

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAM ÖLÇEKLİ ÇÖP SIZINTI SUYU ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNDA  
MİKROALG KÜLTÜRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ENERJİ ÜRETİM  
POTANSİYELLERİNİN BELİRLENMESİ**

**TUBA GENÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. BESTAMİ ÖZKAYA**

**İSTANBUL, 2016**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAM ÖLÇEKLİ ÇÖP SIZINTI SUYU ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNDA  
MİKROALG KÜLTÜRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ENERJİ ÜRETİM  
POTANSİYELERİNİN BELİRLENMESİ**

Tuba GENÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güleda ENGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖVEZ

İstanbul Teknik Üniversitesi



Bu alışma, T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü Sanayi Tezleri Programı (SAN-TEZ) 1643.STZ.2012-2 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Yüksek lisans çalışmalarımın yürütülmesi sırasında desteğini, bilgisini benden esirgemeyen, çalışmalarımda bana yol gösterip destek veren, bilimsel araştırma prensipleri konusunda bana her türlü disiplini ve eğitimi vermeye çalışan, ileriki yaşamımda da kendime örnek almaktan mutluluk duyacağım değerli danışman hocam Prof.Dr. Bestami ÖZKAYA'ya şükranlarımı sunarım.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi çöp depolama alanlarının teknik standartlara uygun bir şekilde kurulumu ve işletilmesinde öncü olan, katı atık mühendisliği kavramını ülkemize kazandırıp konu ile ilgili genç akademisyenlerin yetişmesinde büyük katkıları sebebiyle sayın Prof. Dr. Adem BAŞTÜRK ve Prof. Dr. Ahmet DEMİR'e,

T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı SAN-TEZ programı kapsamında yürütülen proje çalışmalarına verdikleri destekten dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSTAÇ A.Ş.'ye, Şirket yetkililerinden Dr. Şenol YILDIZ, Vahit BALAHORLİ ve Ahmet Emin YILDIRIM'a,

Kısa bir süre projesinde çalışma imkanı bulduğum ve değerli bilgilerini benimle paylaştan Sayın Hocam Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI'ya,

Çalışmamın son aşamasında yardımlarını, bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyen değerli Arş. Gör. Emre Oğuz KÖROĞLU'na,

Her zaman yanımda olan, yardımlarını karşılık beklemeden yapan ve hep öyle olacağına emin olduğum Çevre Yük. Müh. Hande TÜRKAY YILMAZ'a, bana ve çalışmalarına olan katkılarından dolayı Çevre Yük. Müh. Serap BALABAN'a, birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum Çevre Yük. Müh. İsmail Hakkı ZENGİN'e ve tezime katkılarından dolayı Çevre Yük. Müh. Ali ZOUNGRANA'ya,

Her zaman ve her koşulda yanımda olan; her türlü zorluğun üstesinden gelmeyi öğreten, destek, ilgi, anlayış ve hoşgörülerini eksik etmeyen, bana hayatımın her alanında güç veren ve bütün teşekkürlerin çok az kalacağından emin olduğum; babam Nazım GENÇ'e, annem Hatice Nevin GENÇ'e, kardeşim Ömer Ertuğrul GENÇ'e, hayatım boyunca hep yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aile büyüklerim dedem Kadir NALBANT ve anneannem Sevim NALBANT'a,

En içten şükranlarımı, saygılarımı sunarım.

Mayıs, 2016

Tuba GENÇ

## İÇİNDEKİLER

|                                                               | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------|-------|
| KISALTMA LİSTESİ .....                                        | viii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                            | ix    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                         | xii   |
| ÖZET .....                                                    | xiii  |
| ABSTRACT .....                                                | xv    |
| BÖLÜM 1                                                       |       |
| GİRİŞ.....                                                    | 1     |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                     | 1     |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                         | 2     |
| 1.3 Hipotez.....                                              | 3     |
| BÖLÜM 2                                                       |       |
| LİTERATÜR BİLGİLERİ.....                                      | 4     |
| 2.1 Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle Enerjisi ..... | 4     |
| 2.2 Üçüncü Nesil Biyoyakıt Olarak Mikroalgler .....           | 6     |
| 2.3 Mikroalglerin Biyoteknolojisi ve Yetiştiriciliği .....    | 8     |
| 2.4 Mikroalglerin Büyüme Gereksinimleri .....                 | 9     |
| 2.4.1 pH.....                                                 | 10    |
| 2.4.2 Sıcaklık.....                                           | 10    |
| 2.4.3 Işık .....                                              | 11    |
| 2.4.4 Tuzluluk.....                                           | 11    |
| 2.4.5 Besi Ortamı .....                                       | 12    |
| 2.4.6 Havalandırma/Karıştırma.....                            | 12    |
| 2.5 Mikroalg Üretim Teknolojileri .....                       | 13    |
| 2.5.1 Açık Sistemler.....                                     | 13    |
| 2.5.1.1 Karıştırmasız Havuzlar .....                          | 14    |
| 2.5.1.2 Dairesel Havuzlar .....                               | 14    |
| 2.5.1.3 Su Kanallı Havuzlar .....                             | 15    |

|                               |                                                                                                          |           |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.2                         | Kapalı Sistemler.....                                                                                    | 15        |
| 2.5.2.1                       | Tüp Şeklinde Fotobiyoreaktörler .....                                                                    | 16        |
| 2.5.2.2                       | Düz Panel Fotobiyoreaktörler .....                                                                       | 17        |
| 2.5.2.3                       | Dikey Sütun Fotobiyoreaktörler .....                                                                     | 18        |
| 2.6                           | Biyokütle Hasadı ve Susuzlaştırılması.....                                                               | 19        |
| 2.6.1                         | Flokülasyon (Yumaklaştırma).....                                                                         | 20        |
| 2.6.3                         | Süzme .....                                                                                              | 21        |
| 2.6.4                         | Yüzdürme .....                                                                                           | 22        |
| 2.6.5                         | Yer Çekimi İle Çökeltme .....                                                                            | 22        |
| 2.7                           | Mikroalg Biyokütleden Enerji Üretim Yolları .....                                                        | 23        |
| 2.7.1                         | Termokimyasal Dönüşüm .....                                                                              | 23        |
| 2.7.1.1                       | Yakma .....                                                                                              | 23        |
| 2.7.1.2                       | Gazifikasyon .....                                                                                       | 24        |
| 2.7.1.3                       | Piroliz.....                                                                                             | 24        |
| 2.7.1.4                       | Sıvılaştırma .....                                                                                       | 24        |
| 2.7.2                         | Biyokimyasal Dönüşüm .....                                                                               | 25        |
| 2.7.2.1                       | Biyodizel .....                                                                                          | 25        |
| 2.7.2.2                       | Biyometanol .....                                                                                        | 26        |
| 2.7.2.3                       | Biyogaz (Biyometan) .....                                                                                | 27        |
| 2.7.2.4                       | Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (MYH) .....                                                                   | 27        |
| 2.8                           | Enerji Üretimi İçin Uygun Mikroalg Türünün Seçilmesi .....                                               | 28        |
| 2.9                           | Mikroalg Yetiştiriciliği ile CO <sub>2</sub> Salınımının Azaltılması ve Gerçekleştirilen Çalışmalar..... | 28        |
| <b>BÖLÜM 3</b>                |                                                                                                          |           |
| <b>MATERYAL VE METOT.....</b> |                                                                                                          | <b>31</b> |
| 3.1                           | <b>MATERYAL.....</b>                                                                                     | <b>31</b> |
| 3.1.1                         | Çalışmalarda Kullanılan Mikroalgler .....                                                                | 31        |
| 3.1.1.1                       | <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                                          | 31        |
| 3.1.1.2                       | <i>Nannochloropsis oculata</i> .....                                                                     | 32        |
| 3.1.2                         | Kültürlerin Gelişimi İçin Kullanılan Sentetik Besi Ortamları.....                                        | 33        |
| 3.1.2.1                       | <i>Chlorella vulgaris</i> Besi Ortamı (BBM).....                                                         | 33        |
| 3.1.2.2                       | <i>Nannochloropsis oculata</i> Besi Ortamı (F/2) .....                                                   | 35        |
| 3.1.3                         | Çalışmalarda Kullanılan Su ve Süzüntü Suyu .....                                                         | 38        |
| 3.1.3.1                       | Süzüntü Suyu.....                                                                                        | 38        |
| 3.1.3.2                       | Deniz Suyu .....                                                                                         | 41        |
| 3.1.3.3                       | Saf su .....                                                                                             | 41        |
| 3.2                           | <b>METOD.....</b>                                                                                        | <b>42</b> |
| 3.2.1                         | Araştırma Ortamının Kurulması .....                                                                      | 42        |
| 3.2.2                         | Kontrol Çalışmaları.....                                                                                 | 43        |
| 3.2.2.1                       | Deneme 1 (Manyetik Karıştırma Düzenegi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar).....                             | 45        |
| 3.2.2.2                       | Deneme 2 (Biyoreaktörler İle Gerçekleştirilen Çalışmalar) .....                                          | 49        |
| 3.2.2.3                       | Deneme 3 (Mikroalg Üretimi) .....                                                                        | 52        |
| 3.2.3                         | Mikroalg Kültürlerinin Gelişimini İzlemek İçin Üretim Boyunca Yapılan Analizler .....                    | 53        |

|                                  |                                                                                     |     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.3.1                          | Optik Yoğunluk (OD).....                                                            | 53  |
| 3.2.3.2                          | Kuru Ağırlık (KA) .....                                                             | 54  |
| 3.2.3.3                          | Klorofil-a (K-a) .....                                                              | 55  |
| 3.2.3.4                          | Toplam Azot .....                                                                   | 57  |
| 3.2.3.5                          | Toplam Fosfor .....                                                                 | 57  |
| 3.2.4                            | Hasat Çalışmaları.....                                                              | 57  |
| 3.2.5                            | Mikroalgal Biyokütlenin Enerji İçeriğinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar..... | 59  |
| 3.2.5.1                          | Biyometan Potansiyelinin Belirlenmesi .....                                         | 59  |
| 3.2.5.2                          | Yağ Analizi .....                                                                   | 62  |
| 3.2.5.3                          | Biyokütleden Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İle Elektrik Enerjisi Üretimi.....          | 66  |
| <br>BÖLÜM 4                      |                                                                                     |     |
| DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... |                                                                                     | 72  |
| 4.1                              | Çalışmalarda Kullanılan Süzüntü Sularının Karakteristik Özellikleri .....           | 73  |
| 4.2                              | Aşı Kültür Üretimi ve Analiz Sonuçları .....                                        | 74  |
| 4.3                              | Kontrol Çalışmaları ve Analiz Sonuçları .....                                       | 77  |
| 4.3.1                            | Deneme 1 (Manyetik Karıştırma Düzenneği İle Gerçekleştirilen Çalışmalar) .....      | 77  |
| 4.3.1.1                          | Hava Kullanılarak Yürütülen Kesikli Çalışmalar .....                                | 77  |
| 4.3.1.2                          | CO <sub>2</sub> Kullanılarak Yürütülen Kesikli Çalışmalar .....                     | 82  |
| 4.3.2                            | Deneme 2 (Biyoreaktörler Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar).....             | 88  |
| 4.3.2.1                          | Biyoreaktörlerde Farklı Konsantrasyonlarda NF kullanımı .....                       | 88  |
| 4.3.2.2                          | Farklı CO <sub>2</sub> Oranlarında <i>C.vulgaris</i> Gelişimi .....                 | 94  |
| 4.3.3                            | Deneme 3 (Mikroalg Üretimi) .....                                                   | 99  |
| 4.4                              | Hasat Çalışmaları .....                                                             | 100 |
| 4.5                              | Mikroalgal Biyokütleden Enerji Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi .....             | 100 |
| 4.5.1                            | Biyometan.....                                                                      | 100 |
| 4.5.2                            | Biyoelektrik .....                                                                  | 104 |
| 4.5.3                            | Biyo-Yağ .....                                                                      | 106 |
| <br>BÖLÜM 5                      |                                                                                     |     |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....       |                                                                                     | 111 |
| KAYNAKLAR.....                   |                                                                                     | 112 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                    |                                                                                     | 117 |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|       |                                                                                   |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| BMP   | Biyometan Potansiyeli                                                             |
| BOİ   | Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı                                                     |
| DDT   | Düzenli Depolama Tesisi                                                           |
| EES   | Elektrokimyasal Empedans                                                          |
| İSTAÇ | İstanbul Çevre Koruma ve Katı Atık Maddeleri Değerlendirme Sanayi ve Ticaret A.Ş. |
| KA    | Kuru Ağırlık                                                                      |
| KOI   | Kimyasal Oksijen İhtiyacı                                                         |
| K-a   | Klorofil-a                                                                        |
| MBR   | Membran Biyoreaktör                                                               |
| MYH   | Mikrobiyal Yakıt Hücresi                                                          |
| SA    | Sentetik Atıksu (Mikroalg Besiyeri)                                               |
| NF    | Nanofiltrasyon                                                                    |
| TKM   | Toplam Katı Madde                                                                 |
| TKN   | Toplam Kjeldahl Azotu                                                             |
| TP    | Toplam Fosfor                                                                     |
| USEPA | Amerika Çevre Koruma Ajansı                                                       |
| YTÜ   | Yıldız Teknik Üniversitesi                                                        |
| WWF   | Doğal Hayatı Koruma Vakfı                                                         |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

|            |                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | Ticari Olarak Yetiştirilen Bazı Mikroalg Türleri (a) <i>Spirulina spp.</i> ,<br>(b) <i>Chlorella vulgaris</i> , (c) <i>Dunaliella salina</i> , (d) <i>Nannochloropsis spp.</i> [18]....                                                                    | 8  |
| Şekil 2.2  | Küme Kültüründe Mikroalg Büyüme Oranlarının (Düz Çizgi) ve Besin<br>Derişimlerinin (Kesikli Çizgi) Şematik Gösterimi [19] .....                                                                                                                            | 9  |
| Şekil 2.3  | Tipik Alg Üretim Sistemlerinin Şemaları (A) Dairesel, Karıştırmalı Havuz,<br>(B) Yarış Havuzu, (C) Yatay Tübüler Fotobiyoreaktör, (D) Tübüler<br>Fotobiyoreaktör, (E) Hava Karıştırmalı Kolon Fotobiyoreaktör,<br>(F) Düz Plaka Fotobiyoreaktör [25] ..... | 13 |
| Şekil 2.4  | Tüp Şeklindeki Fotobiyoreaktörlerin Şematik Gösterimi [38] .....                                                                                                                                                                                           | 17 |
| Şekil 3.1  | <i>Chlorella vulgaris</i> 'in Mikroskop Altındaki Görünümü (TUBA GENÇ) .....                                                                                                                                                                               | 32 |
| Şekil 3.2  | <i>Nannochloropsis oculata</i> 'nın Mikroskop Altındaki Görünümü (TUBA GENÇ) .....                                                                                                                                                                         | 33 |
| Şekil 3.3  | BBM Besi Ortamının Hazırlık Aşaması .....                                                                                                                                                                                                                  | 35 |
| Şekil 3.4  | F/2 Besi Ortamının Hazırlık Aşaması.....                                                                                                                                                                                                                   | 36 |
| Şekil 3.5  | İSTAÇ Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Detaylı Planı .....                                                                                                                                                                                        | 38 |
| Şekil 3.6  | (a)Odayeri DDT İBBAT Konumu, (b) Proses Akış Diyagramı, (c) Biyolojik<br>Atıksu Arıtma Tesisi Havalandırma Havuzu (d) Membran Filtrasyon<br>Üniteleri [71] .....                                                                                           | 41 |
| Şekil 3.7  | Çalışma Planı.....                                                                                                                                                                                                                                         | 44 |
| Şekil 3.8  | (a), (b) Mikroalglerin Hava Verilerek Manyetik Karışıtma Düzeneği<br>Üzerinde Geliştirilmesi (Deneme 1) .....                                                                                                                                              | 46 |
| Şekil 3.9  | (a), (b) Mikroalglerin CO <sub>2</sub> Verilerek Manyetik Karışıtma Düzeneği<br>Üzerinde Geliştirilmesi (Deneme 1) .....                                                                                                                                   | 48 |
| Şekil 3.10 | (a), (b) Biyoreaktörlerde Farklı Besi Ortamlarında Mikroalg Geliştirilmesi<br>(Deneme 2).....                                                                                                                                                              | 50 |
| Şekil 3.11 | (a), (b) Biyoreaktörlerde Hava ve CO <sub>2</sub> Beslemesi İle <i>C. vulgaris</i><br>Geliştirilmesi (Deneme 2) .....                                                                                                                                      | 51 |
| Şekil 3.12 | (a), (b) Hacimli Kaplarda Hava ve CO <sub>2</sub> Karışımı Beslemesi İle Mikroalg<br>Üretimi (Deneme 3).....                                                                                                                                               | 53 |
| Şekil 3.13 | (a) Optik Yoğunluğun Ölçülmesi İçin Numunenin Hazırlanması,<br>(b) 6600 UV-VIS Spektrofotometre .....                                                                                                                                                      | 53 |
| Şekil 3.14 | Kuru Ağırlık Tayini; (a) Deney İçin Süzme Setinin Hazırlanması,<br>(b) (c) Süzme Sonrası Filtre Kağıdı, (d) Filtre Kağıtlarının Etüvde<br>Kurutulması, (e) Tartım .....                                                                                    | 55 |

|            |                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.15 | Klorofil-a Tayini (a)Deney için Süzme Setinin Hazırlanması, (b) Santrifüj İşlemi, (c) Santrifüj İşlemi Sonrası Oluşan Faz Ayrımı .....                                                                   | 56 |
| Şekil 3.16 | Becker Coulter Allegra X-12 Centrifuge Cihazı .....                                                                                                                                                      | 57 |
| Şekil 3.17 | <i>Chlorella vulgaris</i> Santrifüj İşlemi Öncesi ve Sonrası Görüntüsü.....                                                                                                                              | 58 |
| Şekil 3.18 | <i>Nannochloropsis oculata</i> Santrifüj İşlemi Öncesi ve Sonrası Görüntüsü .....                                                                                                                        | 58 |
| Şekil 3.19 | <i>Chlorella vulgaris</i> Santrifüj İşlemi Sonrası Kalan Katı Madde .....                                                                                                                                | 58 |
| Şekil 3.20 | <i>Nannochloropsis oculata</i> Santrifüj İşlemi Sonrası Kalan Katı Madde .....                                                                                                                           | 59 |
| Şekil 3.21 | BMP için Deney Setlerinin Hazırlanması .....                                                                                                                                                             | 61 |
| Şekil 3.22 | BMP için Deney Setlerinin Hazırlanması .....                                                                                                                                                             | 61 |
| Şekil 3.23 | Hazırlanan Deney Setleri (BMP Şişeleri) .....                                                                                                                                                            | 62 |
| Şekil 3.24 | (a)Shimadzu GC-2010 Plus Gaz Kromatografi Cihazı, (b) Biyogaz Ölçümü... ..                                                                                                                               | 62 |
| Şekil 3.25 | Yağ Analizi için Deney Numunelerinin Hazırlanması .....                                                                                                                                                  | 63 |
| Şekil 3.26 | Yağ Analizi Deneyi için Numunelerin Hazırlanması .....                                                                                                                                                   | 64 |
| Şekil 3.27 | Yağ Analizi Deney Numuneleri – Santrifüj İşlemi .....                                                                                                                                                    | 64 |
| Şekil 3.28 | (a), (b), (c) Yağ Ekstraksiyon İşlemi .....                                                                                                                                                              | 66 |
| Şekil 3.29 | MYH'lerin Hazırlık Aşaması (Eysel Atıksu ile Biyofilm Zenginleştirilmesi Çalışmaları) .....                                                                                                              | 67 |
| Şekil 3.30 | (a), (b), (c) Biyofilm Oluşumu 3 Hafta Sonunda Gözlenmiştir .....                                                                                                                                        | 69 |
| Şekil 3.31 | Mikroalgal Biyokütle ile Hazırlanmış Mikrobiyal Yakıt Hücreleri .....                                                                                                                                    | 70 |
| Şekil 3.32 | (a), (b) Elektrik Üretiminin Takip Edildiği Sistem .....                                                                                                                                                 | 71 |
| Şekil 4.1  | <i>Chlorella vulgaris</i> aşısı üretimi (a) OD, (b) KA Değerleri .....                                                                                                                                   | 75 |
| Şekil 4.2  | <i>Nannochloropsis oculata</i> aşısı üretimi (a) OD ve (b) KA Değerleri.....                                                                                                                             | 77 |
| Şekil 4.3  | Manyetik Karıştırma Düzenegi ile Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi Çalışma Planı (Deneme 1).....                                                                                                | 78 |
| Şekil 4.4  | (a) <i>N. oculata</i> için Zamana Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm), (b) <i>C. vulgaris</i> için Zaman Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm) .....                 | 78 |
| Şekil 4.5  | (a) <i>N. oculata</i> için Zamana Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m <sup>3</sup> ), (b) <i>C. vulgaris</i> için Zaman Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m <sup>3</sup> ) ..... | 79 |
| Şekil 4.6  | (a) <i>N. oculata</i> için Zamana Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L), (b) <i>C. vulgaris</i> için Zaman Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L) .....                         | 80 |
| Şekil 4.7  | Manyetik Karıştırma Düzenegi ile Farklı CO <sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi Çalışma Planı (Deneme 1).....                                                                                      | 82 |
| Şekil 4.8  | (a) <i>N. oculata</i> için Zamana Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm), (b) <i>C. vulgaris</i> için Zaman Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm) .....                 | 83 |
| Şekil 4.9  | (a) <i>N. oculata</i> için Zamana Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m <sup>3</sup> ), (b) <i>C. vulgaris</i> için Zaman Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m <sup>3</sup> ) ..... | 84 |
| Şekil 4.10 | (a) <i>N. oculata</i> için Zamana Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L), (b) <i>C. vulgaris</i> için Zaman Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L) .....                         | 85 |
| Şekil 4.11 | Biyoreaktörler ile Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi Çalışma Planı (Deneme 2) .....                                                                                                             | 88 |

|            |                                                                                                                                                                                                          |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.12 | (a) <i>N. oculata</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm), (b) <i>C. vulgaris</i> İçin Zaman Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm) .....                 | 89  |
| Şekil 4.13 | (a) <i>N. oculata</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L), (b) <i>C. vulgaris</i> İçin Zaman Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L) .....                         | 90  |
| Şekil 4.14 | (a) <i>N. oculata</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m <sup>3</sup> ), (b) <i>C. vulgaris</i> İçin Zaman Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m <sup>3</sup> ) ..... | 91  |
| Şekil 4.15 | (a) <i>N. oculata</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Toplam N Değerleri (mg/L), (b) <i>C. vulgaris</i> İçin Zaman Bağlı Olarak Değişen Toplam N Değerleri (mg/L) .....                                 | 92  |
| Şekil 4.16 | (a) <i>N. oculata</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Toplam Fosfat Değerleri (mg/L), (b) <i>C. vulgaris</i> İçin Zaman Bağlı Olarak Değişen Fosfat Değerleri (mg/L) .....                              | 93  |
| Şekil 4.17 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Absorbans Değerlerinin Değişimi.....                                                                                                                         | 95  |
| Şekil 4.18 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Kuru Ağırlık Değerlerinin Değişimi .....                                                                                                                     | 96  |
| Şekil 4.19 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Giderimi .....                                                                                                               | 96  |
| Şekil 4.20 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> -P Giderimi .....                                                                                                              | 97  |
| Şekil 4.21 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde pH Değerlerinin Değişimi .....                                                                                                                               | 97  |
| Şekil 4.22 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Sıcaklık Değerlerinin Değişimi.....                                                                                                                          | 98  |
| Şekil 4.23 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Çözünmüş Oksijen Değerlerinin Değişimi.....                                                                                                                  | 98  |
| Şekil 4.24 | Hava ve CO <sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde İletkenlik Değerlerinin Değişimi .....                                                                                                                       | 99  |
| Şekil 4.25 | Mikroalg Üretimi (Deneme 3) Çalışma Planı .....                                                                                                                                                          | 100 |
| Şekil 4.26 | <i>C. vulgaris</i> için Zamana Bağlı Olarak Toplam Gaz Üretim Miktarları.....                                                                                                                            | 101 |
| Şekil 4.27 | <i>C. vulgaris</i> için Zamana Bağlı Olarak Toplam Gaz Üretim Miktarları.....                                                                                                                            | 102 |
| Şekil 4.28 | <i>C. vulgaris</i> ile Yapılan Çalışmaların Biyogaz Üretim Potansiyelleri.....                                                                                                                           | 103 |
| Şekil 4.29 | <i>N. oculata</i> ile Yapılan Çalışmaların Biyogaz Üretim Potansiyelleri.....                                                                                                                            | 103 |
| Şekil 4.30 | <i>C. vulgaris</i> ile Yapılan Çalışmaların Metan Gazı Üretim Potansiyelleri.....                                                                                                                        | 104 |
| Şekil 4.31 | <i>N. oculata</i> ile Yapılan Çalışmaların Metan Gazı Üretim Potansiyelleri.....                                                                                                                         | 104 |
| Şekil 4.32 | Mikroalg Beslemesi Sonucu MYH Güç Yoğunluğundaki Değişim .....                                                                                                                                           | 105 |
| Şekil 4.33 | Reaktör Alışma Evresi İle Mikroalg Beslemesi Esnasındaki Hücre Potansiyelindeki Değişim .....                                                                                                            | 106 |
| Şekil 5.1  | Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Örneği.....                                                                                                                                                            | 109 |
| Şekil 5.2  | Mikroalg Biyokütlenin Anaerobik Reaktörde Substrat Kaynağı Olarak Kullanılması Örneği.....                                                                                                               | 110 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|              | Sayfa                                                                                                                               |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çizelge 2.1  | Biyoyakıtlar ve Hammaddeleri [13] ..... 6                                                                                           |
| Çizelge 2.2  | Mikroalg Üretiminde Etkili Olan Faktörler [24] ..... 10                                                                             |
| Çizelge 2.3  | Açık ve Kapalı Mikroalg Üretim Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları 19                                                           |
| Çizelge 2.4  | Mikroalgler ve Diğer Biyodizel Hammaddeleri [19] ..... 25                                                                           |
| Çizelge 2.4  | Mikroalgler ve Diğer Biyodizel Hammaddeleri [19] (Devamı)..... 26                                                                   |
| Çizelge 2.5  | Çeşitli Mikroalgler ve Metan Verimleri [49] ..... 27                                                                                |
| Çizelge 3.1  | <i>Chlorella vulgaris</i> 'in Sistematığı [66] ..... 32                                                                             |
| Çizelge 3.2  | <i>Nannochloropsis oculata</i> 'nın Sistematığı [66] ..... 33                                                                       |
| Çizelge 3.3  | BBM Besi Ortamının İçeriği [68] ..... 33                                                                                            |
| Çizelge 3.4  | F/2 Besi Ortamının İçeriği [69]..... 36                                                                                             |
| Çizelge 3.5  | Arıtma Tesisi Çıkış Suyu Kalitesi [71] ..... 39                                                                                     |
| Çizelge 3.6  | Deney Setlerinde Kullanılan Besiyeri Bileşimleri ..... 60                                                                           |
| Çizelge 3.7  | BMP Deney Ortamları ..... 61                                                                                                        |
| Çizelge 3.8  | Ultrex CMI-7000 Membranının Teknik Özellikleri ..... 68                                                                             |
| Çizelge 4.1  | Kullanılan Süzüntü Sularının Karakterizasyonu ..... 73                                                                              |
| Çizelge 4.2  | <i>Chlorella vulgaris</i> Aşı Üretimi ..... 75                                                                                      |
| Çizelge 4.3  | <i>Nannochloropsis oculata</i> Aşı Üretimi ..... 76                                                                                 |
| Çizelge 4.4  | <i>N. oculata</i> ve <i>C. vulgaris</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Azot Değerleri..... 81                                     |
| Çizelge 4.5  | <i>N. oculata</i> ve <i>C. vulgaris</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Fosfat Değerleri ..... 82                                  |
| Çizelge 4.6  | <i>N. Oculata</i> ve <i>C. vulgaris</i> İçin Zamana ve CO <sub>2</sub> Besleme Oranına Bağlı Olarak Değişen Azot Değerleri..... 86  |
| Çizelge 4.7  | <i>N. oculata</i> ve <i>C. vulgaris</i> İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Fosfat Değerleri ..... 87                                  |
| Çizelge 4.8  | <i>N. oculata</i> ve <i>C. vulgaris</i> İçin Zamana ve CO <sub>2</sub> Besleme Oranına Bağlı Olarak Değişen Yağ Birikimleri..... 87 |
| Çizelge 4.9  | <i>N. oculata</i> ve <i>C. vulgaris</i> 'in Çalışma Sonundaki Yağ İçerikleri ..... 94                                               |
| Çizelge 4.10 | Kültürlerin yağ içerikleri (5 g için) ..... 106                                                                                     |

# TAM ÖLÇEKLİ ÇÖP SIZINTI SUYU ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNDA MİKROALG KÜLTÜRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ENERJİ ÜRETİM POTANSİYELLERİNİN BELİRLENMESİ

Tuba GENÇ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Son yıllarda mikroalgler üzerinde gerçekleştirilen teknolojik çalışmalar sonucunda mikroalglerin; gıda, ziraat, kozmetik gibi sektörlerde ve özellikle çevre mühendisliğinde kullanılabileceğini göstermiştir. Mikroalgler çevre mühendisliği açısından özellikle çevre kirliliğinin önlenmesi konusunda, biyoteknolojinin gelecekteki en önemli ve dikkat çeken kaynağı olarak görülmektedir.

Bu kapsamda alglerin; atıksu arıtımı, CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması ve çeşitli enerji kaynaklarına dönüştürülebilmesinin mümkün olduğunu göstermek amacı ile çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Ancak mikroalgler; yetiştirme zorluğu, üretim alanı sıkıntısı ve yüksek maliyet gibi sebeplerle ülkemizde çok fazla gelişim gösterememiştir.

İSTAÇ A.Ş. Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Tesisine kurulması planan mikroalg üretim tesisin laboratuvar çalışmalarının bir bölümü tez kapsamında tamamlanmıştır. Katı Atık Depolama Tesis Atıksu Arıtma Tesis süzüntü suyunda ilk olma niteliği taşıyan mikroalg geliştirme çalışmaları *Nannochloropsis oculata* ve *Chlorella vulgaris* ile gerçekleştirilmiştir ve çalışma sonunda; en iyi gelişme gösteren türün *C. vulgaris* olduğu tespit edilmiştir. Süzüntü suyundaki nütrientlerin mikroalg gelişimi için kullanılması

hedeflenerek yapılan alışamalar sonucunda; %50 Sentetik Atıksu (Mikroalg besiyeri)/ %50 Nanofiltrasyon ıkışı Sznt Suyu karışımı ile hazırlanan besi ortamlarındaki gelişimin, %100 Sentetik Atıksudaki gelişimine yakın olduğu gözlenmiştir. Çalışmaların devamında %50 Sentetik Atıksu/%50 Nanofiltrasyon Sznt Suyu ile hazırlanan besi ortamlarında *C. vulgaris* ve *N. oculata* retimleri gerçekleştirilmiştir. Mikroalgler hazırlanan besi yeri karışımlarında geliştirilirken CO<sub>2</sub> beslemesi yapıldığında 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesinin gelişimi olumlu yönde etkilediği biyokütle miktarını arttırdığı grlmştir.

Enerji çalışmalarında kullanılan mikroalg kültürleri hava ve CO<sub>2</sub> karışımı ile beslenerek üretilmiştir. alışmalar sonucunda üretilen algal biyokütleden biyometan, biyoelektrik ve yağ üretim potansiyelleri belirlenmiştir ve biyokütleden sırası ile biyoyağ, biyometan ve biyoelektrik üretimlerinin gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikroalg, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata*, CO<sub>2</sub> giderimi, Atıksu Arıtımı, evre Kirliliğinin nlenmesi, Yenilenebilir Enerji, Biyometan, Biyoelektrik, Biyoyağ

**ALGAL GROWN ON EFFLUENT OF A FULL-SCALE LANDFILL LEACHATE  
TREATMENT PLANT**

**AND  
ENERGY PRODUCTION POTENTIAL**

Tuba GENC

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Bestami OZKAYA

In recent years, technological studies which were conducted on microalgae showed that these types of microorganism can be used in food, agriculture, cosmetics and especially in environmental engineering. In terms of environmental engineering, particularly on the prevention of environmental pollution, microalgae are considered to be one of the most important and attracting microorganism sources for biotechnology.

In this context, many studies were performed to show the possibility of using algae for wastewater treatment, the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and a possible conversion to various energy sources.

However, there is not much advancement of the use of microalgae in Turkey due to many reasons such as the difficulty of their growth, the shortage of production area and high cost of their processes.

The present research investigated a lab scale planing and the installation of microalgae production facility in Istaç Odayeri solid waste landfill plant.

The microalgal species used in the study were *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris*. *C. vulgaris* was found to be the best growing species among both species studied.

The results showed that the growth in the nutrient medium prepared with mixed 50% Synthetic Wastewater (microalgae medium) and 50% Nanofiltration Output filtrate was almost similar to the growth in 100% synthetic wastewater.

It was also found that comparable, the addition of 15 mg/L CO<sub>2</sub> per day in the medium positively influenced the development of the microalgae.

The microalgae cultures investigated for the production of energy were prepared by feeding a mixture of air and CO<sub>2</sub>.

As a result, the produced algae biomass determined the biomethane, bioelectric and biooil production potential. It was obvious from the study that high biomethane, bioelectric and biooil were produced from the algae biomass.

**Keywords:** Microalgae, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata*, CO<sub>2</sub> removal, Wastewater Treatment, Prevention of Environmental Pollution, Renewable Energy, Bio methane, Bio electricity, Bio- oil.



#### 1.1 Literatür Özeti

Sanayi devrimi ile birlikte fosil yakıtların kullanımının artması atmosferdeki karbondioksit (CO<sub>2</sub>) seviyesinin yükselmesi, hızla artan küresel enerji ihtiyacı, enerji rezervlerinin giderek tükenmesi ve gün geçtikçe etkileri daha da fazla hissedilmeye başlanan küresel iklim değişikliği sorunu, günümüzde artan çevre duyarlılığıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır.

Ülkemizin 2009 yılında imzalamış olduğu Kyoto Protokolüne ve 2015 yılı içerisinde gerçekleşen, 2020 yılı itibari ile yürürlüğe girecek ve Kyoto Protokolünün yerini alacak olan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine göre taraf ülkelere sera gazı salınımlarını azaltmak, araştırma çalışmaları yapmak ve yeni teknolojiler geliştirirerek bunlar üzerinde işbirliği yapmak gibi “ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar” yüklemiştir [1], [2], [3], [4].

CO<sub>2</sub> salınımlarını kontrol altında tutabilmek için geliştirilen ve ticari olarak başlangıç aşamasında olan bu teknolojiler üzerinde çalışmalar devam etmekte ve pilot ölçekli olarak kurulan sistemlerle yüksek oranlarda CO<sub>2</sub> tutumu gerçekleştirilmektedir. Bu durumlar dünya gündeminde çok farklı disiplinleri bir araya getiren bir olgu halini almıştır ve “temiz kalkınma modelleri” üzerinde çalışılması konusunda teşvik etmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve Doğal Hayatı Koruma Vakfı (WWF)’nin verilerine göre son dönemlerde araştırmacılar; fosil yakıtlara alternatif olabilecek çeşitli biyoyakıtlar elde etmek, tarım alanları ve su kaynakları üzerindeki

baskıyı azaltmak için daha verimli ve gelişime açık bir yöntem olan mikroalgler üzerinde çalışmaktadır [5], [6].

Uygun su ortamında yetişebilen bir tür ilkel bitki olan mikroalgler yaşadıkları çevre ile etkileşim halindedir. Mikroalglerin gelişimini etkileyen en önemli parametreler; ışık, sıcaklık, besinler, ortamın tuzluluğu ve pH olarak sıralanabilir.

Mikroalglerin fotosentezini, hücresel aktivitesini ve hücre bileşimini etkileyen bu parametrelerin (ışık, sıcaklık,..) literatürde belirtilen optimum değerlerde tutulması mikroalg üretiminin de en iyi verimde gerçekleşmesini sağlar [7].

Farklı kullanım alanları için geliştirilen mikroalgler, klasik tarım bitkilerinin yetiştirilme tekniğinden farklı ve daha pahalı tekniklerle üretilmektedir [8]. Mikroalg yetiştirme sistemleri açık sistemler (açık havuzlar) ve kapalı sistemler (fotobiyoreaktörler) olarak iki başlıkta incelenmektedir. Bu sistemlerin tercih edilmesinde; açık sistemlerde iklim koşulları ve kapalı sistemlerde ise maliyet unsuru önemli rol oynamaktadır [9].

Açık ve kapalı sistemler kullanılarak yetiştirilen mikroalglerden; kuru mikroalgal kütlenin elde edilebilmesi için hasat edilerek kültürlerinden suyun uzaklaştırılması sağlanır. Mikroalg hasadını, toptan hasat (kitle hasadı, bulk harvesting) ve yoğunlaştırma veya kıvamlaştırma (thickening) olmak üzere iki temel aşamada ele almak mümkündür.

Hasat edilen mikroalg biyokütlesinden, fosil yakıtlara alternatif olabilecek çeşitli biyoyakıtlar elde etmek mümkündür. Bu enerji dönüşüm prosesleri genel olarak; termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm prosesleri olarak sınıflandırılabilir [10], [11].

## **1.2 Tezin Amacı**

Mikroalg yetiştiriciliği ile baca gazı kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımı azaltımı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Mikroalgler doğadaki azot ve fosfor gibi kirleticileri atıksu arıtımı yoluyla giderme avantajı da sağlamaktadır. Mikroalgal biyokütleler aynı zamanda sahip oldukları enerji potansiyelleri ile de biyodizel ve etanol gibi biyoyakıtlara alternatif yakıt olarak önerilmektedir.

Bu çalışmada mikroalglerin gelişimi için gerekli olan besin maddelerinin, katı atık sızıntı suyu arıtma tesisi çıkış suyundan sağlanarak hem süzüntü suyunda nutrient giderimi sağlanması hem de enerji kaynağı olarak kullanılabilecek en uygun mikroalg türünün

geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu tezin amacı, belirli besi ortamlarında üretilen mikroalglerden elde edilen algal biyokütleden enerji üretim potansiyellerinin belirlenmesidir.

### **1.3 Hipotez**

Son yıllarda mikroalgler üzerinde gerçekleştirilen teknolojik çalışmalar sonucunda mikroalglerin; gıda, ziraat, kozmetik gibi sektörlerde ve özellikle çevre mühendisliğinde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda mikroalgler, özellikle çevre kirliliğinin önlenmesi konusunda, biyoteknolojinin gelecekteki en önemli ve dikkat çeken kaynağı olarak görülmektedir.

Algler; yetiştirme zorluğu, üretim alanı sıkıntısı, yüksek maliyet ve araştırma geliştirme çalışmalarının yetersizliği gibi sebeplerle ülkemizde çok fazla gelişim gösterememiştir.

Bu kapsamda alglerin; atıksu arıtımı, CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması ve çeşitli enerji kaynaklarına dönüştürülebilmesinin mümkün olduğunu göstermek amacı ile yapılan çalışmalar bu tezin hipotezini oluşturmaktadır.

### LİTERATÜR BİLGİLERİ

#### 2.1 Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle Enerjisi

Sanayi devrimi ile birlikte fosil yakıtların kullanımının artması atmosferdeki karbondioksit seviyesinin yükselmesi, hızla artan küresel enerji ihtiyacı, enerji rezervlerinin giderek tükenmesi, gün geçtikçe etkileri daha da fazla hissedilmeye başlanan küresel iklim değişikliği sorunu ve günümüzde artan çevre duyarlılığıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır.

Kyoto Protokolü Ek-A bölümünde atmosferdeki altı sera gazı; Karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), Metan ( $\text{CH}_4$ ), Nitroz Oksit ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Hidroflorür karbonlar (HFCs), Perfloro karbonlar (PFCs), Sülfürhekza florid ( $\text{SF}_6$ )'dir. Bu gazlar; enerji faaliyetleri, endüstriyel işlemler, tarım, atık bertarafı gibi işlemler sonucunda oluşmaktadır [1],[2], [3].

Sera etkisini destekleyen ve ısı tutma kapasitesi çok yüksek olan bu gazların miktarındaki artış, atmosferin ısısının yükselmesine sebep olmaktadır. Küresel ısınma olarak ifade edilen bu durum; mevsimlerin özelliklerinin değişmesi, buzulların erimesi ve okyanusların yükselmesi gibi ciddi sonuçlar doğuracak değişimlere yol açmaya başlamıştır [1], [2].

Dünya ülkelerince imzalanan protokollerle  $\text{CO}_2$  salınımları kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır.

$\text{CO}_2$  salınımlarını kontrol altında tutabilmek için geliştirilen, ticari olarak başlangıç aşamasında olan bu teknolojiler üzerinde çalışmalar devam etmekte ve pilot ölçekte kurulan sistemlerle yüksek oranlarda  $\text{CO}_2$  tutumu gerçekleştirilmektedir. Bu durumlar

dünya gündeminde çok farklı disiplinleri bir araya getiren bir olgu halini almıştır ve “temiz kalkınma modelleri” üzerinde çalışılması konusunda teşvik etmiştir.

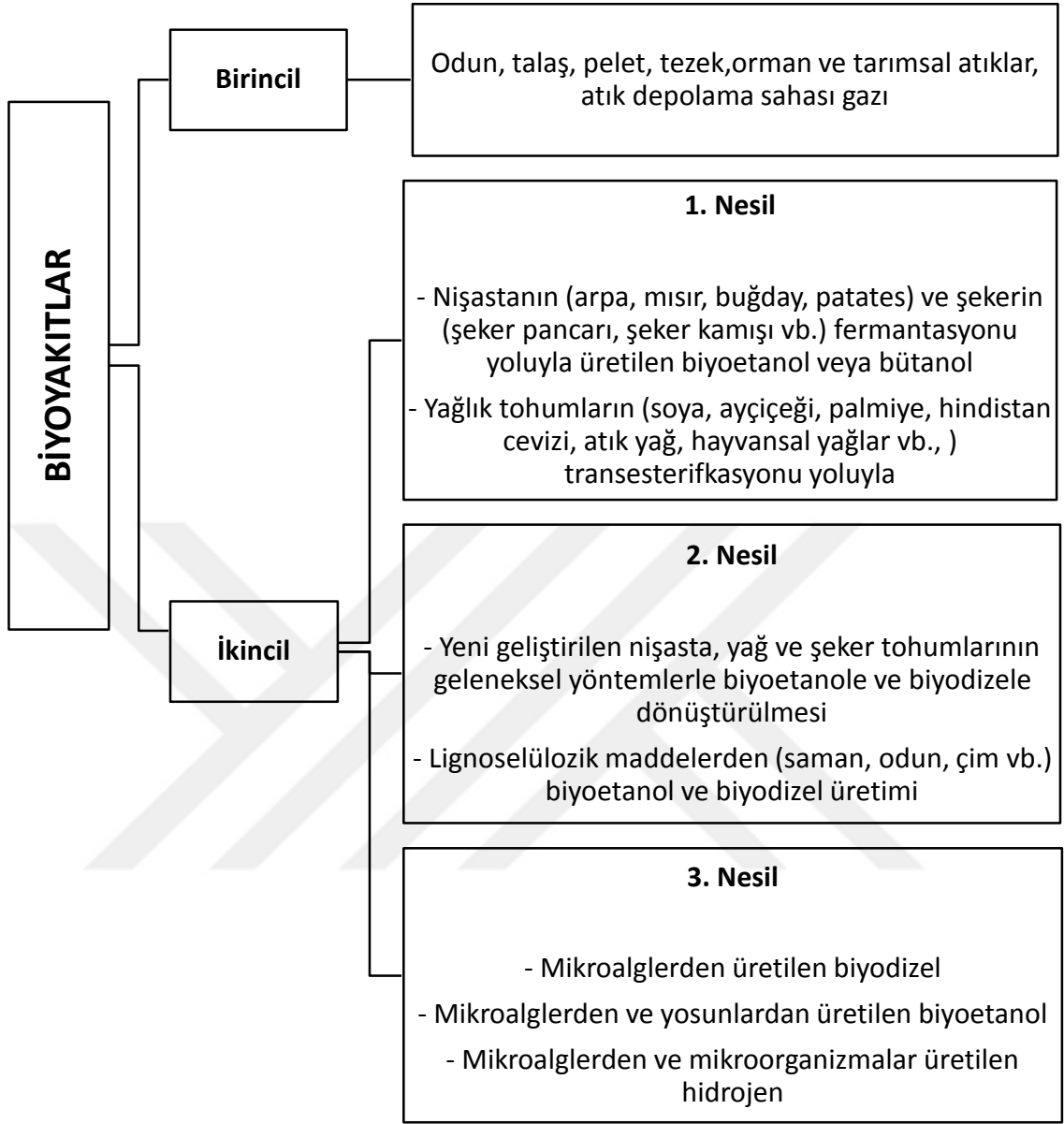
Bu kapsamda yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyokütle enerjisi önem kazanmıştır.

Fosil yakıtların kullanımı sonucunda atmosfere karbon salınmaktadır. Biyokütle enerjisi, bu karbonu kaynağına yani biyokütle hapsederek küresel karbon dengesini yeniden kurma olanağı sağlamaktadır. Bu da biyokütle enerjisini, diğer yenilenebilir enerji kaynaklara göre daha çevreci bir seçenek yapmaktadır. Bu sebeple her geçen yıl gelişim göstermektedir. Biyokütle enerjisine olan artan ilgiyi yenilenebilir enerji kaynakları konusundaki akademik çalışmaların %50’ye yakınının sadece biyokütle enerjisi üzerine olması açıkça göstermektedir [12].

Çizelge 2.1’de biyoyakıtlar ve bazı hammadde kaynakları verilmiştir. Şeker kamışı, kanola, soya ve ayçiçeği gibi enerji bitkilerden biyodizel ve etanol üreterek geleneksel fosil yakıtlara alternatif bir yakıt oluşturacağı düşünülmüştür. Birinci nesil biyokütle enerji kaynağı sınıflandırılan tarımsal enerji kaynakları, tarımsal alanın kullanılması sonucu küresel gıda kaynaklarını ve uzun vadede tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini etkileyerek; kıtlığa, gıda ürünlerinde fiyat artışına, erozyona, biyolojik çeşitlilik kaybına ve aşırı gübre ve ilaç kullanımından dolayı yer üstü ve yer altı sularının kirlenmesine neden olacağı tahmin edilmektedir.

Tüm bu veriler ışığında, araştırmacılar tarım alanları ve su kaynakları üzerinde daha az baskı oluşturan, daha verimli ve gelişime açık bir yöntem olan mikroalgler üzerinde çalışmaktadır.

Çizelge 2.1 Biyoyakıtlar ve Hammaddeleri [13]



## 2.2 Üçüncü Nesil Biyoyakıt Olarak Mikroalgler

Algler veya genel isimleriyle yosunlar, son yıllarda artan petrol fiyatlarının da etkisiyle hızlanan biyokütle enerjisi araştırmaları sonucu, umut vadeden bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Mikroalgler üzerinde son yıllarda gerçekleştirilen teknolojik çalışmalar bu grubun gıda, ziraat, kozmetik ve özellikle çevre alanlarında kullanılabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda mikroalgler, özellikle çevre kirliliğinin önlenmesi konusunda, biyoteknolojinin gelecekteki en önemli ve dikkat çeken kaynağı olarak görülmektedir [13].

Üçüncü nesil biyoyakıt teknolojisi olarak da adlandırılan ve doğada yer alan birçok alg türünü enerji kaynağı olarak kullanmayı hedefleyen çalışmalar, laboratuvar araştırmaları, pilot ve küçük ölçekli denemelerde başarılı olmuştur.

Biyoyakıt hammaddesi olarak mikroalgler; aşağıdaki bazı özellikleri nedeniyle şu an en gözde seçenekler arasında bulunmaktadır.

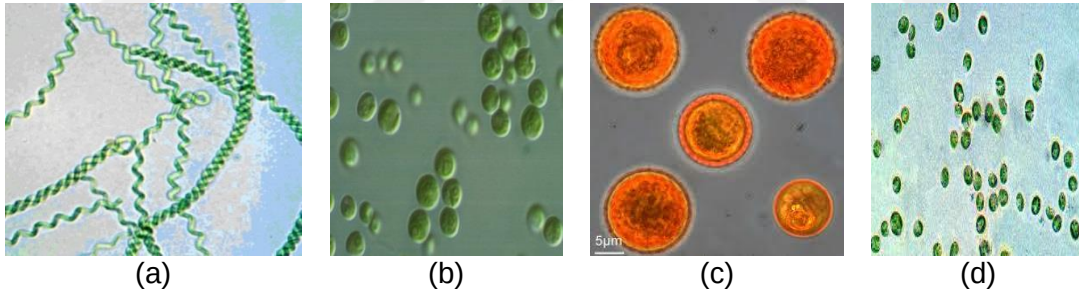
- ❖ Atmosferdeki gereğinden fazla karbondioksiti fotosentez yoluyla verimli ürüne dönüştürerek, küresel ısınmanın önlenmesine katkıda bulunma potansiyeline sahiptirler. Gaz emisyonlarını azaltma konusunda ciddi katkıları bulunan mikroalgler rakipsiz bir enerji alternatifi olarak görülmektedirler [14]. 1 kg mikroalg biyokütlesi ortalama olarak 1,83 kg CO<sub>2</sub> tutabilmektedir [8]. Bu nedenlerle CO<sub>2</sub> azaltımı için biyolojik bir yöntem olarak görülmektedir [15].
- ❖ Mikroalgler türüne göre değişmekle beraber 24 saat gibi kısa sürede biyokütlelerini ikiye katlayabilmeleridir [8].
- ❖ Toprakta yetişen bitkilerin güneş enerjisini biyokütleye dönüştürme verimleri genel olarak %1'den azdır. Bu oran mikroalglerde daha yüksektir ve mikroalgler güneş enerjisinin %2-4'ünü biyokütleye dönüştürebilmektedir [16].
- ❖ Geçerli biyoyakıt üretim yöntemleri, karasal yakıt ürünlerine göre artan miktarda arazi alanlarına ihtiyaç duymaktadır. Tarımsal amaçlı, kullanılmayan arazilerde alg üretim tesisleri kurularak tarımsal üretim de engellenmemektedir [17]. Ayrıca geniş alan ihtiyacı olmayan alg üretim prosesleride mevcuttur.
- ❖ Üretimi sırasında içme suyu kaynakları üzerinde karasal enerji bitkileri gibi büyük bir tehlike oluşturmayan mikroalgler, doğadaki azot ve fosfor gibi kirleticileri atık su arıtımı yoluyla giderme avantajı da sağlamaktadır [17].
- ❖ Mikroalgler; karbonhidrat, protein, lipid ve vitamin içeren mikroorganizmalardır. Genel olarak (türe göre değişmekle birlikte) mikroalgler yaklaşık %15-77 gibi yüksek oranda yağ içerebilmektedir.
- ❖ Diğer yağ bitkilerine kıyaslandığında yüksek oranda yağ içermeleri ve çok hızlı çoğalma özelliğine sahip olmaları mikroalgleri enerji (biyodizel ve biyogaz) üretimi için önemli kılmaktadır.

### 2.3 Mikroalglerin Biyoteknolojisi ve Yetiştiriciliği

Algler, makroalgler (su yosunları) ve mikroalgler olarak iki sınıfa ayrılan damarsız canlılardır [18]. Mikroalgler tek hücreli veya basit çok hücreli yapıları sayesinde, hızlı büyüeyen ve farklı şartlar altında yaşayabilen, prokaryotik veya ökaryotik mikroorganizmalardır [19].

Mikroalgler birkaç mikrondan 100 mikrona kadar çeşitli büyüklüklerde olup, mikroskop yardımıyla görülebilirler. Mikroalgler tipik olarak havuzlarda, göllerde, okyanuslarda ve nemin uygun olduğu her yerde büyüeyebilmektedir [18].

Mikroalgler bitkilerin en ilkel halidir. Biyologlar; mikroalgleri, esasen pigmentasyonuna (renklenme), yaşam çevrimine ve temel hücre yapısına göre ayırarak çeşitli sınıflara ayırmaktadır [20]. Birçok aileye, sınıfa, takıma ve cinse ait on binlerce mikroalg türü tanımlanmıştır. Mikroalg türleri, büyük bitki türlerinden sayıca daha fazladır. Bunlardan yeşil algler, diatomlar ve siyanobakteriler en önemlileridir. Yeşil algler ve diatomlar ökaryot, siyanobakteriler prokaryotturlar [19]. Şekil 2.1’de ticari olarak kullanılan bazı mikroalgere ait mikroskop görüntüleri verilmiştir.



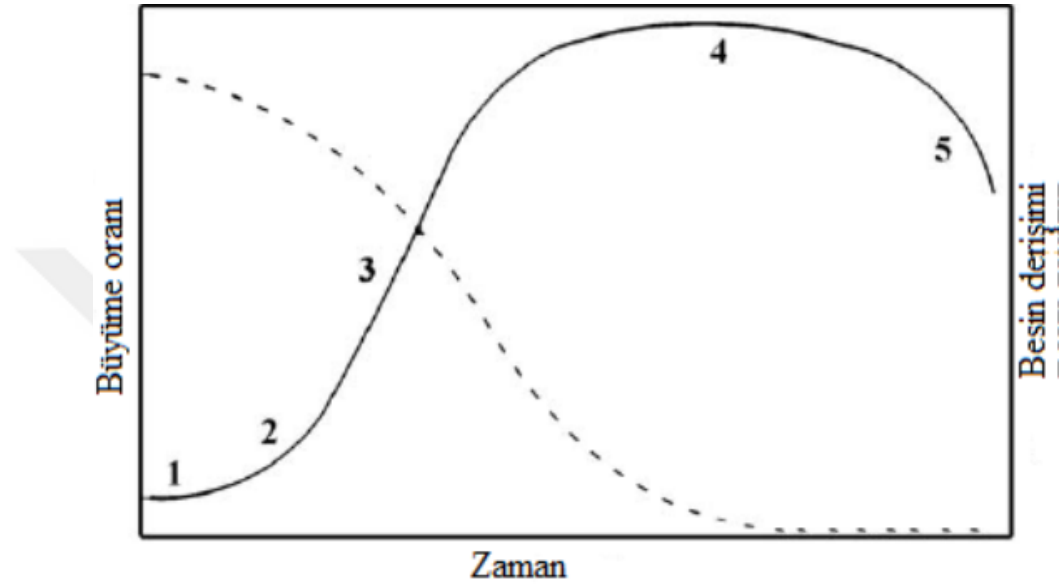
Şekil 2.1 Ticari Olarak Yetiştirilen Bazı Mikroalg Türleri (a) *Spirulina spp.*, (b) *Chlorella vulgaris*, (c) *Dunaliella salina*, (d) *Nannochloropsis spp.* [18]

Algler; fototropik, heterotropik ve mikstotropik büyüme teknikleri ile geliştirilebilir. Heterotropik büyüme, ışık yerine organik karbonun hücresel tüketimidir. Mikstotropik büyüme enerji kaynaklarının (ışık ve organik karbon) birlikte kullanımındır [21].

Mikroalglerin fototropik teknik ile geliştirilmesinde; ışık enerjisi kullanılarak CO<sub>2</sub>, hidrokarbonlara (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) sabitlenecek ve oksijen (O<sub>2</sub>) açığa çıkacaktır (Denklem 2.1).



Şekil 2.2’de besi ortamında mikroalg büyüme eğrisi ve besin miktarının zamanla değişimi verilmektedir. Şekilde beş ayrı büyüme evresi görülmektedir: (1) gecikme (lag) evresi; (2) özel koşullar altında en yüksek büyüme oranını ifade eden üstel (eksponansiyel) büyüme evresi; (3) doğrusal büyüme evresi; (4) sabit büyüme evresi; (5) ölüm evresi. Genel olarak üstel büyüme evresindeki mikroalg kültürleri daha çok protein içerirken, sabit evrede daha çok karbonhidratlar ve glikojen bulunmaktadır [19].



Şekil 2.2 Küme Kültüründe Mikroalg Büyüme Oranlarının (Düz Çizgi) ve Besin Derişimlerinin (Kesikli Çizgi) Şematik Gösterimi [19]

Türlerine göre değişmekle birlikte mikroalgler 24 saat içinde biyokütlelerini ikiye katlayabilmektedirler. Üstel büyüme sırasında bu süre 3,5 saate inmektedir. 1 ton mikroalg biyokütlesi kabaca 1,83 ton karbondioksit bağlayabilmektedir. [8].

Sucul sistemlerin ilk biyolojik CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> dönüştürücü olarak görev yapan canlıları mikroalglerdir [22], [23].

#### 2.4 Mikroalglerin Büyüme Gereksinimleri

Mikroalgler yaşadıkları çevre ile etkileşim halindedir. Mikroalgleri etkileyen en önemli parametreler arasında ışık, sıcaklık, besinler, ortamın tuzluluğu ve pH sıralanabilir. Mikroalglerin üretiminde en iyi verim için bu parametrelerin istenilen seviyelerde tutulması gerekmektedir (Çizelge 2.2). Bu parametreler fotosentezi ve hücresel aktiviteyi, hücre bileşimini etkilemektedir [24].

Çizelge 2.2 Mikroalg Üretiminde Etkili Olan Faktörler [24]

| Parametre                                                                        | Değerler     | Optimum Değerler                               |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------|
| Sıcaklık (°C)                                                                    | 16-27        | 18-24                                          |
| Tuzluluk                                                                         | 12-24        | 20-40                                          |
| Işık Yoğunluğu (Lux)<br>(Işık yoğunluğu hacim ve ortam<br>yoğunluğuna bağlıdır.) | 1,000-10,000 | 2,500-5,000                                    |
| Fotoperiyot (Aydınlık/Karanlık, Saat)                                            | 16/8<br>24/0 | (Min. Aydınlık, Saat)<br>(Min. Karanlık, Saat) |
| pH                                                                               | 7-9          | 8.2-8.7                                        |

#### 2.4.1 pH

Belli bir pH aralığında üreyebilen birçok alg türü için ideal pH 7-9 aralığındadır. Kültür için uygun pH'nın sağlanamaması durumunda özellikle çok yoğun kültür ortamlarında, hücreler parçalanır, içerik ortama geçer ve kültürün ölümüne yol açabilen bir durum ortaya çıkabilmektedir. ve asit/baz ilaveleri ile düzeltilebilir. Çok yoğun kültürlerde, zamanla pH artışı meydana gelmektedir. Bu durumda, pH dengesi sağlanana kadar belirli miktarlarda eklenecek CO<sub>2</sub> ile veya kültürün havalandırılması ile uygun aralıkta tutulabilir [25].

#### 2.4.2 Sıcaklık

Farklı sıcaklık aralıklarında yaşayabilmelerine rağmen, algal biyokütlenin biyokimyasal kompozisyonunu ve kültür ortamdaki biyokimyasal reaksiyonları doğrudan etkilediği için sıcaklık önemli bir çevresel faktördür. Herbir mikroalg türünün gelişimi için optimum yaşama sıcaklığına dikkat edilmelidir. Üretimlerde mikroalglerin 16-27°C arasındaki sıcaklığa uyum sağlayabildiği ve özellikle yapılan çalışmalar sonucunda da; 16°C'den düşük sıcaklıkların üremeyi yavaşlattığı, 35°C'den yüksek sıcaklıkların genellikle öldürücü etki yaptığı görülmüştür [26].

Açık sistemlerde mikroalg üretimi sırasında kontrol edilmesi gereken önemli bir parametredir. Ani ve günlük sıcaklık değişimlerinin üretim verimine olumsuz etkileri olduğu görülmüştür. Sıcaklık artışı buharlaşmaya ve kültür kaybına da neden olabilmektedir. Ayrıca ortamdaki düşük nem miktarıda buharlaşma üzerinde etkilidir ve ortam sıcaklığını düşürebilmektedir [27].

### 2.4.3 Işık

Algler etkin olarak fotosentez yapmaları nedeni ile ışık en önemli ve kontrol edilmesi gereken bir parametredir denilebilir. Işık yoğunluğunun azalması hücrelerdeki klorofil-a ve ışığı tutan diğer pigmentlerin (klorofil b, klorofil c, fikobiliproteinler..) artmasına neden olmaktadır. Işık yoğunluğunun artmasında ise klorofil a ve diğer pigmentler azaldığından fotosentez miktarının azalmasına neden olurken ikincil karotenoidler olan zeaksantin,  $\beta$ -karoten, astaksantin artarlar ve fotokoruyucu ajanlar olarak görev yaparlar. Karotenoidlerin birikmesi türlerin yapısına göre değişmektedir [24].

Işık, fotosentezin gerçekleşmesinde rol oynayan mikroalg fotosistemlerinin antenleri ile yakalanmaktadır. Antenlerin yapısında pigmentler ve proteinler görev alan antenler fotonları tutarak enerji reaksiyon merkezlerine göndermektedirler. Hücrelerin ortamdaki farklı ışık yoğunluklarına adapte olabilmeleri için fotosistem sayıları veya anten boyutları değişim gösterebilmektedir [28].

Laboratuvar ortamında aydınlatma için maliyeti yüksek olabilen, farklı tipteki floresan lambalar kullanılmaktadır ve bu lambaların verdiği ışık şiddeti farklılık göstermektedir. Özellikle kullanılan ışık kaynağının ortamı ısıtmamasına dikkat edilmelidir [26].

### 2.4.4 Tuzluluk

Deniz alglerinin tuzluluk değişimine olan toleransları iyidir. Pek çok tür, doğal ortamdaki tuzluluğa göre daha düşük tuzlulukta iyi bir büyüme gösterir ve minimum %12-44 ppt, optimum %20-24 ppt tuzlulukta yaşabilmektedirler. Örneğin; *Tetraselmis suecica* 25-35 ppt tuzlulukta yaşarken, *Spirulina platensis* %1 tuzlulukta gelişme gösterir [28].

#### 2.4.5 Besi Ortamı

Mikroalg kültürlerinin temel besini; kültürlerin büyümesini etkileyen ana besin olan azot ve yapısal ve fonksiyonel göreve sahip olan fosfordur. Mikroalgler genellikle kültür ortamlarında bulunan farklı azot kaynaklarından nitrat (suda çözüldükten sonra algler tarafından alınabilmektedir.), amonyak (Algler tarafından ilk olarak tüketilir.) veya organik kaynaklı üre kullanılmaktadır. Bu azot kaynaklarından özellikle amonyum tüketimi ile birlikte ortam pH'sı düşmektedir, nitratın geç tüketilmesiyle veya tüketilmemesiyle de pH artmaktadır. Bu nedenle ortama amonyum nitrat ilave edilirken dikkat edilmelidir. Maliyeti düşürürken aynı zamanda ortamda bulunan bakterilerinde gelişimine neden olan ürenin kullanımından da kaçınılmalıdır. Bu duruma dikkat edilmemesi durumunda bakteriler, alg kültürüne göre daha hızlı gelişim gösterebilmekte ve alg kültürünün gelişimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. [26], [27], [29].

Fosfor, besi ortamında fosfor tuzları ( $K_2HPO_4$ ,  $KH_2PO_4$ ,  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ ,  $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $NaH_2PO_4 \cdot 7H_2O$ ) şeklinde bulunmaktadır ve ana makrobesleyici olarak hücresel metabolik ürünler ile mikroalglerin büyümesinde, gelişmesinde bazı yapısal, fonksiyonel göreve sahiptir. Ortamdaki bu tuzlar fosfor kaynağı olarak ve pH dengesinin (tampon özelliğinden yararlanılarak) sağlanması amacı ile de kullanılmaktadır [26], [27].

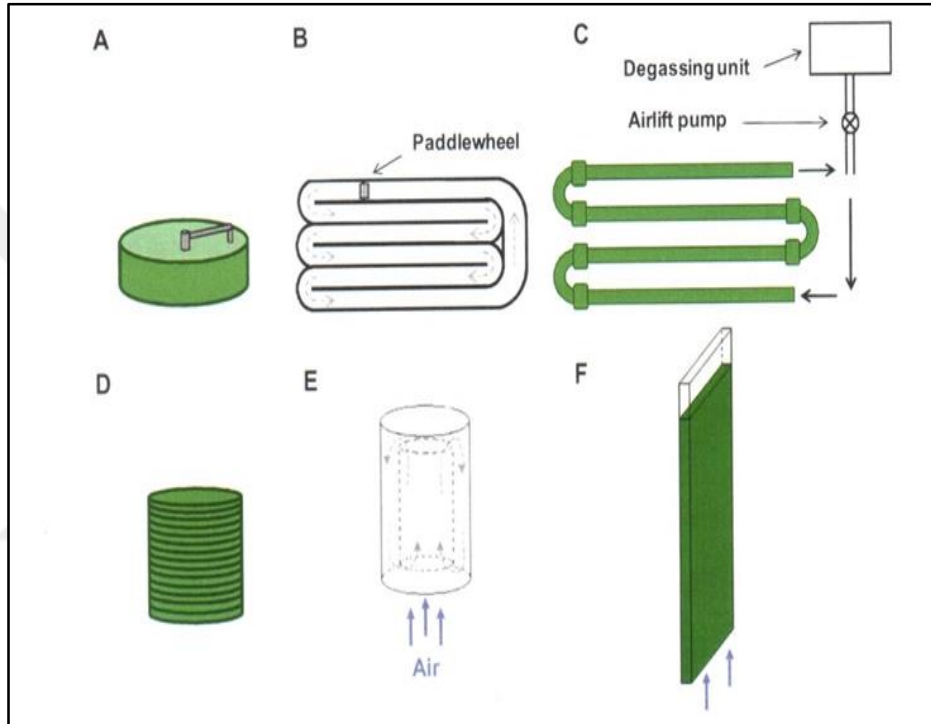
Kükürt, potasyum, magnezyum, demir, çinko, kalsiyum, molibden, kobalt, selenyum ve nikel az miktarda veya eser miktarda gereken besinlerdendir. Klorofil üretiminde de etkili olan demir iz elementtir ve mikroalgler için çok az miktarda gereklidir.

#### 2.4.6 Havalandırma/Karıştırma

Karıştırma, mikroalg kültürlerinde, sıcaklık, ışık gibi parametrelerin ortamda eşit uygulanması gereken önemli bir parametredir. Karıştırma ile alglerin çökmesi önlenir. Ortamdaki hücrelerin homojen olarak dağılım göstermesini sağlar ve böylece popülasyon da ki tüm hücrelerin, ışık ve besin maddelerinden eşit oranda faydalanması sağlanır, muhtemel ısı tabakalar önlenir, kültür ortamı ve hava arasındaki gaz transferinin düzeni sağlanır. Karıştırma, kültür sisteminin ölçeğine ve çalışma şartlarına bağlı olarak, günlük olarak elle (erlenler için), havalandırma ile (tanklar için), çarklı pedallar ve pompalar (havuzlar için) ile gerçekleştirilir [25].

## 2.5 Mikroalg Üretim Teknolojileri

Farklı kullanım alanları için geliştirilen mikroalgler, klasik tarım bitkilerinin yetiştirilme tekniğinden farklı ve daha pahalı tekniklerle üretilmektedir [8]. Genel olarak mikroalg yetiştirme sistemleri açık sistemler (açık havuzlar) ve kapalı sistemler (fotobiyoreaktörler) olarak iki başlıkta incelenmektedir. Bu sistemlerin tercih edilmesinde; açık sistemlerde iklim koşulları, kapalı sistemlerde ise maliyet unsuru önemli rol oynamaktadır [9], (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Tipik Alg Üretim Sistemlerinin Şemaları. (A) Dairesel, Karıştırılmalı Havuz, (B) Yarış Havuzu, (C) Yatay Tübler Fotobiyoreaktör, (D) Tübler Fotobiyoreaktör, (E) Hava Karıştırılmalı Kolon Fotobiyoreaktör, (F) Düz Plaka Fotobiyoreaktör [25]

### 2.5.1 Açık Sistemler

Temel mikroalg yetiştirme tekniğidir. Özellikle ticari amaçla kullanılan mikroalg biyokütlesinin %98'inden fazlasının üretimi açık havuzlarda gerçekleşmektedir [30]. Açık sistemler, mikroalglerin doğal yaşamlarına benzer bir ortamdır. Açık sistemin çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Açık sistemlerin başlangıç ve işletme maliyetlerinin düşük olması en önemli avantajıdır.

Açık sistemlerin dezavantajları:

- ❖ Açık havuz yetiştiriciliğinde sistem kontrolü zayıflığı,
- ❖ Sisteme olan hakimiyetin yetersizliği, istenilen miktarda mikroalgin üretilmemesi ve istenmeyen türlerin çoğalması,
- ❖ Tek kültür yetiştirmek, uç değerlere sahip kültür ortamının korunmasıyla mümkün olmaması,
- ❖ Hücrelerin ışıktan faydalanmalarının düşük olması, buharlaşma kayıpları,
- ❖ CO<sub>2</sub>'nin atmosfere yayılması,
- ❖ Geniş arazi gereksinimleri [31],
- ❖ Biyokütle veriminin düşük olması,
- ❖ Yetiştirilen mikroalgin en uygun büyüme şartlarını sağlamak, iyi bir verim için gereklidir. Fakat mikroalgin büyümesine etki eden faktörleri kontrol etmek, açık sistemlerde tam olarak başarıl原因aması,
- ❖ Sıcaklık ve ışık etmenlerinin tam yönetilememesi ve yetersiz karıştırma mekanizmaları, düşük biyokütle verimliliğine yol açması [25],

şeklinde sıralanabilir.

Farklı açık sistem mikroalg yetiştirme teknikleri mevcuttur.

Her tekniğin birbirlerine göre verim, maliyet, sürdürülebilirlik gibi üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır. Açık havuz sistemleri karıştırmasız, dairesel ve su kanallı havuzlar olmak üzere 3 kategoride incelenebilir.

#### **2.5.1.1 Karıştırmasız Havuzlar**

Bu tip havuzlarda CO<sub>2</sub> temini verimli bir şekilde sağlanamaz ve kontrolü zordur [32].

#### **2.5.1.2 Dairesel Havuzlar**

Dairesel havuzlar, ticari alg üretiminde kullanılan ilk tasarımlardır. Merkezi pivot karıştırıcının kullanışsız hale gelmesinden ötürü dairesel havuzlar 1000 m<sup>2</sup>'nin üzerinde inşa edilmemektedir. Bu sistemler büyük ölçekli üretim için uygun değildir [32].

### 2.5.1.3 Su Kanallı Havuzlar

Su kanallı havuzlar genellikle derinliği 30 cm olan kapalı çevrim kanallarından yapılmıştır ve bir çark ile sağlanır.

Kültürün çökmesini engellemek için sürekli çalıştırılan bir çarkın bulunduğu kanallar betondan, plastik malzemeden veya sıkıştırılmış topraktan yapılır [33].

En yaygın kullanılan açık sistem türüdür. Su kanallı havuzlar tek olarak veya birkaçının seri bağlandığı şekilde işletilebilir.

### 2.5.2 Kapalı Sistemler

Kapalı sistemler diğer bir ismiyle fotobiyoreaktör mikroalglerin fotosentez ile yetiştirildiği sistemlerdir.

Fotobiyoreaktörler mikroalg kültürleri için korumalı, çevreden ayrı bir ortamdır. Fotobiyoreaktörlerin açık sistemlere karşı avantajları:

- ❖ Sistem şartlarının kontrol edilebilmesi,
- ❖ Çevre koşullarına karşı yetiştirme ortamını koruması,
- ❖ Tek tür mikroalg kültürünün daha uzun süre var olmasını mümkün kılması,
- ❖ Daha yüksek fotosentetik verim,
- ❖ Biyokütle üretkenliği, daha iyi çevre kontrolü,
- ❖ Hasat veriminden dolayı yüksek verimlilik potansiyeli

şeklinde sıralanabilir [34].

Fotobiyoreaktörlerin açık sistemlere karşı dezavantajları:

- ❖ Fotosentez sonucu oluşan ürünlerden biri de oksijendir. Açık sistemlerde oluşan oksijen doğrudan atmosfere salınmakta iken fotobiyoreaktörler de çözünmüş oksijen seviyesinin düzenlenmesi mikroalg gelişimi için önemli bir unsurdur. Haddinden fazla çözünmüş oksijen fotosentezi engellemektedir [35]. Bu sebepten dolayı çözünmüş oksijenin bertarafı, fotobiyoreaktörlerde aşılması gereken bir problemdir. Bu durum fotobiyoreaktörlerin büyük ölçekte inşası için sorun oluşturması,

- ❖ Yetiştirme ortamı sıcaklığının belirli değerin üzerine çıkması verimi çok düşürmekte veya mikroalg gelişimini tamamen durdurabilmektedir. Bu durumun optimum koşullarda tutulabilmesi kapalı sistemlerde maliyeti arttırabilmesi,
- ❖ Fotobiyoreaktör sistemlerinde oluşan yüksek kesme gerilimi mikroalg hücrelerinin hasar görmesine neden olması,
- ❖ Fotosentez için gerçekleştirilen ışıklandırmada, güneş ışınlarına maruz kalan malzemelerde bozunma olması,

şeklinde sıralabilir [35], [36].

Fotobiyoreaktörler tasarımlarına ve çalışma şekillerine göre de sınıflandırılabilir. Çalışma şekline göre hava veya pompa karıştırmalı ve tek fazlı veya iki fazlı reaktörler olarak sınıflandırılabilir.

Tek fazlı reaktörlerde gaz değişimi ayrı bir gaz değiştiricisinde gerçekleşir. İki fazlı reaktörlerde gaz kütle transferi reaktörün kendisinde gerçekleşir. Kullanılan yapı malzemeleri de cam veya plastik ve sert veya esnek olmak üzere ayrı sınıflar yaratabilir [35], [36].

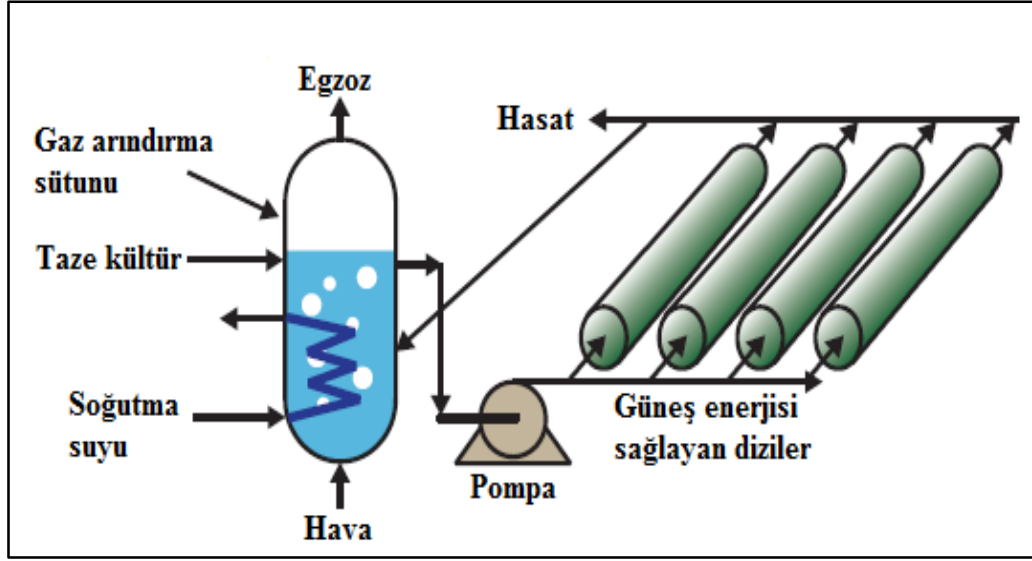
Reaktörler, geometrilerine göre tüp şeklinde, düz panel ve dikey sütun olarak da sınıflandırılabilir.

#### **2.5.2.1 Tüp Şeklinde Fotobiyoreaktörler**

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler değişik modellerde yapılmış saydam tüp dizileridir. Düz, kıvrık veya sarmal yapıda olabilen bu yapılar; yüksek biyokütle verimliliğini sağlamak için genellikle 10 cm veya daha düşük çaplı tüplerden oluşmaktadır [37].

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler dikey, yatay ve eğik dizilişlerde konumlandırılabilir. Tüp şeklindeki fotobiyoreaktör temel olarak; mikroalg gelişimi için güneş enerjisi sağlayan dizi, algleri süspansiyondan ayıran hasat ünitesi, gaz değişimi ve soğutma/ısıtma için gazdan arındırma kolonu ve sirkülasyon pompası gibi bileşenler içermektedir.

Tüp şeklinde fotobiyoreaktörler için şematik bir gösterim Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4 Tüp Şeklindeki Fotobiyoreaktörlerin Şematik Gösterimi [38]

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerin büyük ölçekli uygulamalarda kullanılması durumunda kütle transferi problem oluşturmaktadır [38]. Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler, önerilen fotobiyoreaktörler içerisinde açık hava mikroalg üretimi için en uygun tiplerdir [39]. Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerde karıştırma, kültür ortamının devridaimi ile sağlanır [37].

Optik yoğunluk ve gaz gidericilerin kapasitesine bağlı olarak, biyokütle üretimi yılda hektar başına yaklaşık 20 ile 60 ton arasındadır.

Yatay konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler dikey konumlu olanlara göre daha büyük yüzey alanı-hacim oranı sunmaktadır. Bunun sebebi yatay konumlandırmada tüp çapının azaltılmasının yapısal bütünlüğü bozmamasıdır.

#### 2.5.2.2 Düz Panel Fotobiyoreaktörler

Düz panel fotobiyoreaktörler, kısa ışık yolu olan ve aydınlatılan yüzey ile hacim oranının yüksek olduğu fotobiyoreaktörlerdir.

Tüp şeklindeki reaktörler için söz konusu olmayan, havalandırma sebebiyle yüksek gerilim oluşumunun hücrelere zarar vermesi düz panel fotobiyoreaktörler için bir zayıflık oluşturmaktadır [21].

Çeşitli mikroalg türlerinin seri üretimi için standart reaktör türü olabilecek düz panel fotobiyoreaktörler, fotosentetik mikroorganizmaların seri üretimi için de önemli avantajlar içermektedir.

Yüksek aydınlanma yüzey alanı sayesinde düz panel fotobiyoreaktörler, fotosentetik mikroorganizmaların yetiştirilmesinde bir hayli dikkat çekmektedir [40].

Güneş enerjisinden en üst düzeyde faydalanmak için düz panel fotobiyoreaktörlerde genellikle saydam malzemeler kullanılmaktadır. Yatay konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlere kıyasla çözünmüş oksijen birikimi daha azdır [39].

### **2.5.2.3 Dikey Sütun Fotobiyoreaktörler**

Hava taşımali ve kabarcik sütunu reaktörler dikey sütun reaktörlerin iki ana türüdür. Hava taşımali reaktörlerde, kültür ortamı, mekanik pompalama veya hareket eden parçalar olmadan dolaştırılmaktadır. Bu sayede kirlenme potansiyeli ve kesme kaynaklı hücre hasarları azalmaktadır [31], [41].

Dikey reaktörler, diğer reaktörlere göre daha az yer kaplar ve daha yüksek fotosentetik verimlilik sunarlar. Bununla birlikte ticari ölçekli uygulamalarda fotobiyoreaktör seçimi hususunda, dikey sütun fotobiyoreaktörler ölçeklenebilirlik zorluğuna en çok hassas olan fotobiyoreaktör tipidir [21].

Kapalı sistemler olarak değerlendirilen fotobiyoreaktörler, birim alandan daha yüksek verim elde edilmesi sebebiyle mikroalg eldesinin maliyetlerini aşağıya çekme potansiyeline sahiptir. Fakat ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması fotobiyoreaktörlerin zayıf noktasıdır. Bununla birlikte fotobiyoreaktörler genellikle laboratuvar ölçeğinde test edilen yetiştirme sistemleridir.

Çalışmalarda fotobiyoreaktörler ile mikroalg yetiştiriciliğinin enerji üretimi için ekonomik olarak uygun olmadığı belirtilmiştir [41].

Açık ve kapalı sistemlerin karşılaştırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Açık ve Kapalı Mikroalg Üretim Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

| ÜRETİM YÖNTEMİ          | AVANTAJLARI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | DEZAVANTAJLARI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Açık Sistemler</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• İşletme ve araştırma maliyeti düşüktür</li> <li>• Teknik olarak kurulumu basittir.</li> <li>• Temizleme ve bakım işlemleri kolaydır.</li> <li>• Ölçeklendirilmesi kolaydır.</li> </ul>                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistem kontrolü zayıftır.</li> <li>• Sisteme olan hakimiyet yetersiz olduğundan hedeflenen sonuçlara ulaşılması zordur.</li> <li>• Hücrelerin ışıktan faydalanmaları düşüktür.</li> <li>• Buharlaşmakayıpları mevcuttur.</li> <li>• CO<sub>2</sub> atmosfere yayılır.</li> <li>• Geniş arazi gereksinimi vardır.</li> <li>• Biyokütle verimi düşüktür.</li> </ul> |
| <b>Kapalı Sistemler</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikroalg kültürleri için korumalı bir ortamdır.</li> <li>• Kirlenmelere karşı yetiştirme ortamı korunabilir.</li> <li>• Tek tür mikroalg kültürünün daha uzun süre var olması mümkündür.</li> <li>• Yüksek fotosentetik verim, biyokütle üretkenliği ve biyokütle derişimi sağlar.</li> <li>• Yüksek verimlilik potansiyeline sahiptir.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aşırı ısınma, hücre hasarı oluşabilir.</li> <li>• Işıklandırma aşamasında kullanılan malzemelerin bozunumu üretimi olumsuz etkiler.</li> <li>• Fotosentez sonucu oluşan fazla oksijenin sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir.</li> </ul>                                                                                                                      |

## 2.6 Biyokütle Hasadı ve Susuzlaştırılması

Hasat edilen mikroalg kültürlerinden suyun uzaklaştırılması maliyet ve uygun teknik seçimi açısından önemli bir unsurdur. Kuru mikroalg kütlenin elde edilebilmesi için suyun tamamen uzaklaştırılması gerekmektedir.

Mikroalg hasadını, toptan hasat ve yoğunlaştırma veya kıvamlaştırma olmak üzere iki temel aşamada ele almak mümkündür. Toptan hasatta biyokütleyi süspansiyondan

ayırmak için bütün kitle üzerinde işlem yapılır. Toptan hasatta 100 ile 800 kat arası kadar derişim değışikliğı sağlanmakta, %2-7 gibi oranlarda katı maddeye erişilmektedir. Bu sayısal değerler biyokütlenin ilk derişimine ve kitle hasadında kullanılan yöntemle göre değışmektedir. Floküasyon, yüzdürme ve yer çekimi ile çökeltme bu aşamada kullanılan yöntemlerdendir [11].

Yoğunlaştırma aşamasında mikroalg çamurunda 10 ile 30 kat arasında derişim artışı sağlanmaktadır. Santrifüjleme ve süzme bu aşamada kullanılan en yaygın teknolojilerdir [43], [44].

Mikoalg hasadı ve su içeriğinin azaltılması için en iyi denecek tek bir metot yoktur. Mikroalgin boyutu ve yoğunluğu gibi karakteristik özellikler, kullanılacak hasat tekniğinin seçiminde etkili olmaktadır. Mikroalg hücrelerinin 3-30 µm kadar küçük çapa sahip olanları, biyokütlenin geri kazanımını büyük bir probleme dönüştürebilmektedir [45].

### **2.6.1 Floküasyon (Yumaklaştırma)**

Floküasyon, kitle hasadının ilk aşamasıdır. Mikroalg hücreleri bu yöntem ile bir araya toplanarak parça boyutlarını artırırılar. Mikroalg hücreleri negatif yük taşımaktadırlar. Bu durum kültür ortamında hücrelerin doğal toplanmasına engel oluşturmaktadır. Negatif yükü nötrlemek veya azaltmak için çok değerlikli katyonlar ve katyonik polimerler gibi topaklaştırıcılar eklenmektedir [11], [45].

Mikroalg hücrelerinin küçük gruplar şeklinde yumaklaştırılması, çökeltmeye ve biyokütleyi kültür ortamından kolayca çıkartmaya olanak tanımaktadır [46].

Kullanılacak olan yumaklaştırıcının seçimi dikkat edilmesi gereken bir husustur. İdeal bir yumaklaştırıcı ucuz, zehirsiz ve düşük derişimlerde etkili olmalı, sonraki işlemler için ise ters etki oluşturmamalıdır [45].

Basitliğı ve çeşitli teknikleri içermesi sebebiyle floküasyon işlemi önceden beri geri kazanımda uygulanmaktadır [46]. Kimyasal floküasyon, otofloküasyon, biyofloküasyon, elektrofloküasyon, köpük floküasyonu, ozon floküasyonu ve polielektrolit floküasyon çeşitli floküasyon yöntemlerindendir. Floküasyon yöntemleri su ve atık su arıtımında kullanılmaktadır [46], [47].

### 2.6.2 Santrifüjleme

Santrifüjleme, çoğu mikroalg türünün hasadında kullanılabilecek bir tekniktir. *Dunaliella* gibi çok hassas cinsler haricinde kullanılması mikroalg hasadında santrifüjleme yöntemine bir üstünlük sağlamaktadır. Hassaslık hücre zarlarıyla ilgili bir durumdur. Hücre zarının istenmeyen şekilde parçalanması bazı ürünlerin kaybına yol açabilir [11], [48].

Santrifüjleme, hızlı hasada imkan tanıyan fakat enerji tüketiminin yoğun olduğu bir hasat yöntemidir [45]. Genellikle bir motor tarafından çalıştırılan santrifüjde yoğunluk farklılığı ile biyokütle ve su ayrılmaktadır. Santrifüjleme metodu büyük ölçekli mikroalg hasadı için yüksek enerji gereksinimi sebebiyle kullanışsız olarak değerlendirilmekle beraber, büyük endüstriyel santrifüjler su ve atık su arıtımında çamurun kurutulması maksadıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Santrifüjleme tekniğinin 1.000 \$/ton değerinin epeyce üzerinde olan yatırım ve işletim maliyetleri sera gazı azaltımı süreçleri ve atık su arıtımı için son derece pahalıdır [11].

### 2.6.3 Süzme

Süzme işleminin temelinde hasat edilmek istenen kütlenin belirli açıklığa sahip eleklerden geçirilmesi vardır. Parçacıklar boyutlarına göre ya geçerler ya da elek üzerinde kalırlar. Süzme, basınç veya vakum ile uygulanabilir [42]. Süzme işlemi kavramsal açıdan basittir ama çok pahalı olma potansiyeline sahiptir. Filtrenin gözenek boyutu, malzemesi ve tasarımı ile mikroalg biyokütlesinin filtreden kazanımı hususlarının daha iyi anlaşılması ile süzme işlemi optimize edilebilir.

*Coelastrum* ve *Spirulina* gibi nispeten büyük ( $>70 \mu\text{m}$ ) mikroalglerin hasadı konvansiyonel filtrasyon için en uygun olandır. Konvansiyonel filtrasyona alternatif olarak membran mikrofiltrasyonu ve ultrafiltrasyon vardır. Membran filtrasyonu genel itibarıyla büyük ölçekli mikroalg biyokütlesi üretiminde kullanılmamaktadır. Mikrofiltrasyon sadece günlük  $2 \text{ m}^3$ 'ten küçük hacimlerin filtrelenmesinde santrifüjden daha uygun maliyetli olabilmektedir [45].

Membran mikrofiltasyonu ve ultrafiltasyon hassas hücreler ve küçük ölçekli üretimler için daha uygundur. Bu filtrasyon çeşitleri özellikle membranların yenileriyle değiştirilmesi ve pompalama gibi etkenlerden ötürü daha pahalıdır [19].

Teğetsel akış filtrasyonu büyük miktarlardaki mikroalg kültürlerinin geri kazanımında umut verici bir tekniktir. Adından anlaşılacağı üzere, bu teknikte, kültür ortamı membran boyunca teğetsel olarak akmaktadır. Teğetsel akış filtrasyonunun diğer tekniklere göre üstünlüğü, birikinti ve mikroalg hücrelerinin tamamen uzaklaştırılmasının başarılabilecek olmasıdır [49]. Teğetsel akış filtrasyonu gibi membran ile filtrasyon teknikleri bazı uygulamalarda avantaj sağlasa da sera gazı azaltımı için çok pahalı olacaktır [11].

## 2.6.4 Yüzdürme

Yüzdürme, yer çekimi ile ayırma yöntemidir. Bu yöntemde hava veya gaz kabarcıkları katı parçacıklara bağlanır. Bu parçacıklar sıvı yüzeyin üstüne çıkarlar ve burada birikirler. Parçacıkların birikmesinin ardından bu parçacıklar sıyrılarak ortamdan toplanabilir. Yüzdürme tekniğinin başarısı askıda duran parçacıkların kararsızlığına bağlıdır. Kararsızlık ne kadar az olursa, hava mikroalg teması daha fazla olacaktır. Bu da hava ile temas halinde olan ve bu sebeple yüzen mikroalg miktarını artıracaktır [50].

Kabarcık üretimine göre 3 temel yüzdürme tekniği mevcuttur: çözünmüş hava yüzdürmesi, dağılık hava yüzdürmesi ve elektrolitik yüzdürmedir [49].

Yüzdürme tekniği flokülasyonla beraber uygulanmaktadır. Flokülasyon yöntemi ile bir araya gelip çöken parçacıklar çeşitli yüzdürme teknikleriyle yüzeye çıkarılarak hücre zarını kırma, yağ veya diğer ürün ekstraksiyonu gibi daha sonraki işlemler için toplanmaktadır. Flokülasyon işlemleri ile kümelenen hücreler çökeltme ile de toplanabilir. Fakat yüzdürme tekniklerinden öne çıkan çözünmüş hava ile yüzdürme yöntemi, daha pahalı olmasına karşın daha derişik biyokütle kazanımı sağlamaktadır [51].

### 2.6.5 Yer Çekimi İle Çökeltme

Bu yöntemde esas olan yer çekimi etkisidir. Mikroalg hücreleri doğal yer çekimi ile bulundukları kültür ortamının zeminine doğru çökerler. Askıda duran hücrelerin

çökmesinde hücrelerin çapları ve yoğunlukları etkili olan faktörlerdendir [10]. Mikroalg hücreleri flokülasyon yöntemi ile yumaklaştırma ile çökeltme işlemi daha etkili olmaktadır. Yer çekimli çökeltme ile mikroalg hasadı, su ve atık su arıtma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [43], [44]. Yer çekimi ile çökelmiş sulu çamurlar santrifüj ile elde edilenlere göre daha seyreltik olmaktadır. Elde edilen biyoküttele su oranının yüksek olması sonraki işlemlerin ekonomikliği açısından önemli derecede olumsuz etki yaratmaktadır [19].

Yer çekimi ile çökeltme hasat tekniği, lamel adı verilen ayırıcılar ve çökeltme tankları aracılığıyla uygulanabilir. Mikroalglerin çökeltme tankları ile ayrılması pahalı olmayan bir süreçti. Flokülasyon ile birleştirilmiş yer çekimli çökeltme son derece düşük değerli ürünler için kullanılabilecek bir hasat yöntemi olabilir [19], [49].

## **2.7 Mikroalg Biyokütleden Enerji Üretim Yolları**

Mikroalg biyokütlesinden, fosil yakıtlara alternatif olabilecek çeşitli biyoyakıtlar elde etmek mümkündür. Bu enerji dönüşüm prosesleri genel olarak iki kategori altında toplanabilir. Bunlar; termokimyasal ve biyokimyasal dönüşümdür [10], [11].

Proses seçimi üretilen mikroalg biyokütlenin tipine ve miktarına, enerji türüne, çevresel düzenlemelere ve standartlara ve ekonomik kazanca göre değişir [52].

### **2.7.1 Termokimyasal Dönüşüm**

Termokimyasal dönüşüm prosesi, biyokütlenin enerjiye dönüşümü için ek bir termal enerji kullanımını içerir. Bu dönüşüm prosesleri arasında yakma, gazifikasyon, piroliz ve sıvılaştırma sayılabilir [52].

#### **2.7.1.1 Yakma**

Bu proste biyokütledeki karbon yakılarak karbondioksit, hidrojen ise suya dönüştürülür. Bu proses uzun zamandır kullanılmakta olup kendini ispatlamış bir teknolojidir. Farklı mikroalg kültürler ve hatta kuru biyokütle için kullanılması mümkündür. Ancak, biyokütledeki nem %50'nin üzerinde ise bu proseslerin fizibilitesi düşük olmaktadır.

Ayrıca, mikroalgal biyokütlenin yüksek alkalinitesi nedeniyle korozyon problemleri oluşmakta ve hatta tuzlu su alglerinin kullanılması durumunda yüksek klorür konsantrasyonları problemlere neden olmaktadır [53], [74].

#### **2.7.1.2 Gazifikasyon**

Bu proseste biyokütle yüksek sıcaklıkta (tipik olarak 800-900°C) kısmen oksitlenerek yanıcı bir gaz karışımına (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) dönüştürülür. Çok geniş tipteki, özellikteki alglere uygulanabilir. Bu proses için kullanılacak reaktörler ve yakıt besleme sistemleri nispeten daha ucuzdur. Bu proseste de biyokütlenin su muhtevası büyük önem arz etmekte olup, kuru biyokütle daha avantajlıdır. Ancak, bu prosesle sağlanan enerji eldesi henüz çok netlik kazanmamıştır [52].

#### **2.7.1.3 Piroliz**

Bu proseste biyokütle oksijensiz ortamda ısıtılarak (genellikle 500°C'nin üstünde) sıvı (biyoyağ), katı (kömür) ve uçucu gazlara dönüştürülür. Sıcaklığın, ısıtma hızının ve reaktörde bekleme süresinin iyi ayarlanması ile %70 ve %80'lere varan yüksek dönüşüm verimleri elde edilebilir Mikroalgler için sıklıkla kullanılan bu yöntem de biyokütlenin su muhtevası büyük önem teşkil etmekte olup, sahip olduğu nem proseste sıkıntılara yol açmaktadır. Bu proseste üretilen biyoyağ korozyif özellikte olup, özellikle kuru alg kullanılarak üretilen piroliz yağının ısı değeri daha yüksek, viskozitesi daha düşük, yoğunluğu daha az ve oksijen muhtevası düşüktür [52].

#### **2.7.1.4 Sıvılaştırma**

Bu proseste biyokütle yüksek basınç (5-20 MPa) ve sıcaklıkta (300-350 °C) bir kataliz kullanılarak sıvı yakıtı dönüştürülür. Bu prosesin en önemli avantajı, su muhtevası yüksek biyokütlelerde yüksek verim alınmasıdır. Aynı zamanda bu prosesle net enerji dengesinin pozitif kısımda yer aldığı kesindir. Buna karşın bu proseste kullanılan reaktörler ve yakıt besleme sistemleri pirolizde kullanılanlara göre daha pahalıdır [52].

## 2.7.2 Biyokimyasal Dönüşüm

### 2.7.2.1 Biyodizel

Biyodizel, genel itibarıyla, bitkisel veya hayvansal yağların transesterifikasyonu ile elde edilen metil esterlerden oluşur. Aşırı metanol kullanımı, reaksiyonun eşitliğin sağ tarafına doğru gerçekleşmesini kolaylaştırır. Aşırı metanol geri kazanılarak tekrar kullanılır [53], (Denklem 2.2).



Biyodizel günümüzde konvansiyonel yakıt bitkilerinden elde edilmektedir. Bazı ülkeler, taşıtlardaki kullanımı için, petrol kökenli dizel ile biyodizelin karıştırılarak satılmasını zorunlu kılmışlardır. Gerekli olan biyodizel konvansiyonel yakıt bitkilerinden elde edilmektedir. Yağ kaynağı olarak mikroalglerin konvansiyonel yakıt bitkilerinden en önemli farkı, verim değerleridir. Pek çok mikroalg türünün yağ üretkenliği, en iyi yağ üreten bitkiden dahi daha yüksektir. Biyodizel üretiminde kullanılan mikroalgler genellikle sucul tek hücreli yeşil alglerdir. Bu tip mikroalgler, yüksek büyüme hızı ve yüksek popülasyon sıklığı ile karakterize edilen fotosentetik ökaryot hücreli mikroalglerdir. Yeşil mikroalgler şartların uygun olması durumunda, 24 saatten daha kısa bir sürede biyokütlelerini ikiye katlayabilirler. Mikroalg yağlarının biyodizele dönüşüm prosesleri, klasik tarım bitkilerinin yağlarında olduğu kadar kolaydır (Çizelge 2.4), [54].

Çizelge 2.4 Mikroalgler ve Diğer Biyodizel Hammaddeleri [19]

| Kaynak   | Tohum Yağı İçeriği<br>(Kütlece Yağ Yüzdesi) | Yağ Verimi<br>(L yağ/ha-yıl) | Arazi Kullanım<br>(m <sup>2</sup> -yıl/<br>kgbiyodizel) | Biyodizel Üretkenliği<br>(kg biyodizel/ha-yıl) |
|----------|---------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Mısır    | 44                                          | 172                          | 66                                                      | 152                                            |
| Kenevir  | 33                                          | 363                          | 31                                                      | 321                                            |
| Soya     | 18                                          | 636                          | 18                                                      | 562                                            |
| Jatrofa  | 28                                          | 741                          | 15                                                      | 656                                            |
| Ketencik | 42                                          | 915                          | 12                                                      | 809                                            |

Çizelge 2.4 Mikroalgler ve Diğer Biyodizel Hammaddeleri [19] (Devamı)

| Kaynak                                    | Tohum Yağı İçeriği<br>(Kütlece Yağ Yüzdesi) | Yağ Verimi<br>(L yağ/ha-yıl) | Arazi Kullanım<br>(m <sup>2</sup> -yıl/<br>kgbiyodizel) | Biyodizel Üretkenliği<br>(kg biyodizel/ha-yıl) |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Kanola/Kolza                              | 41                                          | 974                          | 12                                                      | 862                                            |
| Ay çiçeği                                 | 40                                          | 1.070                        | 11                                                      | 946                                            |
| Hint yağı otu                             | 48                                          | 1.307                        | 9                                                       | 1.156                                          |
| Mikroalg<br>(Düşük seviyede yağ içeriği)  | 30                                          | 58.700                       | 0.2                                                     | 51.927                                         |
| Mikroalg<br>(Orta seviyede yağ içeriği)   | 50                                          | 97.800                       | 0.1                                                     | 86.515                                         |
| Mikroalg<br>(Yüksek seviyede yağ içeriği) | 70                                          | 136.900                      | 0.1                                                     | 121.10                                         |

### 2.7.2.2 Biyoetanol

Biyoetanol üretimi için genel olarak iki yöntem uygulanmaktadır. Biri biyokimyasal bir proses olan fermantasyon, diğeri ise gazlaştırmadır. Mikroalgler fermantasyon için kullanılabilecek karbon kaynağı olarak karbonhidrat ve proteince zengindir [55]. Mikroalgler, glikoz ve sakkaroz biriktirme yeteneğine sahiptirler. Bu şekerlerden oksijensiz (anaerobik) fermantasyon ile etanol üretilir.

Etanol, kültür ortamından direkt olarak çıkarılabildiğinde, etanol üretim prosesi, rekabetçi biyoyakıt proseslerinden büyük oranda daha az sermaye ve enerji yoğun olacaktır.

Bu proses, biyokütlenin sudan ayrılmasını ve yağın çıkarılıp işlenmesini gereksiz hale getirmektedir [54]. Biyodizel üretim sistemi ile kıyaslandığında, fermantasyon prosesi daha az enerji tüketimi gerektirmekte ve daha sade bir prosestir.

Fermantasyon sonucu oluşan CO<sub>2</sub>, mikroalg yetiştirme sistemlerine beslenebilir. Mikroalglerden biyoetanol üretimi henüz ticarileşmemiştir [49].

### 2.7.2.3 Biyogaz (Biyometan)

Metan fermantasyon teknolojisini mikroalglerle uygulanması, biyogaz gibi değerli bir yan ürünün elde edilmesinden dolayı dikkat çekmektedir [49].

Biyogaz esas olarak, anaerobik çürüme sırasında oluşan  $\text{CH}_4$  (%55-75) ve  $\text{CO}_2$ 'nin (%25-45) karışımlarından oluşmakla beraber, az miktarda hidrojen sülfür ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nem ve siloksan da içerebilmektedir. Biyometan çok sayıda biyokütle ürününden ve ürün atıklarından elde edilebilir. Nispeten yüksek yağ, nişasta ve protein içeriğinin yanı sıra, fermente edilmesi zor olan ligninin (bitkilerin hücre duvarlarında bulunan kompleks bir kimyasal bileşik) bulunmaması, verimli biyometan üretimi için mikroalgleri ideal bir aday yapmaktadır. Çizelge 2.5'te çeşitli mikroalglerin metan verimleri verilmektedir.

Mikroalg biyokütlesi elde etmenin yüksek maliyetli olması ve üretim kapasitesinin ticari biyogaz santrallerinin taleplerini karşılamada yetersiz kalması, mikroalglerin diğer biyometan kaynakları karşısında rekabet edememesine neden olmaktadır [56].

Çizelge 2.5 Çeşitli Mikroalgler ve Metan Verimleri [49]

| Biyokütle             | Metan verimleri<br>( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) |
|-----------------------|-----------------------------------------------|
| <i>Laminaria sp.</i>  | 0.26-0.28                                     |
| <i>Gracilaria sp.</i> | 0.28-0.40                                     |
| <i>Mayrocystis</i>    | 0.39-0.41                                     |
| <i>L. Digitata</i>    | 0.50                                          |
| <i>Ulva sp.</i>       | 0.20                                          |

### 2.7.2.4 Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (MYH)

Mikrobiyal yakıt hücreleri, mikroorganizmaların katalitik reaksiyonları neticesinde kimyasal bağ enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü biyoelektrokimyasal sistemlerdir. Bir MYH'de anaerobik mikroorganizmalar anot üzerinde büyüyerek organik substratları oksitler ve anota elektron akışı sağlarlar. Daha sonra anot ile katodun birleştirilmesi ile elektron akışı sağlanabilir. Katot kısmında

elektronlar oksijen, demir, mangan ve permanganat gibi kimyasal türleri indirgeyebilir ya da bir biyolojik elektron alıcı tarafından yakalanabilir. Bu sayede bir kapalı devre elde edilmiş ve bir elektrik akımı üretilmiş olur.

## **2.8 Enerji Üretimi İçin Uygun Mikroalg Türünün Seçilmesi**

Biyoenerji üretimi için kullanılacak optimum mikroalg türlerin büyüme hızları ve biyokütle üretimleri ile kalorifik değerlerinin yüksek olması, diğer türlere baskın gelebilecek türler olması gerekmektedir. Hücrelerin sürtünme toleransları yüksek olmalı; buna karşın biyokütle işlenmesi ile ilgili proseslerde kırılmalarının kolay olması arzu edilir. Bir başka husus da işletmeciler ve genel halk sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olmaması açısından toksik olmayan türlerden seçilmeleri gereklidir. Mesela, toksik olan türler genellikle siyanobakterlerden çıkmakta; yeşil alglerde toksik türler bulunmamaktadır açık sistemlerde kullanılacak mikroorganizmaların, kontaminasyon durumunda oluşacak diğer organizmalara baskın gelebilecek nitelikte seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır [57], [58]. Buna karşın kapalı sistemlerde kullanılacak türlerin seçiminde en önemli kriterin sürtünmeye karşı direnç olduğunu belirtmişlerdir.

## **2.9 Mikroalg yetiştiriciliği ile CO<sub>2</sub> Salınımının Azaltılması ve Gerçekleştirilen Çalışmalar**

Atmosferdeki CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması amacıyla çeşitli biyolojik yöntemler uygulanabilmektedir ve Hughes ve Benemann [57], biyolojik CO<sub>2</sub> azaltımını iki gruba ayırmışlardır. Bunlardan biri baca gazları veya tutulan CO<sub>2</sub> ile mikroalg yetiştiriciliğidir.

Atmosferdeki CO<sub>2</sub> derişimdeki artışın önlenmesi ve küresel ısınmanın etkilerinin azaltılması amacı ile geliştirilecek çözümlerden birisi küresel karbon çevriminde önemli bir etkiye sahip olan karasal ve sucul bitkilerin iyi bir şekilde değerlendirilmesidir [58]. Bitkilerin fotosentezin bir parçası olarak CO<sub>2</sub>'yi kullanmaları ile atmosferden çok büyük miktarda CO<sub>2</sub>'i tutabilmektedir ancak ekonomik açıdan uygulanabilir değildir. Mikroalgler, karbon çevrim türleri ile kıyaslandığında, etkin fotosentezleri ve hızlı çoğalmaları ile biyolojik CO<sub>2</sub> azaltımı için önemli ve biyolojik bir seçenektir [58], [59], [60]. Kültür ortamlarına beslenen CO<sub>2</sub>'nin, çok miktarda CO<sub>2</sub> bağlandığı çok sayıda çalışma ile kanıtlanmıştır.

Fotosentetik canlılar olan mikroalgler CO<sub>2</sub>'yi tutarak, farklı yöntemlerle farklı biyoyakıtlara dönüştürülebilecek potansiyel sahibi biyokütleye dönüştürürler. Biyoyakıt üretimi amacı ile mikroalg üretimi üzerinde çalışılan bir konu olmakla birlikte henüz mikroalg kaynaklı biyodizel, biyoetanol gibi biyoyakıtlar fosil kaynaklı alternatifleri ile ekonomik olarak yarışabilecek potansiyele sahip değildir. Mikroalg kökenli biyoyakıt maliyetlerini düşürmek için yapılan çalışmalardan biri de mikroalg yetiştiriciliğini büyük ölçekli hale getirmektir.

Mikroalgler kullanılarak CO<sub>2</sub> salınımının azaltılmasının yanı sıra atıksu arıtımı ve enerji üretimi ve gibi Çevre Mühendisliğini ilgilendiren pek çok alanda çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Çalışmaların amacına, ekonomisi, performansı, sosyal katkısı ve çevresel etkisi göz önünde bulundurularak mikroalg türü tespit edilmesi ile çeşitli prosesler kullanılarak kullanılabilir enerji üretimleri gerçekleştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar;

Hyeon ve ark., 2011 yılında yaptıkları çalışmada Sediment MHY'lerde *Chlorella vulgaris* türünü kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Katot bölmesinde oluşan CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> karışımı gaz kromatograf cihazı ile analiz edilmiştir ve Katot bölmesinde çözülmüş CO<sub>2</sub> sisteme bağlı olan asit baz çözeltileri ile dengelenmiştir. Gelişen mikrolag kültürünün kuru ağırlığı sistemden alınan 50 mL numunenin 80°C'de etüvde kurutulması ile hesaplanmıştır. Bu sistemlerde oluşan gaz ile üretilen akımın doğrudan birbirini etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle CH<sub>4</sub> oluşumu elektrik akımının üretilmesini inhibe ettiği görülmüştür. SMYH kullanılarak yapılan çalışma sonucunda 48.5 Ma/m<sup>2</sup> değerine ölçüldüğünde 420 mg/L mikroalg üretildiği görülmüştür. Bu MYH türü kullanıldığında elektrik akımı ve mikrolag üretiminin yüksek olabileceği tespit edilmiştir [61].

Aino-Maija ve ark, 2012 yılında yaptıkları çalışmada, geliştirdikleri *Chlorella vulgaris* ve *Dunaliella tertiolecta* türlerinin hasadı ile elde edilen biyokütleden iki bölmeli MYH'ler ile 37°C de elektrik üretimini incelemişlerdir. Biyofilm zenginleştirme işlemini kanalizasyon atıksuyu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonunda tatlı su algi olan *C. vulgaris*'in (5.3 mw/m<sup>2</sup>) güç yoğunluğu daha yüksek bulunurken, *D. tertiolecta*'nın (9.8 J/g) elektrik üretimi daha uzun süreli olduğu görülmüştür [62].

Tsuzuki ve ark., 1990 yılında yaptıkları çalışmada, *Chlorella vulgaris*'e uygulanan farklı CO<sub>2</sub> düzeylerinin yağ asitleri içeriğine olan etkilerini araştırmışlardır. Buna göre; CO<sub>2</sub> miktarı artışının yağ asitleri oranını arttırdığı ve linoleik asit ile  $\alpha$ -linoleik asit oranının önemli derecede değiştiği saptanmıştır [63].

Scragg ve Shales (2003) dizel motorların yağları gibi iş görecektir, parça içerikli uzun süre korunan yakıtlar üzerinde çalışmışlardır. Bir çok alg, örneğin *Chlorella vulgaris* gibi tek hücreli ve 5-10 mikron boyutunda ki tür, emülsiyonun içeriği bakımından uygun bulunmuştur. Araştırma sonucunda değişiklik yapılmayan tek silindirli dizel bir motorda *C. vulgaris*'in yakıt olarak kullanılabilirliğini belirlemişlerdir [64].

Miao ve Wu (2006) transesterifikasyon teknolojisi yoluyla bir mikroalg türü olan *Chlorella protothecoides*'den yüksek kalitede biyodizel elde etmek için çalışmışlardır. Araştırma sonunda heterotrofik olarak üretilen *Chlorella protothecoides* kültürlerinde yüksek yağ oranı (%55) saptanmıştır [17].

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1 MATERYAL

##### 3.1.1 Çalışmalarda Kullanılan Mikroalgler

Çalışmada kullanılan mikroalg kültürleri *Chlorella vulgaris* ve *Nannochloropsis oculata*'dır.

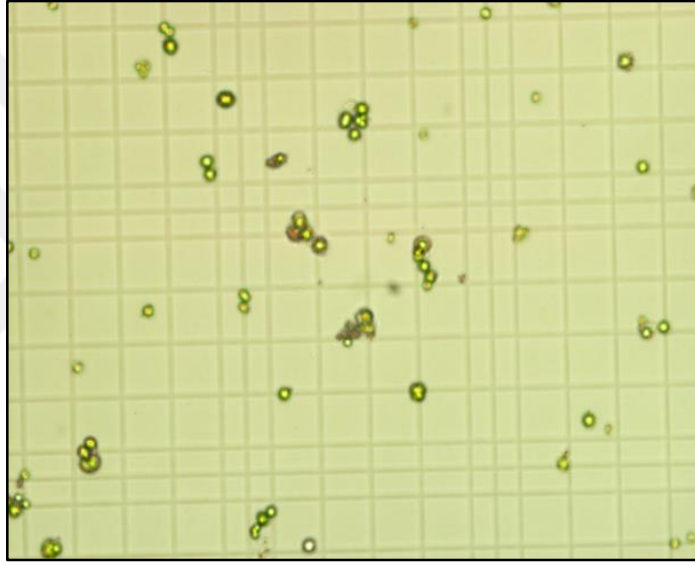
##### 3.1.1.1 *Chlorella vulgaris*

*Chlorella vulgaris* Chlorellaceae familyası üyesidir (Çizelge 3.1). Tatlı su algi olan *C. vulgaris*, tek hücreli, 2-8 µm çapında mikroskobik bir canlıdır. Yapısında bulunan vitamin, protein, amino asitler, nükleik asitler, temel yağ asitleri, enzimler, karotenoidler ve mineral (demir, iyot, çinko, magnezyum, fosfor ve kalsiyum) içeriği ile yararlı bir besindir. Son derece zengin bir klorofil kaynağıdır ve ayrıca %50-60 düzeyinde protein ve sığır karaciğerinden daha fazla miktarda da B12 vitamini içermektedir [65]. Ayrıca, yüksek lipit içeriği ile biyodizel üretimi için tercih edilen bir hammaddedir.

Araştırmada kullanılan *Chlorella vulgaris* (Şekil 3.1) proje kapsamında temin edilmiştir.

Çizelge 3.1 *Chlorella vulgaris*'in Sistematığı [66]

|              |                                  |
|--------------|----------------------------------|
| <b>Alem</b>  | Protista (Bitkiler ve Hayvanlar) |
| <b>Bölüm</b> | Chlorophyta (Yeşil Algler)       |
| <b>Sınıf</b> | Chlorophyceae                    |
| <b>Takım</b> | Chlorococcales                   |
| <b>Aile</b>  | Oocystaceae                      |
| <b>Cins</b>  | <i>Chlorella</i>                 |
| <b>Tür</b>   | <i>Chlorella</i>                 |



Şekil 3.1 *Chlorella vulgaris*'in Mikroskop Altındaki Görünümü (TUBA GENÇ)

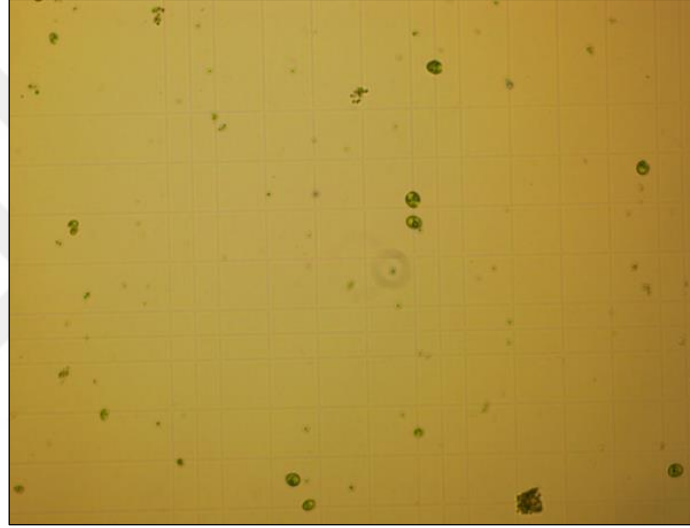
#### 3.1.1.2 *Nannochloropsis oculata*

*Nannochloropsis oculata* Monodopsidaceae familyası üyesidir (Çizelge 3.2). 1986 yılında taksonomik olarak *Nannochloropsis* olarak yerini almıştır [67]. *N. oculata* hücreleri hareketsiz ve yeşil renklidir. Küçük ve küre şeklindeki hücreler 4-6 µm çapındadır. Mikroalgler arasında önemli bir yere sahip olan *Nannochloropsis oculata* türü için optimum yetiştirme koşulları 1000-6000 lux ışık, 25-30°C sıcaklık, 4-36 ppt tuzluluk ve 7,5-8,5 pH olarak belirtilmiştir.

Araştırmada kullanılan *Nannochloropsis oculata* (Şekil 3.2) projeden temin edilmiştir.

Çizelge 3.2 *Nannochloropsis oculata*'nın Sistematığı [66]

|              |                                        |
|--------------|----------------------------------------|
| <b>Alem</b>  | Protista (Bitkiler ve Hayvanlar        |
| <b>Bölüm</b> | Ochrophyta                             |
| <b>Sınıf</b> | Eustigmatophyceae                      |
| <b>Takım</b> | Eustigmatales                          |
| <b>Aile</b>  | Monodopsidaceae                        |
| <b>Cins</b>  | <i>Nannochloropsis</i>                 |
| <b>Tür</b>   | <i>Nannochloropsis oculata</i> (Droop) |



Şekil 3.2 *Nannochloropsis oculata*'nın Mikroskop Altındaki Görünümü (TUBA GENÇ)

### 3.1.2 Kültürlerin Gelişimi İçin Kullanılan Sentetik Besi Ortamları

#### 3.1.2.1 *Chlorella vulgaris* Besi Ortamı (BBM)

*Chlorella vulgaris*'in üretimi için Bold's Basal Medium (BBM) kültür ortamı kullanılmıştır. Besi ortamı iki bölümden oluşmakta olup ortamının içeriği Çizelge 3.3'te, hazırlık aşaması Şekil 3.3'te verilmiştir. Besi yeri hazırlanmasına; kültür ortamının sterilizasyonu için kullanılan malzemelerin otoklavlanması ile başlanmıştır. İçerikleri Çizelge 3.3'te verilen 10 farklı çözelti belirtilen kimyasalların laboratuvarında bulunan Merck Millipore Direct-Q 5 Ultrapure Water Systems cihazından temin edilen çift distile suda çözülmesi sağlanmıştır.

Çizelge 3.3 BBM Besi Ortamının İçeriği [68]

| Bold's Basal Medium (BBM)                            |             |
|------------------------------------------------------|-------------|
| Stok Çözelti                                         | 400 mL için |
| (1)NaNO <sub>3</sub>                                 | 10.0 g      |
| (2)MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O              | 3.0 g       |
| (3)NaCl                                              | 1.0 g       |
| (4)K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                   | 3.0 g       |
| (5)KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                   | 7.0 g       |
| (6)CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O              | 1.0 g       |
| (7)İz Element Çözeltisi                              | 1 L için    |
| ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                 | 8.82 g      |
| MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O                 | 1.44 g      |
| MoO <sub>3</sub>                                     | 0.71 g      |
| CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O                 | 1.57 g      |
| Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O | 0.49 g      |
| (8)H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                    | 11.42 g     |
| (9)EDTA                                              | 50.0 g      |
| KOH                                                  | 31.0 g      |
| (10)FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O             | 4.98 g      |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (konst.)              | 1.0 ml      |
| Besi Ortamı                                          |             |
|                                                      | 1 L için    |
| Stok Çözelti 1 -6                                    | 10.0 mL     |
| Stok Çözelti 7-10                                    | 1.0 mL      |

Her bir çözelti için belirtilen kimyasal maddeler saf su ile 400 mL'ye tamamlanmıştır;

Çözelti A:  $\text{NaNO}_3$  (10 g), Çözelti B:  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (3 g), Çözelti C:  $\text{NaCl}$  (1 g), Çözelti D:  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (3 g), Çözelti E:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (7 g), Çözelti F:  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (1 g)

Stok çözeltiler direkt ışıktan korunarak buzdolabında saklanmıştır.

İz element çözeltisinin hazırlanmasında, her bir çözelti için aşağıda belirtilen kimyasal maddeler 1 L'ye tamamlanmıştır.

Çözelti G:  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (8.82 g) +  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (1.44 g)  $\text{MoO}_3$  (0.71 g) +  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (1.57 g) +  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.49 g)

Çözelti H:  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (11.42 g)

Çözelti I: EDTA (50 g) + KOH (31 g)

Çözelti J:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (4.98 g) +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (konst. 1 mL)

Hazırlanan stok çözeltiler  $121^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika Nüve Steamart OT 40L marka otoklav da sterilize edilmiştir. BBM besi ortamı; 1 litre çift distile saf suya, hazırlanan stok çözeltilerden ilk 6'sından 10'ar mL, kalan 3'ünden 1'er mL ilave edilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.3 BBM Besi Ortamının Hazırlık Aşaması

### 3.1.2.2 *Nannochloropsis oculata* Besi Ortamı (F/2)

Denizel bir tür olan *Nannochloropsis oculata*'nın üretimi için F/2 besi yeri kullanılmıştır. F/2 ortamını oluşturan kimyasal maddelerin tartılma işlemi hassas terazi ile yapılmıştır. F/2 ortamının içeriği (Şekil 3.4), hazırlık aşaması Şekil 3.4'te verilmiştir.

Besi yeri hazırlanmasına; kültür ortamının sterilizasyonu için kullanılan malzemelerin otoklavlanması ile başlanmıştır.



Şekil 3.4 F/2 Besi Ortamının Hazırlık Aşaması

Besi ortamı deniz suyu ile hazırlanmaktadır ve çalışmalarda kullanılan deniz suyu Marmara Denizinden temin edilmiş, tuzluluğu Standart Metotlar da tanımlanan 4500-Cl-B Arjantometrik Metoda göre belirlenmiştir.

0.45 µm göz açıklığında GFC (Whatman 0.47) filtre kağıdından süzülen deniz suyu, otoklavda 121 °C'de 15 dakika sterilize edilerek kültür ortamının hazırlanmasında kullanılmak üzere numune dolabında +4 °C'de muhafaza edilmiştir.

F/2 besi ortamı; sterilize edilmiş 1 litre deniz suyuna çizelgeye göre hazırlanan iz element çözeltisi(1), vitamin karışımı(2) ile  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  kimyasallarının verilen miktarlarda ilave edilmesi ile hazırlanmıştır.

Çizelge 3.4 F/2 Besi Ortamının İçeriği [69]

---

**F/2 Ortamı**

---

**İz Element Stok Çözeltisi**

| (1)İz Elementler                                    | 1 L için |
|-----------------------------------------------------|----------|
| Na <sub>2</sub> EDTA                                | 4.16 g   |
| FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O                | 3.15 g   |
| CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O                | 0.01 g   |
| ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                | 0.022 g  |
| CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O                | 0.01 g   |
| MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O                | 0.18 g   |
| Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O | 0.006 g  |
| (2)Vitamin Karışımı                                 |          |
| Cyanocobalamin (Vitamin B12)                        | 0.0005 g |
| Thiamine HCL ( Vitamin B12)                         | 0.1 g    |
| Biotin                                              | 0.0005 g |

---

**Besi Ortamı**

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
|                                                     | 1 L için  |
| NaNO <sub>3</sub>                                   | 0.075 g   |
| NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O | 0.00565 g |
| İz Element Stok Çözeltisi (1)                       | 1.0 mL    |
| Vitamin Karışımı (2)                                | 1.0 mL    |

---

### 3.1.3 Çalışmalarda Kullanılan Su ve Süzüntü Suyu

#### 3.1.3.1 Süzüntü Suyu

Kültürlerin geliştirilmesi için besi yeri ile birlikte kullanılan süzüntü suyu İSTAÇ Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahası İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Ultrafiltrasyon membranı çıkışından temin edilmiştir.

#### İBB İSTAÇ Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi Ve Çöp Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi

Çalışmada kullanılan süzüntü suları İSTAÇ Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'ndan temin edilmiştir. İstaç Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahası 1994 yılında işletmeye alınmış ve halen günümüzde işletimi devam etmektedir.

Tesise giriş yapan ortalama günlük katı atık miktarı 10,000 ton/gün ve sızıntı suyu miktarı ise 1500 m<sup>3</sup>/gün'dür.

Şekil 3.5'te İSTAÇ Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahasının detaylı planı görülmektedir.



Şekil 3.5 İSTAÇ Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Detaylı Planı

İstanbul'da bulunan düzenli depolama alanlarında (Kömürcüoda ve Odayeri DDT) yaklaşık olarak günlük 14.000 ton ve üzeri evsel atık depolanmaktadır [70]. Bu atıklardan

oluşan sızıntı suyu miktarı 2008 yıl sonu itibarı ile ortalama, Avrupa yakası/Odayeri depolama sahasında 2.300 m<sup>3</sup>/gün olduğu bilinmektedir [71].

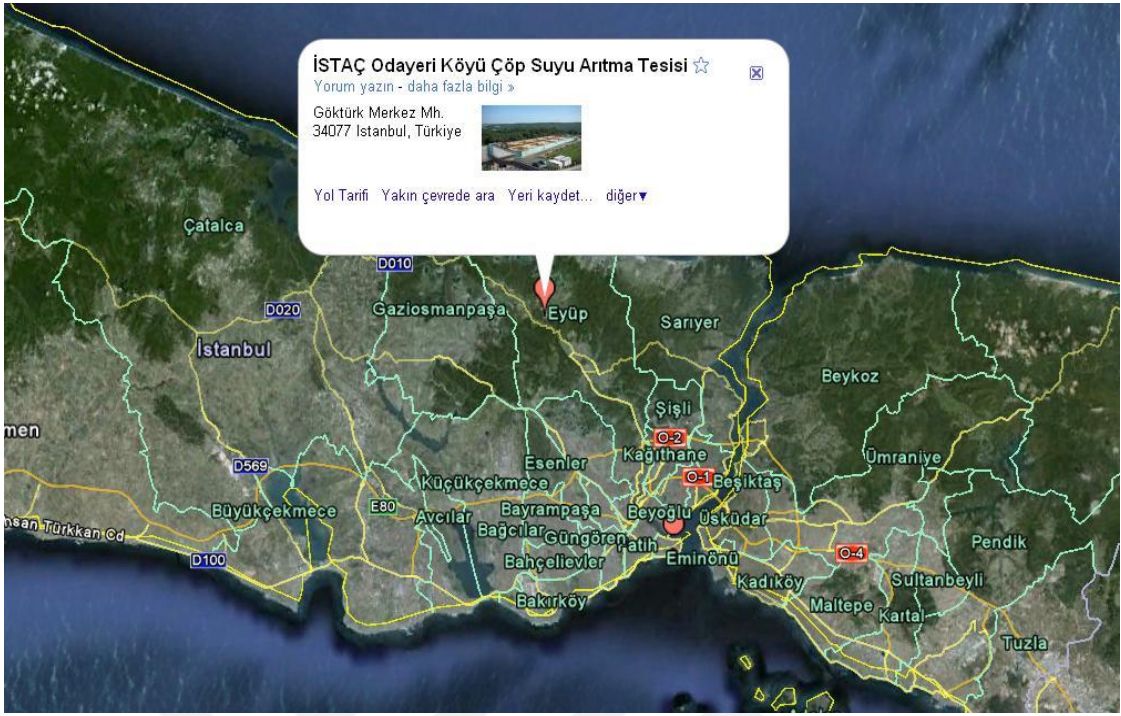
Daha önce inşa edilen ön arıtma tesislerinde, çöktürme, amonyak sıyırma ve anaerobik reaktör üniteleri kullanılmış, ancak deşarj limit değerlerine uygun bir arıtmı elde edilememiştir. Bu nedenle artık Odayeri DDT AAT revize edilerek sızıntı suyu Membran Biyoreaktör ve Nanofiltrasyon (MBR+NF) teknolojisi ile ileri arıtma ile arıtılmaktadır. Odayeri DDT AAT çıkış suyu kanala deşarj yapılacak şekilde dizayn edilmiştir.

Çıkış suyu değerleri Çizelge 3.5'te belirtilmiştir. Her iki arıtma tesisinde oluşan konsantre kısım depolama sahalarına geri devrettirilerek bertaraf edilmektedir.

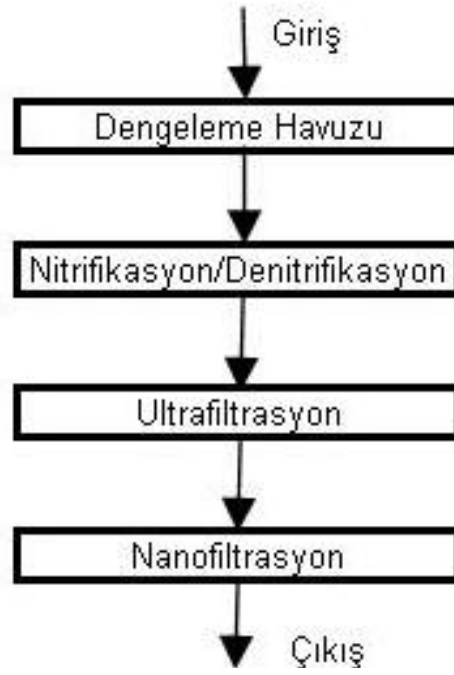
Çizelge 3.5 Arıtma Tesisi Çıkış Suyu Kalitesi [71]

| Parametre        | Birim                  | AAT Çıkış Suyu | Sızıntı Suyu |           |
|------------------|------------------------|----------------|--------------|-----------|
|                  |                        |                | En Düşük     | En Yüksek |
| pH               | -                      | -              | 5,5          | 8,5       |
| KOİ              | mg/L                   | 800            | 4.000        | 20.000    |
| BOİ <sub>5</sub> | mg/L                   | -              | 3.000        | 13.000    |
| Sıcaklık         | °C                     | 25-35          | 15           | 20        |
| TP               | mg/L                   | 10             | -            | <5        |
| TN               | mg/L                   | -              | 2.000        | 5.000     |
| TKN              | mg/L                   | 100            | 2.000        | 5.000     |
| TKM              | mg/L                   | 350            | 300          | 1.500     |
| SO <sub>4</sub>  | mg/L                   | -              | 5            | 500       |
| Sertlik          | mg/L CaCO <sub>3</sub> | -              | 1.400        | 2.500     |
| İletkenlik       | µS/cm                  | -              | 30.000       | 40.000    |
| Alkalinite       | mg/L CaCO <sub>3</sub> | -              | 8.000        | 13.000    |

Odayeri DDT İBBAT yeri, akım diyagramı ve genel görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.6 (a)Odayeri DDT İBBAT Konumu, (b) Proses Akış Diyagramı, (c) Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Havalandırma Havuzu (d) Membran Filtrasyon Üniteleri [71]

### 3.1.3.2 Deniz Suyu

Laboratuvar ölçekli çalışmalar sırasında; F/2 besi ortamı için kullanılan deniz suyu Marmara Deniz’inden Haliç’ten alınmıştır.

### 3.1.3.3 Saf su

Yapılan analizler ve malzemelerin yıkama temizlik çalışmaların da kullanılan saf su Merck Millipore Direct-Q 3, 5, 8 Ultrapure Water Systems cihazından temin edilmiştir.

## 3.2 METOD

### 3.2.1 Araştırma Ortamının Kurulması

Laboratuvar çalışmaları Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi içerisinde bulunan Çevre Mühendisliği Biyoteknoloji ve Atıksu Araştırma laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar 12 ayda tamamlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında Odayeri Düzenli Depolama Tesisi Atıksu Arıtma Tesisi Nanofiltrasyon Ünitesi çıkış suyunda (süzüntü suyunda) *Chlorella vulgaris* ve *Nannochloropsis oculata* kültürlerinin geliştirilmesi ve elde edilen biyokütlenin enerji potansiyellerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Üniversite dışarısından temin edilen mikroalg kültürlerinin ilerleyen çalışmalarda aşı olarak kullanılabilmesi için, literatür bilgileri referans alınarak çalışmaların yürütüldüğü laboratuvar da gerekli şartlar sağlanarak kendi besi ortamlarında çoğaltılmışlardır

Çalışmada kullanılacak kültürlerin aynı özellikte olması deneylerin güvenilirliği bakımından önem taşımaktadır. Bu nedenle deneylerde kullanılacak aşı kültürleri sabit koşullar (24°C’de sıcaklık ve 1000 lüks ışık şiddeti) altında hazırlanmıştır.

Deneme setleri kurulmadan önce BBM ve F/2 besi ortamları 121°C’de 20 dakika süre ile otoklavda steril edilmiştir ve besi ortamları pH’ları 7,5-8,0 aralığında kalacak olacak şekilde ayarlanmıştır.

Her iki tür içinde laboratuvar da sıcaklık oda sıcaklığında 22±2 °C’de sabit tutulmuştur. Işık kaynağı olarak Wiselight marka 24W day-light tasarruflu ampüller-(Tekfen, TLD36 watt) floresan lambalar kullanılmıştır. Ortamın 1000 lüks ışık şiddeti ile sürekli aydınlık kalması sağlanmıştır. Uygulanan ışık şiddeti ışık metre ile kontrol edilmiştir.

50 mL falcon tüp içerisindeki türler steril ve sıvı besi ortamı içeren 250 mL’lik erlenlere aktarılmıştır. Laboratuvar da sterilize edilmiş özel kabin içerisindeki manyetik karıştırma düzeneği üzerine yerleştirilen erlenler yaklaşık 10 gün 1000 lüks ışık altında 25-26°C’de inkübasyona bırakılmıştır. Her iki tür için de erlenlerden biri stok olarak saklanmıştır. Diğer erlenlerle ise ölçek büyötmeye (500 mL, 1L, 6 L) gidilmiştir.

*Chlorella vulgaris* hücrelerinin BBM besi ortamında üretiminde hazırlanan inokulum için inkübasyon süresi 8 gün, *Nannochloropsis oculata*’nın F/2 ortamında üretiminde

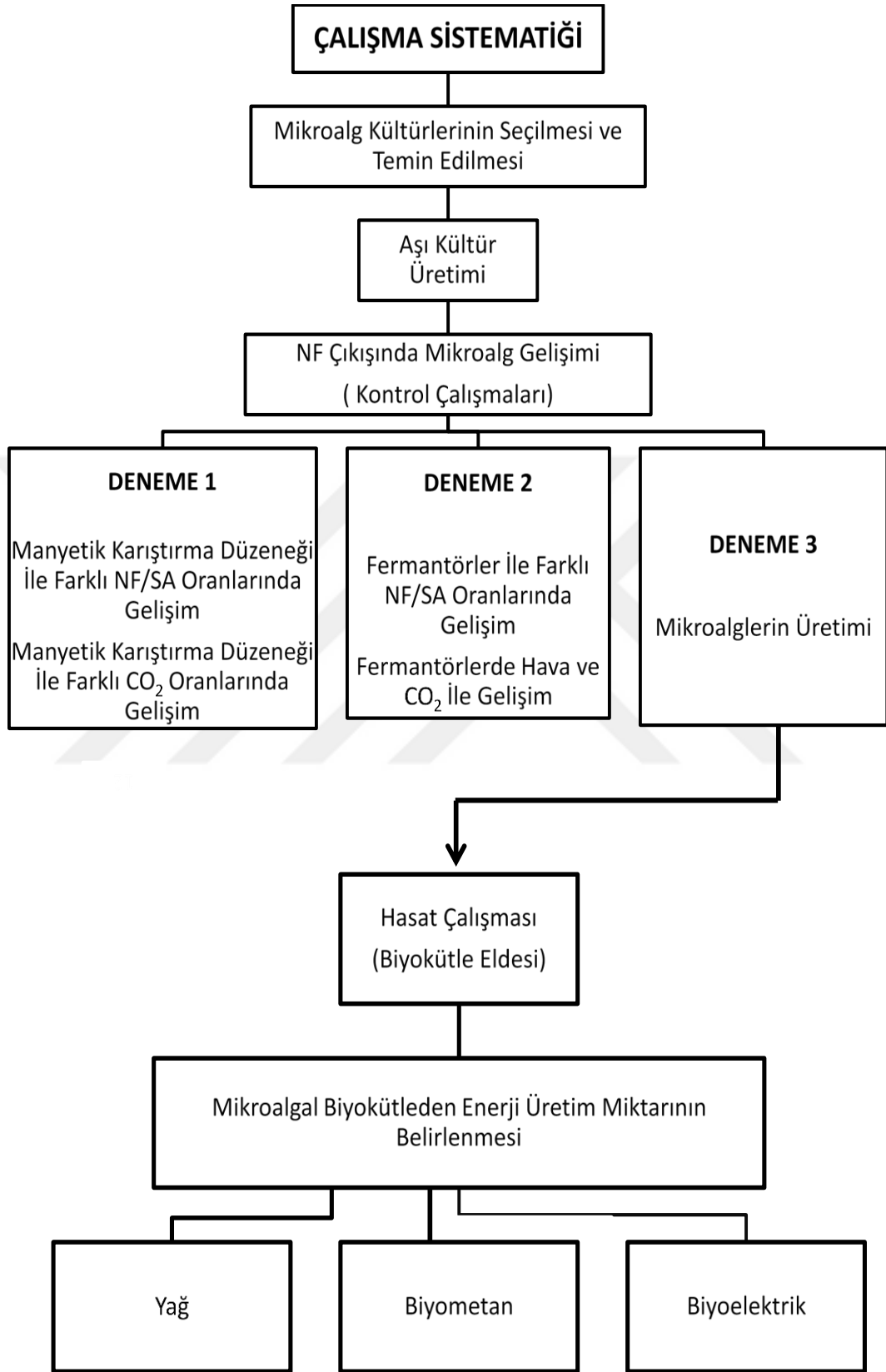
hazırlanan inokulum için inkübasyon süresi ise 10 gün olarak belirlenmiştir. 7 ve 10 günlük inkübasyon periyodu sonunda hücreler logaritmik büyüme evresine girdiği gözlemlenmiştir.

Stok haline getirilen kültürler Odayeri Düzenli Depolama Tesisi içerisinde yer alan atıksu arıtma tesisindeki Nananofiltrasyon ünitesi çıkışından temin edilen süzüntü suyu ile geliştirilmiştir. Farklı kontrol grupları (seyrelme oranlarında) içerisinde geliştirilen kültürlerin gelişimleri düzenli olarak izlenmiştir. Büyüme kinetikleri belirlenmiştir.

Büyüme kinetikleri belirlenen kültürler büyük hacimli kaplar ve reaktörlerde üretilmiştir. Üretilen kültürler santrifüj ile hasat edilerek biyokütle besi ortamından ayrılmıştır. Elde edilen biyokütlelerin enerji üretim potansiyelleri belirlenmiştir. Biyometan, biyoelektrik ve yağ üretimi gerçekleştirilmiştir.

### **3.2.2 Kontrol Çalışmaları**

Çalışmalar Şekil 3.7’de verilen plana göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Çalışma Planı

### 3.2.2.1 Deneme 1 (Manyetik Karıştırma Düzenegi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar)

Araştırmanın bu bölümünde *C. vulgaris* ve *N.oculata*'nın farklı besiyeri ortamlarında hava kullanılarak gelişimi izlenmiştir. En iyi gelişim gösteren besi ortamlarında tekrar kurulan çalışma farklı oranlarda CO<sub>2</sub> beslemesi yapılarak gelişimleri gözlenmiş ve en iyi gelişim gösterdiği şartların tespiti hedeflenmiştir.

Bu süre boyunca her iki tür içinde laboratuvar da sıcaklık oda sıcaklığında 22±2°C'de sabit tutulmuştur. Işık kaynağı olarak Wiselight marka 24W day-light tasarruflu ampüller (Tekfen, TLD36 watt) floresan lambalar kullanılmıştır. Ortamın 1000 lüks ışık şiddeti ile sürekli aydınlık kalması sağlanmıştır. Uygulanan ışık şiddeti ışık metre (Licor, LI-250) ile kontrol edilmiştir.

#### Hava Kullanılarak Yürütülen Kesikli Çalışmalar

*Chlorella vulgaris*'in ve *Nannochloropsis oculata*'nın kendi besi yerlerinin NF çıkış suyu ile belirlenen 5 farklı seyrelme oranı ile hazırlanan ortamlarda gelişimi incelenmiştir. Hava kullanılarak yapılan bu çalışmalar 2 tekrarla yapılmıştır.

Aşı kültürlerden ve optik yoğunluk değeri 0,604 (680 nm) olan *Chlorella vulgaris* ve değeri 0,550 (680 nm) olan *Nannochloropsis oculata* kültürü 10 adet 500 mL'lik erlenlere (her iki kültür için de);

**1.SET için:** 1/0.5 : 300 mL besi yeri, 150 mL NF süzöntü suyu ve 50 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır.

**2. SET için:** 1/1 : 225 mL besi yeri, 225 mL NF süzöntü suyu ve 50 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır.

**3. SET için:** 1/2 : 150 mL besi yeri, 300 mL NF süzöntü suyu ve 50 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır.

**4. SET için:** 1/5 : 375 mL besi yeri, 75 mL NF süzöntü suyu ve 50 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır.

**5. SET için:** 1/10 : 410 mL besi yeri, 41 mL NF süzöntü suyu ve 50 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır.

Sürekli havalandırma uygulanan kültürlerde, steril ince borular kullanılmıştır ve Deneme 1 grubu 10 gün süre ile izlenmiştir. Mikroalglerin gelişimlerini takip etmek amacı ile OD, KA, K-a, TP, TN hergün sonunda yapılmıştır. Çalışmalar Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.8 (a), (b) Mikroalglerin Hava Verilerek Manyetik Karıştırma Düzeneği Üzerinde Geliştirilmesi (Deneme 1)

## CO<sub>2</sub> Kullanılarak Yürütülen Kesikli Çalışmalar

*Chlorella vulgaris*'in ve *Nannochloropsis oculata*'nın kendi besi yerlerinin farklı oranlarda NF çıkış suyu ile karıştırılması sonucu hazırlanan ortamlarda geliştirilmesi tamamlanmıştır. Belirlenen en iyi gelişim ortamında 6 farklı oranda CO<sub>2</sub> beslemesi yapılarak gelişimler izlenmeye devam edilmiştir. Çalışma 2 tekrarla yapılmıştır.

**1 SET için:** 1/1 : 450 mL besi yeri, 450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır. 7.5 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır.

**2. SET için:** 1/1 : 450 mL besi yeri, 450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır. 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır.

**3. SET için:** 1/1 : 450 mL besi yeri, 450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır. 22.5 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır.

**4. SET için:** 1/1 : 450 mL besi yeri, 450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır. 30 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır.

**5. SET için:** 1/1 : 450 mL besi yeri, 450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır. 37.5 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır.

**6. SET için:** 1/1 : 450 mL besi yeri, 450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü miktarında aşılanmıştır. 45 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır.

CO<sub>2</sub> beslemesinde steril ince borular kullanılmıştır ve 10 gün süre ile izlenmiştir. Mikroalglerin gelişimlerini takip etmek amacı ile OD, KA, K-a, TP, TN hergün ve yağ biriktirme kapasitesini tespit etmek için yağ analizi 10. gün sonunda yapılmıştır. Çalışmalar Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.9 (a), (b) Mikroalglerin CO<sub>2</sub> Verilerek Manyetik Karıştırma Düzenneği Üzerinde Geliştirilmesi (Deneme 1)

### 3.2.2.2 Deneme 2 (Biyoreaktörler İle Gerçekleştirilen Çalışmalar)

Araştırmanın bu bölümünde *C. vulgaris* ve *N. oculata* farklı besiyeri ortamlarında tam karışımli, kontrol üniteli Electrolab marka fermantörler kullanılarak geliştirilmiştir.

**1.SET için:** %100 SA/%0 NF : 2900 mL besi yeri ve 100 mL alg kültürü,

**2. SET için:** %90 SA/%10 NF : 2610 mL besi yeri, 290 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü,

**3. SET için:** %75 SA/%25 NF : 2175 mL besi yeri, 725 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü,

**4. SET için:** %50 SA/%50 NF: 1450 mL besi yeri, 1450 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü,

**5. SET için:** %25 SA/%75 NF : 725 mL besi yeri, 2175 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü,

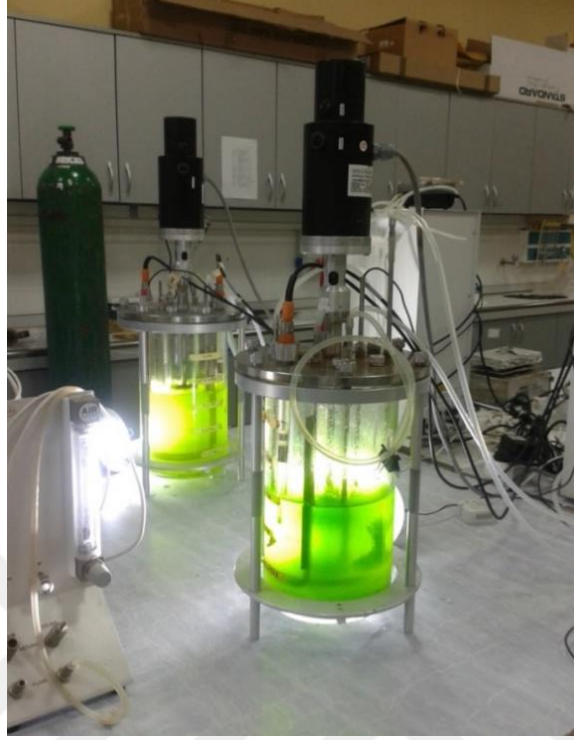
**6. SET için:** %100 NF/%0 SA : 2900 mL NF süzüntü suyu ve 100 mL alg kültürü, miktarlarında aşılarmıştır.

Sürekli havalandırma uygulanan kültürlerde, steril ince borular kullanılmıştır ve Deneme 2 grubu 10 gün süre ile izlenmiştir. Mikroalglerin gelişimlerini takip etmek amacı ile OD, KA, K-a, TP, TN, her gün ve yağ biriktirme kapasitesini tespit etmek için yağ analizi 10. gün sonunda yapılmıştır.

Çalışmanın devamında %50 Sentetik Atıksu/ %50 NF ortamında en iyi gelişimi gösteren *Chlorella vulgaris*'in gelişimi tam karışımli, kontrol üniteli Electrolab marka fermantörlerde izlenmiştir. Laboratuvarda bulunan iki fermantörden birine hava bir diğerine CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır. Biyoreaktörlere hava ve CO<sub>2</sub> steril ince borular verilmiştir ve 25 gün süre ile izlenmiştir. Mikroalglerin gelişimlerini takip etmek amacı ile OD, iletkenlik, Sıcaklık, pH, DO, KA, K-a, TP, TN ve NO<sub>3</sub>-N analizleri yapılmıştır. CO<sub>2</sub> kullanılarak yapılan çalışmalar Şekil 3.10'da, hava kullanılarak yapılan çalışmalar Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

Tüm çalışma boyunca; laboratuvarda sıcaklık oda sıcaklığında 22±2°C'de sabit tutulmuştur, biyoreaktörlerin kontrol panelinden ısı değişimi kontrol edilmiştir. Işık kaynağı olarak Wiselight marka 24W day-light tasarruflu ampüller-(Tekfen, TLD36 watt)

floresan lambalar kullanımıştır. Ortamın 1000 lüks ışık şiddeti ile sşrekli aydınlık kalması sağlanmıştır. Uygulanan ışık şiddeti ışık metre (Licor, LI-250) ile kontrol edilmiştir.

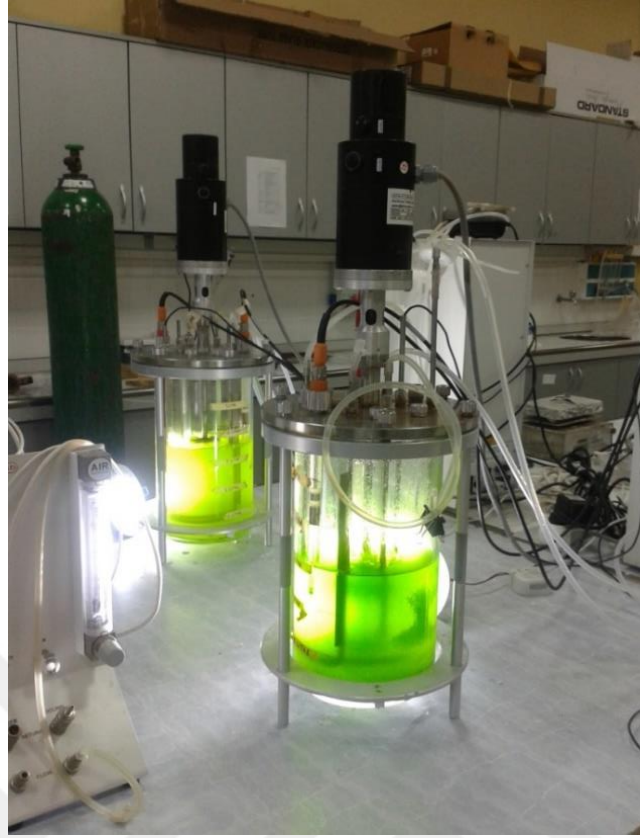


(a)

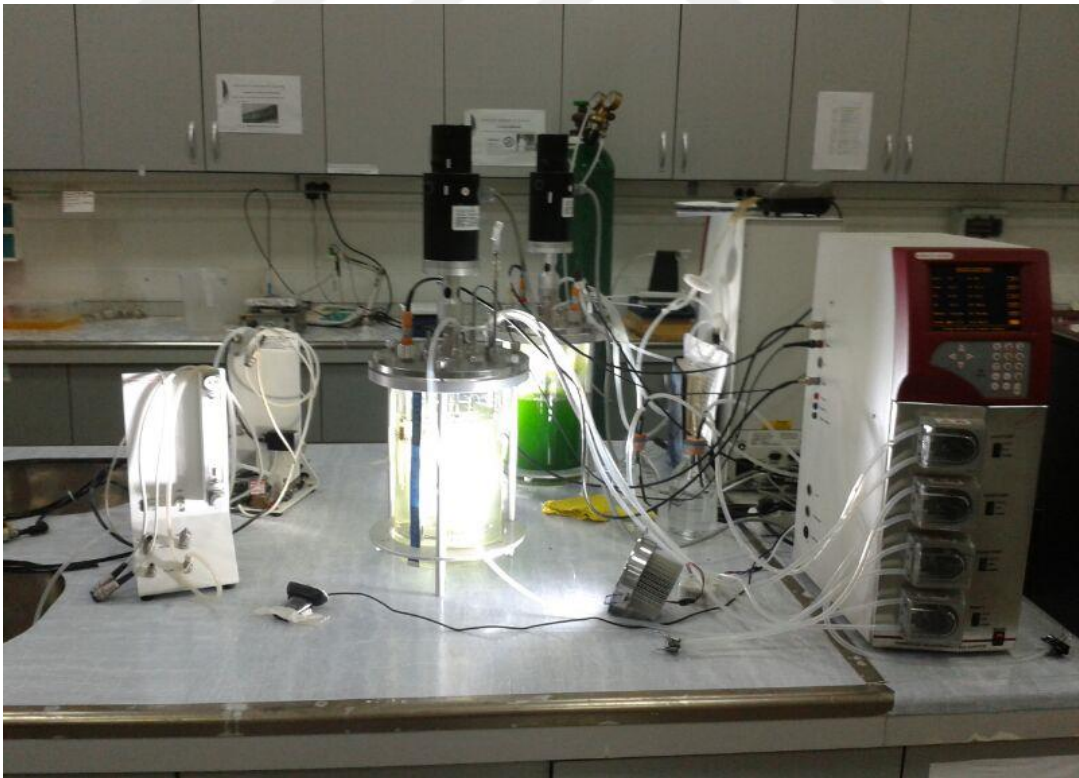


(b)

şekil 3.10 (a), (b) Biyoreaktşrlerde Farklı Besi Ortamlarında Mikroalg Geliştirilmesi (Deneme 2)



(a)



(b)

Şekil 3.11 (a), (b) Biyoreaktörlerde Hava ve CO<sub>2</sub> Beslemesi İle *C. vulgaris* Geliştirilmesi (Deneme 2)

### 3.2.2.3 Deneme 3 (Mikroalg Üretimi)

Araştırmanın bu bölümünde *Chlorella vulgaris*'in ve *Nannochloropsis oculata* 'nın kendi besi yerlerinin NF çıkış suyu ile karıştırılması sonucu oluşturulan ve en iyi gelişim gösterdikleri besi ortamlarında mikroalg üretimi gerçekleştirilmiştir.

Aşı kültürlerden optik yoğunluk değeri 0,604 (680 nm) olan *Chlorella vulgaris* ve optik yoğunluk değeri 0,550 (680 nm) olan *Nannochloropsis oculata*; 4 adet 6 L'lik hacimli kaba aşılanmıştır. Sürekli karışımın hava ve CO<sub>2</sub> karışımı ile gerçekleştirildiği üretimin sonunda algal biyokütleler hasat ile besiyerinden ayrılmıştır. Her iki tür içinde laboratuvar da sıcaklık oda sıcaklığında 22±2°C'de sabit tutulmuştur. Işık kaynağı olarak Wiselight marka 24W day-light tasarruflu ampüller-(Tekfen, TLD36 watt) floresan lambalar kullanılmıştır. Ortamın 1000 lüks ışık şiddeti ile sürekli aydınlık kalması sağlanmıştır. Uygulanan ışık şiddeti ışık metre (Licor, LI-250) ile kontrol edilmiştir.

Sürekli havalandırma uygulanan kültürlerde, steril ince borular kullanılmıştır. Çalışmalar Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



(a)



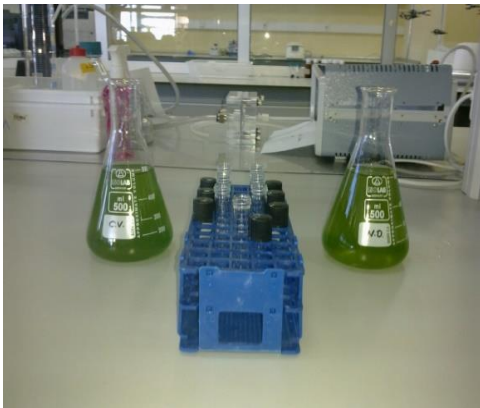
(b)

Şekil 3.12 (a), (b) Hacimli Kaplarda Hava ve CO<sub>2</sub> Karışımı Beslemesi İle Mikroalg Üretimi (Deneme 3)

### 3.2.3 Mikroalg Kültürlerinin Gelişimini İzlemek İçin Üretim Boyunca Yapılan Analizler

#### 3.2.3.1 Optik Yoğunluk (OD)

Optik yoğunluğu ölçmek için günlük olarak kültürler homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra pipet yardımıyla 5 mL numune alınmıştır. Alınan numuneler cam tüplere konularak saf su ile kalibre edilen spektrofotometre de 680 nm dalga boyunda okuma yapılmıştır (Şekil 3.13).



(a)



(b)

Şekil 3.13 (a) Optik Yoğunluğun Ölçülmesi İçin Numunenin Hazırlanması, (b) 6600 UV-VIS Spektrofotometre

### 3.2.3.2 Kuru Ağırlık (KA)

Kuru madde miktarlarının saptanması için, günlük olarak erlen ve fermantörler de bulunan kültürden homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra, 20'şer mL numune alınmıştır. 105°C'de 2 saat etüvde tutulduktan sonra desikatörde soğutulmuş ve darası alınmış 0.45 µm'lik şartlandırılmış filtre kağıtlarından süzölmüştür. Filtre kağıtları tekrara 105°C'ye getirilen etüvde 2 saat tutulmuş ve desikatöre konularak, oda sıcaklığına kadar soğumaları sağlanmıştır. 0.001 g duyarlı terazide tartımları yapılmıştır. Örnekler yaş iken yapılan tartım sonucu elde edilen değerlerden, kurutulduktan sonra elde edilen tartım değerleri çıkarılarak, kuru madde miktarı hesaplanmıştır [72]. (Şekil 3.14)



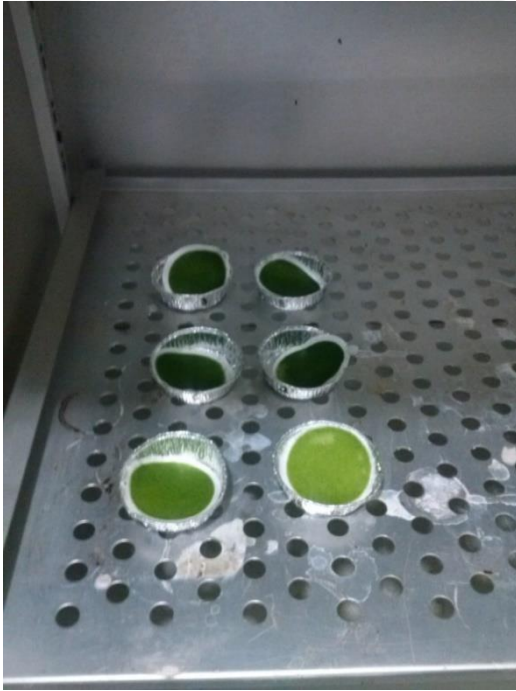
(a)



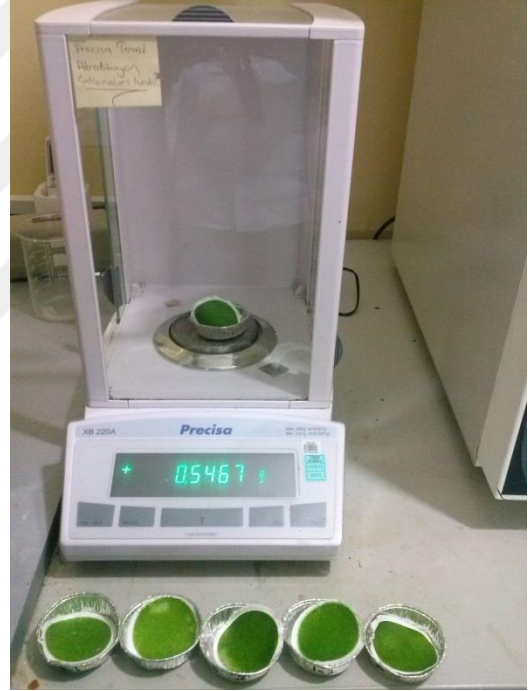
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.14 Kuru Ağırlık Tayini; (a) Deney İçin Süzme Setinin Hazırlanması, (b) (c) Süzme Sonrası Filtre Kağıdı, (d) Filtre Kağıtlarının Etüvde Kurutulması, (e) Tartım

### 3.2.3.3 Klorofil-a (K-a)

Klorofil-a'yı ölçmek için günlük olarak kültürlerden homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra 10 mL numune alınarak 0.45  $\mu\text{m}$ 'lık selüloz asetatlı filtreden süzölmüştür. Daha önceden 10 mL aseton konulan cam tüpün içerisine süzülen filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Cam tüpün kapağı kapatılıp, ışık almaması için alüminyum folyo ile sarılmıştır. +4 derecede 2 saat buzdolabında bekletilen cam tüpler, 2 saat sonunda 15 dk 3000 rpm'de

santrifüj yapılmıştır. Santrifüjleme sonrasında cam tüpün üst kısmındaki duru faz alınarak etanol ile kalibre edilen spektrofotometrede 630, 647, 664 ve 750 nm dalga boylarında okumalar yapılmıştır. Okunan değerlere göre aşağıdaki formüle göre klorofil-a değeri hesaplanmıştır (Denklem 3.1)(Şekil 3.15).

$$Ca = (11.85 * OD_{664}) - (1.54 * OD_{647}) - (0.08 * OD_{630}) \quad (3.1)$$

$$\text{Klorofil-a (mg/m}^3\text{)} = (Ca * \text{aseton hacmi (L)} / \text{numune hacmi (m}^3\text{)})$$



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.15 Klorofil-a Tayini (a)Deney İçin Süzme Setinin Hazırlanması, (b) Santrifüj İşlemi, (c) Santrifüj İşlemi Sonrası Oluşan Faz Ayrımı

#### 3.2.3.4 Toplam Azot

Çalışma gruplarının kurulduğu günden itibaren iki günde bir, homojen olarak karıştırıldıktan sonra alınan numunelerde toplam azot tayini yapılmıştır.

Alınan numunelerin 0.45 µm filtre ile süzülmesi sonucu elde edilen süzüntüden, Standart Metotlar da tanımlanan 4500-Nr-L C. Titrimetrik Metot yöntemine göre yapılmıştır.

#### 3.2.3.5 Toplam Fosfor

Çalışma gruplarının kurulduğu günden itibaren iki günde bir, homojen olarak karıştırıldıktan sonra alınan numunelerde fosfat analizi yapılmıştır.

Alınan numuneler 0.45 µm filtre ile süzülmesi sonucu elde edilen süzüntüden, Standart Metotlar da tanımlanan 4500-P D. yöntemine göre yapılmıştır.

#### 3.2.4 Hasat Çalışmaları

Gelişimi düzenli olarak takip edilen iki farklı tür optik yoğunluğu 2'ye ulaştığında santrifüj ile hasat çalışmalarına geçilmiştir. (Şekil 3.17, Şekil 3.18)

Santrifüj işlemi 45 dakika 2500 RPM'de Becker Coulter Allegra X-12 Centrifuge cihazı ile yapılmıştır. (Şekil 3.16)



Şekil 3.16 Becker Coulter Allegra X-12 Centrifuge Cihazı

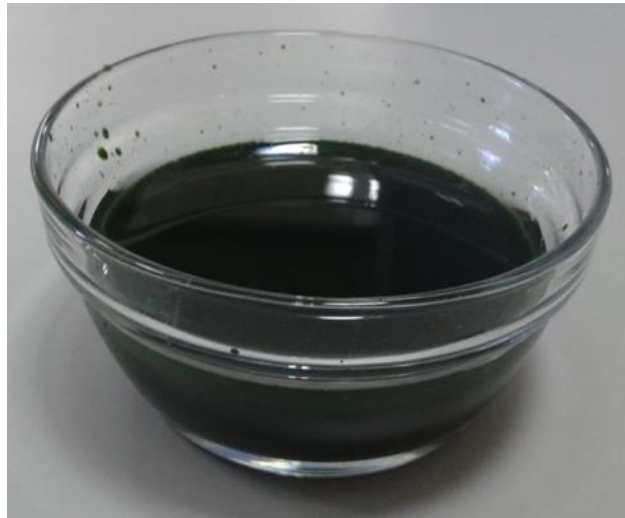


Şekil 3.17 *Chlorella vulgaris* Santrifüj İşlemi Öncesi ve Sonrası Görüntüsü



Şekil 3.18 *Nannochloropsis oculata* Santrifüj İşlemi Öncesi ve Sonrası Görüntüsü

Santrifüj sonrasında süpernatant atılmıştır, atılan miktar kaydedilmiştir. Elde edilen posa ayrı bir kaptaki biriktirilmiştir ve +4°C’de muhafaza edilmiştir. (Şekil 3.19, Şekil 3.20)



Şekil 3.19 *Chlorella vulgaris* Santrifüj İşlemi Sonrası Kalan Katı Madde



Şekil 3.20 *Nannochloropsis oculata* Santrifüj İşlemi Sonrası Kalan Katı Madde

### 3.2.5 Mikroalgal Biyokütlenin Enerji İçeriğinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

#### 3.2.5.1 Biyometan Potansiyelinin Belirlenmesi

Metan fermantasyon teknolojisinin mikroalglerle uygulanması ile biyogaz gibi değerli bir yan ürünün elde edilebilmektedir.

Biyogaz esas olarak, anaerobik çürüme sırasında oluşan  $CH_4$  (%55-75) ve  $CO_2$ 'nin (%25-45) karışımlarından oluşmaktadır. Ayrıca, az miktarda hidrojen sülfid ( $H_2S$ ), nem ve siloksan da içerebilir.

Bu çalışmada geliştirilen mikroalglerin biyometan üretim potansiyeli aşağıda açıklanan yöntemle tespit edilmiştir.

#### BMP Tayini

Laboratuvar ortamında düzenli olarak gelişimleri takip edilen türlerin optik yoğunlukları 2'ye ulaştığında hasat çalışmaları başlatılmıştır. Biyokütlenin besi ortamından ayrılması için numunelere 3000 rpm'de 30 dk santrifüj işlemi uygulanmıştır. Santrifüj sonrasında süpernatant atılmıştır, atılan miktar kaydedilmiştir. Elde edilen posa ayrı bir kapta biriktirilmiştir ve  $+4^{\circ}C$ 'de muhafaza edilmiştir.

BMP analizi anaerobik bakteri kültürü ile sentetik besi yeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sentetik besiyerinde ana besin maddesi olarak mikroalgin posası kullanılmıştır.

**BESİYERİ:** Besiyerinin bileşimi Çizelge 3.6’da gösterilmiştir. Tablodaki değerlere ilaveten mikronütrient olarak  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , EDTA’dan oluşmaktadır. Besiyerine ayrıca, Pyridoxamine ( $\text{C}_8\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Nicotinic acid ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ ), Nicotinamide ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_2\text{O}$ ), DL-panthothenic acid ( $\text{C}_9\text{H}_{16}\text{NO}_5 \cdot 1/2\text{Ca}$ ), Vitamin B12, p-aminobenzoic acid ( $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$ ), Pyridoxine.HCl (B6;  $\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}_3 \cdot \text{HCl}$ ), D Biotin, Thiocctic acid, Folic acid ( $\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{N}_7\text{O}_6$ ), Riboflavin, Thiamine.HCl vitamin çözeltilerine ek olarak  $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  eklenmiştir. Besiyerine son olarak maya özütü (2g/L) ve besiyerinde olabilecek oksijeni bağlayarak anaerobik koşulları sağlayan sistein HCl (0,5 g/L) ilave edilmiştir.

Çizelge 3.6 Deney Setlerinde Kullanılan Besiyeri Bileşimleri

| Kimyasal                                           | Konsantrasyon |
|----------------------------------------------------|---------------|
| $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 10,7 g/L      |
| $\text{Na}_2\text{HPO}_4$                          | 3,20 g/L      |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$                             | 0,6 g/L       |
| $\text{KH}_2\text{PO}_4$                           | 0,125 g/L     |
| $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$          | 0,11 g/L      |
| $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$          | 0,1 g/L       |
| $\text{NaHCO}_3$                                   | 0,2 g/L       |

**AŞI:** Deney seti süresince aşı olarak anaerobik granül çamur kullanılmış olup, çalışmada öncelikle granül çamurun uçucu miktarı (VS) değeri belirlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde granül aşı çamurunun VS miktarı %81,5 olarak tespit edilmiştir.

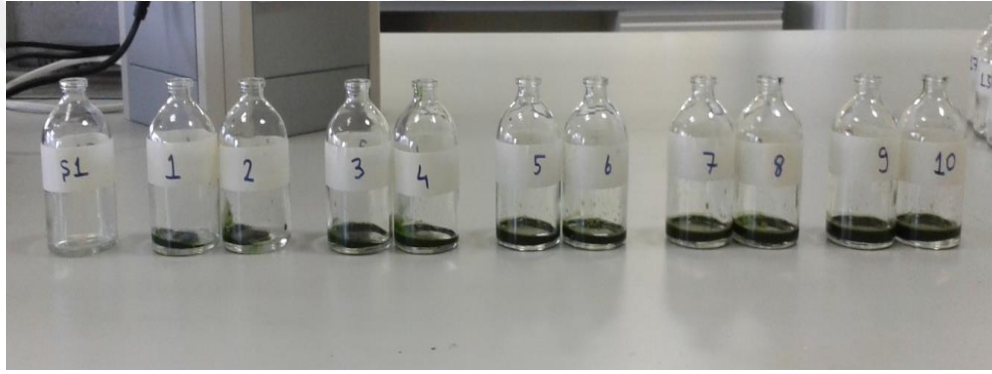
Kullanılan anaerobik bakteri(aşı)’nin mikroalgal biyokütleyle oranları bu analiz için; 1 g mikroalg için 2 gr anaerobik bakteri olarak tespit edilmiştir.

Analizi yapılacak mikroalg numunelerinden 100 mL’lik BMP şişelerine 1,2,3,4,5,10 mL posa konulmuştur (Şekil 3.21).

Daha sonra besiyeri ve anaerobik aşı Çizelge 3.7’de verilen miktarlarda BMP şişeleri içerisine ilave edilmiştir.

Çizelge 3.7 BMP Deney Ortamları

| Mikroalg Miktarı | Besiyeri Miktarı | Granül Aşı Miktarı |
|------------------|------------------|--------------------|
| 1 g              | 49 ml            | 2 g                |
| 2 g              | 48 ml            | 4 g                |
| 3 g              | 47 ml            | 6 g                |
| 4 g              | 46 ml            | 8 g                |
| 5 g              | 45 ml            | 10 g               |
| 10 g             | 40 ml            | 20 g               |

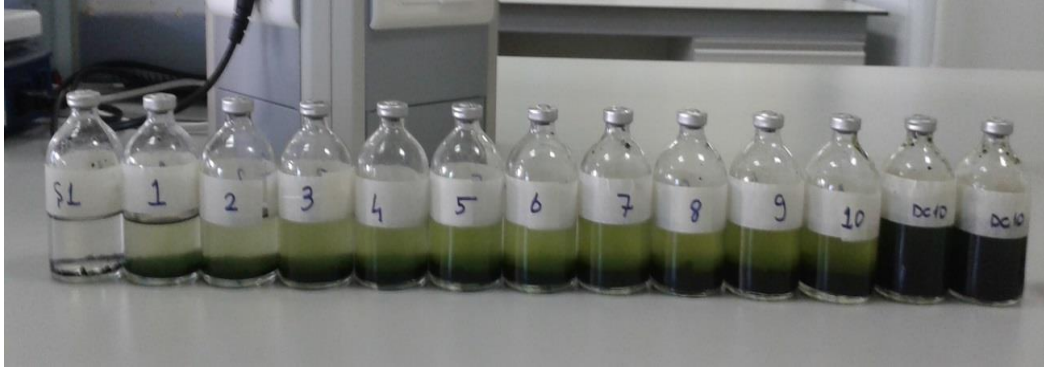


Şekil 3.21 BMP İçin Deney Setlerinin Hazırlanması

Mikroalg, besiyeri ve granül ilavesi tamamlandıktan sonra, şişelerdeki oksijeni gidermek için her bir şişeden 10 dk azot gazı geçirilerek şişelerin ağzı kapatılmıştır (Şekil 3.22, Şekil 3.23).



Şekil 3.22 BMP İçin Deney Setlerinin Hazırlanması

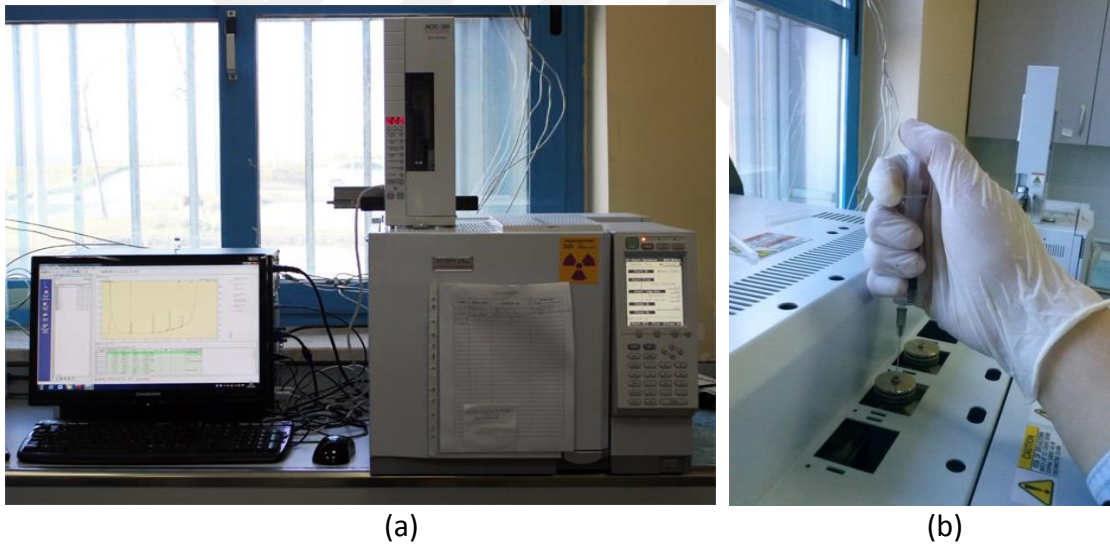


Şekil 3.23 Hazırlanan Deney Setleri (BMP Şişeleri)

Hazırlanan deney şişeleri çalkalanarak 35°C’de inkübe edilmiştir. Bu süreç yaklaşık 40 gün boyunca tamamen karanlık ortam oluşturulan cihazda devam ettirilmiştir.

Her bir numunenin ürettiği gaz hacimleri haftalık olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Gaz bileşeni (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) analizleri “SHIMADZU GC-2014 Gas Chromatograph” cihazı ile deneyin ilk ve son (5 veya 6 hafta) haftasında yapılmıştır. (Şekil 3.24)



Şekil 3.24 (a)Shimadzu GC-2010 Plus Gaz Kromatografi Cihazı, (b) Biyogaz Ölçümü

### 3.2.5.2 Yağ Analizi

Mikroalglerin yapılarında büyüme şartlarına ve türlerine bağlı olarak %1 ile %90 oranında yağ bulunabilmektedir. Bu yüksek oranlardaki yağ içeriği nedeniyle biyodizel ve diğer yağ bazlı sıvı yakıt üretiminde büyük potansiyele sahiplerdir.

Bu çalışmada geliştirilen mikroalglerin bünyelerinde biriktirdikleri ve kullanılabilir yağ miktarı Bligh and Dyer (1959) yöntemi ile tespit edilmiştir.

**Yağ Analizi:** Laboratuvar ortamında düzenli olarak gelişimleri takip edilen türler optik yoğunlukları 2'ye ulaştığında santrifüj ile hasat edilmiştir. Elde edilen biyokütle (posa) ayrı bir kapta biriktirilmiş ve +4°C'de muhafaza edilmiştir.

Elde edilen biyokütlenin biriktirdiği yağ miktarı Bligh and Dyer (1959) yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. (Şekil 3.25)



Şekil 3.25 Yağ Analizi için Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney sırasında kullanılacak 50 mL'lik beherler etüvde 2 saat 105°C şartlandırılmış ve desikatörde yarım saat soğumaya bırakılmıştır.

Diğer taraftan santrifüj kaplarına 5 g numune(posa), 5 mL kloroform, 10 mL metanol ve 25 mL saf su sırasıyla ilave edilip vorteks cihazı ile her ilaveden sonra 2'şer dk karıştırılmıştır.

Oluşan bu karışıma 5 mL daha kloroform eklenip 15 sn vorteks cihazı ile karıştırılmış. Son olarak bu karışıma 5 mL saf su eklenip tekrar 30 sn vorteks veya parçalayıcı bir cihaz yardımı ile karıştırma ve parçalama işlemi uygulanmıştır.

Bu işlemler tamamlandıktan sonra hazırlanan santrifüj tüpleri cihaza yerleştirilip 3000 devirde 10 dk santrifüj işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.26, Şekil 3.27).



Şekil 3.26 Yağ Analizi Deneyi için Numunelerin Hazırlanması

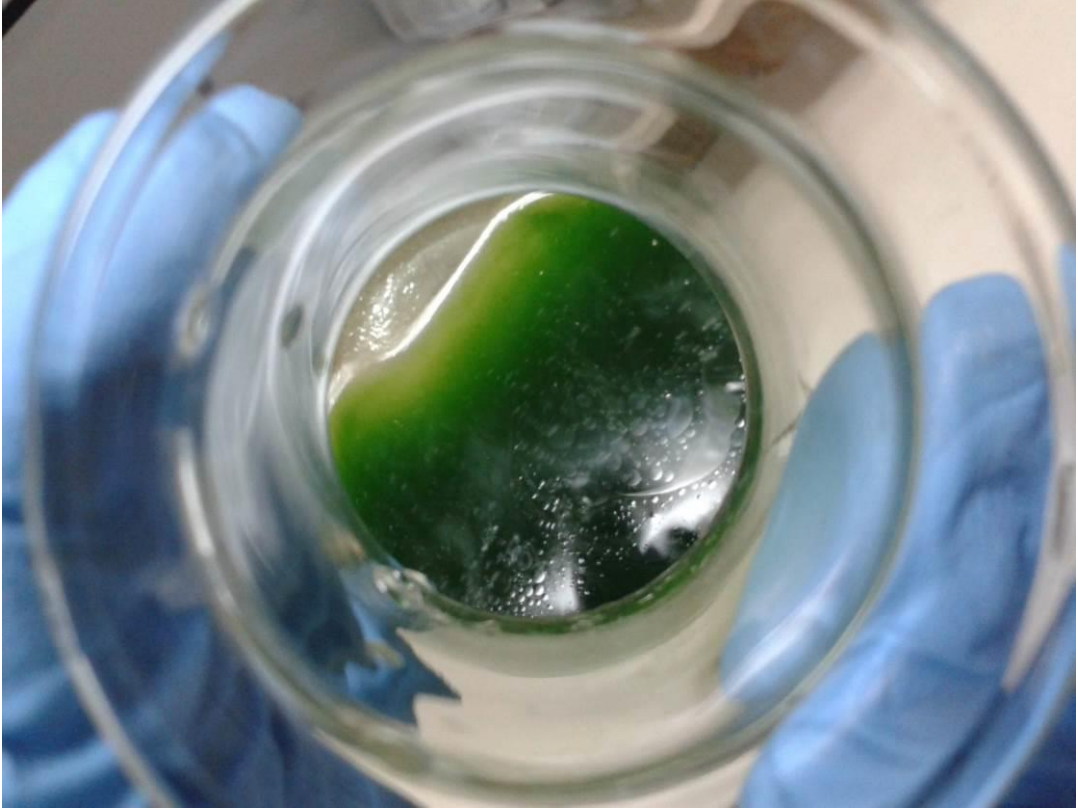


Şekil 3.27 Yağ Analizi Deney Numuneleri – Santrifüj İşlemi

Santrifüj işlem sonucunda çözeltide tabakalaşma gözlenmiştir. (Şekil 3.28)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.28 (a), (b), (c) Yağ Ekstraksiyon İşlemi

En altta kalan parlak sarı karışımdan 1 mL alınmıştır. Deneyin en başında etüvde hazırlanan ve daraları alınmış 50 mL'lik beherlere bu 1 mL'lik karışım konulmuştur. Çözücünün uçurulması için beherler 105 derece etüvde 30 dk'lık periyotlar halinde bekletilmiştir. Çözücü uçurulduktan sonra, desikatörde soğutulan beherlerin son tartımları alınmıştır.

Deney sonucunda biyokütlenin yağ içeriği Denklem 3.3'te göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{Ham Yağ} = \frac{A1 - A2}{S} * 100 \quad (3.3)$$

A1: Dolu beherin ağırlığı

A2: Boş beherin ağırlığı

S: Numune miktarı

### 3.2.5.3 Biyokütleden Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İle Elektrik Enerjisi Üretimi

Organik atıklardaki kimyasal enerjiyi, mikroorganizmalar yardımı ile doğrudan elektrik enerjisine çeviren biyoreaktörlerdir. Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) sistemi içinde bakteriler katalizör görevi görerek organik ve inorganik maddeleri yükseltgeyerek akım üretilmesi sağlanır.

Bu çalışmada geliştirilen mikroalglerden elektrik enerjisi üretimi mikrobiyal yakıt hücresi sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

#### Deneyin Yapılışı:

Bu çalışmada şekilde gösterilen iki bölmeli camdan yapılan mikrobiyal yakıt hücresi kullanılmıştır. (Şekil 3.29)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.29 MYH'lerin Hazırlık Aşaması (Eysel Atıksu İle Biyofilm Zenginleştirilmesi Çalışmaları)

Her bir bölme 275 mL hacmindedir ve MYH'lerinde yaygın olarak kullanılmakta olan CMI-7000 katyon değiştirici membran ile birbirlerinden ayrılmıştır. Çapraz bağlı yapısıyla jel polistiren ve divinil benzenli güçlü asit polimer membrandır. Teknik özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8 Ultrex CMI-7000 Membranının Teknik Özellikleri

| Özellik                                             | Değer          |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| Polimer yapısı                                      | Jel polistiren |
| İşlevsel grup                                       | Sülfonik asit  |
| İyonik form                                         | Sodyum         |
| Standart kalınlık, mm                               | 0.45±0.025     |
| Toplam değiştirme kapasitesi (meq/g)                | 1.6±0.1        |
| Isı kararlılığı (°C)                                | 90             |
| Kimyasal kararlılık aralığı (pH)                    | 1.Eki          |
| Ohmik rezistans ( $\Omega \text{ cm}^2$ ) 0.5M NaCl | <30            |

Bu membranın sistem için kullanılabilir hale getirmek için 40°C sıcaklıkta %5'lik NaCl içeren çözelti içerisinde 24 saat bekletilmiştir ve daha sonra membranlar saf su içerisine alınmıştır.

Anot ve katot bölmelerindeki elektrotlar 5 cm yüksekliğinde 2 cm uzunluğunda ve 1.5 mm inceliğindedir. Elektrotlar karışık metal oksit titanyumlardır. (Ti-TiO<sub>2</sub> from Akat Engineering Company, Turkey).

Özdirenci 0.00001 ohm x cm dir. 1000  $\Omega$  luk dirençle bağlı titanyum tel anottan katota transfer olan elektronları ölçmek için kullanılmış ve işletme öncesi elektrot yüzeyindeki kirleticileri gidermek için elektrot önce etil alkol ile yıkanmış daha sonra saf su ile durulanmıştır.

Katot bölmesi saf su ile doldurulmuş ve havalandırılmıştır. Her iki bölme 350 rpm'de manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve MYH başlangıç aşamasında anaerobik şartların sağlanması için anot bölmeye azot verilmiştir.

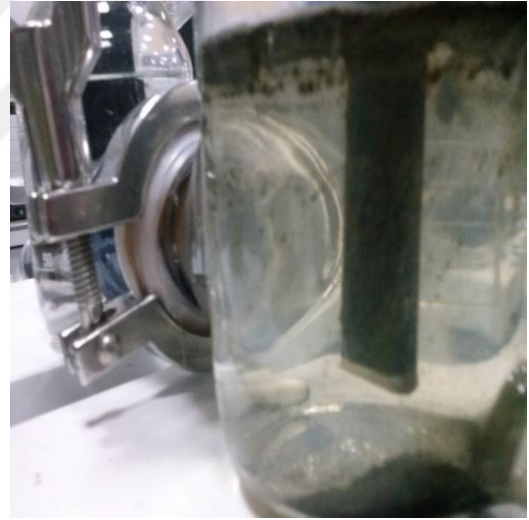
İşletme sırasında zenginleştirilmiş bir besin verilmemiştir. Biyofilm oluşturulması ve geliştirilmesi işlemi evsel atıksu ile yapılmıştır. İlk 5 gün boyunca anot bölmesi evsel atıksu ile her gün voltaj 10 mV'un altında düştüğünde değiştirilmiştir. Bu aşamada 1000 $\Omega$ 'luk dış direnç kullanılmıştır. (Şekil 3.30)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.30 (a), (b), (c) Biyofilm Oluşumu 3 Hafta Sonunda Gözlenmiştir

Elektrik üretimi arttığı ve artık stabil değere ulaştığı anda evsel atıksu, gelişimi tamamlanmış ve santrifüj ile hasat edilmiş *Chlorella vulgaris* ve *Nannochloropsis oculata* ile değiştirilerek mikroalgal biyokütleden elektrik üretimi çalışmasına geçilmiştir.

İki tür içinde reaktörlerin anot bölmesi ne %10'u biyokütle olacak şekilde hazırlanan besiyeri ve posa karışımı ilave edilmiştir. Katot bölmesi anot bölmesindeki karışımla aynı seviyede olacak şekilde saf su ile doldurulmuştur (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Mikroalgal Biyokütle İle Hazırlanmış Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Hazırlanan reaktörlerin içerisindeki karışımın ışık almaması için dışları alüminyum folyo ile kaplanmıştır.

Reaktörler 350 rpm’de manyetik karıştırıcı üzerinde, oda sıcaklığında ( $26\pm4^{\circ}\text{C}$ ) kesikli olarak işletmeye alınmıştır. Elektrik üretimi düzenli olarak ölçülmüştür.

Elektrik üretimi her 10 mV’un altına düştüğünde yeni karışım hazırlanmıştır ve besleme yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.32 (a), (b) Elektrik Üretiminin Takip Edildiği Sistem

Elektrokimyasal ölçümler aşağıda detayları verilen potansiyostat sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümler bir yazılım kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilmektedir ve ölçüm sonuçları kayıt edilmiştir (Şekil 3.32). Bu sistemle, öncelikle V-t, I-t, I-V ve Elektrokimyasal Empedans (EES) ölçümleri yapılmıştır. MYH de üretilen akım değeri, kapalı devre üzerine bağlanan akım direnci üzerinden okunan voltaj değerinden hesaplanmıştır.

### DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR

Mikroalglerin gelişimi için gerekli olan nutrientler, çöp sızıntı suyu arıtma tesisi membran çıkış suyundan sağlanarak hem süzüntü suyunda nutrient giderimi sağlanmış hem de enerji kaynağı olarak kullanılabilecek mikroalglerin yetiştirilmesi hedeflenmiştir.

Deneysel çalışma beş aşamadan oluşmuştur. Bu aşamalar sırasıyla;

- ❖ Çalışmada kullanılacak mikroalg türlerinin belirlenmesi,
  - Yaygın olarak kullanılan *Chlorella vulgaris* ve *Nannochloropsis oculata* türleri temin edilerek birçok kesikli laboratuvar çalışması yürütülmüştür.
  - Laboratuvar çalışmalarında, sentetik besiyeri olarak *Chlorella vulgaris* için Bold's Basal Medium (BBM) ve *Nannochloropsis oculata* için F/2 Medium kullanılmıştır.
  - *Nannochloropsis oculata* deniz suyu algi olduğu için seyreltme suyu olarak Haliç'ten alınan deniz suyu, sterilize edildikten sonra kullanılmıştır.
- ❖ Aşı kültür üretimi,
- ❖ Kontrol Çalışmalarının yürütülmesi,

Çalışmalarda hava ve CO<sub>2</sub> sisteme akvaryum pompası ile beslenmiştir. Ayrıca hava, CO<sub>2</sub> ve farklı oranlarda seyrelme ortamlarından oluşturulan gelişim ortamlarında birçok kesikli çalışma ile yürütülmüştür.

Kesikli çalışmaların bir kısmı orbital karıştırıcı kullanılarak 500 mL'lik erlenlerde bir kısmı tam karışimli biyoreaktörlerde bir kısımda büyük hacimli cam kaplarda gerçekleştirilmiştir.

- Deneme 1; Manyetik karıştırma düzeneği ile farklı NF/SA oranlarında ve CO<sub>2</sub> beslemesi ile gelişim takibi,
- Deneme 2; Biyoreaktörler ile farklı NF/SA oranlarında ve farklı CO<sub>2</sub> oranlarında beslenmesi ile gelişim takibi,
- Deneme 3; Hacimli kaplar ile NF/SA ortamında hava ve CO<sub>2</sub> karışımı beslemesi ile mikroalg üretimi,

❖ Hasat çalışmaları,

- Farklı şekillerde ve farklı besi ortamlarında gelişimi izlenen her iki kültürün en iyi geliştiği ortam tespit edilmiştir.
- Tespit edilen bu oranda mikroalg üretimi gerçekleştirilmiştir.
- Doygunluğa ulaşan kesikli çalışmalarda hasat çalışmaları ile besi ortamlarından biyokütlelerin ayrılması sağlanmıştır.

❖ Enerji üretim potansiyellerinin belirlenmesi şeklindedir.

Elde edilen biyokütlerde biyoenerji potansiyellerinin tespit edilmesi amacı ile biyometan, biyoyağ ve biyoelektrik üretimi potansiyellerinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu biyoenerji çeşitleri;

- Biyoyağ
- Biyometan
- Biyoelektrik'tir.

Çalışmalar boyunca saf kültüre dış ortamdan kontaminasyon olmaması için sterilizasyona özen gösterilerek çalışmalar tamamlanmıştır.

#### 4.1 Çalışmalarda Kullanılan Süzüntü Sularının Karakteristik Özellikleri

Çalışmalarda kullanılan süzüntü suları; Haliçten temin edilen deniz suyu ve İBB İstaç Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahası içerisinde bulunan sızıntı suyu arıtma tesisi nanofiltrasyon membranı süzüntü suyudur. Bu numunelerin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan analizlerin sonuçları çizelgede görülmektedir (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1 Kullanılan Süzüntü Sularının Karakterizasyonu

| Parametre                         | Birimi | NF Çıkış | Deniz Suyu |
|-----------------------------------|--------|----------|------------|
| pH                                |        | 9,29     | 10,32      |
| KOİ                               | mg/L   | 1.35     | 43         |
| Cl <sup>-</sup>                   | mg/L   | 7.49     | 397,87     |
| TKM                               | mg/L   | 17.96    | -          |
| UKM                               | mg/L   | 2.56     | -          |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N   | mg/L   | 904,59   | 82,88      |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> – P | mg/L   | 1,17     | 0,13       |
| Fe                                | mg/L   | 0,29     | -          |
| Cu                                | mg/L   | 0,03     | -          |
| Zn                                | mg/L   | 0,13     | -          |
| Cr                                | mg/L   | 0        | -          |
| Ni                                | mg/L   | 0,27     | -          |

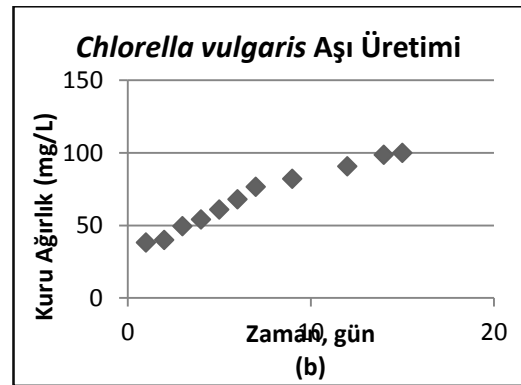
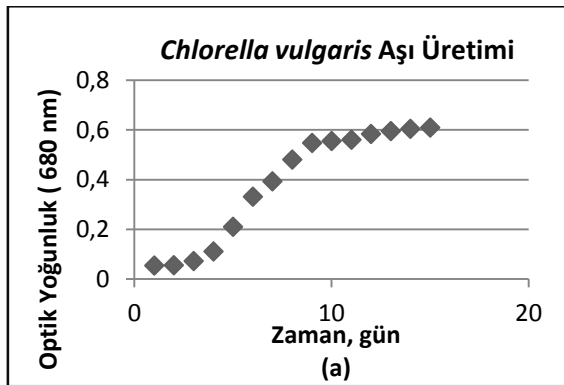
#### 4.2 Aşı Kültür Üretimi ve Analiz Sonuçları

Farklı kurumlardan temin edilen mikroalg kültürlerinin ilerleyen çalışmalarda aşı olarak kullanılabilmesi için, literatür bilgileri referans alınarak çalışmaların yürütüldüğü laboratuvarında gerekli şartlar sağlanarak kendi besi ortamlarında çoğaltılmışlardır.

Aşı kültür üretimi hakkında detaylı bilgi “3.1.2 Kültürlerin Gelişimi İçin Kullanılan Sentetik Besi Ortamları” bölümünde detaylı olarak verilmiştir. 500 mL’lik erlenlere 20 mL aşıl原因 mikroalg kültürleri sabit ve eşit koşullarda 15 gün boyunca izlenmiştir. Gelişimlerini izlemek amacı ile OD, KA, K-a, TP ve TN analizleri günlük olarak yapılmıştır. *Chlorella vulgaris*’in aşı üretim süresince elde edilen analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. *Chlorella vulgaris* türünün yaklaşık 10 günde doymunluğa ulaştığı görülmüştür (Şekil 4.1). Doymunluğa ulaşan ve 500 mL üretilen *Chlorella vulgaris* diğer çalışmalarda aşı olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 *Chlorella vulgaris* Aşı Üretimi

| Gün | Numune<br>(Alg/Besiyeri) | Optik<br>Yoğunluk<br>(685 nm) | Klorofil-a<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | Kuru<br>Ağırlık<br>(mg/L) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N<br>(mg/L) | PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> -P<br>(mg/L) |
|-----|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1   | Cv (20/500)              | 0,05                          | 103,8                              | 38,2                      | 210,3                                     | 189                                        |
| 2   | Cv (20/500)              | 0,05                          | 234,5                              | 40                        |                                           |                                            |
| 3   | Cv (20/500)              | 0,07                          | 227,9                              | 49,5                      |                                           |                                            |
| 4   | Cv (20/500)              | 0,11                          | 434,5                              | 54                        |                                           |                                            |
| 5   | Cv (20/500)              | 0,21                          | 676,2                              | 61                        |                                           |                                            |
| 6   | Cv (20/500)              | 0,33                          | 879,4                              | 68                        |                                           |                                            |
| 7   | Cv (20/500)              | 0,39                          | 1153,7                             | 76,5                      |                                           |                                            |
| 8   | Cv (20/500)              | 0,48                          |                                    |                           |                                           |                                            |
| 9   | Cv (20/500)              | 0,54                          | 1510,4                             | 82                        |                                           |                                            |
| 10  | Cv (20/500)              | 0,55                          |                                    |                           |                                           |                                            |
| 11  | Cv (20/500)              | 0,56                          |                                    |                           |                                           |                                            |
| 12  | Cv (20/500)              | 0,58                          | 1545,6                             | 90,7                      |                                           |                                            |
| 13  | Cv (20/500)              | 0,59                          |                                    |                           |                                           |                                            |
| 14  | Cv (20/500)              | 0,60                          | 1661,3                             | 98,6                      |                                           |                                            |
| 15  | Cv (20/500)              | 0,60                          | 1680,2                             | 100                       | 31                                        | 25                                         |

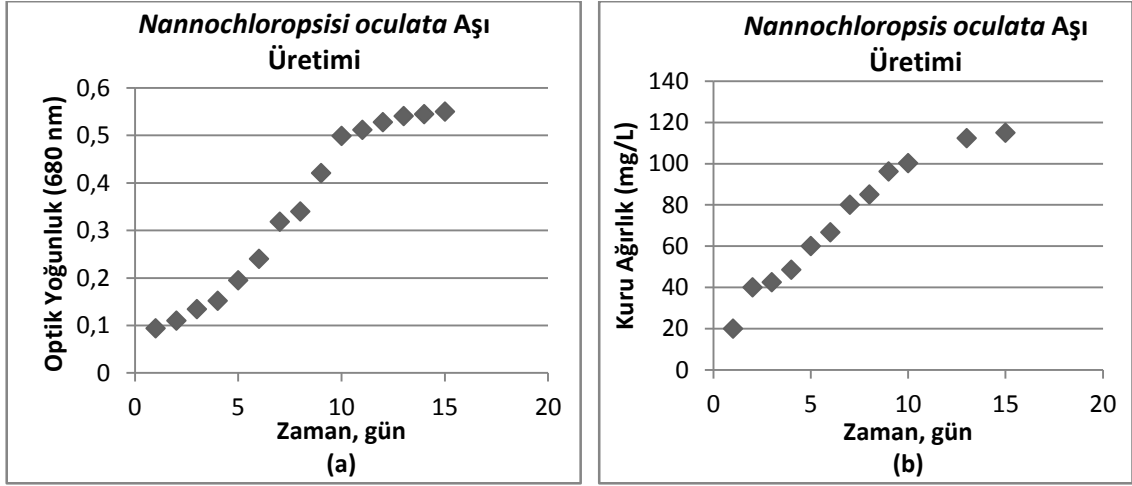


Şekil 4.1 *Chlorella vulgaris* aşı üretimi (a) OD, (b) KA Değerleri

*Nannochloropsis oculata*'nın aşı üretim süresince elde edilen analiz sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. *Nannochloropsis oculata* türünün yaklaşık 10 günde doygunluğa ulaştığı görülmüştür (Şekil 4.2). Doygunluğa ulaşan ve 500 mL üretilen *Nannochloropsis oculata* diğer çalışmalarda aşı olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.3 *Nannochloropsis oculata* Aşı Üretimi

| Gün | Numune<br>(alg/besiyeri) | Optik<br>Yoğunluk<br>(685 nm) | Klorofil-a<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | Kuru<br>Ağırlık<br>(mg/L) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -<br>N<br>(mg/L) | PO <sub>4</sub> -3 – P<br>(mg/L) |
|-----|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 1   | No (20/500)              | 0,09                          | 265,4                              | 20                        | 182,7                                         | 163,1                            |
| 2   | No (20/500)              | 0,11                          | 434,7                              | 40                        |                                               |                                  |
| 3   | No (20/500)              | 0,13                          | 454,2                              | 42,5                      |                                               |                                  |
| 4   | No (20/500)              | 0,15                          | 503,6                              | 48,6                      |                                               |                                  |
| 5   | No (20/500)              | 0,19                          | 661,3                              | 60,0                      |                                               |                                  |
| 6   | No (20/500)              | 0,24                          | 695,4                              | 66,7                      |                                               |                                  |
| 7   | No (20/500)              | 0,31                          | 794,0                              | 80,0                      |                                               |                                  |
| 8   | No (20/500)              | 0,34                          | 800,2                              | 85,0                      |                                               |                                  |
| 9   | No (20/500)              | 0,421                         | 836,3                              | 96,2                      |                                               |                                  |
| 10  | No (20/500)              | 0,49                          | 1280,7                             | 100,2                     |                                               |                                  |
| 11  | No (20/500)              | 0,512                         |                                    |                           |                                               |                                  |
| 12  | No (20/500)              | 0,528                         |                                    |                           |                                               |                                  |
| 13  | No (20/500)              | 0,54                          | 1393,1                             | 112,4                     |                                               |                                  |
| 14  | No (20/500)              | 0,54                          |                                    |                           |                                               |                                  |
| 15  | No (20/500)              | 0,55                          | 1456                               | 115,0                     | 38,6                                          | 9,53                             |



Şekil 4.2 *Nannochloropsis oculata* aşı üretimi (a) OD ve (b) KA Değerleri

#### 4.3 Kontrol Çalışmaları ve Analiz Sonuçları

Mikroalg kültürlerinin üretileceği uygun yöntemi ve NF süzüntü suyunun sentetik besi yeri ile ideal karışım oranı belirlemek amacı ile çalışmalar 3 adımda gerçekleştirilmiştir.

Manyetik karıştırma düzeneği üzerinde, tam karıştırmalı biyoreaktörler ile ve hacimli cam kaplarda geliştirilen mikroalg kültürlerine çalışma adımlarına göre hava veya CO<sub>2</sub> beslemesi yapılmıştır. Alglerin gelişimini izlemek için optik yoğunluk, klorofil-a ve kuru madde analizleri yapılmıştır. Ayrıca nutrient giderimine yönelik toplam azot ve fosfat analizleri yapılmıştır.

Farklı şartlarda gerçekleştirilen deneme gruplarının yağ biriktirme kapasitesinin de tespit edilmiştir.

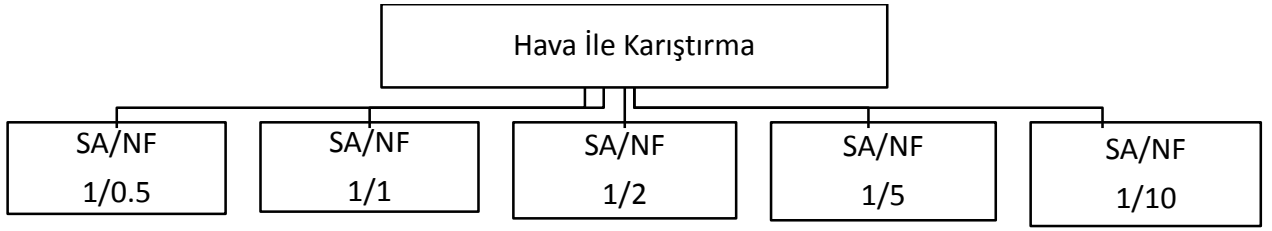
##### 4.3.1 Deneme 1 (Manyetik Karıştırma Düzeneği İle Gerçekleştirilen Çalışmalar)

Bu çalışma grubuna ait bilgi “3.2.2.1 Deneme 1 (Manyetik Karıştırma Düzeneği ile Gerçekleştirilen Çalışmalar)” bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

###### 4.3.1.1 Hava Kullanılarak Yürütülen Kesikli Çalışmalar

Çalışmanın bu bölümünde farklı SA/NF oranlarında hava kullanılarak mikroalglerin gelişimleri 10 gün boyunca izlenmiştir.

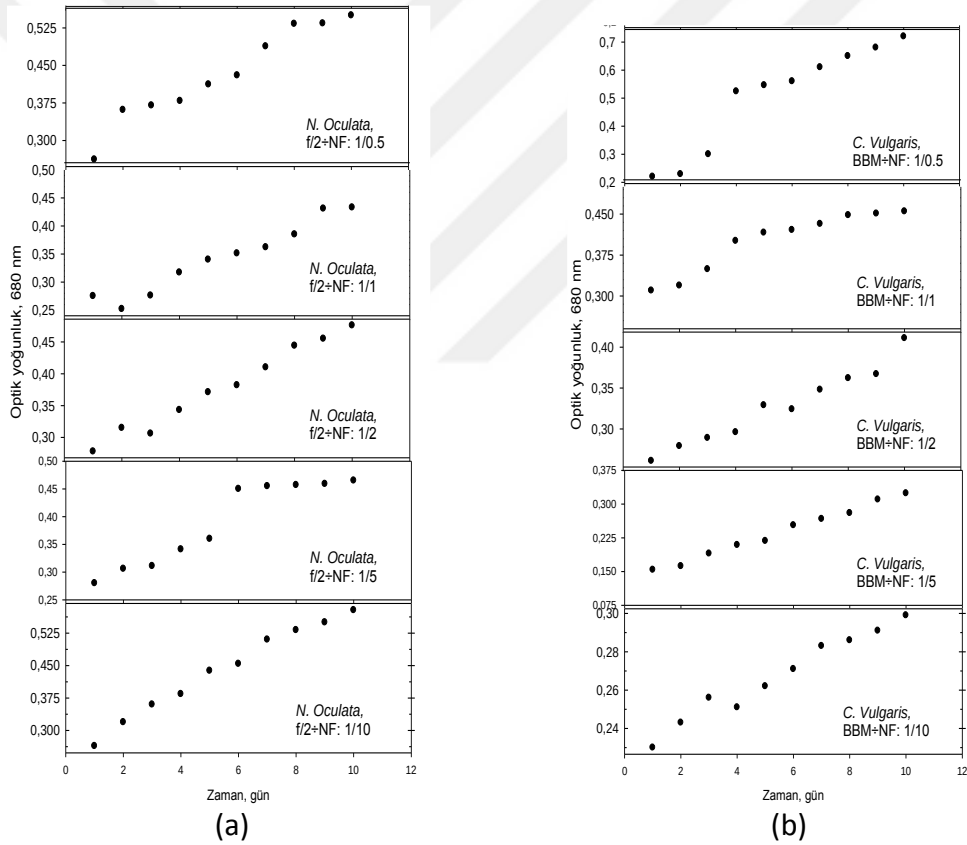
Mikroalg kültürlerinin besi yerlerine Şekil 4.3’te belirtilen oranlarda NF süzüntü suyu ilave edilmiştir.



Şekil 4.3 Manyetik Karıştırma Düzeneği İle Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi Çalışma Planı (Deneme 1)

#### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Optik Yoğunluk Değerleri

Şekil 4.4'de *N. oculata* ve *C. vulgaris* için farklı oranlarda hazırlanan besiyerleriyle gerçekleştirilen mikroalg kültürasyonu işleminin 680 nm dalga boyunda ölçülen optik yoğunluk değerleri değişimi verilmiştir.

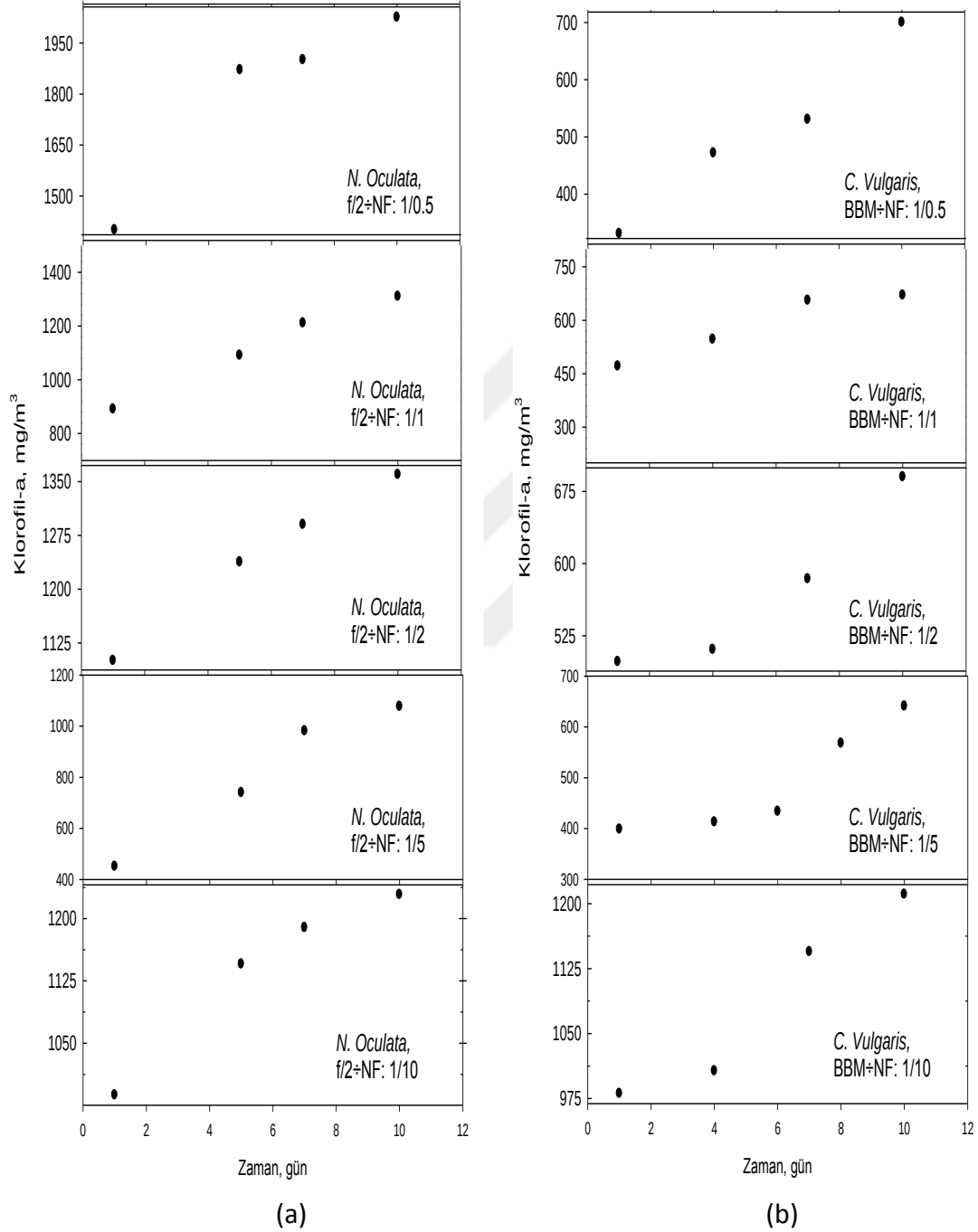


Şekil 4.4 (a) *N. oculata* için Zamanla Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm), (b) *C. vulgaris* için Zamanla Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm)

*N. oculata* için; Şekil 4.4'te en iyi gelişimin 1/0.5 oranında olduğu görülmektedir. NF çıkış suyu kullanıldığında büyüme hızının azaldığı fakat büyümenin devam ettiği görülmektedir. *C. vulgaris* için; Şekil 4.4'de en iyi büyümenin 1/0.5 oranında olduğu görülmektedir. NF çıkış suyu miktarı arttıkça büyüme hızının azaldığı 10 günlük kesikli çalışmalarda görülmektedir.

### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Klorofil-a Değerleri

Mikroalglerin gelişimini gösteren en önemli parametrelerden bir tanesi de klorofil-a tayinidir. Şekil 4.5'te *N. oculata* ve *C. vulgaris* için 10 günlük gelişim periyodunda zaman bağı olarak değişen klorofil-a değerleri verilmiştir.

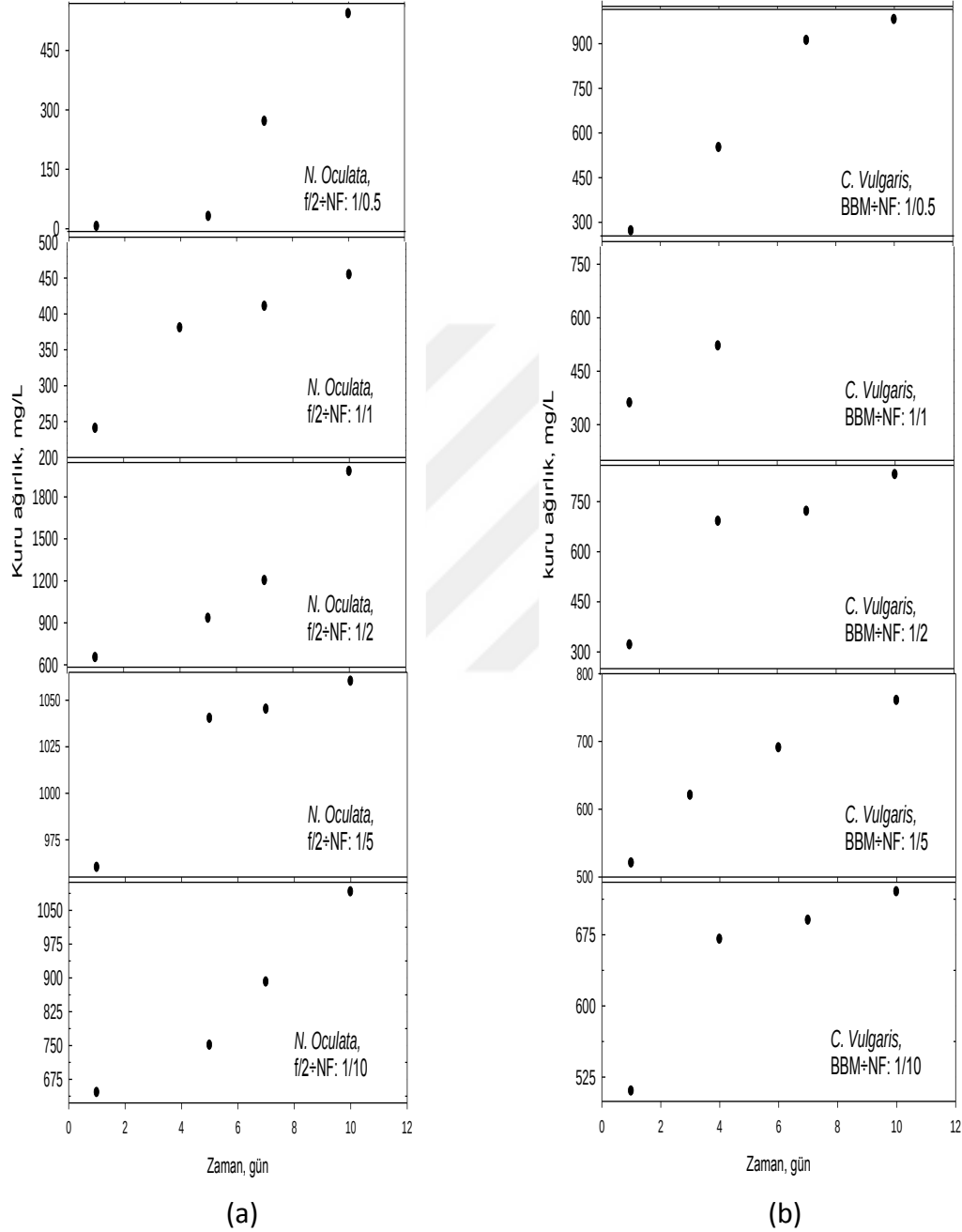


Şekil 4.5 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m³),  
(b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m³)

Şekil'deki klorofil-a değerlerine bakıldığında *N. oculata* için en iyi büyüme 1/5 oranında, *C. vulgaris* için en iyi büyüme 1/10 oranında gerçekleşmiştir.

### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Kuru Madde Değerleri

Çalışmanın bu bölümünde farklı SA/NF çıkış suyu oranlarında hava kullanılarak mikroalglerin gelişimleri kuru ağırlık analizleri ile izlenmiştir. Şekil 4.6'da *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen kuru ağırlık değerleri verilmiştir.



Şekil 4.6 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri ( mg/L),  
(b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri ( mg/L)

Şekil 4.6'daki 10 günlük büyüme periyodunda zamana bağlı olarak değişen kuru ağırlık değerlerine bakıldığında *N. oculata* için en iyi kuru ağırlık artışı 1/10 oranında, *C. vulgaris* için 1/0.5 oranında gerçekleşmiştir.

### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Toplam N Değerleri

*N. oculata* ve *C. vulgaris* türleri ile yapılan kültürasyon çalışmasında nütrient giderimini belirlemeye yönelik çalışmanın 1. ve 10. günlerinde toplam azot tayini gerçekleştirilmiştir.

*N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen Toplam N değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

*N. oculata* için en iyi giderim 1/0.5 ve *C. vulgaris* için en iyi giderim 1/1 oranında gerçekleşmiştir. Çizelge 4.4'te *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen Toplam N değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 *N. oculata* ve *C. vulgaris* İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Azot Değerleri

| <i>N. oculata</i>    |                        |                        | <i>C. vulgaris</i>   |                       |                        |
|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Besiyeri Bileşimi    | 1. Gün, Toplam N, mg/L | 10. Gün Toplam N, mg/L | Besiyeri Bileşimi    | 1. Gün Toplam N, mg/L | 10. Gün Toplam N, mg/L |
| <b>F/2÷NF: 1/0</b>   | 182,74                 | 38,6                   | <b>BBM÷NF: 1/0</b>   | 210,3                 | 24                     |
| <b>F/2÷NF: 1/0.5</b> | 30,73                  | 5,3                    | <b>BBM÷NF: 1/0.5</b> | 18,7                  | 4,91                   |
| <b>F/2÷NF: 1/1</b>   | 31,55                  | 6,7                    | <b>BBM÷NF: 1/1</b>   | 25,7                  | 2,83                   |
| <b>F/2÷NF: 1/2</b>   | 37,61                  | 8,2                    | <b>BBM÷NF: 1/2</b>   | 34,6                  | 4,03                   |
| <b>F/2÷NF: 1/5</b>   | 43,5                   | 12,2                   | <b>BBM÷NF: 1/5</b>   | 12,9                  | 4,56                   |
| <b>F/2÷NF: 1/10</b>  | 28,87                  | 10,9                   | <b>BBM÷NF: 1/10</b>  | 21,24                 | 3,28                   |

### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Fosfat Değerleri

*N. oculata* ve *C. vulgaris* türleri ile yapılan kültürasyon çalışmasında nutrient giderimini belirlemeye yönelik çalışmanın 1. ve 10. günlerinde fosfat tayini gerçekleştirilmiştir.

*N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen fosfat değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. *N. oculata* için en iyi giderim oranı ½ oranında ve *C. vulgaris* için en iyi giderim 1/1 oranında gerçekleşmiştir.

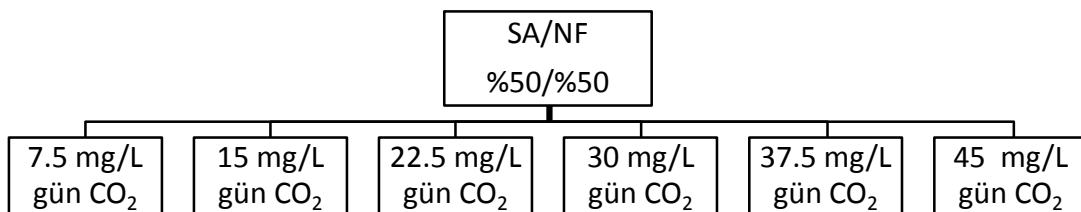
Çizelge 4.5 *N. oculata* ve *C. vulgaris* İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Fosfat Değerleri

| <i>N. oculata</i>    |                                                  |                                                  | <i>C. vulgaris</i>   |                                                  |                                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Besiyeri Bileşimi    | 1. Gün,<br>Toplam<br>PO <sub>4</sub> -P,<br>mg/L | 10. Gün<br>Toplam<br>PO <sub>4</sub> -P,<br>mg/L | Besiyeri Bileşimi    | 1. Gün,<br>Toplam<br>PO <sub>4</sub> -P,<br>mg/L | 10. Gün<br>Toplam<br>PO <sub>4</sub> -P,<br>mg/L |
| <b>F/2÷NF: 1/0</b>   | 163,17                                           | 9,53                                             | <b>BBM÷NF: 1/0</b>   | 189                                              | 26,7                                             |
| <b>F/2÷NF: 1/0.5</b> | 3,135                                            | 1,925                                            | <b>BBM÷NF: 1/0.5</b> | 5,2                                              | 0,12                                             |
| <b>F/2÷NF: 1/1</b>   | 1,886                                            | 0,241                                            | <b>BBM÷NF: 1/1</b>   | 8,2                                              | 1,25                                             |
| <b>F/2÷NF: 1/2</b>   | 5,099                                            | 0,414                                            | <b>BBM÷NF: 1/2</b>   | 6,2                                              | 0,012                                            |
| <b>F/2÷NF: 1/5</b>   | 2,34                                             | 0,231                                            | <b>BBM÷NF: 1/5</b>   | 5,3                                              | 0,343                                            |
| <b>F/2÷NF: 1/10</b>  | 6,135                                            | 0,063                                            | <b>BBM÷NF: 1/10</b>  | 7,9                                              | 1,65                                             |

Manyetik karıştırma düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların ikinci bölümünde CO<sub>2</sub> kullanılmıştır. Alglerin gelişimini izlemek için optik yoğunluk, klorofil-a ve kuru madde analizleri yapılmıştır. Nutrient giderimine yönelik toplam azot ve fosfat analizleri yapılmıştır. Ayrıca çalışma sonunda mikroalglerin yağ içerikleri belirlenmiştir.

#### 4.3.1.2 CO<sub>2</sub> Kullanılarak Yürütülen Kesikli Çalışmalar

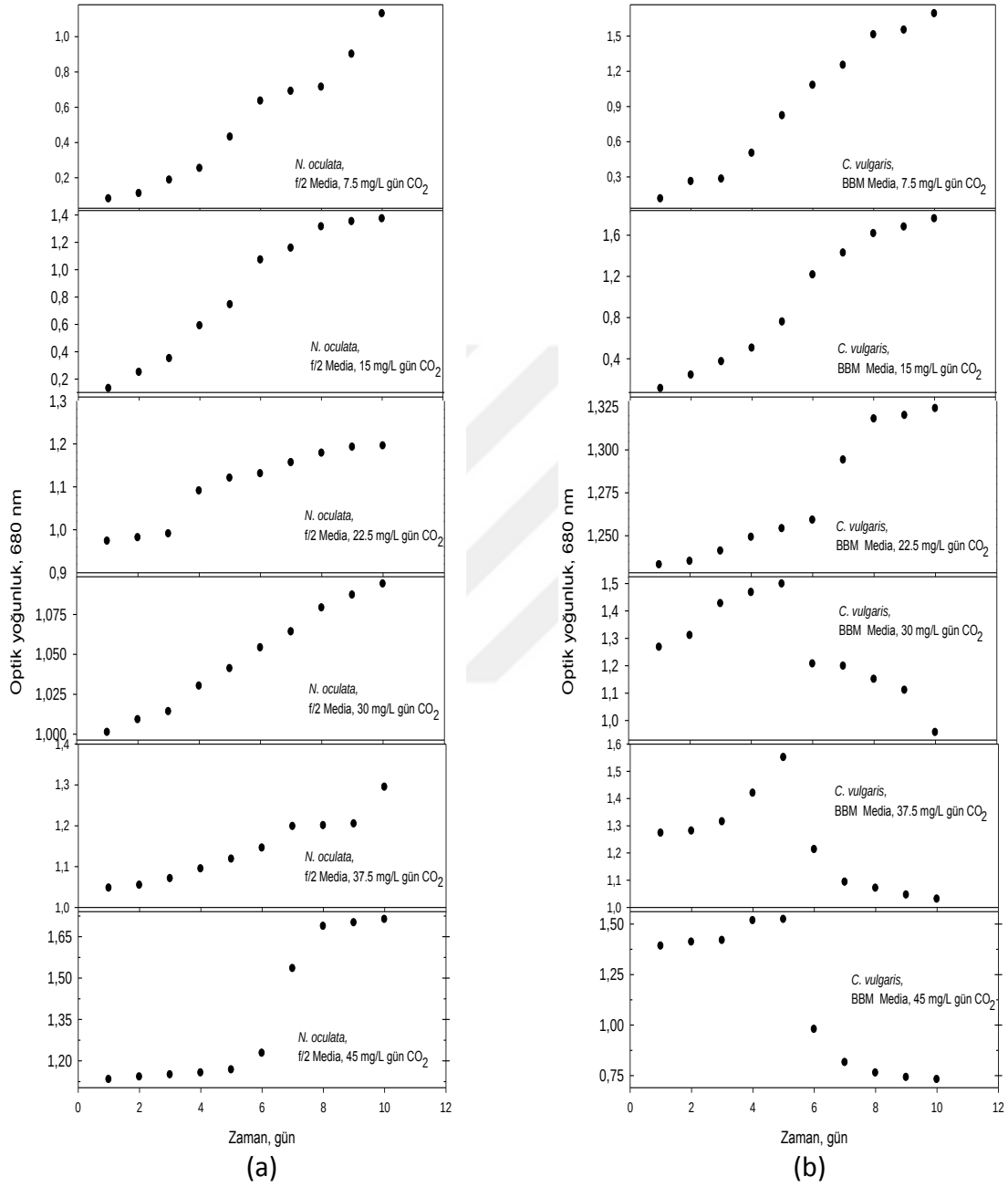
Farklı SA/NF oranlarında geliştirilen mikroalg kültürleri için en iyi gelişim gösterilen besi ortamı %50 SA/ %50 NF olarak belirlenmiştir. Çalışmalara farklı CO<sub>2</sub> besleme oranları ile 10 gün süre ile devam edilmiştir. Çalışma süresince ilave edilen CO<sub>2</sub> oranları Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Manyetik Karıştırma Düzeneği İle Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi Çalışma Planı (Deneme 1)

## Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi Optik Yoğunluk Değerleri

Şekil 4.8’de *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zamana ve CO<sub>2</sub> besleme oranına bağlı olarak değişen 680 nm’deki optik yoğunluk değerleri verilmiştir.

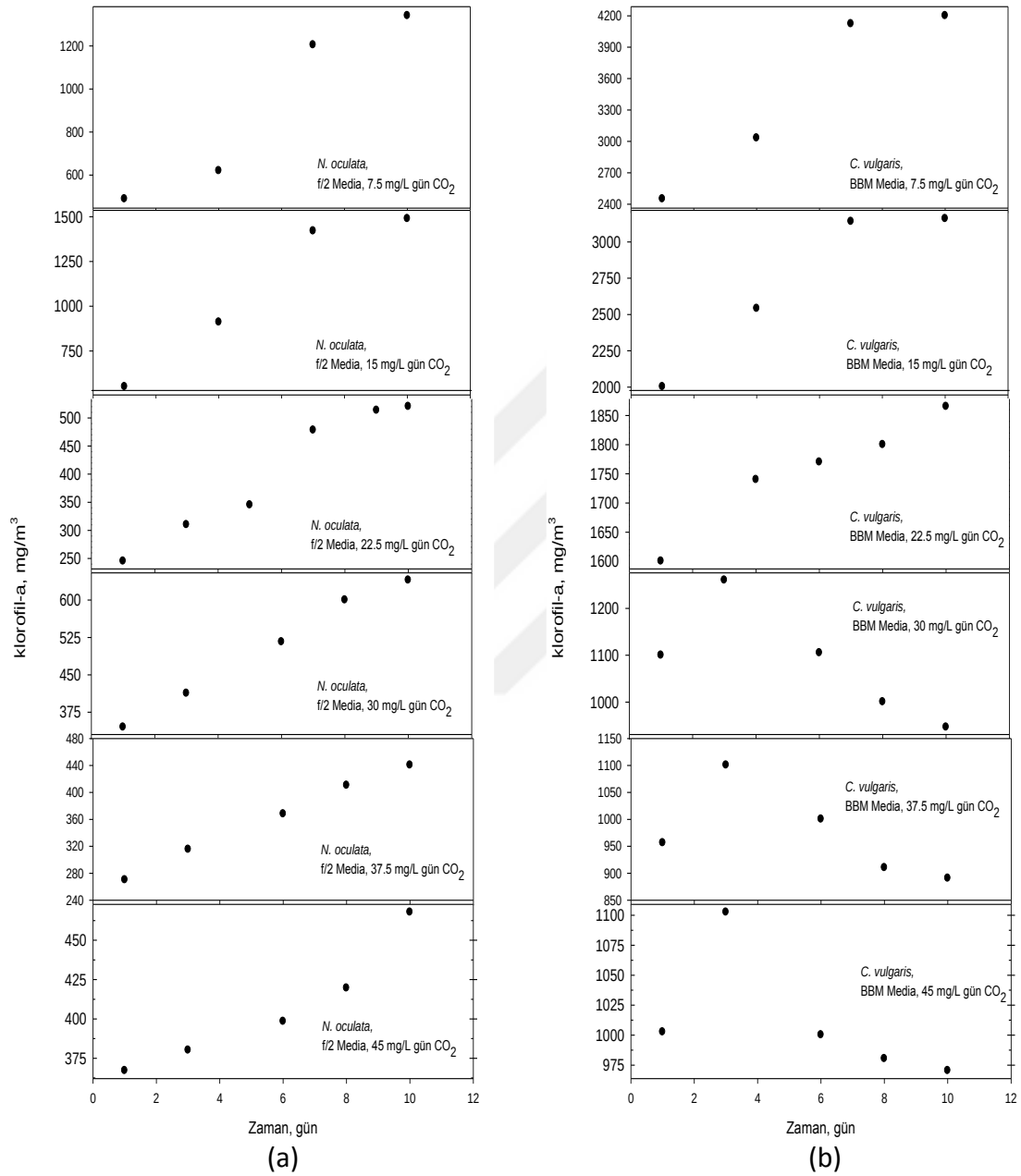


Şekil 4.8 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm), (b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm)

Şekil 4.8’de her iki tür içinde en iyi gelişimin 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleştiği görülmektedir. CO<sub>2</sub> besleme miktarı arttığında büyüme hızının azaldığı görülmektedir.

## Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Klorofil-a Değerleri

Şekil 4.9'da *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zamana ve CO<sub>2</sub> besleme oranına bağlı olarak değişen klorofil-a değerleri verilmiştir.

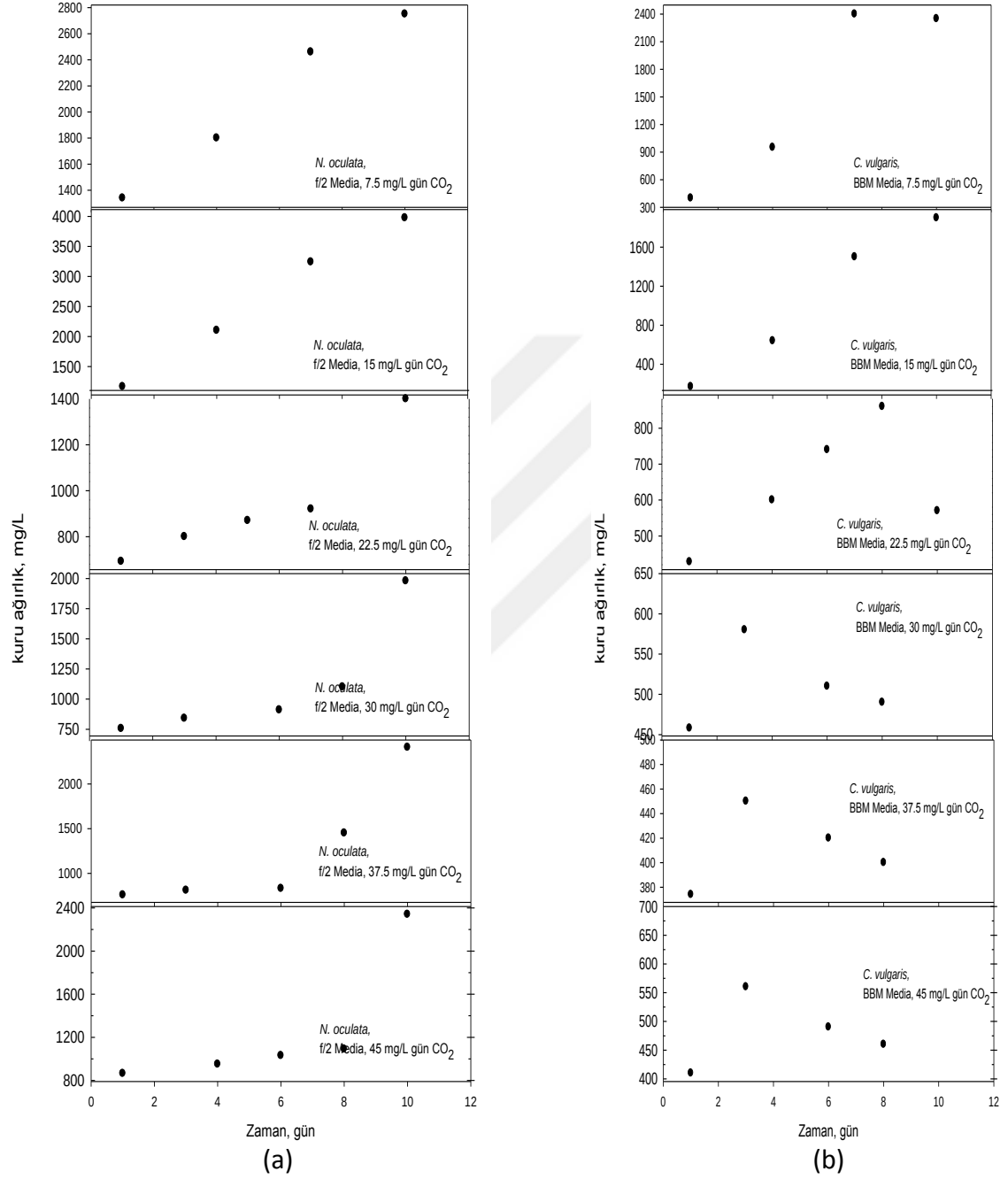


Şekil 4.9 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m<sup>3</sup>),  
(b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m<sup>3</sup>)

Şekil 4.9'da ki Mikroalglerin gelişimini gösteren en önemli parametrelerden bir tanesi olan klorofil-a değerlerine göre her iki tür için en iyi gelişimin 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleştiği görülmektedir. CO<sub>2</sub> besleme miktarı arttığında büyüme hızının azaldığı görülmektedir.

## Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Kuru Madde Değerleri

Şekil 4.10'da *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zamana ve CO<sub>2</sub> besleme oranına bağlı olarak değişen kuru ağırlık değerleri verilmiştir.



Şekil 4.10 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L),  
(b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L)

Şekil 4.10'a göre *N. oculata* için en iyi gelişimin 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile, *C. vulgaris* için 7.5 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleştiği görülmektedir.

CO<sub>2</sub> besleme miktarı arttığında büyüme hızının azaldığı görülmektedir.

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Toplam N Değerleri

*N. oculata* ve *C. vulgaris* için zamana ve CO<sub>2</sub> besleme oranına bağlı olarak nütrient giderimini belirlemek için çalışmanın 1. ve 10. günlerinde toplam azot tayini gerçekleştirilmiştir.

Toplam azot değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. *N. oculata* ve *C. vulgaris* için en iyi giderimin 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.6 *N. Oculata* ve *C. vulgaris* İçin Zamana ve CO<sub>2</sub> Besleme Oranına Bağlı Olarak Değişen Azot Değerleri

| <i>N. oculata</i>          |                        |                        | <i>C. vulgaris</i>         |                       |                        |
|----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| CO <sub>2</sub> Miktarları | 1. Gün, Toplam N, mg/L | 10. Gün Toplam N, mg/L | CO <sub>2</sub> Miktarları | 1. Gün Toplam N, mg/L | 10. Gün Toplam N, mg/L |
| 7.5 mg/L gün               | 12,89                  | 1,14                   | 7.5 mg/L gün               | 37,60                 | 6,13                   |
| 15 mg/L gün                | 14,81                  | 0,40                   | 15 mg/L gün                | 34,50                 | 0,09                   |
| 22.5 mg/L gün              | 14,5                   | 1,47                   | 22.5 mg/L gün              | 30,20                 | 0,4                    |
| 30 mg/L gün                | 11,45                  | 0,64                   | 30 mg/L gün                | 29,70                 | 0,38                   |
| 37.5 mg/L gün              | 16,60                  | 0,76                   | 37.5 mg/L gün              | 31,40                 | 0,39                   |
| 45 mg/L gün                | 12,35                  | 2,15                   | 45 mg/L gün                | 30,10                 | 0,40                   |

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Fosfat Değerleri

*N. oculata* ve *C. vulgaris* için zamana ve CO<sub>2</sub> besleme oranına bağlı olarak nütrient giderimini belirlemek için çalışmanın 1. ve 10. günlerinde fosfat tayini gerçekleştirilmiştir. Fosfat değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. *N. oculata* ve *C. vulgaris* için en iyi giderimin 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.7 *N. oculata* ve *C. vulgaris* İçin Zamana Bağlı Olarak Değişen Fosfat Değerleri

| <i>N. oculata</i>          |                                         |                                         | <i>C. vulgaris</i>         |                                         |                                         |
|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> Miktarları | 1. Gün, Toplam PO <sub>4</sub> -P, mg/L | 10. Gün Toplam PO <sub>4</sub> -P, mg/L | CO <sub>2</sub> Miktarları | 1. Gün, Toplam PO <sub>4</sub> -P, mg/L | 10. Gün toplam PO <sub>4</sub> -P, mg/L |
| 7.5 mg/L gün               | 5,84                                    | 2,23                                    | 7.5 mg/L gün               | 14,664                                  | 4,39                                    |
| 15 mg/L gün                | 4,89                                    | 1,91                                    | 15 mg/L gün                | 12,086                                  | 3,59                                    |
| 22.5 mg/L gün              | 6,2                                     | 0,96                                    | 22.5 mg/L gün              | 10,1                                    | 2,94                                    |
| 30 mg/L gün                | 5,84                                    | 0,59                                    | 30 mg/L gün                | 11,2                                    | 3,09                                    |
| 37.5 mg/L gün              | 4,94                                    | 0,07                                    | 37.5 mg/L gün              | 10,6                                    | 3,96                                    |
| 45 mg/L gün                | 5,5                                     | 0,53                                    | 45 mg/L gün                | 10,2                                    | 2,08                                    |

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Yağ İçerikleri

Çizelge 4.8’de *N. oculata* ve *C. vulgaris* için CO<sub>2</sub> besleme oranına bağlı olarak 10. Gün sonunda biriktirdiği yağ değerleri verilmiştir. Çizelge 4.8’e göre *N. oculata* için en iyi gelişimin 22.5 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile, *C. vulgaris* için 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.8 *N. oculata* ve *C. vulgaris* İçin Zamana ve CO<sub>2</sub> Besleme Oranına Bağlı Olarak Değişen Yağ Birikimleri

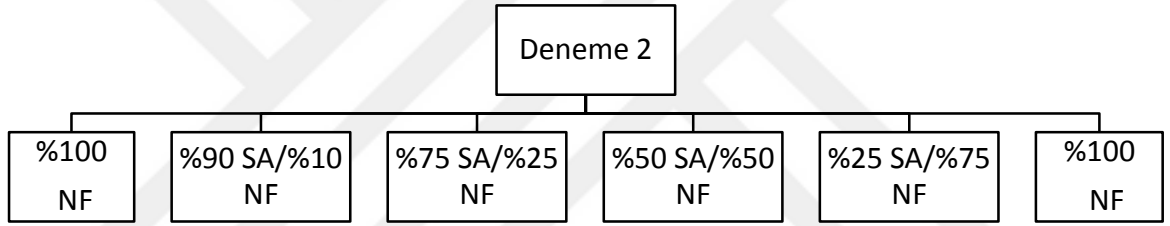
| <i>N. oculata</i>          |                                  | <i>C. vulgaris</i>         |                                  |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| CO <sub>2</sub> Miktarları | 10. Gün Toplam Yağ Miktarları, % | CO <sub>2</sub> Miktarları | 10. Gün Toplam Yağ Miktarları, % |
| 7.5 mg/L gün               | 10,0                             | 7.5 mg/L gün               | 11,0                             |
| 15 mg/L gün                | 13,0                             | 15 mg/L gün                | 14,0                             |
| 22.5 mg/L gün              | 14,0                             | 22.5 mg/L gün              | 10,0                             |
| 30 mg/L gün                | 13,1                             | 30 mg/L gün                | 9,0                              |
| 37.5 mg/L gün              | 13,8                             | 37.5 mg/L gün              | 10,6                             |
| 45 mg/L gün                | 14,2                             | 45 mg/L gün                | 1,9                              |

#### 4.3.2 Deneme 2 (Biyoreaktörler Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar)

##### 4.3.2.1 Biyoreaktörlerde Farklı Konsantrasyonlarda NF kullanımı

Çalışmanın bu bölümünde, hava beslemesi yapılarak yürütülen çalışmalar tam karışimli biyoreaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma grubuna ait bilgi “3.2.2.2 Deneme 2 (Biyoreaktörler İle Gerçekleştirilen Çalışmalar)” bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

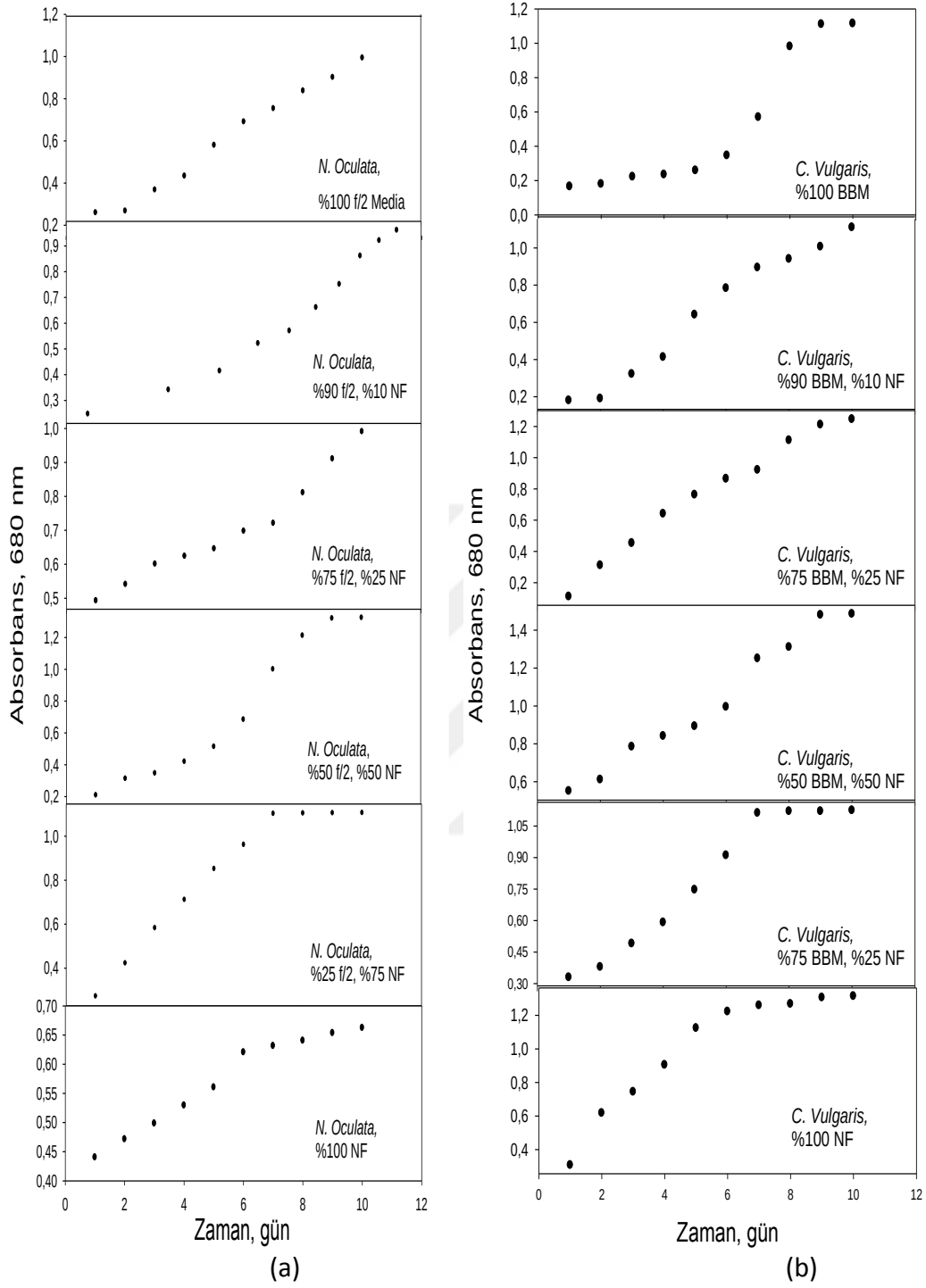
Alglerin gelişimini izlemek için optik yoğunluk, klorofil-a ve kuru madde analizleri yapılmıştır. Nutrient giderimine yönelik toplam azot ve fosfat analizleri yapılmıştır. Ayrıca çalışma sonunda mikroaglerin yağ içerikleri belirlenmiştir. Mikroalg kültürlerinin besi yerlerine Şekil 4.11’de belirtilen oranlarda NF süzüntü suyu ilave edilmiş ve mikroalglerin gelişimleri yaklaşık 10 gün boyunca izlenmiştir.



Şekil 4.11 Biyoreaktörler İle Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi Çalışma Planı (Deneme 2)

##### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Optik Yoğunluk Değerleri

Şekil 4.12’de *N. oculata* ve *C. vulgaris* için farklı oranlarda hazırlanan besiyerleriyle gerçekleştirilen mikroalg kültivasyon işleminin 680 nm dalga boyunda ölçülen optik yoğunluk değerleri değişimi verilmiştir.

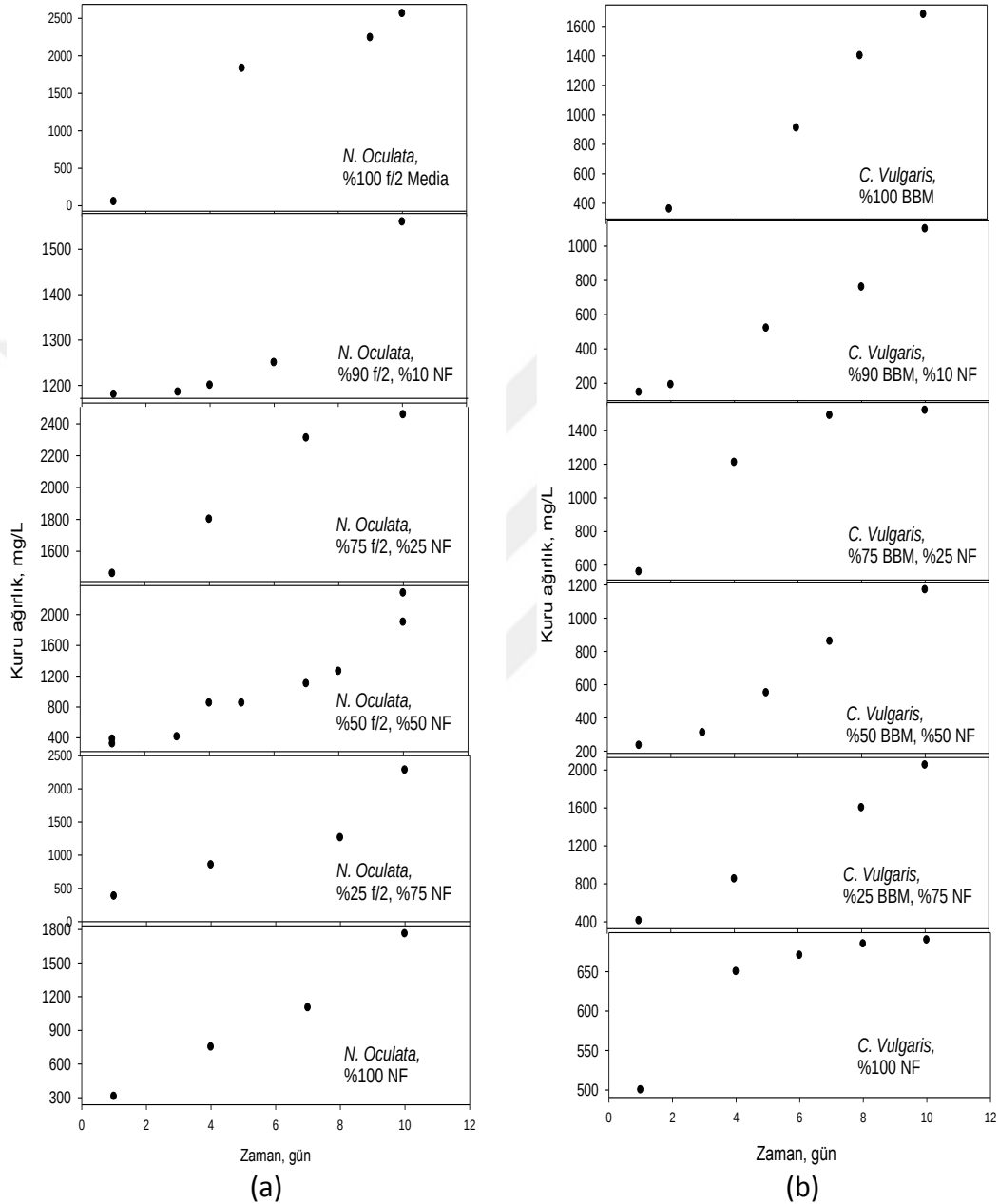


Şekil 4.12 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm), (b) *C. vulgaris* için Zamanla Bağlı Olarak Değişen Optik Yoğunluk Değerleri (680 nm)

Şekil 4.12’de her iki tür içinde en iyi gelişimin %50 SA/%50 NF oranında olduğu görülmektedir. NF çıkış suyu kullanıldığında büyüme hızının azaldığı fakat büyümenin devam ettiği görülmektedir.

## Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Kuru Ağırlık

Şekil 4.13'te *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen kuru ağırlık değerleri verilmiştir.

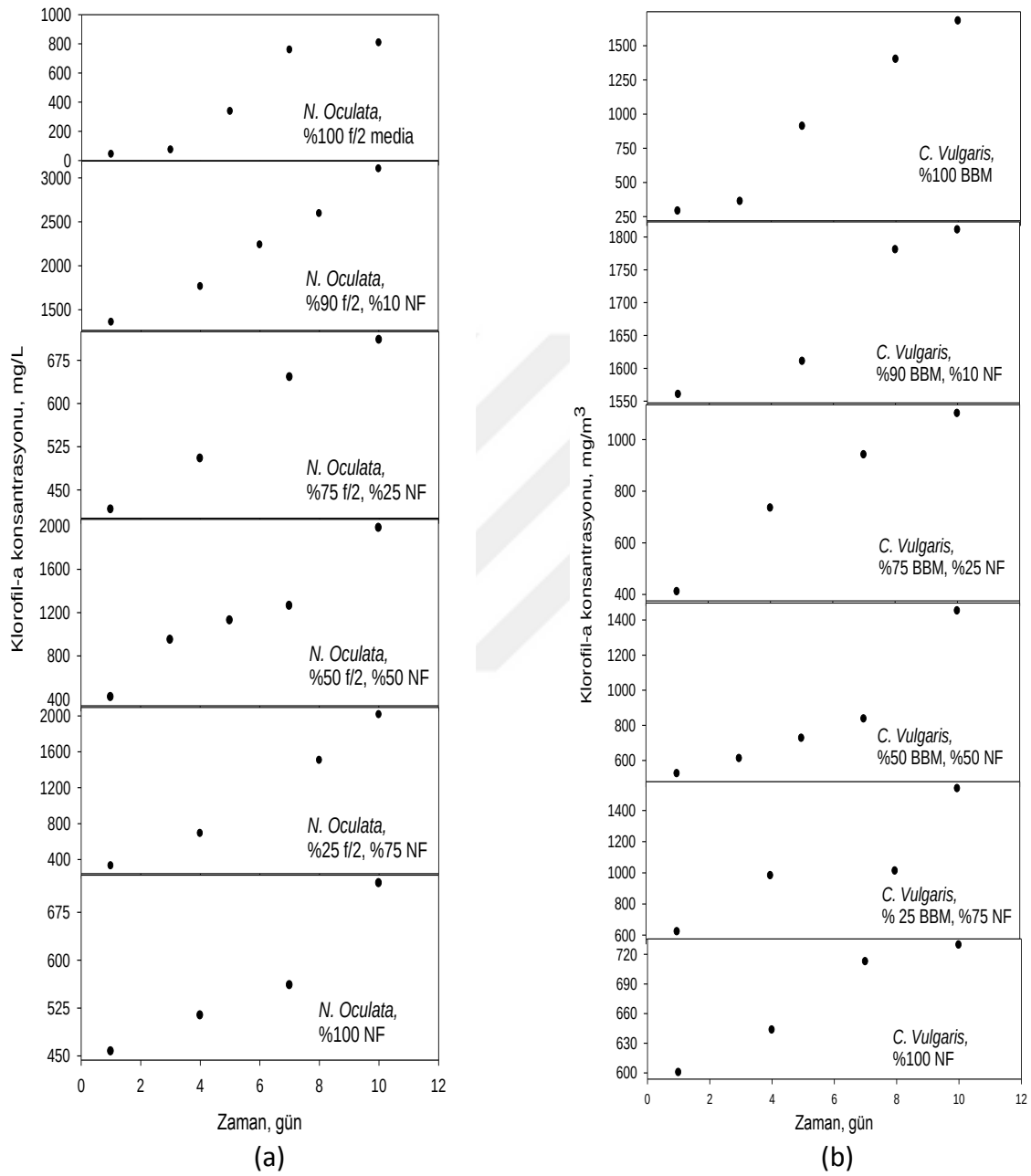


Şekil 4.13 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L),  
(b) *C. vulgaris* için Zaman Bağılı Olarak Değişen Kuru Ağırlık Değerleri (mg/L)

Şekil 4.13'te ki 10 günlük büyüme periyodunda zamana bağılı olarak değişen kuru ağırlık değerlerine bakıldığında *N. oculata* için en iyi kuru ağırlık artışı %100 SA/%100 NF oranında, *C. vulgaris* için %25 SA/%75 NF oranında gerçekleşmiştir.

## Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Klorofil-a Değerleri

Şekil 4.14'te *N. oculata* ve *C. vulgaris* için 10 günlük gelişim periyodunda zaman bağılı olarak değişen klorofil-a değerleri verilmiştir.

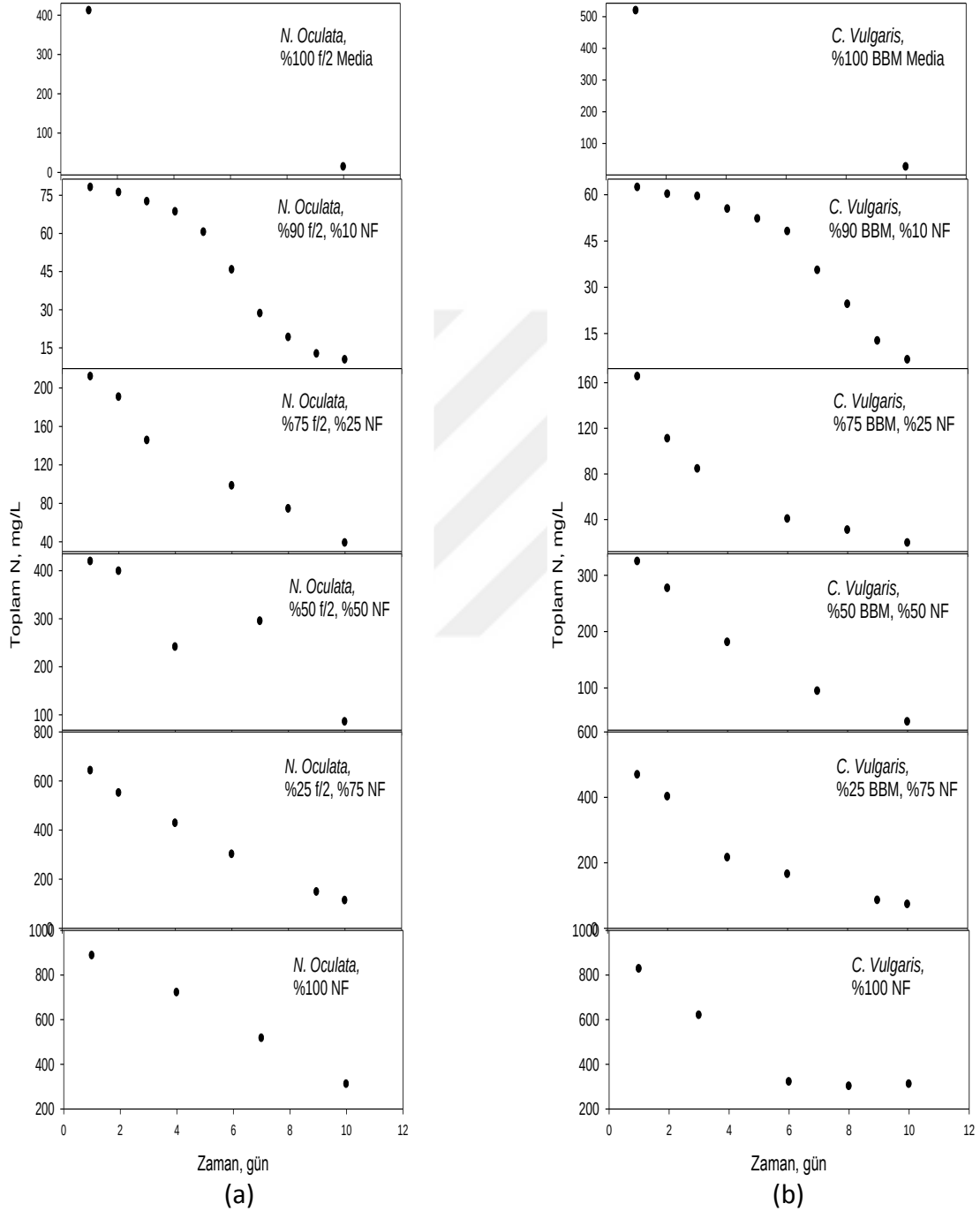


Şekil 4.14 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m<sup>3</sup>), (b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Klorofil-a Değerleri (mg/m<sup>3</sup>)

Şekil 4.14'te Klorofil-a değerlerine bakıldığında *N. oculata* için en iyi büyüme %90 SA/%10 NF oranında, *C. vulgaris* için en iyi büyüme %90 SA/%10 NF oranında gerçekleşmiştir.

## Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - NH<sub>4</sub><sup>+</sup>- N Giderimi

Şekil 4.15'te *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen Toplam N değerleri verilmiştir.

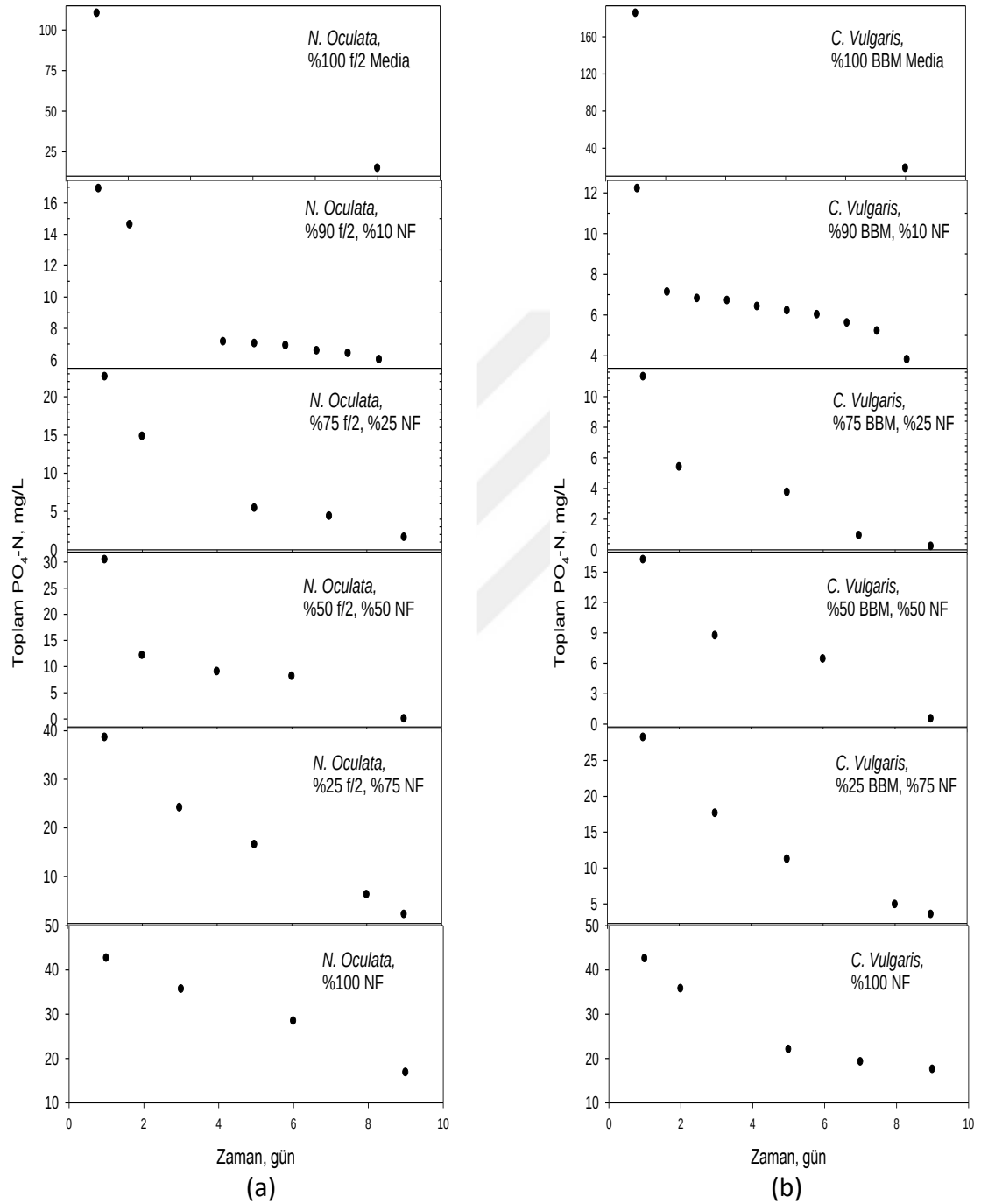


Şekil 4.15 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Toplam N Değerleri (mg/L),  
(b) *C. vulgaris* için Zaman Bağılı Olarak Değişen Toplam N Değerleri (mg/L)

Şekil 4.15'e göre her iki tür için de NF miktarı arttıkça nütrient gideriminin de arttığı görülmektedir.

### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - $PO_4^{3-}$ Giderimi

Şekil 4.16'da *N. oculata* ve *C. vulgaris* için zaman bağılı olarak değişen fosfat değerleri verilmiştir.



Şekil 4.16 (a) *N. oculata* için Zamana Bağlı Olarak Değişen Toplam Fosfat Değerleri (mg/L), (b) *C. vulgaris* için Zaman Bağlı Olarak Değişen Fosfat Değerleri (mg/L)

Şekil 4.16'ya göre her iki tür için de NF miktarı arttıkça nütrient gideriminin de arttığı görülmektedir.

#### Farklı SA/NF Oranlarında Mikroalg Gelişimi - Yağ İçerikleri

Çizelge 4.9'da *N. oculata* ve *C. vulgaris*'in çalışma sonundaki yağ içerikleri % olarak verilmiştir.

Çizelge 4.9 *N. oculata* ve *C. vulgaris*'in Çalışma Sonundaki Yağ İçerikleri

| Besiyeri Bileşimi | <i>N. oculata</i>              | Besiyeri Bileşimi | <i>C. vulgaris</i>             |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|
|                   | 10. Gün Sonunda Yağ İçeriği, % |                   | 10. Gün Sonunda Yağ İçeriği, % |
| %90 F/2, %10 NF   | 27                             | %90 BBM, %10 NF   | 24,50                          |
| %75 F/2, %25 NF   | 34                             | %75 BBM, %25 NF   | 29,50                          |
| %50 F/2, %50 NF   | 40                             | %50 BBM, %50 NF   | 31                             |
| %25 F/2, %75 NF   | 46                             | %25 BBM, %75 NF   | 36                             |
| %100 NF           | 30,10                          | %100 NF           | 28                             |

#### 4.3.2.2 Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi

Çalışmanın devamında biyoreaktörlerde gelişimi izlenen *C.vulgaris* için ideal gelişim gösterdiği besiyeri bileşiminin %5 SA/% 50NF olduğu görülmüştür.

*C.vulgaris* 'in gelişimi %50 SA/%50 NF besi ortamları hazırlanan biyoreaktörlerden birisine hava bir diğerine CO<sub>2</sub> beslemesi yapılarak 25 gün süre ile takip edilmiştir.

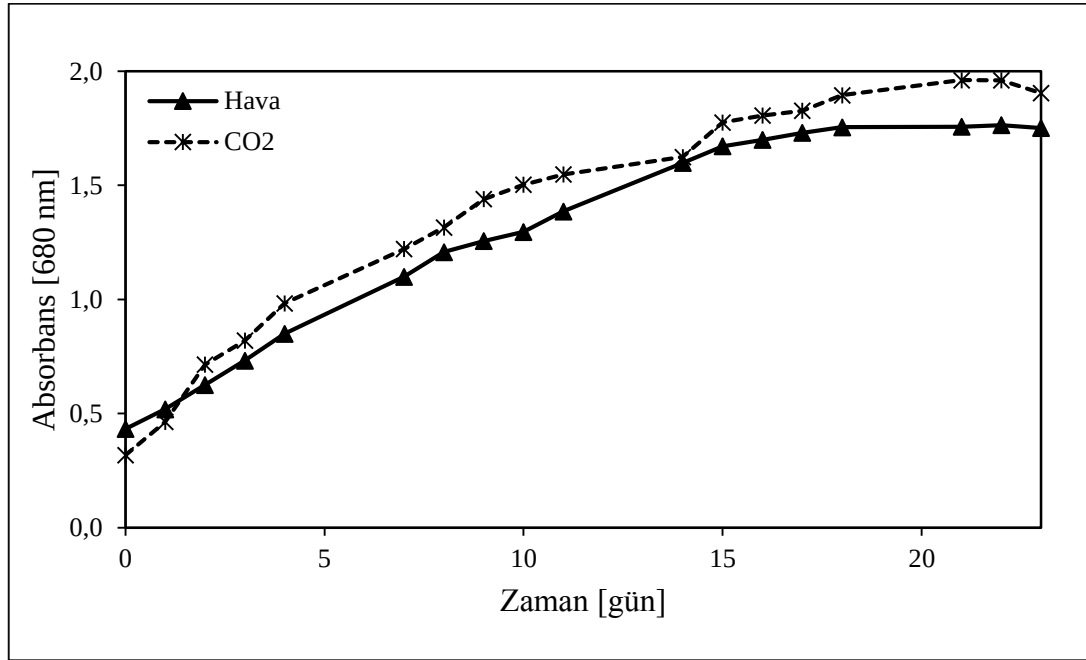
CO<sub>2</sub> kullanılarak yürütülen çalışmalarda alglerin gelişimini izlemek için optik yoğunluk, klorofil-a ve kuru madde analizleri yapılmıştır.

Nutrient giderimine yönelik toplam azot ve fosfat analizleri yapılmıştır. Ayrıca çalışma sonunda mikroalglerin yağ içerikleri belirlenmiştir.

Reaktörde meydana gelen değişimler aşağıda tanımlanmıştır.

### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - Optik Yoğunluk Değerleri

*C. vulgaris*'in gelişimi fermentörlere hava ve CO<sub>2</sub> gazı beslemeleri yapılarak karşılaştırılmıştır. CO<sub>2</sub> gazı beslemesi ile mikroalglerin zamana karşı absorbands değerleri 0.318–1.904 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Fermentöre hava beslemesinde ise absorbands değerlerinin 0.433–1.751 arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. (Şekil 4.17)



Şekil 4.17 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Absorbans Değerlerinin Değişimi

### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - Kuru Ağırlık

CO<sub>2</sub> gazı beslemesi ile *C. vulgaris*'in kuru ağırlık değeri 108 mg/L değerinden 850 mg/L değerine yükselmiştir. Fermentöre hava beslemesinde ise kuru ağırlık değerlerinin 155 mg/L değerinden 928 mg/L değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. (Şekil 4.18) Kuru ağırlık ve absorbands arasında bir ilişki kurulacak olursa aşağıdaki gibi bir eşitlik elde edilir:

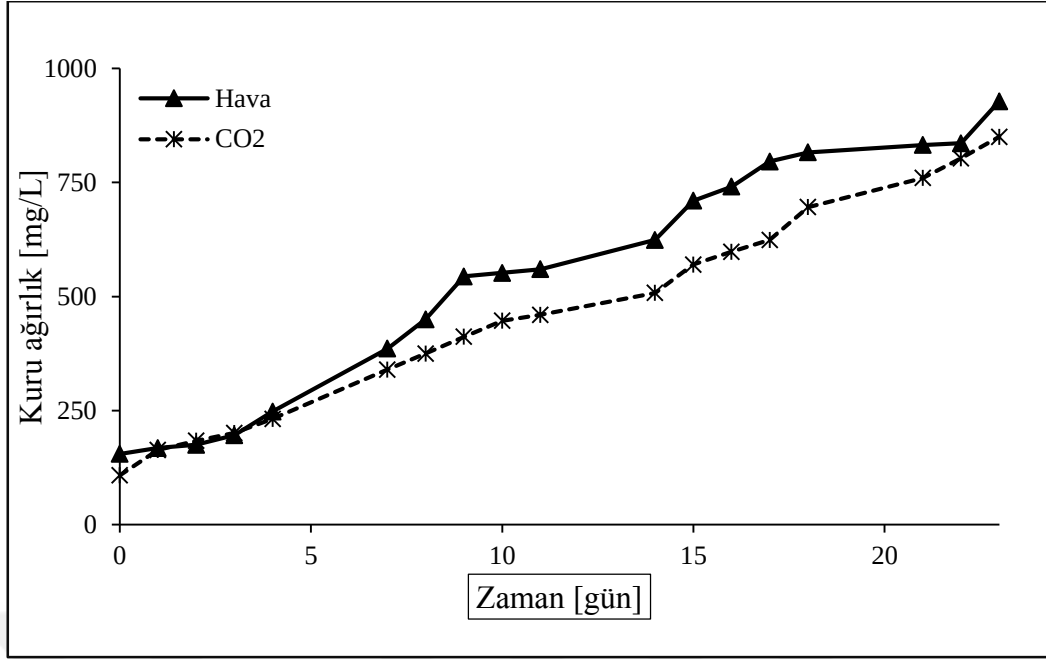
Hava için;

$$OD = 0.0024 \times KA + 0.1666$$

CO<sub>2</sub> için;

$$OD = 0.006 \times KA - 0.261$$

eşitlikte OD absorbands değerini KA ise kuru ağırlık değerlerini ifade etmektedir.

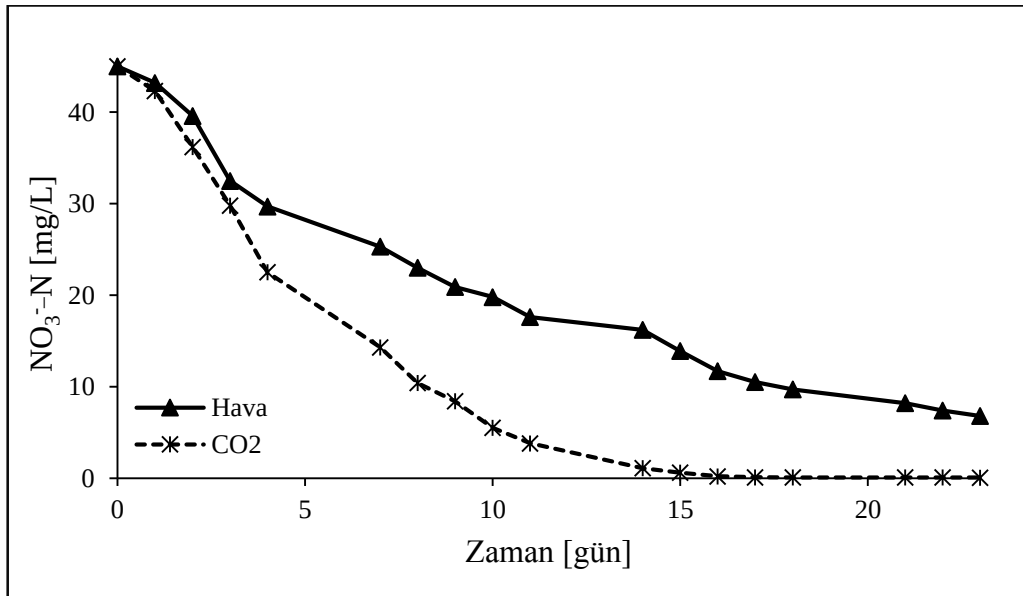


Şekil 4.18 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Kuru Ağırlık Değerlerinin Değişimi

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C. vulgaris* Gelişimi - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N Giderimi

CO<sub>2</sub> gazı ortamında *C. vulgaris*'in NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N neredeyse tamamının gideriminin sağlandığı görülmüştür.

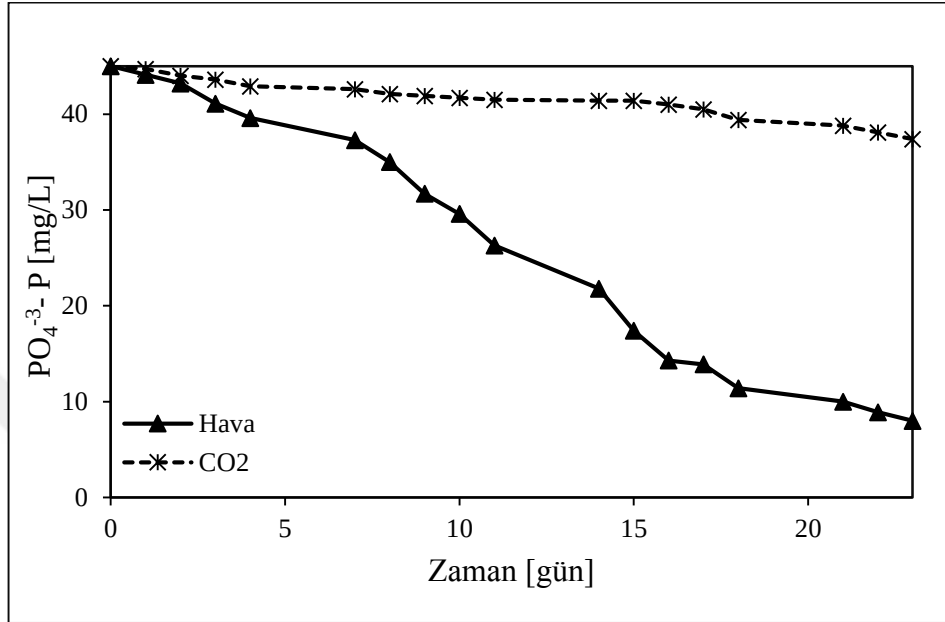
Hava beslemesinde ise NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N yaklaşık olarak % 85 nin gideriminin gerçekleştiği görülmüştür. (Şekil 4.19)



Şekil 4.19 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N Giderimi

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P Giderimi

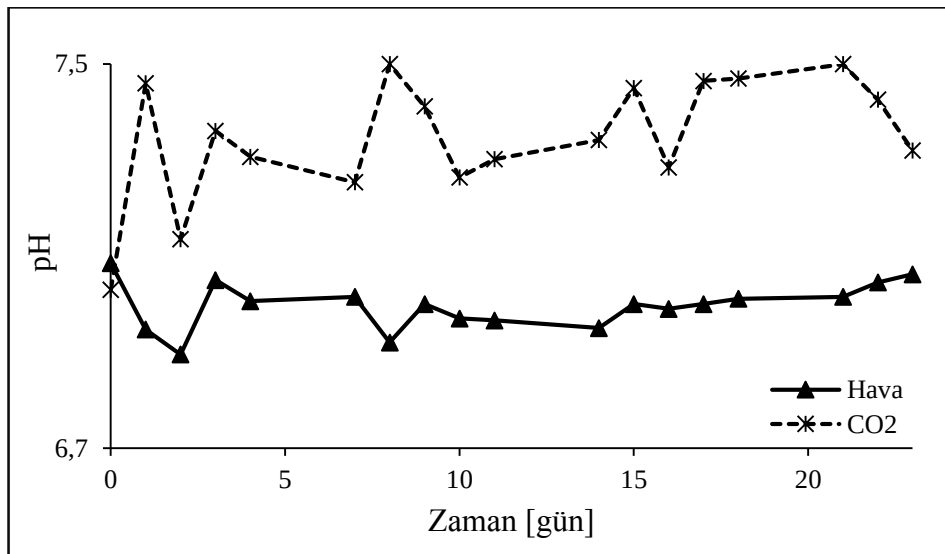
CO<sub>2</sub> gazı ortamında mikroalglerin yaklaşık olarak % 17 PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P giderimi sağladığı tespit edilmiştir. Hava beslemesinde ise PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P yaklaşık % 82 giderim gerçekleştiği tespit edilmiştir. (Şekil 4.20)



Şekil 4.20 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P Giderimi

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - pH Değişimi

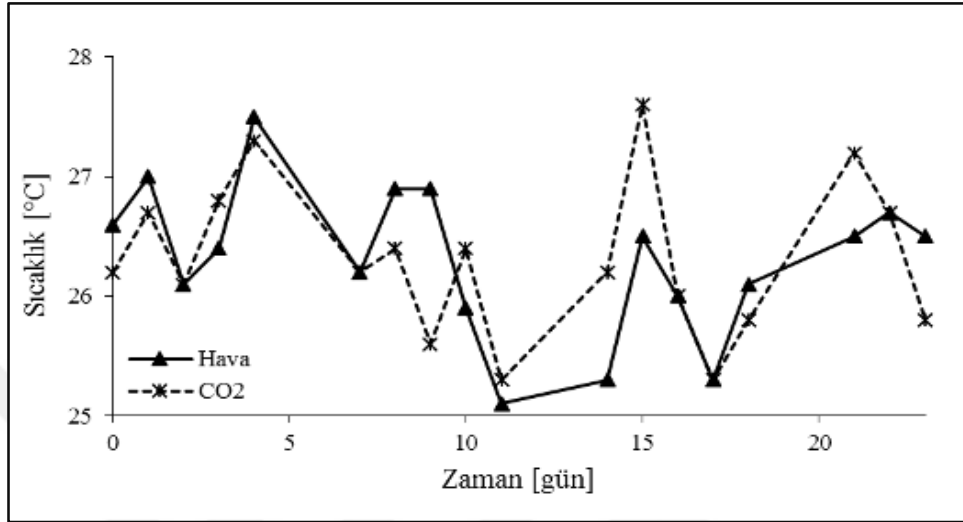
CO<sub>2</sub> gazı ortamında geliştirilen mikroalg prosesinde pH değişim grafiği aşağıdaki şekilde görülmektedir. Ortalama pH değerinin 7.349 olduğu tespit edilmiştir. Hava beslemesinde ise ortalama pH değerinin 7 olduğu tespit edilmiştir. (Şekil 4.21)



Şekil 4.21 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde pH Değerlerinin Değişimi

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - Sıcaklık Değişimi

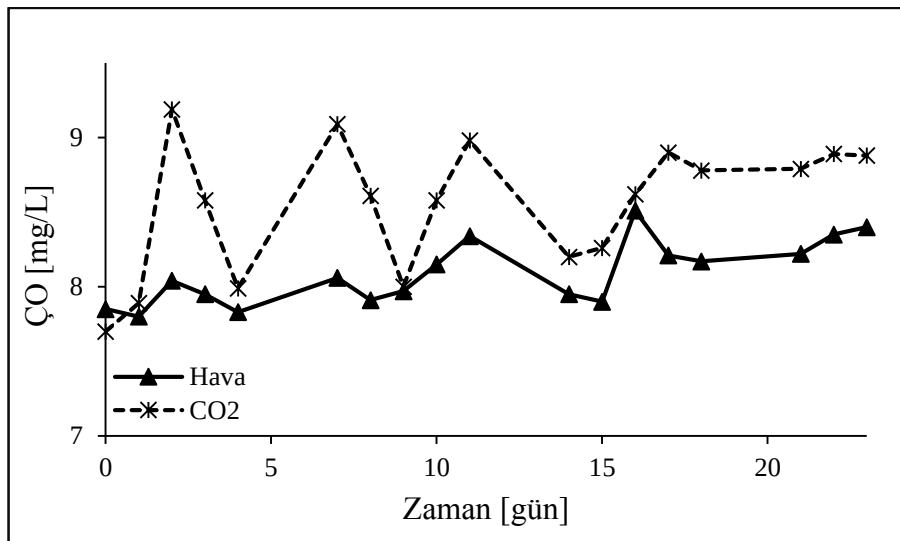
Deneysel çalışmalar esnasında CO<sub>2</sub> gazı ortamında geliştirilen mikroalg prosesinde ortalama sıcaklık değerlerinin 26,3 °C olduğu belirlenmiştir. Hava beslemesi yapılan fermentörde ise ortalama sıcaklık değerinin 26,3 °C olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 4.22)



Şekil 4.22 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Sıcaklık Değerlerinin Değişimi

#### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - Çözünmüş Oksijen Değişimi

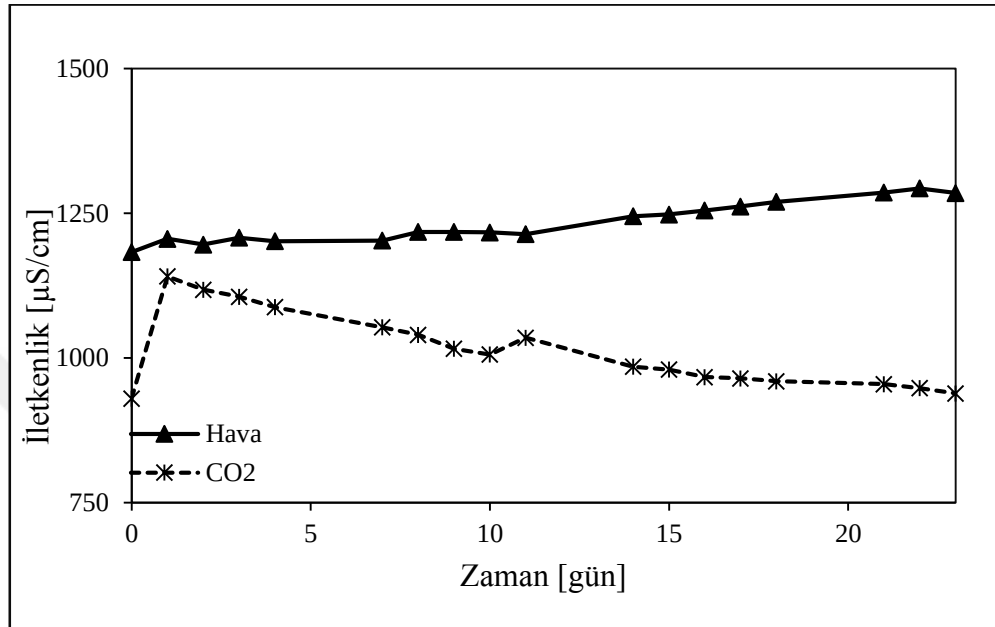
Deneysel çalışmalar esnasında CO<sub>2</sub> gazı ortamında geliştirilen mikroalg prosesinde çözünmüş oksijen değerleri genellikle 7,7–9,2 mg/L arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Hava beslemesi yapılan fermentörde ise çözünmüş oksijen değerleri ise 7,8–8,51 mg/L arasında değiştiği gözlemlenmiştir. (Şekil 4.23)



Şekil 4.23 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde Çözünmüş Oksijen Değerlerinin Değişimi

### Farklı CO<sub>2</sub> Oranlarında *C.vulgaris* Gelişimi - İletkenlik Değişimi

Deneysel çalışmalar esnasında CO<sub>2</sub> gazı ortamında ortalama iletkenlik değerleri 1013  $\mu\text{S/cm}$  aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Hava beslemesi yapılan fermentörde ortalama iletkenlik değeri 1234  $\mu\text{S/cm}$  aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. (Şekil 4.24)



Şekil 4.24 Hava ve CO<sub>2</sub> Gazı Beslemelerinde İletkenlik Değerlerinin Değişimi

### 4.3.3 Deneme 3 (Mikroalg Üretimi)

Çalışmanın bu bölümünde; Farklı şartlar altında, farklı besiyeri bileşimlerinde farklı CO<sub>2</sub> konsantrasyonları ile büyütülen kültürlerle ait en iyi gelişim oranı tespit edilmiştir.

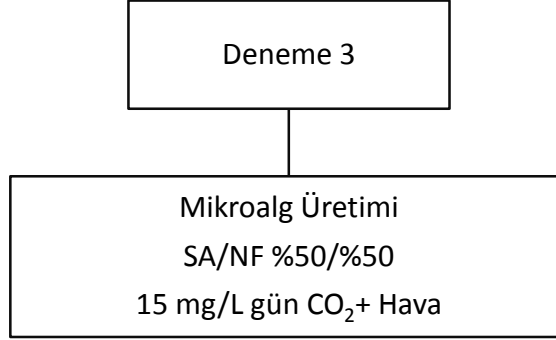
Her iki tür için de yapılan kesikli çalışmalar sonucunda 1 SA/1 NF ve %50 SA/%50 NF oranlarında 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile en iyi gelişimin gerçekleştiği tespit edilmiştir.

*C. vulgaris* ve *N. oculata* türlerinin bu oranlarda geliştirildiğinde enerji üretim potansiyellerinin belirlenebilmesi amacı ile büyük hacimli kaplarda mikroalg üretimi yapılmıştır.

Hava ve CO<sub>2</sub> beslemesi yapılarak yürütülen çalışmalar 6 L'lik steril edilmiş cam kaplarda gerçekleştirilmiştir. Her iki tür içinde laboratuvar da sıcaklık oda sıcaklığında 22±2°C'de sabit tutulmuştur. Işık kaynağı olarak Wiselight marka 24W day-light tasarruflu ampüller-(Tekfen, TLD36 watt) floresan lambalar kullanılmıştır. Ortamın 1000 lüks ışık

şiddeti ile sürekli aydınlık kalması sağlanmıştır. Uygulanan ışık şiddeti ışık metre (Licor, LI-250) ile kontrol edilmiştir.

Şekil 4.25'teki oranlarda hazırlanan mikroalglerin gelişimini izlemek için optik yoğunluk ve kuru madde analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.25 Mikroalg Üretimi (Deneme 3) Çalışma Planı

#### 4.4 Hasat Çalışmaları

Gelişimi düzenli olarak takip edilen iki farklı tür optik yoğunluğu 2'ye ulaştığında santrifüj ile hasat edilere biyokütleler besi ortamından ayrılmıştır.

Santrifüj işlemi 45 dakika 2500 RPM'de Becker Coulter Allegra X-12 Centrifuge cihazı ile yapılmıştır.

#### 4.5 Mikroalgal Biyokütleden Enerji Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi

##### 4.5.1 Biyometan

Organik atıklardan gaz üreitimi yani Biyogaz; anaerobik çürüme sırasında mikrobiyolojik floranın etkisi ile organik maddenin CH<sub>4</sub> (%55-75) ve CO<sub>2</sub> (%25-45) gazına dönüşmesidir. Çevre koşulları, toksisite, C/N oranı ve Ph gibi faktörler biypgaz üretim potansiyelini etkileyebilmektedir.

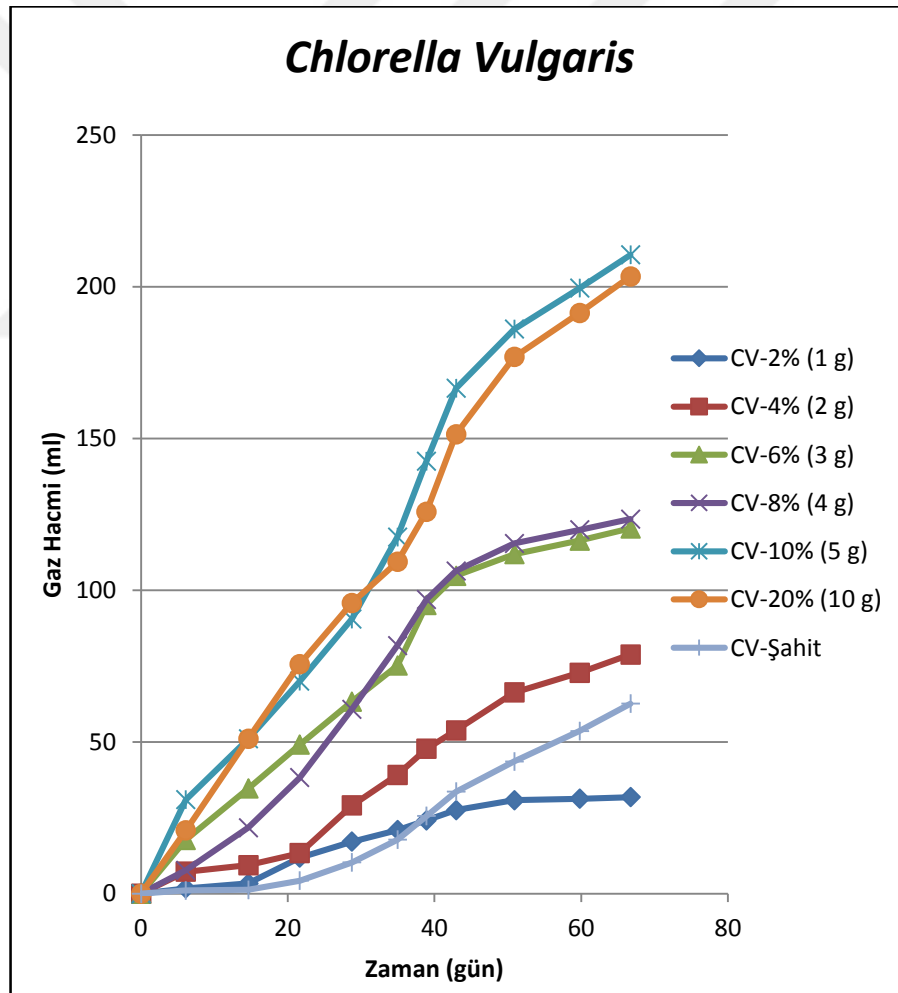
Laboratuvar ortamında sabit koşullar altında geliştirilen mikroalglerden elde edilen biyokütlenin toplam gaz hacmi, biyolojik biyogaz ve metan potansiyelleri Biyolojik Metan Potansiyeli (BMP) tayini ile tespit edilmiştir. BMP bir atıksuyun anaerobik olarak arıtılabilirliğinin metan üretim cinsinden belirlenmesi ilkesine dayanır [17].

Besiyeri, granül ve mikroalgal biyokütle karışımı ile hazırlanan deney şişeleri çalkalanarak 35°C’de inkübe edilmiştir. Bu süreç yaklaşık 40 gün boyunca tamamen karanlık ortam oluşturulan cihazda devam ettirilmiştir.

Her bir numunenin ürettiği gaz hacimleri haftalık olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Gaz bileşeni (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) analizleri “SHIMADZU GC-2014 Gas Chromatograph” cihazı ile deneyin ilk ve son (5 veya 6 hafta) haftasında yapılmıştır. Bu çalışmaya ait bilgi “3.2.5 Mikroalgal Biyokütlenin Enerji İçeriğinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar” bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

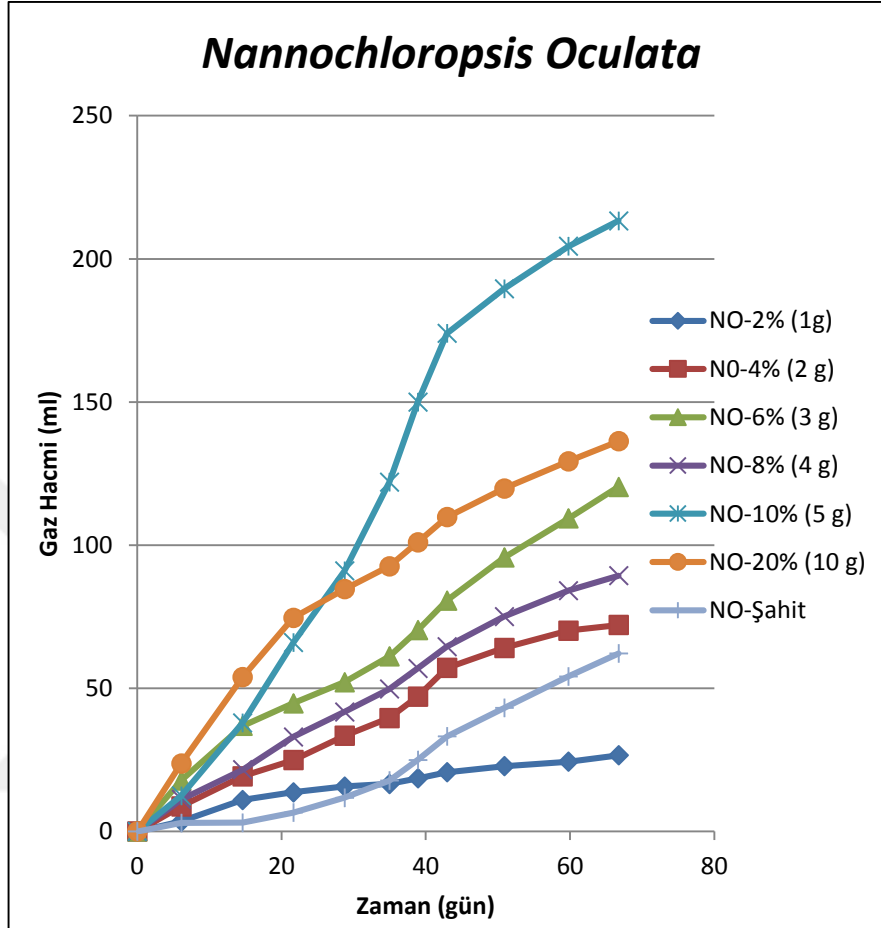
*C. vulgaris* ve *N. oculata*’ya ait algal biyokütlelerden elde edilen toplam gaz, biyolojik biyogaz ve metan potansiyellerine ait sonuçlar grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4.26 *C. vulgaris* için Zamana Bağlı Olarak Toplam Gaz Üretim Miktarları

1 g, 2 g, 3 g, 5 g ve 10 g *C. vulgaris* biyokütlesi ile hazırlanan deney setlerine ait her bir numunenin ürettiği gaz hacmi Şekil 4.26’da verilmiştir. Haftalık olarak ölçülen gaz

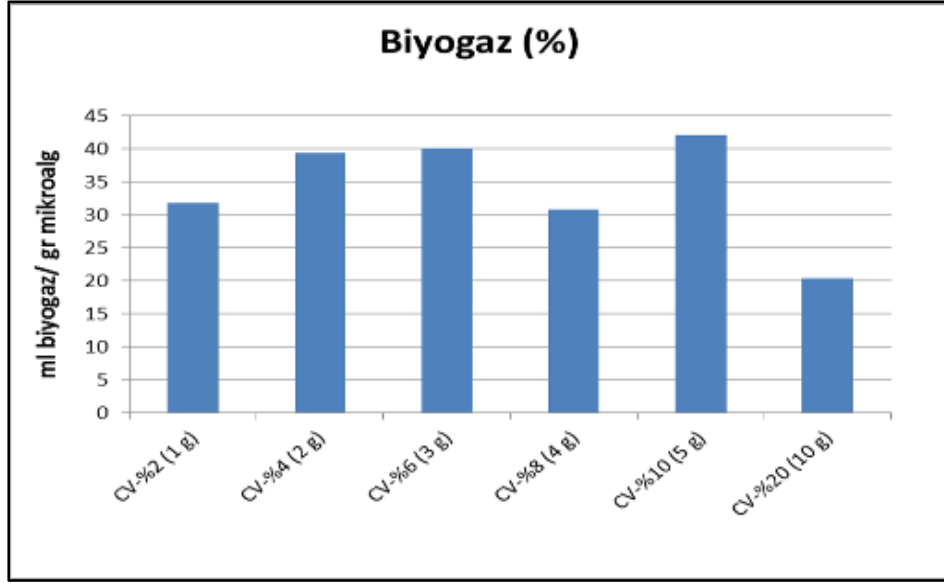
hacimlerinde mikraolgal biyokütle miktarı arttıkça üretilen gazın hacminde aldığı tespit edilmiştir. En fazla gaz üretimi 5 g *C. vulgaris* biyokütlesi kullanılan çalışmada tespit edilmiştir.



Şekil 4.27 *C. vulgaris* için Zamana Bağlı Olarak Toplam Gaz Üretim Miktarları

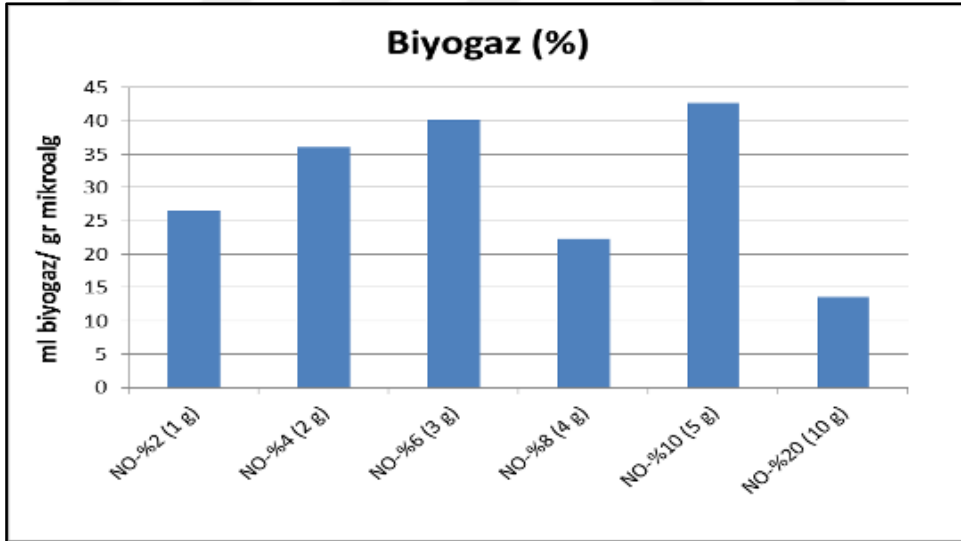
1 g, 2 g, 3 g, 5 g ve 10 g *N. oculata* biyokütlesi ile hazırlanan deney setlerine ait her bir nunumenin ürettiği gaz hacmi Şekil 4.27’de verilmiştir. Haftalık olarak ölçülen gaz hacimlerinde mikraolgal biyokütle miktarı arttıkça üretilen gazın hacminde aldığı tespit edilmiştir. En fazla gaz üretimi 5 g *N. oculata* biyokütlesi kullanılan çalışmada tespit edilmiştir.

Şekil 4.28’e göre *C. vulgaris* türü için en yüksek hacimde gaz üreten 5 g’lık deney setinin yaklaşık %40 (mL biyogaz/gr mikroalg) biyogaz üretim potansiyeli olduğu görülmektedir. En yüksek biyogaz üretim potansiyeli 5 g *C. vulgaris* biyokütlesi ile hazırlanan deney setindedir.



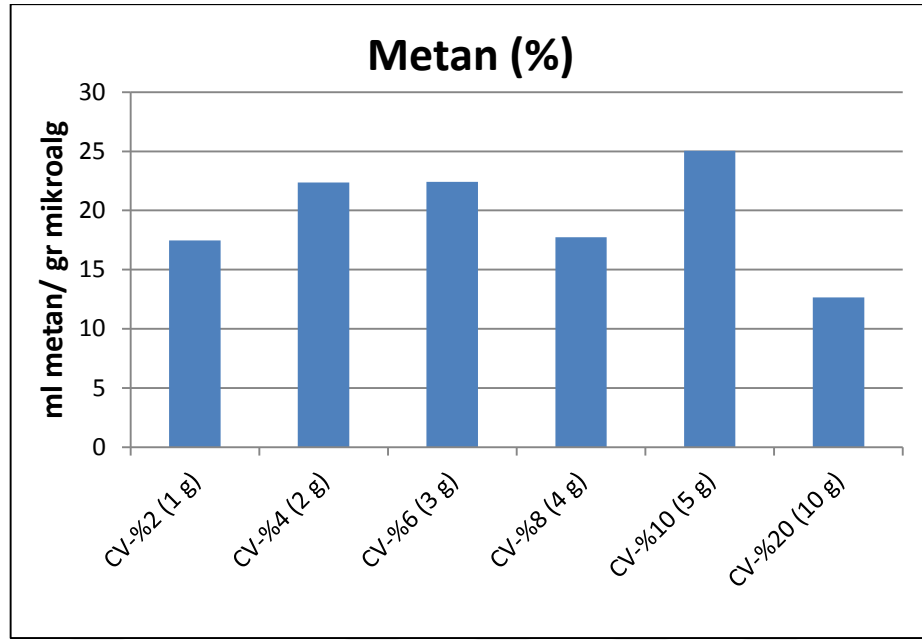
Şekil 4.28 *C. vulgaris* ile Yapılan Çalışmaların Biyogaz Üretim Potansiyelleri

Şekil 4.29'a göre *N. oculata* türü için en yüksek hacimde gaz üreten 5 g'lık deney setinin yaklaşık %40 (mL biyogaz/gr mikroalg) biyogaz üretim potansiyeli olduğu görülmektedir. En yüksek biyogaz üretim potansiyeli 5 g *N. oculata* biyokütlesi ile hazırlanan deney setindedir.

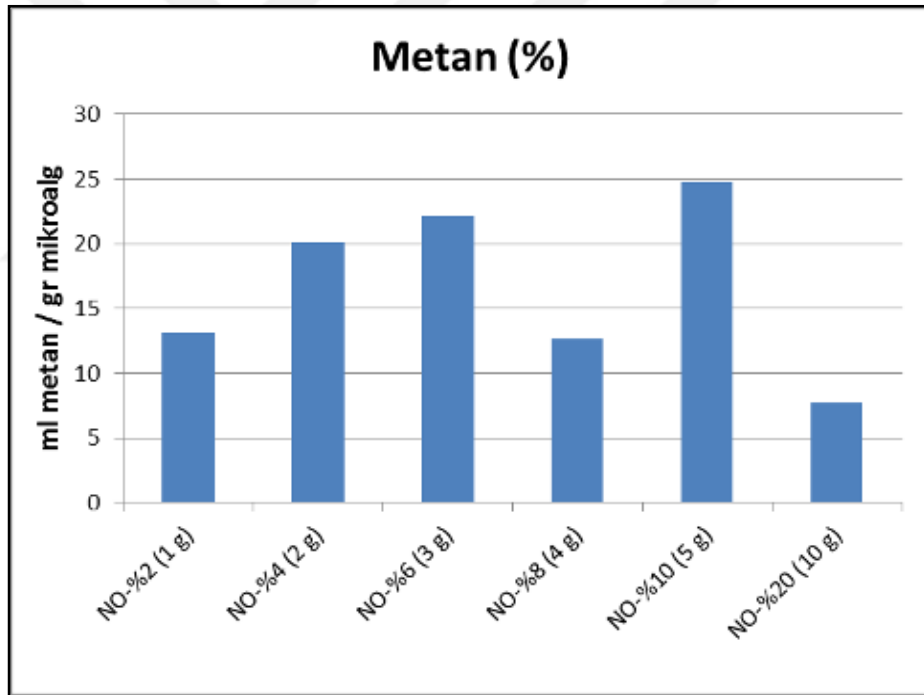


Şekil 4.29 *N. oculata* ile Yapılan Çalışmaların Biyogaz Üretim Potansiyelleri

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de *C.vulgaris* ve *N.oculata* türlerine ait biyokütlelerinin biyogaz üretim potansiyelleri, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da ki biyogaz üretim potansiyelleri içerisindeki metan gazı oluşum potansiyelleri gösterilmiştir. Her iki tür için 5 g biyokütle ile hazırlanan deney setlerinin en yüksek metan üretme potansiyellerine sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.30 *C. vulgaris* ile Yapılan Çalışmaların Metan Gazı Üretim Potansiyelleri



Şekil 4.31 *N. oculata* ile Yapılan Çalışmaların Metan Gazı Üretim Potansiyelleri

#### 4.5.2 Biyoelektrik

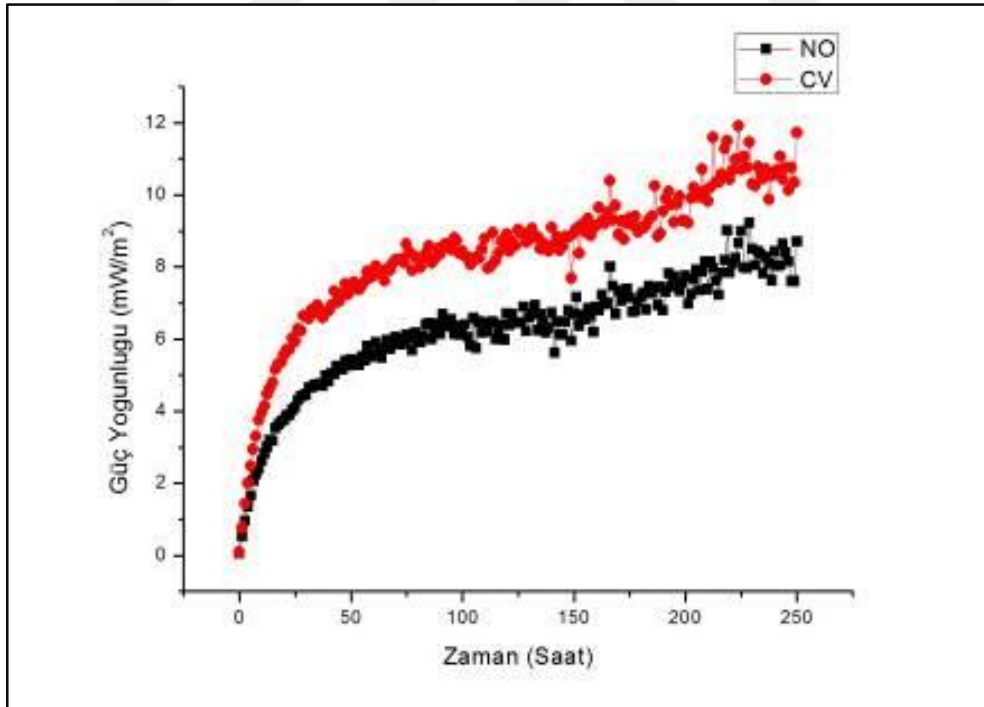
Organik atıklardaki kimyasal enerjiyi, mikroorganizmalar yardımı ile doğrudan elektrik enerjisine çeviren biyoreaktörlerdir. Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) sistemi içinde bakteriler katalizör görevi görerek organik ve inorganik maddeleri yükseltgeyerek akım üretilmesi sağlanır. 275 mL'lik MYH'ler de anot hücresinin %10'u algal biyokütle olacak

şekilde ve besiyeri karışımından, katot hücresi ise anot hücresi ile aynı seviyede saf su ile doldurulmuştur. Bu deney setleri *C. vulgaris* ve *N. oculata* için ayrı ayrı hazırlanmıştır. Elektrik üretimi düzenli olarak ölçülmüştür.

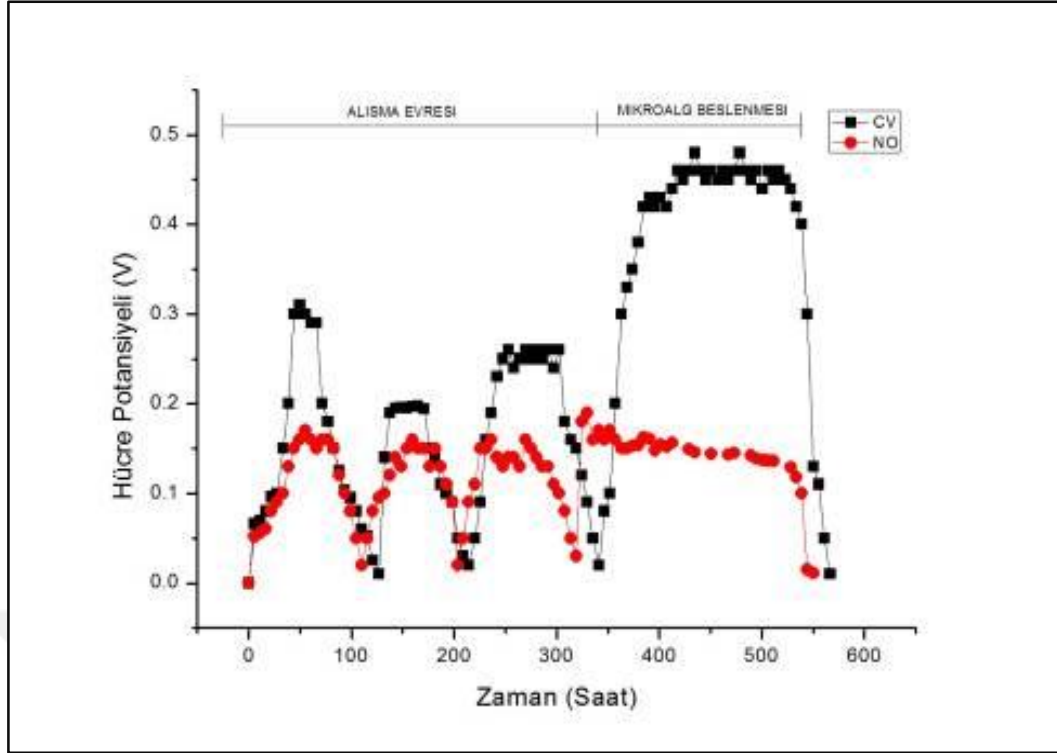
Elektrik üretimi her 10 mV'un altına düştüğünde yeni karışım hazırlanmıştır ve besleme yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler aşağıda detayları verilen potansiyostat sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmaya ait bilgi "3.2.5 Mikroalgal Biyokütlenin Enerji İçeriğinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar" bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

Alışma evresinde evsel atıksu ile beslenen mikrobiyal yakıt hücresinde, sabit hücre potansiyeli elde edilmesinden sonra mikroalg beslenmeye başlanmış, hücre potansiyelindeki değişim Şekil Şekil 4.32'de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde *C.vulgaris* ile beslenen mikrobiyal yakıt hücresi performansı *N.oculata* ile beslenene göre daha fazla çıkmıştır. Elde edilen maksimum güç yoğunlukları *C.vulgaris* için 12 mW/m<sup>2</sup>, *N. oculata* için ise 9.5 mW/m<sup>2</sup> bulunmuştur (Şekil 4.32, Şekil 4.33).



Şekil 4.32 Mikroalg Beslemesi Sonucu MYH Güç Yoğunluğundaki Değişim



Şekil 4.33 Reaktör Alışma Evresi ile Mikroalg Beslemesi Esnasındaki Hücre Potansiyelindeki Değişim

#### 4.5.3 Biyo-Yağ

Mikroalglerin yapılarında büyüme şartlarına ve türlerine bağlı olarak %1 ile %90 oranında yağ bulunabilmektedir. Kesikli çalışmalar sonucunda %50 SA/%50 NF besi oranlarında Hava ve CO<sub>2</sub> beslemesi yapılarak yürütülen 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesi ile geliştirilip hasat edilen *C. vulgaris* ve *N. oculata* biyokütlelerinin yağ biriktirme kapasiteleri belirlenmiştir. Elde edilen biyokütleden 5 g alınarak yağ analizi yapılmıştır. Mikroalg kültürlerinin bünyelerinde biriktirmiş oldukları ve kullanılabilir yağ miktarları Bligh and Dyer (1959) yöntemi ile tespit edilmiştir. Bu çalışmaya ait bilgi “3.2.5 Mikroalgal Biyokütlenin Enerji İçeriğinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar” bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Buna göre Çizelge 4.10’a göre; 5 g *C. vulgaris* ‘in %48’i ve 5 g *N. oculata* ‘nın %39 u kullanılabilir yağdır denilebilir.

Çizelge 4.10 Kültürlerin yağ içerikleri (5 g için)

| <i>Chlorella vulgaris</i> | <i>Nannochloropsis oculata</i> |
|---------------------------|--------------------------------|
| %49                       | %40                            |

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, T.C. Bilim Snayi ve Teknoloji Bakanlığı Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü Sanayi Tezleri Programı (SAN-TEZ) 1643.STZ.2012-2 numaralı “Mikroalg Kültürünün Sürdürülebilir Enerji Üretimi ve Sera Gazı Mitigasyonunda Kullanımı” projesi ile desteklenmiştir. İSTAÇ AŞ. Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Tesisine kurulması planan mikroalg üretim tesisin laboratuvar çalışmalarının bir bölümü tez kapsamında tamamlanmıştır. Hedeflenen sonuçlara yapılan analizlerle ulaşılmıştır.

Ticari bir başarı yakalamakta olan yenilenebilir ve temiz bir enerji türü olan mikroalglerle gerçekleştirilen çalışma; Katı Atık Düzenli Depolama Sahası içerisinde bulunan İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesis NF Membran çıkışından temin edilen süzüntü suyunda mikroalg üretimi ile de bir ilk niteliğindedir.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda yüksek enerji üretim potansiyeli ve yaygın kullanım çeşitleri gibi özellikleri nedeni ile *C. vulgaris* ve *N. oculata* ile çalışma gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda en iyi gelişim gösteren tür *C.vulgaris* olarak tespit edilmiştir.

Süzüntü suyundaki nütrientlerin mikroalg gelişimi için kullanılması ve aynı zamanda süzüntü suyunda nütrient giderimi de hedeflenerek yapılan çalışmalar sonucunda; %50 SA/ %50 NF karışımı ile hazırlanan besi ortamı bileşimlerinde her iki tür içinde gelişimin, %100 sentetik besi ortamı gelişimine yakın olduğu gözlenmiştir. Ancak bu oran kullanılan atıksuyun karakterizasyonuna bağlı olarak değişim gösterebilir. Mikroalg gelişimini etkileyen parametrelerden; pH'nın 7 – 7,3 ve sıcaklığın 25°C - 26°C aralığında olması durumunda, türlerin en iyi gelişimi gösterip en iyi oranda yağ depoladıkları görülmüştür.

Hazırlanan besi ortamlarına hava ve CO<sub>2</sub> ile besleme yapıldığında 15 mg/L gün CO<sub>2</sub> beslemesinin gelişimi olumlu yönde etkilediği ve katı madde miktarını arttırdığı görülmüştür.

%50 SA/ %50 NF ortamında ve Hava/CO<sub>2</sub> beslemesi ile gerçekleştirilen mikroalg üretimlerinden elde edilen algal biyokütlenin biyometan, biyoelektrik ve yağ üretim potansiyelleri belirlenmiştir.

Mikroalg biyokütleden sırası ile biyoyağ, biyometan ve biyoelektrik üretimlerinin gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir.

Metan üretim potansiyeli için;

- ❖ Mikroalg biyokütle miktarı arttıkça üretilen gazın hacminde aldığı tespit edilmiştir. En fazla gaz üretimi 5 g *C. vulgaris* biyokütlesi ve 5 g *N. oculata* biyokütlesi kullanılan çalışmada tespit edilmiştir. Her iki tür için 5 g biyokütle ile hazırlanan deney setlerinin en iyi metan üretme potansiyellerine sahip oldukları görülmüştür.

Elektrik üretim potansiyeli için;

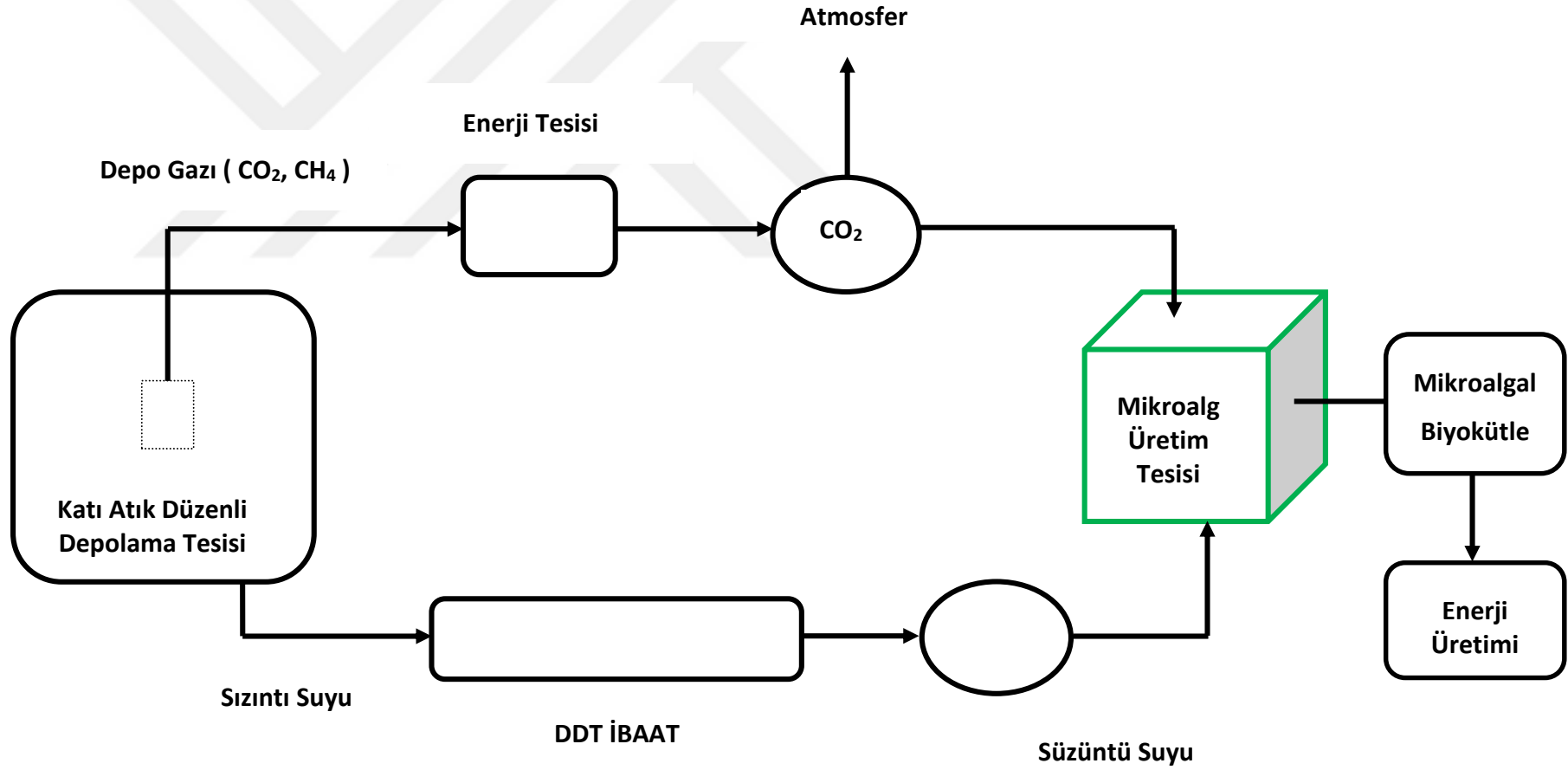
- ❖ *C. vulgaris* ile beslenen mikrobiyal yakıt hücresi performansı *N. oculata* ile beslenene göre daha fazla çıkmıştır. Elde edilen maksimum güç yoğunlukları *C. vulgaris* için 12 mW/m<sup>2</sup>, *N. oculata* için ise 9.5 mW/m<sup>2</sup> bulunmuştur.

Yağ üretim potansiyeli için;

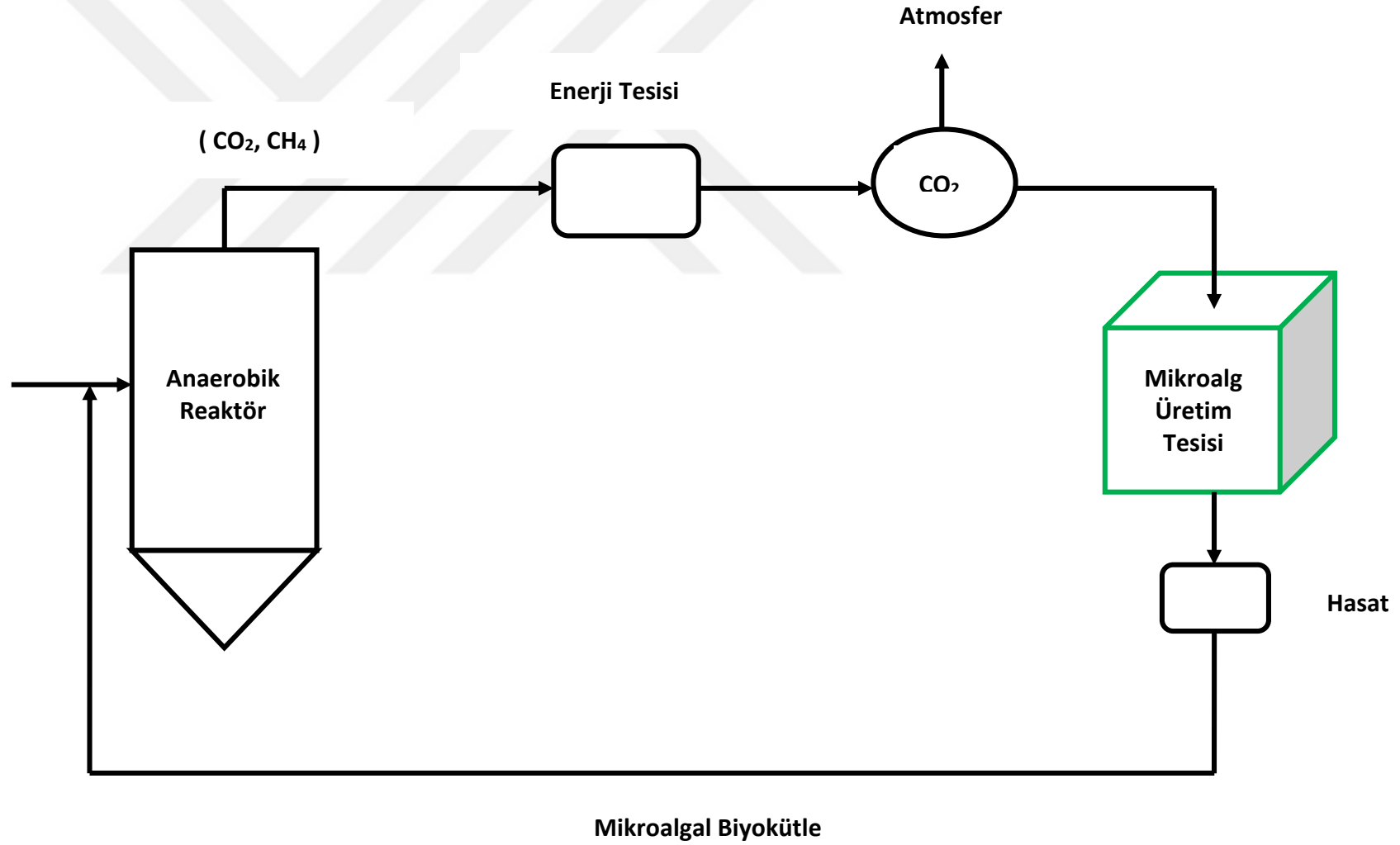
- ❖ 5 g *C. vulgaris* 'in %48'i ve 5 g *N. oculata* 'nın %39'u kullanılabilir yağ olduğu tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında elde edilen verilere göre çalışmaları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'ye göre sonuçlandırmak mümkündür.





Şekil 5.1 Öneri 1: Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Örneği



Şekil 5.2 Öneri 2: Mikroalgal Biyokütlenin Anaerobik Reaktörde Substrat Kaynağı Olarak Kullanılması Örneği

Şekil 5.1 Öneri 1; tez çalışmasında SAN-TEZ projesi ile desteklendiği “Mikroalglerin sera gazı azaltımı ve atıksularda nütrient gideriminin” gösterimidir.

Bu projenin d ş n ld   bir tesiste; bulunduğu alanı içerisinde atıksu arıtma tesisi olan ve proses gereği CO<sub>2</sub> salınımı yapan endüstriyel bir tesis olması gerekmektedir.

Şekil 5.2 Öneri 2; içerisinde organik ve inorganik maddelerin, oksijenin yokluğunda mikroorganizmaların yardımıyla parçalanarak CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S ve NH<sub>3</sub> gibi nihai ürünlere d n şt   anaerobik arıtma sistemlerinin olduğu tesisler içindir.

Bu projenin d ş n ld   bir tesiste; bulunduğu alan içerisinde anaerobik arıtma tesisi olan ve üretilen mikroalgal biyokütlenin anaerobik arıtma da substrat kaynağı olarak kullanılması  n görülmektedir.

 neri 1 ve öneri 2 için ayrıca:

- ❖ Projenin ekonomisi, performansı, sosyal katkısı, kaynak kullanımı ve çevresel etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.
- ❖ İklim de i ikli i ile mücadele çalışmaları çerçevesinde, sera etkisi yaratarak küresel ısınmaya sebep olan gaz salınımlarının azaltılması amacıyla; bu tesiste açığa çıkan yüksek miktardaki karbondioksit gazının geri kazanımı sağlanmalıdır.

Tesis içerisindeki tüm alanların en faydalı şekilde kullanılması ana hedeflerden biri olmalıdır. Bu maddeler doğrultusunda en doğru tercih; günümüzde Dünya genelinde de yaygın olarak kullanılan, “Mikroalg Yeti tiricili i ve Mikroalgal Biyokütleden Enerji” elde edilmesidir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Oncel, S.S., (2013). "Microalgae for a macroenergy world", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26:241-264.
- [2] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, <http://iklim.cob.gov.tr/iklim/AnaSayfa/BMIDCS.aspx?sflang=tr>, 24 Ocak 2016.
- [3] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Kyoto Protokolü, [https://www.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/kyoto\\_protokol.pdf](https://www.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/kyoto_protokol.pdf), 24 Ocak 2016.
- [4] Vikipedi, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Birle%C5%9Fmi%C5%9F\\_Milletler\\_%C4%B0klim\\_De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi\\_%C3%87er%C3%A7eve\\_S%C3%B6zle%C5%9Fmesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Birle%C5%9Fmi%C5%9F_Milletler_%C4%B0klim_De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi_%C3%87er%C3%A7eve_S%C3%B6zle%C5%9Fmesi), 24 Ocak 2016.
- [5] EPA., Feasibility Study of Algae-Based CO<sub>2</sub> Capture, [http://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=526732](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=526732), 24 Ocak 2016.
- [6] WWF, Mikrolagler, <http://wwf.panda.org/index.cfm?uGlobalSearch=microalgae>, 24 Ocak 2016.
- [7] Tredici, M. R. (2004). Mass Production of Microalgae: Photobioreactors, in Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, Ed. Richmond A. Blackwell Publishing.
- [8] Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, 25, 294–306.
- [9] Khan, S. A., Rashmi, Hussain, M. Z., Prasad, S. ve Banerjee, U. C. (2009). Prospects of biodiesel production from microalgae in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2361–2372.
- [10] Tsukahara, K. ve Sawayama, S., (2005). Liquid fuel production using microalgae. Journal of Japan Petroleum Institute 48: 251-259.
- [11] Brennan, L. ve Owende, P., (2010). Biofuels from microalg – a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 557-577

- [12] Ladanai, J., (2009). Global Potential of Sustainable Biomass for Energy, Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 32.
- [13] Karaosmanoğlu, F., (2010). “Türkiye Biyoyakıt Potansiyeli ve Son gelişmeler”, Türkiye 10. Enerji kongresi, 2010, İstanbul.
- [14] Tilman, D., Reich, P. B. ve Knops, J. M. H., (2006). Nature 441, 629–632.
- [15] Akgün, A., (2014). Mikroalg yetiştiriciliği ve yetiştirilen alglerin ticari amaçlı kullanımı, Lisans Tezi, YTÜ, İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [16] Crocker, M. ve Morton, S. (2010). Development of an algae-based system for CO<sub>2</sub> mitigation from coal-fired power plants. *Energia*, 21.
- [17] Harun, R., Davidson, M., Doyle, M., Gopiraj, R., Danquah, M. ve Forde, G., (2011). Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility, *Biomass and Bioenergy* 35, 741-747.
- [18] Lundquist, T. J., Woert, I. C., Quinn, N.W.T. ve Benemann, J. R. (2010). A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production. Energy Biosciences Institute University of California, 2010, Berkeley, California.
- [19] Mata, T. M., Martins, A. A. ve Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217–232.
- [20] Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J. ve Roessler, P. (1998). A Look Back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program— Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory Close- Out Report, NREL/TP-580-24190, Golden, CO.
- [21] Kunjapur, A. M. ve Eldridge, R. B. (2010). Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 3516–3526.
- [22] Naz, M. ve Gökçek, K., (2006). Fotobiyoreaktörler: Fototropik mikroorganizmalar için alternatif üretim sistemleri, *Ulusal Su Günleri 2004*, 6-8 Ekim 2004.
- [23] Gezici, M., Elçin, K. ve Gürhan, R., (2012). Biyoyakıt Amaçlı Mikroalg Üretimi İçin Bazı Yetiştirme Parametrelerinin Belirlenmesi, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*(*Journal of Agricultural Machinery Science*), 8 (2), 223-231.
- [24] Richmond, A., (2004), *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Blackwell Publishing Ltd. RICHMOND, A., 1986. *Outdoor Mass Cultures of Microalgae*. (A. Richmond Editör). *Handbook of Microalgal Mass Cultures of Microalgae*. CRC Press, INC. Boca Raton, Florida. 285-329.
- [25] Coutteau P., Lavens, P. ve Sorgeloos, P. (1996). *Microalgae, Manual on the production and use of live food for aquaculture*, FAO Fisheries Technical, 361.
- [26] Sukatar, A., (2002). *Alg Kültür Yöntemleri*, Ege Üni. Fen Fak. Kitapları, Seri No:184.
- [27] Vonshak, A., Torzillo, G., Masojidek, J. ve Boussiba, S., (2001). Sub-optimal morning temperature induces photoinhibition in dense outdoor cultures of the algal *Monodus subterraneus* (Eustigmatophyta). *Plant, Cell and Environment* 24:1113-1118.

- [28] Vonshak, A., ve Lu, C., (2002). Effects of salinity stres on photosystem11 function in *Spirulina palentis* cells, *Physiologia Plantarum*.
- [29] Tomaselli L. ve Richmond, A., (2004). *Handbook of microalgal cuştüre*, Blackwell Publishing, Oxford, UK 566.
- [30] Benemann, J. (2009). *Microalgae Biofuels: A Brief Introduction*. Benemann Associates and MicroBio Engineering, Inc., CA, USA
- [31] Harmelen, T. V. ve Oonk, H. (2006). *Microalgae Biofixation Processes: Applications and Potential Contributions to Greenhouse Gas Mitigation Options*. TNO Built Environment anf Geosciences raporu, 36562, AH Apeldoorn, Hollanda.
- [32] Lundquist, T. J., Woert, I. C., Quinn, N.W.T. ve Benemann, J. R. (2010). *A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production*. Energy Biosciences Institute University of California, Berkeley, California.
- [33] Darzins, A., Pienkos, P. ve Edye, L. (2010). *Current Status and Potential for Algal Biofuels Production*. IEA Bioenergy report, T39-T2.
- [34] Sayaner, O., (2013). *Mikroalg Yetiştirciliği Yoluyla Baca Gazı Kaynaklı Karbondioksit Azaltımı*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [35] Molina, E., Fernandez, J., Acien, F. G. ve Chisti, Y. (2001). Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of Biotechnology*, 92, 113–131.
- [36] Tredici, M. R. ve Richmond A., (2004). *Mass Production of Microalgae: Photobioreactors*, in *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Blackwell Publishing.
- [37] Wang, B., Lan, C. Q. ve Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, 30, 904–912.
- [38] Wen, Z. ve Johnson, M. B. (2009). *Microalgae as a Feedstock for Biofuel Production*. Virginia Cooperative Extension raporu, PUBLICATION 442-886, Petersburg, Virginia.
- [39] Ugwu, C. U., Aoyagi, H. ve Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, 99, 4021–4028.
- [40] Sierra, E., Acien, F. G., Fernandez, J. M., Garcia, J. L., Gonzalez, C. ve Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, 138, 136–147.
- [41] Kantarcı, N., Borak, F. ve Ülgen, K. O., (2005). Bubble column reactors, *Process Biochemistry*, 40, 2263-2283.
- [42] Alabi, A. O., Tampier, M. ve Bibeau E. (2009). *Microalgae Technologies & Processes For Biofuels-Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability & Barriers to Implementation*. British Columbia Innovation Council raporu.
- [43] Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J. ve Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102, 71–81.

- [44] Chen, M., Tang H., Maa, H., Holland, T. C., Simon Ng, K. Y. ve Salley, S. O. (2011). Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresource Technology*, 102, 1649–1655.
- [45] Grima, E. M., Belarbi, E. H., Acien Fernandez, F. G., Medina, A. R. ve Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20, 491–515.
- [46] Ryan, C. (2009). *Cultivating Clean Energy: The Promise of Algae Biofuels*. The Natural Resources Defense Council raporu.
- [47] Tredici, M. R. (2004). Mass Production of Microalgae: Photobioreactors, in *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Ed. Richmond A. Blackwell Publishing.
- [48] Hauck, J. T., Olson, G. J., Scierka, S. J., Perry, M. B. ve Ataa, M. M., (1996). Effects of Simulated Flue Gas On Growth Of Microalgae. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*, 41.
- [49] Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M. ve Hoadley, A. (2010). Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, 2, 012701.
- [50] Shelef, G., Sukenik, A. ve Green, M. (1984). *Microalgae Harvesting and Processing: A Literature Review*. Solar Energy Research Institute a Subcontract Report, Golden, Colorado.
- [51] Benemann, J. R. ve Pedroni, P. (2007). Biofixation of fossil CO<sub>2</sub> by microalgae for greenhouse gas abatement. *Encyclopaedia Of Hydrocarbons*. Volume III / New Developments: Energy, Transport, Sustainability.
- [52] McKendry, P., (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology* 83:47-54.
- [53] Demirbaş, A. ve Demirbaş, M. F. (2010). *Biodiesel from Algae*. Algae Energy Algae as a New Source of Biodiesel. Springer-Verlag London Limited.
- [54] Demirbaş, A. (2011), Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems. *Applied Energy*, 88, 3541–3547.
- [55] Singh, J. ve Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2596–2610.
- [56] Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C. ve diğ. (2008). Second Generation Biofuels: High- Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenerg. Res.*, 1, 20–43.
- [57] Carvalho, A.P., Meireles, L.A. ve Malcata, F.X., 2006. Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. *Biotechnology Progress* 22:1490-1506.
- [58] Hughes, E. ve Benemann J. R. (1997). Biological Fossil CO<sub>2</sub> Mitigation. *Energy Convers. Mgmt*, 38, 467-473.

- [59] Packer, M. (2009). Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy Policy*, 37, 3428–3437.
- [60] Hsueh, H. T., Li, W. J., Chen, H. H. ve Chu, H. (2009). Carbon bio-fixation by photosynthesis of *Thermosynechococcus* sp. CL-1 and *Nannochloropsis oculata*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 95, 33–39.
- [61] Jeon, H., Seo, K., Lee h., L., Yang., Y. ve Kumaran, s., (2012). Production of algal biomass (*Chlorella vulgaris*) using sediment microbial fuel cells *Bioresource technology* 109:308-311
- [62] Lakaniemi, A. ve Tuovien, O.,(2012). Production off electricity and butanol from microalgal biomass in microbbiial fuel cells *Bioenrer. Res.*, 5:481-491
- [63] Tsuzuki, M., E. Ohnuma, N. Sato, T. Takaku ve A. Kawaguchi, (1990). Effects of CO<sub>2</sub> Concentration during Growth on Fatty Acid Composition in Microalgae. *Plant Physiol.* 93: 851-856.
- [64] Xu, H., Miao., X. ve Wu., Q., (2006). High quality biodiesel production from microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology*. 126: 499–507.
- [65] Özdiş, Ö., (2005). Krom (VI) Birikiminin *Chlorella vulgaris*'te Hücre Sayısı, Klorofil, Büyüme Hızı, Protein ve Şeker Miktarlarına Etkileri. Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, Adana.
- [66] Güner, H. ve Aysel, V., (1989). Tohumuz Bitkiler Sistematiği, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi, 108-245s, İzmir.
- [67] Maruyama, I., Nakamura, T., Matsubayashi, T., Ando, Y. ve Maeda, T. (1986). Identification of the alga known as “marine chlorella” as a member of the Eustigmatophyceae. *Japanese Journal of Phycology*, 34; 319-325.
- [68] Culture Collection of Algae and Protozoa; <http://www.ccap.ac.uk/>; 13.01.2014
- [69] Culture collection of algae and protozoa, <http://www.ccap.ac.uk/media/documents/f2.pdf> , 13.01.2014.
- [70] Balahorli, V. ve Yıldız, Ş., (2009). “Katı Atık Düzenli Depolama Sistemleri Eğitimi, Düzenli Depolama Sızıntı Suyu Yönetimi, İSTAÇ Eğitim Merkezi.
- [71] Acı, G., (2011). Sızıntı Sularının Membran Proseslerle Arıtılabilirliği: Odayeri Örneği, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [72] Cirik, S. ve Kuru, E., 2002, Harika yosun *Chlorella* sp. , *Ekoloji Çevre Magazin Dergisi* sayı 45: 6-7s.
- [73] Vonshak, A., ve Torzillo, G., (2004), *Biotechnology for Algal Mass Cultivation, Applied Course on Production and Monitoring of Microalgal Growth*, İzmir.
- [74] Onel, S.S.,(2013).”Microalgae for a macroenergy World”,*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26:241-264.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

|                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| Adı Soyadı           | Tuba GENÇ                |
| Doğum Tarihi ve Yeri | 19 Aralık 1989, İstanbul |
| Yabancı Dili         | İngilizce                |
| E-posta              | genctubaa@gmail.com      |

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan               | Okul/Üniversite                     | Mezuniyet Yılı |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Çevre Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi          | 2016           |
| Lisans    | Çevre Mühendisliği | Fatih Üniversitesi                  | 2011           |
| Lise      | Sayısal            | Pendik Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi | 2007           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl       | Firma/Kurum                     | Görevi          |
|-----------|---------------------------------|-----------------|
| 2014-2015 | Rast Mühendislik Hiz. Ltd. Şti. | Çevre Mühendisi |
| 2012-2014 | Yıldız Teknik Üniversitesi      | Proje Asistanı  |