derived active ingredients as cosmeceuticals. *Handbook of Marine Microalgae*, S. K. Kim (Ed.), Academic Press, London, s. 309-316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00020-0>
- Samoraj, M., Çaliş, D., Trzaska, K., Mironiuk, M., & Chojnacka, K. (2024). Advancements in algal biorefineries for sustainable agriculture: Biofuels, high-value products, and environmental solutions. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 58, 103224. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103224>
- Samuel-Fitwi, B., Meyer, S., Reckmann, K., Schroeder, J. P., & Schulz, C. (2013). Aspiring for environmentally conscious aquafeed: Comparative LCA of aquafeed manufacturing using different protein sources. *Journal of Cleaner Production*, 52, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.031>
- Sánchez, J., Curt, M. D., Robert, N., & Fernández, J. (2019). Biomass resources. *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, C. Lago, N. Caldes, Y. Lechon (Ed.), Academic Press, London, s. 25-111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9>
- Sani, I., Kurnia, Y. W., Sinthya, H. C., Anthony, R., Situmorang, E. C., Utomo, C., & Liwang, T. (2022). Exploring the potency of microalgae-based biofertilizer and its impact on oil palm seedlings growth. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 44(1), 139-151. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v44i1.3102>
- Sasa, A., Şentürk, F., Üstündağ, Y., & Erem, F. (2020). Alglerin Gıda veya gıda bileşeni olarak kullanımını ve sağlık üzerine etkileri. *Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 2(2), 97-110.
- Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2019). Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 709-722. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.003>
- Selvaraj, D., Sanjiv, R., Banu, S. S., & Arivazhagan, M. (2025). Recent advances in microalgae harvesting and dewatering: A techno-economic evaluation perspective. *Bioresource Technology Reports*, 31, 102201. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102201>
- Shah, M. R., Lutz, G. A., Alam, A., Sarker, P., Kabir Chowdhury, M. A., Parsaeimehr, A., Liang, Y., & Daroch, M. (2018). Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry. *Journal of Applied Phycology*, 30(1), 197-213. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1234-z>
- Shahid, A., Khan, F., Ahmad, N., Farooq, M., & Mehmood, M. A. (2020). Microalgal carbohydrates and proteins: Synthesis, Extraction, applications, and challenges.

- Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products*, Md. A. Alam, J.L. Xu, & Z. Wang (Ed.), Springer, Singapore, s. 433-468. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_14
- Siddik, M. A. B., Sørensen, M., Islam, S. M. M., Saha, N., Rahman, M. A., & Francis, D. S. (2024). Expanded utilisation of microalgae in global aquafeeds. *Reviews in Aquaculture*, *16*(1), 6-33. <https://doi.org/10.1111/raq.12818>
- Silva, D. A. L. (2021). Life Cycle Assessment (LCA)-Definition of goals and scope. *Life Cycle Engineering and Management of Products: Theory and Practice*, J. A. de Oliveira, D. A. Lopes Silva, F. N. Puglieri, & Y. M. B. Saavedra (Ed.), Springer International Publishing, Cham, (ss. 45-69. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78044-9_3
- Soriano-Jerez, Y., Gallardo-Rodríguez, J. J., López-Rosales, L., García-Camacho, F., Bressy, C., Molina-Grima, E., & Cerón-García, M. C. (2024). Preventing biofouling in microalgal photobioreactors. *Bioresource Technology*, *407*, 131125. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131125>
- Sousa, I., Gouveia, L., Batista, A. P., Raymundo, A., & Bandarra, N. M. (2008). Microalgae in novel food products. *Food Chemistry Research Developments*, K. N. Papadopoulos (Ed.), Nova Science Publishers, Inc., New York, s. 75-112.
- Souza, C. M. M., Bastos, T. S., & Santos, M. C. dos. (2021). Microalgae use in animal nutrition. *Research, Society and Development*, *10*(16), e53101622986-e53101622986. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.22986>
- Sphera. (2023). *GaBi V10.7* [Software].
- Suganya, T., Varman, M., Masjuki, H. H., & Renganathan, S. (2016). Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 909-941. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.026>
- Tacon, A. G. J., Metian, M., & McNevin, A. A. (2022). Future feeds: Suggested guidelines for sustainable development. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, *30*(2), 135-142. <https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1860474>
- Taelman, S. E., De Meester, S., Roef, L., Michiels, M., & Dewulf, J. (2013). The environmental sustainability of microalgae as feed for aquaculture: A life cycle perspective. *Bioresource Technology*, *150*, 513-522. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.044>
- Tan, J. S., Lee, S. Y., Chew, K. W., Lam, M. K., Lim, J. W., Ho, S. H., & Show, P. L. (2020). A review on microalgae cultivation and harvesting, and their biomass extraction processing using ionic liquids. *Bioengineered*, *11*(1), 116-129. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1711626>
- Tarım, O., & Bakanlık. (2025). Su ürünleri ürün raporu 2025. *Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Müdürlüğü*.
- Terán-Cuadrado, G., Sbahieh, S., Tahir, F., Nurdiawati, A., Almarshoud, M. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2024). Evaluating the influence of functional unit on life cycle assessment (LCA) reliability of concrete. *Materials Today: Proceedings*, *S2214785324002669*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.079>
- Thangam, K. R., Santhiya, A., Sri, S. R. A., MubarakAli, D., Karthikumar, S., Kumar, R. S., Thajuddin, N., Soosai, M. R., Varalakshmi, P., Moorthy, I. G., & Pugazhendhi, A. (2021). Bio-refinery approaches based concomitant microalgal biofuel production and wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, *785*, 147267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147267>
- Togarcheti, S. C., & Padamati, R. B. (2021). Comparative life cycle assessment of EPA and DHA production from microalgae and farmed fish. *Clean Technologies*, *3*(4), 699-710.
- Tubón-Núñez, E., Vigil Berrocal, M. Á., Rodríguez-Montequín, V., & Ortega-Fernández, F. (2025). Tools to measure the environmental impact of a product. *Procedia CIRP*, *32nd*

- CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE2025)*, 135, 1227-1233. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.01.088>
- Turchini, G. M., Trushenski, J. T., & Glencross, B. D. (2018). Thoughts for the future of aquaculture nutrition: Realigning perspectives to reflect contemporary issues related to judicious use of marine resources in aquafeeds. *North American Journal of Aquaculture*, 81(1), 13-39.
- Türkmen, B. A., Çoşkun, E. M. A., & Yıldırım, S. (2025). *Sustainability Assessment of Open and Closed Systems in Microalgae Cultivation: A Review*. Y. Kaya, N. Beser (Ed.), VII. International Agricultural, Biological & Life Science Conference, Istanbul, Türkiye, s. 1032-1035.
- Udayan, A., Pandey, A. K., Sharma, P., Sreekumar, N., & Kumar, S. (2021). Emerging industrial applications of microalgae: Challenges and future perspectives. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 1(4), 411-431. <https://doi.org/10.1007/s43393-021-00038-8>
- Union, E. (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*, 5. 2009
- Uthaiyah, N. M., Mehar, J. G., Mudliar, S. N., & Shekh, A. Y. (2019). Recent advances in microalgal bioactives for food, feed, and healthcare products: Commercial potential, market space, and sustainability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 1882-1897. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12500>
- Vieira de Mendonça, H., Assemany, P., Abreu, M., Couto, E., Maciel, A. M., Duarte, R. L., Barbosa dos Santos, M. G., & Reis, A. (2021). Microalgae in a global world: New solutions for old problems? *Renewable Energy*, 165, 842-862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.014>
- Voloshin, R. A., Rodionova, M. V., Zharmukhamedov, S. K., Nejat Veziroglu, T., & Allakhverdiev, S. I. (2016). Review: Biofuel production from plant and algal biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(39), 17257-17273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.084>
- Vuppaladiyam, A. K., Prinsen, P., Raheem, A., Luque, R., & Zhao, M. (2018). Microalgae cultivation and metabolites production: A comprehensive review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(2), 304-324. <https://doi.org/10.1002/bbb.1864>
- Wang, Y., Wen, H., Wu, M., Liu, X., Yin, H., Qin, W., Zheng, X., He, J., Wei, K., Kong, X., & Liang, S. (2025). Assessing the environmental footprint of microalgae biofuel production: A comparative analysis of cultivation and harvesting scenarios. *Biochemical Engineering Journal*, 213, 109571. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109571>
- Wei, C., Huang, Y., Xia, A., Zhu, X., Zhu, X., & Liao, Q. (2025). Performance and feasibility analysis of an integrated airlift microalgae photobioreactor for cultivation and pre-harvesting. *Journal of Environmental Management*, 375, 124244. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124244>
- Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2010). An outlook on microalgal biofuels. *Science*, 329(5993), 796-799. <https://doi.org/10.1126/science.1189003>
- Wu, W., Lin, K.-H., & Chang, J.-S. (2018). Economic and life-cycle greenhouse gas optimization of microalgae-to-biofuels chains. *Bioresource Technology*, 267, 550-559. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.083>
- Xu, Y., Wei, C., Li, B., Li, W., Han, J., Nie, Y., Li, Z., & Xu, L. (2025). Life-cycle and economic assessments of DHA-biogas hierarchical production system utilizing microalgae biomass and residues. *Chemical Engineering Journal*, 503, 158450.

- <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158450>
- Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., & Takriff, M. S. (2014). An overview: Biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. *Journal of Biological Research-Thessaloniki*, 21(1), 6. <https://doi.org/10.1186/2241-5793-21-6>
- Yadav, G., Meena, D. K., Sahoo, A. K., Das, B. K., & Sen, R. (2020). Effective valorization of microalgal biomass for the production of nutritional fish-feed supplements. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118697>
- Yang. (2020). Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies. *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*, J. Ren, S. Toniolo (Ed.), Elsevier, Amsterdam, s. 95-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00005-1>
- Yarkent, Ç., Gürlek, C., & Oncel, S. S. (2020). Potential of microalgal compounds in trending natural cosmetics: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17, 100304. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100304>
- Yarnold, J., Karan, H., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Microalgal aquafeeds as part of a circular bioeconomy. *Trends in Plant Science*, 24(10), 959-970. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.06.005>
- Yıldırım, Ö. (2008). Aquafeed industry in Turkey: Its aquafeed projections towards the year 2015. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 8(1), 93-98.
- Yousuf, A. (2020). Fundamentals of microalgae cultivation. *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*, A. Yousuf (Ed.), Academic Press, London, s. 1-9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00001-1>
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., Chen, H., & Ao, X. (2024). Impacts of Global climate change on agricultural production: A comprehensive review. *Agronomy*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>
- Zaabwe, T., Singini, W., Kang'ombe, J., Kapute, F., & Mbamba, D. (2020). An evaluation of water pellet stability of two iso-proteineous floating and sinking diets. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2020.120615>
- Zhan, J., Rong, J., & Wang, Q. (2017). Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8505-8517. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.021>
- Zhang, C., Show, P. L., & Ho, S. H. (2019). Progress and perspective on algal plastics - A critical review. *Bioresource Technology*, 289, 121700. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121700>
- Zhang, L., Liao, K., Shi, P., Guo, J., Xie, F., & Xu, J. (2025). Dietary inclusion of microalgae meal for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): Effects on growth performance, flesh quality, and immunity. *Animal Feed Science and Technology*, 320, 116205. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.116205>
- Zhang, Y., Ishikawa, M., Koshio, S., Yokoyama, S., Dossou, S., Wang, W., Zhang, X., Shadrack, R. S., Mzengeza, K., Zhu, K., & Seo, S. (2021). Optimization of soybean meal fermentation for aqua-feed with *Bacillus subtilis* natto using the response surface methodology. *Fermentation*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/fermentation7040306>
- Zlaugotne, B., Diaz Sanchez, F., Pubule, J., & Blumberga, D. (2023). Life cycle assessment of fish feed for oil alternatives—Environmental impact of microalgae, rapeseed and fish oil. *Agronomy Research*, 21(3), 1351-1360.
- Zlaugotne, B., & Pubule, J. (2024). From cradle to plate: Analysing the life cycle sustainability of fish feed composition. *Environmental and Climate Technologies*, 28(1), 686-694. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2024-0053>