

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

**MİKROALG ÜRETİMİ İÇİN LABORATUVAR ÖLÇEKLİ  
SOLAR BİYOREAKTÖR TASARIMI VE MİKROALGLERİN  
TARIMSAL UYGULAMALARDA KULLANIMI**

**Vildan ERCİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Biyomühendislik Anabilim Dalı**

**Biyomühendislik Programı**

**Danışman**

**Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN**

**Şubat, 2023**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROALG ÜRETİMİ İÇİN LABORATUVAR ÖLÇEKLİ SOLAR  
BİYOREAKTÖR TASARIMI VE MİKROALGLERİN TARIMSAL  
UYGULAMALARDA KULLANIMI**

Vildan ERCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 13.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomühendislik Anabilim Dalı, Biyomühendislik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muhammed Ü. KAHVECİ, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR, Üye  
Sağlık Bilimleri Üniversitesi

Prof. Dr. Musa TÜRKER, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mahfuz ELMATAŞ, Üye  
Sağlık Bilimleri Üniversitesi

---

---

---

---

---

Danışmanım Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Mikroalg Üretimi için Laboratuvar Ölçekli Solar Biyoreaktör Tasarımı ve Mikroalglerin Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Vildan ERCİ

İmza



*Aileme*  
*ve*  
*biricik oğluma*

## TEŞEKKÜR

Mikroalg Üretimi İçin Laboratuvar Ölçekli Solar Biyoreaktör Tasarımı ve Mikroalglerin Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı konu başlıklı doktora tez yolculuğum süresince engin bilgi ve deneyimi ile bu yolda ilerlememde yardımcı olan çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN'e sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın yerine getirilmesine imkân sağlayan Kimya-Metalurji Fakültesi Dekanlığına, Fen Bilimleri Enstitüsüne, Biyomühendislik Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Mehmet Burçin PİŞKİN ve bölümümüzün değerli öğretim üyeleri ile asistanlarına, Ayrıca gerektiğinde yardımlarını esirgemeyen İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Muhammet Ü. KAHVECİ ve Sağlık Bilimleri Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR'e,

Deneyisel çalışmam boyunca benden yardımlarını esirgemeyen ve desteklerini unutamayacağım Dr. Öğr. Üyesi Benan İNAN ve Anıl Tefvîk KOÇER'e

Ayrıca yaşadığım her türlü zorluğa rağmen hiçbir desteği benden esirgemeyen sevgili aileme,

Çalışkanlık, disiplin, özgüven ve vazgeçmemeyi öğrenerek örnek aldığım ve her zaman desteğini yanımda hissettiğim sevgili eşim Fatih ERCİ'ye ve anlayışı ile bana destek olan oğlum İbrahim Ethem ERCİ'ye bütün içtenliğimle teşekkürü bir borç bilirim.

Vildan ERCİ

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                    |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>                                                                                               | <b>vi</b>   |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                                                                                            | <b>viii</b> |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                                                               | <b>ix</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                                                               | <b>xi</b>   |
| <b>ÖZET</b>                                                                                                        | <b>xii</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>                                                                                                    | <b>xiv</b>  |
| <b>1 GİRİŞ</b>                                                                                                     | <b>1</b>    |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                                                                          | 1           |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                                                                              | 3           |
| 1.3 Orijinal Katkı .....                                                                                           | 3           |
| <b>2 BAŞLIK</b>                                                                                                    | <b>5</b>    |
| 2.1 Mikroalgler.....                                                                                               | 5           |
| 2.2 Mikroalg Yetiştirme Sistemleri.....                                                                            | 6           |
| 2.3 Mikroalglerin tarımsal uygulamaları .....                                                                      | 10          |
| 2.4 Mikroalglerin Topraklardaki Etkinlikleri.....                                                                  | 12          |
| <b>3 MATERYAL-METOD</b>                                                                                            | <b>24</b>   |
| 3.1 Laboratuvar Ölçekli Solar Biyoreaktör Yapımı ve Özellikleri .....                                              | 24          |
| 3.2 İyon Seçici Elektrotlar (ISE).....                                                                             | 28          |
| 3.3 Mikroalgler.....                                                                                               | 33          |
| 3.4 Mikroalglerin Toprak Örneklerine Uygulanması .....                                                             | 40          |
| 3.5 İstatistiki analizler .....                                                                                    | 46          |
| <b>4 SONUÇ VE ÖNERİLER</b>                                                                                         | <b>47</b>   |
| 4.1 Laboratuvar Ölçekli Solar Biyoreaktörün Tasarımı ve Üretilmesi .....                                           | 47          |
| 4.2 Mikroalg Büyüme Ortamı ile İlgili Parametrelerin Ölçülmesi .....                                               | 49          |
| 4.3 Mikroalg Uygulamalarının Bazı Toprak Özelliklerine, Tohum Çimlenmesine ve Bitki Gelişimine Olan Etkileri ..... | 57          |
| 4.4 <i>C. vulgaris</i> uygulamasının toprak örneklerinde rüzgâr erozyonu kontrolündeki etkinliği .....             | 63          |
| <b>KAYNAKÇA</b>                                                                                                    | <b>68</b>   |
| <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>                                                                                   | <b>81</b>   |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| Al              | Alüminyum       |
| N               | Azot            |
| Cu              | Bakır           |
| B               | Bor             |
| Zn              | Çinko           |
| dk              | Dakika          |
| Fe              | Demir           |
| P               | Fosfor          |
| g               | Gram            |
| Ag              | Gümüş           |
| H               | Hidrojen İyonu  |
| OH              | Hidroksit İyonu |
| Ca              | Kalsiyum        |
| C               | Karbon          |
| CO <sub>2</sub> | Karbondiyoksit  |
| kg              | Kilogram        |
| Cl              | Klor            |
| Co              | Kobalt          |
| S               | Kükürt          |
| L               | Litre           |
| Mg              | Magnezyum       |
| Mn              | Mangan          |
| m               | Metre           |
| m <sup>2</sup>  | Metrekare       |
| µL              | Mikrolitre      |
| µmol            | Mikromol        |
| mL              | Mililitre       |
| mm              | Milimetre       |
| M               | Molar           |
| nm              | Nanometre       |
| NO <sub>2</sub> | Nitrit          |
| O <sub>2</sub>  | Oksijen         |

|    |            |
|----|------------|
| K  | Potasyum   |
| sa | Saat       |
| s  | Saniye     |
| °C | Santigrat  |
| cm | Santimetre |
| Na | Sodyum     |
| W  | Watt       |
| V  | Volt       |



## KISALTMA LİSTESİ

---

|                     |                                       |
|---------------------|---------------------------------------|
| AAS                 | Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi     |
| ATP                 | Adenozin Trifosfat                    |
| DBF                 | Dibutil Fitalat                       |
| DNA                 | Deoksiribo Nükleik Asit               |
| DO                  | Çözünmüş Oksijen                      |
| DOP                 | Çözünmüş Organik Fosfat               |
| EC                  | Elektriksel Kondüktivite              |
| FÇM                 | Fosfat Çözücü Mikroorganizmalar       |
| FDA                 | Floresein Diasetat                    |
| HDP                 | Hücre Dışı Polisakkaritler            |
| ISE                 | İyon Seçici Elektrot                  |
| KDK                 | Katyon Değişim Kapasitesi             |
| KTpCLPB             | Potasyum Tetrakis Klorofenil Borat    |
| MBC                 | Mikrobiyal Biyokütle Karbonu          |
| NADPH               | Nikotinamid Adenin Dinükleotit Fosfat |
| OD                  | Optik Yoğunluk                        |
| PBR                 | Fotobiyoreaktör                       |
| PMMA                | Polimetil Metakrilat                  |
| PVC                 | Polivinil Klorür                      |
| PVCNH <sub>2</sub>  | Aminleştirilmiş Polivinil Klorür      |
| RE                  | Referans Elektrot                     |
| TDA-NO <sub>3</sub> | Tetradesil Amonyum Nitrat             |
| TDS                 | Toplam Çözünmüş Katılar               |
| THF                 | Tetrahidrofur                         |
| TOC                 | Toprak Organik Karbonu                |
| TOM                 | Toprak Organik Maddesi                |
| WHC                 | Su Tutma Kapasitesi                   |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                              |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | <i>C. vulgaris</i> 'in hücre yapısı.....                                                                     | 5  |
| Şekil 2.2  | Mikroalglerin toprak ve bitkiler üzerindeki seçilmiş yararlı etkileri. ....                                  | 10 |
| Şekil 2.3  | Mikroalg/siyanobakteri bazlı biyolojik toprak kabuklarının oluşumu.....                                      | 19 |
| Şekil 3.1  | a) Polikarbon, b) Galvanize alüminyum.....                                                                   | 24 |
| Şekil 3.2  | Biyoreaktörde karıştırma işlemi için kullanılan motor.....                                                   | 25 |
| Şekil 3.3  | Solar sistemin tasarımı .....                                                                                | 26 |
| Şekil 3.4  | Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktörün tasarımı .....                                                       | 27 |
| Şekil 3.5  | PVC membran $\text{NO}_3^-$ - seçici elektrot üretiminin şematik gösterimi .....                             | 30 |
| Şekil 3.6  | Elektrodların genel görünümü.....                                                                            | 31 |
| Şekil 3.7  | Bütünüyle katı-hal kontakt $\text{NO}_3^-$ ve pH seçici elektrotların görüntüsü.....                         | 31 |
| Şekil 3.8  | Bilgisayar kontrollü potansiyometrik ölçüm sistemi.....                                                      | 32 |
| Şekil 3.9  | Hazırlanan sensörlerin tekrarlanabilirliği .....                                                             | 33 |
| Şekil 3.10 | Mikroalglerin çoğaltılma öncesi petrilere üretilmesi .....                                                   | 37 |
| Şekil 3.11 | Petri ortamında büyütülen mikroalglerin 0.5L hacme sahip sıvı besiyerlerine aktarılması ve büyütülmesi ..... | 38 |
| Şekil 3.12 | Mikroalglerin biyoreaktöre aktarılmadan önce laboratuvarlarda farklı boyutlarda üretilme aşamaları.....      | 38 |
| Şekil 3.13 | Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktöre aktarılan mikroalgler .....                                           | 39 |
| Şekil 3.14 | Biyoreaktörde büyümenin tamamlanmasından sonra hasat edilmesi.....                                           | 40 |
| Şekil 3.15 | Petri ve viyol ortamında <i>C. vulgaris</i> mikroalginin domates tohumunun çimlendirilmesi .....             | 42 |
| Şekil 3.16 | Toprak örneklerine mikroalg uygulamasının yapılması ve 24 saat inkübasyona bırakılması .....                 | 43 |
| Şekil 3.17 | Saksı denemesinin üstten görünümü .....                                                                      | 43 |
| Şekil 3.18 | Uygulama sonrası rüzgar erozyonu sonucu ortaya çıkan toprak kaybının belirlenmesi.....                       | 45 |
| Şekil 4.1  | Biyoreaktörden görüntüler .....                                                                              | 48 |
| Şekil 4.2  | <i>C. vulgaris</i> büyüme eğrisinin zamana karşı değişim.....                                                | 50 |
| Şekil 4.3  | Mikroalg büyüme eğrisi ile %tuzluluk ilişkisinin zamana karşı değişimi ...                                   | 51 |
| Şekil 4.4  | Çözünmüş oksijen ile mikroalg büyüme eğrisinin zamana karşı değişimi ..                                      | 52 |
| Şekil 4.5  | Toplam çözünmüş katılar (TDS) ile mikroalg büyüme eğrisi arasındaki ilişki .....                             | 53 |
| Şekil 4.6  | <i>C. vulgaris</i> büyümesi - iletkenlik .....                                                               | 54 |

|                   |                                                                                                                  |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.7</b>  | <i>C. vulgaris</i> 'in büyüme eğrisi - direnç ilişkisi.....                                                      | 55 |
| <b>Şekil 4.8</b>  | <i>C. vulgaris</i> 'in büyüme eğrisi - sıcaklık ilişkisi.....                                                    | 55 |
| <b>Şekil 4.9</b>  | Sensörleri ile solar biyoreaktörde mikroalg biyokütlesine karşın Nitrat ve pH değişiminin takibi.....            | 56 |
| <b>Şekil 4.10</b> | Farklı uygulama biçim ve dozlarının 5 gün sonunda tohumların kök boyu üzerinde meydana getirdiği değişimler..... | 59 |
| <b>Şekil 4.11</b> | Uygulama dozu artışının rüzgâr erozyonu sonucu oluşan toprak kaybını önlemedeki etkinliği.....                   | 65 |



## TABLO LİSTESİ

---

|                  |                                                                                                                                                             |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1</b> | Bold'un değiştirilmiş temel besiyeri .....                                                                                                                  | 36 |
| <b>Tablo 4.1</b> | Farklı konsantrasyonlarda <i>C. vulgaris</i> mikroalg uygulaması yapılan domates bitkilerinin hasat öncesi bitki boyları, gövde çapları ve kök boyları..... | 61 |
| <b>Tablo 4.2</b> | Farklı konsantrasyonlarda <i>C. vulgaris</i> mikroalg uygulaması yapılan domates bitkilerinin hasat sonrası yaş ve kuru ağırlıkları .....                   | 61 |
| <b>Tablo 4.3</b> | Farklı konsantrasyonlarda <i>C. vulgaris</i> mikroalg uygulaması yapılan domates bitkilerinin hasat sonrası Besin Madde İçerikleri .....                    | 63 |



# MİKROALG ÜRETİMİ İÇİN LABORATUVAR ÖLÇEKLİ SOLAR BİYOREAKTÖR TASARIMI VE MİKROALGLERİN TARIMSAL UYGULAMALARDA KULLANIMI

Vildan ERCİ

Biyomühendislik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN

Mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan biyoreaktör sistemi ve tipi etkin mikroalg büyütülmesi için en önemli parametrelerden birisidir. Tasarım, yetiştirilen türün özelliklerine ve kültivasyon sonucunda hedeflenen amaca uygun olmalıdır. Ek olarak, mikroalg büyüme koşulları kolaylıkla izlenebilir olmalıdır. Bu tez çalışmasında *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) mikroalginin daha verimli bir şekilde yetiştirilmesi amacı ile laboratuvar ölçekli solar bir biyoreaktör tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada temel hedeflerden birisi tasarlanan biyoreaktör ile farklı açılardan gelen gün ışığının toplanması ve fiber optik kablolarla biyoreaktör ortamına aktarabilmesi ve bu sayede yetiştirilen mikroalgin maksimum düzeyde ışık yoğunluğundan faydalanmasını sağlamak oluşturmıştır. Aynı zamanda, biyoreaktörde mikroalg büyümesini takip için *C. vulgaris* kültivasyonunu etkileyen iki önemli faktör olan nitrat ve pH iyon-seçici elektrotlar (ISE) ile gerçek zamanlı olarak takibi yapılmıştır. Ayrıca, *C. vulgaris* büyümesine etki eden diğer parametrelerden olan sıcaklık, çözünmüş oksijen, tuzluluk, iletkenlik, direnç ve toplam çözünmüş katı madde içeriği büyüme boyunca ölçülmüştür. İlgili çalışmanın diğer kısmında ise laboratuvar ölçekli solar biyoreaktörde büyümesini

tamamlayan *C. vulgaris* mikroalgleri hasat edildikten sonra tohum çimlenmesi ve bitki büyümesi üzerine olan etkileri incelenmiştir. Buna ilaveten, mikroalg uygulamasının toprak fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkisi ve rüzgâr sonucunda oluşan toprak kaybını engellemedeki etkinliği değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre, *C. vulgaris* büyümesinde logaritmik büyüme fazının 50. güne kadar sürdüğü belirlenmiştir. Biyoreaktörde takip edilen süreç boyunca gerçekleştirilen potansiyometrik ölçümler sonucunda, besin solüsyonunda nitrat oranının OD değerinin artmasına kıyasla azaldığı belirlenmiştir. *C. vulgaris* mikroalginin uygulamalarının domates tohumlarının çimlenmesine ve bitki gelişimine etkisinin doz bağımlı olduğu belirlenirken, en etkin tohum çimlenmesinin ve bitki büyümesinin istatistiki olarak en yüksek sırası ile 8 mL ve 80 mLkg<sup>-1</sup> ve üzeri toprak uygulama dozunda gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, 9 ms<sup>-1</sup> rüzgâr hızında oluşan toprak erozyonunu önlemede 80 mLkg<sup>-1</sup> ve üzeri uygulamalarının etkin olduğu istatistiki olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar *C. vulgaris* mikroalginin solar biyoreaktörde verimli bir şekilde üretilebileceğini ve tarımsal uygulamalar için iyi bir çevre dostu alternatif oluşturacağını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Solar biyoreaktör, iyon seçici sensör, *Chlorella vulgaris*, bitki gelişimi, toprak erozyonu.

# DESIGN OF LABORATORY-SCALE SOLAR BIOREACTOR FOR THE PRODUCTION OF MICROALGAE AND THE USE OF MICROALGAE IN AGRICULTURAL APPLICATIONS

Vildan ERCİ

Department of Bioengineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN

The bioreactor system and type used in microalgae cultivation is one of the most important parameters for effective microalgae growth. The design should correspond to the characteristics of the cultivated species and the purpose of cultivation. In addition, the growth conditions for microalgae should be easily observed. In this thesis, a laboratory-scale solar bioreactor was designed and fabricated to grow *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) microalgae more efficiently. In this study, one of the main goals was to collect the sunlight coming from different angles with the designed bioreactor and to transfer it to the bioreactor environment with fiber optic cables, and thus ensuring that the grown microalgae benefit from the maximum level of light intensity. At the same time, nitrate and pH, two important factors affecting *C. vulgaris* cultivation, were monitored in real time using ion selective electrodes (ISE) to monitor microalgae growth in the bioreactor. In addition, temperature, dissolved oxygen, salinity, conductivity, resistance, and total dissolved solids content, which are other parameters affecting the growth of *C. vulgaris*, were measured during the growth. In the other part of the study, after harvesting *C. vulgaris* microalgae that had completed their growth in a laboratory-scale solar

bioreactor, their effects on seed germination and plant growth were investigated. In addition, the effects of microalgae treatments on soil physicochemical properties and their effectiveness in preventing soil loss by wind were evaluated. According to the results, it was found that the logarithmic growth phase continued in the *C. vulgaris* growth up to the 50th day. As a result of the potentiometric measurements performed during the process in the bioreactor, it was determined that the nitrate ratio in the nutrient solution decreased compared to the increase in the OD value. While it was determined that the effects of *C. vulgaris* treatments on the germination of tomato seed and plant growth were found to be dose-dependent, it was found that seed germination and plant growth were statistically most effective at 8 mL and 80 mLkg<sup>-1</sup> and above application doses, respectively. In addition, applications of 80 mLkg<sup>-1</sup> and above were statistically found to be effective in preventing soil erosion at wind speeds of 9 ms<sup>-1</sup>. The obtained results showed that *C. vulgaris* microalgae can be efficiently produced in a solar bioreactor and will be a good environmentally friendly alternative for agricultural applications.

**Keywords:** Solar bioreactor, ion selective electrodes, *Chlorella vulgaris*, plant growth, soil erosion.

### 1.1 Literatür Özeti

Mikroalgler, siyanobakteriler grubuna ait bilinen en eski gurubun Batı Avustralya kayalıklarında fosilleşmesiyle 3-4 milyar yıl öncesine kadar dayanan çok eski bir tarihe sahiptir. Yapılarının günümüze kadar değişmeden kaldığını, ilkel olmalarına rağmen oldukça karmaşık ve düzenli canlıları temsil ettiklerini yapılan araştırmalar göstermiştir (Safi vd., 2014). Nehirler, göller, denizler, atık sular ve hatta çöller gibi çeşitli alanlarda mikroalglerin büyüyebildikleri bilinmektedir. Biyolojik çeşitlilikleri oldukça büyüktür. *Chlorella vulgaris* gibi tatlı suda gelişen türleri olduğu gibi tuzlu suda yetişen farklı türleri de mevcuttur (Metsoviti vd., 2020).

Mikroalgler tek hücreli fotosentetik organizmalar olup büyüme ve biyokütle üretebilmek için ışık ve karbondioksit ihtiyacı duyarlar. Ayrıca heterotrofik olarak büyüeyebilen mikroalglerde mevcuttur. Bu alg türleri ise bir organik karbon kaynağını karanlık koşullarda kullanarak büyümekte ve biyokütle oluşturmaktadırlar. Son yıllarda 40.000'den fazla ökaryotik mikroalg türü, hayvan yemi, gıda takviyeleri, nutrasötikler ve farmasötikler için alternatif kaynaklar olarak potansiyelleri açısından araştırılmıştır (Mata vd., 2010; Tomaselli, 2004).

Geleneksel olarak mikroalgler üretim yönünden bitkilerle karşılaştırıldığında, mikroalglerin büyüme özelliklerine göre çeşitli avantajları vardır. Mikroalgler verimli topraklara ihtiyaç duymamaktadır. Mikroalgler besinleri oldukça verimli bir şekilde kullanabildiğinden, yalnızca temel besinleri içeren bir ortam kullanılabilirler ve böylece kullanılmayan gübreler nedeniyle su kirliliğini önleyebilirler. Ayrıca, bazı mikroalgler acı suda, tuzlu suda veya deniz suyunda büyüeyebilir ve bu da sınırlı tatlı su kaynaklarının korunmasına yardımcı olabilmektedir (Yan vd., 2016). Mikroalgler gibi fotosentetik mikroorganizmalar, daha kısa sürede yüksek miktarda lipit, karbonhidrat, protein üretir ve benzersiz büyüme koşullarına sahiptir (Deprá vd., 2019). Karasal bitkiler ile karşılaştırıldığında biyolojik CO<sub>2</sub> fiksasyonunun mikroalglerle 10 kat daha fazla verime sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bu özelliklerinin yanı sıra mikroalgler çok hızlı büyüeyebilmektedirler. Mikroalgler içerdikleri yüksek katma değerli ürünler ile de ön

plana çıkmaktadırlar. Bunlar arasında biyoyakıtlar, biyopolimerler, doğal renklendiriciler, çoklu doymamış yağ asitleri ve terapötik maddeler sıralanmaktadır (El-Baz & Baky, 2018).

Mikroalglerden çeşitli uygulamalarda kullanmak amacıyla maksimum biyokütle verimi için suş seçimi önemli bir faktördür. Mikroalglerin hem laboratuvarında hem de açık ortamda yetiştirilmesi için kullanılan birçok sistem vardır. Mikroalglerin laboratuvarında kültürlenmesi ve bakımı için yaygın olarak kullanılan bir sistem olarak konik bir şişe veya normal kültür şişesi ortamı olmaktadır. Bununla birlikte, mikroalglerin endüstriyel ölçekte veya ticari ölçekte yetiştirilmesi ve hasat edilmesinin önemli maliyet etkenleri olduğundan, günlük birim hacim başına daha yüksek biyokütle verimi üreten pilot ölçekli açık havuz veya fotobiyoreaktör sistemler gerekmektedir (Thuy Lan Chi vd., 2022).

Mikroalgler, birçok alanda olduğu gibi tarım uygulamalarında da çeşitli roller üstlenebilmektedirler. Örneğin, çevresel kirliliğe sebebiyet veren kimyasal gübrelerin yerine mikroalglerin tarımda alternatif olarak kullanımları çevresel kirlenmeyi azalttığı gibi bitki ve toprak özelliklerine de faydalı yönde katkılar sunmaktadır. Bu alanda çalışmalar son zamanlarda yoğunlaşmıştır (Alvarez vd., 2021; Stirr & van Staden, 2020). Biyogübreler, kimyasal gübrelerin en iyi alternatifi olarak kabul edilmektedir ve yeşil, sağlıklı ve kirlilik içermeyen bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Biyogübreler toprakta azot, fosfor ve potasyum gibi birçok elementin kullanımını etkili bir şekilde iyileştirebilmektedir. Ayrıca, biyogübreler bitkilerin stres koşullarında daha dirençli olmasına katkı sunmaktadırlar ve böylece tarımsal ürünlerin kalitesini ve verimini artırabilmektedirler. Diğer bir faydası da topraktaki bitki patojenlerinin toksisitesini önemli ölçüde azaltmaları gösterilmiştir (D. P. Singh vd., 2011). Çeşitli biyogübre türleri arasında, ökaryotik mikroalgler, anoksijenik fototroflar ve siyanobakteriler dahil olmak üzere fotosentetik organizmalara dayalı formülasyonlar, özellikle toprak verimliliğinin korunmasına ve mahsul veriminin artırılmasına önemli katkılarından dolayı önem kazanmaktadır (Renuka vd., 2018). Mikroalgler temelde iki şekilde tarım uygulamalarında toprağa katkıda bulunmaktadır. Bunlardan birincisinde toprakta besin zenginleştirmesine azot fiksasyonu ve mineralizasyonu ile katkıda bulunan heterokist siyanobakteriler yer alırken diğerinde ise toprakta çözünmeyen veya hareketsiz besinlerin salınması yoluyla besin olarak katkıda bulunan heterokist olmayan siyanobakteriler ve yeşil algler yer almaktadır. Toprak organik maddesinin gelişmesi, toprak mineralizasyonunun sağlanması ve toprakta makro ve mikro besinlerin kullanımının

iyileştirilmesini sağlayan karbon zenginleştirme olayı mikroalglerin fotosentez kapasitesi ve toprak uygulamaları neticesinde gerçekleşir. Ek olarak, mikroalgler fitohormonlar, polisakkaritler ve benzeri metabolitler üretebilir ve bu da tarımsal üretime ek faydalar sağlayabilir (Harden vd., 2009; Lu & Xu, 2015). Kısacası mikroalglerin besin içeriğini artırması, toprak organik karbonunu ve verimliliğini iyileştirmesi ve topraktaki mikrobiyal aktiviteyi olumlu yönde etkileyerek bitki büyümesini ve ürün verimini artırması gibi katkı sonucu olumlu yönler nedeniyle kimyasal gübrelerin yerine modern tarımda uygulanabilir alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, seskiterpenler, alkaloidler ve andaminler gibi mikroalg metabolitleri, toprak ve bitkilere zararlı organizmaların kontrolü için yüksek bir potansiyel göstererek biyopestisidal özellikler sunar (Costa vd., 2019).

## 1.2 Tezin Amacı

Alg hücrelerine yeterli miktarda ışık iletmek, özellikle büyük ölçekli alg yetiştiriciliği için alg biyokütlesi birikimi için kritik bir faktördür. Aydınlatma stratejileri, fotonları kültür ortamında alg hücrelerine aktarmak için güneş ışığının nüfuz etmesine dayanmaktadır. Bununla birlikte, alg yetiştiriciliği için güneş ışığının kullanılması, coğrafi konum, gündüz süresi ve hava koşullarından etkilendiği için bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, mikroalg üretimini daha etkin gerçekleştirmek amacı ile bu çalışmada yeni bir solar biyoreaktör tasarlanmıştır. Yeni solar biyoreaktördeki mikroalg büyüme özelliklerinin gerçek zamanlı nitrat ve pH sensörleri ile izlenmesi diğer hedeflerden birisini temsil etmektedir. Ayrıca, yetiştirilen ve hasadı yapılan *Chlorella vulgaris* mikroalginin tohum çimlenmesi, bitki gelişimi ve toprak özelliklerine olan etkisinin ortaya çıkarılarak tarımda yenilikçi ve çevre dostu bir alternatif uygulamanın potansiyelinin ortaya çıkarılması bu tez çalışmasında temel hedeflerden birini oluşturmaktadır.

## 1.3 Orijinal Katkı

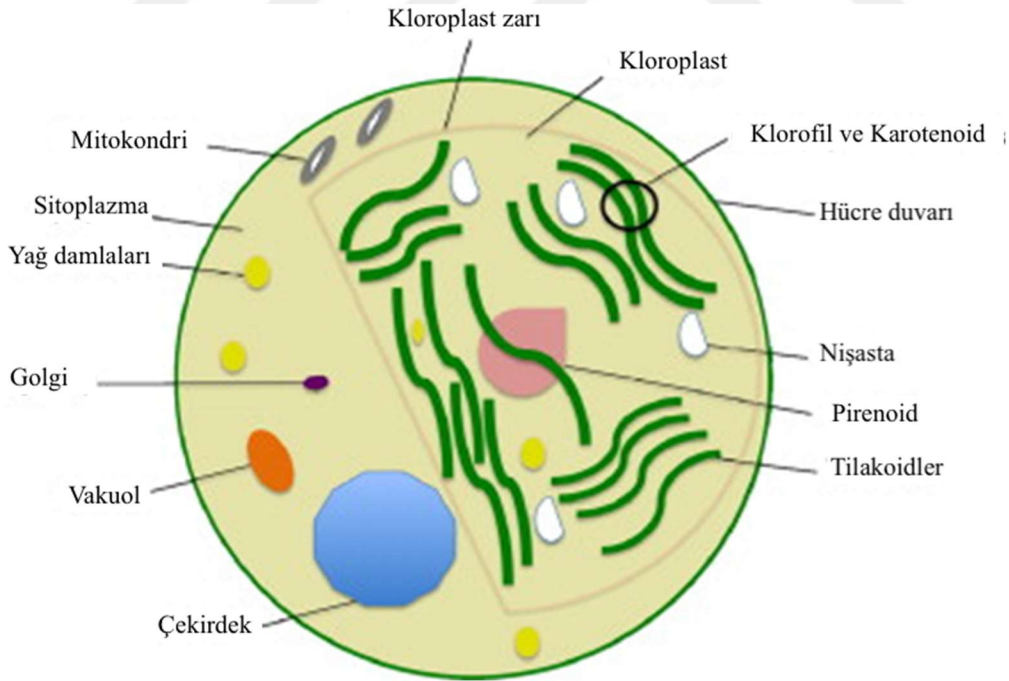
Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında *Chlorella vulgaris* (*C. Vulgaris*) mikroalginin yetiştirilmesi için laboratuvar ölçekli bir solar biyoreaktörün tasarımı ve üretilmesi ve mikroalgal büyümenin nitrat ve pH sensörleri ile takibinin yapılması literatüre yeni bir katkı sunacak olup çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada sensörler ile takibi yapılan laboratuvar ölçekli bir solar biyoreaktörde yetiştirilen *C. vulgaris* 'in tohum çimlenmesi, bitki gelişimi ve özellikle rüzgâr erozyonu sonucu oluşan

toprak kaybını önlemedeki etkisinin incelenmiş olması mikroalglerin tarım uygulamalarında bir alternatif oluşturabilmesi için yenilikçi bir yön sunmaktadır.



### 2.1 Mikroalgler

Algler genellikle makroalgler ve mikroalgler olarak ikiye ayrılır. Makroalgler tatlı su ve deniz türlerini içermesine rağmen, genellikle deniz yosunu olarak bilinen büyük alglerdir (Ge vd., 2018). Mikroalgler, ökaryotik protistler (fotoototroflar) ve prokaryotik siyanobakterilerden oluşan oldukça büyük bir grup oluşturmaktadır (Bello vd., 2021). Kokoid yeşil mikroalg cinsi olan *Chlorella* en önemli ticari mikroalglerden birisidir (Champenois vd., 2015). *Chlorella vulgaris* Beyerinck, 1890'da Hollandalı mikrobiyolog Dr Martinus Willem Beijerinck tarafından bir ökaryotik mikroalg'in ilk saf kültüründen tanımlanan yeşil bir algdir. *C. vulgaris* yüksek fotosentetik kabiliyetine ve ototrofik, miksotrofik ve heterotrofik koşullar altında hızlı büyüme kabiliyetine sahip olup tatlı su, deniz ve karasal ortamlarda yaygın olarak bulunabilmektedir (Tomaselli, 2004).



**Şekil 2.1** *C. vulgaris*'in hücre yapısı.(Safı vd., 2014).

*C. vulgaris* flagella içermeyen 2 ila 10 µm çapında, küresel, küre altı veya elips şeklinde bir organizmadır (Champenois vd., 2015). *C. vulgaris* mitokondri, küçük bir çekirdek, vakuoller, tek bir kloroplast ve Golgi cismi gibi organelleri bünyesinde

bulundurmaktadır. *C. vulgaris*, eşeysiz ve hızlı üreyen hareketsiz bir üreme hücresi olarak tanımlanabilmektedir (otospor). Böylece, 24 saat içinde, optimal koşullarda büyüyen *C. vulgaris*'in bir hücresi, alglerde en yaygın eşeysiz üreme olan otosporülasyonla çoğalır. Bu şekilde, ana hücrenin hücre duvarı içinde kendi hücre duvarına sahip dört yavru hücre oluşur (Yamamoto vd., 2004). Bu yeni oluşan hücrelerin olgunlaşmasından sonra, ana hücre duvarı yırtılarak yavru hücrelerin serbest kalmasına izin verir ve ana hücrenin kalan kalıntıları, yeni oluşan yavru hücreler tarafından besin olarak tüketilir. *C. vulgaris* hızlı bir büyüme oranına sahip olup ve büyüme ortamında belirli bir bileşenin verimini değiştirmesi ile büyüme verimi değiştirilebilmektedir. *C. vulgaris*, zorlu koşullara ve istilacı türlere karşı oldukça dirençli bir tür olup bu özelliği ile büyük üretim ortamları için idealdir. *C. vulgaris* nitrojen ve fosfor sınırlamasında, yüksek CO<sub>2</sub> konsantrasyonunda, besi ortamındaki aşırı demir fazlalığına maruz kalmada veya sıcaklık artışı gibi olumsuz büyüme koşullarında lipit ve nişasta içeriğini arttırırken biyokütle verimliliğini ise durma noktasına getirmektedir. Öte yandan, protein içeriği normal ve kontrollü büyüme koşullarında artmaktadır. Bu nedenle, biyokütle üretkenliğini, lipit, protein, karbonhidrat ve pigment içeriğini kontrollü olarak yönetmek için birçok büyütme tekniği üretim koşullarında test edilebilmektedir (Safi vd., 2014).

## **2.2 Mikroalg Yetiştirme Sistemleri**

Mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan biyoreaktör sistemleri ve tipleri, mikroalg yetiştirilmesinde en önemli parametrelerden biridir. Tasarım, yetiştirilen türlere ve kültürün amacına uygun olmalıdır. Mikroalg yetiştiriciliği açık veya kapalı sistemlerde gerçekleştirilebilir. Açık alan ekimi genellikle çevreye maruz kalan açık kanallı biyoreaktörlerde gerçekleştirilmektedir. Mikroalg yetiştirme sistemleri yapısında kil, çimento, PVC levhalar, cam, elyaf, polietilen veya tuğla gibi farklı malzemeler kullanılmakta olup farklı şekil ve boyutlarda tasarlanabilmektedirler (Gualtieri, 2014).

### **2.2.1 Açık havuz sistemleri**

Alg yetiştiriciliğinde açık havuzlar yaygın olarak kullanılan bir üretim şeklidir. Bu yöntem büyük ölçekli biyokütle üretimi için maliyet yönünden en uygun yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Doğal sular (göller, lagünler ve göletler), atık su göletleri, dairesel ve kanallı havuzlar gibi yapay su kütleleri ve yapay üretim ortamları bu sistemlere örnek olarak gösterilmektedir. Büyük ölçekte mikroalg yetiştirmenin en eski ve en basit yollarından birisi olarak açık havuz yetiştiriciliği; düşük enerji talebi, ölçek büyütebilme

özelliği ve nispeten daha ucuz yapım ve bakım maliyetleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Costa & de Moraes, 2014). Açık havuz sistemleri, en uygun maliyetli yetiştirme sistemi olmasına ve geniş yetiştirme alanına sahip olmasına rağmen doğal sudan mikroalg yetiştirme nispeten daha düşük hücre konsantrasyonu ile sonuçlanmaktadır ve bu nedenle oldukça verimli bir üretim yöntemi gerektirmektedir (Tan vd., 2020). Ek olarak, tuzluluk ve pH gibi mikroalglerin büyüme koşullarını etkileyen yağmur suyu akışı, sızıntıya neden olan kıyı erozyonu ve artan su bulanıklığı gibi konular, açık havuzlardaki mikroalglerin üretkenliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Ayrıca, sistemde protozoa ve bakteri kontaminasyonu ürünlerin toksik ve kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır, bu durum açık havuz yetiştirme sisteminde ortaya çıkan bir diğer sorundur. Bu sorunu ortadan kaldırmanın mevcut yolu, aşırı alkali veya tuzlu koşullarda hayatta kalabilen mikroalglerin yetiştirilmesidir, çünkü bu koşullar altında yalnızca birkaç kirletici gelişebilmektedir. Ayrıca sistemin açık yapısı nedeniyle mikroalglerin büyüme hızını etkileyebilecek sıcaklık ve ışık şiddeti gibi bazı büyüme parametrelerinin kontrolü de daha zordur (Stark & O’Gara, 2012).

Açık sistemlerden biri olan dairesel havuzlar, büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan ilk yapay havuzlar olarak bilinmektedir. Bu yetiştirme sistemi adını dairesel şekilli kültür tankından almıştır ve tipik olarak 30-70 cm derinliğe ve 45 m genişliğe ve havuzun merkezine yerleştirilmiş dönen bir karıştırıcıya sahiptir (Shen vd., 2009). Bununla birlikte, dönen kolun sunduğu karıştırma en fazla 10.000 m<sup>2</sup> alan ile sınırlıdır (Faried vd., 2017). Diğer bir açık yetiştirme sistemi ise yarış pisti (raceway) havuzlarıdır. Besin maddelerinin eşit dağılımını sağlamak ve mikroalg biyokütlesinin çökmesini önlemek için mikroalg biyokütlesinin devridaimini sağlayan yaklaşık 30 cm derinliğinde bir dizi kapalı döngü kanalı ve çarktan oluşur. Geçtiğimiz 40 yıl boyunca, bu sistemler mikroalg ürünlerinin büyük ölçekli ekimi ve ticari üretimi için en yaygın olarak kullanılan açık sistem reaktörü olmuştur (El-Baz & Baky, 2018)

### **2.2.2 Fotobiyoreaktörler**

Fotobiyoreaktör (PBR) mühendisliğindeki son gelişmeler, biyoproses mühendisliğinin üretim maliyetlerini düşürme ve alglerin sahip olduğu potansiyelleri ortaya çıkarmaya yoğunlaştı. Bir fotobiyoreaktör, kontrollü biyokütle üretimi için tasarlanmış kapalı, aydınlatılmış bir kültür kabı olarak tanımlanabilir. Bir fotobiyoreaktör, sistemle gaz veya kirletici alışverişi olmayan dış ortamdan kilitlenmiş kapalı bir yapıdır. Genel olarak, PBR'ler mikroalg yetiştiriciliği için en uygun sistemler olarak kabul edilmiştir. PBR'lerin

seçimi, mikroalg biyokütlesinin üretkenliği ve nihai ürünler dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır ve bu sistemler açık sistemlere göre kontrolü daha basit ve kirlenme ile ilgili sorunları en aza indirebilmektedir. Borulu biyoreaktör, düz plaka biyoreaktör ve kolon biyoreaktör dahil olmak üzere kapalı fotobiyoreaktörler, bakteriyel kontaminasyon risklerini azaltmak ve katma değerli mikroalg biyokütlesi üretmek için geliştirilmiştir (Carvalho vd., 2011).

Fotobiyoreaktörler, maliyetlerine rağmen, açık sistemlere göre birkaç önemli avantaja sahiptir:

- Fotobiyoreaktörler kontaminasyonu en aza indirir ve monokültürlerin aksenik alg kültivasyonuna izin verir.
- Fotobiyoreaktörler pH, sıcaklık, ışık, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu vb. koşullar üzerinde daha iyi kontrol sunar.
- Fotobiyoreaktörler daha az CO<sub>2</sub> kaybına yol açar.
- Foto biyoreaktörler suyun buharlaşmasını önler.
- Fotobiyoreaktörler daha yüksek hücre konsantrasyonlarına izin verir.
- Fotobiyoreaktörler, karmaşık biyofarmasötiklerin üretimine izin verir (R. N. Singh & Sharma, 2012)

### **2.2.3 *Chlorella vulgaris* yetiştirilmesinde rol alan faktörler**

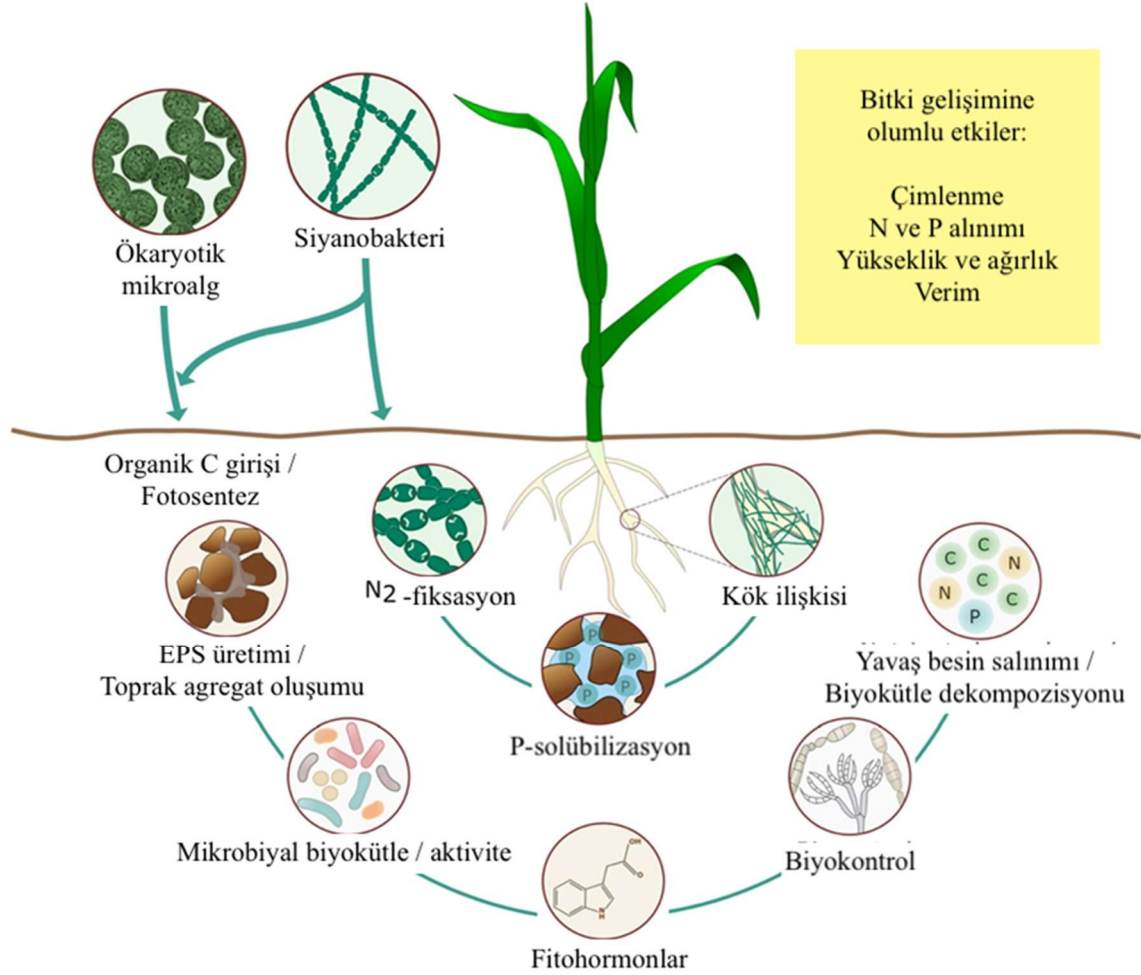
Mikroalg kültür sistemleri spesifik türlere bağlıdır ve mikroalg kültür sistemleri, sıcaklık, ışık yoğunluğu, karbondioksit, pH ve kültür ortamının besin bileşimi gibi farklı faktörlerden etkilenir (Papapolymerou vd., 2019). Diğer alg türlerine göre bir sıcaklık ayarı, genellikle *C. vulgaris*'in hayatta kalması için yeterlidir. Optimum büyüme oranını korumak için gün ışığından kaynaklanan sıcaklık artışı için bir soğutma sistemi düşünülmelidir (Elcik & Cakmakci, 2017). Alglerin iyi bir şekilde büyümesi ve genellikle hava/gaz köpürtmesi veya kültür ortamının pompayla çalkalanmasıyla sağlanan biyokütle sedimantasyonunun önlenmesi için yeterli karıştırma gereklidir. Sürekli ışık kaynağına sahip reaktörlerde, yüksek üretkenlik elde etmek için hücreleri karanlıktan aydınlatılmış hacme kaydırmak için karıştırma özellikle önemlidir. Mikroalglerin büyüme hızı, ideal bir sistemde fotosentez hızı ile doğrudan bir korelasyon içinde gerçekleşmektedir (Elcik & Cakmakci, 2017).

PBR'lerdeki fotosentez hızı, her zaman tüm kültüre nüfuz edemeyen güneş radyasyonu miktarına teknik olarak bağlıdır. Sistemin dış katmanları iç hacme göre daha fazla ışık almaktadır. Işık konsantrasyonu ve dağılımına ek olarak, ışık türünün (güneş ışığı veya yapay ışık)'de PBR'lerin tasarımında dikkate alınması önemlidir. Ayrıca en iyi sonuç için karanlık bir dönemin planlanması gerekmektedir (Elcik & Cakmakci, 2017). Işık yoğunluğu, mikroalg büyümesi ve biyokütle üretiminde en önemli yetiştirme parametrelerinden biridir ve ışık enerjisinin tedariki ve verimli kullanımı, fotosentetik mikroorganizmaların yetiştirilmesinde araştırma ve geliştirmede en büyük bilimsel ve teknolojik zorluğu oluşturmıştır (Y. Li vd., 2012). Endüstriyel alg yetiştiriciliğinde, sürekli ışık veya açık karanlık döngüsü gibi aydınlatma koşulları, fotoperiyodun uzunluğu ve ışık yoğunluğu hem mikroalg büyümesini hem de biyokütle bileşimini etkiler (Wahidin vd., 2013). Hem biyokütlenin bileşimi hem de üretimi biyolojik süreçlerin düzenlenmesi haricinde ışık yoğunluğuna bağlıdır (Maroneze vd., 2016). Mikroalglerin fotosentez hızını ve dolayısıyla büyüme hızlarını etkileyen en önemli parametre ışık yoğunluğudur. Çünkü, ATP ve NADPH üretmek ve büyüme için gerekli molekülleri sentezlemek için mikroalgler ışığa ihtiyaç duyar (S. P. Singh & Singh, 2015). Tüm çevresel faktörler arasında ışık kaynağı, yalnızca alglerin fotosentezini ve üretkenliğini, ayrıca hücre bileşimini ve metabolik yolu değil, aynı zamanda alg yetiştirme sürecinin ekonomik verimliliğini de büyük ölçüde etkileyen en önemli faktörlerden birisidir (Cuaresma vd., 2009).

Biyokütle konsantrasyonunda başlangıç kültür pH değeri önemli bir role sahiptir. Yüksek pH seviyesi, bazı mikroalg türlerinin büyüme hızını azaltabilir (Yeh vd., 2010). Mikroalglerin büyüme seviyesi ve nihai konsantrasyonu, ortam bileşiminden oldukça etkilenir (Dauta vd., 1990). Yeterli biyokütle üretimi için gerekli tüm besin maddelerinin alglerin büyüme ortamında sağlanması gereklidir. Alg üretimine katkıda bulunan ilk ve en önemli bileşen karbondur. Organik karbon kaynaklarının (Asetik asit veya pepton) yanı sıra inorganik karbon dioksit ortam içinde sağlanabilir. Nitrojen, genellikle ortama nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) formunda eklenen alg biyokütlesi üretiminde yer alan önemli bir temel besindir. Nitrojen, biyokütle içeriğinin % 10'undan fazlasını oluşturur ve kültür ortamındaki eksikliği klorofillerin azalmasına, karotenoidlerin artmasına, polisakkaritlerin ve bazı yağların birikmesine neden olur (Widjaja vd., 2009). Fosfor ise, DNA anabolizması ve enerji iletimi gibi büyümede yer alan hücresel süreçler için gereklidir. Ayrıca, potasyum, sodyum, demir, magnezyum, selenyum ve kalsiyum içeren

diğer elementler ile eser elementler (bor, bakır, manganez, çinko ve molibden) enzim reaksiyonlarında kullanılan önemli besin elementleridir (Cysewski & Lorenz, 2004).

### 2.3 Mikroalglerin tarımsal uygulamaları



**Şekil 2.2** Mikroalglerin toprak ve bitkiler üzerindeki seçilmiş yararlı etkileri (Alharbi vd., 2021).

Mikroalgler ve siyanobakteriler, fenolik bileşikler, polisakkaritler, hormon benzeri maddeler ve proteinler gibi biyolojik olarak aktif bileşiklerin önemli bir kaynağıdır ve diğerlerinin yanı sıra antioksidan maddeler, bitki büyümesini hızlandırıcılar olarak faydaları bilinmektedir. Ayrıca, nitrojen sabitleyen siyanobakteriler ile mikroalgler ve makroalgler toprağın gübrelenmesi ve bitki büyümesinin teşvik edilmesi gibi rolleriyle bilinen organizmalardır (Chiaiese vd., 2018).

Günümüzde kimyasal gübrelerin tarım alanlarında kullanılması ile yüksek verim oranına sahip gıda ürünlerinin üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Fakat, bu durum ciddi çevre ve toprak kirliliği sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Kimyasal gübrenin aşırı

uygulanması, N, P ve K oranlarında ciddi dengesizlik, toprak sıkışması, tuzlanma, besin azaltma, yeraltı suyu kirliliği gibi modern tarımın sürdürülebilir gelişimini engelleyen bir dizi sorunla sonuçlanmıştır (Deepika & MubarakAli, 2020). Kimyasal gübre kullanımı sonucu oluşan bu sorunların ortadan kaldırılmasına yönelik olarak çevre dostu alternatif gübre kullanımı önemli hale gelmiştir. Günümüzde topraktaki yüksek orandaki besin maddesinin eksikliği talebinin karşılanması için kimyasal bazlı gübrelerin tüketiminde sürekli artış meydana gelmektedir bu durum mahsul kalitesini ve hatta toprak kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Kimyasal gübreler, uzun süreli kullanımdan sonra toprakta biriken ve toprakta metal iyonları ile suda çözünmeyen maddeler oluşturan ve toprak verimliliğini azaltan çok sayıda etkisiz bileşen içermekte olup ayrıca toprakta dengesiz azot, fosfor ve potasyum oranına, toprak besin bileşiminin azalmasına, toprak tuzluluğu ve sıkışması gibi sorunlara da yol açmaktadır. Mikroalglerden hazırlanan gübreler ise, zengin potasyum, fosfor ve nitrojen içeriklerinin yanı sıra metabolitler ve oksinler, sitokinin ve gibberellinler gibi bitki gelişimini teşvik edici düzenleyiciler açısından zengin olmaları nedeniyle kimyasal bazlı gübrelerle karşı tercih edilmektedir (Uysal vd., 2015). Mikroalglerin toprak verimliliğini, bitki büyümesini, meyve kalitesini, beslenme özelliklerini ve tahıl verimini artırmak için biyogübre olarak potansiyel kullanımını da ortaya koyan çalışmalara son zamanlarda artan bir ilgi ortaya çıkmıştır (Coppens vd., 2016). Araştırmaların çoğu, diazotrofik siyanobakteriler yoluyla N gübrelemesine odaklansa da (Kaushik, 1998), diğer faydalı yönler son zamlara kadar daha az araştırılmıştır (Mandal vd., 1999). Bununla birlikte, son çalışmalar, siyanobakterilerin uygulamasının diğer mikro- (Çinko (Zn), Bakır (Cu) Demir (Fe) vb.) ve makro besinlerin (karbon (C), nitrojen (N), fosfor (P), potasyum (K)) mevcudiyetini de artırabildiğini ortaya koymuştur (Coppens vd., 2016; Nisha vd., 2007).

Tarımda biyostimülanların işlevi, tohumlarda veya rizosferde bitki büyümesini, besin kullanım etkinliğini, abiyotik faktörlere karşı toleransı ve mahsul kalitesini artırmayı amaçlayan mekanizmaları veya metabolizmayı başlatmak veya hızlandırmaktır. Kısacası, biyostimülanlar tohuma veya toprağa düşük dozlarda uygulandığında mahsulün fizyolojik süreçlerini düzenleyebilen ve geliştirebilen ürünlerdir (Ronga vd., 2019). Hem yeşil mikroalgler hem de siyanobakteriler tarafından üretilen fitohormonlar, polisakkaritler, amino asitler ve antimikrobiyal bileşikler gibi metabolitler sayesinde verimi artırarak tarımsal üretime fayda sağlamaktadır (Rachidi vd., 2020). *Chlorella vulgaris*, *Chlorella ellipsoidea*, *Chlorella infusionum*, *Acutodesmus dimorphus*,

*Scenedesmus platensis*, *Scenedesmus quadricauda*, *Dunaliella salina*, *Spirulina maxima* ve *Calothrix* elenkini biyostimülatör etkiye sahip bazı önemli mikroalg türleridir. Bu aktivite birincil metabolitlerin (karbonhidratlar ve proteinler, lipidler), amino asitlerin (arginin ve triptofan), vitaminlerin, osmolitlerin (prolin ve glisin betain) ve polisakkaritlerin ( $\beta$ -glukan) içeriği ile bağlantılıdır (Rachidi vd., 2020).

Zirai kimyasalların (pestisitler ve gübreler) toprak ve su için toksik elementler ve kirleticiler içerdiği ve böylece küresel biyolojik çeşitlilik üzerinde çeşitli çevresel tahribatlara yol açması günümüz önemli problemlerinden biridir. Bunların yerine çevreye zarar vermeyen ve sürdürülebilir tarıma katkıda bulunabilen alternatif yöntemler geliştirilmelidir. Bu senaryoda, biyogübreler, biyostimülanlar ve biyopestisitler gibi biyolojik kökenli zirai kimyasallar öne çıkmaktadır (Costa vd., 2019; Renuka vd., 2018). Şu anda, mikroalg bazlı arıtma teknolojilerine, besinleri, organik maddeleri ve ağır metaller gibi diğer kirleticileri ve ayrıca fekal kontaminasyon göstergelerini ortadan kaldırma kapasiteleri nedeniyle büyük ilgi artmaktadır (Garcia vd., t.y.). Mikroalgler, özellikle siyanobakteriler de esas olarak hidrolitik enzimlerin ve benzoik asit, majuskülonik asit gibi biyosidal bileşiklerin üretiminin bir sonucu olarak bakteri, mantar ve nematod gibi birçok bitki patojenine karşı antagonistik etki gösterdikleri için potansiyel biyokontrol ajanları olarak kabul edilirler (Chandel, 2009; Chaudhary vd., 2012; Gupta vd., 2013).

## **2.4 Mikroalglerin Topraklardaki Etkinlikleri**

### **2.4.1 Karbon Tutma**

Karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), sera gazı emisyonunda en büyük katkısı (% 68) oluşturmaktadır. Kimyasal gübrelerin kullanımı ile sera gazı emisyonları hammaddelerin çıkarılması, üretim süreci, nakliye ve mekanize gübreleme gibi birçok yönden artmıştır ve bunların hepsi karbondioksit emisyonlarında artışına neden olmuştur. Kimyasal gübreler kullanıldığında topraktan sera gazları ayrıca  $\text{CO}_2$  ve  $\text{NO}_2$  şeklinde yayılmaktadır. Mikroalgler, sıcaklık, ışık, pH, tuzluluk ve nem gibi değişen çevresel koşullara uyum sağlama yeteneği ile dünya çapındaki geniş dağılımları sağlayan önemli bir ekolojik değişkenlik gösterir (Alwathnani & Johansen, 2011). Siyanobakteriler ve mikroalgler, dünyadaki toplam fotosentezin % 50'sinden sorumludur. Atmosferik karbondioksitin fotosentez yoluyla organik alg biyokütlesine dönüşümünde siyanobakteriler ve mikroalgler doğrudan katkı sunmaktadırlar ve böylece tarım alanlarındaki önemli organik

madde kaynakları olarak ön plana çıkmaktadırlar. Atmosferik karbondioksiti sabitlemek ve biyokütleye dönüştürmek için besinleri verimli bir şekilde kullanmak için farklı yollara sahiptirler. Karbondioksit asimilasyonu, toprağın organik karbon içeriğini önemli ölçüde artırabilmektedir. Bunun yanı sıra, algal ekzopolisakkaritler topraktaki organik karbon havuzunu artışına yol açmakta ve diğer mikroflora ve faunanın büyümesini teşvik etmektedir.

#### **2.4.2 Azot Fiksasyonu**

Karbonun yanı sıra, azot biyokütle üretiminde en önemli besindir. Biyokütle azot içeriği popülasyona göre değişmekte olup genellikle % 1-10 arasında yer almaktadır. Atmosferde bulunan azotun bazı mikroorganizmalar (azot fikse edici) tarafından amonyağa dönüştürülme süreci biyolojik azot fiksasyonu olarak tanımlanmakta olup doğadaki azot döngüsünün korunmasına son derece önemli bir katkı sunmaktadır. Bu azot fiksasyonu belirli özelleşmiş sistemlere sahip bakteri ve algler gibi sadece birkaç özel mikroorganizma yoluyla gerçekleşebilmektedir. Azot fiksasyonunda rol oynayan organizmaların araştırılması tarım için alternatif bir gübre üretimine yol açabilir. Böylece toprak verimliliğinin korunmasında ve geliştirilmesinde önemli problemlere çözüm olanağı sunabilir. Azot eksikliğinin tipik reaksiyonu hücre renginin bozulması (klorofil azalması, humus artışı) ve polisakkaritler ve bazı yağlar (PUFA) gibi organik karbonların birikmesidir. Azot (N) genellikle tarımda en sınırlayıcı besindir ve tarımsal üretim için en büyük ve en maliyetli girdi olarak yer almaktadır (N. K. Sharma vd., 2011). Siyanobakteriler, atmosferik N'yi sabitleyebilen ve böylece toprak mikro ve makro faunası ve florası bitkilerin taleplerini karşılayabilen heterokistler adı verilen özel hücrelere sahiptir. Siyanobakteriler tarafından azot fiksasyonu, toprak azot kapasitesini artırır ve bu pozitif toprak N dengesinin toprak verimliliği için faydaları vardır (Alharbi vd., 2021). Çeşitli çalışmalar, çeşitli mikroorganizma konsorsiyumu ile aşılanmış tarımsal ürünlerin toprak azot içeriğinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

#### **2.4.3 Toprak Fosfor (P) Döngüsü**

Fosfor, tarımda azot'tan sonra ikinci en önemli sınırlayıcı besin olmasından dolayı gelecekte gıda güvenliğinin sağlanabilmesi için büyük ölçüde güvenilir bir fosfor kaynağına ihtiyaç fazla olacaktır (Vaishampayan vd., 2001). Dünya genelinde var olan tarım topraklarının yarısına yakını düşük yarayışlı fosfor miktarına sahiptir, bu durum da fosfor gübrelerinin gün geçtikçe daha fazla tüketimine neden olmaktadır. Fosfor tüketimi

2002'de 34 megatondan 2018'de 41 megaton çıkmıştır (Bolarinwa, 2022). Fosfatlı gübreler yenilenemez kaynaklar arasında olup bu yüzyılın sonuna doğru tükenme durumu söz konusudur. Dünyanın belirli bölgelerinde fosfatlı gübre kaynakları mevcuttur (başlıca Fas, Çin ve ABD). Fosfor, fosfor açısından zengin fosfat kayası gibi jeolojik yataklardan elde edilmektedir (Cordell vd., 2009). Fosfor kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle 2007 yılında fosfat kayasının fiyatları bir yıl içerisinde % 700 bir artış ile zirve yapmıştır. Bu durum doğrultusunda bir tahmin yapılacak olursa 2030 yılında bir başka zirvenin öngörülmesi olağandır (Elser, 2012). Topraklarda genellikle kısıtlı miktarda bulunan fosfor ve yetersiz mikrobiyal aktivite nedeniyle topraklara ekstra fosforlu gübre uygulamalarının yapılması bitki büyümesi ve verimliliği açısından yararlı olabilecektir. Ancak, bu uygulamaların fazla kullanımı, toprak kalitesini bozabilir ve ekosistem sağlığına zarar verebilir. Bu nedenle, topraklar için doğru fosfor yönetimi, toprak ve bitki özellikleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Yıllar geçtikçe tarımda kullanımı git gide artan fosforlu gübrelerin sadece bir miktarı bitkiler tarafından kullanılabilir. Önemli bir kısmı ya erozyon ile aşınıp taşınmakta ya da yıkanma yolu ile yer altı sularına karışmaktadır. Her iki durumda da aşırı fosforlu gübre kullanımı, toprağın organik madde miktarını azaltabilir ve çevredeki su kaynaklarına karışarak kirliliğe neden olabilir (Alori vd., 2017). Bu nedenle fosforlu gübre kullanımının dozajı, toprağın özellikleri ve bitkilerin ihtiyacına göre ayarlanmalı ve kontrol edilmelidir. Ayrıca, ekstra fosfor uygulamalarının ekonomik maliyeti de düşünülmelidir.

Birçok toprak Kalsiyum (Ca), demir (Fe) veya alüminyum (Al) ile karmaşık organik moleküller veya çözünmeyen inorganik tuzlar oluşturma eğilimine sahiptir. Bu durum bitkilerin var olan fosfor kaynaklarında yararlanabilmelerini her ne kadar tam anlamı ile sağlamasa da topraklarda var olan bu mekanizma sayesinde organik veya inorganik formlarda P içerikleri mevcut durumdadır. Kısacası topraklardaki fosfor döngüsü, çözünmüş fosforun bitkiler tarafından alınmadan önce organik fosfatlara dönüşmesi ile başlar ve bu organik fosfatlar bakteriler ve mantarlar tarafından parçalanarak suda çözülebilen inorganik fosfatlara dönüştürülür. Bu sayede inorganik fosfatlar, bitkiler tarafından kullanılabilir forma dönüştürülmüş olur. Siyanobakteriler immobilize halde olan inorganik fosfatı ( $PO_4^{3-}$ ) çözebilme yeteneğine sahiptirler. Mandal ve ark. yaptıkları bir çalışmada siyanobakterilerin bağlı olduğu  $PO_4^{3-}$  'ı ya pH'ı değiştiren  $Ca^{2+}$  için şelatörlerin senteziyle ya da karbonik ve organik asitlerin salınmasıyla ya da her ikisinin bir kombinasyonu ile çözebildiklerini belirlemişlerdir (Mandal vd., 1999). Topraklarda

yaygın olarak fosfat çözücü mikroorganizmalar (FÇM) bulunmaktadır (Vaishampayan vd., 2001). Mikroalgler, toprak da parçalanmayan inorganik P'u parçalayabilmekle birlikte, topraktaki organik P'lu bileşikleri de parçalayarak inorganik P salınmasını sağlayabilmektedir. Sulu ortamlarında inorganik fosforun noksanlığında da, mikroalgler çözünmüş organik P'un (DOP) çeşitli biçimlerini kullanarak inorganik fosfor açığa çıkarabilirler (Ghyoot vd., 2015). Organik P'un bir formu olan fosfoesterler, mikroalgler tarafından ya doğrudan ya da ökaryotik mikroalgler ve siyanobakterilerde bulunan bazı enzimler aracılığıyla büyüme için kullanılmaktadır (Dyhrman, 2016; Markou vd., 2014). Çevresel ve tarımsal uygulamalarda mikroalg kullanımı P için yeni fırsatlar sunmaktadır. Genel olarak mikroalgler organik fosfor bileşiklerini mikroalgal enzimler vasıtasıyla parçalayarak inorganik fosfor kaynaklarını açığa çıkarabilmektedir bu durum bitkiler için P mevcudiyetine (P-mineralizasyonu) neden olmuş olur. Ayrıca bu sayede de toprak P döngüsüne katkıda bulunabilir. Bitki tarafından temin edilebilen P organik P-bileşiklerinden veya polifosfatlardan ayrışma esnasında mikroalg biyokütlesine katılarak da salınabilir (Mandal vd., 1999). Tarımsal uygulamalarda mikroalglerin toprak P-döngüsüne potansiyel katkılarının ve daha nicelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Mikroalgler ayrıca mikro besin döngüsünde de rol oynanmaktadır. Birçok mikro besin elementi mikroalgal büyüme için gereklidir (Manjunath vd., 2016). Topraklara yapılan mikroalg uygulamaları ile bitki ve mikro besin zenginleştirme arasındaki mekanizmalar iyi anlaşılmamış olup, siyanobakteriler tarafından yanroforların üretilmesi önerilen bir mekanizma olarak kabul görmektedir (Rana vd., 2015). Bitkilerin mikro besinlere topraklarda yetersiz erişiminin olması dünya nüfusunun neredeyse yarısını olumsuz yönde etkileyecektir. Topraklardaki mikro besin element eksikliği gıda mahsullerinde hastalıklara karşı duyarlılığa yol açmaktadır bu nedenle mikroalg gibi değerli mikro besin sağlayıcı biyokütlelerin bu sorunu ele almadaki potansiyel rolünün aydınlatılması kritik değere sahiptir (Rana vd., 2015).

#### **2.4.4 Toprak Mikrobiyal Dinamikleri, Aktivite ve Çeşitlilik**

Topraktaki mikroorganizmalar toprak verimliliğinin, agregat yapısının, toprak organik maddesinin (TOM) olumlu yönde değişim sergilemesinde önemli rol almaktadır. Ayrıca besin döngüsü küresel biyojeokimyasal döngüleri etkileyen temel toprak süreçlerinden sorumludur (Dick vd., 1997). Güçlü, dinamik mikrobiyal toplulukların topraklardaki varlığı ve sürdürülebilirliği ekosistemin işleyişi için önem arz etmektedir. Gereğinden

fazla sentetik gübrelerin kullanımıyla tarımsal kirlilik açığa çıktığı gibi toprak mikrobiyal çeşitliliğinde de azalmalar meydana gelecektir. Doğal olarak bu ve benzeri parametrelere bağlı toprak kalitesinde bozulmalar gözlemlenecektir. Sürdürülebilir tarım için bu ve benzeri sorunların önüne geçmek öncelikli hedeflerimiz arasında yer alması gerekmektedir (Bender vd., 2016). Bitkiler tarafından topraklara verilen organik substratların çeşitli mikrobiyal topluluklardan faydalanarak parçalanabilmesi ve bu sayede yüksek verimli ekinlerin elde edilme olanağının olması durumu tarımsal sistemleri (organik tarım dahil) destekleyen aktif ve işlevsel bir olgudur (Tautges vd., 2016). Bu nedenle, toprak mikroorganizmaları toprak işleyişinin ve sürdürülebilirliğinin korunması için önem arz etmektedir ayrıca toprak kalitesinin bir göstergesi olarak da kabul edilmektedir (Andrews vd., 2004). Toprak kalitesi için mikrobiyolojik parametreler arasında en yaygın olanlar, toprak mikrobiyal biyokütle, aktivite (örneğin, toprak enzimleri) ve mikrobiyal topluluk bileşimi ve çeşitliliğidir (Dick vd., 1997). Son zamanlarda mikroalglerle alakalı olarak yapılan çalışmalarda mikroalglerin özellikle mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ve enzim aktivitesi üzerindeki etkileri incelenmekteyken mikroalglerin topluluk bileşimi ve çeşitliliği hakkında yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

TOM'un döngüsü ve dönüşümünde oldukça büyük bir öneme sahip olan toprak mikrobiyal biyokütlesi besinlerin ana kaynağı olarak işlev görmektedir (örn., organik C, N ve P mineralizasyonu) (Gregorich vd., 1994). Mikrobiyal biyokütle topraktaki C mevcudiyetinden oldukça etkilenebilmekte olup topraklarda meydana gelen en ufak değişikliklerin de en hassas bir göstergelerinden birisidir (Kallenbach & Grandy, 2011). Tarımsal işleme ile TOM'un miktarı ve kalitesi azalır bu durum da toprak mikrobiyal biyokütlesinde bir azalmaya yol açar. Bu nedenle, ekim yapılmış veya yapılacak olan topraklarda C sağlayan ve mikrobiyal biyokütleyi geri kazandıran tarımsal uygulamaların seçilmesi ve yapılması oldukça büyük bir önem arz etmektedir (Kallenbach & Grandy, 2011). Siyanobakteriyel biyofertilizasyon (canlı aşılama), bitki büyümesi altındaki topraklarda mikrobiyal biyokütle karbonu'nu düzenli olarak iyileştirmektedir. Kanalizasyon atık suyunda yetişen ve fırında kurutulmuş yeşil alg ve siyanobakteri karışımı, buğday büyümesi altında NPK kimyasal gübre ile karşılaştırıldığında topraklardaki mevcut olan mikrobiyal biyokütle karbonunu arttırdığı belirlenmiştir (Renuka vd., 2018). Bu çalışmalar, çeşitli mahsul ve toprak türleri arasında, mikroalgal toprak iyileştirmelerinin toprak mikrobiyal biyokütle karbonu'nu büyük ölçüde

artırdığını ve bu nedenle toprak fonksiyonları ve toprak kalitesi için faydalı olduğunu göstermektedir. Ek olarak, bu çalışmalar, toprak kalitesinin diğer biyolojik, kimyasal ve fiziksel göstergeleri dahil olmak üzere bitki büyümesi ve verimi için faydalarını açığa çıkarmaktadır. Ayrıca, mikrobiyal biyokütle karbonunu ve birçok toprak özelliklerinde meydana getirdiği iyileştirmelerinin etkisi mikroalgleri oldukça ön plana çıkarmaktadır.

Topraklardaki besin döngüsü ve bitki tarafından sağlanan besin maddelerinin organik substratlardan salınması topraklardaki mikrobiyal biyokütlenin miktarına ve aktivitesine bağlıdır. Ancak, mikrobiyal biyokütle, mikrobiyal aktiviteyi tek başına tanımlamakta yetersiz kalmaktadır (Gregorich vd., 1994).

Potansiyel toprak mikrobiyal aktivitesi, spesifik besin döngülerini etkileyen toprak enzimleriyle veya genel mikrobiyal aktiviteyi gösteren diğer enzim deneyleri ile ölçülebilir (Caldwell, 2005; Dick vd., 1997). Mikroalgler toprağa eklendiğinde, C, N ve diğer mikro besin elementleri mevcudiyetlerince sağlarlar, bu nedenle bu girdilerin toprak mikrobiyal popülasyonlarının aktivitesini etkilemesi doğal olarak görülmektedir. Ancak bu etkilerin zaman çerçevesi muhtemelen çevre koşulları ve inokulum oluşum süresi ile yakından ilişkili olacaktır.

Mikroalglerin toprak enzim aktivitesi üzerindeki etkileri incelenirken yapılan çalışmaların çoğunda siyanobakteri bazlı formülasyonlar tercih edilmiştir. Birçok çalışma, çeşitli siyanobakteri türlerinin ekin bitkilerinin ekili olduğu alanlardaki enzim aktivitelerinde önemli ölçüde artış belirlendiğini bildirmektedir. Birçok çalışmada seçilen toprak örneklerinde genel mikrobiyal aktivite için dehidrogenaz ve FDA hidroliz ölçümleri, C döngüsü için invertaz ve P döngüsü için ise fosfomonoesteraz ve alkalın fosfataz ölçümleri yapılmaktadır. Dehidrogenazlar, bozulmamış hücrelerin oksidatif metabolik aktivitesini temsil edtmekte olup genellikle mikrobiyal biyokütle ile ilişkilidir (Dick vd., 1997). FDA hidrolizi, lipazlar, proteazlar ve esterazlar gibi geniş spesifik olmayan enzim havuzu tarafından hidrolize edildiğinden, toprak mikrobiyal aktivitesinin geniş bir temsilini sağlamaktadır (Dotaniya vd., 2019).

#### **2.4.5 Toprak Yapısının İyileştirilmesi**

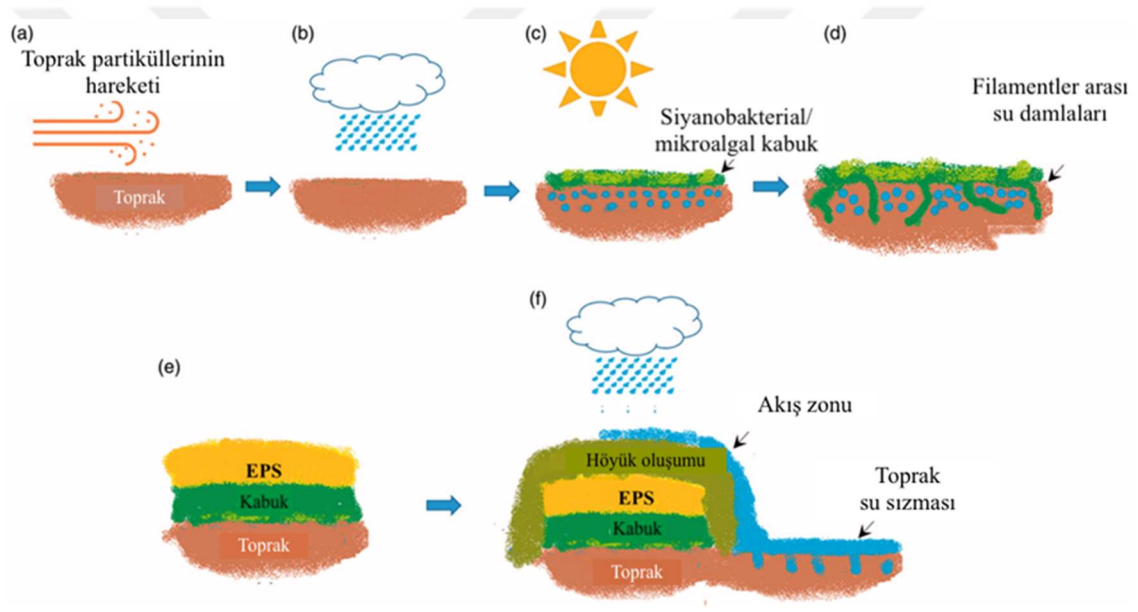
Su, rüzgâr ve tarımsal faaliyetler gibi fiziksel kuvvetler toprak verimliliğini etkileyen önemli faktörler olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle günümüzde aşırı toprak işleme faaliyetleri ve bu süreçlerde kullanılan ağır makineler genellikle toprağın yapısal stabilitesini, su iletkenliğini ve besin mobilizasyon yeteneğini önemli oranda

etkilemektedir. Sürdürülebilir tarım için yeterli düzeyde toprak organik maddesinin ve uygun toprak yapısının korunması şarttır. Siyanobakteriler ve yeşil mikroalgler, atmosferik karbondioksitin fotosentez yoluyla organik alg biyokütlesine asimilasyonunda doğrudan rol oynadıkları için agro-ekosistemdeki önemli organik madde kaynaklarını temsil etmektedirler. Bu organizmalar ayrıca topraktaki karbonun (ekzopolisakkaritler) atılımı yoluyla toprağın organik karbon havuzunu artırır ve diğer mikroflora ve faunanın büyümesini artırır (Nisha vd., 2007; Renuka vd., 2018)

Mikroalgler, sinerjistik olarak, siyanobakteriler ve diğer prokaryotlar arasında Quorum sensing mekanizmasını etkinleştirebilir, bu da onların alt tabakaya doğru hareket etmelerini veya büyümelerini sağlar ve böylece toprak stabilitesini artırmaktadır (Morales vd., 2010). Birçok mikroalg ve siyanobakterinin çevreye hücre dışı polisakkaritler (HDP) salgılayabildiği bilinmektedir. Siyanobakterilerden gelen HDP, emilim yoluyla topraktaki su hareketini tutar ve böylece toprakta su düzenlemesi için bir mikro ortam oluşturur. Ayrıca, HDP bir yandan toprak organik karbonunu artırırken diğer yandan toprak erozyonunu önlemede etkin rol oynayarak toprak yapısının iyileşmesine katkı sağlamaktadır. HDP, anormal koşulları yönetmek için bir su depolama rezervuarı görevi görür ve yeniden ıslanma sırasında metabolik olarak aktif olabilir. Siyanobakteriyel kabuklar, organik madde ve katyon değişim kapasitesi (KDK) ile birlikte kütle yoğunluğunu ve toprak gözenekliliğini azaltarak su tutma süresini artırır. Üretilen HDP'nin karakteristik özelliklerinden birisi yapışkan olmasıdır. Bu özeliği sayesinde bitki büyümesi ve kök penetrasyonu için gereken minimum gözenekliliği sağlayan toprak partiküllerinin agregasyonuna yol açmaktadır. Bu sayede oluşan toprak agregatlarının rüzgâr ve su erozyonuna karşı daha dayanıklı olması ve toprak yapısının korunması sağlanabilmektedir (Abinandan vd., 2019; D. Mager, 2008). Mikroalg kullanımı, toprak verimliliğini artırmak için diğer toprak değişikliklerini en aza indirerek hidrolik iletkenliği de artıracaktır (Kaushik & Murti, 1981).

Toprağın yapısal kararlılığı, su sızması, aşınabilirlik ve bitki büyümesi gibi birçok toprak fiziksel özelliğini etkileyen temel bir parametredir. Alglerin aracılık ettiği oksijenli fotosentez nedeniyle toprak difüzyon yoluyla O<sub>2</sub>'yi emerek aerobik hale gelir. Örneğin, ısınmanın neden olduğu yüzey bozukluğu nedeniyle yanmamış topraklara kıyasla yanmış topraklarda siyanobakteriyel aşılama ile kabuğun nispeten yavaş oluşumu bunu gösterir (Eldridge & Green, 1994). Aksine, ısıtılmış toprak örneklerinin siyanobakterilerle aşılmasının çoğalma ve kabuk oluşumuyla sonuçlandığına dair ipuçları da mevcuttur

(Acea vd., 2003). Alglerin çoğu doğası gereği izotermaldir ve hayatta kalma protoplazmaya bağlıdır, ancak yalıtım katmanlarına bağlı değildir. Değiştirilmiş ışık yoğunluğu, sıcaklık ve nem nedeniyle kurak ortamlarda, şeffaf tabakalar algler için uygun yaşam alanlarıdır. Ek olarak, algler, suya dayanıklı organomineral agregatlar üretmek için minerallerle bir ilişki oluşturur. Ayrıca Siyanobakteriyel örtüye sahip topraklar organik madde üretebilmekte, bu sayede de toprak TOC'sini artmakta ve suya daha dayanıklı toprak agregatlarını ortaya çıkarmaktadır (Abinandan vd., 2019; Malam Issa vd., 2001). Alg biyokütlesi ve toprak kabuğundaki aktivite üst toprak katmanlarında yoğunlaşmaktadır ve HDP'nin toprak partikülleri üzerinde yapıştırıcı etkisi ortaya çıkmaktadır. Böylece toprak agregat oluşturulmasında da iyileşme olmaktadır (Garcia-Pichel & Belnap, 1996; Malam Issa vd., 1999).



**Şekil 2.3** Mikroalg/siyanobakteri bazlı biyolojik toprak kabuklarının oluşumu. (a) Rüzgâr, toprak parçacıklarını üst topraktan uzaklaştırır; (b) Yağmur damlacıklarının toprak tabakasına sızması; (c) Bir örtü oluşturmak için siyanobakterilerin ve mikroalglerin kolonizasyonu; (d) Bir siyanobakteriyel/mikroalgal kabuk oluşturmak için toprak ve su tutulması; (e) Hücre dışı polisakkaritler (HDP) kabuktan üretilir ve (f) Oluşan tümsek, yağmur suyunu toprağa yönlendirmek için bir akış bölgesi görevi görür ve su sızmasını artırır (Abinandan vd., 2019).

Literatürde yapılan çalışmalarda ise, Malam Issa ve ark. (2007) siyanobakterilerin toprakta aşılmasının, 6 haftalık aşılama sonrası filamentler ve HDP içeren organomineral toprak agregatları oluşturduğunu ve inoküle edilmemiş kontrole kıyasla agregatların stabilitesini arttırdığını göstermiştir (Malam Issa vd., 2007). Son çalışmalar ayrıca yeşil alg aşılama maddelerinin toprak yapısını ve agregat stabilitesini iyileştirme

potansiyelini ortaya çıkardı. Yılmaz ve Sönmez (2017), mikroalglerden oluşan farklı biyogübre uygulamalarının toprağın agregat stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. *Chlorella* spp. tek başına veya vermikülit ile kombinasyon halinde, kimyasal gübre içeren ve içermeyen kontrol uygulamasına kıyasla toprak mikro agregatlarının stabilitesini (0,25–0,050 mm) artırdığını buldular. HDP üreten siyanobakteriyel aşılama, bozulmuş arazilerin toprak yapısını da iyileştirebileceği ortaya çıkarıldı (Yılmaz & Sönmez, 2017). Kheirfam ve ark. (2017) ise, siyanobakterilerin toprakta aşılamaının 60. gününde ölçüldüğünde toprak kaybında % 99 azalmaya yol açtığını ortaya koymuştur (Kheirfam vd., 2017).

#### **2.4.6 Mikroalglerin Bitki Büyümesine Etkisi**

Yapılan son çalışmalar ışığında hem siyanobakterilerin hem de ökaryotik mikroalglerin bitki büyümesinde etkin bir şekilde rol aldıklarını ve biyostimülanların gelişimi için yüksek potansiyele sahip olduğunu destekler niteliktedir. Siyanobakteriler veya yeşil mikroalglerin canlı hücre süspansiyonlarının veya hidroponik ortak kültürlerinin tahıl, baklagil ve sebzelerin gelişimlerinde olumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Örneğin, yapılan bir çalışmada N<sub>2</sub> sabitleyici siyanobakterilerin hücre süspansiyonlarının veya taze biyokütlesinin toprak uygulamalarında mısır, buğday ve pirinç bitkilerinde bitki ağırlığını, kuru maddeyi, bitki N'unu ve/veya tane verimini iyileştirdiği belirlenmiştir (Mahmoud, 1999). Canlı N<sub>2</sub> sabitleyen siyanobakterilerin hidroponik ortak kültürlerde fasulye ve şeker pancarı yetiştiriciliği üzerine olan etkileri incelendiğinde de benzer gelişmeler gözlemlendi (Svircev vd., 1997). Canlı N<sub>2</sub> siyanobakterilerin domates bitkisi üzerine etkileri incelenmiş, bitkide N, P artışı belirlenirken yapılan uygulamanın domates tohumlarının çimlenme oranında da artışa neden olduğu belirlenmiştir (Prasanna vd., 2013). Tohumların (tahılları) N<sub>2</sub>-sabitleyen siyanobakterilerin, N<sub>2</sub>-sabitlemeyen siyanobakterilerin ve yeşil mikroalglerin hücre süspansiyonlarına batırılması sonucu tohumlarda çimlenme oranlarında artış gözlemlenmiştir ayrıca mısır fidelerinin büyümesinde de artış belirlenmiştir (Grzesik & Romanowska-Duda, 2014).

Bir başka çalışmada yeşil mikroalglerin hücre süspansiyonlarının bamya ve domates tohumlarının çimlenmesi ve bitki gelişimi üzerine olan etkileri incelenmiştir, çalışma sonucunda tohum çimlenmelerinde, bitki boy uzunluklarında artış gözlemlenmiştir (Agwa vd., 2017). Canlı mikroalg hücrelerinin bitki besleme iyileştirmeleri üzerine etkileri özellikle kullanılan suşlarına bağlıdır.

Yapılan bir çalışmada mikroalg biyokütlesi kuru formda uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mısır ve buğday'a uygulanan yeşil mikroalg *Chlorella vulgaris*'in havayla kurutulmuş veya püskürtülerek kurutulmuş biyokütleleri bitki büyüme parametrelerinde gelişime neden olmuştur (Dineshkumar vd., 2019). Fırında kurutulmuş *C. vulgaris*'in marul üzerine etkisi incelendiğinde bitkide toplam ve çözünmez protein miktarında artışın meydana geldiği belirtilirken diğer bitki parametrelerin de azalmanın olduğu bildirilmiştir (Faheed & Fattah, 2008). Fırında kurutulmuş *Nannokloropsis oculata*'nın domates bitkisine uygulanması sonucunda domates bitkisinde birçok parametrede iyileşmeler gösterdiği belirlenmiştir (Coppens vd., 2016). Cansız kuru biyokütlenin (fırında kuru veya püskürtülerek kurutulmuş) uygulanmasıyla bitkiler, mineralizasyon süreçlerinden salınan besinlerden yararlanmaktadırlar ve bu nedenle bitki gelişim parametrelerinde iyileşmeler gözlemlenmektedir (Coppens vd., 2016). Bu ve benzeri kuru mikroalg biyokütle uygulamalarında canlı mikroorganizmalar bulunmamasından dolayı mikroalg biyokütlesi biyogübre yerine geçen organik (yavaş salınan) bir gübredir (Coppens vd., 2016). Cansız biyokütle ile bitki büyümesinin desteklenmesi, biyolojik olarak aktif mikroalg bileşikleri nedeniyle biyostimülasyonun sonucu da olabilir (Ronga vd., 2019). A. Faheed ve Abd-El Fattah (2008)'e göre; *C. vulgaris* taze ve kuru biyokütle kullanımını bir çalışma başlığında toplamış ve yapılan uygulamalar çimlenmemiş kontrollerle karşılaştırıldığında her iki uygulamanın da çimlenmeler üzerine olumlu etkisi belirlenmiştir. Bununla birlikte, marul fideleri için kuru biyokütle uygulamasının bitki ağırlığı açısından daha ümit verici olduğu bildirilmiştir (Faheed & Fattah, 2008).

Buğday için, taze ve kuru mikroalg biyokütle uygulaması sonucunda elde edilen sürgün ve kök parametrelerindeki sonuçlar, alt tabakaya (kum ve yapay besin eksikliği olan karışım) bağlı olarak değişiklik göstermiştir (Schreiber vd., 2018). Bazı çalışmalarda mikroalgal süspansiyonların ve ekstraktların bitki büyümesini teşvik edici etkileri saha deneyleri ile de değerlendirilmeye çalışılmıştır. Örneğin Michalak ve ark., (2016), yaptıkları bir arazi denemesinde *Arthrospira (Spirulina) platensis*'in farklı oranlarının süperkritik ekstraktlarını kışlık buğdaya püskürtmüştür ve sonuç olarak ticari bitki biyoyararicileriyle karşılaştırılabilir tahıl verimleri elde ettiklerini belirtmişlerdir (Michalak vd., 2016). Benzer şekilde, *Spirulina* bazlı bir ürünün patlıcan (*Solanum melongena*) yapraklarına uygulanması sonucunda patlıcan meyve sayısında ve veriminde gözle görülür bir etki gözlemlenmiştir (Dias vd., 2016). Bir başka çalışmanın sonucuna göre,

*Chlorella vulgaris* süspansiyonları yaprak yeşilliğini, salkım ağırlığını, meyve boyutunu ve üzüm verimini artırmıştır (Nagy & Pintér, 2015). Başka bir uygulama yönteminde, soğan fideleri öncelikle hümik asit karışımlarına ve ardından liyofilize *Scenedesmus subspicatus* süspansiyonlarına bir dakika olacak şekilde daldırılmıştır. Sonuç olarak yapılan bu uygulamanın bitki çapını ve verimini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Gemin vd., 2019). Belirtilen bu çalışmaların çoğunda mikroalg biyokütlesinin canlı veya kuru uygulamalarının bitki veya toprak üzerine etkileri açıklanmaya çalışılmış olsa da yapılan çalışmalar mikroalg biyokütlesinin etkinliğini açığa çıkarmada oldukça yetersizdir. Bu nedenle bu alanda daha detaylı çalışmalar yapılarak farklı bitki ve toprak çeşitleri üzerindeki etkileri incelenmelidir. Ayrıca, yapılacak çalışmaların saha denemeleri ile de desteklenmesi gerekmektedir. Bu sayede bitki büyümesini teşvik eden faktörlerin daha iyi anlaşılmasının mümkün olacağı vurgulamaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar, mikroalg süspansiyonlarının veya ekstraktlarının tarla koşullarında bitki büyümesini ve performansını iyileştirebileceğini ve daha sürdürülebilir ve çevre dostu tarım uygulamaları için umut verici alternatifler olduğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir. Bu nedenle daha fazla çalışma ile bu durum desteklenmelidir.

Mikroalgler,

- 1) Gelişmiş toprak verimliliğinde (artmış C, N, P, organik madde ve mikrobiyal aktivite) (Karthikeyan vd., 2009),
- 2) Makro/mikro besin mobilizasyonu ve alımında (Prasanna vd., 2014, 2015),
- 3) Fitohormonların veya amino asitler, poliaminler veya serbest uçucu yağ asitleri gibi diğer biyoaktif bileşiklerin üretiminde (Osman vd., 2010),
- 4) Stres toleranslı metabolitler (Nisha vd., 2018; Rachidi vd., 2020),
- 5) Bitki dokusuna ağır metal translokasyonunun azaltılmasında (Srivastava vd., 2018) ve
- 6) Doğrudan bitki kök ilişkilerinde (Sood vd., 2011) önemli düzeyde rol almaktadırlar.

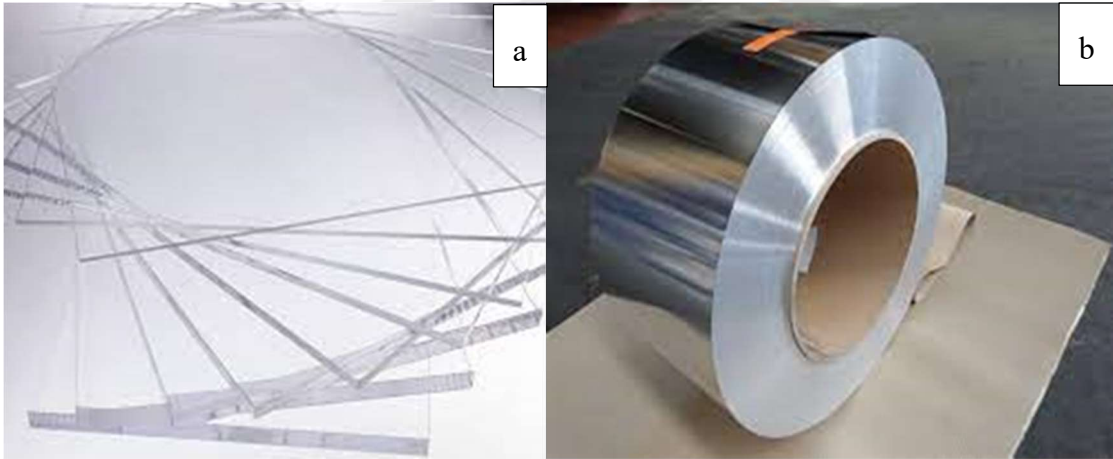
Fitohormonların üretimi ve bitki kökleriyle olan ilişkileri nedeniyle bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmalar arasında tanımlanan mikroalgler suşları, özellikle siyanobakteriler için önemli araştırma hedefleri olmuştur (Kumar, 2016). Bununla birlikte, yukarıda belirtilen tüm faktörlerin daha derinden anlaşılması, mikroalg

biyogübrelerin ve biyostimülanların gelişimini ve ayrıca mikroalg bazlı bitki büyümesini destekleme uygulamalarını ilerletecektir.



### 3.1 Laboratuvar Ölçekli Solar Biyoreaktör Yapımı ve Özellikleri

Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktör İstanbul Sanayii'nde yer alan Üçler Makine tarafından üretilmiştir. Mikroalg yetiştirmeye yönelik laboratuvar ölçekli solar biyoreaktör 150L üretim kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmış ve solar bir sistem üzerine kurulmuştur. Sistemde tasarlanan biyoreaktör iç içe geçirilen 3 adet silindir şeklinde borudan ve borular üzerinde bulunan sileceklerden oluşmaktadır. Biyoreaktörde kullanılan silindir borular polikarbon malzemesinden yapılmıştır. Biyoreaktörün genel çerçevesi, alt ve üst kapakları ise kolay şekil alması, dayanıklı ve hafif olması nedeniyle galvanize alüminyum levhalar kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1** a) Polikarbon, b) Galvanize alüminyum

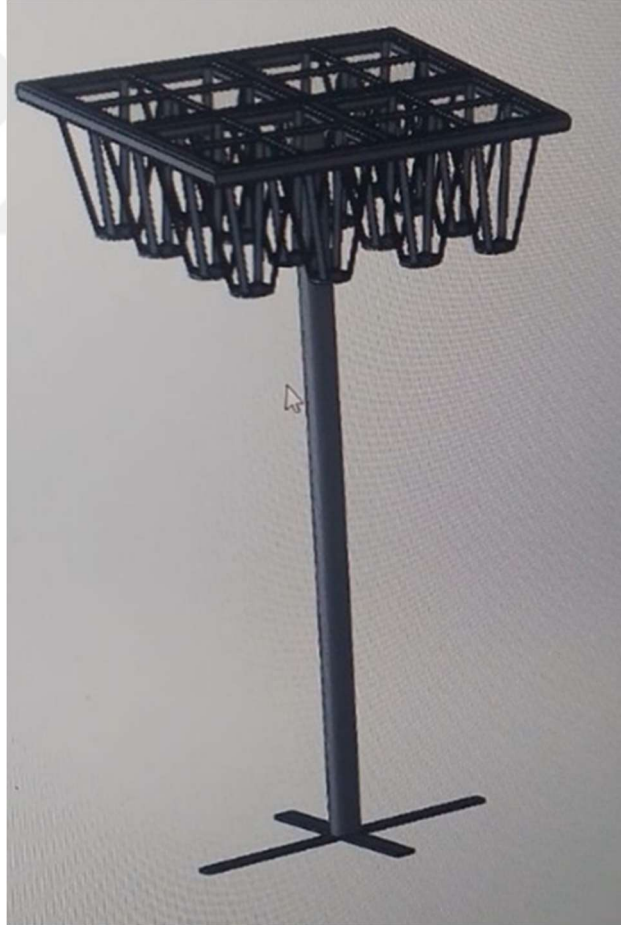
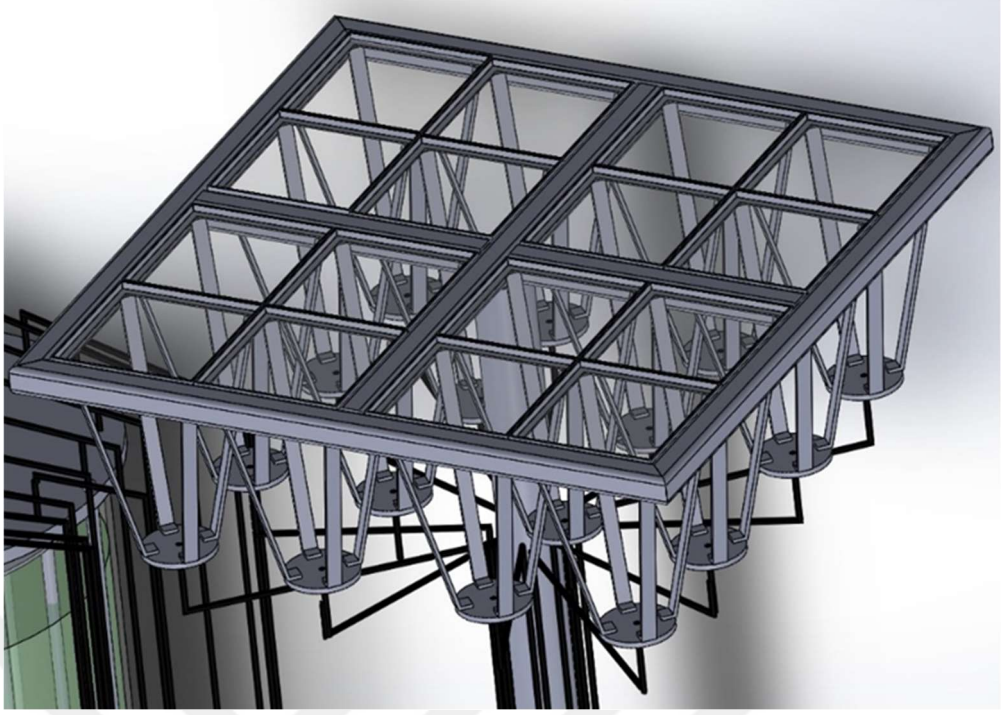
Biyoreaktörün genel yüksekliği, biyoreaktörün istenilen alana taşınmasını kolaylaştıracak tekerlekler ve üretim sonrası hasat yapılabilecek yüksekliği sağlayan ayaklar dahil 130 cm'dir. Biyoreaktörün ayak kısım yüksekliği 0,4m olup, üretim yapılan ana tankın yüksekliği ise 0.9m yüksekliğindedir. Biyoreaktörün çapı 0,5 m'dir.

Biyoreaktörün içerisinde büyütülen mikroalglerin çökmesini önlemek, eşit gün ışığına maruz bırakabilmek için karıştırma ve havalandırma işleminin yapılabilmesi amacı ile YN90-120 220V 120W 260RPM AC özelliklerine sahip Linux marka bir adet motor kullanılmıştır (şekil 3.2).



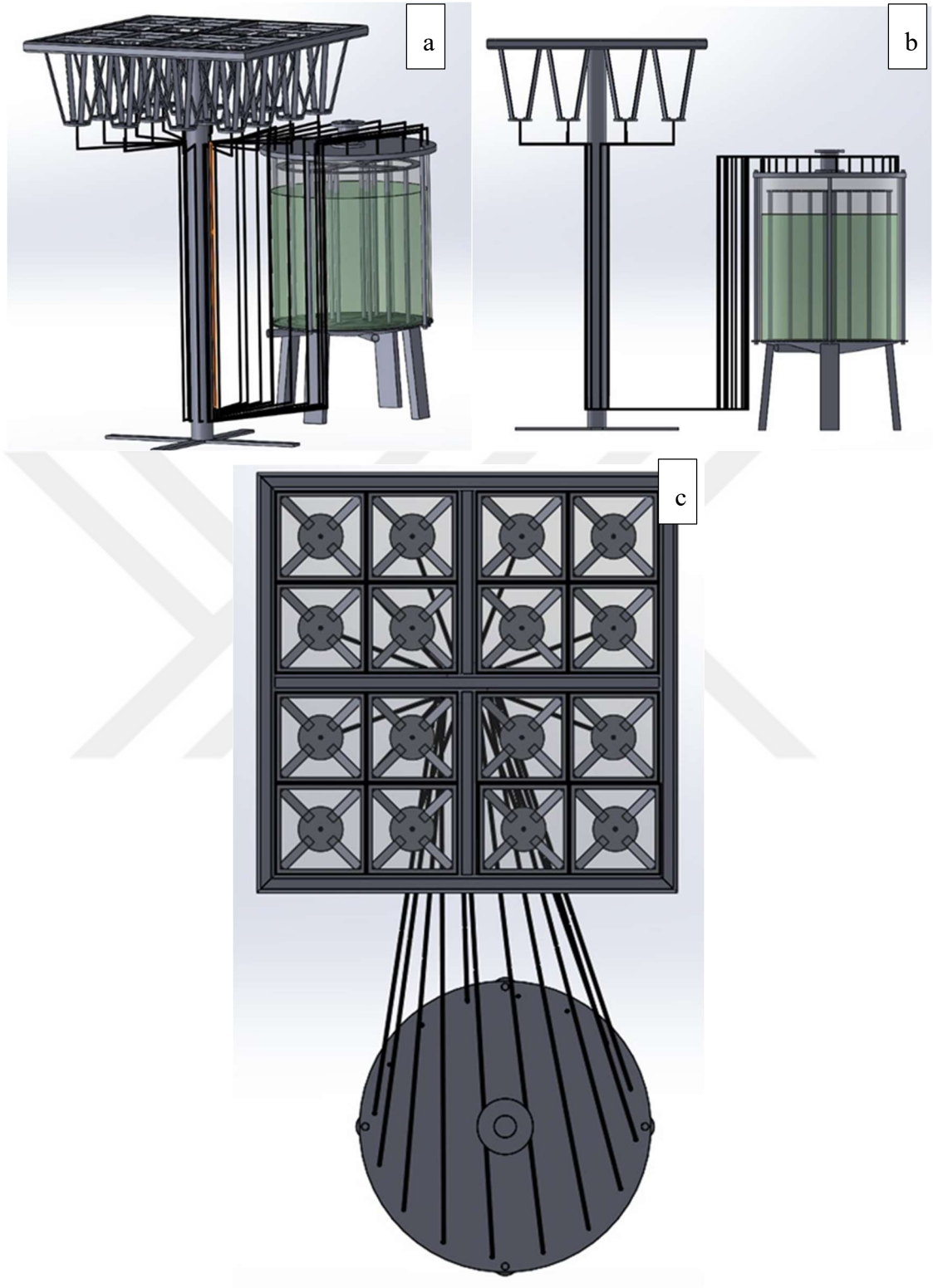
**Şekil 3.2** Biyoreaktörde karıştırma işlemi için kullanılan motor

Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktörün solar panel kısmı ise fresnel lens ve fiber optik kablolardan oluşmaktadır. Fresnel lenslerin yerleştirildiği solar panelin yapımında ve panelin yükseklik ve yön ayarının yapılabilmesine olanak sağlayan gövde kısmının yapımında galvanize alüminyum kullanılmıştır. Solar panel tekerlekli ayaklara sahip olup gövde uzunluğu 2 m'dir. Fresnel lenslerin yerleştirildiği panel kısım ise 20,5\*20,5 cm boyutlarında 16 adet birleştirilmiş alüminyum çerçeveden oluşmaktadır. Sistemde toplamda 16 adet 20x20 cm boyutlarında fresnel lens kullanılmış olup her bir fresnel lens için ayrı ayrı 0,5 cm çapında 5m uzunluğunda fiber optik kablolar kullanılmıştır. Fresnel lenslerin buradaki kullanım amacı gün ışığını fiber optik kablonun olduğu noktaya yansıtabilmesidir. Sistemde yer alan fiber optik kablolar fresnel lenslerden gelen gün ışığını toplayarak gün ışığının biyoreaktöre aktarımını sağlamaktadırlar. Sistemde her bir fresnel lens bir fiber optik kabloya bağlanarak güneş ışınlarını, fiber optik kablolar aracılığıyla mikroalglerin bulunduğu havuza homojen olarak ulaştırmakta ve mikroalglerin fotosentez için gerek duyduğu gün ışığını bu sayede sağlamaktadır. Fresnel lenslerin olduğu kısım güneş ışığının geldiği yöne doğru şekil değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle farklı açılarda gelen gün ışığından maksimum düzeyde fayda sağlanabilmektedir (Şekil 3.3). Biyoreaktörün en alt kısmında mikroalglerin etkin üretiminin bitmesi sonrasında hasat edilebilmesi için bir boşaltım vanası bulunmaktadır.



**Şekil 3.3** Solar sistemin tasarımı

Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktörün son görünümü Şekil.3.4'te gösterilmektedir.



**Şekil 3.4** Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktörün tasarımı a) genel görünüm, b) yan görünüm, c) üst görünüm

## 3.2 İyon Seçici Elektrotlar (ISE)

İyon-seçici elektrotlar (ISE), çözeltide çeşitli iyonlar varlığında seçici oldukları iyonların aktivitelerinin potansiyometrik olarak belirlenmesine imkân vermesini sağlayan elektrokimyasal sensörler olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, hiçbir elektrot sadece tek bir iyonla cevap vermez, fakat sensörlerde kullanılan membranın yapısına bağlı olarak bir iyonla karşı bilinen bir seçicilik göstermektedir. Bu sayede iyon seçici elektrotlar kullanıp çözeltide kullanılan elektrodun seçici olduğu iyon konsantrasyonu ölçülebilir (Kwon vd., 1994).

İyon-seçici elektrotların birçok alt sınıfı vardır. Bunlar;

Kaplama tel sensör, Katı-hal iyon seçici sensör, Cam iyon seçici sensör, Kompozit sensör, Gaz ve enzim sensör, İyon seçici alan etki transistörleri, Sıvı-membran iyon seçici sensör (polimer-membran elektrotlar)'dır.

İyon-seçici elektrotta istenilen iyonun konsantrasyonunu hesaplamak için kalibrasyon eğrisi yapılmaktadır. Konsantrasyonu bilenen çözeltiler ile kalibre eğrisi alınarak istediğimiz çözeltideki iyon konsantrasyonunun hesaplanması sağlanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılmak üzere katı-hal iyon seçici sensör tercih edilmiştir

### 3.2.1 Nitrat ve pH'a Duyarlı İyon Seçici Elektrotların (ISE) Hazırlanması

#### 3.2.1.1 ISE Yapımında Kullanılan Kimyasallar

##### Katı-kontakt yapımında;

Grafit, epoksi ve tetrahidofuran (THF) (Sigma Aldrich), sertleştirici (Desmodur RFE) Bayer AG (Germany) firmasından temin edilmiştir.

##### Nitrat ISE Yapımında;

Polivinilklorür (PVC), potasyum tetrakis(kloro)afenilborat (KTPCIPB), tetradodesilamonyum nitrat (TDA-NO<sub>3</sub>), dibutil ftalat (DBF) Sigma Aldrich'ten satın alınmış, nitrat seçici sensörün ölçümünde kullanılan diğer tüm tuzlar ise Merck'ten temin edilmiştir.

##### pH ISE Yapımında;

Quinhidron ve akrilik asit Merck (Darmstadt, Germany) firmasından temin edilmiştir. Aminleştirilmiş polivinilklorür (PVCNH<sub>2</sub>) Sigma-Aldrich firmasından. pH tampon çözeltilerin hazırlanmasında kullanılan fosforik asit ve fosfat tuzları (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O,

$\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) Merck (Darmstadt, Germany) firmasından, çözelti ortamında iyonik şiddeti sabit tutmak için kullanılan tuz;  $\text{KNO}_3$  Fluka firmasından, polimetil metakrilat (PMMA) ise Fortex firmasından temin edilmiştir.

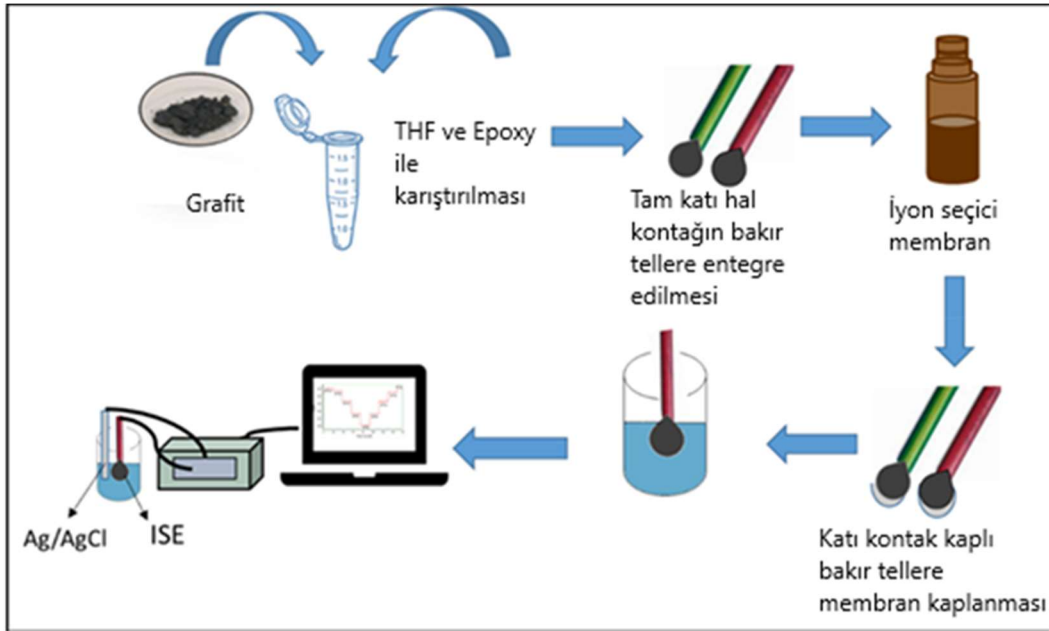
### 3.2.1.2 ISE Yapımı

- **Katı Kontak Yapımı;**

Tamamen katı hal temaslı mikro boyutlu nitrat seçici elektrot (ISE) hazırlandı ve mikroalg yetiştirme sırasında nitrat konsantrasyonunu belirlemek için kullanıldı. Katı hal temaslı mikro boyutlu nitrat seçici sensörünün hazırlanmasında daha önce yayınlanmış çalışmalardaki protokol takip edilmiştir (Ozer & Isildak, 2019) Katı-kontak adı verilen ISE'lerde iletkenliği sağlayan malzemenin hazırlanmasında % 50 (a/a) grafit, % 35 (a/a) epoksi ve %15 (a/a) sertleştirici kullanılmakta olup bu kimyasalların homojen olarak karıştırılmasında yeterli miktarda THF kullanılmıştır. Sensör yapımında kullanılan bakır tel yaklaşık 1 mm çapındadır. Hazırlanacak sensörün uzunluğu çalışmaya ve kişiye göre farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada bakır telin uç kısmına vida şeklinde içi boş bir materyal entegre edilmiştir ve vidanın iç kısmı hazırlanan bu katı kontak ile doldurularak elektrot nitrat ve pH seçici sensör yapımına hazır hale getirilmiştir.

- **Nitrat Seçici Elektrotun Yapımı;**

Elektrotun nitrat seçici olmasını sağlayabilmek amacıyla nitrat seçici bir membran hazırlanmıştır. Nitrat seçici membran kokteyli için öncelikle PVC, TDA- $\text{NO}_3$  4 mL THF içinde karıştırılarak hazırlanmıştır. İyonofor olarak, plastikleştirici olarak DBF ve anyon dışlayıcı olarak KTpCIPB kullanılmıştır. Membran kokteylinin çözücüsü (THF), konsantre viskos bir karışım elde edilene kadar buharlaştırılmıştır. Elektrodun iletken malzemesine 0.1 mm'lik bir zar kalınlığı oluşturulacak şekilde hazırlanan nitrat seçici membran bir cam pipet vasıtasıyla kaplanmıştır. Hazırlanan bu nitrat seçici elektrot oda sıcaklığında 12 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Kuruma işlemi sonrası tamamen katı hal temaslı nitrat seçici elektrot, en az 6 saat  $10^{-2}\text{M}$  nitrat çözeltisine batırılarak doyuruldu. Şekil 3.5'te  $\text{NO}_3^-$  seçici elektrodun hazırlanışına ilişkin şematik sunum verilmiştir.



**Şekil 3.5** PVC membran  $\text{NO}_3^-$  - seçici elektrot üretiminin şematik gösterimi (Balkanlı vd., 2022)

- **pH Elektrotunun Yapımı;**

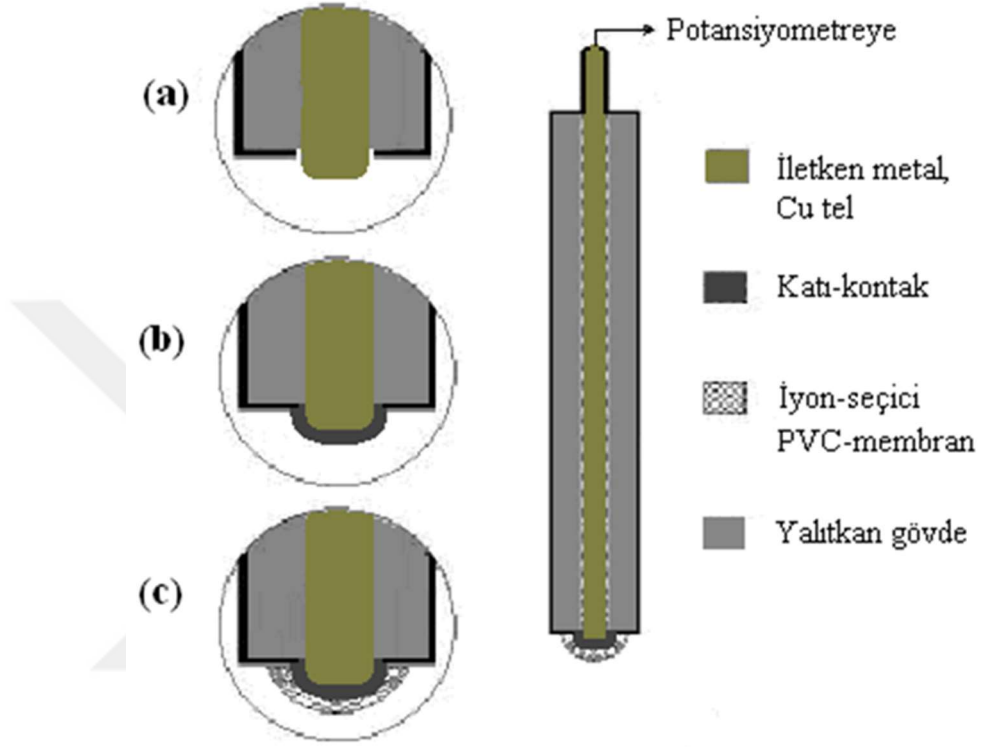
Elektrodun pH'a duyarlı davranabilmesi için %10 quinhidron, %20 grafit ve %20 polimetil metakrilat (PMMA) tozları iyice homojenize edildikten sonra üzerine 500 $\mu\text{L}$  THF'de çözünmüş PVC-NH<sub>2</sub> ilave edilmiştir. Daha sonra %50 akrilik asit ilave edilerek uygun kıvama gelinceye kadar karıştırılmıştır. Uygun kıvama gelen karışımlar ince borulara doldurulmuştur. Borunun bir ucuna bakır bir tel katı kontak vasıtası ile tutturulmuş olup hazır hale getirilene pH sensörü kuruması için bir hafta bekletilmeye konmuştur.

Kompozit pH elektrotların potansiyometrik davranışlarının incelenmesi için iyonik şiddeti 0,1M KNO<sub>3</sub> ile çözeltisiyle sabitlenmiş pH'sı 2-12 arasında değişen 5x10<sup>-3</sup>M fosfat tamponu çözeltileri hazırlanmıştır. İyonik şiddeti sabit tutmak için kullanılan tuz; KNO<sub>3</sub>' tan 0,1M stok çözelti hazırlandı.

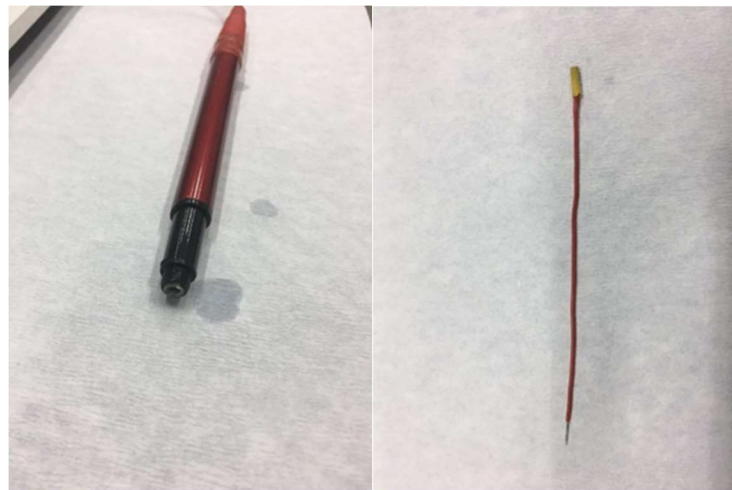
Fosfat tamponunun hazırlanışı: 2-5 aralığında pH'ya sahip fosfat tamponları, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> çiftinden, 6-8 aralığında pH'ya sahip fosfat tamponları, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>/Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> tuz çiftinden, 9-12 aralığında pH'ya sahip fosfat tamponları da Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>/Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> tuz çiftlerinden hazırlandı. Çözeltilerdeki toplam fosfat derişimi 10<sup>-2</sup>M olacak şekilde çiftlerin her birinden 5,0x10<sup>-3</sup>M derişime karşılık gelen miktarlar alınarak, hazırlanması düşünülen hacimden 4-5 mL kadar eksik suda çözüldü. Çözeltilerin pH değerlerini ayarlarken, pH değerini düşürmek için uygun derişimlerde

$H_3PO_4$ , yükseltmek için de  $Na_3PO_4$  çözeltilerinden gerekli miktarlarda ilave edildi. Ayarlama işleminden sonra çözeltilerin hacmi su eklenerek hazırlanması düşünülen son hacme tamamlandı.

ISE elektrotlarının genel görünümünün şematize edilmiş hali ile Şekil 3.6’da, hazırlanan nitrat ve pH elektrotlarının görünümü ise Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



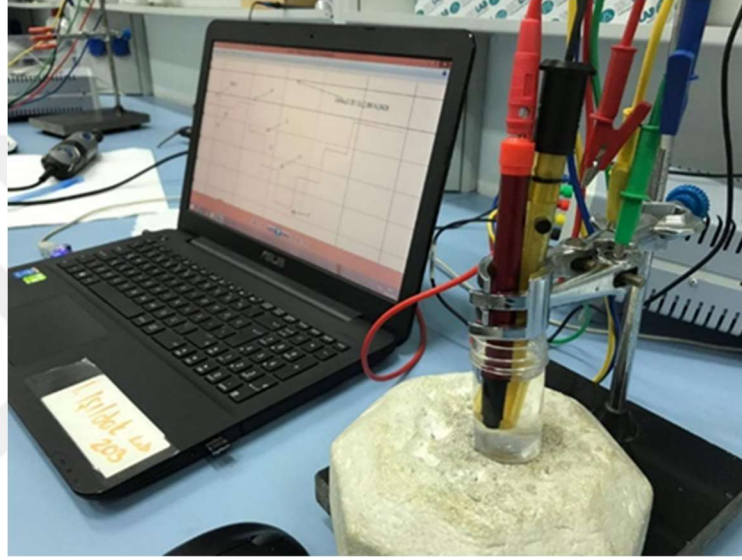
Şekil 3.6 Elektrotların genel görünümü



Şekil 3.7 Bütünüyle katı-hal kontakt  $NO_3^-$  ve pH seçici elektrotların görüntüsü

### 3.2.1.3 ISE Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz: Potansiyometri

Potansiyometri; akımın çok az geçtiği sistemlerde, indikatör elektrotla referans elektrot arasında ortamdaki iyonların aktivitelerine bağlı olarak değişen potansiyel farkın ölçüldüğü elektrokimyasal bir tayin yöntemidir. ISE'ların oda sıcaklığında ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ) potansiyometrik ölçümlerini gerçekleştirmek için özel yapım bilgisayar kontrollü yüksek giriş empedanslı çok kanallı potansiyometrik ölçüm sistemi (Medisen Arge, Türkiye) kullanıldı. ISE'lar ile birlikte kullanılmak üzere referans elektrot (RE) olarak Ag/AgCl elektrodu (BASi, ABD) kullanıldı (Şekil 3.8)

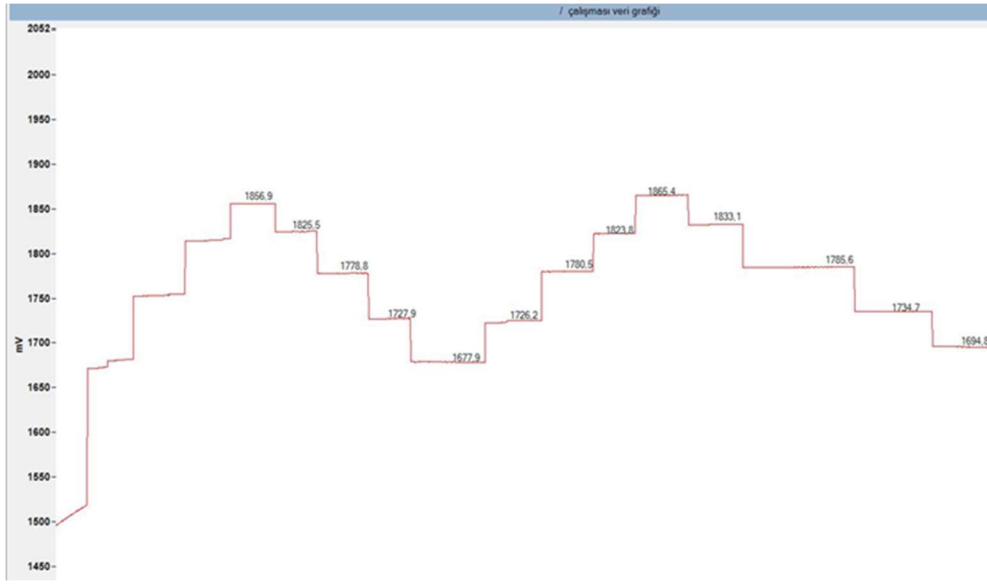


Şekil 3.8 Bilgisayar kontrollü potansiyometrik ölçüm sistemi

### 3.2.1.4 Nitrat ve pH Sensörlerinin Kalibrasyonlarının Yapılması

Kararlı durum ölçümleri, 10 mL test solüsyonu sabit bir hızda karıştırılırken referans ve çalışma elektrodu kullanılarak yapıldı. Test çözeltilerinin her ölçümünden önce, referans elektrot, pH sensörü ve nitrat seçici sensör deiyonize su ile yıkandı ve adsorban doku ile kurutuldu. Nitrat ve pH sensörünün potansiyometrik performans özellikleri,  $10^{-5}$  ve  $10^{-1}$  M konsantrasyon aralığındaki birincil iyonların standart çözeltilerinde belirlenmiştir. Sulu çözeltilerin hazırlanması boyunca deiyonize su kullanıldı. Kalibrasyon solüsyonlarını hazırlamak için  $10^{-1}$ M nitrat stok çözeltisi ve pH tampon çözeltisi hazırlanmıştır ve yeterli miktarda deiyonize su kullanılarak seyreltilmiştir.

Sensörlerin tekrarlanabilirliği hazırlanan bu çözeltiler vasıtasıyla potansiyometri cihazı ile belirlenmiştir.



Şekil 3.9 Hazırlanan sensörlerin tekrarlanabilirliği

### 3.3 Mikroalgler

#### 3.3.1 Deneyisel Çalışmada Kullanılan Hammaddeler ve Cihazlar

*C. vulgaris* mikroalglerinin yetiştirilmesi için ortamında bulunması gerekli makro ve mikro besin maddeleri;  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ , EDTA, KOH,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  Merck firması tarafından temin edilmiştir. Algal büyüme, Cary 60 UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 680 nm'de optik yoğunluğun ölçülmesi ile belirlendi.

Çalışmada mikroalglerin büyütülmesinde Işık kaynağı olarak iki adet OSRAM L marka 3500 lüks (40  $\mu\text{mol}$  foton /  $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 'e eşdeğer) yoğunluğundaki beyaz floresan lambalar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan diğer cihazlar ise; Analitik Teraziler (KERN PFB), Stok Kültür Saklama Dolabı (Arçelik), Santrifüj (Sigma 2-16KL), İnkübatör (Kerman Lab), Multimetre (Haaglande)'dir

##### 3.3.1.1 *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*)

Kullanılan *Chlorella vulgaris* suşu, Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ), Biyomühendislik Bölümü, Algal Biyoteknoloji ve Biyoproses Laboratuvarı mikroalg kültür koleksiyonundan sağlanmıştır. Bu çalışmada içerdiği kloroplastlardan dolayı yeşil bir renge sahip olan *Chlorella vulgaris* mikroalgi kullanılmıştır. *Chlorella*, ilk olarak 1890-1893'te Beijerinck tarafından izole edilen yeşil mikroalglerin bir üyesi olup 1894'te bir Alman bilim adamı Krüger, saf bir *Chlorella* sp. kültürü oluşturmuştur (Preisig & Andersen, 2005). *C. vulgaris*'in sistematik olarak sınıflandırılması ise aşağıdaki gibidir;

Üst Alem: Eukaryotic

Alem: Protista

Grup: Chlorophyta

Sınıf: Trebouxiophyceae

Takım: Chlorellales

Aile: Chlorellaceae

Cins: *Chlorella*

Tür: *Chlorella vulgaris* (Safi vd., 2014).

### **3.3.1.2 Mikroalgal Büyüme Etkileyen Faktörler**

Mikroalglerin büyümesinde birçok parametre etki eder. Bu parametreler;

#### **a. Işık**

Işık, mikroalg kültürünün büyümesini ve verimini belirleyen tartışmasız en önemli faktördür (Harun vd., 2014; Seyfabadi vd., 2011). Mikroalgal biyokütle üretimi büyük ölçüde doğal veya yapay ışık kaynağı altında açık havuzda veya kapalı foto-biyoreaktörde ototrofik yetiştirme yoluyla elde edilmiştir. Farklı ışık yoğunluklarında dahi, mikroalgelerin büyüme hızlarının ve azami hücre yoğunluğunun ışık periyodu süresine orantılı olarak arttığı görülmüştür (Isleten-Hosoglu vd., 2012, 2013).

#### **b. Sıcaklık**

Mikroalg büyüme kültüründeki sıcaklık artışına, optimum sıcaklık elde edilene kadar her zaman büyüme hızında karşılık gelen bir artış eşlik eder. Optimum aralığın üzerindeki ek artış, büyüme oranının düşmesine neden olur. 15–25°C civarındaki sıcaklık, daha düşük sıcaklıklarda büyümeye adapte olanlar da dahil olmak üzere çoğu mikroalgin büyümesi için yer sağlar (Larsdotter, 2006). *Chlorella* türleri arasında sıcaklık gereksinimi türe özgüdür. Bazı türler, 26 ila 30°C arasındaki daha yüksek bir sıcaklık aralığında iyi gelişir (Chinnasamy vd., 2009). *Chlorella vulgaris* ise 25–30°C'de yetiştirilenler, daha yüksek biyokimyasal içerikler ve daha iyi besin bileşimi ile daha iyi bir büyüme gösterdiği belirlenmiştir (R. Sharma vd., 2012).

#### **c. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>)**

Mikroalgler fotosentez yapmakta olup besiyer ortamında büyüebilmek için karbondioksit de ihtiyaç duymaktadırlar. Mikroalgin büyümesi için besiyerinde optimum düzeyde karbondioksit bulunmalıdır (X. Li vd., 2013). Mikroalglerin büyümesi için gerekli olan karbondioksit miktarı, üretim yapılan sistemin tipine ve yetiştirilmesi planlanan mikroalg türüne göre değişiklik göstermektedir. Bazı mikroalg türleri çok yüksek CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarında yaşamlarına devam edebiliyorken bazıları devam edememektedir (Bitog vd., 2011; Özçimen vd., 2012).

#### **d. Tuzluluk**

Besiyerindeki bulunan tuzluluk oranı mikroalglerin osmatik basıncını etkileyerek besiyerinde bazı metabolitlerin oluşmasını sağlamaktadır. Besiyerindeki tuzluluk miktarı mikroalgin birçok özelliğini etkilemektedir (Richmon, 1986)

#### **e. pH**

Her mikroalg türü, biyokütle ve lipid üretimi için dar ve türe özgü olan optimal bir pH aralığına sahiptir (Moheimani, 2013). Spesifik olarak pH, sudaki karbonlu türlerin nispi konsantrasyonlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Azov, 1982). Mikroalg kültürlerinin pH'ı, mikroalgler tarafından inorganik karbon alımı nedeniyle gün içinde kademeli olarak yükselir. Daha yüksek pH, CO<sub>2</sub>'nin mevcudiyetini sınırlar ve böylelikle hücre büyümesini inhibe eder (Chen & Durbin, 1994). Öte yandan, yüksek pH'ta alg yetiştirme durumu istenmeyen biyolojik kirleticilerin baskılanmasına yol açabilir (Bartley vd., 2014).

#### **f. Çözünmüş Oksijen**

Mikroalgler karanlıkta bırakıldıklarında fotosentez yapamazlar bu nedenle bulundukları ortamdaki çözünmüş oksijen miktarını kullanmak durumundadırlar. Bu durumda çözünmüş oksijenin optimum değeri karanlıkta etkisini göstermektedir (Sukatar, 2002).

#### **g. Besin Maddesi Kompozisyonu**

Medya kompozisyonu hem büyüme hızı hem de mikroalglerin nihai konsantrasyonu üzerinde çok büyük etkiye sahiptir. Mikroalgler besince zengin sularda daha fazla geliştiği bilinmektedir.

##### **3.3.1.3 Mikroalglerin Büyütülmesi**

Kullanılan mikroalgler Bold'un Ortamının değiştirilmiş (BBM) (pH: 6.8) kültür ortamı kullanılarak üretilmiştir.

Tablo 3.1'de gösterilen formülasyon, mikroalg kültür ortamı olarak kullanılmıştır. Bu besiyeri mikroalglerin yetişmesi için gerekli makro ve mikro besin maddelerini içermektedir.

**Tablo 3.1** Bold'un değiştirilmiş temel besiyeri

| <b>İçerik</b>                                             |        |
|-----------------------------------------------------------|--------|
| <b>Makro Nutrient Çözeltileri (L)</b>                     |        |
| <b>NaNO<sub>3</sub></b>                                   | 25.00g |
| <b>CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O</b>                   | 2.50g  |
| <b>MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O</b>                   | 7.50g  |
| <b>K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b>                       | 7.50g  |
| <b>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b>                       | 17.50g |
| <b>NaCl</b>                                               | 2.50g  |
| <b>Alkaline EDTA Solüsyonu Stok Çözeltisi (L)</b>         |        |
| <b>EDTA</b>                                               | 50.00g |
| <b>KOH</b>                                                | 31.00g |
| <b>Asitlendirilmiş Demir Solüsyonu Stok Çözeltisi (L)</b> |        |
| <b>FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O</b>                   | 4.98g  |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>                        | 1mL    |
| <b>Boron Solüsyonu Stok Çözeltisi (L)</b>                 |        |
| <b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>                        | 11.42g |
| <b>İz Element Solüsyonu Stok Çözeltisi (L)</b>            |        |
| <b>ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O</b>                   | 8.82g  |
| <b>MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O</b>                   | 1.44g  |
| <b>CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O</b>                   | 1.57g  |

Ortam ve şişeler, büyüme aşamalarında bulaşmayı önlemek için 121 °C'de 15 dakika boyunca bir otoklavda sterilize edilmiştir. Tablo 3.1'de belirtildiği şekilde 1L son hacme sahip olacak şekilde tabloya göre hazırlanan stok çözeltiler kullanılarak besiyeri ortamı oluşturulmuştur. Prosedüre uygun olarak 829 mL saf suya makro nütrient çözeltilerinden olan NaNO<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ve NaCl çözeltilerinden sırasıyla 10'ar mL alınarak saf suya eklenmiştir. Ardından hazırlanan diğer stok çözeltilerinden saf suyun içerisine sırasıyla 1mL alkaline EDTA solüsyonundan, 1mL asitlendirilmiş demir solüsyonundan, 1mL boron solüsyonundan ve son olarak 1mL İz

element solüsyonundan eklenmiştir. 829mL saf suya belirtilen bu bileşikler ilave edildikten sonra besiyerinin pH'ı 1 M NaOH ve HCl ile 7.1'e optimize edilmiştir. Daha önce hazırlanan stok çözeltilerin tamamı kullanıma hazır şekilde buzdolabında saklandı.

Katı ortam için ise Tablo 3.1 'de yer alan bileşikler tıpkı sıvı besiyerindeki gibi saf suya ilave edilerek hazırlanmıştır ek olarak sıvı besiyerine katı ortam oluşturmak için gerekli olan 15 gL<sup>-1</sup> agar ilave edilerek katı besiyeri hazırlanmıştır. Daha önceden steril edilen besiyeri petri kaplarına dökülerek ekim için hazır hale getirilmiştir. Petri kaplarında yer alan besiyerlerine ekimi yapılan mikroalgler 15-20 gün boyunca büyümeye bırakılmıştır (Şekil 3.10).

25 °C'de kültür, 16: 8 saatlik açık-karanlık döngüler içinde 3500 lux (40 umol foton / m<sup>2</sup>.s'e eşdeğer) yoğunluğundaki beyaz floresan lambalar ile aydınlatıldı. Çalışılacak besiyeri ortamı hacminin % 10'u oranında inokülsayon yapıldıktan sonra algal büyüme, Cary 60 UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 680 nm'de optik yoğunluğun ölçülmesi ile belirlendi. Bir mL numune steril bir şekilde kültür besiyerinden alınarak çıkarılarak bir cam küvet vasıtasıyla ölçüm işlemi gerçekleştirildi.



**Şekil 3.10** Mikroalglerin çoğaltılma öncesi petrilerde üretilmesi



**Şekil 3.11** Petri ortamında büyütülen mikroalglerin 0.5L hacme sahip sıvı besiyerlerine aktarılması ve büyütülmesi

Besiyeri ortamında 15-20 gün boyunca büyütülen *C. vulgaris* mikroalgleri Şekil 3.11'deki gibi steril kabinde yıkama yardımıyla 0.5L hacme sahip erlenmayer içerisindeki sıvı besiyerine aktarılmıştır. 0.5L hacme sahip sıvı besiyerinde büyüme kapasitesini tamamlayan mikroalgler sırasıyla 1 L ve 5 L içerisinde sıvı besiyeri bulunduran şişelere aktarılmıştır. (Şekil 3.12).



**Şekil 3.12** Mikroalglerin biyoreaktöre aktarılmadan önce laboratuvarında farklı boyutlarda üretilme aşamaları

Laboratuvarında kademeli yetiştirme ortamında kültürlenен mikroalgler istenilen son hacme ulaştığında üretim ölçekli solar biyoreaktöre aktarılmıştır. 150L'lik bir hacme sahip olan solar biyoreaktörün sadece 70L'lik kısmı üretimde kullanılmıştır (Şekil 3.13). Solar biyoreaktörde gerçekleştirilen üretim 16:8 saat (aydınlık: karanlık) döngüsünde, 72 gün boyunca sürdürülmüştür. Bu süreç boyunca hücre büyümesi gün aşırı olacak şekilde spektrofotometre ile 680 nm'de spektrofotometrik olarak belirlenmiştir. Biyokütle miktarı

mikroalgler yeterince büyüdükten sonra 5000 rpm de 10 dk santrifüj edilerek hasatlanmış ve 60°C'lik etüvde 18 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutulduktan sonra örneklerin tartımı yapılarak biyokütle miktarı belirlenmiştir.

Solar biyoreaktördeki alg kültürünün sirkülasyonunun sağlanabilmesi için pompa kullanılmıştır. Ayrıca, Solar biyoreaktörde geliştirilen mikroalglerin pH, nitrat ve sıcaklık ölçümleri her gün hazırlanan seçici elektrotlar sayesinde sistem içerisinde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.13** Laboratuvar ölçekli solar biyoreaktöre aktarılan mikroalgler

Üretim ölçekli solar biyoreaktörde büyümesini tamamlayan *C. vulgaris* mikroalgleri hasat edilerek şişelere aktarılmıştır (Şekil 3.14). Hasat edilen *C. vulgaris* mikroalgleri yapılacak uygulamalar için -20°C'de saklanmıştır.



**Şekil 3.14** Biyoreaktörde büyümenin tamamlanmasından sonra hasat edilmesi

Ayrıca biyoreaktörde gerçekleştirilen mikroalg yetiştiriciliği sırasında pH, tuzluluk, iletkenlik, toplam çözünmüş katı ve çözünmüş oksijen taşınabilir multimetre (Hach-Lange) ile günlük olarak ölçülmüştür.

### **3.4 Mikroalglerin Toprak Örneklerine Uygulanması**

#### **3.4.1 Toprak Örneklerinin Alınması**

Araştırma, Büyük Konya Ovası, Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Kampüs sınırları içerisinde yer alan mevcut durumda siltli killi tın tekstüre sahip toprak örnekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, bozulmuş toprak örnekleri bir toprakçı küreği yardımıyla Konya ovası, Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Kampüs sınırları içerisinde yer alan bakır (tarım yapılmayan) alanlardan uygun nemde 0- 30 cm derinlikten alınmıştır. Arazinin 15 farklı noktasından alınan toprak örnekleri karıştırılarak laboratuvara getirilmiştir. Getirilen örnekler gölgede kurutularak hava kuru hale getirilmiştir. Toprak örneklerinden bir miktar toprak 2 mm'lik elekten elenerek bazı toprak özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Kalan toprak örnekleri ise 4 mm'lik elekten elenerek saksı denemesinin kurulumunda kullanılmıştır.

Ayrıca üretilen mikroalglerin rüzgâr erozyonuna olan etkilerini incelemek için belirlenen çalışma sınırları içerisinde uygun nemde 0-5 cm derinlikten yüzey toprak örnekleri alınmıştır. Alınan bu toprak örnekleri laboratuvarında hava kuru hale getirilerek 1-0,5 mm eleklerden elenmiş yapılacak analizler için hazır olacak şekilde depolanmıştır.

#### **3.4.2 Toprak Örneklerinin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi**

Toprak örneğinin bazı özelliklerine bakıldığında tekstürünün siltli killi tın olduğu pH değerinin ise 8,01 değeri ile alkali sınıfa girdiği tespit edildi. İletkenlik değeri ise 413

$\mu\text{cm cm}^{-1}$  bulunmuş olup, kireç değeri ise 20,7 bulunmuştur. Fazla kireçli toprak olarak nitelendirilmektedir bu toprak örneği. Toprak organik madde içeriği ise 1,62 olarak belirlenmiştir bu değer ile orta derecede organik madde içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

### 3.4.3 *C. vulgaris* Uygulamasının Tohum Çimlenmesi, Bitki Gelişimini ve Toprak Erozyonuna Etkisinin Belirlenmesi

#### 3.4.3.1 *Domates Tohumlarının Farklı Dozlarda C. vulgaris İçeren Ortamlarda Çimlendirilmesi*

Petri kaplarına ve viyollere konulan farklı konsantrasyonlarda *C. vulgaris* mikroalglerinin domates tohumlarının çimlenmesi üzerine etkisi incelenmiştir (Şekil 3.15). Bu işlem esnasında ortam sıcaklığı 25 °C olup, petri kaplarında yer alan tohumlar için 24 saat karanlık döngü kullanmıştır. Viyollerde yer alan tohumlar için ise 16: 8 saatlik aydınlık-karanlık döngü kullanılmıştır. Aydınlik döngü için 3500 lux (40  $\mu\text{mol foton} / \text{m}^2.\text{s'e}$  eşdeğer) yoğunluğunda beyaz floresan lambalar kullanılmıştır. *C. vulgaris* mikroalg uygulama dozlarının domates tohumlarının çimlenmesi üzerine etkinlikleri, çimlenen tohumların boyları ölçülerek belirlenmiştir. Denemede tohumlar üzerine yapılan uygulama dozları ise şu şekildedir;

K1 (Saf su-Kontrol)

K2 (Sıvı besiyeri-Kontrol)

M1 (Sıvı mikroalg % 2)

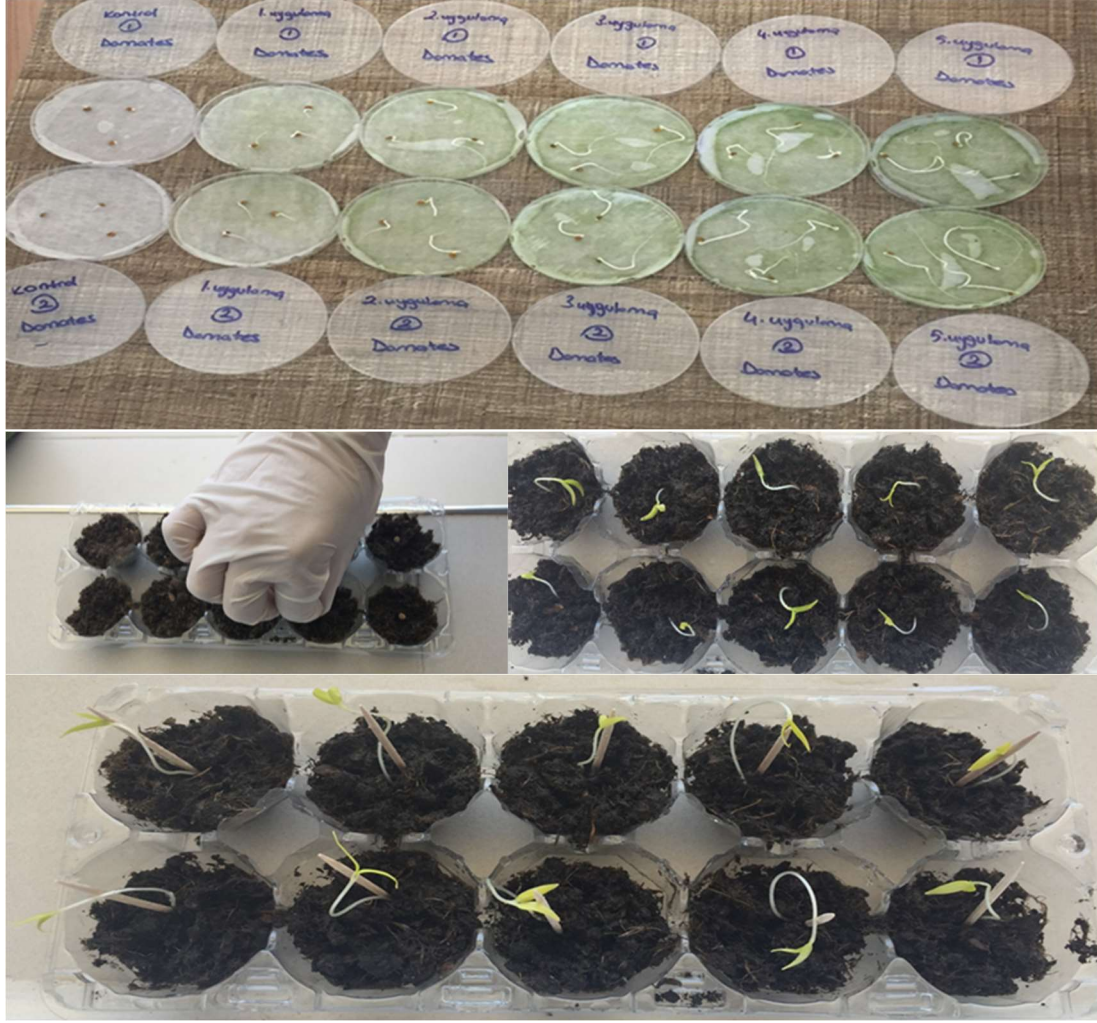
M2 (Sıvı mikroalg % 4)

M3 (Sıvı mikroalg % 6)

M4 (Sıvı mikroalg % 8)

M5 (Sıvı mikroalg %10)

Son hacim bütün uygulamalar için saf su ile 10mL'ye tamamlanmıştır. Deneme 2 tekerrürlü olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.15 Petri ve viyol ortamında *C. vulgaris* mikroalginin domates tohumunun çimlendirilmesi

#### 3.4.3.2 *C. vulgaris* Uygulamasının Domates Bitkisi Üzerine Etkisi

Saksılara konulan toprak örneklerine 0-20-40-60-80-100 mLkg<sup>-1</sup> olacak şekilde hasat edilen mikroalglerden uygulama yapılmıştır. Yapılan uygulamalar sonrası toprağa karıştırılan mikroalgler 24 saat süre ile inkübasyona bırakılarak 24 saatin sonunda domates fide ekimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.16).



**Şekil 3.16** Toprak örneklerine mikroalg uygulamasının yapılması ve 24 saat inkübasyona bırakılması

Domates bitkilerinin gelişimi 5.boğuma kadar devam ettirilerek hasat işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneme boyunca farklı uygulama dozlarında yetiştirilen domates bitkilerinin gelişimleri takip edilmiştir (Şekil 3.17).



**Şekil 3.17** Saksı denemesinin üstten görünümü

Yeterli büyüklüğü gelen domates bitkilerinde hasat öncesi yapılması gereken bazı ölçümler (bitki boyu, gövde çapı) yapılmıştır. Bu işlemler sonrası hasat makası yardımıyla bitkiler saksı yüzeyinden kesilerek hasat edilmişlerdir. Hasat bittikten sonra bitki kökleri ayırt edilerek basınçlı su ile yıkanarak temizlenmiş, kaba filtre kağıtları üzerinde fazla suların uzaklaşmasından sonra duyarlı terazide tartılarak kök yaş ağırlıkları (g) saptanmıştır. Kese kağıtlarına konulup hava dolaşımli kurutma fırınında (65-70°C)

kurutulan köklerin tartımı tekrar yapılarak kuru ağırlıkları (g) da belirlenmiştir. Duyarlı terazide bitki yeşil aksanının yaş ağırlıkları alınmıştır. Daha sonra bitkiler 2 kez çeşme suyu, 1 kez seyreltilmiş HCl'li su ve 1 kez de destile su ile yıkanarak kese kağıtlarına konulup sıcaklığı 50-60°C'ye ayarlanmış hava dolaşımli kurutma fırınında kurutulmuşlardır. Kurutma işlemini takiben bitkiler yeniden duyarlı terazide tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

#### ***3.4.3.3 Farklı Oranlarda C. vulgaris Mikroalginin Uygulamalarının Domates Bitkisinin Besin Maddeleri İçeriği Üzerine Etkileri***

Hasat sonrası kurutulan bitki, besin maddesi analizleri için öğütülmüştür. Öğütülen bitki örnekleri hava almayan küçük poşetlere konularak analizler için hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan bitki örneklerinde yapılan bazı besin elementi analizleri ve yöntemleri ise şu şekildedir;

pH: pH metre yardımı ile 1:1'lik örnek solüsyonu kullanılarak,

EC: Kondüktometre yardımı ile 1:1'lik örnek solüsyonu kullanılarak,

N: Kjeldahl yöntemiyle,

P: Spektrofotometrede okuma yapılarak,

K: Fleymfotometrede okunarak,

Toplam Ca,Mg: Atomik absorbsiyon spektrofotometresinde (AAS) okunarak,

Toplam Fe,Cu,Mg,Zn: Atomik absorbsiyon spektrofotometresinde (AAS) okunarak belirlenmiştir.

#### ***3.4.3.4 C. vulgaris Uygulamasının Toprak Yüzey Kabuklanmasına ve Rüzgâr Erozyonuna Olan Etkinliğinin Belirlenmesi***

Rüzgâr erozyonu deneyi, Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Laboratuvarı rüzgâr tüneline yapılmıştır. Çalışmada kullanılan laboratuvar ölçekli rüzgâr tüneli daha önceden tasarlanmış ve karakterize edilmiştir (Erci vd., 2021). Kısaca laboratuvar rüzgâr tüneli 5 m uzunluğunda ve 0,40 m çapında 2 mm galvanizli saclardan oluşmaktadır. Rüzgâr tüneline toprak örneğinin yerleştirileceği çalışma bölümü 0,25 m uzunluğunda ve 0,30 m genişliğindedir. Rüzgâr, 0,5–20ms<sup>-1</sup> aralığında rüzgâr hızları üretebilen bir fan tarafından üretilmiştir.

Rüzgâr erozyonu deneyinde kullanılmak üzere her örnek tepsi için 0,5kg toprak örneği hazırlanmıştır. Toprak örneklerine sırasıyla 0-20-40-60-80-100 mLkg<sup>-1</sup> olacak şekilde elde edilen mikroalg solüsyonları toprak yüzeyine bir pipet yardımı ile uygulanmıştır. Sprey vasıtasıyla daha homojen bir uygulama yapılmak istenmiş fakat mikroalg solüsyonunun içerisinde yer alan mikroalgler sprey uçları tıkanmıştır. Bu nedenle pipet vasıtasıyla toprak yüzeyine uygulama gerçekleştirilmiştir. Toprak yüzeyine yapılan uygulamaların toplam son hacmi kontrol de dahil 100 mLkg<sup>-1</sup> olacak şekilde yapılmıştır. Mikroalg oranına göre kalan kısım saf su uygulaması ile tamamlanmıştır. Yapılan uygulamalar sonrası tepsideki toprak örnekleri 24 saat boyunca inkübasyona bırakılmıştır. 24 saatin sonunda rüzgâr tüneli test odasına örnekler sırası ile konularak 9ms<sup>-1</sup> rüzgâr hızına 10dk süre maruz bırakılmıştır (Şekil 3.18).



**Şekil 3.18** Uygulama sonrası rüzgar erozyonu sonucu ortaya çıkan toprak kaybının belirlenmesi

İşlem sonrası örnek tepsilerinde kalan toprak örnekleri tartılarak kaybolan toprak miktarları belirlenmiştir. Tüm uygulamalar üç tekrar yapılmıştır. Bu miktarlar belirlenirken aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Erci vd., 2021);

$$q_s = (Q_i - Q_f) / (A \cdot t_i) \quad \text{Denklem [1]}$$

Burada:  $q_s$ , rüzgâr akımı simülasyonundan önce ve sonra test tepsilerinin yüzey alanı başına ağırlık farkı olarak toprak kaybıdır ( $\text{gm}^{-2} \text{dk}^{-1}$ ).

$Q_i$ : malzeme uygulamasından sonra numune tepsilerindeki toplam kir miktarı (g)

$Q_f$ : rüzgâr tüneli çalışmasının sonunda numune tepsilerinde kalan toplam toprak miktarının zamansal düzeltilmesinden sonraki değer (g)

A: test tepsilerinin yüzey alanı

ti: maruz kalma süresi (dk).

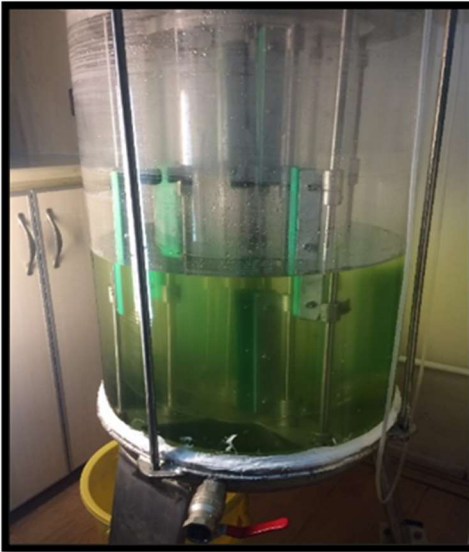
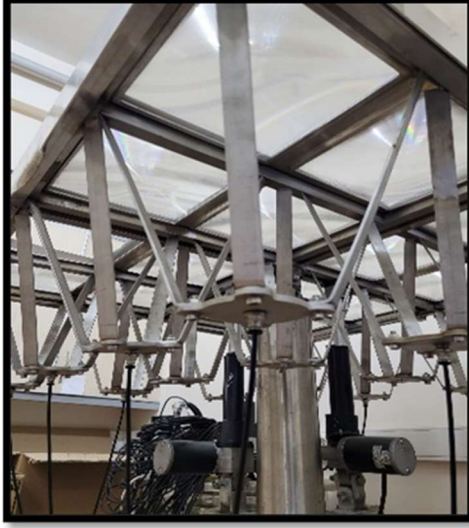
### **3.5 İstatistiki analizler**

Çalışma gruplarının uygulama etkilerinin bitki gelişimine ve erozyona etkisindeki anlamlı farklılıkları belirlemek için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapıldı, ardından ikili karşılaştırmalar için Tukey testi yapıldı. İstatistiksel analiz SPSS (Statistical Package for Social Sciences, version 16, Chicago, IL, USA) ile yapıldı ve anlamlılık düzeyi  $P < 0,05$  olarak belirlendi.



#### 4.1 Laboratuvar Ölçekli Solar Biyoreaktörün Tasarımı ve Üretilmesi

Mikroalg yetiştirme sistemlerinde iyi performanslar elde etmek için ışığın verimli kullanımı esastır. Gündüz/gece döngüleri ve çevre koşullarındaki hızlı değişiklikler gibi ışığın oldukça dinamik olduğu güneş koşullarda ışığın verimli kullanımı zorlaşmaktadır. Mikroalglerin kısa vadede yüksek ışıkla karşılaştıklarında, hücre hasarlarını (örneğin, ksantofil döngüsü) önlemek için birkaç foto koruma özelliklerine sahip oldukları görülmektedir. Diğer yandan, mikroalgler uzun vadede farklı bir ışık yoğunluğuna maruz kaldıklarında pigment içeriklerinin değişebildiği bilinmektedir (Bonnafant vd., 2021). Işık yoğunluğu ve dalga boyu, *C. vulgaris*'in büyümesini ve bunun yanı sıra biyokütle besin bileşimini güçlü bir şekilde etkilemektedir. Çalışmada üretimi yapılan laboratuvar ölçekli solar biyoreaktör güneş ışığını fresnel lensler vasıtasıyla fiber optik kablolarla aktarım yapmaktadır (Şekil 4.1). Fiber optik kablolar ise mikroalg üretiminin gerçekleştirildiği biyoreaktöre güneş ışığını taşımaktadır. Bu sayede yüksek düzeyde ışık yoğunluğuna maruz kalan mikroalglerin büyüme hızı ve biyokütlesi de fotosentezin artması sonucu hızla artış göstermektedir. Üretilen solar sistemin güneş ışığının geldiği yöne doğru el ile yönlendirilebilmesi sistemin avantajlarından olup, bu yapının güneş ışınlarının geldiği açıya göre otomatik olarak yön değiştirilebilir olarak yeniden revize edilmesi önerilmektedir. Bu sayede insan ihtiyacı olmadan sistem güneş enerjisinden maksimum düzeyde fayda sağlayabilecek, mikroalg biyokütlesi de buna paralel olarak artış gösterecektir. Sistem ile alakalı olarak yapılabilecek bir diğer öneri ise; fiber optik kabloların sayılarının arttırılarak biyoreaktörün farklı lokasyonlarından da mikroalglerin güneş ışığına maruz bırakılması fotosentezi arttıracak için daha kısa sürede daha yüksek biyokütle eldesini mümkün kılacaktır.



Şekil 4.1 Biyoreaktörden görünüm

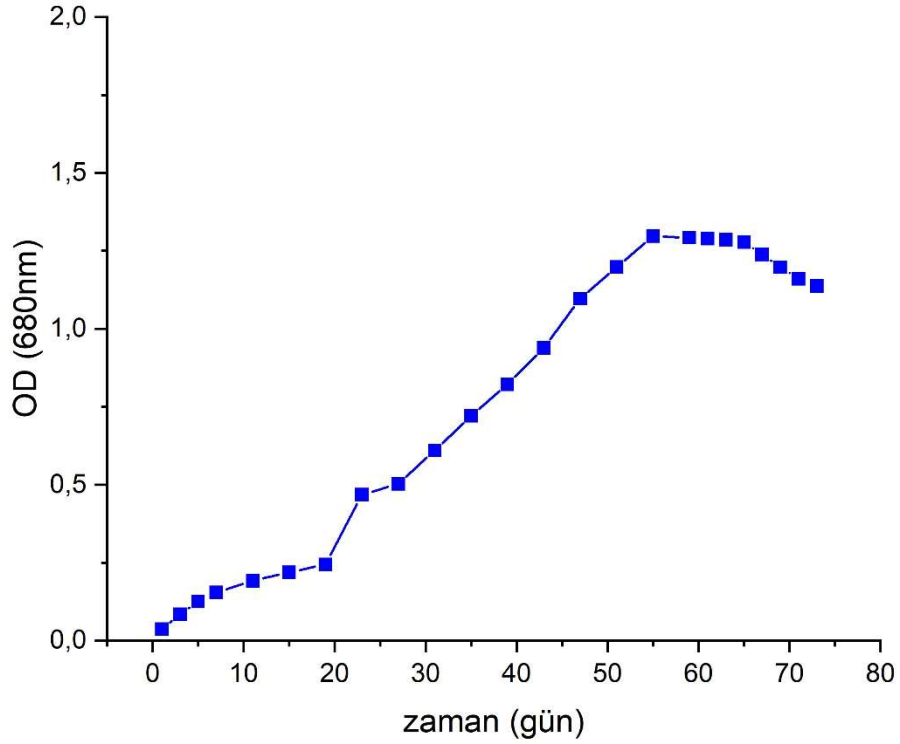
## 4.2 Mikroalgal Büyüme Ortamı ile İlgili Parametrelerin Ölçülmesi

### 4.2.1 Solar biyoreaktörde mikroalg üretimi ve performansının takibi

- Zaman- Mikroalg büyüme ilişkisi:

*C. vulgaris* büyüme eğrisinin zamana karşı değişim grafiği Şekil 4.2’ de verilmiştir. UV spektroskopisinde 680 nm’de 73 gün boyunca ölçüm alınmış olup, mikroalg büyümesinin 53. güne kadar sürdüğü, 53. günden sonra büyümenin devam ettiği fakat durgun faza geçtiği görülmektedir. 68. günden sonra ise büyümenin artık bittiği ölüm fazına geçtiği görülmektedir. Elde edilen bulgular doğrultusunda tez çalışması kapsamında üretilen solar biyoreaktördeki biyokütle üretim miktarı maksimum değeri  $1,157 \text{ gL}^{-1}$  olarak belirlenmiştir. Bu değer literatürde yer alan birçok laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktörlerin biyokütle üretim miktarından fazladır. Bu durum tez kapsamında üretilen solar biyoreaktörün etkinliğinin üstün olduğunu kanıtlar niteliktedir. Yapılan bir çalışmada *Chlorella vulgaris*'in çeşitli fotoperiyot rejimlerindeki biyokütle değişimleri değerlendirilmiştir. Tüm fotobiyoreaktörler (ototrofik ve mikсотrofik mikroalg büyümeleri), yetiştirme süresi boyunca sürekli ve önemli bir biyokütle artış modeli gözlemlemişlerdir. Buna göre mikсотrofik fotobiyoreaktörlerin ( $0,8\text{--}0,9 \text{ gL}^{-1}$ ), ototrofik fotobiyoreaktörden ( $0,68 \pm 0,02 \text{ gL}^{-1}$ ) daha yüksek biyokütle konsantrasyonları ürettiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, fotoperiyot rejimi stratejisinde ışık koşullarının uzatılması, yüksek besin alımlarına karşılık gelen yüksek mikroalg biyokütle büyümesine katkıda bulunduğu bildirilmiştir (Leong vd., 2022; Rani & Ojha, 2021; Sirisuk vd., 2018). Bir başka çalışmada, yeşil mikroalg *Dunaliella salina* üzerine benzer bir fotoperiyod çalışması yapılmış, mikroalglerin uzun süreli ışığa maruz kalmaları daha hızlı büyüme hızına sahip olmalarını sağlamıştır. Bu durum hücre yoğunluklarındaki artışı da beraberinde getirmiştir (Xu vd., 2016). Yapılan bir başka çalışmada mikroalg yetiştirme ortamındaki nitrat, karbonat ve fosfat konsantrasyonunun *Chlorella minutissima* mikroalg biyokütlesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek *C. minutissima* üretiminin  $2,63 \text{ gL}^{-1} \text{ NaNO}_3$ ,  $0,35 \text{ gL}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$  ve  $0,4 \text{ gL}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ 'ten oluşan besiyerinde elde edildiği görülmüştür. Bu koşullar altında elde edilen maksimum biyokütle üretimi ise  $0,84 \text{ gL}^{-1}$  olarak bulunmuştur (Balkanlı vd., 2022). Literatürde yer alan birçok çalışma detaylı incelendiğinde bu çalışmada kullanılan solar fotobiyoreaktörün biyokütle üretiminde diğer reaktörlere kıyasla daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun ana nedenlerinden birisi mikroalglerin uzun süreli olarak

yüksek miktarda gün ışığına maruz kalması ve ortamda büyümeleri için gerekli besiyerinin yeterli miktarda bulunması olarak değerlendirilebilir. Solar fotobiyoreaktöre gün ışığının diğer fotobiyoreaktörlere kıyasla daha yüksek miktarda ulaştırılabilmesinin ana nedeni sistemde yer alan fresnel lensler sayesinde güneş ışınlarının toplanarak fiber optik kablolar aracılığı ile solar fotobiyoreaktöre aktarılmasıdır.



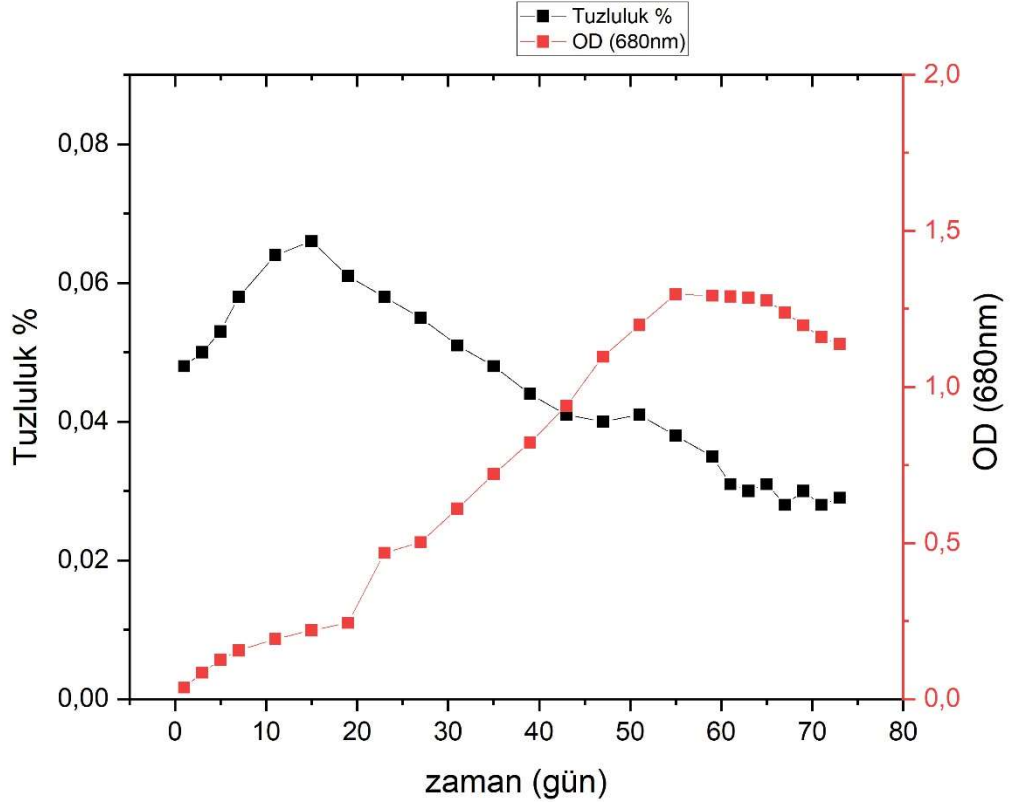
**Şekil 4.2** *C. vulgaris* büyüme eğrisinin zamana karşı değişimi

Mikroalglerin büyümesine etki eden diğer parametrelerden olan sıcaklık, çözünmüş oksijen, tuzluluk, iletkenlik, direnç ve toplam çözünmüş katı madde içeriği büyüme boyunca ölçülmüştür. Mikroalg büyümesiyle bu parametrelerin değişimleri sırası ile verilmiştir.

- **% tuzluluk- Mikroalg büyüme ilişkisi:**

*Chlorella*, tuza dayanıklı mikroalgler olarak kabul edilmektedir ve 0,4 M tuz konsantrasyonu olan bir ortamda hayatta kalabildiği literatürce belirtilmiştir (Abou-Elela vd., 2010). Yapılan bir çalışmada tuzluluk mevcudiyeti arttıkça *Chlorella*'nın tuzluluğu tüketme kapasitesinin de arttığı belirtilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada *Chlorella*'nın çözünmüş katıları kullanması nedeniyle TDS ve tuzluluğun azaldığını bildirmişlerdir.

Çözünmüş katılar da ortamın tuzluluğunda rol oynadığından TDS ile aynı anda tuzluluk da azalma göstermiştir (Bhuyar vd., 2020). Yapılan bu çalışmada mikroalg gelişimi sırasında tuzluluk önce artmış, daha sonra sabit kalan bir noktaya kadar azalmaya başlamıştır. Mikroalg büyüme eğrisi ile %tuzluluk ilişkisinin zamana karşı değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.

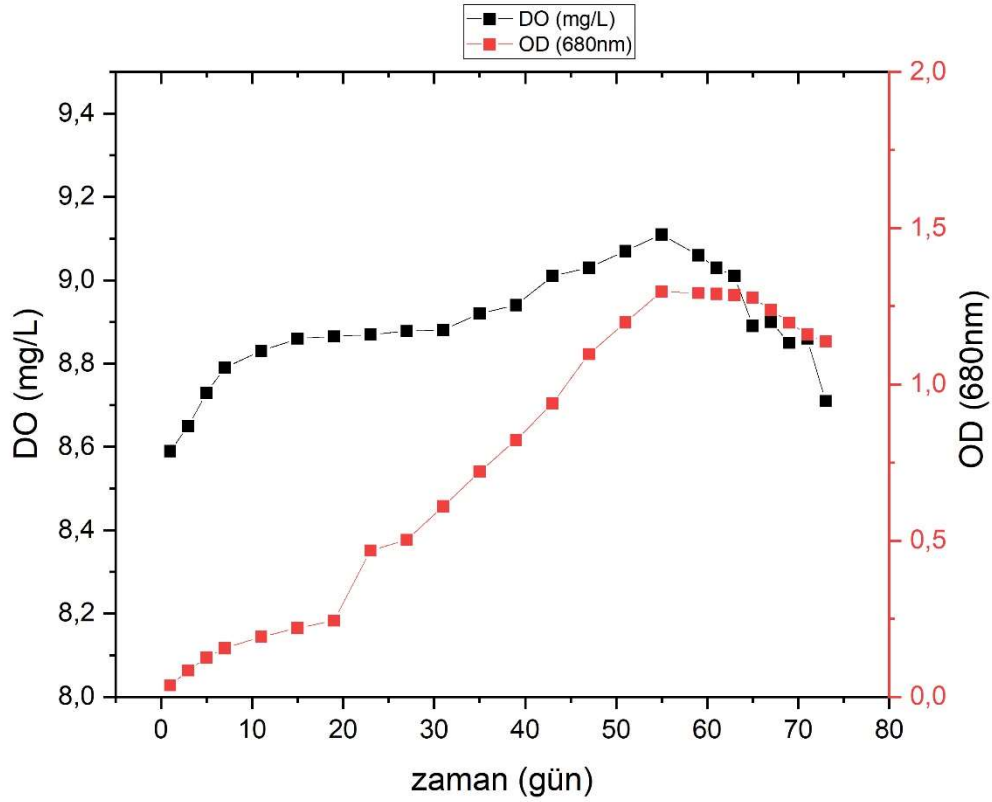


**Şekil 4.3** Mikroalg büyüme eğrisi ile % tuzluluk ilişkisinin zamana karşı değişimi

- **% Çözünmüş Oksijen (DO) – Mikroalg büyüme ilişkisi:**

Çözünmüş oksijen ile mikroalg büyüme eğrisinin zamana karşı değişimi Şekil.4.4'te sunulmuştur. Büyütülen mikroalglerin sayıları artarken yapmış olduğu fotosentezden dolayı çözünmüş oksijen (DO) oranı ilk başta az miktarda artış sergilemiş olup, ölüm fazına doğru gidildikçe büyüme (OD) grafiğine paralel olarak bu fazda fotosentez yapamadıklarından dolayı çözünmüş oksijen miktarında azalma görülmüştür. Alg biyokütlesinin artmasıyla oksijen üretimi DO'yu artırdığından bu beklenen bir sonuçtur. Zhang ve ark.,2020 tarafından yapılan bir çalışmada biyokütle artışı ile DO'nun arttığı bildirilmiştir (Zhang vd., 2020). Bununla birlikte, fotosentetik biyokütle konsantrasyonu yüksek olduğunda, oksijen üretimi artış göstermiştir DO ise yavaşça artış sergilemiştir. Bu, suyun oksijenle aşırı doymun hale gelmesi ve üretilen oksijenin yalnızca bir kısmının

ortam tarafından emilmesiyle açıklanmıştır. Buna göre bu çalışmanın sonuçları literatür ile uyumlu bulunmuştur.

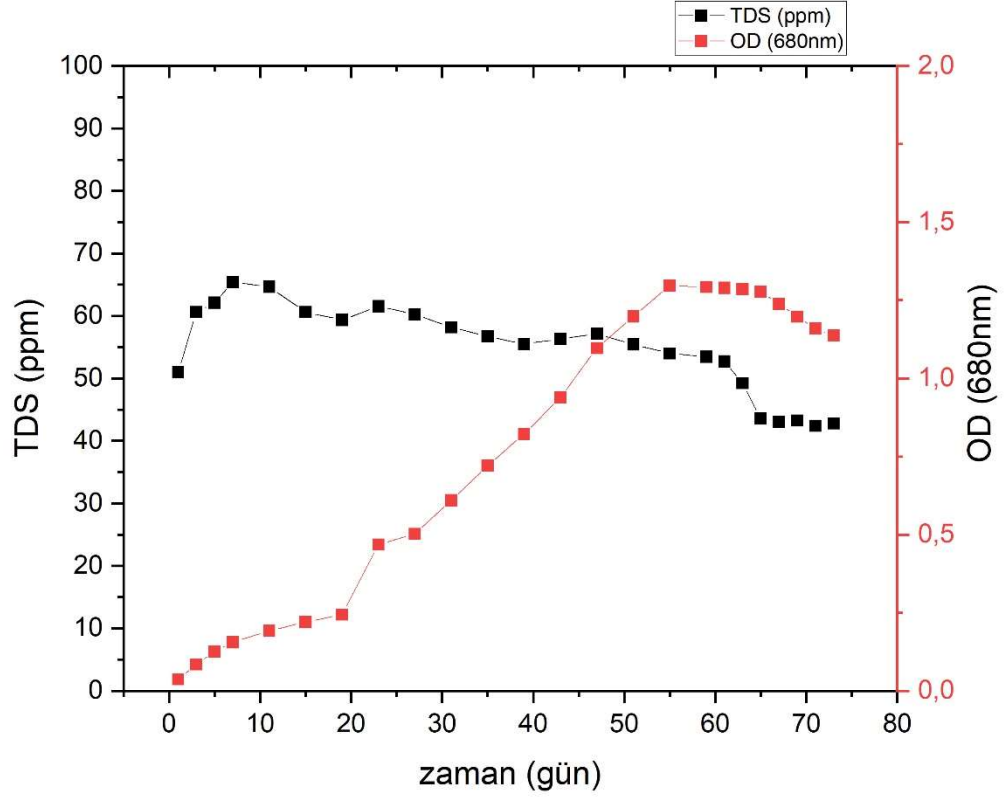


Şekil 4.4 Çözünmüş oksijen ile mikroalg büyüme eğrisinin zamana karşı değişimi

- **Toplam çözünmüş katılar (TDS) – Mikroalg büyüme ilişkisi:**

Toplam çözünmüş katılar (TDS) ile mikroalg büyüme eğrisinin zamana karşı değişimi Şekil 4.5'te sunulmuştur. Büyütülen mikroalglerin sayıları artarken toplam çözünmüş katıların (TDS) oranı ilk başta az miktarda artış sergilemiştir. Ölüm fazına doğru gidildikçe TDS oranında azalma görülmüştür.

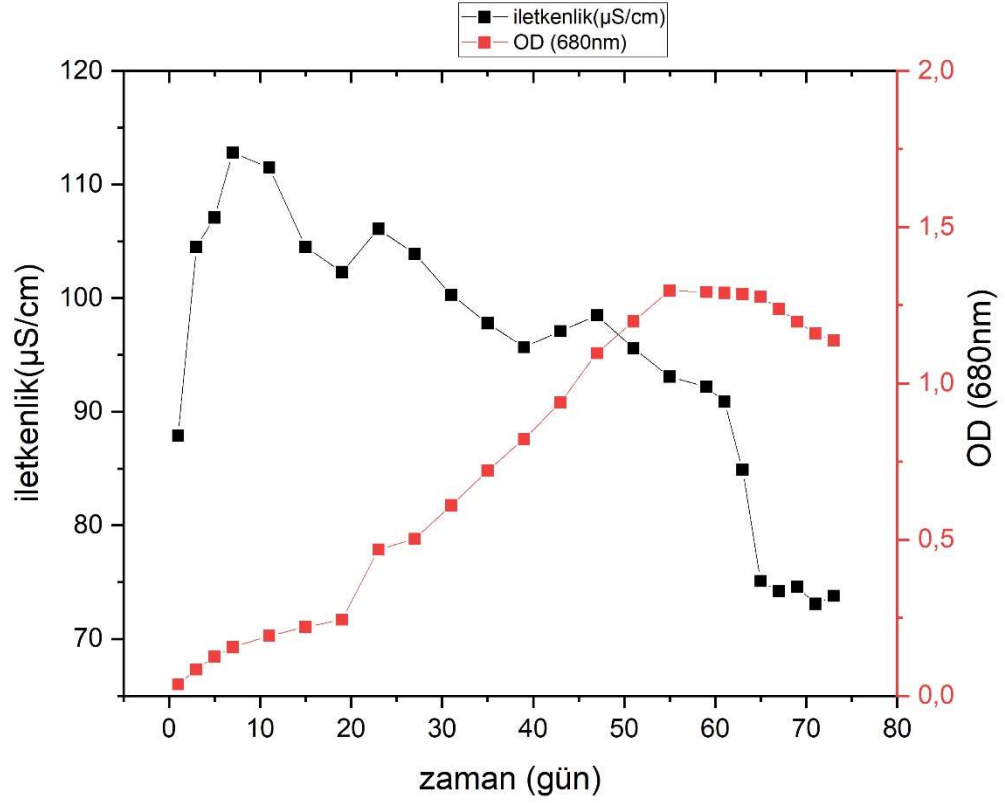
Toplam çözünmüş katılar (TDS), suda çözünmüş çözünmüş mineraller, tuzlar, iyonlar veya metallerdir. Yapılan bir çalışmada atık sudaki TDS'nin azalması, çözünmüş katıların biyo-absorpsiyon/adsorpsiyon mekanizmaları yoluyla büyüme ve metabolizma için kullanılmasından kaynaklandığını göstermektedir (Bhuyar vd., 2020). Su arıtımı için mikroalg kullanan birçok araştırmacı TDS'nin mikroalg üretiminde azaldığını bildirmiştir (Azarpira vd., 2014). *Chlorella vulgaris* mikroalgi çözünmüş katıları kullandıkça, TDS azalmış ve aynı zamanda çözünmüş katılar da atık suyun tuzluluğunda rol oynadığından tuzluluk azalmıştır.



Şekil 4.5 Toplam çözünmüş katılar (TDS) ile mikroalg büyüme eğrisi arasındaki ilişki

- İletkenlik (EC) – Mikroalg Büyümesi:

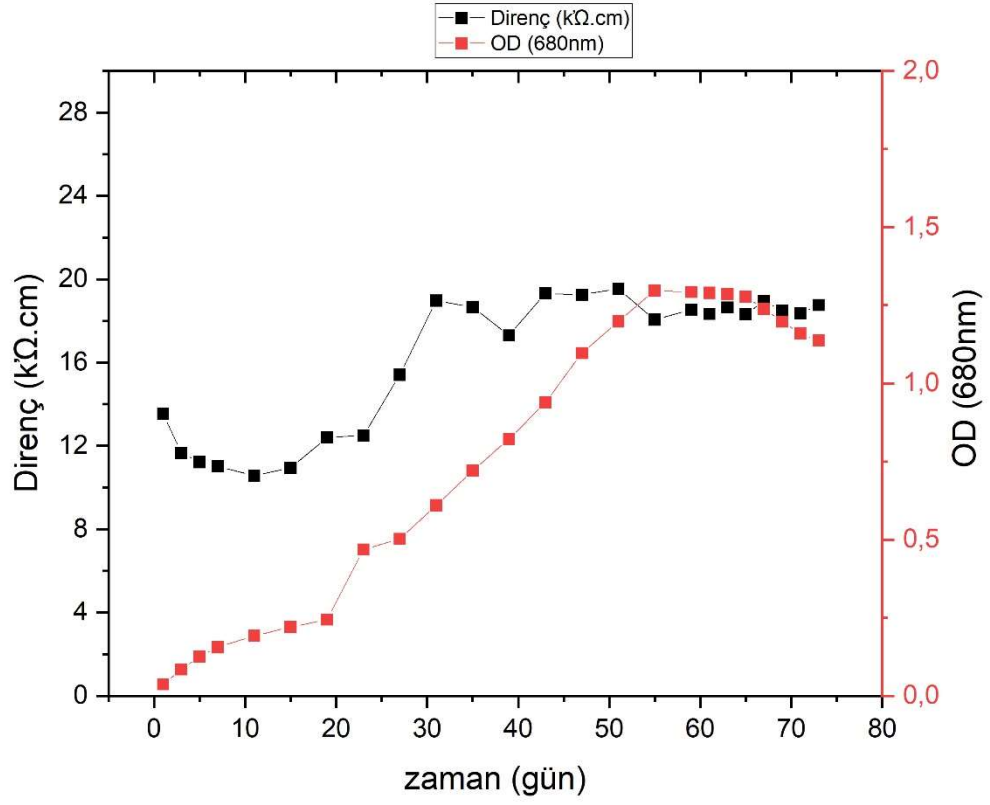
Şekil 4.6'da *Chlorella vulgaris*'in büyümesi ile iletkenlik ilişkisi verilmiştir. Mikroalg büyürken, besin ortamında çözünmüş katıların (TDS) ve tuzluluğun azalmasına bağlı olarak ortamda çözünmüş iyon miktarı da azalmaktadır. Elektriksel iletkenlik çözeltide çözünmüş ve iyon haline gelmiş elementler sayesinde sağlanmaktadır. İyon miktarının azalmasına bağlı olarak elektrik iletkenliğinin de azaldığı gözlenmiştir. Yapılan bir çalışmada tuzluluk azaldıkça, tuz konsantrasyonlarının da azaldığı belirlenmiştir. Tuz konsantrasyonunun azalması atıksudaki iletkenliği de azaltmıştır (Zhuo et al., 2017). Bunun nedeni, suda ayrılan ve elektrik yüklerini iletebilen  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Cl}^-$  gibi iyonik tuzların varlığı olup bu tuzların ortamdaki uzaklaşması ile iletkenlik azalmaktadır. Bir başka çalışmada ise mikroalg büyüme sırasında toplam çözünmüş katı ve tuzluluğun azalması nedeniyle toplam çözünmüş iyon konsantrasyonu azaldığı belirlenmiş olup besiyerinde azalan iyon konsantrasyonu nedeniyle iletkenliğin azaldığı gözlemlenmiştir (Balkanlı et al., 2022).



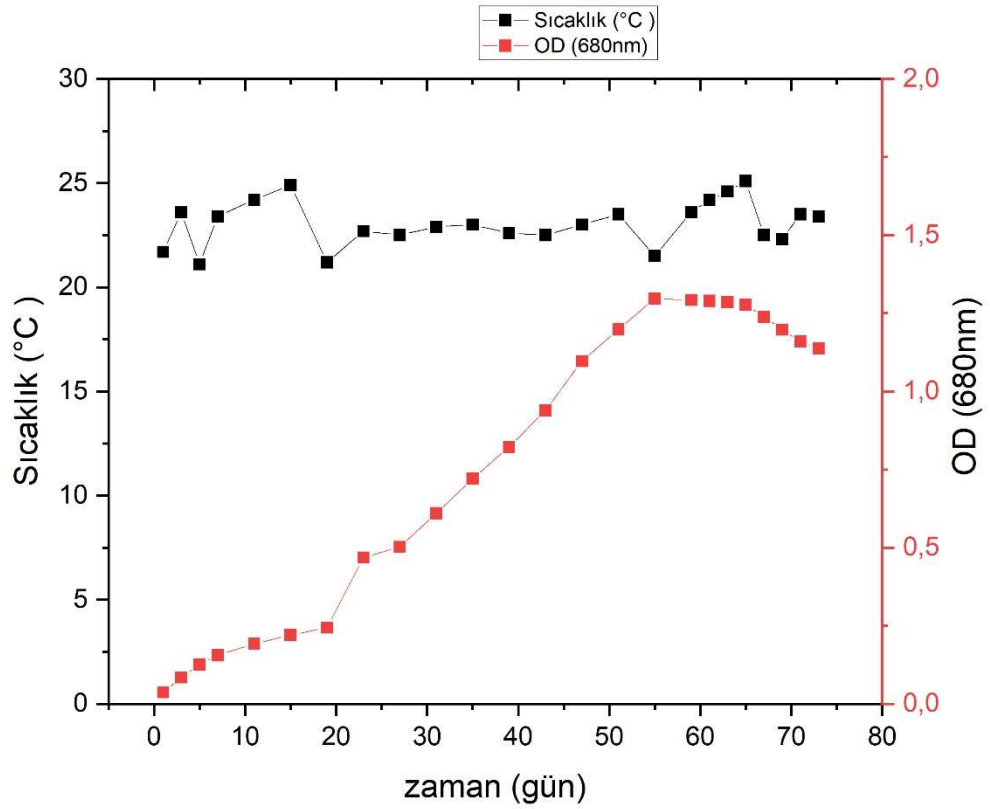
Şekil 4.6 *C. vulgaris* büyümesi - iletkenlik

- **Direnç ve sıcaklığın mikroalg büyüme eğrisi ile ilişkisi:**

Şekil 4.7’de *Chlorella vulgaris*’in büyüme eğrisi ile direnç ilişkisi verilmiştir. Direnç’in başlangıçta çok az bir azalma eğilimi gösterdiği fakat sonrasında büyüme eğrisine benzer şekilde artış gösterdiği belirlenmiştir. Besin ortamında iletkenlik ve direncin ters orantılı olduğu literatürce belirtilmiştir (Balkanlı vd., 2022). İletkenliğin azalması ona ters orantılı olan direnci arttırmaktadır. Şekil 4.8 ’de ise *Chlorella vulgaris*’in büyüme eğrisi ile sıcaklık ilişkisinin zamana karşı değişimi verilmiş olup besiyer sıcaklığının mikroalg gelişimine uygun şekilde olduğu belirlenmiştir.



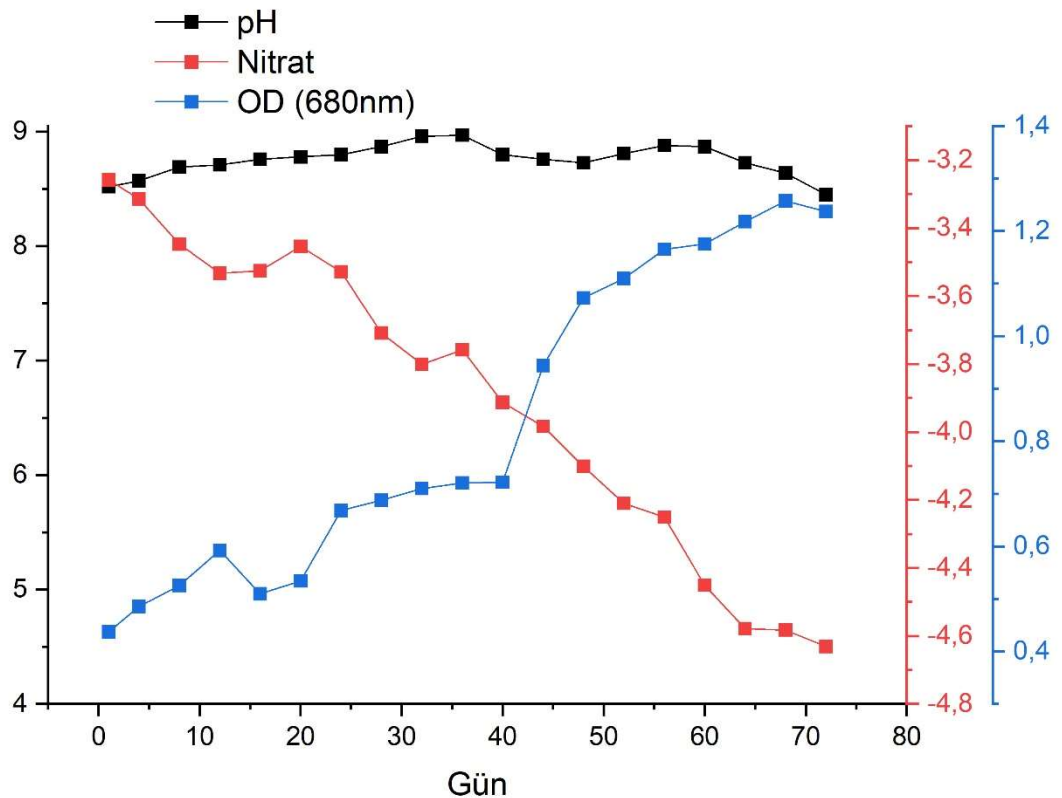
Şekil 4.7 *C. vulgaris*'in büyüme eğrisi - direnç ilişkisi



Şekil 4.8 *C. vulgaris*'in büyüme eğrisi - sıcaklık ilişkisi

#### 4.2.2 Nitrat ve pH Sensörleri ile solar biyoreaktörde mikroalg üretim performansının takibi

Algler nitratı bir nutrient olarak kullanmaktadır. Nitrat kullanımı sonucu büyüyen mikroalgler besiyer ortamındaki nitratın azalmasına neden olmaktadır, ölüm fazına geçtiği anda ise nitrat kullanımı görülmemekte olup besiyerinde kalan nitrat sabitlenmektedir. Bu nedenle OD takibinin yanı sıra nitrat takibi de önem arz etmektedir. Biyoreaktörde takip edilen süreç boyunca besin solüsyonunda nitrat oranının mikroalg biyokütle konsantrasyon değerinin artmasına kıyasla azaldığı belirlenmiştir. Literatüre göre optimum pH değerleri 6 ile 8 arasındadır (Balkanlı vd., 2022). Besiyerindeki tuzu anyonlarının ve amonyak birikiminin hücre emilimi nedeniyle büyüme esnasında ortamın pH değeri artar. Mikroalglar büyüme evresinde besiyerinde olan karbonatı kullanmaktadırlar. Çözülmüş karbonat besin yerinde bikarbonata dönüşerek ( $H^+/OH^-$  değiştirilerek) ortamda  $OH^-$  iyonu fazlalığı yarattığından dolayı ortam pH' ı artış göstermektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Sensörler ile solar biyoreaktörde mikroalg büyümesi sırasında Nitrat ve pH değişiminin takibi

### 4.3 Mikroalg Uygulamalarının Bazı Toprak Özelliklerine, Tohum Çimlenmesine ve Bitki Gelişimine Olan Etkileri

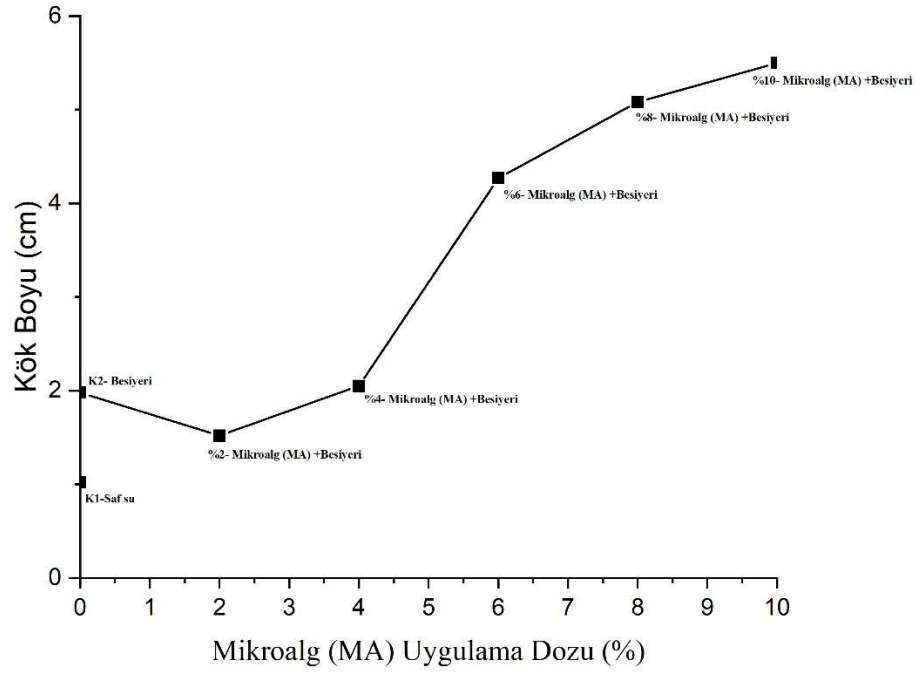
#### 4.3.1 *C. vulgaris* uygulamasının tohum çimlenmesine etkisi

Çalışmada domates tohumları içerisinde sırasıyla % 0 (saf su 10mL)-0 (Mikroalg Besiyeri 10mL)-2-4-6-8 ve 10 mL *C. vulgaris* mikroalg solüsyonu steril petri kaplarına yerleştirilmiştir (bütün petri kaplarında son hacim 10 mL olacak şekilde saf su ile tamamlanmıştır). Çalışmanın bu aşamasında belirlenen farklı dozlardaki *C. vulgaris* mikroalg uygulamasının domates tohumunda çimlenme oranına ve kök gelişimine olan etkinlikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Deney tamamen tesadüfi bir tasarımda yürütülmüş olup veriler Varyans Analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur.

Yapılan bir çalışmada farklı atık su ve mikroalgal hücre konsantrasyonları ile nemlendirilmiş iki yaprak filtre kâğıdı sterilize edilmiş petri kaplarına (90 mm çap) yerleştirilmiş olup içerisinde 25 adet marul tohumu (*cv. Lucy Brown*) dört tekerrür olacak şekilde ekilmiştir. Tohumlanmış plakalar (MA 415 Marconi) içinde  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de beyaz flüoresan ışığı altında 12 saat/12 saat fotoperiyotta inkübe edilmiş olup, çimlenme yüzdesi 10 günlük bir süre boyunca geliştirilen normal fide sayısından hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda farklı konsantrasyonlarda *C. sorokiniana* ile muamele edilen marul tohumlarının çimlenmesinde önemli ölçüde farklılık tespit edilmemiştir (Ribeiro vd., 2019). Her bir mikroalg türü, farklı seviyelerde biyokütle bileşenleri üretme yeteneğine sahip olup (Behrens & Kyle, 1996), kültür ortamının kimyasal bileşimi, havalandırma, ışık yoğunluğu, sıcaklık ve yaş dahil diğer kültür koşullarındaki değişikliklere göre metabolizmasını değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu durum ele alındığında, hücre bileşiminin tohum çimlenmesini etkilemiş olabileceği düşünülmektedir (Dunstan vd., 1993; Guschina & Harwood, 2006). Dineshkumar ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada çeltikte biyogübre olarak *C. vulgaris* ve *Spirulina* kullanımının tohum verimi üzerine olan etkisi araştırılmış olup yapılan mikroalg uygulamalarının tohum verimini % 7-29 oranında artırdığını bildirmişlerdir (Dineshkumar vd., 2018). Ayrıca yapılan mikroalg uygulamalarının toprağın biyolojik ve kimyasal özellikleri açısından iyileştirici etkisinin olduğunu ve her iki mikroalg türünün de biyogübre olarak başarı ile kullanılabileceği bildirmişlerdir (Günsan Can vd., 2022). Bir başka çalışmada doğal sıcaklık ve ışık rejimleri altında tohum çimlenmesini araştırmak ve tatlı su mikroalglerinin üç *Vallisneria* türünün tohum çimlenmesi üzerindeki etkisini

değerlendirmek için deney yapılmıştır. Sonuç olarak alg ile aşılınmış kültür solüsyonundaki tohum çimlenme oranlarının, alg içermeyen solüsyona göre önemli ölçüde daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Zhongqiang vd., 2005).

Bu çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda değerlendirme yapılacak olursa; *C. vulgaris* mikroalg uygulamasının yapılan doz artışı ile birlikte tohumların çimlenme durumuna ve kök gelişimine olumlu yönde etkisi olmuştur. Kök gelişimi açısından kontrole kıyasla *C. vulgaris* mikroalgi uygulanan tohumlarda kök gelişiminin doz oranına paralel olarak hızla geliştiği istatistiki olarak belirlenmiştir. Uygulama dozunun artması ile çimlenme durumunda da artış gözlemlenmiştir. En iyi çimlenme ve kök gelişimi %8 ve 10 uygulama dozlarında görülmektedir (Şekil 4.10). Tohumlar üzerine yapılan saf su uygulaması (K1) ve mikroalg içermeyen besiyeri uygulaması (K2) tohum çimlenmesi ve kök gelişimi açısından birbirleri ile kıyaslandığında, mikroalg içermeyen besiyerin içerisinde kalan bazı bitki besin elementlerinin varlığı tohum çimlenmesi ve kök gelişimi üzerine %48,5 oranında saf suya karşın daha etkin bulunmuştur. Tohum çimlenmesi üzerine olan etkinlikleri açısından en yüksek iki uygulama dozu olan % 8 ve 10, saf su içeren kontrol örneği ile kıyaslandığında sırasıyla %80 ve 81,5 oranlarında saf suya kıyasla bu uygulama dozlarının daha etkin oldukları belirlenmiştir.



**Şekil 4.10** Farklı uygulama biçim ve dozlarının 5 gün sonunda tohumların kök boyu üzerinde meydana getirdiği değişimler

Saksıya yerleştirilen toprak örneklerine şaşırtmalı olarak domates fideleri ekilmiştir. Toprak örneklerine sırasıyla 0 (saf su)-20-40-60-80-100 mL kg<sup>-1</sup> *C. vulgaris* mikroalg solüsyonu uygulanmış olup domates bitkisinin gelişimine etkisi belirlenmiştir. Deney tamamen tesadüfi bir tasarımda yürütülmüş olup domates bitkisinin bitki boy, kök boy ve gövde çapları arasında belirlenen farklılıklar TUKEY testi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Domates bitkisine uygulanan *C. vulgaris* mikroalginin bitki ve kök boylarına olan etkisine yakından inceleyecek olursak kontrol grupları ile kıyaslandığında bitki boy gelişimi 40 mLkg<sup>-1</sup> ve üzeri uygulamalarda istatistiki olarak anlamlı bulunmuştur. Kontrol örneğinde bitki boyu ortalama olarak 78,8 cm olarak bulunurken en yüksek doz uygulaması olan 100 mLkg<sup>-1</sup> uygulamasında 95,1 cm olarak tespit edilmiştir.

Kök boyuna olan etkisine bakılacak olursa, kontrol grubuna kıyasla kök boy gelişimi bitki boy gelişimine benzer şekilde 40 mLkg<sup>-1</sup> ve üzeri uygulamalarda istatistiki olarak anlamlı bulunmuştur Kök boyu 100 mLkg<sup>-1</sup> da kontrole kıyasla % 40,84 oranında artış sergilemiştir. Uygulanan *C. vulgaris* mikroalginin bitki gövde çapına olan etkisi tıpkı bitki boyu ve kök boyunda olduğu gibi 40 mLkg<sup>-1</sup> ve üzeri uygulamalarında etkin

bulunmuştur. Kontrol ile 100 mLkg<sup>-1</sup> dozu kıyaslandığında gövde çapının kontrole kıyasla artış gösterdiği görülmektedir.

En iyi bitki boyu, kök boyu ve gözde çapı gelişimi 80 ve 100 mLkg<sup>-1</sup> uygulamalarında gözlemlenmiştir.

Tablo 4.2’de görüldüğü üzere farklı dozlarda *C. vulgaris* uygulaması sonrası domates bitkilerindeki gelişim takip edilmiştir. Elde edilen sayısal veriler TUKEY testi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan uygulama bitki gövde yaş ve kuru ağırlıkları açısından değerlendirilecek olursa kontrol örneklerine kıyasla 40 mLkg<sup>-1</sup> ve üzeri dozlarda bitki gövde yaş ve kuru ağırlıkları önemli düzeyde artış göstermektedir. Bu durum kök yaş ve kuru ağırlıkları içinde geçerli olup en etkin uygulamaların 80 ve 100 mLkg<sup>-1</sup> dozlarında olduğu tespit edilmiştir.

Mikroalgal süspansiyonların ve ekstraktların bitki büyümesini teşvik edici etkileri de saha deneylerinde değerlendirilmiştir. Yapılan bir çalışmada *C. vulgaris* ve *Spirulina platensis*’in algal biyo-gübrelerinin pirinç bitkisinin büyümesini iyileştirmede kilit rol oynadığı savunulmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda bu ifadeyi destekleyici sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada bitki -kök boyunun, bitki taze ve kuru ağırlıklarının her iki mikroalg gübresi için pirinç bitkilerinde olumlu performans sergilediği tespit edilmiştir (Dineshkumar vd., 2018). Bir başka çalışmada ise yeşil mikroalg *C. vulgaris*’in mısır ve buğday bitkisi üzerine olan etkinlikleri araştırılmış olup mikroalg biyokütlesinin mısır ve buğdaydaki bitki parametrelerini geliştirdiği bildirilmiştir (Dineshkumar vd., 2019; Schreiber vd., 2018).

Mikroalgal süspansiyonların ve ekstraktların bitki büyümesini teşvik edici etkileri de saha deneylerinde değerlendirilmiştir. Yapılan bir çalışmada *C. vulgaris* ve *Spirulina platensis*’in algal biyo-gübrelerinin pirinç bitkisinin büyümesini iyileştirmede kilit rol oynadığı savunulmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda bu ifadeyi destekleyici sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada bitki -kök boyunun, bitki taze ve kuru ağırlıklarının her iki mikroalg gübresi için pirinç bitkilerinde olumlu performans sergilediği tespit edilmiştir (Dineshkumar vd., 2018). Bir başka çalışmada ise yeşil mikroalg *C. vulgaris*’in mısır ve buğday bitkisi üzerine olan etkinlikleri araştırılmış olup mikroalg biyokütlesinin mısır ve buğdaydaki bitki parametrelerini geliştirdiği bildirilmiştir (Dineshkumar vd., 2019; Schreiber vd., 2018).

**Tablo 4.1** Farklı konsantrasyonlarda *C. vulgaris* mikroalg uygulaması yapılan domates bitkilerinin hasat öncesi bitki boyları, gövde çapları ve kök boyları

|                | Bitki Boyu(cm) | Kök Boyu(cm) | Gövde Çapı(mm) |
|----------------|----------------|--------------|----------------|
| <b>Kontrol</b> | 78,8a *        | 38,2a        | 7,72a          |
| <b>20 mL</b>   | 76,6a          | 35,2a        | 7,81b          |
| <b>40 mL</b>   | 85,5b          | 43,1b        | 7,93b          |
| <b>60 mL</b>   | 91,6c          | 48,2c        | 7,98c          |
| <b>80 mL</b>   | 98,5d          | 52,2d        | 8,13d          |
| <b>100 mL</b>  | 95,1d          | 53,8d        | 8,11d          |

\*: Sütunlardaki farklı küçük harfler istatistiksel olarak anlamlı farklılığı göstermektedir (p < 0,05)

**Tablo 4.2** Farklı konsantrasyonlarda *C. vulgaris* mikroalg uygulaması yapılan domates bitkilerinin hasat sonrası yaş ve kuru ağırlıkları

|                | Yaş ağırlık (g/bitki) |       |        | Kuru ağırlık(g/bitki) |       |        |
|----------------|-----------------------|-------|--------|-----------------------|-------|--------|
|                | Gövde                 | Kök   | Toplam | Gövde                 | Kök   | Toplam |
| <b>Kontrol</b> | 328,5a *              | 58,2a | 386,7a | 65,1a                 | 12,8a | 77,9a  |
| <b>20 mL</b>   | 335,6a                | 55,2a | 390,8a | 69,6b                 | 12,9a | 82,5b  |
| <b>40 mL</b>   | 370,5b                | 63,1b | 433,6b | 71,2b                 | 14,5b | 85,7b  |
| <b>60 mL</b>   | 389,6c                | 68,2c | 457,8c | 79,3c                 | 16,5c | 95,8c  |
| <b>80 mL</b>   | 398,5d                | 72,2d | 470,7d | 82,6d                 | 18,4d | 101,0d |
| <b>100 mL</b>  | 405,1d                | 73,8d | 478,9d | 85,9e                 | 19,3d | 105,2d |

\*: Sütunlardaki farklı küçük harfler istatistiksel olarak anlamlı farklılığı göstermektedir (p < 0,05)

Benzer şekilde, yapılan *C. vulgaris* süspansiyon uygulamalarının yaprak yeşilliğini, bitki ağırlığını, bitki boyutunu ve üzüm verimini artırdığı bildirilmiştir (Nagy & Pintér, 2015). Yapılan bu ve benzeri birçok laboratuvar veya saha bazlı çalışmalar mikroalg süspansiyonlarının veya ekstraktlarının bitki büyümesini ve performansını iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca daha sürdürülebilir ve çevre dostu tarım uygulamaları için umut verici alternatifler olduğunu da güçlü bir şekilde göstermektedir. Bu bağlamda daha fazla araştırmaya hala ihtiyaç vardır.

#### **4.3.2 Farklı Oranlarda *C. vulgaris* Mikroalg Uygulamalarının Bitki Besin Maddeleri İçeriği Üzerine Etkileri**

Toprak pH'sı kontrole kıyasla *C. vulgaris* mikroalg uygulama dozlarındaki artışla kısmi azalma görülmektedir. EC değerinde ise kontrole kıyasla doz artışına paralel olarak kısmi artışlar sergilemekte olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada toprağa mikroalg uygulamasının bitki pH ve EC değerinde bir miktar azalmaya neden olduğunu bildirmiştir (Sutton vd., 1991).

Bitkideki mevcut N, P ve K, kontrole kıyasla mikroalg aşılması nedeniyle önemli ölçüde artış göstermiştir. Mevcut en yüksek N, P ve K içerikleri, 100 mLkg<sup>-1</sup> uygulamasında sırasıyla % 5,49, 0,48 ve 2,78 şeklinde elde edilmiştir (Tablo 4.3).

Yapılan bir çalışmada, mısır ekiminden önce farklı oranlarda *C. vulgaris*'in kurutulmuş biyokütlesi toprağa uygulanmıştır. Kırk günlük bitkilerde, gelişmiş bitki büyümesi (kök hacmi, bitki boyu ve kök, sürgün ve toplam kuru ağırlık), yapraklarda artan klorofil ve daha yüksek mikro besin alımının (Mg, Fe, Mn ve Zn) meydana geldiği bildirilmiştir (Shaaban, 2001).

Yapılan bu çalışmada görüldüğü üzere domates bitkisinin mikro besin element değerleri uygulama doz artışına paralel olarak kontrole kıyasla artış göstermiştir. Bu durum literatür ile uyum göstermekte olup yapraklarda mikro besin elementlerinin miktarlarının daha fazla olduğunu kanıtlar niteliktedir. En yüksek mikro besin element içerikleri 100mlkg<sup>-1</sup> uygulamasında görülmektedir.

**Tablo 4.3** Farklı konsantrasyonlarda *C. vulgaris* mikroalg uygulaması yapılan domates bitkilerinin hasat sonrası besin madde içerikleri

|                | pH     | EC                 | N     | P     | K     | Ca     | Mg    | Fe    | Cu    | Mn     | Zn     |
|----------------|--------|--------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                |        | $\mu\text{hos/cm}$ | %     | %     | %     | %      | %     | ppm   | ppm   | ppm    | ppm    |
| <b>Kontrol</b> | 8,11a* | 408,2a             | 4,97a | 0,24a | 2,51a | 72,14a | 1,02a | 432a  | 20,4a | 74,69a | 11,34a |
| <b>20 mL</b>   | 8,08b  | 412,2a             | 4,98a | 0,26b | 2,59a | 82,5b  | 1,08b | 452b  | 21,2a | 76,52a | 14,33b |
| <b>40 mL</b>   | 8,04b  | 422,1b             | 5,04b | 0,32b | 2,55b | 85,7b  | 1,12c | 475c  | 23,4b | 79,31a | 14,62b |
| <b>60 mL</b>   | 7,98c  | 438,2c             | 5,18c | 0,39c | 2,64c | 95,8c  | 1,15c | 481cd | 27,4c | 80,14b | 15,02c |
| <b>80 mL</b>   | 7,95d  | 452,2d             | 5,37d | 0,42d | 2,74d | 101,0d | 1,18d | 487d  | 27,9c | 80,19b | 15,37c |
| <b>100 mL</b>  | 7,95d  | 473,8d             | 5,49d | 0,48e | 2,78d | 105,2d | 1,23e | 495e  | 29,1d | 82,14b | 16,01d |

\*: Sütunlardaki farklı küçük harfler istatistiksel olarak anlamlı farklılığı göstermektedir (p <0,05)

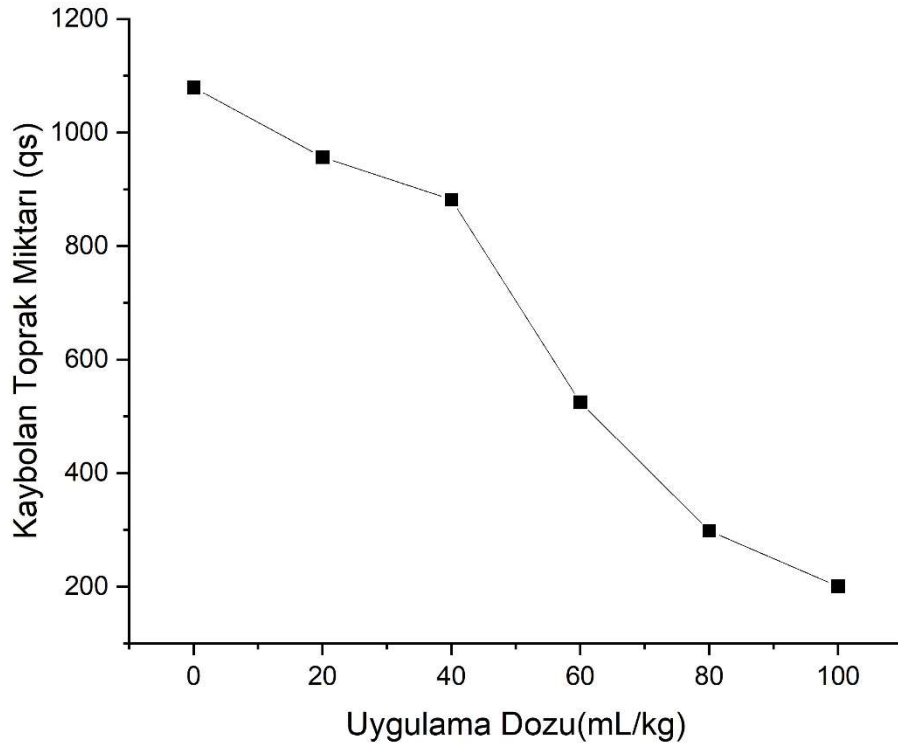
#### 4.4 *C. vulgaris* uygulamasının toprak örneklerinde rüzgâr erozyonu kontrolündeki etkinliği

SiCL tekstür sınıfına sahip toprak örneğine toprak düzenleyici materyal olarak uygulanan *C. vulgaris* mikroalginin  $9 \text{ m s}^{-1}$  rüzgâr hızında meydana getirdiği rüzgâr erozyonunu önlemedeki etkinlikleri, laboratuvar ölçekli bir rüzgâr tüneli vasıtası ile ölçülmüştür. Bunun sonucunda her örnek için kaybolan toprak miktarları  $\text{g m}^{-2}10\text{dk}^{-1}$  cinsinden toprak kaybı denkleminde yerine konularak belirlenmiştir. Kaybolan toprak miktarları belirlenirken zamansal normalleştirme yapılmış olup bütün örneklerin 10 dakikalık kayıpları hesaplanarak değerlendirilmeye alınmıştır. Rüzgâr tüneli denemesi sonrasında elde edilen bu verilerin ortalama değerlerinin TUKEY testine göre karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 4.11). Buna göre, farklı dozlarda yapılan uygulamaların kontrole kıyasla rüzgâr erozyonu ile kaybolan toprak miktarında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Maliyet açısından değerlendirme yapılacak olursa yapılan bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda toprak yüzeylerine uygulanan mikroalg uygulamalarından  $60 \text{ mLkg}^{-1}$  uygulama dozunun sahada rüzgâr erozyonunu önlemede yeterli olduğu söylenebilir.  $60 \text{ mLkg}^{-1}$  uygulama dozunun üzerinde yapılan

uygulamaların da rüzgâr erozyonunu önlemede etkin oldukları şekil de görülmekte olup aralarında çok ciddi farkların olmadığı elde edilen bulgular sonucunda söylenebilmektedir.

Konu ile alakalı literatür çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Toprakta meydana gelen agregasyon toprak yapısını etkileyen önemli bir faktördür ve kararlı agregatlara sahip topraklar, gelişmiş havalandırma ve hidrolik özelliklere sahip olup ayrıca rüzgâr ve su gibi aşındırıcı kuvvetlere karşı daha az duyarlılığa sahiptir (Johnson vd., 2016; Nimmo, 2004). Bu bağlamda Mısırda yapılan 3 yıllık bir çalışmada, zayıf yapılı topraklarda erozyonu azaltmak için 7,8 kg kuru mikroalg biyokütlesi ha<sup>-1</sup> oranında mikroalg kullanımının toprakların agregat stabilitesini arttırdığını belirlemiştir (Metting, 1987). Bununla birlikte, HDP üreten mikroalgler ayrıca tarımsal ortamlarda toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirerek toprak düzenleyiciler olarak potansiyeli destekler (Maqubela vd., 2012; Nisha vd., 2018). Ökaryotik mikroalg *Chlamydomonas mexicana* ve *C. sajabo* ayrıca ılıman tarım topraklarında agregat stabilitesini artırmıştır (Metting, 1987; Metting & Rayburn, 1983).

Agregat stabilitesinin artmasının toprağın rüzgâr ve su erozyonuna karşı dirence geliştirmesini sağlamaktadır. BSC'lerde, (Hu vd., 2002), ince kumun rüzgâr erozyonuna karşı geliştirilmiş direncini gösterirken, Chamizo ve ark. 2012 saha deneylerinde yağmur simülasyonlarından sonra daha düşük tortu erozyonunu tanımlamıştır (Chamizo vd., 2012). Öte yandan, HDP üreten mikroalgler toprakta su tutulmasını iyileştirebilir ve hidrolik davranış. HDP higroskopiktir özelliğe sahiptir (Colica vd., 2014; D. M. Mager & Thomas, 2011). Tarımsal topraklarda, mikroalg değişiklikleri toprağın su tutma kapasitesini (WHC) artırmıştır (Mandal vd., 1999). Genel olarak HDP, topraktaki su hareketlerini geciktirerek, su yolları oluşturarak, su alımını iyileştirerek pozitif bir su dengesi sağlar ve WHC ve buharlaşma kayıplarının azaltılmasını sağlar (Rossi vd., 2018).



**Şekil 4.11** Uygulama dozu artışının rüzgâr erozyonu sonucu oluşan toprak kaybını önlemedeki etkinliği

### Öneriler;

Literatürde yer alan birçok çalışma mikroalglerin tarımsal ortamlarda toprak verimliliği, bitki büyümesi, biyokontrol ve besin döngüsü için faydalı olduğunu göstermektedir. Mevcut teknolojik zorluklar ve bilgi boşlukları mikroalglerin yaygın kullanımlarını ve tarımsal uygulamalara dahil edilmelerini sınırlandırmaktadır. En önemli zorluklar arasında mikroalg üretim alanları gelmektedir. Bu nedenle daha küçük alanlarda daha etkin üretim yapılabilecek mekanizmalar geliştirilmesi ve bu yapılırken de temiz teknolojiler kullanılması bu alan için önem arz etmektedir. Bu açıdan bu alanda mevcut olan boşlukların doldurulması için birçok çalışma yapılmakta ve yapılmaya da devam etmektedir. Çalışmada geliştirilen laboratuvar ölçekli solar biyoreaktör etkin mikroalg üretimi açısından planlanan verimi sağlamakta olup daha öteye taşınması için AR-GE çalışmalarına devam edilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalarda mikroalglerin büyümek için ihtiyaç duyduğu güneş ışığının maksimum seviyede elde edilebilir olması hedef amaçlardan birisi olup bu bağlamda solar panellerin mühendislik açısından daha üst seviyeye çıkarılması gerekmektedir. Biyoreaktörün birçok noktasından güneş ışığı

beslemesi yapılarak mikroalglerin etkin olarak üretimine katkı sağlayabileceği de gözden kaçırılmaması gereken bir diğer husus olarak bu çalışmada öne çıkmaktadır.

Mikroalgler çok yönlü olup çok çeşitli besin kaynakları ve koşullarında (sıcaklık, ışık, pH, tuzluluk) büyümektedirler bu durum bir avantaj olup gelecekte birçok çevre problemlerinin çözümünde yer alacağı aşikardır. Bu açıdan bu alanda yapılacak olan büyük ölçekli kaliteli üretimin ekonomik olabilmesi, üretilen mikroalglerin muhafaza edilebilmesi ya da nakliye edilebilmesi için ilerleyen teknolojik gelişmelere ihtiyaç duyulmaktadır (Innok vd., 2009; Wang vd., 2015). Mikroalg üretim maliyetlerini en aza indirmek için, en uygun kültür sistemlerini (dış mekâna karşı iç mekân, açık havuzlara karşı kapalı reaktörler) ve yerel olarak mevcut besin kaynaklarını ve besin geri dönüşümü seçeneklerini (formüle edilmiş ortam, besin açısından zengin atık sular, CO<sub>2</sub> kaynağı) belirlemek oldukça önemlidir (Prasanna vd., 2014; Renuka vd., 2018; Rossi vd., 2017).

Mikroalgal uygulamaların toprak, rizosfer ve bitki dokularındaki mikrobiyal topluluklar üzerindeki etkilerini, bitki büyüme parametrelerini, ürün verimleri ve ekosistem işleyişi ile nasıl ilişkili olduğunu daha detaylı incelemek ve anlamak gerekmektedir (Kanchan vd., 2019; Prasanna vd., 2017). Bu bağlamda yapılan çalışmalarda mikroalgal biyogübrelerin, gıda mahsullerinin yaprak ve tanelerindeki bu eksiklikleri gidermek ve yetersiz beslenmeyle mücadeleye katkıda bulunmak için umut verici bir seçenek olduğu görülmektedir (Rana vd., 2015; Renuka vd., 2018)

Toprakta mikroalgler, besin sağlayarak ve toprak besin döngüsünü ve toprak kalitesinin mikrobiyolojik parametrelerini geliştirerek toprak yapısını geliştirir ve toprak verimliliğine fayda sağlar. Mikroalgler ayrıca bitki patojenlerine karşı koruma sağlayarak bitki büyümesini destekler. Araştırma ayrıca, mikroalglerin besin açısından zengin atıklarla, özellikle N ve P ile mikroalg biyokütlesi üreterek ve bu besinleri mahsul üretimi için toprağa geri dönüştürerek atık sulardan besin maddelerini geri kazanmak için kullanıldığına işaret etmektedir. Ek olarak, mikroalg biyofilmleri ve konsorsiyumları, agronomik verimlilik ve mikroalgi diğer bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmalarla sinerjik etkilerle üretkenliği artırmak için birleştirme potansiyeli göstermektedir. Bu nedenle bu alanlarda yapılacak olan çalışmaların genişletilerek devam edilmesi önem arz etmektedir (Alvarez vd., 2021).

Dünya çapında insan etkenleri ve iklim değişiklikleri nedeniyle oluşan kurak veya bozulmuş alanlarda erozyona karşı koymak ve çölleşmeyi önlemek açısından birçok

toprak düzenleyici kullanılmakta olup bu alandaki yoksunluk henüz giderilmiş değildir. Ülkemiz en büyük sorunlarından birisi olan toprak erozyonunu önlemede bu ve benzeri toprak düzenleyici materyaller kullanılarak etkinlikleri belirlenmeli. Etkin ve ekonomik olan uygulamaların bu alanlarda hayata geçirilmesi gerekmektedir. Son zamanlarda mikroalglerin tarımsal uygulanmaları artış göstermiş olup mikroalglerin zamanla topraklarda meydana getirdiği fiziksel özelliklerdeki dikkate değer değişikliklerin mikroalglerin farklı alanlarda da değerlendirilebileceğinin öngörüsünü oluşturmaktadır. Rüzgâr ve su gibi aşındırıcı kuvvetler nedeniyle meydana gelen toprak kaybını azaltmak için mikroalglerin kullanımını değerlendirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Sadeghi et al., 2020).

Yenilenebilir kaynak olan mikroalglerin çeşitliliği hala büyük ölçüde keşfedilmemiş olup tarımda ekin üretiminde, bitki makro ve mikro besin zenginleştirmede ve toprak koruma için sürdürülebilir çözümler olarak uygulamalarını genişletmek için sayısız olasılık sunar. Artan kanıtlar, mikroalglerin, biyogübreler, organik gübreler, biyoyararıcılar, biyokontrol ajanları ve toprak düzenleyiciler gibi tarıma yönelik çok sayıda biyoürünün geliştirilmesi için uygun platformlar olduğunu desteklemektedir. Yine de farklı türdeki topraklardaki, ürünlerdeki ve agroekolojik bölgelerdeki verimlilikler, mikroalg biyokütle üretiminde ve tarımsal uygulamalarda en iyi yöntemin belirlenmesi ve uygulamaların bitkiler ve toprak üzerindeki etkilerinin ilişkilendirilmesi gibi pek çok soru günümüzde cevap bulabilmek için araştırma konusu haline gelmiştir. Bunların yanı sıra, mikroalglerin pestisitlerle etkileşimleri, biyokontrol ajanları olarak kullanımı ve çevresel etkileri azaltmadaki rolleri henüz belirlenebilmiş değildir. Mikroalg kaynağının genişletilmiş kullanımı, gelecek on yılların tarımsal sürdürülebilirliği için kritik ihtiyaçlar olan toprak verimliliği, besin döngüsü ve erozyon kontrolü gibi tarımın ekosistem hizmetlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca, mikroalglerin uygulama yelpazesini çeşitlendirmek ve tarım sektöründeki kullanımlarını genişletmek, maliyetlerin dengelenmesine ve diğer sektörlerde (yani gıda takviyeleri, kozmetikler, biyoplastikler, biyoyakıtlar) yeni oluşan alg endüstrisinin güçlendirilmesine yardımcı olabilir ve çevresel faydalar sağlayabilir (Alvarez vd., 2021).

- Abinandan, S., Subashchandrabose, S. R., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2019). Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(8), 981-998. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1654972>
- Abou-Elela, S. I., Kamel, M. M., & Fawzy, M. E. (2010). Biological treatment of saline wastewater using a salt-tolerant microorganism. *Desalination*, 250(1), 1-5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.03.022>
- Acea, M. J., Prieto-Fernández, A., & Diz-Cid, N. (2003). Cyanobacterial inoculation of heated soils: effect on microorganisms of C and N cycles and on chemical composition in soil surface. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(4), 513-524. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00005-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00005-1)
- Agwa, O. K., Ogugbue, C. J., & Williams, E. E. (2017). Research Article Field Evidence of *Chlorella vulgaris* Potentials as a Biofertilizer for Hibiscus esculentus.
- Alharbi, S., Majrashi, A., Ghoneim, A. M., Ali, E. F., Modahish, A. S., Hassan, F. A. S., & Eissa, M. A. (2021). A new method to recycle dairy waste for the nutrition of wheat plants. *Agronomy*, 11(5), 840.
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in microbiology*, 8, 971.
- Alvarez, A. L., Weyers, S. L., Goemann, H. M., Peyton, B. M., & Gardner, R. D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54, 102200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- Alwathnani, H., & Johansen, J. R. (2011). Cyanobacteria in soils from a Mojave Desert ecosystem. *Monographs of the Western North American Naturalist*, 5(1), 71-89.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative evaluation using case studies. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
- Azarpira, H., Behdarvand, P., Dhupal, K., & Pondhe, G. (2014). Potential use of cyanobacteria species in phycoremediation of municipal wastewater. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 4(4), 105-111. <https://doi.org/10.12692/ijb/4.4.105-111>
- Azov, Y. (1982). Effect of pH on Inorganic Carbon Uptake in Algal Cultures. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(6), 1300-1306. <https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1300-1306.1982>
- Balkanlı, N. E., Işıldak, İ., İnan, B., Özer, T., & Özçimen, D. (2022). Monitoring microalgal growth of *Chlorella minutissima* with a new all solid-state contact nitrate selective sensor. *Biotechnology Progress*, 38(3), e3247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/btpr.3247>
- Bartley, M. L., Boeing, W. J., Dungan, B. N., Holguin, F. O., & Schaub, T. (2014). pH effects on growth and lipid accumulation of the biofuel microalgae *Nannochloropsis salina* and invading organisms. *Journal of Applied Phycology*, 26(3), 1431-1437. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0177-2>

- Behrens, P. W., & Kyle, D. J. (1996). Microalgae as a source of fatty acids. *Journal of Food Lipids*, 3(4), 259-272. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.1996.tb00073.x>
- Bello, A. S., Saadaoui, I., & Ben-Hamadou, R. (2021). “Beyond the Source of Bioenergy”: Microalgae in Modern Agriculture as a Biostimulant, Biofertilizer, and Anti-Abiotic Stress. *Içinde Agronomy (C.* 11, Sayı 8). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081610>
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in ecology & evolution*, 31(6), 440-452.
- Bhuyar, P., Hong, D., Mandia, E., Ab. Rahim, M. H., Maniam, G. P., & Govindan, N. (2020). Salinity Reduction From Poly-Chem-Industrial Wastewater by Using Microalgae (*Chlorella* sp.) Collected From Coastal Region of Peninsular Malaysia. *The journal of biology and medicine*, 1(1), 1-14.
- Bitog, J. P., Lee, I.-B., Lee, C.-G., Kim, K.-S., Hwang, H.-S., Hong, S.-W., Seo, I.-H., Kwon, K.-S., & Mostafa, E. (2011). Review: Application of Computational Fluid Dynamics for Modeling and Designing Photobioreactors for Microalgae Production: A Review. *Comput. Electron. Agric.*, 76(2), 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.015>
- Bolarinwa, S. T. (2022). Effect of Soil Microalgae (*Chlorella Vulgaris*, *Chlorella Minutissima*, and *Scenedesmus Acutus*) Amendment on Nitrogen and Phosphorus Dynamics in Florida Soils to Mitigate Harmful Algal Blooms. Florida Agricultural and Mechanical University.
- Bonnanfant, M., Marec, H., Jesus, B., Mouget, J.-L., & Pruvost, J. (2021). Investigation of the photosynthetic response of *Chlorella vulgaris* to light changes in a torus-shape photobioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(23), 8689-8701. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11636-w>
- Caldwell, B. A. (2005). Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia*, 49(6), 637-644. <https://doi.org/10.1016/J.PEDOB.2005.06.003>
- Carvalho, A. P., Silva, S. O., Baptista, J. M., & Malcata, F. X. (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied microbiology and biotechnology*, 89(5), 1275-1288.
- Chakraborty, S., Verma, E., & Singh, S. S. (2019). Cyanobacterial siderophores: ecological and biotechnological significance. *Içinde Cyanobacteria (ss. 383-397)*. Elsevier.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., Solé-Benet, A., & Domingo, F. (2012). Crust Composition and Disturbance Drive Infiltration Through Biological Soil Crusts in Semiarid Ecosystems. *Ecosystems*, 15(1), 148-161. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9499-6>
- Champenois, J., Marfaing, H., & Pierre, R. (2015). Review of the taxonomic revision of *Chlorella* and consequences for its food uses in Europe. *Journal of Applied Phycology*, 27(5), 1845-1851. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0431-2>
- Chandel, S. T. (2009). Nematicidal activity of the *Cyanobacterium*, *Aulosira fertilissima* on the hatch of *Meloidogyne triticroyzae* and *Meloidogyne incognita*. *Archives Of Phytopathology And Plant Protection*, 42(1), 32-38.

- Chaudhary, V., Prasanna, R., Nain, L., Dubey, S. C., Gupta, V., Singh, R., Jaggi, S., & Bhatnagar, A. K. (2012). Bioefficacy of novel cyanobacteria-amended formulations in suppressing damping off disease in tomato seedlings. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(12), 3301-3310.
- Chen, C. Y., & Durbin, E. (1994). Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 109, 83-94. <https://doi.org/10.3354/meps109083>
- Chiaiese, P., Corrado, G., Colla, G., Kyriacou, M. C., & Roupael, Y. (2018). Renewable sources of plant biostimulation: microalgae as a sustainable means to improve crop performance. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1782.
- Chinnasamy, S., Ramakrishnan, B., Bhatnagar, A., & Das, K. C. (2009). Biomass Production Potential of a Wastewater Alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under Elevated Levels of CO<sub>2</sub> and Temperature. *İçinde International Journal of Molecular Sciences* (C. 10, Sayı 2, ss. 518-532). <https://doi.org/10.3390/ijms10020518>
- Colica, G., Li, H., Rossi, F., Li, D., Liu, Y., & de Philippis, R. (2014). Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 62-70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.017>
- Coppens, J., Grunert, O., van den Hende, S., Vanhoutte, I., Boon, N., Haesaert, G., & de Gelder, L. (2016). The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *Journal of applied phycology*, 28(4), 2367-2377.
- Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change*, 19(2), 292-305.
- Costa, J. A. V., & de Moraes, M. G. (2014). Chapter 1 - An Open Pond System for Microalgal Cultivation (A. Pandey, D.-J. Lee, Y. Chisti, & C. R. B. T.-B. from A. Soccol, Ed.; ss. 1-22). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59558-4.00001-2>
- Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Cruz, C. G., Silveira, J., & Moraes, M. G. (2019). Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 54(5), 366-375. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1571366>
- Cuaresma, M., Janssen, M., Vílchez, C., & Wijffels, R. H. (2009). Productivity of *Chlorella sorokiniana* in a short light-path (SLP) panel photobioreactor under high irradiance. *Biotechnology and bioengineering*, 104(2), 352-359.
- Cysewski, G. R., & Lorenz, R. T. (2004). Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products-species of high potential. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*, 281.
- Dauta, A., Devaux, J., Piquemal, F., & Boumnick, L. (1990). Growth rate of four freshwater algae in relation to light and temperature. *Hydrobiologia*, 207(1), 221-226.
- Deepika, P., & MubarakAli, D. (2020). Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 28, 101701.
- Deprá, M. C., Mérida, L. G. R., de Menezes, C. R., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2019). A new hybrid photobioreactor design for microalgae culture. *Chemical*

- Dias, G. A., Rocha, R. H. C., Araújo, J. L., de Lima, J. F., & Guedes, W. A. (2016). Growth, yield, and postharvest quality in eggplant produced under different foliar fertilizer (*Spirulina platensis*) treatments. *Semina: Ciências Agrárias*, 37(6), 3893-3901.
- Dick, R. P., Breakwell, D. P., & Turco, R. F. (1997). Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. *Methods for assessing soil quality*, 49, 247-271.
- Dineshkumar, R., Kumaravel, R., Gopalsamy, J., Sikder, M. N. A., & Sampathkumar, P. (2018). Microalgae as Bio-fertilizers for Rice Growth and Seed Yield Productivity. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 793-800.
- Dineshkumar, R., Subramanian, J., Gopalsamy, J., Jayasingam, P., Arumugam, A., Kannadasan, S., & Sampathkumar, P. (2019). The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L.). *Waste and Biomass Valorization*, 10(5), 1101-1110. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>
- Dotaniya, M. L., Aparna, K., Dotaniya, C. K., Singh, M., & Regar, K. L. (2019). Role of soil enzymes in sustainable crop production. *Içinde Enzymes in food biotechnology* (ss. 569-589). Elsevier.
- Dunstan, G. A., Volkman, J. K., Barrett, S. M., Leroi, J.-M., & Jeffrey, S. W. (1993). Essential polyunsaturated fatty acids from 14 species of diatom (Bacillariophyceae). *Phytochemistry*, 35(1), 155-161. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)90525-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)90525-9)
- Dyhrman, S. T. (2016). Nutrients and their acquisition: phosphorus physiology in microalgae. *The physiology of microalgae*, 155-183.
- El-Baz, F. K., & Baky, H. H. A. el. (2018). Pilot Scale of Microalgal Production Using Photobioreactor (J. C. G. Cañedo & G. L. L. Lizárraga, Ed.; s. Ch. 5). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78780>
- Elcik, H., & Cakmakci, M. (2017). Microalgae production and biofuel from microalgae. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3).
- Eldridge, D. J., & Green, R. S. B. (1994). Microbiotic Soil Crusts: A Review of their Roles in Soil and Ecological Processes in the Rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 389-415.
- Elser, J. J. (2012). Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? *Current opinion in biotechnology*, 23(6), 833-838.
- Erci, V., Seker, C., Basaran, M., & Erpul, G. (2021). Determining the effectiveness of some soil stabilizers in wind erosion prevention using wind tunnel experiments. *Land Degradation & Development*, 32(10), 2962-2977. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.3937>
- Faheed, F. A., & Fattah, Z. A. (2008). Effect of *Chlorella vulgaris* as bio-fertilizer on growth parameters and metabolic aspects of lettuce plant. *Journal of Agriculture and Social Sciences (Pakistan)*.
- Faried, M., Samer, M., Abdelsalam, E., Yousef, R. S., Attia, Y. A., & Ali, A. S. (2017). Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent

- advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 893-913.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.199>
- Garcia, J., Green, B. F., & Lundquist, T. (t.y.). MujeriegoR., Hernandez-Marine M., Oswald WJ (2006). Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater. *Bioresource Technology*, 97, 1709-1715.
- Garcia-Pichel, F., & Belnap, J. (1996). Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts. *Journal of Phycology*, 32(5), 774-782.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1996.00774.x>
- Ge, S., Madill, M., & Champagne, P. (2018). Use of freshwater macroalgae *Spirogyra* sp. for the treatment of municipal wastewaters and biomass production for biofuel applications. *Biomass and Bioenergy*, 111, 213-223.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.014>
- Gemin, L. G., Mógor, Á. F., Amatussi, J. D. O., & Mógor, G. (2019). Microalgae associated to humic acid as a novel biostimulant improving onion growth and yield. *Scientia Horticulturae*, 256, 108560.
- Ghyoot, C., Gypens, N., Flynn, K. J., & Lancelot, C. (2015). Modelling alkaline phosphatase activity in microalgae under orthophosphate limitation: the case of *Phaeocystis globosa*. *Journal of Plankton Research*, 37(5), 869-885.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, Cm., & Ellert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74(4), 367-385.
- Grzesik, M., & Romanowska-Duda, Z. (2014). Improvements in germination, growth, and metabolic activity of corn seedlings by grain conditioning and root application with cyanobacteria and microalgae. *Pol. J. Environ. Stud*, 23(4), 1147-1153.
- Gualtieri, P. (2014). *Algal Culturing. İçinde Algae* (ss. 237-282). CRC Press.
- Gupta, V., Ratha, S. K., Sood, A., Chaudhary, V., & Prasanna, R. (2013). New insights into the biodiversity and applications of cyanobacteria (blue-green algae)—Prospects and challenges. *Algal research*, 2(2), 79-97.
- Guschina, I. A., & Harwood, J. L. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 45(2), 160-186.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.01.001>
- Günsan Can, B., Yıldız, M., & Şensoy, S. (2022). Mikroalg Kullanımının Ispanakta Bitki Gelişimi Üzerine Etkisi. *Journal*, 12(4), 1884-1895.
- Harden, E. A., Falshaw, R., Carnachan, S. M., Kern, E. R., & Prichard, M. N. (2009). Virucidal activity of polysaccharide extracts from four algal species against herpes simplex virus. *Antiviral Research*, 83(3), 282-289.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2009.06.007>
- Harun, I., Yahya, L., Chik, M. N., Kadir, N. N. A., & Pang, M. A. M. A. (2014). Effects of Natural Light Dilution on Microalgae Growth. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 5(2), 112-116.  
<https://doi.org/10.7763/IJCEA.2014.V5.362>
- Hu, C., Liu, Y., Song, L., & Zhang, D. (2002). Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands. *Journal of Applied Phycology*, 14(4), 281-292.  
<https://doi.org/10.1023/A:1021128530086>

- Innok, S., Chunleuchanon, S., Boonkerd, N., & Teaumroong, N. (2009). Cyanobacterial akinete induction and its application as biofertilizer for rice cultivation. *Journal of Applied Phycology*, 21(6), 737. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9409-x>
- Isleten-Hosoglu, M., Ayyıldız-Tamis, D., Zengin, G., & Elibol, M. (2013). Enhanced growth and lipid accumulation by a new *Ettlia texensis* isolate under optimized photoheterotrophic condition. *Bioresource Technology*, 131, 258-265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.070>
- Isleten-Hosoglu, M., Gultepe, I., & Elibol, M. (2012). Optimization of carbon and nitrogen sources for biomass and lipid production by *Chlorella saccharophila* under heterotrophic conditions and development of Nile red fluorescence based method for quantification of its neutral lipid content. *Biochemical Engineering Journal*, 61, 11-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.12.001>
- Johnson, J. M. F., Strock, J. S., Tallaksen, J. E., & Reese, M. (2016). Corn stover harvest changes soil hydrology and soil aggregation. *Soil and Tillage Research*, 161, 106-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.004>
- Kallenbach, C., & Grandy, A. S. (2011). Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 241-252.
- Kanchan, A., Simranjit, K., Ranjan, K., Prasanna, R., Ramakrishnan, B., Singh, M. C., Hasan, M., & Shivay, Y. S. (2019). Microbial biofilm inoculants benefit growth and yield of chrysanthemum varieties under protected cultivation through enhanced nutrient availability. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 153(2), 306-316. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1478904>
- Karthikeyan, N., Prasanna, R., Sood, A., Jaiswal, P., Nayak, S., & Kaushik, B. D. (2009). Physiological characterization and electron microscopic investigation of cyanobacteria associated with wheat rhizosphere. *Folia Microbiologica*, 54, 43-51.
- Kaushik, B. D. (1998). Use of cyanobacterial biofertilizers in rice cultivation: a technology improvement. *Cyanobacterial biotechnology*, 211-222.
- Kaushik, B. D., & Murti, K. G. (1981). Effect of blue green algae and gypsum application on physicochemical properties of alkali soils. *Phykos*, 20(1 and 2), 91-94.
- Kheirfam, H., Sadeghi, S. H., Zarei Darki, B., & Homaei, M. (2017). Controlling rainfall-induced soil loss from small experimental plots through inoculation of bacteria and cyanobacteria. *CATENA*, 152, 40-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.006>
- Kumar, V. V. (2016). Plant growth-promoting microorganisms: interaction with plants and soil. *Plant, Soil and Microbes: Volume 1: Implications in Crop Science*, 1-16.
- Kwon, K.-H., Paeng, K.-J., Lee, D. K., Lee, I. C., Hong, U. S., & Sig Cha, G. (1994). Neutral carrier-based ion-selective electrode with similar sensitivity to different monovalent cations as a detector in ion chromatography. *Journal of Chromatography A*, 688(1), 350-356. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9673\(94\)00963-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9673(94)00963-5)
- Larsdotter, K. (2006). Wastewater treatment with microalgae-a literature review. *Vatten*, 62, 31-38.
- Leong, W. H., Saman, N. A. M., Kiatkittipong, W., Assabumrungrat, S., Najdanovic-Visak, V., Wang, J., ... & Lim, J. W. (2022). Photoperiod-induced mixotrophic

- metabolism in *Chlorella vulgaris* for high biomass and lipid to biodiesel productions using municipal wastewater medium. *Fuel*, 313, 123052.
- Li, X., Příbyl, P., Bišová, K., Kawano, S., Cepák, V., Zachleder, V., Čížková, M., Brányiková, I., & Vítová, M. (2013). The microalga *Parachlorella kessleri*—A novel highly efficient lipid producer. *Biotechnology and Bioengineering*, 110(1), 97-107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bit.24595>
- Li, Y., Zhou, W., Hu, B., Min, M., Chen, P., & Ruan, R. R. (2012). Effect of light intensity on algal biomass accumulation and biodiesel production for mixotrophic strains *Chlorella kessleri* and *Chlorella protothecoide* cultivated in highly concentrated municipal wastewater. *Biotechnology and bioengineering*, 109(9), 2222-2229.
- Lu, Y., & Xu, J. (2015). Phytohormones in microalgae: a new opportunity for microalgal biotechnology? *Trends in Plant Science*, 20(5), 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.01.006>
- Mager, D. (2008). Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts and their role in dryland surface processes [Thesis (Ph.D.), Manchester Metropolitan University]. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.493099>
- Mager, D. M., & Thomas, A. D. (2011). Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes. *Journal of Arid Environments*, 75(2), 91-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001>
- Mahmoud, S. A. (1999). Promotive effect of the Cyanobacterium *Nostoc muscorum* on the growth of some crop plants. *Acta Microbiologica Polonica (Poland)*.
- Malam Issa, O., Défarge, C., le Bissonnais, Y., Marin, B., Duval, O., Bruand, A., D'Acqui, L. P., Nordenberg, S., & Annerman, M. (2007). Effects of the inoculation of cyanobacteria on the microstructure and the structural stability of a tropical soil. *Plant and Soil*, 290(1), 209-219. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9153-9>
- Malam Issa, O., le Bissonnais, Y., Défarge, C., & Trichet, J. (2001). Role of a cyanobacterial cover on structural stability of sandy soils in the Sahelian part of western Niger. *Geoderma*, 101(3), 15-30. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00093-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00093-8)
- Malam Issa, O., Trichet, J., Défarge, C., Couté, A., & Valentin, C. (1999). Morphology and microstructure of microbiotic soil crusts on a tiger bush sequence (Niger, Sahel). *CATENA*, 37(1), 175-196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00052-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00052-1)
- Mandal, B., Vlek, P. L. G., & Mandal, L. N. (1999). Beneficial effects of blue-green algae and *Azolla*, excluding supplying nitrogen, on wetland rice fields: a review. *Biology and Fertility of Soils*, 28(4), 329-342.
- Manjunath, M., Kanchan, A., Ranjan, K., Venkatachalam, S., Prasanna, R., Ramakrishnan, B., Hossain, F., Nain, L., Shivay, Y. S., & Rai, A. B. (2016). Beneficial cyanobacteria and eubacteria synergistically enhance bioavailability of soil nutrients and yield of okra. *Heliyon*, 2(2), e00066.
- Maqubela, M. P., Muchaonyerwa, P., & Mnkeni, P. N. S. (2012). Inoculation effects of two South African cyanobacteria strains on aggregate stability of a silt loam soil. *African Journal of Biotechnology*, 11(47), 10726-10735. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2111>

- Markou, G., Vandamme, D., & Muylaert, K. (2014). Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. *Water research*, 65, 186-202.
- Maroneze, M. M., Siqueira, S. F., Vendruscolo, R. G., Wagner, R., de Menezes, C. R., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2016). The role of photoperiods on photobioreactors—A potential strategy to reduce costs. *Bioresource technology*, 219, 493-499.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, Nidia. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Metsoviti, M. N., Papapolymerou, G., Karapanagiotidis, I. T., & Katsoulas, N. (2020). Effect of Light Intensity and Quality on Growth Rate and Composition of *Chlorella vulgaris*. *Içinde Plants* (C. 9, Sayı 1). <https://doi.org/10.3390/plants9010031>
- Metting, B. (1987). Dynamics of wet and dry aggregate stability from a three-year microalgal soil conditioning experiment in the field. *Soil Science*, 143(2). [https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1987/02000/DYNAMICS\\_OF\\_WET\\_AND\\_DRY\\_AGGREGATE\\_STABILITY\\_FROM\\_A.9.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1987/02000/DYNAMICS_OF_WET_AND_DRY_AGGREGATE_STABILITY_FROM_A.9.aspx)
- Metting, B., & Rayburn, W. R. (1983). The Influence of a Microalgal Conditioner on Selected Washington Soils: An Empirical Study. *Soil Science Society of America Journal*, 47(4), 682-685. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040015x>
- Michalak, I., Chojnacka, K., Dmytryk, A., Wilk, R., Gramza, M., & Rój, E. (2016). Evaluation of supercritical extracts of algae as biostimulants of plant growth in field trials. *Frontiers in plant science*, 7, 1591.
- Moheimani, N. R. (2013). Inorganic carbon and pH effect on growth and lipid productivity of *Tetraselmis suecica* and *Chlorella sp* (*Chlorophyta*) grown outdoors in bag photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 387-398. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9873-6>
- Morales, V. L., Parlange, J.-Y., & Steenhuis, T. S. (2010). Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. *Journal of Hydrology*, 393(1), 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.048>
- Nagy, P. T., & Pintér, T. (2015). Effects of Foliar Biofertilizer Sprays on Nutrient Uptake, Yield, and Quality Parameters of Blaufrankish (*Vitis vinifera* L.) Grapes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(sup1), 219-227. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.989016>
- Nimmo, J. R. (2004). Aggregation: physical aspects. *Içinde D. Hillel & J. L. Hatfield (Ed.), Aggregation: physical aspects. Academic Press.*
- Nisha, R., Kaushik, A., & Kaushik, C. P. (2007). Effect of indigenous cyanobacterial application on structural stability and productivity of an organically poor semi-arid soil. *Geoderma*, 138(1-2), 49-56.
- Nisha, R., Kiran, B., Kaushik, A., & Kaushik, C. P. (2018). Bioremediation of salt affected soils using cyanobacteria in terms of physical structure, nutrient status and microbial activity. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(3), 571-580. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1419-7>

- Osman, M. E. H., El-Sheekh, M. M., El-Naggar, A. H., & Gheda, S. F. (2010). Effect of two species of cyanobacteria as biofertilizers on some metabolic activities, growth, and yield of pea plant. *Biology and fertility of soils*, 46, 861-875.
- Ozer, T., & Isildak, I. (2019). A New Fe (III)-Selective Membrane Electrode Based on Fe (II) Phthalocyanine. *J. Electrochem. Sci. Technol*, 10(3), 321-328. <https://doi.org/10.33961/jecst.2019.00038>
- Özçimen, D., Gülyurt, M. Ö., & İnan, B. (2012). Algal Biorefinery for Biodiesel Production (Z. Fang, Ed.; s. Ch. 2). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/52679>
- Papapolymerou, G., Karayannis, V., Besios, A., Riga, A., Gougoulas, N., & Spiliotis, X. (2019). Scaling-up sustainable *Chlorella vulgaris* microalgal biomass cultivation from laboratory to pilot-plant photobioreactor, towards biofuel. *Glob. Nest J*, 21, 37-42.
- Prasanna, R., Bidyarani, N., Babu, S., Hossain, F., Shivay, Y. S., & Nain, L. (2015). Cyanobacterial inoculation elicits plant defense response and enhanced Zn mobilization in maize hybrids. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 998507.
- Prasanna, R., Chaudhary, V., Gupta, V., Babu, S., Kumar, A., Singh, R., Shivay, Y. S., & Nain, L. (2013). Cyanobacteria mediated plant growth promotion and bioprotection against Fusarium wilt in tomato. *European Journal of Plant Pathology*, 136, 337-353.
- Prasanna, R., Ramakrishnan, B., Simranjit, K., Ranjan, K., Kanchan, A., Hossain, F., & Nain, L. (2017). Cyanobacterial and rhizobial inoculation modulates the plant physiological attributes and nodule microbial communities of chickpea. *Archives of Microbiology*, 199(9), 1311-1323. <https://doi.org/10.1007/s00203-017-1405-y>
- Prasanna, R., Sood, A., Ratha, S. K., & K. Singh, P. (2014). Cyanobacteria as a “green” option for sustainable agriculture. *Çinde Cyanobacteria* (ss. 145-166). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118402238.ch9>
- Preisig, H., & Andersen, R. (2005). Historical Review of Algal Culturing Techniques (ss. 1-12). <https://doi.org/10.1016/B978-012088426-1/50002-0>
- Rachidi, F., Benhima, R., Sbabou, L., & el Arroussi, H. (2020). Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution. *Biotechnology reports*, 25, e00426.
- Rana, A., Kabi, S. R., Verma, S., Adak, A., Pal, M., Shivay, Y. S., Prasanna, R., & Nain, L. (2015). Prospecting plant growth promoting bacteria and cyanobacteria as options for enrichment of macro- and micronutrients in grains in rice–wheat cropping sequence. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 1037379. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1037379>
- Rani, S., & Ojha, C. S. P. (2021). *Chlorella sorokiniana* for integrated wastewater treatment, biomass accumulation and value-added product estimation under varying photoperiod regimes: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101889.
- Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P., & Bux, F. (2018). Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255-1273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.004>
- Ribeiro, D. M., Zanetti, G. T., Maria, H. M. J., Tathiana, E. M., Jane, M. L. N. G., & Gustavo, G. F. (2019). Effect of different culture media on growth of *Chlorella*

- sorokiniana* and the influence of microalgal effluents on the germination of lettuce seeds. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 7(1), 6-10. <https://doi.org/10.7324/JABB.2019.70102>
- Richmon, A. (1986). *Cell Response to Environmental Factors*. İçinde A. Richmon (Ed.), *Handbook of Microalgal Mass Culture* (1st bs). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203712405>
- Rivera-Solís, R. A., Peraza-Echeverría, S., Echevarría-Machado, I., & Herrera-Valencia, V. A. (2014). *Chlamydomonas reinhardtii* has a small family of purple acid phosphatase homologue genes that are differentially expressed in response to phytate. *Annals of Microbiology*, 64, 551-559.
- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., & Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy*, 9(4), 192.
- Rossi, F., Li, H., Liu, Y., & de Philippis, R. (2017). Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. *Earth-Science Reviews*, 171, 28-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.006>
- Rossi, F., Mugnai, G., & de Philippis, R. (2018). Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant and Soil*, 429(1), 19-34. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3441-4>
- Sadeghi, S. H., Kheirfam, H., & Zarei Darki, B. (2020). Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. *Journal of Hydrology*, 585, 124814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124814>
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.-Y., & Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265-278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>
- Schreiber, C., Schiedung, H., Harrison, L., Briese, C., Ackermann, B., Kant, J., Schrey, S. D., Hofmann, D., Singh, D., Ebenhöf, O., Amelung, W., Schurr, U., Mettler-Altmann, T., Huber, G., Jablonowski, N. D., & Nedbal, L. (2018). Evaluating potential of green alga *Chlorella vulgaris* to accumulate phosphorus and to fertilize nutrient-poor soil substrates for crop plants. *Journal of applied phycology*, 30(5), 2827-2836. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1390-9>
- Seyfabadi, J., Ramezanpour, Z., & Amini Khoeyi, Z. (2011). Protein, fatty acid, and pigment content of *Chlorella vulgaris* under different light regimes. *Journal of Applied Phycology*, 23(4), 721-726. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9569-8>
- Shaaban, M. M. (2001). Nutritional Status and Growth of Maize Plants as Affected by Green Microalgae as Soil Additives. *Journal of Biological Sciences*, 1(6), 475-479. <https://doi.org/10.3923/jbs.2001.475.479>
- Sharma, N. K., Tiwari, S. P., Tripathi, K., & Rai, A. K. (2011). Sustainability and cyanobacteria (blue-green algae): facts and challenges. *Journal of Applied Phycology*, 23(6), 1059-1081.

- Sharma, R., Singh, G. P., & Sharma, V. K. (2012). Effects of Culture Conditions on Growth and Biochemical Profile of *Chlorella Vulgaris*. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 03(05). <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000131>
- Shen, Y., Yuan, W., Pei, Z. J., Wu, Q., & Mao, E. (2009). Microalgae mass production methods. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1275-1287.
- Singh, D. P., Prabha, R., Yandigeri, M. S., & Arora, D. K. (2011). *Cyanobacteria*-mediated phenylpropanoids and phytohormones in rice (*Oryza sativa*) enhance plant growth and stress tolerance. *Antonie van Leeuwenhoek*, 100(4), 557-568. <https://doi.org/10.1007/s10482-011-9611-0>
- Singh, R. N., & Sharma, S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2347-2353.
- Singh, S. P., & Singh, P. (2015). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 431-444.
- Sirisuk, P., Ra, C. H., Jeong, G. T., & Kim, S. K. (2018). Effects of wavelength mixing ratio and photoperiod on microalgal biomass and lipid production in a two-phase culture system using LED illumination. *Bioresource technology*, 253, 175-181.
- Sood, A., Singh, P. K., Kumar, A., Singh, R., & Prasanna, R. (2011). Growth and biochemical characterization of associations between cyanobionts and wheat seedlings in co-culturing experiments. *Biologia*, 66, 104-110.
- Srivastava, S., Srivastava, S., Bist, V., Awasthi, S., Chauhan, R., Chaudhry, V., Singh, P. C., Dwivedi, S., Niranjana, A., & Agrawal, L. (2018). *Chlorella vulgaris* and *Pseudomonas putida* interaction modulates phosphate trafficking for reduced arsenic uptake in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of hazardous materials*, 351, 177-187.
- Stark, M., & O’Gara, I. (2012). An Introduction to Photosynthetic Microalgae. *Disruptive Science and Technology*, 1(2), 65-67. <https://doi.org/10.1089/dst.2012.0017>
- Stirk, W. A., & van Staden, J. (2020). Potential of phytohormones as a strategy to improve microalgae productivity for biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, 44, 107612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107612>
- Sukatar, A. (2002). *Alg Kùltür Yöntemleri*. Ege Üniversitesi Basımevi.
- Sutton, S. D., Barrett, G. W., & Taylor, D. H. (1991). Microbial metabolic activities in soils of old-field communities following eleven years of nutrient enrichment. *Environmental Pollution*, 73(1), 1-10. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491\(91\)90092-B](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491(91)90092-B)
- Svircev, Z., Tamas, I., Nenin, P., & Drobac, A. (1997). Co-cultivation of N<sub>2</sub>-fixing cyanobacteria and some agriculturally important plants in liquid and sand cultures. *Applied Soil Ecology*, 6(3), 301-308.
- Tan, J. sen, Lee, S. Y., Chew, K. W., Lam, M. K., Lim, J. W., Ho, S.-H., & Show, P. L. (2020). A review on microalgae cultivation and harvesting, and their biomass extraction processing using ionic liquids. *Bioengineered*, 11(1), 116-129. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1711626>
- Tautges, N. E., Sullivan, T. S., Reardon, C. L., & Burke, I. C. (2016). Soil microbial diversity and activity linked to crop yield and quality in a dryland organic wheat production system. *Applied Soil Ecology*, 108, 258-268.

- Thuy Lan Chi, N., Mathimani, T., Manigandan, S., Shanmugam, S., Thi Ha, N., Cam Nhung, T., Ali Alharbi, S., Chinnathambi, A., Brindhadevi, K., Chanasut, U., & Whangchai, K. (2022). Small scale photobioreactor, outdoor open pond cultivation of *Chlorella* sp. and harvesting at log and stationary growth phase towards lipids and methyl ester production. *Fuel*, 319, 123813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123813>
- Tomaselli, L. (2004). The microalgal cell. *İçinde Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology* (C. 1). CRC Press.
- Uysal, O., Uysal, F. O., & Ekinici, K. (2015). Evaluation of microalgae as microbial fertilizer. *European Journal of Sustainable Development*, 4(2), 77.
- Vaishampayan, A., Sinha, R. P., Hader, D.-P., Dey, T., Gupta, A. K., Bhan, U., & Rao, A. L. (2001). Cyanobacterial biofertilizers in rice agriculture. *The Botanical Review*, 67, 453-516.
- Xu, Y., Ibrahim, I. M., & Harvey, P. J. (2016). The influence of photoperiod and light intensity on the growth and photosynthesis of *Dunaliella salina* (chlorophyta) CCAP 19/30. *Plant Physiology and Biochemistry*, 106, 305-315.
- Wahidin, S., Idris, A., & Shaleh, S. R. M. (2013). The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp. *Bioresource technology*, 129, 7-11.
- Wang, R., Peng, B., & Huang, K. (2015). The research progress of CO<sub>2</sub> sequestration by algal bio-fertilizer in China. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 11, 67-70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.01.007>
- Whitton, B. A., Grainger, S. L. J., Hawley, G. R. W., & Simon, J. W. (1991). Cell-bound and extracellular phosphatase activities of cyanobacterial isolates. *Microbial Ecology*, 21, 85-98.
- Widjaja, A., Chien, C. C., & Ju, Y. H. (2009). Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40(1), 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.07.007>
- Yamamoto, M., Fujishita, M., Hirata, A., & Kawano, S. (2004). Regeneration and maturation of daughter cell walls in the autospore-forming green alga *Chlorella vulgaris* (*Chlorophyta*, *Trebouxiophyceae*). *Journal of Plant Research*, 117(4), 257-264. <https://doi.org/10.1007/s10265-004-0154-6>
- Yan, N., Fan, C., Chen, Y., & Hu, Z. (2016). The Potential for Microalgae as Bioreactors to Produce Pharmaceuticals. *İçinde International Journal of Molecular Sciences* (C. 17, Sayı 6). <https://doi.org/10.3390/ijms17060962>
- Yeh, K., Chang, J., & chen, W. (2010). Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31. *Engineering in Life Sciences*, 10(3), 201-208.
- Yilmaz, E., & Sönmez, M. (2017). The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales. *Soil and Tillage Research*, 168, 118-124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.003>
- Zhang, H., Gong, W., Bai, L., Chen, R., Zeng, W., Yan, Z., Li, G., & Liang, H. (2020). Aeration-induced CO<sub>2</sub> stripping, instead of high dissolved oxygen, have a negative impact on algae-bacteria symbiosis (ABS) system stability and wastewater treatment

efficiency. Chemical Engineering Journal, 382, 122957.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122957>

Zhongqiang, L., Yu, D., & Manghui, T. (2005). Seed germination of three species of *Vallisneria* (Hydrocharitaceae), and the effects of freshwater microalgae. *Hydrobiologia*, 544(1), 11-18. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-7895-z>

Zhu, J., & Wakisaka, M. (2020). Finding of phytase: Understanding growth promotion mechanism of phytic acid to freshwater microalga *Euglena gracilis*. *Bioresource technology*, 296, 122343.

Zhuo, Y., Sheng, M., Liang, X., & Cao, G. (2017). Treatment of high salinity wastewater using CWPO process for reuse. 20(2). <https://doi.org/doi:10.1515/jaots-2017-0024>.



## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### Konferans Bildirileri

1. Erci, V., & Özçimen, D. (2017). Measuring Nitrate Consumption by *C. vulgaris* Using  $\text{NO}_3^-$  İonselective Electrode (ISE). Presented at The The First International Congress on Advances in BioScience and Biotechnology (ICABB), Bosnia and Herzegovina.

