

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TATLI SU ALGLERİNİN İNCE TABAKA KURUMA  
KARAKTERİSTİĞİ VE MODEL EŞİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

**Ebru CÖMERT**

Yüksek Lisans Tezi

BIYOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2021

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
Biyomühendislik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**TATLI SU ALGLERİNİN İNCE TABAKA KURUMA**  
**KARAKTERİSTİĞİ VE MODEL EŞİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

Tez Yazarı  
**Ebru CÖMERT**

Danışman  
Doç. Dr. Mehmet KALENDER

TEMMUZ 2021  
ELAZIĞ

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Biyomühendislik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

|                    |                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Başlığı:           | Tatlı Su Alglerinin İnce Tabaka Kuruma Karakteristiği ve Model Eşitliğinin Belirlenmesi |
| Yazarı:            | Ebru CÖMERT                                                                             |
| İlk Teslim Tarihi: | 29.06.2021                                                                              |
| Savunma Tarihi:    | 29.07.2021                                                                              |

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

|           |                                                                                |                          |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Danışman: | Doç. Dr. Mehmet KALENDER<br>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi          | <i>İmza</i><br>Onayladım |
| Başkan:   | Prof. Dr. Hamdi Soner ALTUNDOĞAN<br>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  | Onayladım                |
| Üye:      | Prof. Dr. Ayşegül Ülkü METİN<br>Kırıkkale Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi | Onayladım                |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*  
Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Tatlı Su Alglerinin İnce Tabaka Kuruma Karakteristiğı ve Model Eşitliğinin Belirlenmesi ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteğı olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

29.07.2021

**Ebru CÖMERT**



# ÖNSÖZ

Algler fotosentez yapabilen primer canlılar olduğu ve içerdikleri bileşenler sayesinde geniş bir enerji potansiyeline sahip çok yönlü bir hammadde olmasından dolayı kullanım alanı geniştir. Kurutma işlemi katılardan, sıvılardan ve gazlardan ısıtıl işlem ile su veya diğer sıvıların uzaklaştırılmasıdır. Bu çalışmada, tatlı su alglerinin ince tabakalı kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işleminden elde edilen veriler ile kuruma karakteristiği ve uygun model eşitlikleri belirlenmiştir. Kurutulan alg örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal analizleri elde edilmiştir.

Çalışmalarım boyunca geçen süre içerisinde, değerli bilgilerinden yararlandığım ve çalışmalarım sırasında karşılaştığım tüm sorunlarımın çözümünde içten ilgi ve büyük yardımlarını gördüğüm, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet KALENDER'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım boyunca bana manevi desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Aykut Topdemir'e ve Arş. Gör. Abayhan BURAN'a teşekkür ederim. Çalışmamdaki tür analizini yapmak için yardımlarından dolayı Prof. Dr. Ahmet Kadri ÇETİN'e teşekkür ederim. Protein analizini gerçekleştirmek için destek olan Tarım Kredi Yem Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Engin BUĞDAYCI'ya teşekkür ederim.

Bu zorlu tez sürecinde ve tüm eğitim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu süreçte yanımda olan Kübra PAŞAOĞLU ve Gözde BAYDOĞAN'a ayrıca teşekkür ederim.

**Ebru CÖMERT**  
ELAZIĞ, 2021

# İÇİNDEKİLER

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ .....                                               | iv        |
| ÖZET .....                                                | vii       |
| ABSTRACT .....                                            | viii      |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                    | ix        |
| TABLolar LİSTESİ .....                                    | xi        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                             | xii       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>2. ALGLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....</b>            | <b>3</b>  |
| 2.1. Alglerin Morfolojik ve Sitolojik Özellikleri .....   | 4         |
| 2.1.1. Hücre Çeperi.....                                  | 5         |
| 2.1.2. Sitoplazma .....                                   | 5         |
| 2.1.3. Çekirdek .....                                     | 5         |
| 2.1.4. Hareket Organelleri .....                          | 5         |
| 2.1.5. Plastidler .....                                   | 6         |
| 2.1.6. Pirenoid.....                                      | 6         |
| 2.1.7. Vakuol .....                                       | 6         |
| 2.2. Alglerin Sınıflandırılması .....                     | 7         |
| 2.2.1. Kahverengi Algler (Phaeophyta) .....               | 8         |
| 2.2.2. Kırmızı Algler (Rhodophyta) .....                  | 8         |
| 2.2.3. Yeşil Algler (Chlorophyta) .....                   | 9         |
| 2.2.4. Diyatomeleler (Chrysophyta) .....                  | 10        |
| 2.2.5. Kamçılı Algler (Euglenophyta) .....                | 10        |
| 2.2.6. Mavi-Yeşil Algler (Cyanophyta) .....               | 11        |
| 2.3. Alg Üretiminde Etkili Olan Faktörler .....           | 12        |
| 2.3.1. Sıcaklık .....                                     | 13        |
| 2.3.2. Işık .....                                         | 14        |
| 2.3.3. pH .....                                           | 14        |
| 2.3.4. Karıştırma .....                                   | 15        |
| 2.3.5. Besin .....                                        | 15        |
| 2.3.6. Tuzluluk.....                                      | 16        |
| 2.4. Alg Üretim Sistemleri .....                          | 16        |
| 2.4.1. Açık Havuzlar.....                                 | 17        |
| 2.4.2. Kapalı sistemler (Fotobiyoreaktörler).....         | 18        |
| 2.5. Alglerin Kullanım Alanları .....                     | 20        |
| 2.5.1. Alglerin Tıp ve Eczacılık Alanında Kullanımı ..... | 20        |
| 2.5.2. Alglerin Gıda Alanında Kullanımı .....             | 21        |
| 2.5.3. Alglerin Tarım Alanında Kullanımı .....            | 22        |
| 2.5.4. Alglerin Sanayi Alanında Kullanımı .....           | 22        |
| 2.5.5. Alglerin Biyoyakıt Alanında Kullanımı .....        | 23        |
| <b>3. KURUTMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....</b>           | <b>27</b> |
| 3.1. Kurutucu Tipleri.....                                | 29        |
| 3.1.1. Döner Kurutucular .....                            | 30        |
| 3.1.2. Vakumlu Döner Kurutucular .....                    | 31        |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3. Akışkan Yataklı Kurutucular .....                                 | 32        |
| 3.1.4. Püskürtmeli (Sprey) Kurutucular .....                             | 32        |
| 3.1.5. Tünel Kurutucular .....                                           | 33        |
| 3.1.6. Tepsili Kurutucular .....                                         | 34        |
| 3.1.7. Dielektrik Kurutucular .....                                      | 35        |
| 3.1.8. Mikrodalga Kurutucular .....                                      | 36        |
| 3.1.9. Kızgın Buhar Ortamında Kurutma .....                              | 36        |
| 3.2. Kurutmanın Genel Prensipleri .....                                  | 37        |
| 3.2.1. Nemlilik .....                                                    | 37        |
| 3.2.2. Sıvı-Gaz Dengesi .....                                            | 39        |
| 3.3. Kuruma Hızları ve Su Transfer Mekanizması .....                     | 40        |
| 3.3.1. Kurutma Hızları .....                                             | 41        |
| 3.3.2. Sabit Hız Periyodu .....                                          | 42        |
| 3.3.3. Azalan Hız Periyodu .....                                         | 43        |
| 3.4. Kurutma Teorileri .....                                             | 44        |
| 3.4.1. Difüzyon Teorisi .....                                            | 45        |
| 3.4.2. Kapiler Teori .....                                               | 46        |
| <b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>                                        | <b>47</b> |
| 4.1. Alg Temini ve Hazırlanışı .....                                     | 47        |
| 4.2. Tepsili Kurutucu Deneyleri .....                                    | 47        |
| 4.3. Alg Örneklerinin Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi ..... | 48        |
| 4.4. Karakterizasyon Testleri .....                                      | 48        |
| 4.4.1. Protein Analizi .....                                             | 48        |
| 4.4.2. Yağ analizi .....                                                 | 49        |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                     | <b>50</b> |
| 5.1. Alg Örneklerinin Kuruma Eğrileri .....                              | 50        |
| 5.2. Alg Örneklerinin Kuruma Hızı Eğrileri .....                         | 55        |
| 5.3. Alg Örneklerinin Kuruma Olayının Modellenmesi .....                 | 60        |
| 5.4. Tatlı Su Alglerinin Karakterizasyon Sonuçları .....                 | 69        |
| 5.4.1. FTIR Sonuçları .....                                              | 69        |
| 5.4.2. SEM Sonuçları .....                                               | 71        |
| 5.4.3. Protein Analizi Sonuçları .....                                   | 75        |
| 5.4.4. Yağ Analizi Sonuçları .....                                       | 75        |
| <b>6. SONUÇLAR .....</b>                                                 | <b>76</b> |
| KAYNAKLAR .....                                                          | 78        |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                 |           |

## ÖZET

### Tatlı Su Alglerinin İnce Tabaka Kuruma Karakteristiği ve Model Eşitliğinin Belirlenmesi

**Ebru CÖMERT**

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomühendislik Anabilim Dalı

Temmuz 2021, Sayfa: xii + 84

Bu çalışmada, Elazığ Yedigöze yöresine ait doğal ve yapay havuz sularında yetişen tatlı su alg örneklerinin ince tabaka kuruma karakteristiği incelenmiştir. Kurutma deneyleri havanın kullanıldığı laboratuvar tipi bir tepsili kurutucuda gerçekleştirilmiştir. Alg örnekleri, kurutma deneylerinde kullanılmak üzere +4 °C'deki buzdolabında muhafaza edilmiştir. DeneySEL çalışmalar 0,5-1,5 m/s hava akış hızı, 40-60 °C sıcaklık aralıklarında ve atmosferik şartlarda yürütülmüştür. Tipik bir kurutma deneyi, sıcaklık ve hava akış hızı ayarlanmış kurutucu haznesine yerleştirilen belirli bir miktar tatlı su alg örneğinin, belirli zaman aralıklarında ağırlık ölçülmesi şeklinde yapılmıştır. Tatlı su alg örneklerinin ölçülen son iki ağırlık değerleri yaklaşık aynı olunca deneyler sonlandırılmıştır.

Alg örneklerine ait kuruma eğrileri ve kuruma hızı eğrileri elde edilmiştir. Süre ilerledikçe tatlı su alg örneklerinin nem içeriği değerlerinin çalışılan tüm sıcaklık değerlerinde azaldığı ve Alg-1 örneğinin kuruma süresinin, Alg-2 örneğinin kuruma süresine göre daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Alg-1 örneğine ait kuruma hızı eğrileri incelendiğinde, 40-50 °C ve tüm hava akış hızlarında genel olarak azalan hız periyodu görülürken azda olsa sabit hız periyodu da görülmüştür. 60 °C sıcaklığına ve tüm hava akış hızlarına ait kuruma hızı eğrilerinde ise azalan hız periyodu gözlemlenmektedir. Alg-2 örneğinin elde edilen kuruma hızı eğrilerinde 60 °C 1 ve 1,5 m/s hava akış hızı deneyleri hariç diğer tüm kurutma şartlarında sabit hız periyodu ile karşılaşmıştır. Alg örneklerinin kuruma hızı periyotları için ulaşılan bu sonucun, çalışılan iki alg türünün katı yapısındaki farklılıktan ileri geldiği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, kurutma deneylerinden elde edilen nem oranı verilerinin çeşitli kuruma model eşitlikleri ile iki aşamalı olarak istatistiksel karşılaştırılması da yapılmıştır. Birinci aşama istatistiksel analiz sonuçlarından, incelenen alg türleri için kuruma olayını en iyi Difüzyon modelinin temsil ettiği saptanmıştır. İstatistiksel analizin ikinci aşamasında Difüzyon modelindeki sabitlerin farklı eşitliklerle tanımlanmasıyla oluşturulan türetilmiş model eşitlikleri ile kıyaslama yapılmıştır. İkinci aşama istatistiksel sonuçlarından Alg-1 örneği için 6 nolu; Alg-2 örneği için ise 5 nolu türetilmiş model ile uyumun olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmanın son aşamasında kurutulan tatlı su alg örneklerinin karakterizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Tür analizi, protein, yağ, SEM, FTIR gibi analizler sonucunda genel olarak literatürdeki alg örneklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tatlı su algi, Kurutma, Tepsili kurutucu, Modelleme

## ABSTRACT

---

### Thin Layer Drying Characteristics of Freshwater Algae and Determination of Model Equality

**Ebru CÖMERT**

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Bioengineering

July 2021, Pages: xii + 84

---

In this study, thin layer drying characteristics of freshwater algae growing in natural and artificial pools were investigated by using a laboratory type tray dryer set up. Alga samples harvested were kept in a refrigerator at the temperature of +4 °C. The drying experiments were conducted in the air flow rates between 0.5 and 1.5 m/s, at the temperature ranges of 40-60 °C, and at the atmospheric conditions. A typical drying experiment was carried out by placing a certain weight of algae sample in the dryer chamber at a known air flow rate and temperature and by making weight measurements at certain times. The experiments were ended when the last two weight values of freshwater alga samples were approximately the same.

The drying and drying rate curves of alga samples were obtained. As the time progressed, the moisture content values of freshwater algae samples decreased at all temperature values studied. It was observed that the drying time of Alga-1 sample was lower than that of Algae-2 sample. When the drying rate curves of the Algae-1 sample are examined, a generally falling rate period is observed for all air flow rates and at 40-50 °C, while a constant rate period is also occurred. However, the drying period of Algae-1 sample was falling rate period at the temperature of 60 °C (for all air flow rate). In the drying rate curves of the Algae-2 sample, a constant velocity period was encountered in all drying conditions except for the 60 °C 1 and 1.5 m/s air flow rate experiments. It was thought that the reason for obtaining different drying rate periods was due to the difference in the solid structure of the two algae species studied.

In this study, the moisture ratio values obtained from drying experiments were also fitted to the drying model equations as two stages. The first stage statistical analysis results showed that the best model equation of algae species studied was Diffusion equation. In the second stage, the derived model equations obtained by rearranging the constants of Diffusion equation by using some definitions. So, statistical analyses were done by these equations. As a result, the best equations were the equation numbered as 6 for Algae-1 and the equation numbered as 5 for Algae-2, respectively.

Finally, the characterization analyses of algae species dried in this study were carried out. The properties such as species analysis, oil content, SEM, FTIR were similar to that of previous studies in the literature.

**Keywords:** Freshwater algae, Drying, Tray dryer, Modelling

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                      | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Prokaryotik alg örneği .....                                                              | 7     |
| Şekil 2.2. Ökaryotik alg örneği .....                                                                | 7     |
| Şekil 2.3. Kahverengi alg örneği: <i>Fucus spp</i> .....                                             | 8     |
| Şekil 2.4. Kırmızı alg örneği: <i>Gelidium spp.</i> .....                                            | 9     |
| Şekil 2.5. Yeşil alg örneği: <i>Scenedesmus spp</i> .....                                            | 10    |
| Şekil 2.6. Diatom örneği: <i>Navicula spp.</i> .....                                                 | 11    |
| Şekil 2.7. Kamçılı alg örneği: <i>Ceratium tripos</i> .....                                          | 11    |
| Şekil 2.8. Mavi-yeşil alg örneği: <i>Chroococcales</i> .....                                         | 12    |
| Şekil 2.9. Tipik alg üretim sistemleri .....                                                         | 17    |
| Şekil 2.10. Geniş alg üretim havuzları .....                                                         | 18    |
| Şekil 2.11. Fotobiyoreaktör örneği .....                                                             | 19    |
| Şekil 2.12. Algal biyokütleden biyoyakıt üretimi için dönüşüm prosesleri .....                       | 24    |
| Şekil 3.1. Katı maddenin kurutulma sürecinde oluşan ısı ve kütle transferi .....                     | 28    |
| Şekil 3.2. Tek silindirli vakum altında kurutucu örneği.....                                         | 31    |
| Şekil 3.3. Paralel, karşıt ve çapraz akımlı püskürtmeli kurutucuların kurutma hazneleri .....        | 32    |
| Şekil 3.4. Püskürtmeli (sprey) kurutucunun çalışma prensibi.....                                     | 33    |
| Şekil 3.5. Tünel kurutucuların çalışma prensibi.....                                                 | 34    |
| Şekil 3.6. Tepsili kurutucu örneği.....                                                              | 35    |
| Şekil 3.7. Mikrodalga kurutucu.....                                                                  | 36    |
| Şekil 3.8. Akışkan yataklı kızgın buhar ortamında kurutma teknolojisi ve endüstriyel uygulaması..... | 37    |
| Şekil 3.9. 25 °C’de bulunan farklı katılara ait denge nemi eğrileri .....                            | 40    |
| Şekil 3.10. Tipik kuruma hızı eğrileri .....                                                         | 42    |
| Şekil 3.11. Sabit ve azalan hız periyodunda kuruma hızları .....                                     | 44    |
| Şekil 3.12. Gözenekli katı maddelere ait tipik bir kuruma hızı eğrisi.....                           | 46    |
| Şekil 4.1. Tepsili kurutucu deney seti .....                                                         | 47    |
| Şekil 4.2. Tünel tipi kurutucu görüntüsü.....                                                        | 47    |
| Şekil 4.3. Soxhlet deney düzeneği .....                                                              | 49    |
| Şekil 5.1. Alg-1 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri .....            | 50    |
| Şekil 5.2. Alg-1 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri.....             | 51    |
| Şekil 5.3. Alg-1 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri .....            | 51    |
| Şekil 5.4. Alg-2 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri .....            | 52    |

|                    |                                                                                                                                                                                     |    |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.5.</b>  | Alg-2 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri .....                                                                                                      | 52 |
| <b>Şekil 5.6.</b>  | Alg-2 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri .....                                                                                                      | 53 |
| <b>Şekil 5.7.</b>  | Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                         | 54 |
| <b>Şekil 5.8.</b>  | Alg-2 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                         | 55 |
| <b>Şekil 5.9.</b>  | Alg-1 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                                 | 56 |
| <b>Şekil 5.10.</b> | Alg-1 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                                 | 56 |
| <b>Şekil 5.11.</b> | Alg-1 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                                 | 57 |
| <b>Şekil 5.12.</b> | Alg-2 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                                 | 57 |
| <b>Şekil 5.13.</b> | Alg-2 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                                 | 58 |
| <b>Şekil 5.14.</b> | Alg-2 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                                 | 58 |
| <b>Şekil 5.15.</b> | Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                         | 59 |
| <b>Şekil 5.16.</b> | Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri .....                                                                                         | 60 |
| <b>Şekil 5.17.</b> | Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki (a) ve 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki (b) modellerin $\chi^2$ , RMSE ve RSS değerlerinin değişimi ..... | 65 |
| <b>Şekil 5.18.</b> | Alg-2 örneği için 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki (a) ve 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki (b) modellerin $\chi^2$ , RMSE ve RSS değerlerinin değişimi ..... | 66 |
| <b>Şekil 5.19.</b> | Alg-1 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri için istatistiksel parametrelerin değişimi .....                                                                                    | 68 |
| <b>Şekil 5.20.</b> | Alg-2 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri için istatistiksel parametrelerin değişimi .....                                                                                    | 69 |
| <b>Şekil 5.21.</b> | Alg-1 örneği için farklı sıcaklıklarda ve 1,5 m/s hava akış hızındaki FTIR spektrumları .....                                                                                       | 70 |
| <b>Şekil 5.22.</b> | Alg-2 örneği için farklı sıcaklıklarda ve 1,5 m/s hava akış hızındaki FTIR spektrumları .....                                                                                       | 70 |
| <b>Şekil 5.23.</b> | Alg-1 örneğinin 40 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 72 |
| <b>Şekil 5.24.</b> | Alg-2 örneğinin 40 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 72 |
| <b>Şekil 5.25.</b> | Alg-1 örneğinin 50 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 73 |
| <b>Şekil 5.26.</b> | Alg-2 örneğinin 50 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 73 |
| <b>Şekil 5.27.</b> | Alg-1 örneğinin 60 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 74 |
| <b>Şekil 5.28.</b> | Alg-2 örneğinin 60 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 74 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                           | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Bazı alg türlerinin içerdığı protein, karbonhidrat ve yağ oranları.....                                                                                                 | 4     |
| <b>Tablo 2.2.</b> Alglerin yetiştirilmesi için gerekli parametreler ve yaklaşık değer aralıkları .....                                                                                    | 13    |
| <b>Tablo 2.3.</b> Farklı alg üretim sistemlerinin karşılaştırılması.....                                                                                                                  | 19    |
| <b>Tablo 2.4.</b> Bazı alg türlerinden elde edilen biyometan verimleri .....                                                                                                              | 26    |
| <b>Tablo 4.1.</b> Tez çalışmasında kullanılan kuruma eğrisi modellenmesi için eşitlikler .....                                                                                            | 48    |
| <b>Tablo 5.1.</b> Alg-1 örneğine ait 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri ..... | 61    |
| <b>Tablo 5.2.</b> Alg-1 örneğine ait 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri .....            | 62    |
| <b>Tablo 5.3.</b> Alg-2 örneğine ait 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri ..... | 63    |
| <b>Tablo 5.4.</b> Alg-2 örneğine ait 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri .....            | 64    |
| <b>Tablo 5.5.</b> Difüzyon modelindeki sabitlerin sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmasıyla türetilen model eşitlikleri .....                                                          | 67    |
| <b>Tablo 5.6.</b> Alg-1 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri ile yapılan istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametreler .....                 | 68    |
| <b>Tablo 5.7.</b> Alg-2 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri ile yapılan istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametreler .....                 | 68    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

---

|       |                                                                          |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|
| C     | : Difüzyon bileşen konsantrasyonu ( $\text{kmol m}^{-3}$ )               |
| D     | : Difüzyon katsayısı ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )                       |
| MR    | : İstatiksel analizlerde kullanılan ayrılabilir nem oranı                |
| L     | : Katı madde içerisindeki difüzyonun gerçekleştiği boyutun kalınlığı (m) |
| t     | : Zaman (dk)                                                             |
| T     | : Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )                                        |
| W     | : Katı maddenin t anındaki nem içeriği (kg nem/kg kuru madde)            |
| $w_o$ | : Katı maddenin başlangıç nem içeriği (kg nem/kg kuru madde)             |
| $w_e$ | : Katı maddenin denge nem içeriği (kg nem/kg kuru madde)                 |
| x     | : Katı maddenin içerisinde difüzyonun gerçekleştiği konum (m)            |

### Kısaltmalar

---

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| $\mu\text{m}$ | : Mikrometre             |
| nm            | : Nanometre              |
| ml            | : Mililitre              |
| rpm           | : Revolutions per minute |
| g/L           | : gram/litre             |
| kg            | : Kilogram               |
| $\text{m}^3$  | : Metre küp              |
| Mhz           | : Megacycle per second   |
| vb.           | : Ve benzeri             |
| vd.           | : Ve diğeri              |

# 1. Giriş

Algler, besin zincirinin ilk basamağını oluşturan ve sucul ekosistemin en önemli parçası olan canlılardır. Tatlı su ortamlarında, çok tuzlu su ortamlarında, buzla kaplı ortamlarda, yüksek sıcaklıkta olan kaynak sularında, yüksek basınç ve düşük ışık yoğunluğu ve şartlarına sahip deniz ortamları ve gölde, fotosentez yapabilmek için ışık bulabildikleri tüm alanlarda yaşarlar. Gövde ya da benzer fonksiyonlara sahip formları ile akarsular ve toprak, ağaç, kaya gibi kara ortamlarına yerleşerek yaşayabilirler. Algler, akarsudaki canlıların ihtiyaç duyduğu organik maddeyi ve oksijeni üretmeleri açısından önemlidir.

Algler protein, aminoasit, vitamin ve türlü mineraller yönünden zengindir ayrıca polisakkarit, sterol ve yağ asitlerini barındırdığı için kullanım alanlarının geniş olduğu bilinmektedir. Deniz yaşamı rotasyonunda oksijen kaynağı olarak önemli bir yeri kapsayan algler, diğer organizmalara göre daha kolay şekilde elde edilebilirliği ve yetiştiricilik potansiyelinin yüksek olması gibi önemli avantajları vardır. Algler, hücre içerisinde depoladıkları değerli metabolitleri sayesinde; tıp alanı, gıda maddesi, kozmetik sanayisi, ilaç sanayisi, biyo-materyal (dolgu maddesi ve biyoplastik), hayvan yemi, toprak yapılarını iyileştirici özellikleri nedeniyle gübre olarak, metal bağlama yetenekleri sayesinde atık su arıtımı gibi birçok farklı alanda sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca son zamanlarda, alg kaynaklı biyoyakıt üretimi oldukça önem kazanmaktadır ve fosil yakıtların yerini alma etkisine sahiptir.

Alglerin kullanım alanlarının artmasıyla, alg yetiştiriciliğinin de önemi artmış ve alg endüstrisinin kaynak problemi oluşturmaması sağlanmıştır. Alg çeşitlerinin Uzak Doğu ülkelerinde kullanımının fazla olmasından ötürü doğal kaynaklar tükenmekteyken, batı ülkelerinde ise alglerin temin edilmesi, işçilik bedelinin fazla olmasından dolayı pahalı karşılanmaktadır. Bu nedenle algleri yetiştirmek için optimizasyon şartları araştırılarak yeni teknikler geliştirilmektedir.

Kimyasal proseslerin önemli bir basamağı olan kurutma işlemi, içerdiği sıvı (su veya uçucu madde) seviyesinin, mikroorganizmaların oluşumunu engelleyecek ve kimyasal bozulma reaksiyonlarını en aza indirmesi için uygulanan bir muhafaza işlemidir. Isı ve kütle transferi eş zamanlı gerçekleşir. Kurutma işlemi, kurutucu gazdan katı maddeye doğru ısı transferi ile gerçekleşir. Kurutma işlemi; enerji tasarrufu yapması, hacimsel olarak küçüldüğü için taşıma masraflarının azalması, raf ömrünün uzaması ve sıvı içeriğinin azalmasından dolayı besin içeriği yönünden zengin olmasından diğer muhafaza yöntemlerine göre daha avantajlıdır.

Bu çalışmada, Elazığ Yedigöze yöresine ve havuz suyuna ait örnekler temin edilerek santrifüjlenip, infrared kurutucuda nem içeriğine bakılmıştır. Ayrıca temin edilen alglerin tür analizi yapılmıştır. Farklı sıcaklıklar (40-60 °C) ve farklı hava akış hızlarında (0,5-1,5 m/s) tepsili kurutucuda kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi sonucunda elde edilen veriler ile kuruma eğrisi ve kuruma hızı eğrisi belirlenmiştir. Ayrıca istatistiksel parametre değerleri ile

matematiksel modellemeleri incelenip, en uygun denklemler seçilmiştir. Kurutulan alg örneklerinden protein, yağ, SEM ve FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tezin ana yapısı Giriş bölümünü takiben, Algler Hakkında Genel Bilgiler, Kurutma Hakkında Genel Bilgiler, Materyal ve Metot, Bulgular ve Tartışma ve Sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.



## 2. ALGLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Ekosistemlerin bütünlüğünün sağlanması açısından büyük önem arz eden algler; tatlı, tuzlu ve acı su ortamlarında geniş dağılım alanlarına sahip olan primer üretici canlılar olmakla beraber besin zincirinin önemli bir basamağını da oluşturmaktadırlar (Cirik ve Cirik, 2011). Algler, görünüşleri açısından, tek hücreli ve iplikli mikroskobik yapılardan birkaç metre boyunda bitkilere kadar farklı morfolojide gözlenebilen, sucul ortamda gelişen, basit mikroskobik heterotrofik ve/veya ototrofik fotosentetik organizmalardır (Zhu, 2015).

Alglerin karlı alanlar ve tamamen buzla kaplı alanlarda bulunabilmesi ise ekolojik durumlarını ifade etmektedir. Işık ve nemin olduğu her ortamda ve denizlerde bol miktarda alg bulunmaktadır. Deniz bitkilerinin yaklaşık olarak %90'ı algler meydana gelmektedir. 50000'i geçen farklı alg türü var olduğu tahmin edilmesine rağmen, yaklaşık 30000 civarında alg türü belirlenmiştir ve bunlardan endüstriyel düzeyde sadece 200 alg türü kullanılmaktadır (Mata vd., 2010). Boyutları 3-10 µ ile 70 cm uzunluğa kadar değişebilirken, günde 50 cm'e kadar uzayabildikleri de bilinmektedir.

Alglerin bazı kaynaklarda kimyasal formülü  $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$  (Singh vd., 2011; Medeiros vd., 2015) olarak ifade edilirken, bazı kaynaklarda ise  $C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P_1$  (Xu vd., 2014) olarak gösterilmektedir. Alglerin yapısında başlıca lipitler (%4-55) (Becker, 2007), karbonhidratlar (%6-57) (Yeh vd., 2010), proteinler (%10-63) (Becker, 2007) yer alırken ayrıca; enzim, asit, selüloz, alkaloit, glikozit, amin, iz elementler (Mn, Zn, Mg, Ni, Al, Co, Na, Fe, K, Ca, B, Cr, F) ve inorganik mineraller, fitohormonlar (öksin, giberellin), pigmentler ve uçucu bileşenler (alkol, asetik, aldehit, akrilik, butirik, miristik, formik, terpen, fenoller ve palmitik asit) de bulunmaktadır (Chapman ve Buchheim, 1992).

Algler 24 saat gibi kısa bir zaman aralığında sayılarını iki katına çıkarabilmektedirler. Alglerin geniş enerji potansiyeline sahip çok yönlü bir hammadde olmasından dolayı kimyasal bileşimi genellikle türe ve kültür koşullarına göre farklılık göstermektedir (Zhu, 2015). Bazı alg türlerinin ihtiva ettiği bileşenleri yüzdelik oranları ile Tablo 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Bazı alg türlerinin içerdiği protein, karbonhidrat ve yağ oranları (Zhu, 2015)

| Alg                              | Bileşenler (% kuru ağırlık olarak) |         |       |
|----------------------------------|------------------------------------|---------|-------|
|                                  | Karbonhidrat                       | Protein | Lipit |
| <i>Chlorella vulgaris</i>        | 6-10                               | 25-30   | 30-40 |
| <i>Scenedesmus obliquus</i>      | 10-17                              | 50-56   | 12-14 |
| <i>Spirulina platensis</i>       | 8-14                               | 46-63   | 4-9   |
| <i>Pavlova lutheri</i>           | 11,7                               | 28,8    | 37    |
| <i>Isochrysis sp.</i>            | 26,7                               | 21,5    | 31,9  |
| <i>Chlorella protothecoides</i>  | 15,4                               | 10,2    | 55,2  |
| <i>Prymnesium parvum</i>         | 25-33                              | 28-45   | 22-38 |
| <i>Dunaliella salina</i>         | 32                                 | 57      | 6     |
| <i>Porphyridium cruentum</i>     | 40-57                              | 28-39   | 9-14  |
| <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> | 17                                 | 48      | 21    |
| <i>Chlamydomonas sp.</i>         | 33,2                               | 17,9    | 41,1  |

## 2.1. Alglerin Morfolojik ve Sitolojik Özellikleri

Basit yapılı, klorofil içeren organizmalar olan algler, hücre tipine göre ökaryotik ve prokaryotik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ökaryotik hücre gelişmiş hücre tiplerini, prokaryotik hücreler ise basit yapılı hücre tiplerini temsil etmektedir. Alglerin farklı türlere sahip olmasının sebebi; prokaryotik ve ökaryotik hücrelere ait özellikler, kromofor yapısında gelişen pigment yayılımı ve hücre çekirdeğinin yapısı, üreme farklılıkları ve kamçı gibi hususlardır. Alglerin üreme sistemi; vejetatif, eşeyli ve eşeysiz üreme olarak üç gruba ayrılır. Yaygın olarak vejetatif üreme görülmektedir. Alglerin bazı türlerinde hücreler büyüyerek koloni meydana getirirler ve devamında normal büyümeyle bölünürler. Bazı türlerinde ise tallusun yetişmesi veya ana bitkinin büyümesiyle vejetatif üreme gerçekleşir (Dural, 1989). Suda gelişen alglerin çoğu kamçılı hareketli “zoospor”; toprakta gelişenler ise “aplanospor” ile çoğalma gerçekleştirirler. Gametlerin oluşumu ile eşeyli çoğalma gerçekleşir. İki gametin birleşmesi ile zigot meydana gelir, zigottan da yeni alg oluşur.

### 2.1.1. Hücre Çeperi

İplikli yapıdaki yeşil veya kırmızı algler mikroskop altında gözlemlendiğinde her hücrenin kendine özgün bir çeperle çevrildiği görülmektedir. En dışta hücreler arasında dolgu maddesinin yer aldığı, zar gibi bir kütikulanın mevcudiyeti dikkat çekmektedir. Alglerin bazı tek hücrelilerinde ise sadece hücreyi kütikula çevrelemektedir. Bazı ameboid yapılarda ise çeper gözlemlenmez. Alglerin hücre çeperlerinde değişik oranlarda selüloz bulunmaktadır. Genel olarak hücreler arası dolgu maddesi yeşil alglerin ksilan ve mannan, kırmızı alglerin ise agar-agar ve karragen, esmer alglerin aljinik asitten oluşmaktadır. Çeperde oluşan yapılarla, hücreler arası iletişim kurulur. Hücre çeperinde bir takım mineral maddeler depolanabilir, örneğin; bazı yeşil ve kırmızı alg sınıflarında kalsiyum karbonat birikim göstermiştir (Bowen, 1966; Atay, 1978). Alglerin hücre çeperlerinin ortak bileşeni pektindir. Bazı alglerde ise, hücre çeperi plakalar veya bir kaplayıcı ile güçlendirilmektedir.

### 2.1.2. Sitoplazma

Alglerde sitoplazma yapısı, homojen görüntüde olmayıp, endoplazmik retikulumdan oluşmuştur. Viskoz yapıdaki sitoplazmanın bileşiminde lipit ve protein bulunurken, aynı zamanda “plazmalemma” adı verilen bir membran ile çevrilidir. Sitoplazma; hareketsizdir, tek hücreli ve çok hücreli türlerin çoğunda belirli bir hücre çeperi ile sınırlandırılmıştır (Cirik ve Cirik, 2011).

### 2.1.3. Çekirdek

Hücre çekirdeği, Cyanophyceae haricinde bütün ökaryotik alg gruplarında görülmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile Cyanophyceae’de de sitoplazma içinde açık bir şekilde görülme de çekirdek materyalinin var olduğu gözlemlenmiştir. Sitoplazma ile çevrelenmiş halde bulunan çekirdek, hücre içinde değişmez. Sabit bir yerinin olmamasıyla birlikte, mevcut olduğu yer hücrenin genel durumu ve metabolizmasına bağlı olarak değişmektedir. Çekirdek şekilleri; yumurtamsı, yuvarlak, şeritsi, mercimek şekilli ya da amip biçiminde değişkenlik göstermektedir. Hücredeki çekirdek sayıları, çoğunlukla tek olduğu halde iki ya da daha çok sayıda da olarak değişkenlik göstermektedir (Cirik ve Cirik, 2011).

### 2.1.4. Hareket Organelleri

Alglerin vejetatif hücreleri ve üreme hücreleri “flajel” adı verilen, kamçı biçiminde gelişen hareket organelleri bulundurmaktadır. Her grup için karakteristik özellikleri farklı olan flajellerin, hücredeki yerleşimi ve morfolojisi alg gruplarına göre değişkenlik göstermektedir. Morfolojik olarak kamçılar; aynı şekil ve eşit uzunluğa sahip ise “izokonte”, farklı uzunlukta ise “heterokonte”,

hücresinin tepe noktasında çok sayıda kamçı bir taç şeklini oluşturuyor ise “stefanokonte” olarak tanımlanmaktadır (Cirik ve Cirik, 2011).

#### **2.1.5. Plastidler**

Alg hücrelerinin en belirgin özelliği, taksonomik afinitenin yararlı bir formu olan plastidlerdir. Fotosentez olayında yer alan en önemli yapılardan biri olan plastidler; kloroplast, lökoplast ve kromoplast olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Kloroplastlar fotosentezin önemli bir yapısı olup; protein, lipit, inorganik maddeler ve renk maddesini de içermektedir. Kloroplastın kuru ağırlığını %35-55’ni proteinler, %20-30’nu lipitler, %9’nu ise klorofil oluşturmaktadır. Klorofil a’yı %75, klorofil b’yi %25’ bulunduran klorofilin; kırmızı alglerde klorofil a ve d hali bulunurken, esmer alglerde ise klorofil a ve c hali mevcuttur. Karotenoitler, kloroplastlarda yer alan diğer renk maddeleridir ve kuru ağırlığın %4’nü meydana getirmektedir. Karotenoitler %75 oranında karotenleri içermektedir (Bowen, 1966; Mason, 1977).

#### **2.1.6. Pirenoid**

Pirenoidler, kloroplastlarda farklı şekillerde bağlı bulunan, renksiz, granüler yapılı, “pirenosom” olarak adlandırılan taneciklerin bileşiminden oluşan organellerdir. Değişik konumlarda bulunan pirenosomlar piramidal, ombilik, katlı ve mercimek şeklinde olmak üzere 4 gruba ayrılmışlardır. Pirenoidler yeşil alglerdeki gibi kloroplastın içinde bulunurlar ise “intraplastidial”, esmer alglerdeki gibi kloroplastın dışında bulunurlar ise “ekstraplastidial” olarak adlandırılırlar (Guner, 1977). Yeşil alglerde nişasta oluşumunun olduğu bölge pirenoid olarak gösterilmektedir ve bir veya daha fazla nişasta tanesi, pirenoidin yüzeyine sıkıca uygulanarak kloroplast meydana gelmektedir. Pirenoidin görevleri ise, fotosentezin erken ürünleri için geçici depolama bölgesi olması ve aşırı üretildiğinde nişasta haline dönüştürülmesidir.

#### **2.1.7. Vakuol**

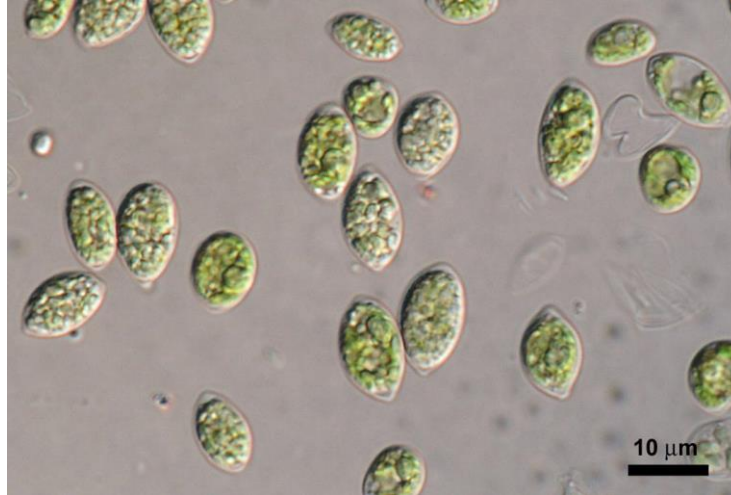
Sitoplazmada mevcut olan içi hücre özsuyu ile dolu boşluklardan oluşan vakuollere, ökaryotik alg gruplarının tümünde gerçek ve farklı şekillerde rastlanmaktadır. Cyanophyceae alg üyelerinde ise psödovakuoller mevcuttur. Prokaryotik alg gruplarında bulunan psödovakuoller, kaldırma kuvveti ve mekanik güce sahip yapılardır (Guner ve Aysel, 1997; Vardar, 1979). Alg gruplarına göre vakuollerin şekli, sayısı ve hücrede bulunduğu yerler değişiklik göstermektedir. Örneğin esmer alg türünün çoğunda vakuol hücrede sabun köpüğü kadar çok sayıda bulunurken, yeşil alglerde ise hücrenin merkezini olduğu gibi vakuol kaplamaktadır (Atay, 1978; Vardar, 1979).

## 2.2. Alglerin Sınıflandırılması

Dünyada ticari olarak büyük ölçüde kullanılan değişik alg grupları birbirleriyle kıyaslandığında morfolojik, sitolojik, üreme şekilleri, biyokimyasal özellikleri ve hayat devirleri yönünden aralarındaki farklılıklar değerlendirilir (Cirik ve Cirik, 2011). Algler, prokaryotik (mikroalg) ile ökaryotik (makroalg) olmak üzere yapısal olarak iki ayrı sınıfa dahil edilebilir. Prokaryotik alglere ait örnek Şekil 2.1’de, ökaryotik alglere ait örnek ise Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Prokaryotik alg örneği (Demirbaş, 2010)



Şekil 2.2. Ökaryotik alg örneği (Demirbaş, 2010)

“Mavi-yeşil algler (Cyanophyta)” mikroalg sınıfı altında adlandırılırlar. Makroalgler ise taşıdıkları kamçı ya da pigmentasyonlarına göre;

- Kahverengi algler (Phaeophyta),
- Kırmızı algler (Rhodophyta),

- Yeşil algler (Chlorophyta),
- Diyatomeler (Chrysophyta) ve
- Kamçılı algler (Euglenophyta) olarak gruplandırılmaktadır (Gamal, 2010).

### 2.2.1. Kahverengi Algler (Phaeophyta)

Çoğunlukla tuzlu sularda, nadiren tatlı sularda yaşayan kahverengi algler, 1500 – 2000 arası türe sahiptir. Kahverengi algler ya da esmer su yosunları, en iri yapılı algler olup boyları 30 metreye kadar ulaşabilmektedir. Ancak tropik denizlerde mevcut olan türlerinden bir kısmı, mikroskobik boylarda da olabilmektedir. Kahverengi alglere örnek Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Hem eşeyli hem de eşeysiz olarak üreyebilirler. Hücreleri tek çekirdekli ve hücre çeperleri içte selüloz, dışta pektin içerir. Tallus hücrelerinde pirenoidsiz birden fazla kromatofor vardır. Kloroplastları feoplast olarak adlandırılır. Kara bitkilerinin fotosentez yapanlarında klorofil –a'ya ilave olarak klorofil -c bulunurken, kloroplasta ilave olarak da esmer rengi veren fukoksantin pigmentini taşımaktadırlar. Pigmentlerden biri olan fukoksantin suların derinliklerindeki kısa dalgaları absorbe ederek, alglerin fotosentez yapabilmesine imkan sağlar. Kahverengi alglerin anabolizma ürünü; dekstrin yapısındaki polisakkarid olan laminarin, alkol özelliğindeki manitol, yağlar ve musilajlı bir madde olan algindir (Çakı, 2009; Altuner, 2010).



Şekil 2.3. Kahverengi alg örneği: *Fucus spp.* (Altuner, 2010)

### 2.2.2. Kırmızı Algler (Rhodophyta)

Alglerin en gelişmiş bölümünü oluşturan kırmızı algler, genellikle denizlerde yaşarlar. Çok az türü tatlı sularda ve toprakta yaşar. Genellikle ipliksi, çok sıralı, sık dallı veya geniş yüzeyli etli yapılarda olan tallusa sahiptirler. Kırmızı algler ökaryot hücre yapısında olup bir ya da birden fazla çekirdek taşımaktadır. Farklı oranlarda fikoeritrin ve fikosiyenin bulunduran kırmızı algler, klorofil -a ve klorofil -d'nin verdiği yeşil rengi kaplayarak çeşitli tonlarda kırmızı rengini vermektedir

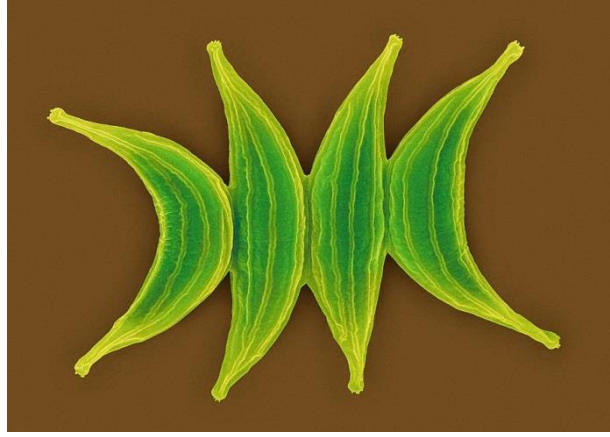
(Cirik ve Cirik, 2004). Tallus hücrelerinin çeperi dışta müsilaşımmsı pektinden, içte ise selüloz tabakalarından oluşmaktadır. Bazı türlerinde hücre çeperlerinde büyük oranda kalsiyum karbonat depolanır (Altuner, 2010). Kırmızı alglerin hiçbir hücresinin kamçı taşımaması önemli bir özelliklerindendir. Karmaşık yaşam dönüşümleri üç evreden oluşur ve döl almaşası görülür. Asimilasyon ürünü olan glikojen, iyot ile kırmızı rengini verir. Şekil 2.4'te kırmızı alglere ait örnek verilmiştir.

### 2.2.3. Yeşil Algler (Chlorophyta)

Hem tatlı hem de tuzlu sularda yaşayabilen, şekil ve büyüklük itibariyle farklı, tek hücreli, ipliksi, şeritsi yapıdaki yeşil bitkileri içeren 2-8 µm boyutunda organizmalardır. Tatlı su yosunları olarak da adlandırılan yeşil algler doğada geniş bir yaşam alanına sahiptir. Tatlı sularda ve nemli topraklarda %90 oranında, denizlerin sığ bölgelerinde ise %10 oranında yayılış görülür. Genellikle sucul olmasına rağmen, kar üzerinde, toprakta veya ağaç gövdelerinde ortak yaşam sürdüren türleri de mevcuttur. Mantarlar aleminin üyelerine katılarak liken olarak adlandırılan bitki grubunu meydana getirirler. Şekilleri, renk pigmentleri, hücre çeper yapısı, klorofil taşımaları ve anabolizma ürünleri açısından özgün karakterlere sahiptir ve bu yüzden çoğu bilim adamı tarafından, bitkiler aleminde türlerin atası olarak kabul edilirler (Altuner, 2010). Yeşil alglere ait örnek Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Fotosentez ürünleri, yağlar ve nişasta şeklinde depolanır. Taşıdıkları klorofil -a ve klorofil -b'den ötürü cam yeşili rengindedirler. Hücre çeperleri genellikle selüloz içerirken, değişik maddeleri biriktirerek çeşitli renk ve görüntüler elde ederler (Çakı, 2009). Yeşil alglerde hücre bölünmesi ile üreme çok yaygındır. Bazı türlerinde kamçı yok iken, bazı türlerinde sadece gametler kamçılıdır. Yeşil alglerin büyümekte olan türlerinde protein meydana gelir. Gelişimi ilerledikçe karbonhidrat ve yağ üretimi arttığı için besin değerleri büyük ölçüde önemlidir.



Şekil 2.4. Kırmızı alg örneği: *Gelidium spp.* (Altuner,2010)



Şekil 2.5. Yeşil alg örneği: *Scenedesmus spp.* (Altuner,2010)

#### 2.2.4. Diyatomeler (Chrysophyta)

Sıklıkla tatlı sularda, nadiren tuzlu sularda geniş dağılım alanına sahip ve çok sayıda türle ifade edilen bu grubun en iyi tanınan üyeleri, diatomlardır (Bacillariophyceae). Genel olarak fotosentetiklerdir. Zooplanktonların birinci dereceden besinleri olmalarından dolayı, sucul sistemlerin önemli bileşenlerini teşkil ederler. Çoğu türü bir hücreli ve suda serbestçe hareket ederler, ancak ipliksi (filamentöz) ve çeşitli şekillerde koloni yapıları da bulunur. Hücrelerinin biri küçük, diğeri büyük olacak şekilde içiçe geçen iki kutu kapakçığına benzemektedir. Bir takım bireylerinde alt ve üst kapakçıklarında boydan boya uzanan ve “rafe” denilen yarıktan çıkan plazma hareketleri ile hücre ters yönde ilerleyerek hareket eder. Şekil 2.6’da diatomlara örnek verilmiştir. Hücre çıplaktır ya da selüloz veya pektinden yapılı bir zarla çevrilidir. Bu zar çoğunlukla silis veya kalsiyum içerir. İçeriğinde klorofil (–a ve –c), pigment (fukoksantin) ve birbirinden farklı iki adet kamçı bulundurur. Fotosentez ürünleri, kahverengi alglerdeki gibi laminarin veya chrysolaminarin halinde birikir. Kamçılı veya kamçısız sporlarla, eşeysiz üreme gerçekleştirirler. Bu sporlar, “kist” olarak tanımlanan, silis yapılı ve sert ortam şartlarına dayanıklı hücrelerin içinde oluşur.

Diatomlar (Bacillariophyceae), silis içerikli hücre duvarının iki kapaklı bir kutuya benzemesiyle, soğuk sularda yaygın olarak bulunurlar. Tek hücreli ya da filamentli hücrelerden oluşmuş basit bir topluluk halindedirler.

#### 2.2.5. Kamçılı Algler (Euglenophyta)

Hücrelerin etrafında salüloz çeperi bulunmayan çıplak ya da yoğunlaşmış proteinden ibaret ince özel bir örtünün (pelikula) mevcut olduğu tek hücreli organizmalardır. Tatlı, acı sularda ve nemli ortamlarda yaşayan kamçılı algler, genellikle serbest olarak yüzerler. Kamçılı alg örneği Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Anabolizma ürünleri, hücre içinde tanecikler şeklinde bir polisakkarit olan paramilon ve yağlardan (ergestrol) oluşur (Kıran vd., 1980).



Şekil 2.6. Diatom örneği: *Navicula* spp. (Kıran vd., 1980)



Şekil 2.7. Kamçılı alg örneği: *Ceratium tripos*. (Kıran vd., 1980)

#### 2.2.6. Mavi-Yeşil Algler (Cyanophyta)

Yeryüzünün ilk fotosentetik organizmaları olarak bilinen ve dünya üzerinde yaklaşık 3,5 milyar yıldır var olan mavi yeşil algler, rRNA ve klorofil -a'yı kapsayan, karbondioksit ve atmosferik azotu fikse edebilen, fotosentez yapma kabiliyetine sahip, oksijen ve organik karbon üretebilen tek prokaryot organizma grubudur. Çekirdek zarı olmadığından DNA ve pigment maddeleri sitoplazma içinde dağınık halde bulunurken, mitokondri, golgi aygıtı ve vakuol bulundurmamaları ve cinsiyetin görülmemesinden ötürü bakteriyologlar tarafından Cyanobacteria bölümünde sınıflandırılırken, Fotosistem I ve Fotosistem II bulundurmalarından dolayı algler tarafından Cyanophyta bölümü altında araştırılmaktadır (Cirik ve Cirik, 2011). Hücre çeperi selüloz ve pektinden oluşurken, destek besin maddeleri nişasta yerine glikojen, proteinlerden ise siyanofisin ve volitinden oluşur (Chorus ve Bartram, 1999). Bu alg grubunun hücreleri homojen

renklidir ve tür çeşitlerine göre mavi yeşil ile menekşe renklerine kadar değişim gösterirler. Şekil 2.8’de mavi-yeşil alg örneği verilmiştir.

Mavi-yeşil algler, çoğunlukla sucul habitatlarda yaşamalarına rağmen, buzul gölü, sıcak su kaynakları ve çöl gibi olağan dışı habitatlarda da yayılım göstermektedirler (Stal, 2002). Tek hücreli olmakla beraber filament veya koloni oluşturan, basit ya da yalancı dallanma gösteren ipliksi yapıda da olabilirler (Cirik ve Gökpınar, 1993). Hücre duvarlarının yapısı gram (-) bakterilerinin hücre duvarına benzer. Mavi-yeşil alglerin üremelerinde suyun sıcaklığı, güneş ışığı, yüksek besin maddesinin bulunması, otlama, iklim gibi çeşitli faktörlerin etkili olmasıyla birlikte büyümelerinin farklı safhalarında çeşitli hücre dışı polimerik bileşikler sentezlemelerinden dolayı yüksek UV radyasyonunda yaşamlarını devam ettirebilirler (Christensen vd., 1985).



**Şekil 2.8.** Mavi-yeşil alg örneği: *Chroococcales*. (Cirik ve Cirik, 2011)

Mavi-yeşil algler yüksek protein içerikleri, fotosentez kabiliyetleri ve basit besiyerlerinde hızlı çoğalmalarından dolayı besin kaynağı olarak kullanım alanına sahiptirler. Bir kısım mavi-yeşil alg türleri fotosentezin yanında ortam şartları değiştiğinde elektron vericisi olarak sülfat bileşiklerinden yararlanarak azot fiksasyonu da yapabilirler (Cohen vd., 1986). Azot fiksasyonu heteroist denilen kalın çeperli, apikal deliğe sahip ve homojen yapılar içerisinde, oksijensiz koşullarda gerçekleşir (Cirik ve Cirik, 2011). Nörotoksin üretme yetenekleri bulunur ve bu toksinlerin olduğu suyu içen gelişigüzel bir canlının yaşamı aniden ölümle sonuçlanabilir. Açık sularda yerleşim gösteren türlerinde gaz kesecikleri görülmesinden dolayı canlı suda istediği derinlikte durabilir.

### **2.3. Alg Üretiminde Etkili Olan Faktörler**

Alglerin biyokütle üretimini; biyolojik (patojenler ve bazı alg türlerinden meydana gelen rekabet ortamı) ve biyolojik olmayan (ışık, sıcaklık, besin maddesi, oksijen, karbondioksit, pH,

tuzluluk ve toksik kimyasallar gibi) faktörler etkilemektedir. Ayrıca işletme parametreleri olan seyreltme oranı, karıştırma ve hasat sıklığı gibi faktörlerin de etkisi vardır.

Algler basit oluşumları ve enerji korunumuna yönelik olan yapıları nedeniyle bitkilere oranla daha hızlı büyüme özelliğine hakimlerdir (Mata vd., 2010). Farklı çevresel koşullar altında yaşayabilme kabiliyetinin yanı sıra yetiştirilme zamanlarındaki üretim parametrelerinin alg gelişimine etkisi oldukça büyüktür. Alglerin yaşama şartları ve üremeleri için gerekli parametrelerin değerleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

### 2.3.1. Sıcaklık

Alg gelişimi ve biyokütle üzerinde gözle görülür etkilere sahip olan sıcaklık, özellikle hücre morfolojisi ve fizyolojisini değiştirerek, metabolik sürece ve biyolojik reaksiyon hızını etkilemektedir (Raeesossadati vd., 2014; McGinn vd., 2011). Alglerin gelişmesi için gerekli olan sıcaklık 5-35 °C olmasına rağmen, optimal büyüme sıcaklığı 20-30 °C arasındadır (Rashid vd., 2014). Algler için sıcaklık aynı zamanda bir fiziksel etkidir. Hücrenin lipid kompozisyonu, besin kullanımı, büyüme hızı ve karbon fiksasyonu sıcaklıktan etkilenmektedir ve bu durum alglerin üretimine yansımaktadır (Tan vd. 2009). Hava koşullarındaki değişimlerden dolayı, dış ortamda alg üretmek için sıcaklığı belirli bir değerde tutmaya çalışmak oldukça zordur. Soğuk havalarda ve düşük sıcaklıklarda alg büyümesi yavaş ilerlemektedir. Kapalı sistemlerde, kontrollü sıcaklık sağlandığı için alg büyümesi istenilen seviyelerde gerçekleşebilmektedir.

Sakamoto ve Bryant yaptığı *Synechococcus sp. PCC 7002* çalışmada, 38°C kültivasyon sıcaklığında en kısa yarılanma süresini (3,5 saat) keşfetmiştir (Sakamoto ve Bryant, 1998). Chokshi vd., yaptığı *Acutodesmus dimorphus* çalışmada, 35 °C’de en iyi büyümenin görüldüğünü ve yapısında lipidi %22,7, karbonhidratı %33,7 ve proteini %38 oranında depolayabildiğini belirtmiştir (Chokshi vd., 2015). Converti vd., yaptığı *N. oculata* çalışmada, lipid üretiminin optimal sıcaklık koşullarında (25 °C) iki katına çıktığını ifade etmiştir. Converti vd., *Chlorella sp.* ile yaptıkları çalışmada lipid içeriğinin, sıcaklığın 30 °C’den 25 °C’ye düşürülmesi ile arttığını gözlenmiştir (Converti vd., 2009).

**Tablo 2.2.** Alglerin yetiştirilmesi için gerekli parametreler ve yaklaşık değer aralıkları (Tan vd., 2009)

| Parametreler                          | Literatür verileri |
|---------------------------------------|--------------------|
| <b>pH</b>                             | 5,8-9              |
| <b>Sıcaklık (°C)</b>                  | 25-36              |
| <b>Tuzluluk (g/l)</b>                 | 15-150             |
| <b>Işık Yoğunluğu(nm)</b>             | 400-700            |
| <b>Işıklanma Süresi (gündüz:gece)</b> | 12/12              |

### 2.3.2. Işık

Genellikle enerjilerini ışıktan alan algler, basit organik bileşikleri karbon ve enerji kaynağı olarak kullanarak çoğalabilmelerine rağmen, fotosentez mekanizmasını ve enzimatik aktiviteleri doğrudan etkilemesi nedeniyle ışığın miktarı ve dalga boyu alglerin çoğalmasında ve derinlere doğru yayılımında belirleyici en önemli parametrelerden biridir. Işık için olan optimum seviye aşıldığında alglerin çoğalma hızı düşmektedir (Borowitzka, 1998). Alglerin kültür ortamına göre ışık kaynağı doğal veya yapay olabilir. Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda yapay aydınlatma ile kontrol daha kolay sağlanmaktadır. Bundan dolayı da genellikle floresan lambalar kullanılmaktadır. Fotosentez için kullanılan en aktif ışık spektrum aralığına sahip olduklarından ve derine en fazla ulaşabildiklerinden, mavi ya da kırmızı ışık spektrumu yayan floresanlar tercih edilmektedir.

Alglerin üretiminde en yaygın yöntem olan fotoototrofik kültivasyonu için ışık enerjisi büyük ölçüde önemlidir (Gonçalves vd., 2014). Fotoototrofik gelişim boyunca ışık enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesiyle tanımlanan fotosentetik etkinlik, algler için önemli olup, ışık parametresiyle doğrudan etkilenmektedir (Brennan ve Owende, 2010; Zeng vd., 2011). Işık spektrumuna göre farklılık gösteren fotosentetik etkinlik, alglerin fotosentezi için genel olarak, 400-700 nm dalga boyundaki ışığı kullanmaktadır (Blair vd., 2014; Kim vd., 2013).

Alglerin gün boyunca maruz kaldığı aydınlık/karanlık saatlerini açıklayan fotoperiyot zamanı, alglerin gelişiminde önemli faktörlerden biridir (George vd., 2014). Wahidin vd., *Nannochloropsis sp.* ile alg gelişimi ve lipid üretiminde fotoperiyot zamanının etkisini araştırarak, 6 saat karanlık 18 saat aydınlık döngüde olduğunu belirlemiştir (Wahidin vd., 2013). Ayrıca, Lee vd., aydınlık sürenin uzun tutulmasının algal biyokütle üretimi için avantajlı olacağını ifade etmiştir (Lee vd., 2015).

### 2.3.3. pH

Alglerin metabolik aktivitelerini, besi ortamının pH değeri büyük ölçüde etkilemektedir (Rashid vd., 2014). Alglerin canlılığını sürdürmesi ve diğer istilacı organizmaların büyümesini azaltmak için optimum pH değeri 7-9 arasında olduğu bildirilmiştir (Katarzyna vd., 2015). pH 10-11'in üzerine olduğunda ya da optimum değerlerin altına inildiğinde alglerin gelişimi inhibe olmakta ve çoğalma hızı düşmektedir (Liu vd., 1998). Ancak, bazı türler tatlı su ökaryotik alglerinin büyümesi için elverişli olan asidik ortam (pH 5-7) ve siyanobakterilerin (mavi-yeşil algler) büyümesi için faydalı olan alkali ortamda (pH 7-9) gelişim göstermektedir (Razzak vd., 2013).

Alg yetiştirme işlemi sırasında pH genellikle, karbonat/bikarbonat ve karbondioksit dengesiyle kontrol edilmektedir. Hücre dışı pH (karbonat tamponlarının) ve hücre içi pH'ın izole edilmiş etkilerinin ayrıntılı bir analizi, büyük ölçekte pH kontrolünü gerektirmektedir (Behera vd.,

2019). Algler fotosentez yaparak CO<sub>2</sub>'yi kullanırlar ve artan pH'ı kontrol altına almak için asetik asit ya da hidroklorik asit kullanılmaktadır. Asetik asit alglerin gelişimine karbon kaynağı olarak yardımcı olduğu için, hidroklorik asite nispeten daha avantajlıdır (Zhu vd., 2013).

#### **2.3.4. Karıştırma**

Alg kültürlerinin büyümesinde önemli bir parametre olan karıştırma performansı, alg hücrelerini süspansiyon şeklinde tutar, termal tabakalaşmayı ihmal eder, besini homojen olarak dağıtır, besin maddelerinin kullanımı artırır, alglerin çökmesini önler ve özellikle fotobiyoreaktörlerde oksijen birikimine engel olmak için gaz-sıvı kütle transferini geliştirmektedir (Lakaniemi, 2012). Işık, sıcaklık ve gazların (O<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub>) homojen dağılımı için optimum karıştırma gerekmektedir (Rashid vd., 2014). Ancak, karıştırma hızlı olursa alg hücrelerine zarar verebilir. Karıştırma, gaz (hava ya da diğer gaz karışımları) dağıtıcı sistemler, mekanik karıştırıcılar (karıştırma kolu, çark gibi) veya mekanik pompalar ile gerçekleştirilmektedir (Lakaniemi, 2012). Açık sistemlerde mekanik karıştırıcılar, kapalı sistemlerde gaz dağıtıcılar ve pompalar tercih edilmektedir.

Biyoreaktör içerisindeki alg kültür ortamının dolaşımını sağlayan ve karıştırma işlemini yerine getiren pompalar sayesinde verimli bir karıştırma sağlanırken, gaz transfer hızı da düşmektedir (Kumar vd., 2010). Karıştırma işlemi için uygun sistemin seçilmesi ile biyokütle üretiminin %75'e dek arttığı gözlemlenmektedir (Rashid vd., 2014). De Bhowmick vd., 0,3 m/s'lik sabit hızda olan mekanik çark karıştırıcı sayesinde algal kültürü devamlı olarak karıştırmıştır (De Bhowmick vd., 2014). Ranga Rao vd., 15 rpm karıştırma hızında, 80 litrelik işletme kapasitesine sahip alg havuzunu işletmiştir (Ranga Rao vd., 2012). Komolafe vd., alg kültürü elde etmek için kullandığı açık havuz biyoreaktörde, hava pompasını besin maddelerinin homojen yayılımı için kullanmıştır (Komolafe vd., 2014).

#### **2.3.5. Besin**

Genel olarak karbon, azot ve fosfor gibi besin kaynakları tüm mikroorganizmalar tarafından kullanılmaktadır. Endüstriyel egzoz gazları, atmosferden alınan CO<sub>2</sub> ve çözünür karbonatlar alglerin karbon kaynağı olarak bilinmektedir (Jankowska vd., 2017). Alg kültür ortamlarına verilen karbondioksit atmosferden sağlanmaktadır. CO<sub>2</sub>'nin atmosferden normal difüzyon ile elde edilmesi algal tüketim hızından daha yavaş gerçekleştiğinden ve sudaki çözünürlüğü nispeten düşük olduğundan, suni kaynaklardan (hava pompası gibi) sürekli beslemek gerekmektedir (Elcik ve Çakmakçı, 2017; Rashid vd., 2014). Birincil kaynak olarak amonyuma gerek duyan alg türleri, büyüme ortamında nitrat haricinde başka bir azot kaynağı bulunmadığından, alg büyümesini aralıklı nitrat beslemesi ile gerçekleştirebilmektedir (Jankowska vd., 2017; Jin vd., 2006). Alg

hücreleri tarafından özellikle amonyum seçilmektedir ancak amonyum yüksek derişimlerde kullanılırsa alglere toksik etki yapabilir (Cai vd., 2013). Fazla miktarda fosforu alg hücreleri, polifosfat tanecikleri olarak biriktirme eğilimindedir. Böylece, besin yetersizliği olduğunda algler tarafından fosfat hücre büyümesi için kullanılabilir. Alglerin yetiştirilmesinde, temel besin maddelerinin (azot, karbon, fosfor) haricinde az miktarda kalsiyum, magnezyum, silika, potasyum, demir, çinko, bakır benzeri mikro besin maddelerine de gereksinim duyulmaktadır (Elcik ve Çakmakçı, 2017).

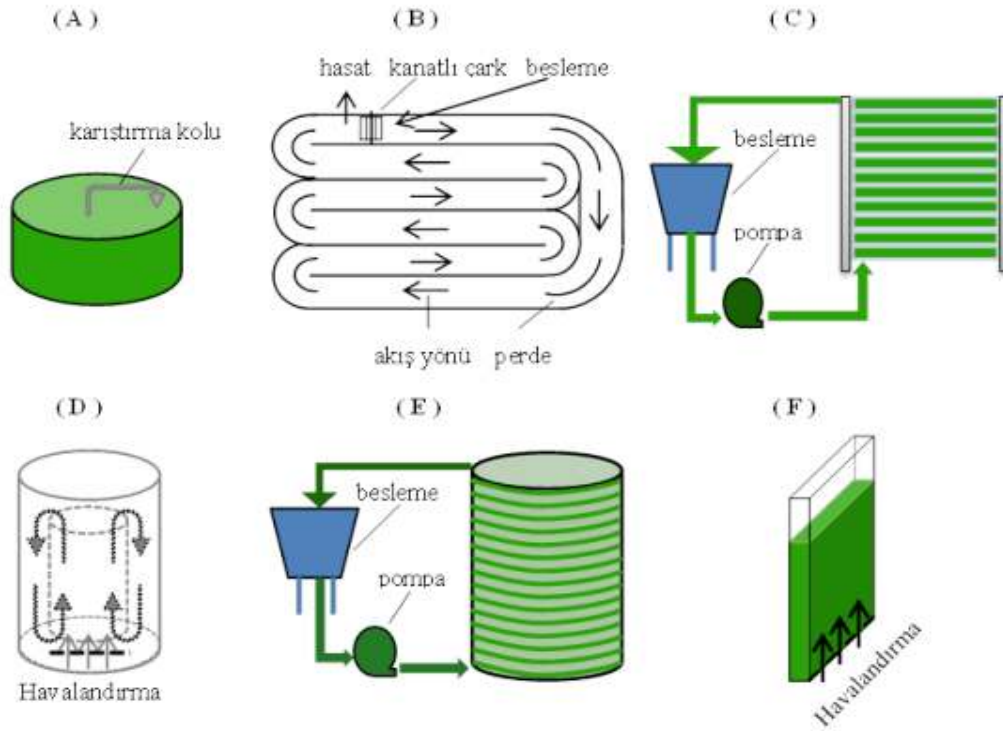
#### 2.3.6. Tuzluluk

Tuzluluk, deniz organizmalarının dağılışı ve algal biyokütle üretimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Cirik ve Cirik, 2011; Dural, 1989). Optimum tuzluluk değerleri, her alg türünün üretimi için değişmektedir (Singh vd., 2011). Deniz alglerinden *Nannochloropsis salina*, *Synechococcus sp.*, *Botryococcus braunii* ve *Chlorococcum littorale* yüksek tuz miktarına sahip büyüme ortamında daha iyi gelişebilmektedir. Tatlı su alglerinden ise *Chlorella vulgaris* ve *Microcystis aeruginosa*, daha az tuzun bulunduğu besin ortamında gelişebilmektedir (Rashid vd., 2014).

#### 2.4. Alg Üretim Sistemleri

Bazı alg türlerinin sahip oldukları spesifik özelliklerinden dolayı farklılık ortamlarda yetiştirilirler. Alg üretim sistemleri, açık ve kapalı olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadır (Suali ve Sarbatly, 2012). Açık sistemlerdeki alg üretimi, yarış pisti, eğimli, dairesel ve karıştırmasız (sığ) olarak gruplandırılmış açık havuzlarda meydana gelmektedir. Kapalı sistemlerdeki alg üretimi ise borusal, fermentör tipi, düz plaka ve içten aydınlatmalı fotobiyoreaktörlerde meydana gelmektedir (Yılmaz, 2006; Dębowski vd., 2012). Alg üretim sistemleri Şekil 2.9’da verilmiştir.

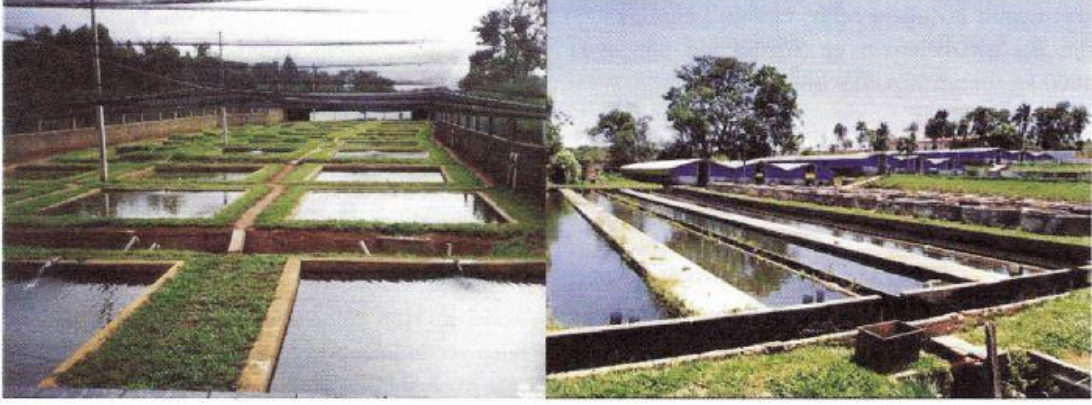
Alg üretiminde büyük çaplı üretimin amacı, az maliyet ve kolaylıkla verimli ürün geliştirmektir. Bundan dolayı da açık havuzlar (Chen vd., 2011) daha elverişlidir. Ancak açık sistemlerde alg üretilmesinde, istenmeyen türlerin oluşması ve verimliliği az olması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Gross, 2013). Kapalı fotobiyoreaktörlerde ise alglerin üretilmesi için, üretim koşullarının optimum şartlarda tutulması, istenmeyen türlerin oluşumunun engellenmesi gibi fiziksel ve kimyasal parametreler kontrol altında tutulabilir.



**Şekil 2.9.** Tipik alg üretim sistemleri : A) Dairesel karıştırılmalı açık havuz B) Yarış pisti tipi açık havuz C) Yatay borusal fotobiyoreaktör D) Hava kaldırmalı reaktör E) Sarmal borusal fotobiyoreaktör F) Düz plaka fotobiyoreaktör (Yılmaz, 2006)

#### 2.4.1. Açık Havuzlar

Açık havuzlarda alg üretilmesi çalışmaları 1950’li yıllarda başlamıştır. Alg üretim verimliliğini etkileyen ana faktör, reaktör seçimidir. Açık havuzlar, ekonomik açıdan uygun olmasından ötürü endüstriyel çalışmalarda kullanılan ve büyük alanlara gereksinim duyulan sistemlerdir. Ancak, sıcaklığı kontrol etmek, günlük ve mevsimsel dalgalanmalardan dolayı zordur. Sıcaklık değişimleri, ışık yoğunluğunun zayıf olması, çözülmüş oksijen konsantrasyonu ve pH’ın etkisi alglerin büyüme parametrelerini kısıtlayabilir. Sistem kontrolünü, düşük biyokütle verimliliğinden (0.1-1.5 g/L) dolayı oluşan işletme zayıflığı ve istenmeyen türler zorlaştırmaktadır. Şekil 2.10’da alg üretimi için kullanılan açık havuzlara örnek gösterilmiştir. Alg kültürasyonunda yarış pisti yani yosun havuzları, en yaygın kullanılan büyük ölçekli sistemlerdir (Christenson ve Sims, 2011). Yarış pisti tipi havuzlar, sıg veya büyük dairesel şekilli kapalı döngü resirkülasyon kanalları şeklinde olup, derinlikleri 0,2-0,5 metre aralığında (Brennan ve Owende, 2010), genişlikleri ise yaklaşık 0,25 metredir (Bahadar ve Bilal Khan, 2013). Yarış pisti tipi havuzlar genellikle beton, fiber cam veya membranlardan yapılır. Açık sistemlerde ticari olarak en çok üretilen alg türleri *Spirulina* ve *Chlorella*’dır (Razzak vd., 2013).



Şekil 2.10. Geniş alg üretim havuzları (Christenson ve Sims, 2011)

#### 2.4.2. Kapalı sistemler (Fotobiyoreaktörler)

Alg üretiminde kullanılan kapalı sistemler (fotobiyoreaktörler), açık havuz sistemlerine nazaran bazı avantajlara sahip olarak tasarlanmıştır (Bahadar ve Bilal Khan, 2013). Fotobiyoreaktörlerin, açık havuzlara göre avantajlı olduğu durumlar,

- Daha iyi pH ve sıcaklık kontrolünün olması,
- Daha düşük alan ihtiyacı,
- Karıştırmanın daha iyi olması,
- Su ve CO<sub>2</sub> kayıplarının az olması,
- Yüksek biyokütle üretimi,
- Çoğu alg türlerinin yetiştirilmesine imkan sağlaması,
- Kirlilik oluşumunu minimize etmek,
- Güneş ışığının daha geniş bir yüzey alanına dağılmasıyla yüksek hücre yoğunluğuna sahip olmasıdır.

Fotobiyoreaktörlerin alg üretim verimliliğinin 20-40 g/m<sup>2</sup> gün arasında değiştiği gözlemlenmektedir (Christenson ve Sims, 2011). Fotobiyoreaktörlerin, kurulum maliyetleri açık havuzlara göre fazla olduğu için pek tercih edilmez. Fotobiyoreaktör örneği Şekil 2.11'de verilmiştir. Kapalı fotobiyoreaktörlerin borsal, sürekli karıştırılmalı, düz plaka, dikdörtgen vb. birçok çeşidi arasında en çok borsal ve plaka şeklinde olan fotobiyoreaktörler kullanılmaktadır (Demirbas, 2010; Khan vd., 2009). Borsal fotobiyoreaktörlerde, pompa yardımıyla reaktör ve besleme haznesi arasında dolaşan alg kültürü sayesinde besin maddelerine ait kültür koşullarının daha iyi kontrol edilmesi, gaz transferinin artırılması, alglerin çökmesinin en aza indirilmesi, kirliliğin azaltılması ve yüksek ışık kullanım verimliliği artırılması gibi durumlar sağlanmaktadır (San Pedro vd., 2014; Demirbas, 2010). Bu sistemlerde tüplerin tasarımına göre yatay, dikey, eğimli ve sarmal konfigürasyonları vardır. Borular genellikle cam veya plastik malzemeden

genellikle 0.1 m veya daha küçük çapda olacak şekilde üretilmektedir (Slegers vd., 2012; Chisti, 2007). Tablo 2.3'te alg üretimi için kullanılabilecek farklı üretim sistemlerinin karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 2.11.** Fotobiyoreaktör örneği (Slegers vd., 2012)

**Tablo 2.3.** Farklı alg üretim sistemlerinin karşılaştırılması (Bahadır ve Bilal Khan, 2013)

| Üretim sisteminin adı                           | Avantajı                                                                                                                                                                                              | Dezavantajı                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Yarış pisti tipi havuz (Yosun havuzları)</b> | İşletme ve yatırım maliyetleri ucuzdur. Kolay işletilme sahiptir. Zirai amaçlarda uygun olmayan alanlara kurulabilir.                                                                                 | Biyokütle üretim verimi azdır. Fazla alana ihtiyaç vardır. Aydınlatma, karıştırma ve CO <sup>2</sup> harcama verimliliği düşüktür. Alg türleri sınırlı sayıda üretilir. Buharlaşıma ile fazla su kaybı yaşanır. Kültürlerin kontaminasyon riski yüksektir. |
| <b>Borsal fotobiyoreaktör</b>                   | Büyük yüzey alanına sahiptir. Biyokütle üretim verimi fazladır. Dış ortamda üretim için uygundur. Kültürlerin kontaminasyon riski azdır. Sistem kontrolü yüksektir. Az alanı kaplamaktadır.           | Fotoinhibisyona karşı hassastır. Sıcaklık kontrolü gerektirir. Algler yüzeye tutunma eğilimdedir. Açık sistemlere göre kurulum maliyetlidir.                                                                                                               |
| <b>Düz plaka fotobiyoreaktör</b>                | Biyokütle üretim verimi fazladır. Kolay steril edilir. Yüzey alanı geniştir. Sistemde az miktarda O <sub>2</sub> birikir. Kültürlerin kontaminasyon riski azdır. Alan ihtiyacı azdır.                 | Algler yüzeye tutunma yönelimindedir. Sıcaklık kontrolü zor sağlanır. Açık sistemlere göre kurulum maliyetli yüksektir. Ölçek büyütmesi güçtür.                                                                                                            |
| <b>Hava kaldırmalı fotobiyoreaktör</b>          | Kompakt sistemdir, az alana ihtiyacı azdır. Az miktarda enerji tüketilir. Yüksek kütle transferine sahiptir. Kolay steril edilir. Karıştırma verimi yüksektir. Kültürlerde kontaminasyon riski azdır. | Aydınlatma alanı düşüktür. Reaktör tasarımı karışıktır. Ölçek büyütmesi güçtür. Açık sistemlere göre kurulum maliyeti yüksektir.                                                                                                                           |

## 2.5. Alglerin Kullanım Alanları

Algler, denizlerin en değerli canlı kaynaklarından biridir. Protein, aminoasit, vitamin ve birçok mineral maddeler yönünden zengin olan algler; ayrıca polisakkarit, sterol ve yağ asitlerini kapsadığı için geniş kullanım alanına sahiptir. Tıp alanında, eczacılık, kozmetik sanayisi, gıda, tarım ve endüstri sektörlerinde kullanılmaktadır. Nüfusun fazla, toprağın az olduğu Uzakdoğu ülkelerinde algler 17.yy'dan şimdiye kadar insan besini olarak tüketilmektedir. (Hoppe Heinz vd., 1979; Zeybek vd., 2003). Gıda tüketimlerinde; balık, et, sebze ve tahılların arasında çeşitli algler kullanılmaktadır. *Porphyra* (Nori), *Laminaria* (Kambu) ve *Undaria* (Wakame) en çok tüketilen alg türleridir. Bu sektör için en fazla üretim Çin, Japonya, Kore ve Tayvan'da yapılmaktadır (Atay, 1978).

Ülkemiz denizlerinde dağılım gösteren, bileşimleri yönünden dünya çapında kullanımı milyarlarca dolarlık bir endüstriye sahip olan alglerden; agar-agar, aljinik asit, karragen, vitamin B12, bir kısım organik asitler ve selüloz temin edilmiştir (Guner ve Aysel, 1977; Guven vd., 1969).

### 2.5.1. Alglerin Tıp ve Eczacılık Alanında Kullanımı

Alglerin; tıp alanında kullanım amaçları geniş çaplı olup, yaralanmalarda, bağışıklık sisteminin dengeli olmasında, ağır metal zehirlenmelerinde, yüksek ateşi düşürmede, deri yenilenmesinde, kan dolaşımının düzenlenmesinde, kolesterolü düşürmede ve damar tıkanıklıklarının önüne geçilmesinde büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir (Orhan vd., 2006). Yaklaşık olarak 30 alg türünün araştırmalar sonucunda bağışıklık sistemini düzenleyici tesiri gözlemlenmiştir. Bu alg türlerinin bakteri, mantar ve viral patojenite karşısında en etkileyici unsur direnç sağlamasıdır (Ivanova vd., 1994; Manial vd., 2009).

Alglerin eczacılıkta tercih edilmesinin önemli sebeplerinin başında fikokolloidler gelir. Fikokolloidler polisakkarit yapısında olup higroskopik özelliklerinden dolayı emülgatör, jelleştirici, stabilize edici, süspanse edici ve kalınlaştırıcı etkiye sahip olurlar ve kolloid yapıcı özellikleri nedeniyle vücutta ilaç absorpsiyonuna etki sağlarlar (Zhou vd., 1993). Bazı etken maddelerin (antibiyotik, insülin, vitamin, hormon gibi) infüzyon ve oral ilaç yapılarında, yağ ve mumların sulu solüsyonunda, yağlı kremlerin homojenizasyon ve stabilitesinin sağlanmasında, tabletlerde dolgu maddesi olarak, emülsiyon, losyon, süspansiyon, pomat, şampuan, sabun, tampon, patil ve diş macunu yapımında, bağırsakta çözünen ilaç yapılarının kaplanması alglerden elde edilen aljinatlar büyük bir etken olduğu için ilaç sanayisinde hammadde ya da yardımcı madde olarak kullanılırlar. Ayrıca; flaster, sargı ve bandajlar gibi sarf malzemelerin ana maddesini de aljinatlar oluşturmaktadır (Gümüş, 2006; Guner ve Aysel, 1989). Son yıllarda Türkiye'de güzellik enstitüleri tarafından oldukça yaygın olarak kullanılan algler, deriyi yenileme ve zengin mineral

içerme özelliklerinden dolayı “thallassoterapi” adı verilen uygulamaları ve alg içeren kozmetik ürünlerin çeşitliliği arttırmaktadır (Charlier ve Chaineux, 2009).

### 2.5.2. Alglerin Gıda Alanında Kullanımı

Genellikle Phaeophyceae ve Rhodophyceae yer aldığı 100’den fazla alg türünün içeriğinde bulunan karbonhidrat, protein, vitamin ve minerallerden dolayı dünyanın farklı yerlerinde insanlar tarafından besin kaynağı yerine kullanılırlar. Bu konuda yapılan çalışmada, bazı araştırmacılar uzun süreli alg tüketiminin insanı olumsuz yönde etkilediğini, bazı araştırmacılar ise herhangi zararlı bir tesirinin olmadığını ifade etmektedir. Günde 100 gramdan az, hatta içerdikleri nükleik asit sebebiyle 20 gram olacak şekilde alg kullanımının herhangi bir olumsuz tesiri olmadığı tespit edilmiştir. Uzakdoğu ülkelerinde algler, salata, çorba, yemeği ve sosu yapılarak tüketilmektedir. Besin değeri açısından zengin olmalarından ötürü, besin endüstrisinde kullanılan kahverengi algler ayrıca ticari iyot kaynağı olarak da büyük bir paya sahiptir. Kırmızı algler içerikleri karbonhidratlar, proteinler ve yağ asitleri sayesinde tam anlamıyla protein kaynağı olup, canlılar için gerekli olan çoğu aminoasiti de yapısında bulundurur (Zeybek vd., 2003).

Algler, Japonya’da “Suschi, Asaksanori, Tjintiow, Amanori, Kanten, Kombu” gibi isimler altında hazır gıda maddesi olarak satılırken, ilaveten çay olarak da tüketilmektedir. Ülkemizin denizlerinde bu amaç için *Gelidium*, *Ulva*, *Rhodymedia*, *Porphyra*, *Polysiphonia* ve *Laurencia* gibi alg türleri dağılım göstermektedir (Casal Garcia vd., 2009). Batıda insan gıdasının kısıtlı bir bölümünü oluşturan alglere son yıllarda oldukça ilgi artmıştır. Batı ülkelerinin mutfaklarında çoğunlukla alglerden temin edilen, “jelatan” da adlandırılan karragen, agar-agar, aljinat gibi maddelerin; jelleştirici, yoğunlaştırıcı, süspanse edici özelliklerinden dolayı pasta, marmelat, reçel ve dondurma yapımında kullanılmaktadır.

Olası yapılan çalışmalarda insan beslenmesi için yeterli alg işleme yöntemleri kullanılmamış ve alglerin hücre çeperleri parçalanmadığı için beslenme açısından etkisiz olduğu tespit edilmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda alglerin bağışıklık sistemini kuvvetlendirdiği, kötü koku yaratan bakterileri imha ederek, sindirim sistemine destek olduğu gözlemlenmiştir. Kanseri önleyici ve anti tümör etkiyle donatılmışlardır. Diyet programlarının yan etkilerinin önüne geçerek ve enerji seviyesini koruyarak kilo kaybını sağlıklı şekilde gerçekleştirir. Zararlı maddelerin (hava kirliliği, sigara, alkol vb.) tesirini azaltır. Yaşlanma etkilerini yavaşlatır. Vücudun, civa-kurşun ve radyasyon gibi zehirli metallerin etkilerinden arınmasına ve korunmasına yardımcı olurlar (Nwosu vd., 2011).

Günümüzde algler birçok ülkede yem katkı maddesi olarak kümes hayvanlarının, ruminantların, domuzların ve böceklerin beslenmesinde tercih edilmektedir. Kümes hayvanları ile yapılan çalışmalarda, yemlerde bulunan soya proteinin %25’i kadar alg kullanıldığında ağırlığın normale göre çok fazla arttığı gözlemlenmiştir. Alg ile beslenen kümes hayvanlarının etlerinin rengi pembeleşmiş ve yumurta sarıları koyulaşmıştır. Alg içeren yemlerin besin değerlerinin

yüksek olmasından dolayı, Kanada ülkesinde inek sütünün içerdiği yağ miktarı ve Norveç ülkesinde yumurta sarısının büyük ölçüde fazlaştığı gözlemlenmiştir. Genellikle kuru ağırlıklarının %20'si kadar proteine sahip olan algler bu amaçla kullanılmaktadır. Denizlerimizde kolaylıkla bulunan ve yem sanayiinde çoğunlukla kullanılan *Cystoseira* alg türüdür (Haris, 1963).

### 2.5.3. Alglerin Tarım Alanında Kullanımı

Günümüzde tarımda ve biyolojik tarımda alglerin, verim arttırması ve toprak yapısını iyileştirmesi amaçlarıyla dünyanın birçok bölgesinde kullanıldıkları bilinmektedir. Dünyanın birçok sahil yöresindeki algler; vitamin, mineral ve iz elementlerini yüksek konsantrasyonlarda absorbe etme yeteneğinden dolayı gübre olarak kullanılırlar (Dring, 1986). Alg gübresi, potas bakımından fakir topraklarda süperfosfat ile karıştırılarak özellikle patates üretiminde olumlu sonuçlar görülmektedir. *Cystoseira*, *Enteromorpha*, *Ulva* türleri bu amaç için kullanılabilir (Gümüş, 2006). Çoğu ülkede sera sebzeciliğinin, meyvelerin (turunçgiller, asma, elma, armut vb.) ve süs bitkilerinin (orkideler vb.) yetiştirilmesinde alg ekstraktlarının büyük bir etkisi vardır (Çağatay vd., 2012).

Algler; erozyonu önlemek, havalandırmayı sağlamak, kök gelişimi, su hareketini kolaylaştırmak, toprak sürülmesini basitleştirmek ve bitki gelişimini düzenlemek gibi farklı fonksiyonlarda toprak iyileştiricisi olarak kullanılarak tarım endüstrisine katkı sağlamaktadırlar.

### 2.5.4. Alglerin Sanayi Alanında Kullanımı

Algler alkol sanayisinde; şarap ve bira berraklaştırıcısı özelliğine sahipken, karışımların ve kokteyllerin çökmesini önlemek için de stabilizatör olarak kullanılmaktadır.

Kağıt ve kauçuk sanayisinde, su sızdırma ve mürekkep yayılımına önlemek için dolgu materyali olarak kullanılır ayrıca kağıtların yüzeylerini cilalamaya da yardımcı olur. Doğal kauçuğa eklenen algler, kauçuğun yumuşak ve akıcı olmasını sağlar.

Boya ve tekstil sanayisinde, boyaları zenginleştirmek, pigmentlerin zarar görmesine engel olmak, fazla akıcılığı önlemek, emülsiyonu sabitleştirmek için kullanılırlar.

Kozmetik sanayisinde algler, cilt temizleme maddelerinin, losyonların, cilt kremlerinin, saç spreyleri ve boyalarının ham maddesi olarak kullanılmaktadır. Sabunlarda ise köpük arttırıcı ve temizleyici özelliğine sahiptir.

Atık su arıtımında algler, evsel ve endüstriyel kaynakların sebep olduğu atıklar, süspanse ya da çözünmüş haldeki organik ve inorganik bileşiklerin arıtılmasında kullanılır. Atıkların temizlenme süreçleri oksijenli bir ortamda meydana gelir ve bu oksijenlendirme bazı algler aracılığıyla gerçekleşir. Ayrıca, temizlenmesi zor olan fosfor ve azot gibi bileşikler alglerin olduğu

tanklara alınarak, algler vasıtasıyla besin kaynağı olarak kullanılmaları amacıyla ortamdan uzaklaştırılmaktadır (Gümüş, 2006).

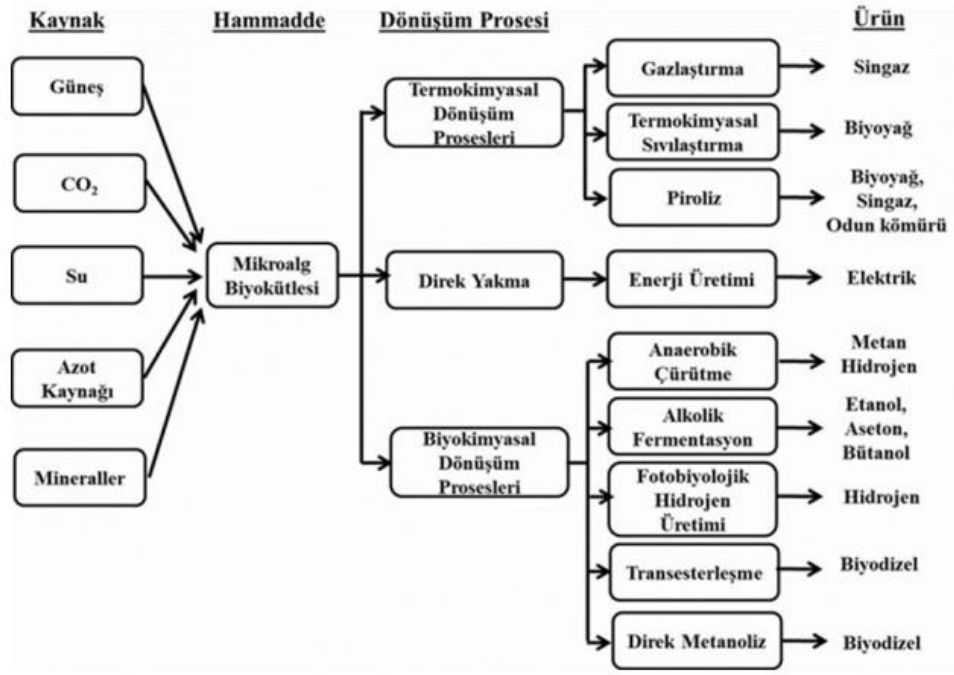
#### **2.5.5. Alglerin Biyoyakıt Alanında Kullanımı**

Biyoyakıtlar; yenilenebilir, çevre için olumlu ve ekonomik gelişim sağlayan; ısı, güç ve alternatif motor yakıtı olarak kullanıma uygun, tarımsal ürünlerin, odunun, hayvan, bitki ve kentsel artıklarının çeşitli biyokimyasal ve/veya termokimyasal dönüşüm proseslerinden geçirilmesiyle elde edilen alternatif yakıtlardır. En çok kullanılan alternatif enerji kaynakları arasında hidrojen gazları, doğal gaz ve sentetik gazlar yer alırken çevre dostu olması ve birçok avantaj sunması ile gün geçtikçe fosil yakıtların yerini de almaktadır (Zhao vd., 2009; Singh vd., 2010). Enerji kaynakları içinde en büyük teknik potansiyele sahip birçok endüstriyel sektörlere ait ürün ile bu ürünlerin atıklarından üretilen biyoyakıtlar, sıvı-katı-gaz özellikte bulunabilmektedir. Katı biyoyakıtlara; odun, odun kömürü, odun parçaları, biyokömür, biyopelet, biyobriket, sıvı biyoyakıtlara; biyoetanol, biyodizel, biyometanol, biyodimetileter, biyoetiltersiyerbutileter ve bitkisel yağlar, gaz formundaki biyoyakıtlara ise; biyohidrojen, biyogaz, singaz denilen sentetik gazlar, piroliz sonucu üretilen gazlar örnek olarak verilebilir. Şekil 2.12’de algal biyokütleden biyoyakıt üretimi için dönüşüm prosesleri gösterilmiştir (Suganya vd., 2016; Raheem vd., 2015).

Biyodizel, biyoetanol, biyogaz ve biyohidrojen gibi biyoyakıtlar enerji sektörünün ihtiyacını ortadan kaldırmak için, fosil yakıtların yerine alternatif yakıt kaynağı olarak seçilmektedir (Suganya vd., 2016).

Biyoyakıtlara olan ilginin gün geçtikçe artmasının sebepleri şöyle söylenebilir;

- Fosil kaynaklı yakıtlarının doğurduğu çevre kirliliği ve sera etkisi yapan gaz emisyonlarını azaltmak,
- Enerji de dışa bağımlılığı küçültmek ve enerji güvenliğini sağlamak,
- Üretim ve çevirim teknolojilerinin iyi öğrenilmesi,
- Sürdürülebilir üretim.



**Şekil 2.12.** Algal biyokütleden biyoyakıt üretimi için dönüşüm prosesleri (Suganya vd., 2016; Raheem vd., 2015)

Artan küresel enerji ihtiyacına çare olabilme ve kısmen de olsa atmosferdeki fazla miktardaki karbondioksiti fotosentez yardımıyla verimli ürünlere dönüştürerek, küresel ısınmanın engellenmesine katkıda bulunma potansiyeline sahip olmalarından dolayı, biyoyakıtların üretilmesinde algler kullanılır. Ekilir olmayan alanlarda ve sucul yerlerde yetiştirilen algler, çok az bir suya rağmen sadece güneş enerjisini kullanarak popülasyonlarını bir günde iki katına çıkarmaktadırlar (Nigam ve Singh, 2011). Hatta bu büyümeyi sadece birkaç saat içinde tamamlayan algler bile vardır (Chisti, 2007). Alglerin, optimum büyüme sıcaklığı 20-30 °C aralığındadır. Alg yetiştirilmesinde, askıda yetişen kültürler ve immobilize kültürler kullanılmaktadır.

**Biyoetanol;** biyolojik kaynaklardan mayalanma (*Saccharomyces cerevisiae*) yolu ile üretilen etanol olarak tanımlanmaktadır (Demirbaş, 2008; Johnston, 2008). Son yıllarda fiziksel ve kimyasal özelliklerinden ötürü biyoetanol, benzin gibi yakıt türlerine karşı alternatif bir biyoyakıttır. Birincil üretim yakıtı olan gıda ürünlerinden şekerli ve nişastalı hammaddelerden, ikincil üretim yakıtı olan lignoselülozik biyokütlelerden, biyoetanol temin edilebilmektedir. Biyoetanol üretimi için son zamanlarda üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı bir diğer kaynak ise alglerdir (Silva ve Bertucco, 2016; Chisti, 2008). Yapısında zengin karbonhidrat içeriğine sahip olan, lipit dışında güneş ışığı eşliğinde karbondioksiti karbonhidrata dönüştüren hücre fabrikaları olan algler, biyoetanol üretiminde besin kaynağı olarak bakterilerin fermentasyonunda kullanılabilir (Bahadar ve Bilal Khan, 2013).

Lignoselülozik biyokütlelerin fermantasyonuna göre alg esaslı biyoetanol fermantasyonu daha çok avantaja sahiptir. Alg esaslı karbonhidratlar, çoğunlukla polisakkarit, nişasta ve selüloz yapısındadır. Karbonhidratlar fermente şekere hidroliz edilmesi için hidroliz reaksiyonu kullanılmaktadır. Karbonhidratların hidrolizi için kullanılan en yaygın metotlar, kimyasal (asit ve alkalın) veya enzimatik hidrolizdir. Fermantasyon ile alglerden elde edilen şeker, biyoetanole dönüştürülür. Fermantasyon prosesi için yaygın olarak kullanılan iki yöntem; ayrı hidroliz ve fermantasyon (AHF) ile eş zamanlı sakkarifikasyon ve fermantasyondur (ZSF) (Wang vd., 2014).

**Biyodizel;** trigliserid içeren bitkisel, kullanılmış atık ve hayvansal yağlardan uygun katalizör yardımıyla alkol ile kimyasal tepkimesi sonucunda açığa çıkan yakıt türüdür (Harun vd., 2010). Tepkime anında bitkisel yağ molekülünün (trigliserid) yapısında mevcut olan yağ asitleri yeni esterler oluşturmak için alkol ile tepkimeye girerler ve yan ürün olarak gliserin oluştururlar. Parfüm ve kozmetik gibi sanayi alanlarında gliserini saflaştırılarak değerlendirilmektedir.

Algler, fotosentez yoluyla karbondioksiti ve güneş ışığını kullanarak enerjiye dönüştürerek yağ üreten küçük birer biyolojik fabrikadır. Tıpkı soya yağı gibi alglerden temin edilen yağda, dizel motorlarda doğrudan yakıt olarak değerlendirilebilir ve arıtılarak biyoyakıtta da dönüştürülebilir. Alglerin çok kısa bir hasat döngüsüne sahip olmasından (yaklaşık olarak 1-10 gün) dolayı çok sayıda veya sürekli hasat için çok kaliteli ve büyük bir alana ihtiyaç yoktur (Scott vd., 2010). Biyodizel, hidrojen ve etanol gibi biyoyakıtların üretiminde, başka ham madde kaynaklarına göre en iyi alternatif enerji kaynaklarından biride, alglerdir (Nigam ve Singh, 2011).

Alg esaslı biyodizel üretimi genellikle, alglerden yağların ekstraksiyonu, fazla olan solventin uzaklaştırılması ve homojen ya da heterojen katalizör kullanılarak katalize edilen biyodizelin üretimi basamaklarından meydana gelmektedir (Hossain vd., 2008). Alglerden biyodizel üretimi, alg biyokütlesinin sahip olduğu lipit içeriğine bağlıdır. Alglerden temin edilen lipitler kimyasal yönden bitkisel yağlar gibi görülmekte ve biyodizel için alternatif ana madde olarak düşünülebilmektedir. Konvansiyonel transesterifikasyon yönteminde, uygulanması zor, enerji tüketimi yüksek ve pahalı olması gibi dezavantajlarından dolayı, alglerden ticari ölçekte biyodizel üretimini kısıtlar.

**Biyohidrojen,** şekerler, nişasta veya selülozik maddeler kullanılarak fermantasyon yoluyla üretilebilir. Kimyasal hidrojen üretim proseslerinde fosil yakıtların kullanımı yaygın olmasına rağmen 1920’lerde başlayarak biyolojik prosesler de merak duymaya başlanmıştır. Bu proseslerden biri de alglerin hidrojen üreticisi olarak tercih edildiği sistemlerdir. Bazı alg türleri güneş enerjisini kullanarak ve hidrojenaz/nitrojenaz enzimlerinin yardımıyla da, anaerobik koşullarda suyu hidrojen ve oksijene ayırıştırarak biyolojik hidrojen üretimini başarabilmektedir. Biyohidrojen üretimi için genel olarak kullanılan alg türleri; *Anabaena sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Spirulina platensis*, *Platymonas subcordiformis* ve özellikle *Chlamydomonas reinhardtii*’dir.

Biyogaz gibi faydalı yan ürün üretimleriyle beraber alglerin kullanıldığı metan fermentasyon uygulamaları büyük miktarda ilgi görmüştür. Anaerobik mikroorganizmalar aracılığıyla parçalanmış

biyogaz, organik maddelerden meydana gelir ve ağırlıklı olarak karbondioksitten (%25-45) ve metan (%55-75) oluşur (Harun vd., 2010). Üretilen metandan, yakıt gazı olarak ya da elektrik üretimi için yararlanılabilir. Alglerin yapısında lignin bulunmamasıyla beraber selüloz içeriği de düşüktür. Böylece, metan üretiminde organik maddelerin ayrılması daha kolay sağlanmaktadır ve proses stabilitesini gerçekleştirmektedir. Bazı alg türlerinden elde edilen biyometan verimleri Tablo 2.4.'de verilmiştir. Metan verimini etkileyen başlıca parametreler; anaerobik parçalanma süreçleri ile biyogaz üretimi için organik yükleme, pH, sıcaklık ve bekletme süreleridir. Yüksek metan verimleri genellikle, fazla bekletme süreleri ile organik yükleme hızları sayesinde elde edilmektedir. Otsuka ve Yoshino, *Ulva sp.* türü algin sabit mezofilik (35 °C) sıcaklık derecesinde anaerobik ayrılması sonucunda metan üretimi 180 mL/g (uçucu katı) olarak elde edilmiştir (Otsuka ve Yoshino, 2004).

**Tablo 2.4.** Bazı alg türlerinden elde edilen biyometan verimleri (Harun vd., 2010)

| Alg türleri           | Biyometan verimi (m <sup>3</sup> /kg) |
|-----------------------|---------------------------------------|
| <i>Laminaria sp.</i>  | 0,26-0,28                             |
| <i>Gracilaria sp.</i> | 0,28-0,4                              |
| <i>Macrocystis</i>    | 0,39-0,41                             |
| <i>L. Digitata</i>    | 0,5                                   |
| <i>Ulva sp.</i>       | 0,2                                   |

### 3. KURUTMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

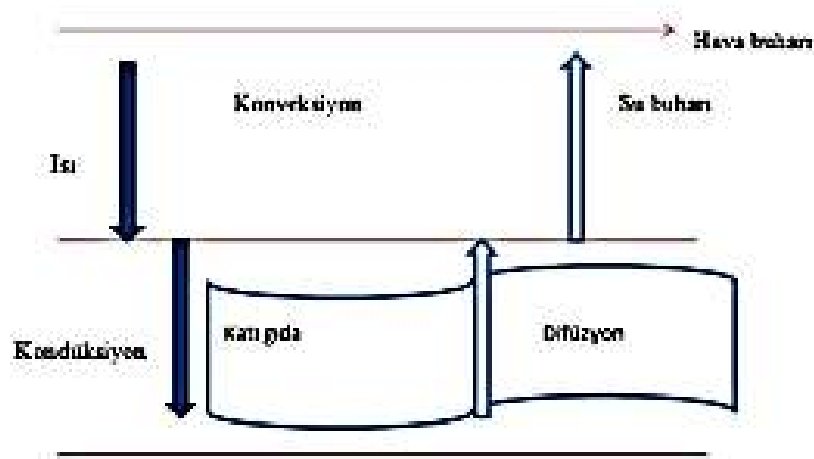
Kurutma; kurutulmak istenen üründen nemin uzaklaştırılması işlemi olarak tanımlanmaktadır. Gaz, sıvı ya da katıdan su veya diğer sıvıların giderilmesi işlemidir. Geçmişten günümüze kadar süregelen zamanda endüstriyel ihtiyaçları karşılayacak şekilde gelişmiş ve geniş bir uygulama alanı olan kurutma işleminin, günümüzde kullanılmadığı alan nerede ise yok gibidir. Kurutma işleminin genellikle uygulandığı endüstri dalları; gıda, tekstil, kimya, deri ve kereste sanayisi gibi alanlardır (Ceylan, 2007).

Genel olarak kurutma, ürünün azalan su içeriği ile su aktivitesinin azalması prensibine dayandığından dolayı proses boyunca uzun depolama sürecinde muhtemel kimyasal bozulma reaksiyonlarını azaltacak seviyeye kadar düşürülmesini sağlayan önemli bir koruma yöntemidir (Erbay ve Küçüköner, 2008; Vega vd., 2007). Kurutmanın temel amacı, ürünün su içeriğinin ve su aktivitesinin değerini düşürerek raf ömrünü uzatmak, sağlıklı ve standart bir ürün elde edebilmektir. Kurutma; enerji tasarrufu sağlaması, hacimsel küçülmeye bağlı olarak taşıma masraflarının azalması, raf ömrünün daha çok uzaması ve su içeriğinin azalmasından dolayı daha yoğun besin içeriği bulunması gibi avantajları sağlaması ile diğer muhafaza yöntemlerinden ayrılarak en çok tercih edilen yöntemdir (Erbay ve Küçüköner, 2008). Genellikle düşük nem içerikli sıcak hava akımı ile kurutma yapılmaktadır. Başarılı bir kurutma sağlanması kurutulan ürünün tazeliğine en yakın şekilde kurutulmasını sağlayacak koşulların uygulanmasına bağlıdır. Kurutma sürecini etkileyen faktörler; kurutma havasının sıcaklık derecesi, nemi, hızı ve akış yönü, yüzey alanı, ortamın basıncı, kurutulacak ürünün kendine özgün özellikleri (şekil ve büyüklük) ve ürünün bileşenleridir (Saldamlı ve Saldamlı, 2000; Lewicki vd., 2014). Kurutma koşullarının optimizasyonu, kurutma sırası ve sonrasında ürünün su içeriğinin, su aktivitesinin ve renkte meydana gelen değişimlerin saptanmasıyla sağlanmaktadır.

Maddeden buharlaşma, osmotik ya da süblimleşme işlemlerinden biri sayesinde suyun hareket etme süreci olarak tanımlanan kurutma; aynı zamanda ham, işlenmiş veya yarı işlenmiş katı, sıvı, yarı sıvı maddelerin yapılarında bulunan su oranının azaltılarak belli düzeye düşürülmesi işlemi olarak da bilinmektedir (Lewicki vd., 2014; Saldamlı ve Saldamlı, 2000). Maddeden nemin hızla uzaklaştırılması, mikrobiyal büyüme ve enzim aktivitesi açısından önem taşımaktadır. Katı maddelerin kurutulmasında, maddedeki mevcut suyun etrafa doğru buharlaşması gerçekleşmektedir. İki temel süreç ile bu aşama gerçekleşmektedir;

- Enerji transferi,
- Katı maddenin yüzeyine doğru su transferi.

Katı maddelerde suyun transferi, suyun katının üst kısmına doğru taşınması ve suyun katının üst kısmından çevreye doğru buharlaşması gibi iki aşamadan meydana gelmektedir. Katı maddelerin kurutulmasında oluşan ısı ve kütle transferi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.** Katı maddenin kurutulma sürecinde oluşan ısı ve kütle transferi (Lewicki vd., 2014)

Kurutma işleminde ısı ve kütle transferi aynı anda gözlenmektedir. İşlem sırasında ısı transferi, kurutucu gazdan katıya doğru gerçekleşmektedir. Bu işlemde son kurutma derecesi, ürünün kullanım kalitesi ile dayanıklılık özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden ötürü önemli olduğu ve bu sebeple koşulların optimize edilerek kontrollü bir biçimde gerçekleştirilmesi kabul edilmektedir.

Kurutma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi, ürün kalitesi ve işletmenin kârlılığı açısından uygun bir kurutucunun seçilmesine bağlıdır. Her ürünün kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeniyle, kurutma yönteminin ve kurutucu seçiminin doğru yapılması önem taşımaktadır (Ersöz, 2008). Kurutucuların karakteristik nitelikleri, kurutucu seçiminde göz önünde tutulmaktadır. Aynı kurutucu tipinin çalışma koşullarında yapılan değişiklik ile ürünün kalitesi etkilenebilmektedir (Güngör, 2013). Kurutma işlemi, besleme stoğuna ısı verilip sıvının buharlaşmasını sağlayarak gerçekleşmektedir. Isı transferi, taşınım (direkt kurutucular), iletimle (indirekt yada temasla kurutucular), ışınlı veya hacimsel olarak ıslak maddeyi mikrodalga veya radyo frekanslı elektromanyetik dalgaya geçirmekle sağlanabilmektedir. Endüstriyel alanda kurutma araçları olarak %85'i hava veya doğrudan yanma gazlarını kullanan taşınım kurutuculardan oluşmaktadır. %99'u sıvının uzaklaştırılmasını içeren uygulamalardır. Kurutma objesinin sınırları, dielektrik (radyo veya mikrodalga frekansı) yöntemi haricinde bütün uygulamalarda ısıyla beslenir, böylece ısı öncelikle iletimle maddenin içine difüze olur. Sıvı, öncelikle malzemenin sınırlarına transfer olur, daha sonra taşıyıcı gaz tarafından uzaklaştırılır (Mujumdar, 2000). Kurutma hızının çözümlenmesinde ısı ve kütle transfer işlemleri aktif kullanılan faktörlerdir (Geankoplis, 2003).

### 3.1. Kurutucu Tipleri

Kurutucular farklı tip mekanizmalar ile gerçekleştirilebilir. Geleneksel sıcak havanın ile kurutmada daha sonra geliştirilen infrared ve mikrodalga kurutmaya kadar çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. İletim ile kurutmada, ısıtılan yüzey ile kurutulacak malzeme temas halindedir ve ısıtmanın homojen olması için alınan önlemler ile malzemenin aşırı ısınması önlenmektedir. Nem miktarından dolayı, aşırı ısınmayı önleyen bir kurutucu tipidir. Genellikle kağıt ürünlerinin kurutulmasında ve kağıt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak iletim ile kurutmada; yüksek kurutma hızlarına ulaşamama, sabit bir ısı ve kütle transferi şartları sağlanmama, sistemin kontrol sorunları, makine etrafında istenmeyen çalışma koşulları, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gibi sorunlar ile karşılaşmaktadır. İletim ile kurutma sahip olduğu dezavantajlara rağmen, diğer kurutma sistemlerine dönüştürülmesi yatırım, işletme ve bakım maliyetlerinin pahalı olması nedeniyle tercih edilmemektedir (Yağcıoğlu, 1999).

İnfrared (kızılötesi) ışınım, dalga boyu 750 nm ile 1 µm arasında olup görünür ışıktan uzun, fakat terahertz ışıınımdan ve mikrodalgalardan daha kısa ve kırmızı görünür ışığın en uzun dalga boyuna sahip rengi bulunan elektromanyetik ışıınımdır. İnfrared radyant kurutucuların; infrared ışınlarını üretimi, geçişi ve absorplanması çalışma sistemini etkilemektedir (Güngör ve Özbalta, 1997). Genellikle, otomobil gövdesi gibi metal malzeme üzerinde bulunan boya tabakasının kurutulmasında, plastik üretiminde, meyve kurutma ve kağıt, tekstil gibi üstünde motif desen bulunduran ürünlerin kurutulması gibi alanlarda kullanılır. Temel radyasyon, kızılötesi ışın veren lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, elektrikle ısıtılmış yüzeylerle temin edilir. Bu kurutma tipi çok pahalı olup, malzemenin yüzeyini ve etrafını ısıttığı için ince tabaka yapısındaki malzemelerin kurutulması için uygundur (Banchero ve Badger, 1973).

Dondurarak kurutmadaki temel ilke; katı halden gaz haline doğrudan geçiş sağlayan, tıpkı buharlaşmadaki gibi bir molekül etrafındaki moleküllerden ayırmak için yeterli enerji sağlandığında gerçekleşen süblimasyondur. Dondurarak kurutma işlemi düşük atmosfer basıncında ve -10°C ile -40°C gibi düşük sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Sıradan nem uzaklaştırmadan farkı, maddenin orijinal özelliklerini tamamen korumasıdır. Bu bakımdan genellikle; farmakolojik ürünler, serumlar, bakteri kültürleri, sebze, meyve suları, kahve ve çay özütlerinin eldesinde, deniz ürünlerinde, et ve süt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dondurarak kurutma işlemi 2 aşamadan meydana gelmektedir; birinci aşama madde dondurularak ön işlemi gerçekleşmektedir, ikinci aşama ise kimyasal nem alıcı ya da düşük sıcaklık yoğunlaştırıcusuyla bağlantılı yüksek vakum odasına alınarak malzemeyi kurutmaktadır (Geankoplis, 2003). Dondurulmuş malzemeye ısı, iletim veya kızılötesi radyasyon ile iletilerek, uçucu element (genel olarak su) yoğunlaşır ve süblimleşir, ya da nem alıcı madde aracılığıyla absorplanır. Bu kurutma tipi pahalı ve yavaş bir işleme sahip olup, ısıya duyarlı malzemelerde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık veya aktivatör

atmosferden zarar gören, biyolojik ürünlerin kurutma işlemlerinde dondurarak kurutma kullanılabilmektedir (Ratti, 2001).

Endüstriyel tip kurutucularının çoğu, hızlı ve yüksek miktarlarda üretim gerçekleştirirken aynı zamanda açık havadan kaynaklanan, iklim şartlarının değişkenliği (yağmur, rüzgâr vb.), mikrobiyal ve çevresel kontaminasyon (mikroorganizmalar, sinek, toz vb.) sorunlarını gibi dezavantajları da bertaraf etmektedir. Endüstriyel tip kurutucuları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

- 1) Sıcak havalı (konveksiyon) kurutucular
  - a) Kabin (dolap) kurutucular
  - b) Fırın kurutucular
  - c) Sandık kurutucular
  - d) Bantlı kurutucular
  - e) Tünel kurutucular
  - f) Püskürtmeli kurutucular
- 2) Mikrodalga kurutucular
- 3) Dondurarak kurutucular (freze-driers)
- 4) Vakum kurutucular
- 5) Valsli (kondüksiyon) kurutuculardır (Saldamlı ve Saldamlı, 2000).

Kurutma ile ürünlerin raf ömrü uzamakta, ağırlık kaybından ötürü taşınması kolaylaşmakta, taşıma ve depolama maliyetleri en aza indirilmekte, ürünün sterilasyonu veya korunması sağlanmakta, ürünün mikrobiyal kontaminasyon riski azalmakta, çözeltilerden bazı ürünlerin geri kazanılması gerçekleştirilmektedir (Karabacak vd., 2014). Katı maddelerin kurutulması, birçok faktörden etkilenen zor bir süreç olmakla beraber, farklı ön işlemlerin uygulanması ile suyun katı maddeden daha rahat uzaklaştırılmasından dolayı daha hızlı kurutulması sağlanabilmektedir.

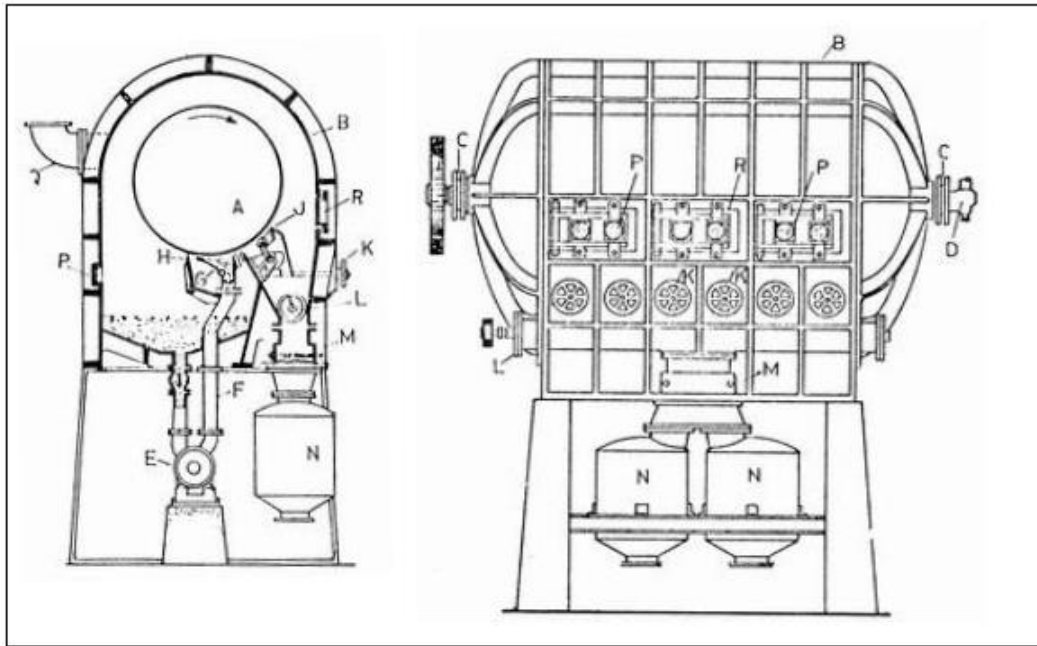
### **3.1.1. Döner Kurutucular**

Genellikle ince ve akışkan taneli malzemelerin kurutulması için uygun olan döner kurutucular; direkt ısıtmalı, dolaylı ısıtmalı ve ikisinin karışımından oluşmak üzere üç tipte üretilebilmektedir. Döner kurutucuların sistemi, yataya yakın olarak dönen uzunca bir silindirden ibaret olup içyapı tasarımı bakımında farklılıklar gösterebilmektedirler. Malzemenin kuruma işlemi, silindir içinde sıcak gazlarla veya sıcak borularla direkt temas ederek, hava akışı paralel veya ters akımlı olacak şekilde uygulanarak ve basınç ise emme veya doğal halde verilerek gerçekleşmektedir (Delele vd., 2015). Döner kurutucuların işletilmesinde korozyon önemli bir maliyet unsuru olmasına rağmen, işletme maliyeti düşüktür. Kurutucu uzunluğuna ve kurutma

oranına göre kurutulacak malzeme 5 ile 50 dakika aralığında kurutucu içerisinde kalabilmektedir. Kurutucu uzunluğu ile kurutma oranı arasında doğru orantı vardır. Kurutucu uzunluğu arttıkça, nem giderme oranı da yükselmektedir (Delele vd., 2015; Hacıfazlıoğlu, 2016).

### 3.1.2. Vakumlu Döner Kurutucular

Suyun kaynama noktasının düşük atmosfer basıncında düşmesi ile buharlaşmanın daha düşük sıcaklıkta ve daha hızlı olduğu kurutucu tipi olan vakumlu döner kurutucular, genellikle 100-150 °C arasında kurutma işlemini yapmaktadır. Vakumlu döner kurutucularda ürünün kurutulması, mukavemetli bir kabin içinde vakum pompası ile atmosfer basıncının azaltılması ve içerisinde bulunan ısıtıcı, fan ve hareketli bir aktarma sistemi ile sağlanmaktadır. Kurutma süresi diğer kurutucu tipleri ile karşılaştırıldığında daha kısa sürmektedir (Erbay ve Küçüköner, 2008). Şekil 3.2’de tek silindirli vakum altında çalışan kurutucu örneği verilmiştir. Tek bir kurutma silindiri olan A, dökme demirden üretilmiş geniş bir kaplama olan B ile sarılmıştır ve kaplamanın atmosfer basıncı altında şeklinin deforme olmaması için, demir kuşaklar konulmuştur. Kısmen kağıt sanayisinde uygulanmaktadır.



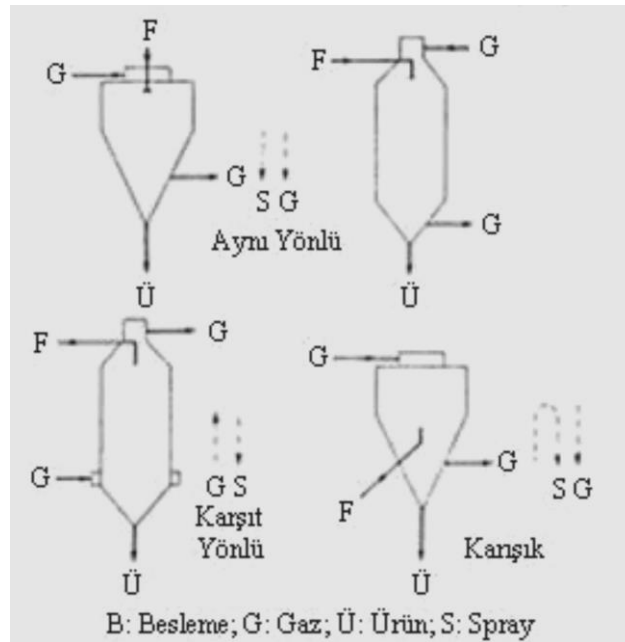
**Şekil 3.2.** Tek silindirli vakum altında kurutucu örneği: A, kurutma silindiri; B, kaplama; C, miller; D, döner bağlantı; E, besleme pompası; F, besleme akımı için giriş borusu; G, silindir besleme teknesi; H, yayıcı; J, kazıyıcı bıçak; K, kazıyıcı bıçağı ayarlayan çark; L, ürünü taşıyan konveyör; M, ürün tanklarına ait açıp kapama vanası; N, ürün depolama tankları; P, gözetleme pencereleri; Q, buhar çıkışı; R, bakım için giriş kapağı (Banchero ve Badger, 1973).

### 3.1.3. Akışkan Yataklı Kurutucular

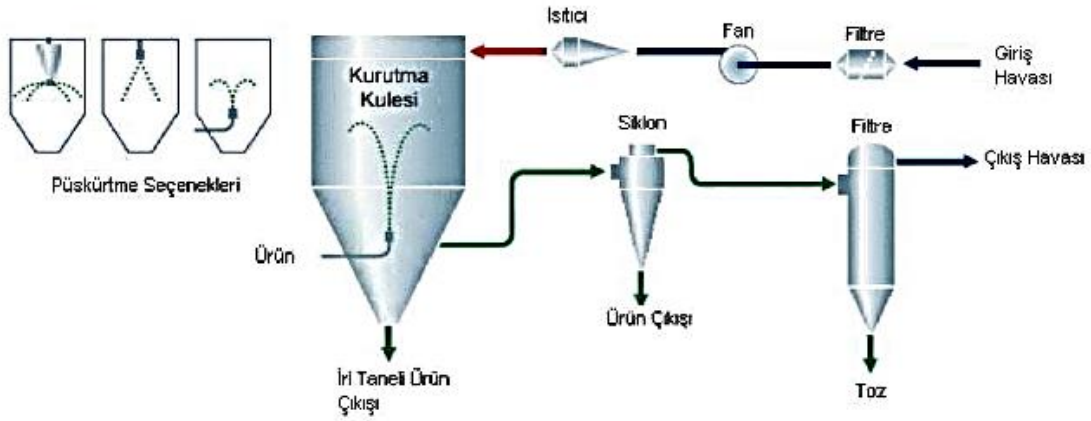
Akışkan yataklı kurutucularda tanecik yapısındaki maddeler kurutucu içerisinde sıcak hava ile askıda tutularak kurutulmaktadır. Geleneksel kurutma sistemlerinden farklı olarak kurutulan malzeme, tepsi ve diğer ısı alışveriş yüzeylerine serilmeden serbest olarak kurutulmaktadır. Otomatik doldurma veya boşaltmanın olası olduğu bu sistemin en büyük avantajı kurutma işlemini kısa sürede gerçekleştirmesidir. Kurutulacak katı maddeler, sabit bir yatak içinde sıcak gaz akımı veya ısıtma serpantinleri ile akışkanlaştırılmaktadır (Güngör ve Özbalta, 1997). Akışkan yataklı kurutucular kömür, endüstriyel hammaddeler, çeşitli cevherler, kireçtaşı, kilitaşı, fosfat kayası, çimento, dökümhane kumu, plastik, tıbbi malzeme ve yiyecekler gibi malzemelerin kurutulmasında kullanılmaktadır (Park vd., 2014; Si vd., 2015).

### 3.1.4. Püskürtmeli (Sprey) Kurutucular

Püskürtmeli kurutucularda kurutulacak madde, özel olarak tasarlanmış konik bir hücre haznesi içerisine püskürtülerek, sıcak hava ile temas etmektedir. Kurutucu besleme türü (viskozite), besleme oranı, besleme ürününün aşındırıcı etkisi, talep edilen parçacık boyutu ve parçacık yayılımı ile akış türünün ve kurutma haznesinin paralel, karşıt ve karışık akım için (Şekil 3.3) tasarlanması püskürtmeli kurutucunun çalışmasını etkileyen faktörler olduğundan dolayı atomizörün uygun tasarlanması ve seçilmesi püskürtmeli kurutucular için çok önemlidir (Mujumdar, 2000). Kurutulacak ürünün tanecik büyüklüğü, yığın yoğunluğu, toz içeriği gibi fiziksel özellikleri, kurutucu gazının sıcaklığı ve püskürtme karakteristikleriyle değişebilmektedir.



Şekil 3.3. Paralel, karşıt ve çapraz akımlı püskürtmeli kurutucuların kurutma hazneleri (Mujumdar, 2000)

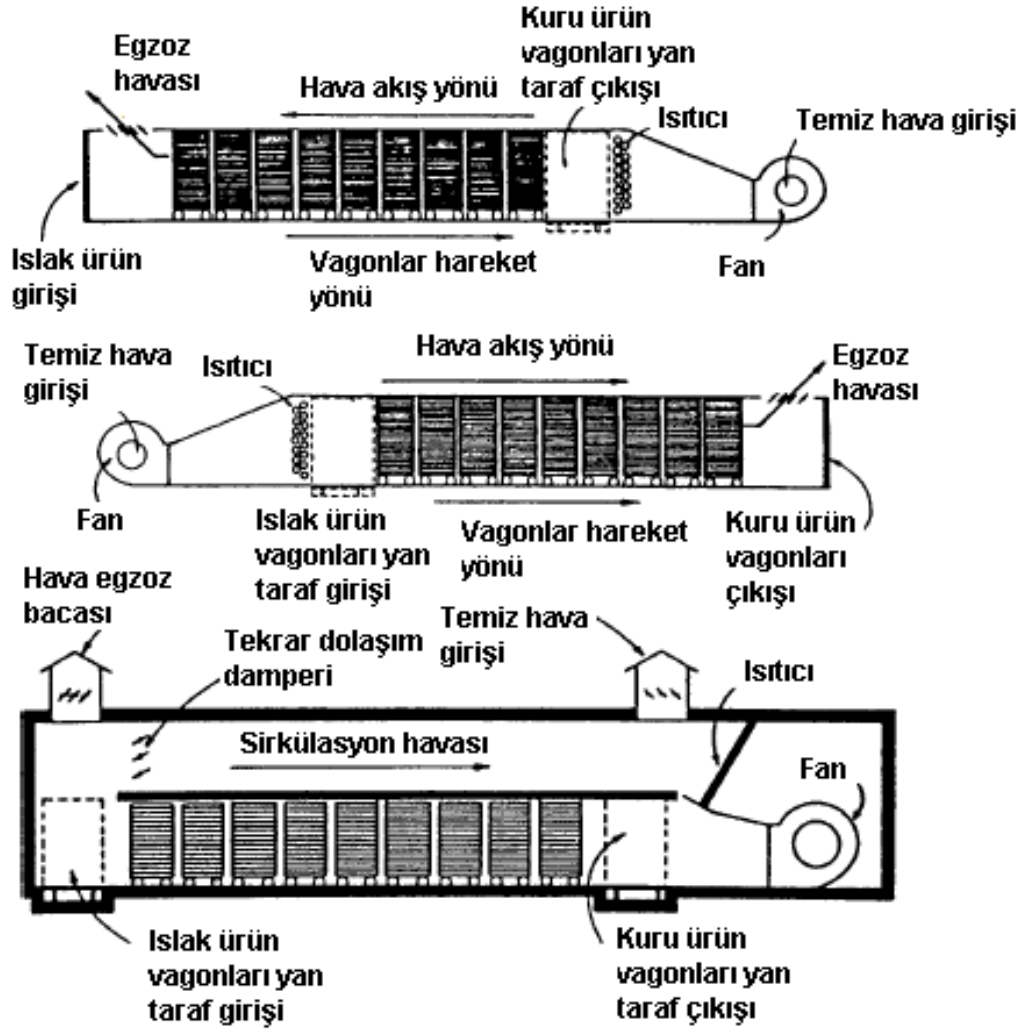


**Şekil 3.4.** Püskürtmeli (sprey) kurutucunun çalışma prensibi (Eksis, 2017)

Şekil 3.4'te püskürtmeli kurutucunun çalışma prensibi görülmektedir. Kuruma süresinin (5 ile 15 saniye arasında) çok kısa olmasından dolayı ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için uygundur. Püskürtmeli kurutucular genel olarak süt tozu, kahve, deterjan ve sabun yapımında kullanılırken gıda, ilaç, kozmetik, ziraat ve kimya sanayilerinde de yaygın olarak tercih edilmektedir (Huang vd., 2003; Langrish ve Fletcher, 2003).

### 3.1.5. Tünel Kurutucular

Tünel kurutucular, sürekli ya da yarı sürekli olarak çalışan kabin (bölmeli) kurutucuların geliştirilerek tasarlanmış halidir. Bir tünel içerisinde hareket eden kurutma vagonlarının içine uygun bir şekilde yerleştirilen madde, ayarlanabilen bir hızda yürüyen bantlar üzerinde, sıcak hava veya yanma gazlarıyla temasta olacak şekilde kurutulmaktadır (Güngör ve Özbalta, 1997). Tünel kurutucularda vagonların tünelin içinden geçirilmesi, kuruma işlemi tamamlanmış bir vagonun tünelden ayrılırken yeni yüklenmiş bir vagonun tünele girecek şekilde düzenlenmesi Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



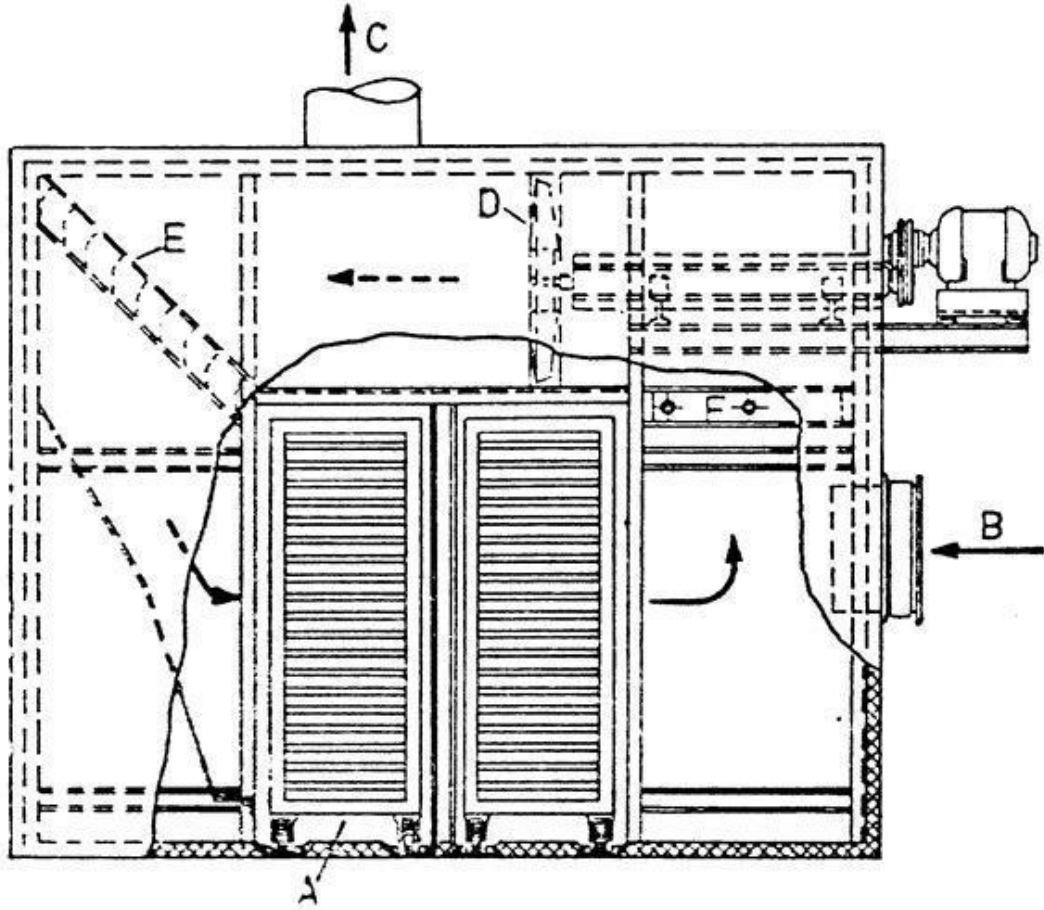
Şekil 3.5. Tünel kurutucuların çalışma prensibi (Güngör ve Özbalta, 1997)

Tünel kurutucularda hava akışı paralel, zıt veya vagonların izledikleri yola dik yönde olacak şekilde hareket etmektedir (Moyers ve Baldwin, 1999). Tünel içerisindeki vagonların üstünden geçirilen hava, daha sonra bir ısıtıcıda ısıtılıp tekrar aynı yerdeki vagonlara gönderilmektedir, böylece sistemden çıkmadan önce daha fazla nem alması sağlanmaktadır. Çoğunlukla miktarları büyük olan, ancak yavaş kurumaları gereken kiremit, tuğla, kereste, seramik ve diğer malzemeler için tünel kurutucu tipi kullanılmaktadır. Bu kurutucu sisteminin sıcak haznesinde malzemenin çok çabuk kurumasına engel olmak için, havanın nemlendirilmesi gerekebilir (Banchero ve Badger, 1973).

### 3.1.6. Tepsili Kurutucular

Farmasötik endüstride yaygın olarak kullanılan tepsili kurutucular, malzemeyi alt kısmı delikli ya da elek olan paslanmaz çelik tepsiler veya raflar üstüne belirli yükseklikte yayarak

kurutmaktadır. Kurutulacak malzemenin tepsilere serilmesinin amacı, yüzey alanını arttırmaktır. Kurutulacak malzemenin niteliklerine, partikül büyüklüğüne, nem içeriğine, gözenekliliğine, tepsilere yerleştirme pozisyonuna, uygulanan sıcak havanın nemine, hızına ve sıcaklığına göre kurutma süresi 2-24 saat arasında olmaktadır (Moyers ve Baldwin, 1999). Tepsili kurutucular, nemli malzemenin düşük sıcaklıklarda kurutulması için tasarlanmıştır. Şekil 3.6’da tepsili kurutucu örneği verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Tepsili kurutucu örneği A, tepsileri taşıyan vagon; B, temiz hava girişi; C, hava çıkışı; D, vantilatör; E, yön verme kanatları; F, kanatlı borulardan oluşturulmuş ısıtıcı (Banchero ve Badger, 1973)

### 3.1.7. Dielektrik Kurutucular

Dielektrik kurutucuların çalışma prensibi, yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilen katı madde içerisinde ısı üretimiyle gerçekleşmektedir (Güngör ve Özbalta, 1997). Malzemedeki kuru alanlar, nemli alanlara göre daha fazla ısınır, böylece malzemenin her noktasında nem profili muntazam bir şekilde düzenlenmektedir. Malzeme yüksek derecede ısıtılmadan su buharlaşmaktadır. Bu kurutucu tipi çok pahalı olması ve tam bir kurutma operasyonu sayılmamasıyla beraber genellikle, kontrplak tabakaları arasında olan reçinenin polimerizasyonu

ve bu biçimde tabakaların birbirlerine yapışması açısından önem taşımaktadır (Banchero ve Badger, 1973).

### 3.1.8. Mikrodalga Kurutucular

Mikrodalga, “magnetron” denilen osilatör-amplifikatörde üretilen bir çeşit elektromanyetik titreşimlerdir. Işın tanecikleri halinde yayılan mikrodalgalar, malzemelere nüfuz ederek onların ısınmasını sağlamaktadır. Bu tip kurutucularda kurutulacak malzemedeki su/nem ısınırken, ortam/hava ısınmamaktadır. Kurutulacak malzeme içerisindeki su dipolleri elektromanyetik alan frekansına dayanarak belirli bir hızda sağ-sol dönme hareketi yapması sonucunda sürtünme oluşmaktadır ve ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Polar özellikte molekül bulunmayan bir malzeme kurutulacak ise, dönme hareketi ve sürtünme olmadığından ısınma da olmamaktadır (Travers, 1990). Şekil 3.7’de endüstriyel ölçekli bir mikrodalga kurutucu gösterilmektedir. Mikrodalga kurutucularda ısıtma için çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır. Çok ince taneli, yüksek miktarlarda nem içeren malzemeler için en ideal kurutucu tipi olan mikrodalga kurutucuların, hem hızlı hem de daha ekonomik olduğu bilinmektedir (Kingman ve Rowson, 2000).

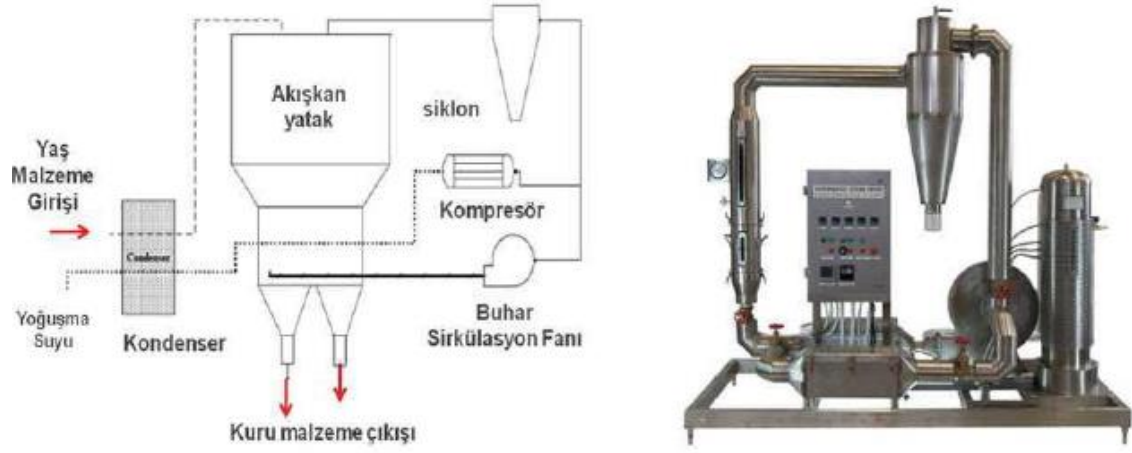


Şekil 3.7. Mikrodalga kurutucu (Max, 2017)

### 3.1.9. Kızgın Buhar Ortamında Kurutma

Yaklaşık 200-30 °C’ye ısıtılmış kızgın buhar (superheated steam), bir kompresör yardımıyla yüksek basınç altında boruların içerisinde geçerek, kurutulacak malzemenin sıcak boruyla teması sağlanarak, malzemedeki su buharlaştırılarak giderilmektedir (Wilson vd., 1992; Karthikeyan vd., 2009). Kızgın buhar ortamında gerçekleşen kurutma işleminde, malzemenin hava veya başka bir kurutucu gaz ile kurutulması sırasında uzaklaştırılan nem buharları (su veya sıvı) yığın gaz akımına ulaşmak için durgun bir gaz filminde difüzenmektedir. Gaz filmi, kütle aktarımına karşı bir direnç göstermektedir bu sebeple kuruma hızı nem buharının difüzyon hızına bağlı olarak değişmektedir. Eğer kurutma ortamında gaz, nem buharının yerini alırsa, buhar fazındaki kütle aktarımına olan

direnç yok sayılır ve kurutma hızı yalnızca ısı aktarım oranına bağlı olmaktadır. Kurutucu akışkanın sıcaklık ve kütle akış oranına göre nem buharındaki kuruma hızları daha büyüktür (Chu vd., 1953). Şekil 3.8’de akışkan yataklı kızgın buhar ortamındaki kurutma teknolojisi gösterilmektedir. Bu kurutma işleminde termal verimlilik yüksektir ve nemin sisteme geri kazanılması kolaydır. Kurutma maliyeti düşük, patlama ve yanma riski bulunan malzemeler için uygun bir kurutucu olduğu için, tekstil ve kimya sanayilerinde kullanılmaktadır.



**Şekil 3.8.** Akışkan yataklı kızgın buhar ortamında kurutma teknolojisi ve endüstriyel uygulaması (Hacıfazlıoğlu, 2019)

### 3.2. Kurutmanın Genel Prensipleri

Katı maddedeki toplam nem miktarı ya katı madde yüzeyinde absorblanmış ya da katı madde içerisinde bulunan kapilerde hapsedilmiş iki şekilde bulunan suyun toplamıdır. Katı madde içerisindeki nem, katı yapısına ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Kurutma işleminde, ısı enerjisi yardımıyla kurutulacak maddenin içindeki suyun (ya da organik sıvının) buharlaşması için gerekli olan latent buharlaşma ısısı oluşturulmaktadır. Isı aktarımı sonucunda buharlaşan suyun uzaklaştırılması, madde yüzeyinden kurutucu havanın içine difüzyonuyla sağlanmaktadır. Sıvıyı uzaklaştırmak için tercih edilen buharlaştırma yöntemi genel olarak sıcak gazlar veya hava yardımıyla taşınır. Gazların nemliliklerini tayin etmek için, gazlarda bulunan sıvı alma özelliğinden yararlanılmaktadır (McCabe ve ark., 1993; Coulson ve Richardson, 1991).

#### 3.2.1. Nemlilik

Buharlaştırma prosesinde çoğunlukla buharlaştırılacak materyal su, taşımaya yardımcı gaz ise havadan oluşmaktadır. Hava kullanılan kurutucuların tasarımında, su-hava prosesinin özelliklerinin çok iyi bir şekilde bilinmesi gerekmektedir.

Kuru havanın birim kütlesi başına suyun kütlesi olarak adlandırılan nemliliğe aynı zamanda, havanın mutlak nemi de denilmektedir. Denklem 3.1’de toplam sabit basınçtaki havanın nemi, karışımdaki su buharının kısmi basıncına bağlı olarak verilmiştir:

$$H = \frac{18P_s}{29(P_t - P_s)} \quad (3.1)$$

H : Nemlilik miktarını,

P<sub>t</sub> : Toplam basıncı,

P<sub>s</sub> : Suyun kısmi basıncıdır.

Denklem 3.2’de ise nemliliğin, mol fraksiyonuna (y) göre değişimi verilmiştir:

$$y = \frac{H/18}{\frac{1}{29} + \frac{H}{18}} \quad (3.2)$$

Doygun buhar, aynı sıcaklıkta sıvının gazda bulunan buharı ile denge halinde bulunduğu durumu olarak tanımlanmaktadır. Doygun buhara ait buharın kısmi basıncı ile aynı sıcaklıkta bulunan suyun buhar basıncı karşılıklı olarak eşittir. Bu nem ise doyguluk nemi olarak bilinir ve Denklem 3.3’deki gibi gösterilmektedir;

$$H_s = \frac{18P_s^0}{29(P_t - P_s^0)} \quad (3.3)$$

H<sub>s</sub> : Doygunluk nemi,

P<sub>s</sub><sup>0</sup> : Suyun buhar basıncıdır.

Denklem 3.4’te gösterilen ve mutlak nemin doyguluk nemine oranına % nemlilik oranı denilmektedir.

$$\%H = \frac{H}{H_s} 100 \quad (3.4)$$

Relatif nemlilik ise Denklem 3.5’te gösterimiştir. Buharın kısmi basıncının, aynı sıcaklıktaki suyun buhar basıncına oranına relatif nemlilik denilmektedir.

$$H_R = \frac{P_s}{P_s^0} 100 \quad (3.5)$$

Mutlak nem, nemli havanın ısıtılıp soğutulması ile değişmez. Bunun sebebi, herhangi bir sıcaklıktaki kuru havanın birim kütlesindeki su buharı miktarını ifade eden mutlak nemin, havanın sıcaklık derecesine bağlı olmamasıdır. Havanın bağıl (relatif) nemi ise havanın basıncına ve sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Havanın bağıl nemi 0 ise; bu hava tamamen kurudur hiçbir şekilde sıvı içermezken, havanın bağıl nemi %100 ise; hava su buharı ile doygundur.

Nemli havanın soğutulması ile havanın içindeki su buharının yoğunlaşmaya başladığı ilk sıcaklık noktasına çiğlenme noktası denilmektedir. Havanın bileşim ve basıncının sabit kalması şartıyla soğutma işlemi gerçekleşmektedir. Bağıl nem miktarının donma noktasına erişmesi ise havanın soğutulmasıyla sağlanmaktadır. Nemli havanın içerdiği su miktarına bağlı olarak, bu havanın hangi sıcaklık derecesinde doyma noktasına ulaşacağı değişmektedir.

Buharlaşmanın oluşması için nemli bir havanın su yüzeyi ile temas ettiği anda suyun sıcaklığının çiğlenme noktasının üzerinde bir derecede olması gerekmektedir. Bu olaylar meydana gelirken suyun sıcaklığı havanın sıcaklığının altına düşer ve havadan suya doğru bir ısı transferi gerçekleşir. Su ve hava arasında oluşan denge sıcaklığının ardından suyun ulaştığı sıcaklığa yaş termometre sıcaklığı denilir. Aynı zamanda, kuru termometre sıcaklığı ve nem oranında bulunan havanın, basınç sabit kalmak şartıyla nem verilerek adyabatik olarak duyma durumuna getirilmesi sırasında elde edilen sıcaklık olarak da tanımlanmaktadır.

Havanın farklı sıcaklıklardaki mutlak nem, bağıl nem veya diğer özelliklerini kuru termometre sıcaklığı ve yaş termometre sıcaklığı yardımıyla hava-su için hazırlanan nem diyagramından bulunabilmektedir (McCabe ve ark., 1993; Treybal, 1981; Coulson ve Richardson, 1991).

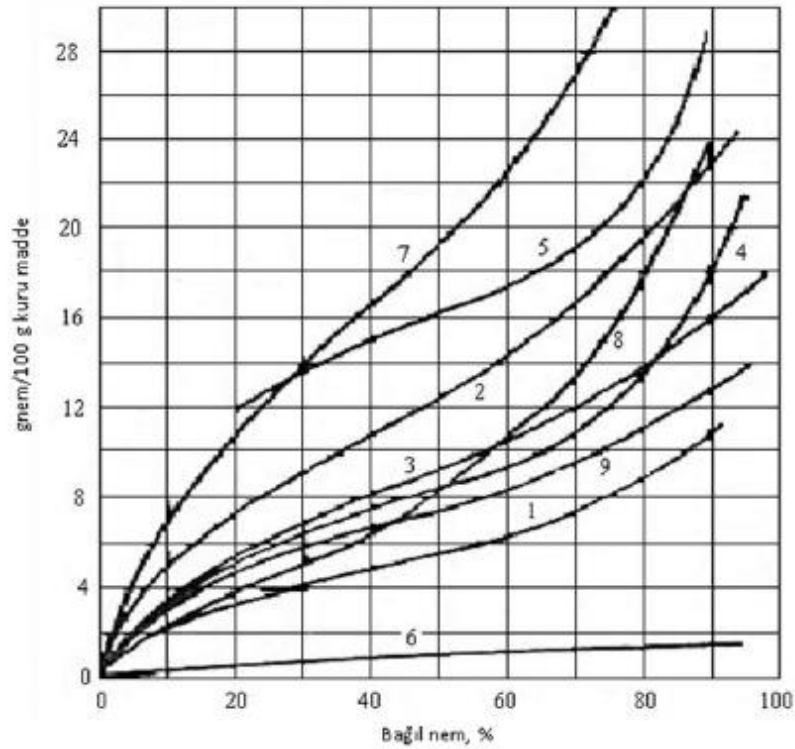
### **3.2.2. Sıvı-Gaz Dengesi**

Sıcaklık yardımıyla katı madde içerisinde bulunan nem, katının ve nemin yapısına bağlı olarak sistem üzerinde buhar basıncı oluşturmaktadır. Nem içeren katı belli bir oranda nem ve sıcaklık kapsayan hava ortamına maruz kalırsa, katının yüzeyinde bulunan sıvının kısmi basıncı ile gazın ki birbirine eşit oluncaya kadar ya gazdan nem absorblanır ya da katı madde nem kaybına uğrar. Havanın sıcaklığı ve nemliliği sabit olduğu için hava akımının özellikleri değişmez ve sistemin dengeye gelmesi için yeterli temas süresi uzun olmaktadır. Katı madde bu şartlara bağlı olarak belirli bir miktarda nemlenir ve katının hava ile daha fazla temas etmesi bu duruma etki etmez. Katı ile gaz arasında bir denge kurulması durumunda katı içerisinde bulunan neme ise denge nemi denilir.

Katı maddelerde denge neminin miktarı, katının dengeye nasıl yaklaştığına göre değişiklik gösterir. Veriler desorpsiyon (nemli katı maddenin kuruması) ve sorpsiyon (kuru maddenin su toplaması)'a göre değişmektedir. Kurutma hesaplamalarında genellikle dikkate alınan değer, desorpsiyon değeridir. Kuruma işlemi, katı madde içinde denge neminden daha fazla nem var ise denge eğrisinde belirtilen denge nemi miktarına ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Fakat aksi bir durum söz konusu ise katı madde denge eğrisinde belirtilen denge nemi miktarına ulaşıncaya kadar nemlenmeye devam eder. Denge nem miktarının sıfır olması için, havanın nemliliği sıfır olmalıdır.

Katı maddenin cinsine göre, belirli bir orandaki % nemlilik değeri için denge nemi değişiklik göstermektedir. Genellikle katının sıvı içeriği ve gazın bağıl nemi arasındaki ilişkiye göre nem

içeren katı maddelere ait denge grafikleri elde edilir. Suda çözünemeyen gözeneksiz katılarda (kum gibi) havanın tüm nemlilik ve sıcaklık değerleri sıfıra yaklaşıktır. Denge nemlerinin, deri, tekstil ve odun gibi organik materyallerde büyük farklılıkları vardır. Şekil 3.9’da farklı katılara ait denge nemi grafikleri verilmiştir. Bu grafiğe göre, denge eğrileri %100 bağıl nem doğrusunu kesene kadar uzatılırsa bu şekilde bulunan nem miktarı katı maddenin sahip olabileceği en düşük nem miktarıdır. Doymuş hava ile dengede olan katı maddenin sahip olabileceği en düşük su konsantrasyonuna bağıl nem denilir. Higroskopik madde ise; bağıl nem içeren maddelerdir. Katı içerisinde bulunan denge neminden daha fazla miktarda olan nem miktarına da serbest nem adı verilir. Serbest nem, katı içerisinde bulunan denge nemi ile toplam nem arasındaki farkı vermektedir (McCabe ve ark., 1993; Treybal, 1981; Coulson ve Richardson, 1991).



**Şekil 3.9.** 25 °C’de bulunan farklı katılara ait denge nemi eğrileri; 1. kâğıt (yeni baskı), 2. yün (örülmüş), 3. nitroselüloz, 4. ipek, 5. kösele (bitkisel dibağ), 6. kaolin, 7. tütün yaprağı, 8. sabun, 9. tutkal. (McCabe ve ark., 1993)

### 3.3. Kuruma Hızları ve Su Transfer Mekanizması

Nem içeren katı maddeler arasında aynı anda gerçekleşen kütle ve ısı transferlerini kapsayan kurutma ortamında genellikle sıcak hava kullanılmaktadır. İlk olarak gaz fazı yığın akımından konveksiyon yardımı ile katı yüzeyine aktarılan ısı, ardından da kondüksiyonla katı bünyesine transfer olur. Aynı anda katı yüzeyinden gaz fazı yığın akımına buharlaşması ile kütle transferi de

oluşur. Transfer olan ısıнын tamamı ya da bir kısmı buharlaşmaya yardımcı olurken, kalan kısmı ise katı bünyesinde duyulur ısı şeklinde birikir.

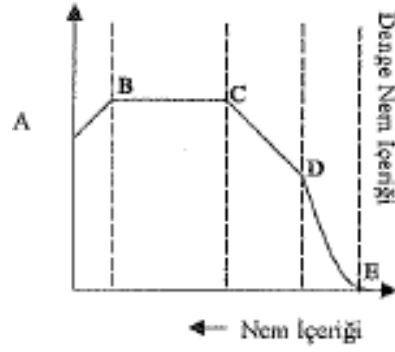
Isı transferi, endüstriyel kurutma cihazlarında kullanılan metoda göre farklılıklar gösterebilir. Bu tür cihazlarda ısı transferi konveksiyon, radyasyon, yayılımı ya da bunların farklı şekillerde bir araya gelmeleriyle oluşur. Kurutucu tiplerinden olan mikrodalga ve dielektrik kurutmada yüksek frekans sebebiyle ısı ilk önce katının iç kısımlarında oluşur ardından katının bünyesinde ve yüzeyinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olmaktadır.

Geleneksel bir yöntem olan güneşte kurutmanın olumsuz bir kurutma tipi olması; açık alanda kurutulması ve kurutma zamanının fazla olmasından dolayı toz, toprak, yağmur, çeşitli böceklerin zararına uğramak ile yılın her mevsiminde kurutma işleminin mümkün olmaması gibi durumlar ile açıklanabilir. Endüstriyel boyutta kullanılan sıcak havanın uygulandığı kurutma sistemlerinden olan mikrodalga ve infrared kurutucu tipleri, kurutma zamanının düşük olmasından dolayı yapılan çalışmalar da bu yöntemlere olan ilgiyi arttırmıştır. Ayrıca bu kurutucu tiplerinin bir diğer avantajı ise, yüksek sıcaklıklarda bozulabilen bir dokuya sahip gıda maddelerinin bu metotlar sayesinde rahatlıkla kurutulabilmesidir (Chua ve Chou, 2005; Schiffmann, 1995; Ginzburg, 1996).

Kuruma esnasında kütle transferi, katı bünyesinde sıvı veya buhar halinde yüzeye ya da gaz fazı yığın akımına gerçekleşir. Böylece katı bünyesinde bulunan sıvının hareketinde bir konsantrasyon gradyenti meydana gelir. Kurutma işleminde kullanılacak katılar gözenekli ve gözeneksiz olabilecekleri gibi higroskopik ya da non-higroskopik yapıda olabilirler. Kütle ve ısı proseslerini yönlendiren faktörler, kuruma işlemi sırasında kuruma hızlarını belirleyen parametrelerdir.

### **3.3.1. Kurutma Hızları**

Kurutma işleminin asıl amacı katı yüzeyindeki ve katı bünyesindeki serbest suyun uzaklaştırılmasıdır. Kurutma hızı eğrileri, katı materyalin nem içeriğinin zamanla değişmesi sonucunda meydana gelir. Bu eğriler, katı materyalin cinsi ve yapısına göre değişiklik gösterebilir. Sıcaklığı ve nem içeriği belirli olan hava akımı, kurutulacak olan nemli katı maddenin üstünden geçirildiğinde ısı enerjisinin bir kısmı madde yüzeyinin sıcaklığını yükseltirken, diğer kısmı latent buharlaşma ısısı olarak kullanılır. Şekil 3.10'da kuruma hızı eğrisi gösterilmiştir. Dört bölgeden oluşan eğride, AB bölgesine ayarlanma süreci denir. Burada katı maddenin sıcaklığı havanın sıcaklığından düşüktür, bu nedenle kurutma hızı da düşüktür. BC sabit kuruma hız bölgesidir. CD ve DE ise azalan hız periyodunu göstermektedir. Bir doğru şeklinde olan CD 1. azalan hız, hafif eğrisel olan DE ise 2.azalan hızı göstermektedir (Rankel vd., 1986).



Şekil 3.10. Tipik kuruma hızı eğrileri (Rankel vd., 1986)

### 3.3.2. Sabit Hız Periyodu

Sabit hız periyodunda, katı maddenin nem içeriği sabit bir hızla değişmektedir. Katının yüzeyini doymun hale getirmek için, sabit hız periyodunda bulunan katının bünyesindeki suyun hareketi yeterli derecede hızlıdır. Bu şartlara sahip kurutma işleminde, katı yüzeyine yapılan ısı transferi ile kuruma hızının kontrolü sağlanmış olur. Kurutma işlemi, katı maddenin yüzeyinden buharlaşan su buharının sabit bir hava filmi içerisinde geçerek difüzyonla kütle transferi şeklinde gerçekleşmesidir. Bu esnada yüzey sıcaklığının sabit kalması için ısı ve kütle transfer hızları dengeye ulaşmalıdır. Sabit hız periyodunda katı maddenin yapısından bağımsız olarak, nem uzaklaştırma işlemi gerçekleşir.

Katı maddenin yüzeyinde bulunan suyun buharlaşması sırasında harcanan latent buharlaşma ısılarından dolayı, katı maddenin yüzey sıcaklığının kurutucu havanın bulunduğu sıcaklıktan düşük olduğu görülür. Kurutucu havanın sıcaklığı ile kuruma yüzeyi arasında farklılık gerçekleşince, havadan kuruma yüzeyine enerji transferi olmaktadır. Sağlanan enerji aktarımı sayesinde yüzeydeki buharlaşma artar. Havadan transfer edilen ısı enerjisi tamamen buharlaşma latent enerjisi olarak harcanınca, kuruma yüzeyi varlığındaki buhar basıncı sabitleşir, aynı zamanda kurumakta olan katı maddenin yüzey sıcaklığı da değişmez. Yüzey sıcaklığının sabitleşmiş haline yaş hazne sıcaklığı adı verilir ve buharlaşma için harcanan ısı enerjisinin transfer hızı, buharlaşma hızına eşit olur. Katı maddenin yüzeyinde gerçekleşen ısı transferi yalnızca konveksiyonla yapılmaktadır. Sabit hız periyodunun kararlı duruma ulaşması için, yüzey sıcaklığı sıcak havanın yaş termometre sıcaklığına ulaştıktan sonra kuruma hızının sabit kalması şartıyla sağlanmaktadır.

Katı maddeye ısı transfer hızı ile yüzeyden kütle transfer hızı arasında dinamik bir dengeyin meydana gelmesi ile sabit hız periyodunda buharlaşma işlemi ısısının sıcak bir gazdan sağlanması da gerçekleşmiş olur. Buna bağlı olarak Denklem 3.6 oluşturulmuştur.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{h_t A \Delta T}{\lambda} = k_g A (P_s - P_s^0) \quad (3.6)$$

Burada,

$\frac{dw}{dt}$  : Suyun buharlaşma hızı,

$h_t$  : Isı transfer katsayısı,

$A$  : Isı ve kütle transferi için ara yüzey alanı,

$\Delta T$  : Sıcaklık farkı,

$k_g$  : Kütle transfer katsayısı,

$\lambda$  : Buharlaşma gizli ısı,

$P_s$  : Suyun hava içerisindeki kısmi basıncı,

$P_s^0$  : Suyun katı yüzeyindeki buhar basıncıdır.

Sabit hız periyodunda kurutma hızı; akış hızı, havanın nemliliği ve sıcaklığa bağlıdır. Şekil 3.10'da BC periyodu kuruma hızının en yüksek olduğu süreçtir, burada kuruma işlemi hazne sıcaklığındaki kurutucu havanın nem içeriği ile katı maddenin nem içeriği arasındaki farkı ile belirlenen sabit hızla devam etmektedir. Sabit hız periyodunda, buharlaşma hızına denk bir difüzyon hızı ile partikül içerisindeki sıvı yüzeye difüzlenerak katı madde yüzeyinin sıvı filmi sürekli olarak yenilenmiş olur (Moyers ve Baldwin, 1999).

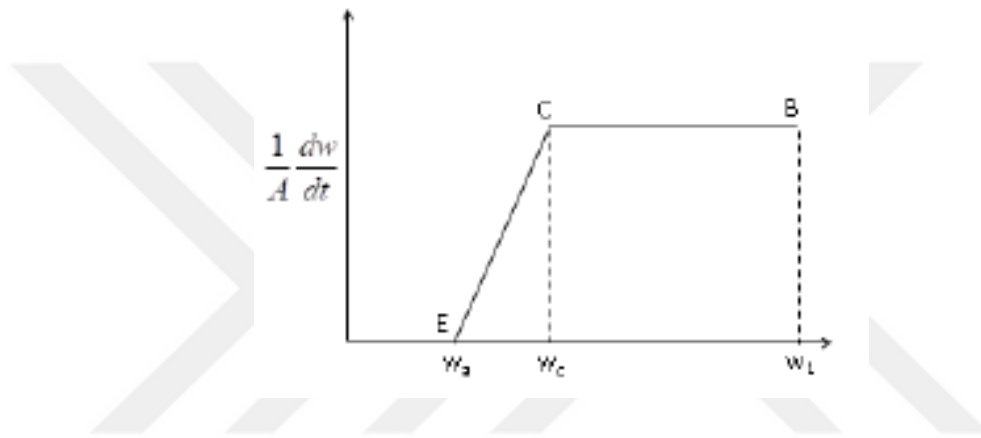
### 3.3.3. Azalan Hız Periyodu

Kuruma sabit hızda devam ederken, kurumadan dolayı katı maddenin nem içeriği azaldığı için, partikülün iç kısmında olan nem dış yüzeye difüzlenerak devamlı bir sıvı filmi oluşturmaz. Kuruyan katı maddenin dış yüzeyinde yer yer kuru noktalar oluşmaya başlar. Kuruma hızının düşmeye katı maddenin yüzey sıcaklığının artmaya başladığı, kritik nem içeriği denilen C noktasından itibaren azalan hız periyodu başlar. Şekil 3.10'da CD boyunca kuruma hızının sürekli azaldığı bu sürece birinci azalan hız periyodu denir. Azalan hız periyodunun sonuna doğru kuruma hızı denge nemi noktasında sıfıra yaklaşmaktadır. Azalan hız periyodunda sabit hız periyoduna göre geçen zaman daha fazladır. Katının içerdiği nem miktarı azalan hız periyodunun sonunda ise en düşük seviyeye ulaşmış olabilir. Azalan hız periyodunda katının içindeki değişiklikler, kuruma hızına etki eden değişkenlerdir.

Şekil 3.10'da D noktasından itibaren katı maddenin dış yüzeyinde oluşan kuru noktalar fazlalaşmaya başlar ve en dışta kuru bir katman meydana gelir. Kuruma hızının D noktasından itibaren devamlı bir düşüş göstermesinin nedeni, az ısı geçirgenliğine sahip olan kuru katmanın oluşması ve yüzeye çıkacak sıvı difüzyon hızının azalmasıdır. İkinci kritik nem içeriği noktası olan D noktasından sonra oluşan DE bölgesine ise ikinci azalan hız periyodu denir. Bu periyotta, buharlaşma hızını, iç katmanlardan yüzeye difüzlenerak nemin difüzyon hızı etkiler. Partiküllerin yüzey sıcaklıkları daha da artar, bunun sebebi kuruma (buharlaşma) hızı azaldıkça havadan aktarılan ısı enerjisinin çok az bir kısmı buharlaşma latent ısısı olarak kullanılmasıdır. Kurutucu

havanın içerisindeki nemin buhar basıncı ile katı maddenin içerisindeki nemin buhar basıncı denk olunca kuruma son bulur, buna göre Şekil 3.10'da E noktasına ulaşıldığında kuruma durmuş olur. Bu bölgede buharlaşma olmadığı için gönderilen ısı, buharlaşma latent ısısı olarak harcanılmaz; verilen ısı ürün sıcaklığını artırır ve kuruyan katı maddenin sıcaklığı kuru hazne sıcaklığına yani kurutucu havanın sıcaklığına yaklaşır. Kurutucu havanın sıcaklığı arttıkça, katı maddenin nem içeriği daha da azalmaktadır (Rankel vd., 1986).

Şekil 3.11'de azalan hız periyodunun ilk aşamasında nem içeriği ve kuruma hızı arasında doğrusal bir ilişkinin varlığı CE eğrisinde gösterilmektedir. Matematiksel eşitliği ise Denklem 3.7'de verilmiştir.



**Şekil 3.11.** Sabit ve azalan hız periyodunda kuruma hızları (Rankel vd., 1986)

$$\frac{1}{A} \frac{dw}{dt} = -n(w - w_e) \quad (3.7)$$

Burada;

w : Toplam nem miktarı,

w<sub>e</sub> : Denge nemi,

n : Kuruma hız eğrisinin eğimidir.

### 3.4. Kurutma Teorileri

Nem içeriğine sahip katı maddelerin kuruma hızları genellikle birbirlerinden farklı iki veya bazen de üç bölümden oluşmaktadır. Gaz film transfer katsayısı kontrolü altında, sabit kuruma hız periyodunda katı madde yüzeyindeki suyun hava akımına buharlaşması gerçekleşir. Azalan hız periyodunda ise su buharının katı madde yapısından yüzeye transfer mekanizması daha farklıdır. Genel olarak, gözeneksiz katı maddeler düzenli bir nem dağılım grafiğine sahiptirler. Kurutma teorilerinde difüzyon ve kapiler teori olmak üzere iki ayrı transfer modeli vardır.

### 3.4.1. Difüzyon Teorisi

Kurumanın yavaş gerçekleştiği materyallerdeki karakteristik davranışa difüzyon denilir. Katı madde yüzeyinden havaya sıvı buharının kütle aktarımı çoğunlukla ihmal edilir ve katı maddedeki difüzyon bütün kuruma hızını denetler. Bu sayede, katı madde yüzeyindeki nem içeriği ya denge değerindedir ya da denge değerine yaklaşıktır. Sıcaklık ile difüzyon katsayısı doğru orantılı olduğundan, katı maddenin sıcaklığıyla kuruma hızı da orantılıdır.

Difüzyon teorisinde, katı maddenin iç kısımlarındaki sıvının yüzeye doğru hareketi katı içi difüzyonla sağlanır. II. Fick kanununa uygunluk gösteren sıvı ya da buharların transferinde, bu tip difüzyon kontrollü kütle transferinin olduğu varsayılmaktadır. Denklem 3.8’de II. Fick kanununda tek yönlü difüzyonun matematiksel ifadesi verilmiştir (Devahastin, 2000).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3.8)$$

Burada,

C : A ve B’ den oluşan karışımın içindeki bileşenlerden herhangi birinin bileşimi,

$D_{AB}$  : Moleküler difüzyon katsayısı,

z : Difüzyonun gerçekleştiği yöndeki uzaklıktır.

Denklem 3.8’ in yardımıyla yassı tabakaların kurutulmasında azalan hız periyodu eşitliği olan Denklem 3.9 elde edilir.

$$\frac{w-w_e}{w_0-w_e} = \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-a\beta} + \frac{1}{9} e^{-9a\beta} + \frac{1}{25} e^{-25a\beta} + \dots \right) \quad (3.9)$$

Burada;

$$\beta = \frac{D_L \cdot t}{z^2}$$

$$a = \left( \frac{\pi}{2} \right)^2, \text{dir.}$$

w : t anındaki nem içeriği,

$w_0$  : Başlangıç nem içeriği,

$w_e$  : Denge nem içeriği,

$D_L$  : Sıvının katıdaki difüzyon katsayısıdır.

Denklem 3.9 katı maddenin başlangıçta düzenli bir nemliliğe sahip olması ve kurumanın her iki yüzeyden geçmesi durumunda kullanılır. Kurumanın tek bir yüzeyden geçtiği durumda difüzyon yolu iki katı olarak alınmalıdır. Denklem 3.10 kuruma zamanı çok uzun süren işlemler için verilmiştir.

$$\frac{w-w_e}{w_0-w_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-a\beta} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'un diferansiyeli alınmış hali Denklem 3.11'de gösterilmiştir.

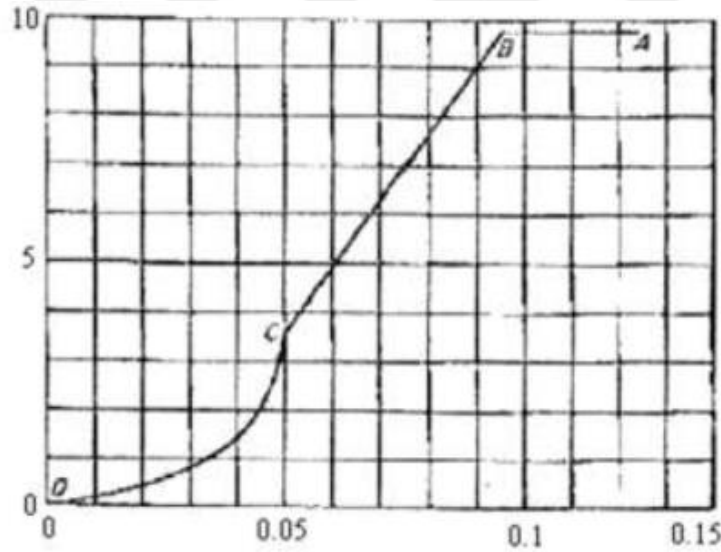
$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\pi^2 D_L}{4z^2} (w - w_e) \quad (3.11)$$

Denklem 3.11'in integralinin alınmasıyla Denklem 3.12 olan, katı içi difüzyon kontrolü altında kuruma için gerekli zaman hesaplanabilir.

$$t = \frac{4z^2}{\pi^2 D_L} \ln \frac{8(w - w_e)}{(w_0 - w_e)} \quad (3.12)$$

### 3.4.2. Kapiler Teori

Gözenekli katı maddelerde, katı içindeki sıvının yüzeye hareketi, difüzyonla kütle aktarımından daha çok kapiler hareketle olur. Kapiler teoriye göre katı maddelerin sahip olduğu kanal ve gözenekler, farklı büyüklük ve şekildedir. Bu durumda katı madde gözeneklerinde bulunan sıvı, kanallar sayesinde yüzeye ulaşır. Şekil 3.12'de gözenekli katılara ait tipik kuruma eğrisi verilmiştir. Aynı zamanda bu tür katılar için Denklem 3.13 geçerlidir (Perry ve Green, 1984).



Şekil 3.12. Gözenekli katı maddelere ait tipik bir kuruma hızı eğrisi (Perry ve Green, 1984)

$$t_f = \frac{\rho_s d \lambda (w_0 - w_e)}{h_t (t - t_s)} \ln \frac{(w_0 - w_e)}{(w - w_e)} \quad (3.13)$$

Burada;

$t_f$  : Azalan hız periyodundaki kuruma zamanı,

$\rho_s$  : Katının yoğunluğudur.

## 4. MATERYAL VE METOT

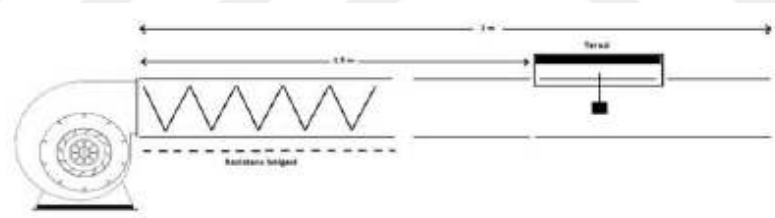
Tez çalışmasında kullanılan tatlı su alg örnekleri Elazığ Yedigöze yöresinden ve havuz suyundan temin edilmiştir. Yedigöze yöresinden temin edilen alg örneğini Alg-1, havuz suyundan temin edilen alg örneğini de Alg-2 olarak adlandırılmıştır.

### 4.1. Alg Temini ve Hazırlanışı

Temin edilen algler santrifüjlendikten sonra, başlangıç nem içeriği infrared kurutucu da belirlendi. Başlangıç nem içerikleri sırasıyla, Alg-1 örneğine ait %89, Alg-2 örneğine ait ise %92 olarak ölçüldü. Başlangıç nem içeriği belirlendikten sonra, tepsili kurutucu deneylerinde kullanılmak üzere örnekler +4 °C’de sızdırmaz kapaklı cam kaplarda muhafaza edildi.

### 4.2. Tepsili Kurutucu Deneyleri

Tepsili kurutucu deney düzeneğinde, terazi bölmesi fandan 1,5 metre uzaklıkta olup anlık olarak ölçüm yapmaktadır ve toplamda 2 metre uzunluğa sahiptir. Şekil 4.1. ve Şekil 4.2’de tepsili kurutucu deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tepsili kurutucu deney seti



Şekil 4.2. Tünel tipi kurutucu görüntüsü. (1-Fan 2-Rezistans bölgesi 3-Hidro dinamik geçiş bölgesi 4-Terazi Bölgesi 5-Terazi 6-Kontrol paneli 7- Dijital Termometre 8-Bilgisayar)

Nemli alg örnekleri, 1,3 cm çapında 1 cm uzunluğunda poliamitten yapılmış bir halka içerisine sığacak kadar konularak tepsili kurutucunun terazi kısmındaki yerine yerleştirildi. Yapılacak olan çalışmalara göre, kurutucunun sıcaklığı ve fan akış hızı ayarlandı ve belirli zaman aralıklarında (10 dk) teraziden örneğin ağırlığı ölçüldü. Kurutma işlemi son iki ağırlık arasındaki fark 0,01 oluncaya kadar devam edildi.

1,5 m uzunluğundaki sistemde sıcak hava, rezistans bölgesinden fandan çıkan havanın geçirilmesiyle elde edilmiştir. Havanın sıcaklığını ve fan hızını ayarlamak için rezistanslardan gönderilecek elektrik akım şiddeti bir elektriksiz kontrolörle ayarlanmıştır. Deneysel çalışmalar 0,5-1,5 m/s aralığındaki hava akış hızları ve 40-60 °C sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma deneylerinin yapıldığı oda şartları atmosfer basınç ve %25 relatif nem oranlarıdır. “HYGRO Thermometer” marka cihaz ile relatif nem ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

### 4.3. Alg Örneklerinin Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, tatlı su alglerinin tepsili kurutucuda ince tabaka kurutulmasına ait deneysel veriler literatürde mevcut olan bazı kuruma model eşitlikleriyle kıyaslanmıştır. Bu amaçla yedi adet yarı-ampirik kuruma model eşitliği ve matematiksel ifadeleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablo 4.1’deki MR terimleri nem oranını temsil edip Denklem 3.10’da tanımlanan boyutsuz ya da ayrılabilir nem oranı  $[(w-w_e)/(w_0-w_e)]$  olarak da adlandırılmaktadır. Deneysel nem oranı değerleri ( $MR_{\text{deneysel}}$ ) model nem oranı değerleri ( $MR_{\text{hesaplanan}}$ ) ile uyum karşılaştırılması STATISTICA programı kullanarak gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.1.** Tez çalışmasında kullanılan kuruma eğrisi modellenmesi için eşitlikler (Toğrul, H., 2006)

| Model No | Model Adı           | Model Denklemleri                     |
|----------|---------------------|---------------------------------------|
| 1        | Newton              | $MR = \exp(-kt)$                      |
| 2        | Page                | $MR = \exp(-kt^n)$                    |
| 3        | Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt)$                    |
| 4        | Logaritmik          | $MR = a \exp(-kt) + c$                |
| 5        | Difüzyon            | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ |
| 6        | Verma               | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$  |
| 7        | Two term            | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ |

### 4.4. Karakterizasyon Testleri

#### 4.4.1. Protein Analizi

Protein analizi; “FOSS Kjeltac™ 8200” protein analiz cihazı ile Kjeldahl yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kjeldahl yöntemi; proteinlerin içindeki azotu esas alarak tayin işlemi gerçekleştiren en önemli ve en sağlıklı toplam azot veya ham protein tayin metodudur. Bu yöntem;

yakma, distilasyon ve titrasyon olmak üzere 3 bölümden oluşur. Analiz sonucunda Denklem 4.6 kullanılarak % azot miktarı bulunmuştur. Azot miktarı belirli katsayı ile çarpılarak protein miktarları hesaplanmıştır (Denklem 4.7).

$$\% \text{ Azot} = \frac{(V - V_{\text{kör}}) * N * 14,007 * 100}{Mg \text{ numune}} \quad (4.6)$$

$$\text{Ham protein (\%)} = \% \text{ Azot} * 6,25 \quad (4.7)$$

#### 4.4.2. Yağ analizi

Kurutulan tatlı su alg örneklerinin yağ analizi için Şekil 4.3'te görüldüğü gibi en basit haliyle dibi yuvarlak şilifli cam balon (250 ml), soxhlet ekstraktörü (100 ml),yoğunlaştırıcı ve ısıtıcıdan oluşan bir düzenek hazırlandı. Kuru alg tartıldı ve filtre kağıdında hazırlanan alg kartuş içine bırakılarak ekstraksiyon için hazır hale getirildi. 110 ml (hekzan) alınarak bir kaynama taşı ile beraber cam balona bırakıldı. Isıtıcı çözücünün kaynama noktasına kadar ısınmasını sağlayacak şekilde ayarlandı. Çözücü buharları yoğunlaştırıcıya ulaşarak yoğunlaşıp soxhlet ekstraktörü içinde bulunan kartuşun üzerine damlalar halinde düşmesi sağlandı. Kartuş üzerindeki hekzan renksizleşinceye kadar sifon yapması beklenildi (5 sifon). Çözücü ekstrakte maddeden tamamen uzaklaştırıldıktan sonra armudi balonun tartımı yapıldı. Kullanılan düzenek Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



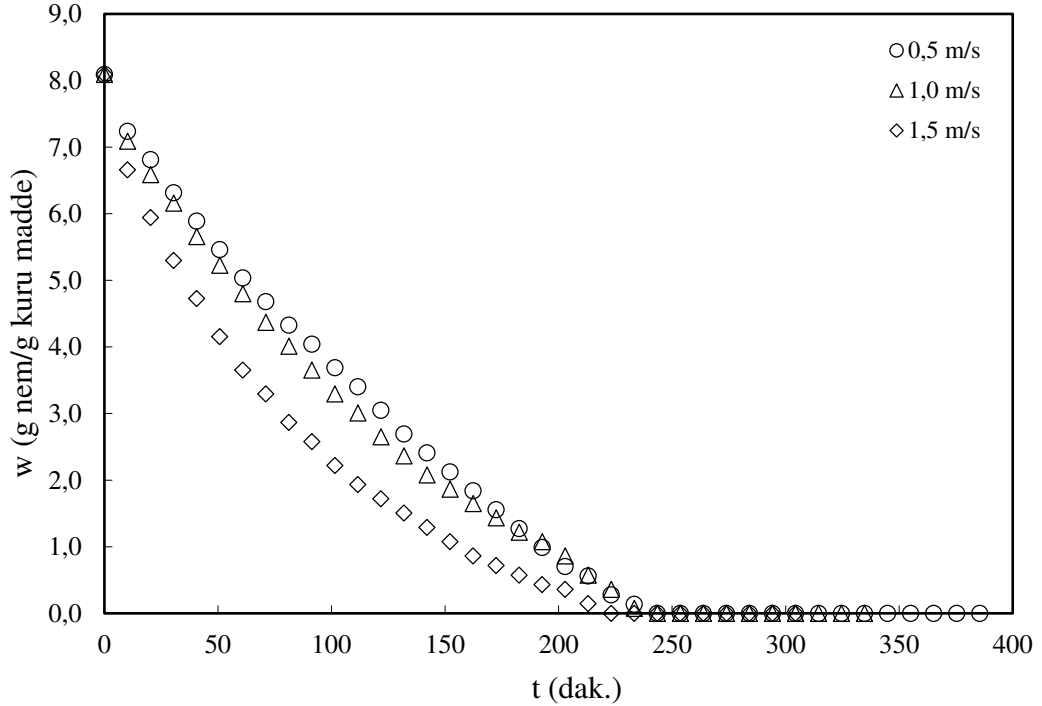
Şekil 4.3. Soxhlet deney düzeneği

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

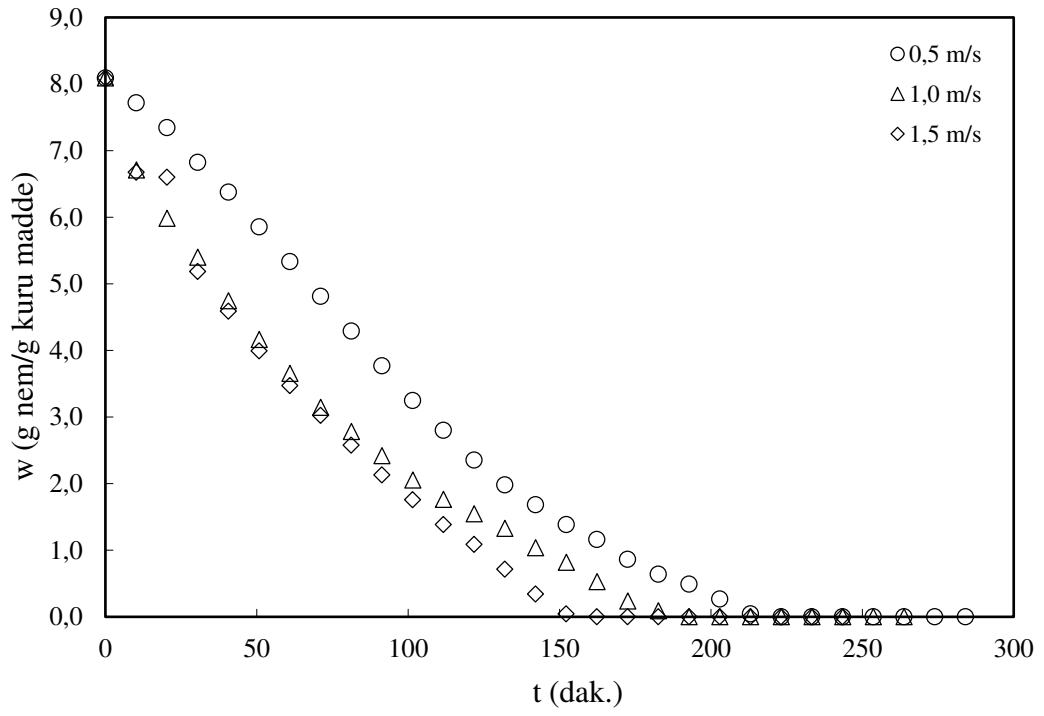
Tatlı su alglerinin kuruma karakteristiği ve modellenmesinin araştırıldığı bu tez çalışmasında, çalışılan alglerin türü Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Ahmet Kadri ÇETİN tarafından mikroskopik olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Alg-1 örneğinde; ağırlıklı olarak *Zygnema*, *Synedra* türleri görülürken, *Surirella* ve *Amphora* türlerine de rastlanmıştır. Alg-2 örneği ise, ağırlıklı olarak *Spirogyra* türü ile *Synedra* türlerini içermektedir. Tezin bu bölümünde alg örneklerine ait kuruma, kuruma hızı eğrileri irdelenmiştir. Bu kısmı takip eden alt bölümde kurutma deneylerinden elde edilen veriler model eşitlikleri ile istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

### 5.1. Alg Örneklerinin Kuruma Eğrileri

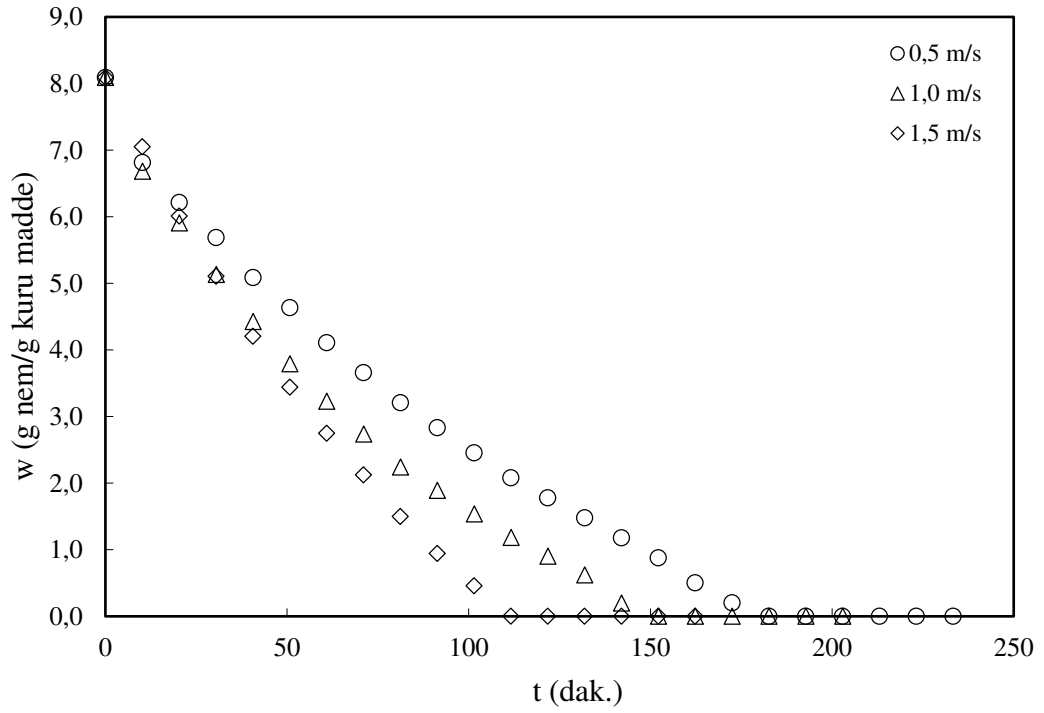
Belirli bir oranda su içeren Alg-1 ve Alg-2 örneklerinin tepsili kurutucuda çalışılan sıcaklıklarda ve hava akış hızlarında gerçekleştirilen ince tabaka kurutma deneyleri sonucunda elde edilen zaman-örnek ağırlığı verileri elde edilmiştir. Bu deneysel verilerden her bir zaman değeri için alg örneklerinin g nem/g nem kuru madde miktarı olacak şekilde nem içeriği (w) değerleri hesaplanmıştır. Çalışılan sıcaklık (40 °C, 50 °C, 60 °C) ve hava hızı (0,5-1-1,5 m/s) değerlerinde her iki alg türü için de kurutma süresi (t) - nem içeriği (w) değişimini içeren kuruma eğrileri Şekil 5.1 ve 5.6 arasında gösterilmiştir.



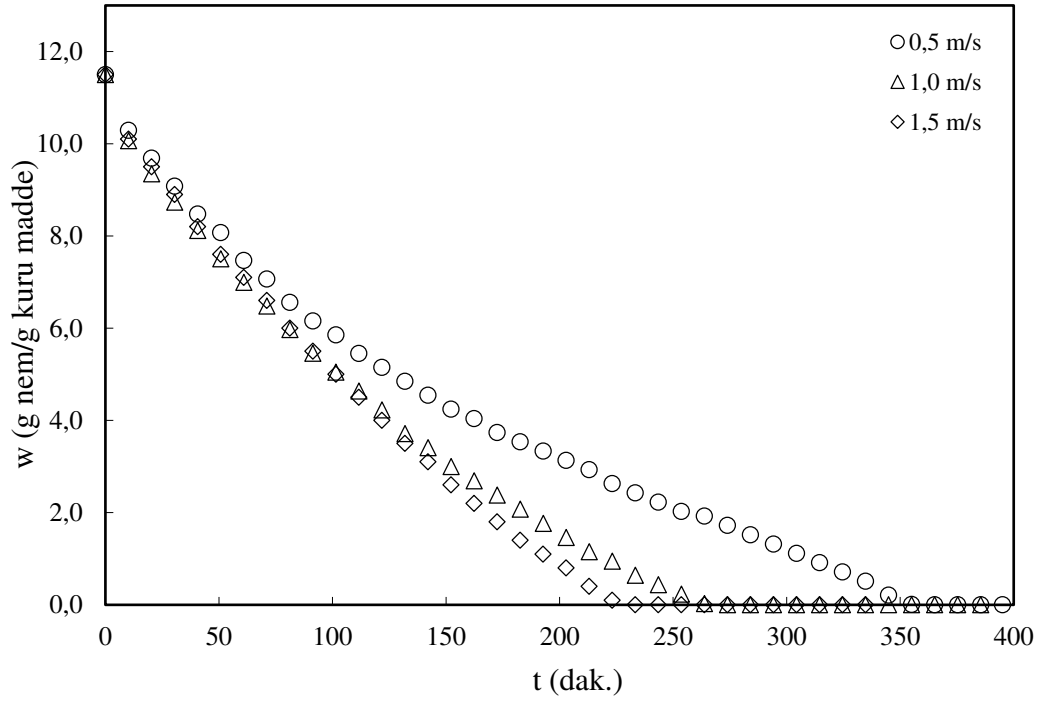
Şekil 5.1. Alg-1 örneği için 40 °C'de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri



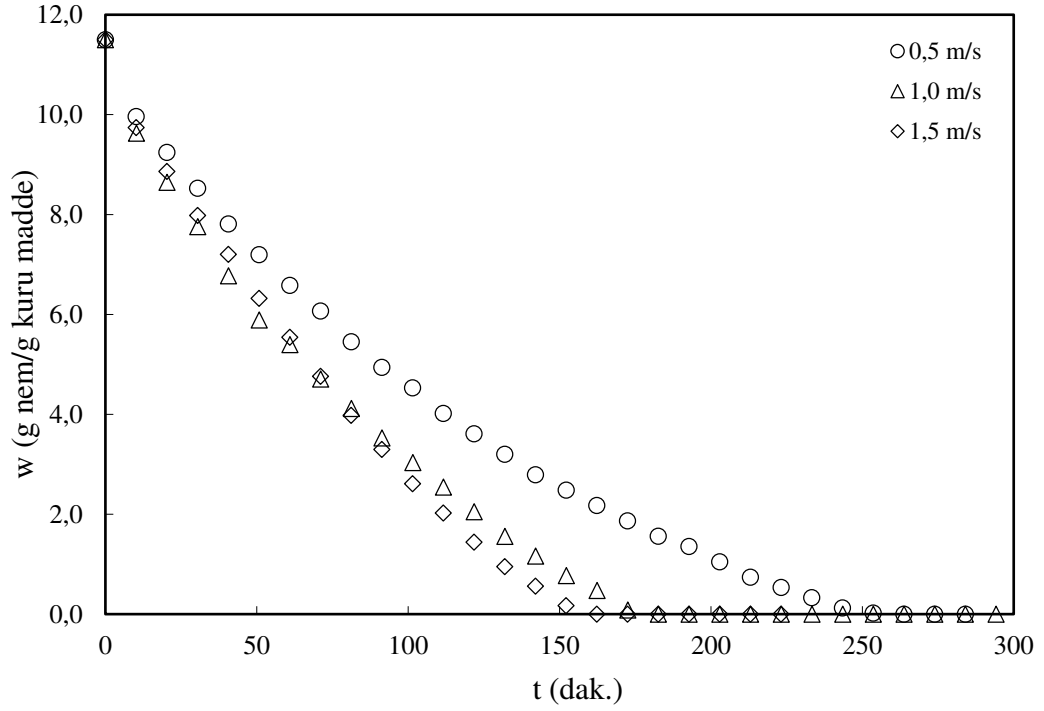
Şekil 5.2. Alg-1 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri



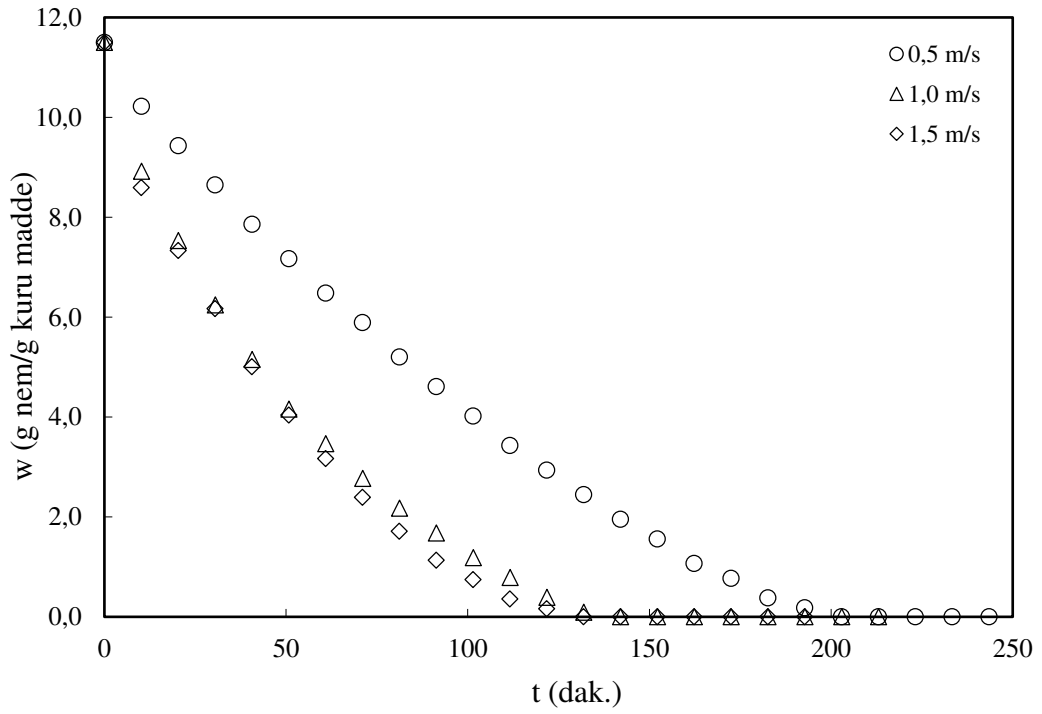
Şekil 5.3. Alg-1 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri



Şekil 5.4. Alg-2 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri



Şekil 5.5. Alg-2 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri



Şekil 5.6. Alg-2 örneği için 60 °C'de farklı hava akış hızlarındaki kuruma eğrileri

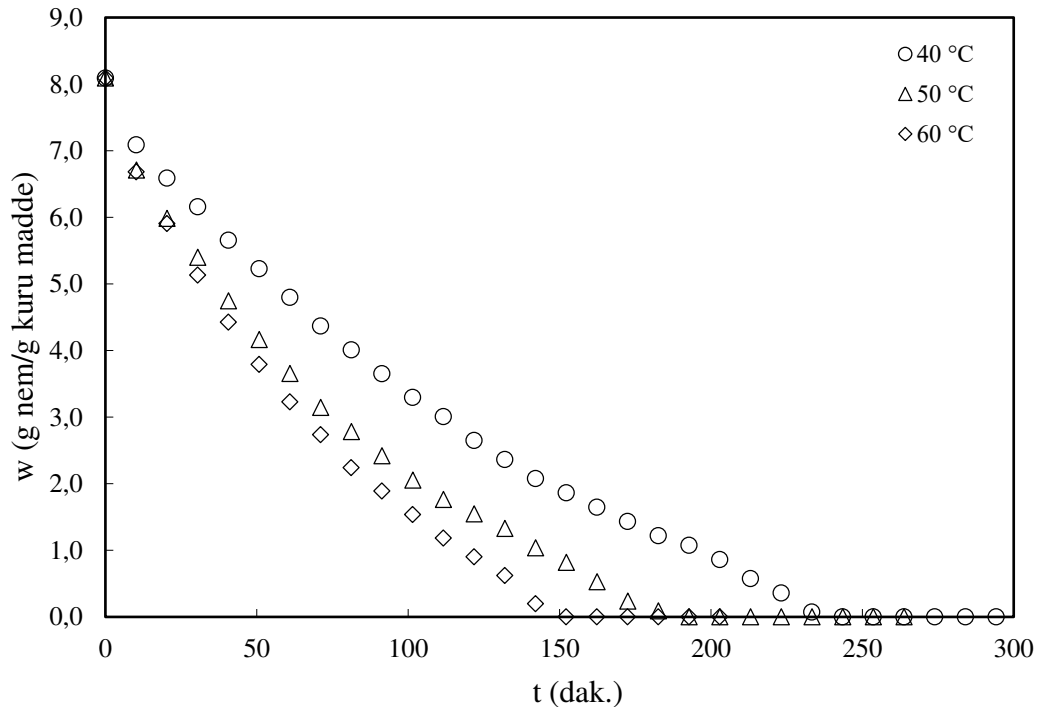
Şekil 5.1'de 40 °C'de Alg-1 örneğinin kurutma işlemindeki, deneysel verilerden hesaplanan nem içeriği değerlerinin kurutma süresi ile değişimi görülmektedir. Elde edilen kuruma eğrileri literatürde birçok gıda vb. ürünler için elde edilen tipik kuruma eğrilerine benzemektedir (Rankel vd., 1986). Şekil 5.1'den çalışılan tüm akış hızlarında başlangıç nem içeriği değerinin zamanla azaldığı ve belirli bir kurutma süresi sonunda sıfır değerine ulaştığı gözlenmektedir. 0,5 ve 1 m/s hava akış hızlarında Alg-1 örneğindeki tüm nemin uzaklaştırılması için geçen süre yaklaşık olarak 250 dakikadır. 1,5 m/s hava akış hızı değerinde ise örnekteki tüm nemin uzaklaşma süresinin azda olsa daha düşük bir değer olan 225 dak. olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, 40 °C'de kuruma olayının çalışılan aralıkta hava akış hızı ile pek fazla değişmediği söylenebilir. Şekil 5.2'de Alg-1 örneğine ait farklı hava akış hızı değerlerinde 50 °C'deki kuruma eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.2'den görüldüğü üzere, 40 °C'de elde edilen kuruma eğrilerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Belirgin bir farklılık beklenildiği gibi, tüm hava akış hızları için, örnek kuruma sürelerinin sıcaklık arttıkça azalmasıdır (0,5 m/s için 215 dak., 1 m/s için 190 dak. ve 1,5 m/s için ise 150 dak.). 60 °C'de Alg-1 örneğinin kuruma eğrilerinin görüldüğü Şekil 5.3'ten, kuruma zamanının hava akış hızıyla çok daha belirgin bir şekilde farklılaştığı anlaşılmaktadır. Daha kısa kuruma sürelerinde katı nem içeriğinin sıfırlandığı Şekil 5.3'te görülen bir başka sonuçtur (0,5 m/s için 180 dak., 1 m/s için 151 dak. ve 1,5 m/s için ise 115 dak.).

Alg-2 örneği için farklı hava akış hızlarında ve çalışılan sıcaklıklardaki kuruma eğrileri Şekil 5.4-5.6'da gösterilmiştir. Alg-2 için kuruma eğrilerinden görüldüğü üzere 0,5 m/s dışında çalışılan

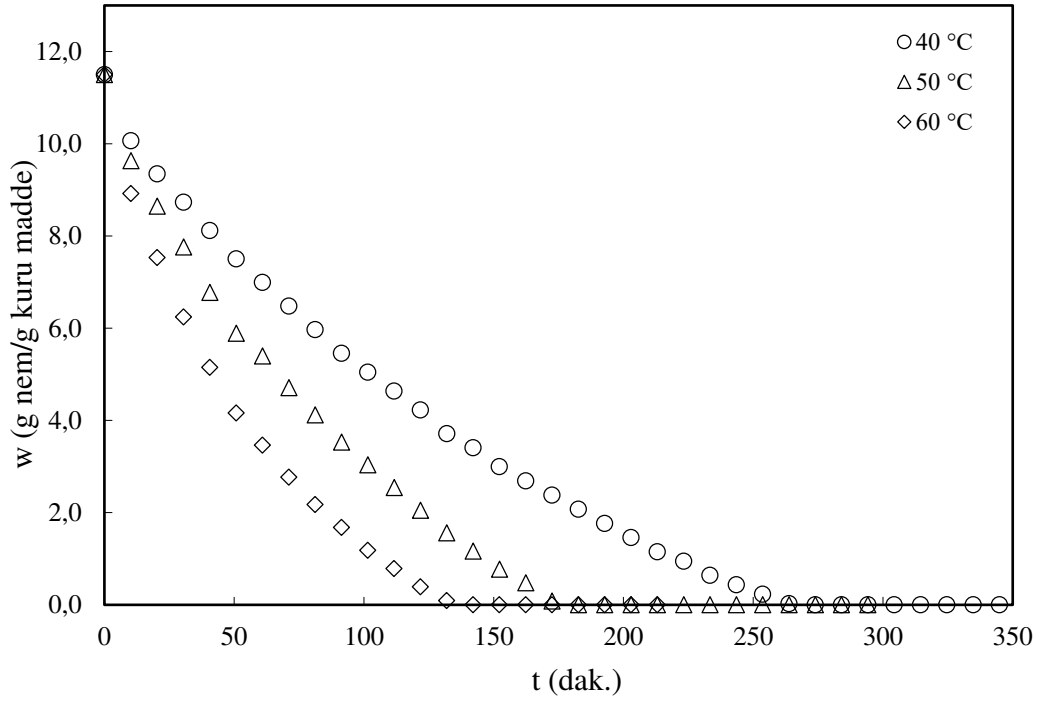
diğer hava akış hızlarında tüm sıcaklık değerlerinde kuruma olayının hava akış hızıyla neredeyse değişmemektedir. Artan sıcaklıkla Alg-2 örneklerinin tüm nem içeriğinin uzaklaşma sürelerinin beklenildiği gibi belirgin bir şekilde düştüğü Şekil 5.4-5.6'da ulaşılan bir diğer sonuçtur. 0,5 m/s hava akış hızı değeri için 40 °C'de Alg-2 neminin tamamen uzaklaşma süresi yaklaşık olarak 350; 50 °C'de 300; 60 °C'de ise 250 dakikadır. 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklar için 1 ve 1,5 m/s hava akış hızlarında nem uzaklaşma süreleri ise sırasıyla yaklaşık olarak 250, 165 ve 130 dakika olarak ölçülmüştür.

Şekil 5.1-5.6'da görüldüğü gibi, kurutulması incelenen iki alg örneğinin kuruma sürelerinin genel olarak farklı olduğu görülmektedir. Alg-1 numunelerinin kuruma süreleri Alg-2 örneklerinin kuruma sürelerinden daha düşüktür. Bu durumun en önemli sebebinin Alg-2 örneklerinin Alg-1 örneklerinden az da olsa daha yüksek nem içeriğine sahip olması olduğu düşünülmektedir.

1 m/s hava akış hızı için çalışılan iki alg örneğinin farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrilerinin sıcaklıkla değişimini gösteren grafikler Şekil 5.7 ve 5.8'de verilmiştir. Alg-1 örneği için farklı sıcaklıklardaki kurutma işlemine ait Şekil 5.7'de görülen kuruma eğrilerinden sıcaklık arttıkça zamanla katı nem içeriği değeri belirgin bir şekilde azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, Alg-1 örneği için, 60 °C sıcaklık dışında çalışılan diğer düşük sıcaklık değerlerinde hava akış hızının kuruma üzerine etkisi sıcaklığın etkisinden daha düşük olduğu söylenebilir. Benzer durum daha belirgin bir şekilde Alg-2 örneği için de elde edilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.7. Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri

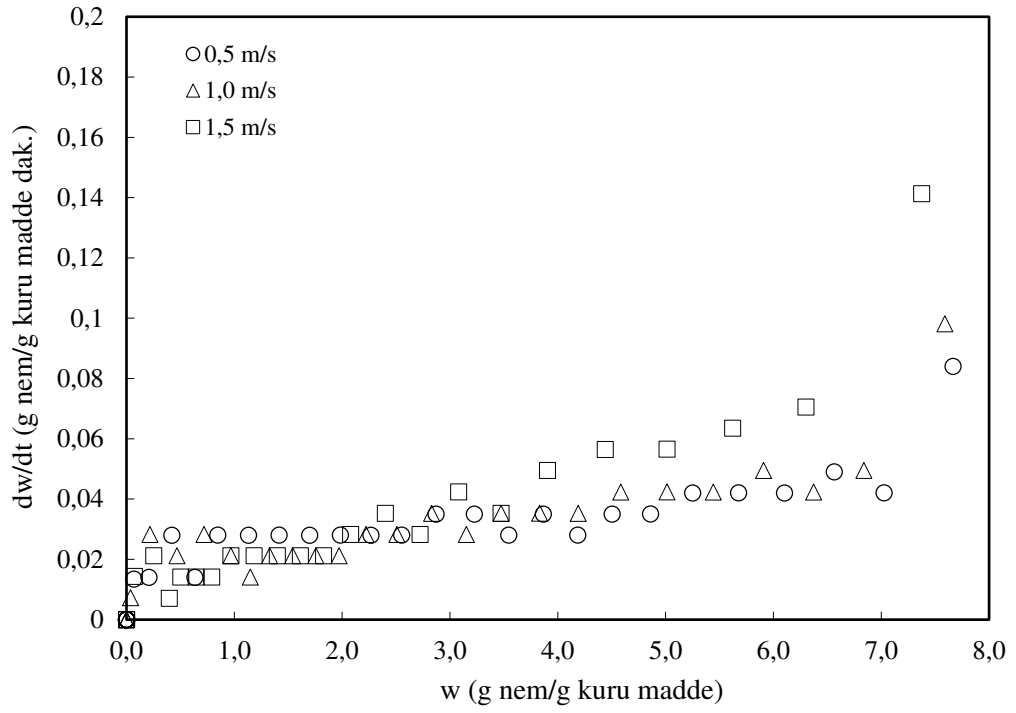


Şekil 5.8. Alg-2 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri

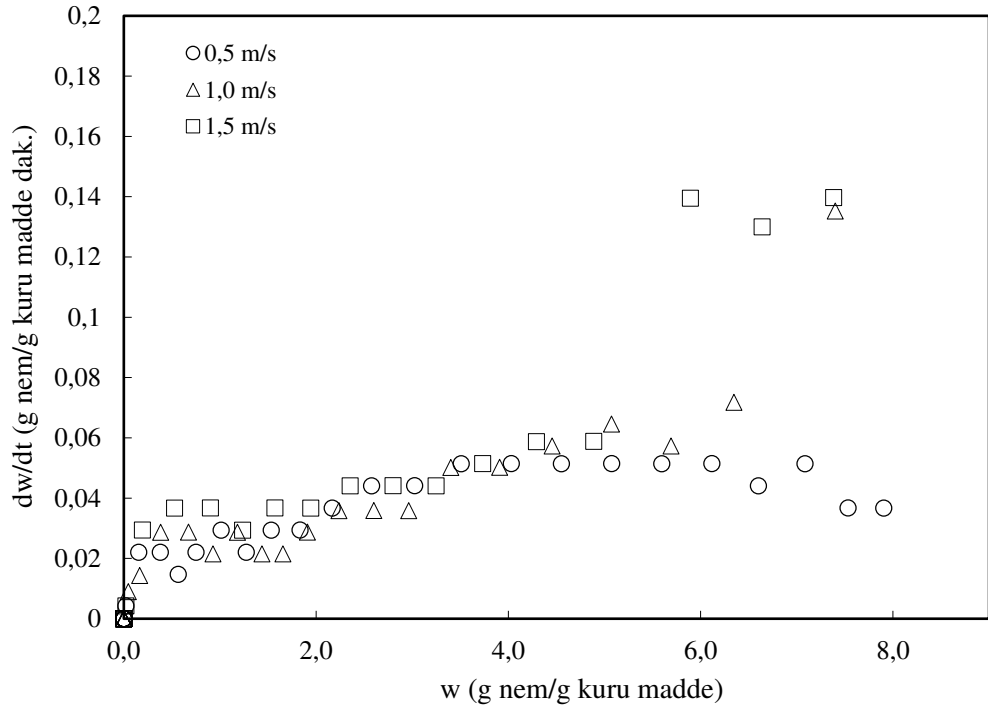
## 5.2. Alg Örneklerinin Kuruma Hızı Eğrileri

Alg örneklerinin kuruma verilerinden faydalanarak kuruma hızı değerleri ( $dw/dt$ , g nem/g kuru madde dak.) hesaplanmıştır. Nem içeriği ( $w$ , g nem/g kuru madde) değerlerine karşı  $dw/dt$  grafiğe geçirilerek Alg örneklerine ait kuruma hızı eğrileri elde edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan Alg-1 ve Alg-2 örneklerinin kuruma hızı eğrileri Şekil 5.9 – 5.14 arasında gösterilmiştir.

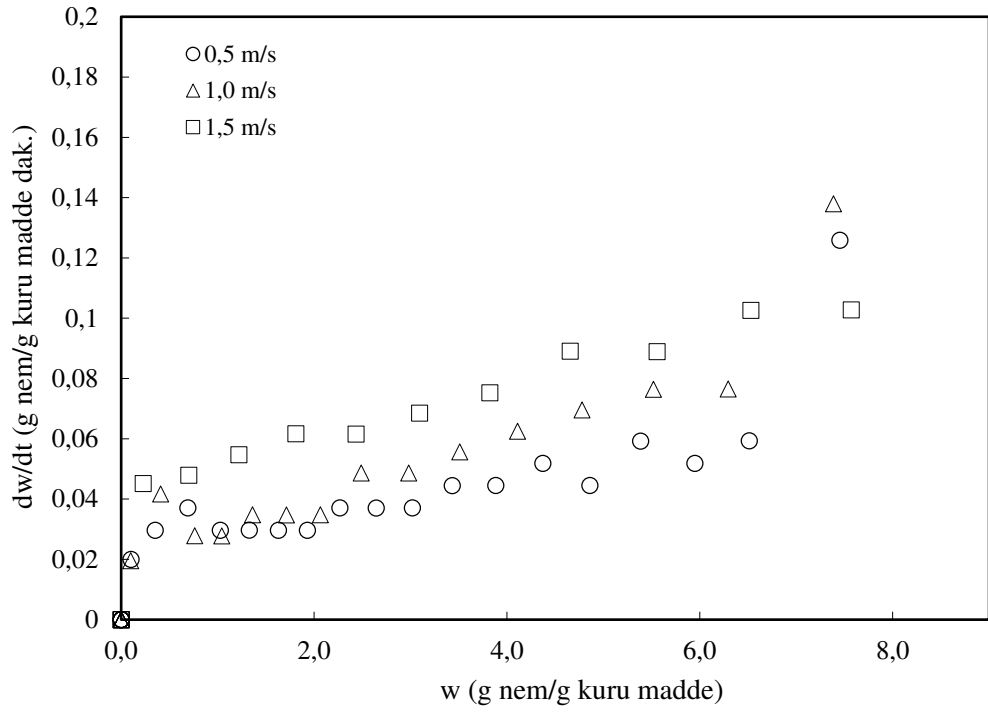
Şekil 5.9'da Alg-1 örneğine ait 40 °C'de çalışılan tüm hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrilerinden, kuruma olayının azalan hız periyodunda daha uzun bir şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bununla beraber, düşük hava akış hızı değerlerinde (0,5 ve 1 m/s) kısa süreli sabit hız periyodu da gözlenmektedir. Benzer durum Şekil 5.10'da gösterilen 50 °C sıcaklıktaki kurutma için de elde edilmiştir. Düşük hava akış hızlarında kuruma hızı eğrilerinde az da olsa sabit hız periyodunun oluşması Chua vd. tarafından yapılan bir çalışmada da gözlenmiştir (Chua vd., 2001). Alg-1 örneğinin 60 °C'deki kuruma hızı eğrisinden (Şekil 5.11), çalışılan tüm hava akış hızı değerleri için de azalan hız periyodunda kuruma gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta katının içerisinden yüzeye nem transfer hızının yüzeyden hava akımına olan nem transfer hızından daha düşük olduğu söylenebilir (Geankoplis, 2003). Alg-1 örneğinin kuruma hızı eğrilerinden genel olarak hava akış hızının kuruma olayı üzerinde etkisinin sıcaklık etkisiyle kıyaslandığında çok az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



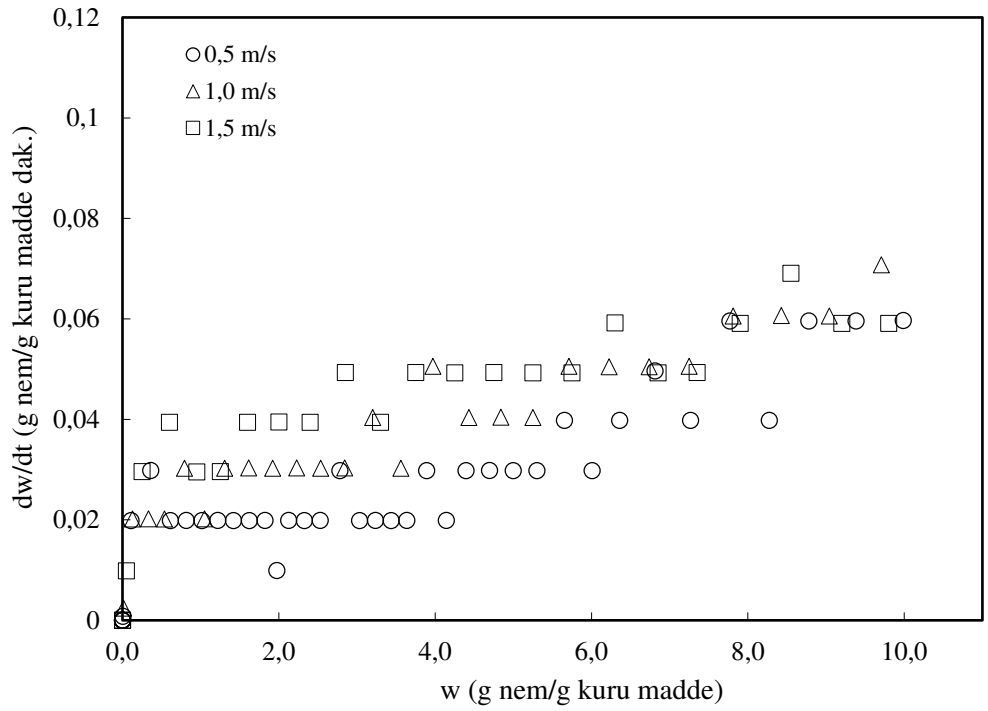
Şekil 5.9. Alg-1 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri



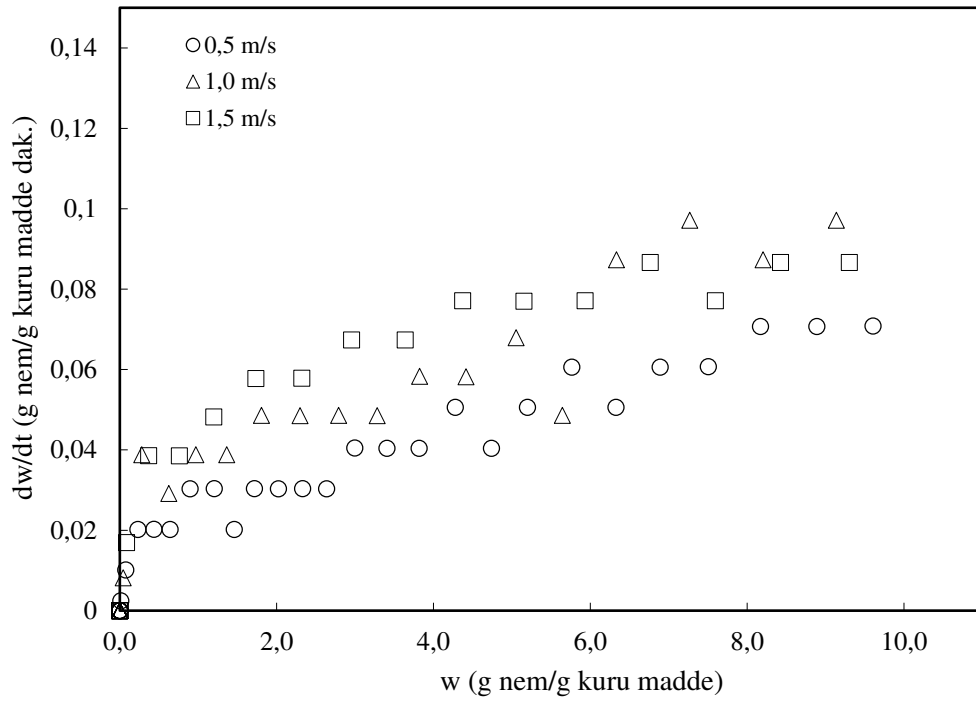
Şekil 5.10. Alg-1 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri



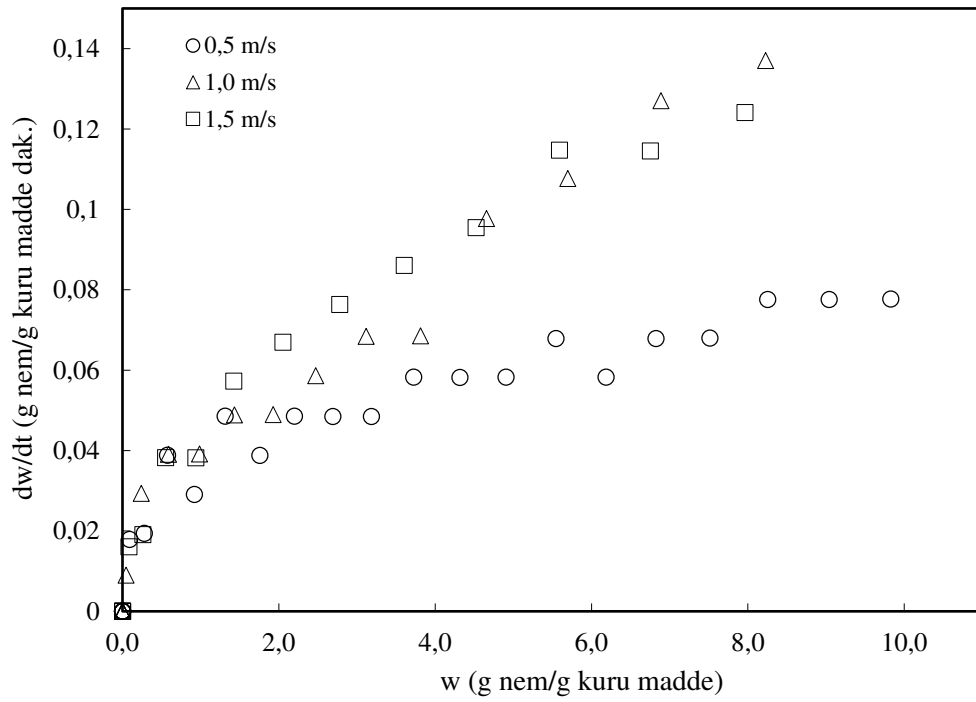
Şekil 5.11. Alg-1 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri



Şekil 5.12. Alg-2 örneği için 40 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri



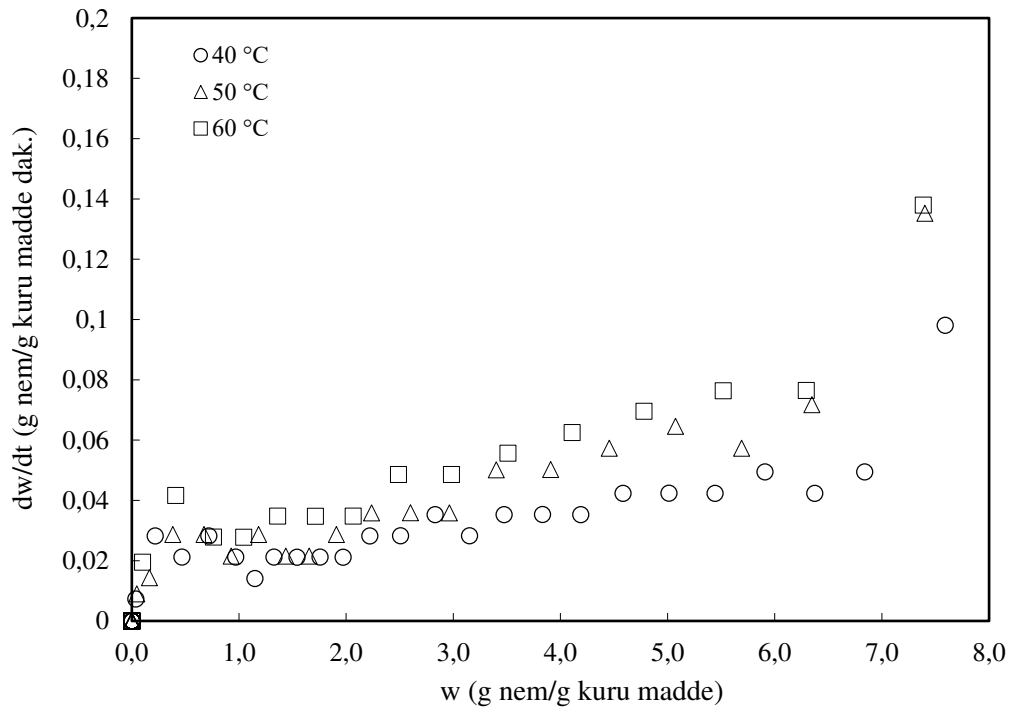
Şekil 5.13. Alg-2 örneği için 50 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri



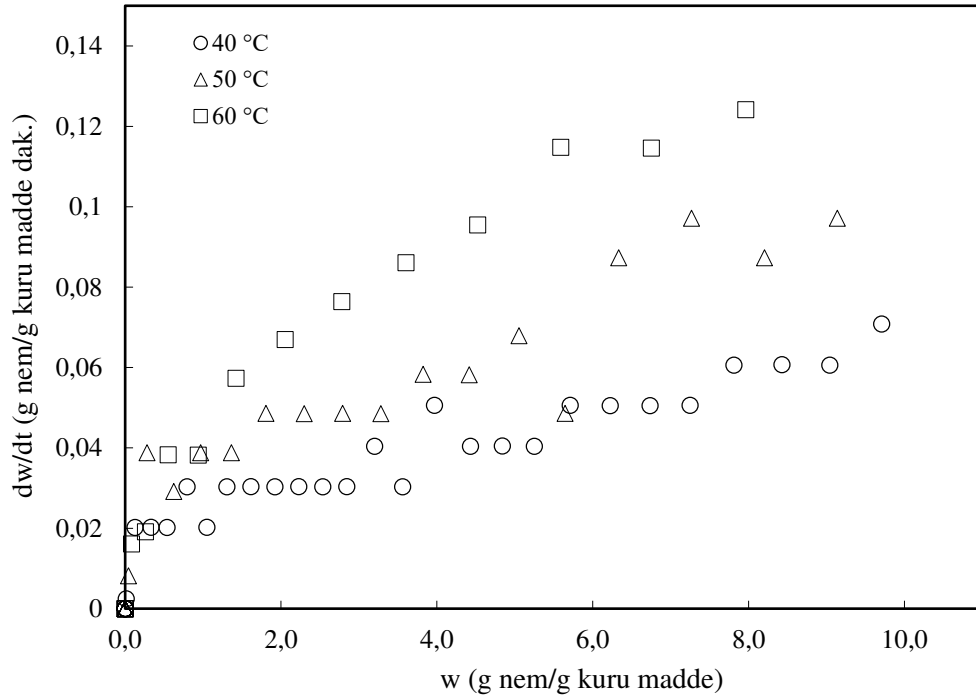
Şekil 5.14. Alg-2 örneği için 60 °C’de farklı hava akış hızlarındaki kuruma hızı eğrileri

Alg-2 örneğinin 40 °C'deki kuruma hızı eğrisinin verildiği Şekil 5.12'den görüldüğü üzere, hava akış hızının kuruma üzerine etkisinin olmadığı söylenebilir. Şekil 5.12'de ayrıca, sabit hız periyodunun kuruma olayında tüm hava akış hızları için de baskın şekilde geçerli olduğu göze çarpmaktadır. Alg-1 örneğinde gözlenmeyen bu durumun iki alg türünün katı yapısının farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Shibata ve Hirohashi yapmış oldukları bir çalışmada bir tünel kurutucuda 30 °C'de iki farklı gözenek boyutuna sahip katının kurumasını incelemiş ve ortalama gözenek boyutu düşük olan katı materyalde sabit hız periyoduna rastlanırken, büyük gözenek boyutu olan katı materyalde sabit hız periyoduyla karşılaşmamıştır (Shibata ve Hirohashi, 2013). Bu tez çalışmasının alg türlerinin karakterizasyon test sonuçlarından 40 °C'deki SEM görüntülerinden Alg-2 örneğinin gözenek çapının Alg-1'e göre daha düşük olduğu görülmektedir. 50 °C'de Alg-2 örneğinin kuruma hızı eğrileri (Şekil 5.13) ile 60 °C'de sadece 0,5 m/s hava akış hızındaki kurutma işleminde sabit hız periyoduna rastlanmıştır. Alg-2 örneğine ait SEM görüntülerine bakıldığında 60 °C ve 1 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsünde katının daha gözenekli bir yapıya sahip olması tez çalışmasında sabit hız periyodu için ulaşılan sonucu desteklemektedir. Yüksek nemlilik değerlerinde de sabit hız periyoduna rastlandığı literatürde belirtilmektedir (Geankoplis, 2003). Alg-2 örneğinin Alg-1 örneğine göre az da olsa daha yüksek başlangıç nem içeriğine sahip olması da Alg-2 örneğinin kurumasında sabit hız periyodunun gözlenme sebeplerinden biri olarak düşünülmektedir.

Alg örneklerinin 1 m/s hava akış hızı ve farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri Şekil 5.15 ve 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri



Şekil 5.16. Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki kuruma hızı eğrileri

### 5.3. Alg Örneklerinin Kuruma Olayının Modellenmesi

Alg örneklerinin tepsili kurutucu deneyleri sonucunda elde edilen nem oranı değerlerinin (MR) zamanla değişimi Tablo 4.1’de verilen model eşitlikleri ile STATISTICA programı kullanılarak kıyaslanmıştır. Model uyumluluğunun istatistiksel testinde belirleyici parametreler olan ki-kare ( $\chi^2$ ), RMSE (ortalamadan fark kareler sapma hatası) ve RSS (ortalamadan sapma hatası) için denklemler aşağıda verilmiştir:

$$\chi^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N (MR_{deneysel,i} - MR_{hesaplanan,i})^2 \right)}{N-n} \quad (5.1)$$

$$RMSE = \left[ \left( 1/2 \sum_{i=1}^N (MR_{deneysel,i} - MR_{hesaplanan,i})^2 \right) \right]^{0.5} \quad (5.2)$$

$$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{deneysel,i} - MR_{hesaplanan,i})^2 \quad (5.3)$$

Ki-kare değeri ( $\chi^2$ ), sıfıra ne kadar yakın ise, deneysel ve hesaplanan veriler o kadar uyumludur. Ki-kare değeri  $R^2$ ’ye göre daha kullanışlı bir istatistiksel değerdir (Spiegel ve Stephens, 1999). Denklemlerdeki  $MR_{deneysel,i}$  ve  $MR_{hesaplanan,i}$  sırasıyla deneysel ve model eşitliklerinden hesaplanan ayrılabilir nem oranı değerlerini, N hesaplamalarda kullanılan veri sayısı, n ise model eşitliklerindeki sabit sayıyı ifade etmektedir. Alg-1 ve Alg-2 örnekleri için yapılan istatistiksel analiz sonuçları Tablo 5.1-5.4 arasında verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Alg-1 örneğine ait 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri

| Model No | k       | n       | a         | b       | c       | g       | RMSE    | RSS     | $\chi^2$         | R <sup>2</sup> |
|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|----------------|
| 40 °C    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0100  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1891  | 0,0715  | 0,001834         | 0,9763         |
| 2        | 0,0034  | 1,2236  | -         | -       | -       | -       | 0,1344  | 0,0361  | 0,000951         | 0,9880         |
| 3        | 0,0104  | -       | 1,0399    | -       | -       | -       | 0,1825  | 0,0666  | 0,001752         | 0,9779         |
| 4        | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz   | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz          | Uyumsuz        |
| 5        | 0,0166  | -       | -52,5448  | 0,9884  | -       | -       | 0,1311  | 0,0344  | <b>0,000905</b>  | 0,9886         |
| 6        | 0,0170  | -       | -11,1984  | -       | -       | 0,0162  | 0,1312  | 0,0344  | 0,000906         | 0,9886         |
| 7        | 2,8230  | -       | 0,0035    | -       | -       | -       | 0,1903  | 0,0724  | 0,001906         | 0,9760         |
| 50 °C    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0143  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1238  | 0,03064 | 0,0007855        | 0,9864         |
| 2        | 0,0194  | 0,9348  | -         | -       | -       | -       | 0,1475  | 0,04350 | 0,0011448        | 0,9807         |
| 3        | 0,0144  | -       | 1,0122    | -       | -       | -       | 0,1231  | 0,03029 | 0,0007970        | 0,9866         |
| 4        | 0,0115  | -       | 1,0603    | -       | -0,0824 | -       | 0,0667  | 0,00890 | <b>0,0002342</b> | 0,9961         |
| 5        | 0,0212  | -       | -100,2500 | 0,99546 | -       | -       | 0,1004  | 0,02018 | <b>0,0005310</b> | 0,9910         |
| 6        | 0,0217  | -       | -9,4310   | -       | -       | 0,0207  | 0,1005  | 0,02019 | 0,0005314        | 0,9910         |
| 7        | 2,4926  | -       | 0,0057    | -       | -       | -       | 0,1245  | 0,03101 | 0,0008161        | 0,9862         |
| 60 °C    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0167  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1287  | 0,0332  | 0,0008500        | 0,9826         |
| 2        | 0,0077  | 1,1789  | -         | -       | -       | -       | 0,0973  | 0,0189  | 0,0004984        | 0,9900         |
| 3        | 0,0172  | -       | 1,0283    | -       | -       | -       | 0,1255  | 0,0315  | 0,0008283        | 0,9834         |
| 4        | 0,0128  | -       | 1,1062    | -       | -0,1174 | -       | 0,0584  | 0,0068  | <b>0,0001793</b> | 0,9964         |
| 5        | 0,0266  | -       | -155,1065 | 0,99644 | -       | -       | 0,0933  | 0,0174  | <b>0,0004585</b> | 0,9908         |
| 6        | 0,0272  | -       | -13,4999  | -       | -       | 0,0261  | 0,0934  | 0,0174  | 0,0004588        | 0,9908         |
| 7        | 4,4049  | -       | 0,0038    | -       | -       | -       | 0,1297  | 0,0336  | 0,0008847        | 0,9823         |

**Tablo 5.2.** Alg-1 örneğine ait 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri

| Model No | k       | n       | a         | b       | c       | g       | RMSE    | RSS     | $\chi^2$         | R <sup>2</sup> |
|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|----------------|
| 0,5 m/s  |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0101  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,3065  | 0,18784 | 0,004816         | 0,9443         |
| 2        | 0,0007  | 1,5540  | -         | -       | -       | -       | 0,0709  | 0,01006 | 0,000265         | 0,9970         |
| 3        | 0,0114  | -       | 1,1416    | -       | -       | -       | 0,2524  | 0,12737 | 0,003352         | 0,9622         |
| 4        | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz   | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz          | Uyumsuz        |
| 5        | 0,0214  | -       | -237,0233 | 0,9956  | -       | -       | 0,1065  | 0,02267 | <b>0,000597</b>  | 0,9933         |
| 6        | 0,0220  | -       | -17,1155  | -       | -       | 0,0207  | 0,1066  | 0,02273 | 0,000598         | 0,9933         |
| 7        | 4,4988  | -       | 0,0022    | -       | -       | -       | 0,3081  | 0,18982 | 0,004995         | 0,9437         |
| 1 m/s    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0143  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1238  | 0,03064 | 0,0007855        | 0,9864         |
| 2        | 0,0194  | 0,9348  | -         | -       | -       | -       | 0,1475  | 0,04350 | 0,0011448        | 0,9807         |
| 3        | 0,0144  | -       | 1,0122    | -       | -       | -       | 0,1231  | 0,03029 | 0,0007970        | 0,9866         |
| 4        | 0,0115  | -       | 1,0603    | -       | -0,0824 | -       | 0,0667  | 0,00890 | <b>0,0002342</b> | 0,9961         |
| 5        | 0,0212  | -       | -100,2500 | 0,99546 | -       | -       | 0,1004  | 0,02018 | <b>0,0005310</b> | 0,9910         |
| 6        | 0,0217  | -       | -9,4310   | -       | -       | 0,0207  | 0,1005  | 0,02019 | 0,0005314        | 0,9910         |
| 7        | 2,4926  | -       | 0,0057    | -       | -       | -       | 0,1245  | 0,03101 | 0,0008161        | 0,9862         |
| 1,5 m/s  |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0157  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1634  | 0,05341 | 0,001369         | 0,9767         |
| 2        | 0,0054  | 1,2417  | -         | -       | -       | -       | 0,1141  | 0,02604 | 0,000685         | 0,9886         |
| 3        | 0,0163  | -       | 1,0457    | -       | -       | -       | 0,1562  | 0,04878 | 0,001284         | 0,9787         |
| 4        | 0,0129  | -       | 1,1003    | -       | -0,0894 | -       | 0,1037  | 0,02150 | <b>0,000566</b>  | 0,9906         |
| 5        | 0,0263  | -       | -139,7992 | 0,99543 | -       | -       | 0,1133  | 0,02566 | <b>0,000675</b>  | 0,9888         |
| 6        | 0,0269  | -       | -13,6969  | -       | -       | 0,0257  | 0,1133  | 0,02568 | 0,000676         | 0,9888         |
| 7        | 5,0837  | -       | 0,0031    | -       | -       | -       | 0,1644  | 0,05405 | 0,001422         | 0,9764         |

**Tablo 5.3.** Alg-2 örneğine ait 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri

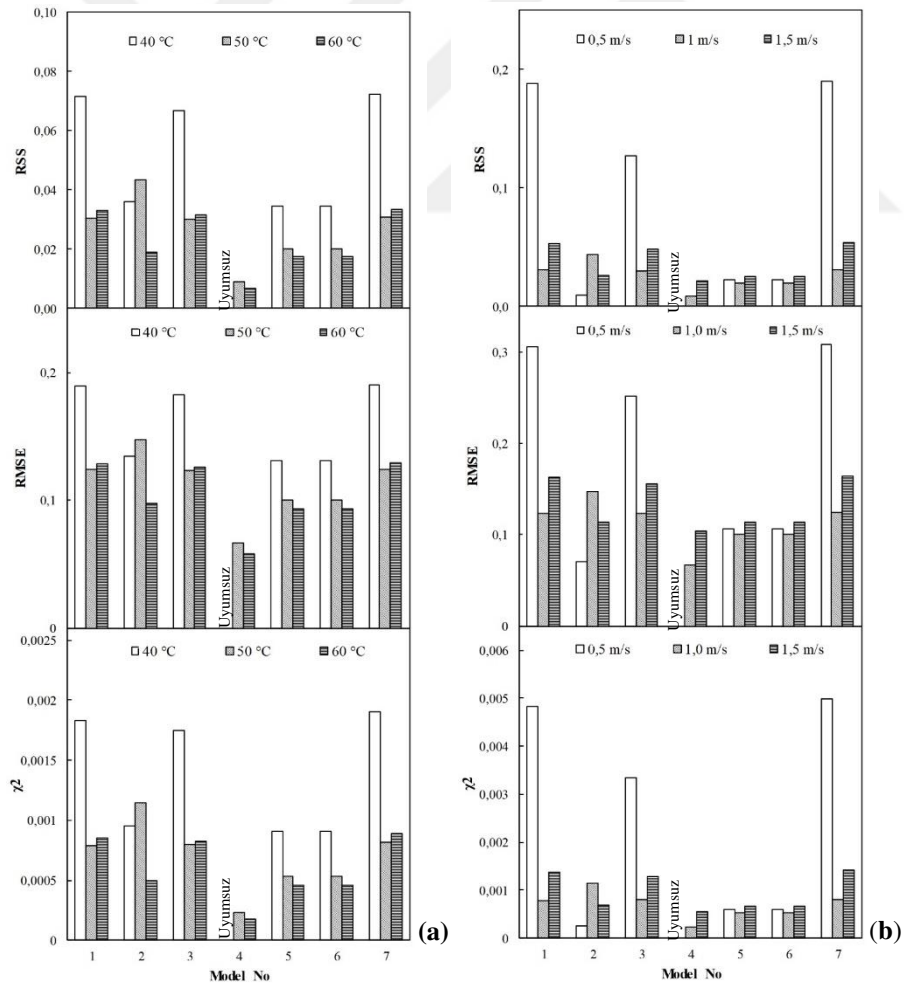
| Model No | k       | n       | a         | b       | c       | g       | RMSE    | RSS     | $\chi^2$         | R <sup>2</sup> |
|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|----------------|
| 40 °C    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0094  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1955  | 0,0764  | 0,0019591        | 0,9772         |
| 2        | 0,0034  | 1,2095  | -         | -       | -       | -       | 0,1454  | 0,0423  | 0,0011121        | 0,9874         |
| 3        | 0,0097  | -       | 1,0334    | -       | -       | -       | 0,1907  | 0,0727  | 0,0019138        | 0,9783         |
| 4        | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz   | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz          | Uyumsuz        |
| 5        | 0,0157  | -       | -10,2928  | 0,9464  | -       | -       | 0,1407  | 0,0396  | <b>0,0010419</b> | 0,9882         |
| 6        | 0,0157  | -       | -11,5974  | -       | -       | 0,0150  | 0,1407  | 0,0396  | 0,0010422        | 0,9882         |
| 7        | 2,4102  | -       | 0,0039    | -       | -       | -       | 0,1966  | 0,0773  | 0,0020344        | 0,9769         |
| 50 °C    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0144  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1515  | 0,0459  | 0,001176         | 0,9819         |
| 2        | 0,0064  | 1,1797  | -         | -       | -       | -       | 0,1184  | 0,0280  | 0,000737         | 0,9889         |
| 3        | 0,0147  | -       | 1,0272    | -       | -       | -       | 0,1485  | 0,0441  | 0,001161         | 0,9825         |
| 4        | 0,0122  | -       | 1,0642    | -       | -0,0672 | -       | 0,1007  | 0,0203  | <b>0,000534</b>  | 0,9920         |
| 5        | 0,0227  | -       | -78,7167  | 0,99306 | -       | -       | 0,1138  | 0,0259  | <b>0,000682</b>  | 0,9897         |
| 6        | 0,0232  | -       | -11,9617  | -       | -       | 0,0222  | 0,1139  | 0,0259  | 0,000683         | 0,9897         |
| 7        | 2,4028  | -       | 0,0059    | -       | -       | -       | 0,1528  | 0,0467  | 0,001229         | 0,9815         |
| 60 °C    |         |         |           |         |         |         |         |         |                  |                |
| 1        | 0,0214  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,0881  | 0,0155  | 0,0003984        | 0,9914         |
| 2        | 0,0148  | 1,0894  | -         | -       | -       | -       | 0,0781  | 0,0122  | 0,0003211        | 0,9932         |
| 3        | 0,0215  | -       | 1,0072    | -       | -       | -       | 0,0879  | 0,0154  | 0,0004064        | 0,9914         |
| 4        | 0,0188  | -       | 1,0308    | -       | -0,0435 | -       | 0,0575  | 0,0066  | <b>0,0001738</b> | 0,9963         |
| 5        | 0,0304  | -       | -135,5441 | 0,99703 | -       | -       | 0,0732  | 0,0107  | <b>0,0002823</b> | 0,9940         |
| 6        | 0,0311  | -       | -9,8270   | -       | -       | 0,0299  | 0,0733  | 0,0107  | 0,0002825        | 0,9940         |
| 7        | 3,8598  | -       | 0,0055    | -       | -       | -       | 0,0886  | 0,0157  | 0,0004133        | 0,9913         |

**Tablo 5.4.** Alg-2 örneğine ait 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametre değerleri

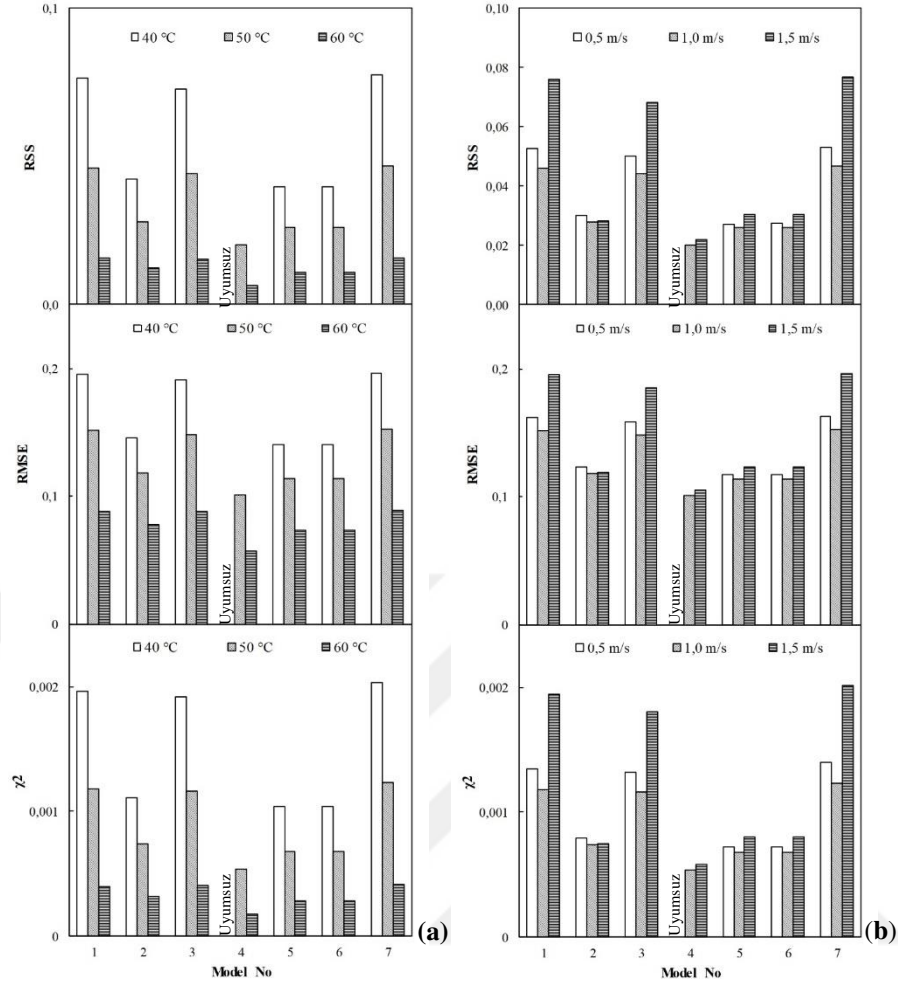
| Model No | k       | n       | a         | b       | c       | g       | RMSE    | RSS     | $\chi^2$        | R <sup>2</sup> |
|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------|----------------|
| 0,5 m/s  |         |         |           |         |         |         |         |         |                 |                |
| 1        | 0,0104  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1621  | 0,0525  | 0,001347        | 0,9814         |
| 2        | 0,0044  | 1,1780  | -         | -       | -       | -       | 0,1228  | 0,0302  | 0,000794        | 0,9893         |
| 3        | 0,0106  | -       | 1,0272    | -       | -       | -       | 0,1586  | 0,0503  | 0,001323        | 0,9822         |
| 4        | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz   | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz | Uyumsuz         | Uyumsuz        |
| 5        | 0,0165  | -       | -127,8621 | 0,9957  | -       | -       | 0,1169  | 0,0273  | <b>0,000719</b> | 0,9903         |
| 6        | 0,0171  | -       | -7,5468   | -       | -       | 0,0159  | 0,1170  | 0,0274  | 0,000720        | 0,9903         |
| 7        | 2,8933  | -       | 0,0036    | -       | -       | -       | 0,1630  | 0,0531  | 0,001398        | 0,9812         |
| 1 m/s    |         |         |           |         |         |         |         |         |                 |                |
| 1        | 0,0144  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1515  | 0,0459  | 0,001176        | 0,9819         |
| 2        | 0,0064  | 1,1797  | -         | -       | -       | -       | 0,1184  | 0,0280  | 0,000737        | 0,9889         |
| 3        | 0,0147  | -       | 1,0272    | -       | -       | -       | 0,1485  | 0,0441  | 0,001161        | 0,9825         |
| 4        | 0,0122  | -       | 1,0642    | -       | -0,0672 | -       | 0,1007  | 0,0203  | <b>0,000534</b> | 0,9920         |
| 5        | 0,0227  | -       | -78,7167  | 0,99306 | -       | -       | 0,1138  | 0,0259  | <b>0,000682</b> | 0,9897         |
| 6        | 0,0232  | -       | -11,9617  | -       | -       | 0,0222  | 0,1139  | 0,0259  | 0,000683        | 0,9897         |
| 7        | 2,4028  | -       | 0,0059    | -       | -       | -       | 0,1528  | 0,0467  | 0,001229        | 0,9815         |
| 1,5 m/s  |         |         |           |         |         |         |         |         |                 |                |
| 1        | 0,0147  | -       | -         | -       | -       | -       | 0,1949  | 0,0760  | 0,001948        | 0,9663         |
| 2        | 0,0033  | 1,3377  | -         | -       | -       | -       | 0,1191  | 0,0284  | 0,000747        | 0,9874         |
| 3        | 0,0155  | -       | 1,0572    | -       | -       | -       | 0,1849  | 0,0684  | 0,001800        | 0,9697         |
| 4        | 0,0108  | -       | 1,1695    | -       | -0,1601 | -       | 0,1051  | 0,0221  | <b>0,000582</b> | 0,9902         |
| 5        | 0,0263  | -       | -207,1154 | 0,99644 | -       | -       | 0,1234  | 0,0304  | <b>0,000801</b> | 0,9865         |
| 6        | 0,0268  | -       | -16,5910  | -       | -       | 0,0257  | 0,1234  | 0,0305  | 0,000802        | 0,9865         |
| 7        | 5,3829  | -       | 0,0027    | -       | -       | -       | 0,1959  | 0,0767  | 0,002019        | 0,9660         |

Tablo 5.1 incelendiğinde Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızı değerinde ve 40 °C sıcaklıkta en uygun modelin  $\chi^2$  değeri en düşük olan 5 nolu Difüzyon modeli olduğu görülmektedir. Bununla beraber, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda en düşük  $\chi^2$  değerlerine 4 nolu Logaritmik modelinde sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu iki sıcaklık değerlerinde ikinci en uyumlu modelin yine Difüzyon modeli olduğu Tablo 5.1’de açıkça belirlenebilmektedir. Benzer durum Alg-1 örneğinin 50 °C ve farklı hava akış hızı değerleri kurutma olayının modellenmesinde de elde edilmiştir. Alg-2 örneğinin 1 m/s hava akış hızı değerinde farklı sıcaklık ve 50 °C’de farklı hava akış hızı için gerçekleştirilen kurutma deneyleri sonucu elde edilen model sonuçlarında da Alg-1 örneği modellenmesine benzer durumlarla karşılaşmıştır. Düşük sıcaklık ve hava akış hızı değerlerinde yapılan istatistiksel analiz sonuçlarından Logaritmik modelin uyumsuzluğu açıkça gözlenmektedir. Süre-nem oranı modelleme sonuçlarının özeti olarak, her iki alg örneği için de en uygun modelin Difüzyon modeli olduğu söylenebilir.

Tablo 5.1 ve 5.4 arasındaki tablolarla verilen modellere ait RMSE, RSS ve  $\chi^2$  değerleri grafik olarak Alg-1 için Şekil 5.17, Alg-2 için ise Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.17.** Alg-1 örneği için 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki (a) ve 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki (b) modellerin  $\chi^2$ , RMSE ve RSS değerlerinin değişimi



**Şekil 5.18.** Alg-2 örneği için 1 m/s hava akış hızında ve farklı sıcaklıklardaki (a) ve 50 °C ve farklı hava akış hızlarındaki (b) modellerin  $\chi^2$ , RMSE ve RSS değerlerinin değişimi

Çalışılan her iki alg örneği için de tüm şartlarda en küçük  $\chi^2$ , RMSE ve RSS değerlerine 4 ve 5 nolu modellerde ulaşıldığı Şekil 5.18 ve 5.19'dan da açıkça görülmektedir.

İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda elde edilen Tablo 5.1 – 5.4 ve Şekil 5.18 ie 5.19 dan en uygun modelin Difüzyon olduğu belirlenmiştir. Buraya kadar gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında süre-nem oranı değişimi kullanılmıştır. STATISTICA programıyla Tablo 4.1'deki eşitliklerdeki sabitlerin sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade edilmesiyle de modelleme yapılabilmektedir (Toğrul, 2006). Bu amaçla, her iki alg örneği için de en uygun model eşitliği olan difüzyon modelindeki sabitlerin sıcaklığın fonksiyonu olarak farklı tip eşitliklerle (lineer, üs, eksponansiyel, Arrhenius ve logaritmik) tanımlanmış halleri Tablo 5.5'te verilmiştir. Sıcaklığa bağlı fonksiyonların eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$\text{Lineer tip} \quad a + bT \quad (5.4)$$

$$\text{Üs tipi} \quad a T^b \quad (5.5)$$

$$\text{Eksponansiyel tip} \quad a \exp(bT) \quad (5.6)$$

$$\text{Arrhenius Tip} \quad a \exp\left(-\frac{b}{8,314 T}\right) \quad (5.7)$$

$$\text{Logaritmik tip} \quad a + b \ln(T) \quad (5.8)$$

**Tablo 5.5.** Difüzyon modelindeki sabitlerin sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmasıyla türetilen model eşitlikleri

| Model No | Eşitlik                                                                                                               |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | $MR = a_1 T^{a_2} \exp(-(k_1 T^{k_2})t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-(k_1 T^{k_2})(b_1 T^{b_2})t)$                       |
| 2        | $MR = a_1 T^{a_2} \exp(-(k_1 T^{k_2})t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-(k_1 T^{k_2})(b_1 \exp(b_2 T))t)$                   |
| 3        | $MR = (a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-(k_1 T^{k_2})t) + (1 - a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-(k_1 T^{k_2})(b_1 \exp(b_2 T))t)$         |
| 4        | $MR = a_1 T^{a_2} \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))(b_1 T^{b_2})t)$               |
| 5        | $MR = a_1 T^{a_2} \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))(b_1 \exp(b_2 T))t)$           |
| 6        | $MR = (a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))t) + (1 - a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))(b_1 T^{b_2})t)$     |
| 7        | $MR = (a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))t) + (1 - a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-(k_1 \exp(k_2 T))(b_1 \exp(b_2 T))t)$ |

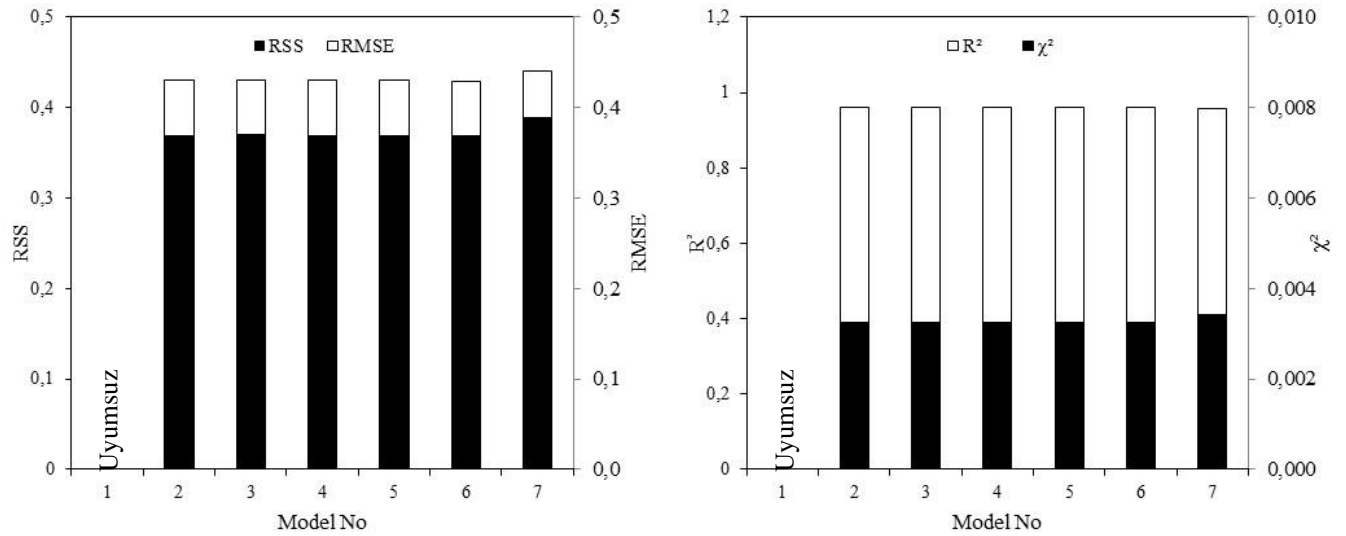
Alg örneklerinin Tablo 5.5'te verilen türetilmiş eşitlikler ile gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında, hava akış hızının kurutma üzerindeki etkisinin sıcaklığın etkisine nazaran daha düşük olduğu düşünülerek, 1 m/s hava akış hızındaki deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Bu şekilde Difüzyon eşitliğinden türetilmiş modeller ile gerçekleştirilen istatistiksel değerlendirmeler sonucunda, Alg-1 örneği için model sabitleri ve istatistiksel parametreler Tablo 5.6'da Alg-2 örneği için ise Tablo 5.7'de verilmiştir. Alg örneklerine ait türetilmiş modeller için istatistiksel parametrelerin değişimleri ayrıca grafik olarak Şekil 5.19 ve 5.20'de gösterilmiştir. Tablo 5.6 ve Şekil 5.20'den görüldüğü üzere Alg-1 örneği için türetilmiş en uygun model 6 numaralı modeldir. Tablo 5.7 ve Şekil 5.20'den ise Alg-2 örneği için türetilmiş en uygun modelin 5 numaralı model olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Tablo 5.6.** Alg-1 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri ile yapılan istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametreler

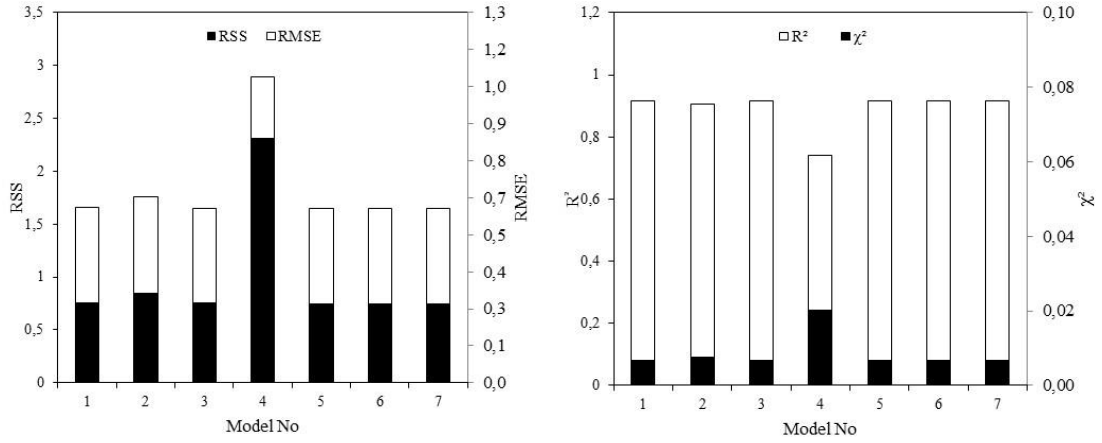
| Model No | $k_1$         | $k_2$         | $a_1$         | $a_2$         | $b_1$         | $b_2$          | RMSE          | RSS           | $\chi^2$        | $R^2$         |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| 1        | uyumsuz       | uyumsuz       | uyumsuz       | uyumsuz       | uyumsuz       | uyumsuz        | uyumsuz       | uyumsuz       | uyumsuz         | uyumsuz       |
| 2        | 0,0901        | 0,0001        | 0,0977        | 0,1346        | 0,0754        | 0,0043         | 0,4297        | 0,3693        | 0,003240        | 0,9592        |
| 3        | 0,0333        | 0,00004       | 0,3402        | 0,0023        | 0,1207        | 0,0060         | 0,4304        | 0,3705        | 0,003250        | 0,9591        |
| 4        | 0,0879        | 0,0041        | 0,1067        | 0,0922        | 0,0801        | 0,00004        | 0,4297        | 0,3694        | 0,003240        | 0,9592        |
| 5        | 0,0857        | 0,0088        | 0,1278        | 0,00001       | 0,0888        | -0,0051        | 0,4297        | 0,3694        | 0,003240        | 0,9592        |
| <b>6</b> | <b>0,1185</b> | <b>0,0036</b> | <b>0,1160</b> | <b>0,0045</b> | <b>0,0612</b> | <b>0,00001</b> | <b>0,4296</b> | <b>0,3691</b> | <b>0,003238</b> | <b>0,9592</b> |
| 7        | 0,1487        | -1,8398       | -0,4319       | -0,2068       | 0,0726        | 1,8415         | 0,4406        | 0,3883        | 0,003407        | 0,9571        |

**Tablo 5.7.** Alg-2 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri ile yapılan istatistiksel analiz sonucu elde edilen model sabitleri ve istatistiksel parametreler

| Model No | $k_1$         | $k_2$         | $a_1$         | $a_2$         | $b_1$         | $b_2$          | RMSE          | RSS           | $\chi^2$        | $R^2$         |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| 1        | 0,0711        | 0,1853        | 0,1264        | 0,000015      | 0,0566        | 0,0543         | 0,6150        | 0,7564        | 0,006635        | 0,9150        |
| 2        | 0,0551        | 0,0001        | 0,2533        | 0,1850        | 0,0308        | 0,0080         | 0,6517        | 0,8495        | 0,007452        | 0,9045        |
| 3        | 0,0135        | 0,1576        | 0,8019        | 0,0168        | 0,0001        | 0,6233         | 0,6132        | 0,7520        | 0,006597        | 0,9155        |
| 4        | 0,0628        | 0,0042        | 0,1505        | 0,1311        | 0,0478        | 0,000005       | 1,0748        | 2,3102        | 0,020265        | 0,7404        |
| <b>5</b> | <b>0,1146</b> | <b>0,3890</b> | <b>0,0376</b> | <b>0,4635</b> | <b>0,0566</b> | <b>-0,3855</b> | <b>0,6116</b> | <b>0,7482</b> | <b>0,006563</b> | <b>0,9159</b> |
| 6        | 0,1096        | 0,0027        | 0,1284        | 0,0036        | 0,0764        | 0,0000         | 0,6118        | 0,7485        | 0,006566        | 0,9159        |
| 7        | 0,0110        | 0,0022        | 0,8946        | 0,0017        | 0,1404        | 0,4504         | 0,6118        | 0,7487        | 0,006568        | 0,9159        |



**Şekil 5.19.** Alg-1 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri için istatistiksel parametrelerin değişimi



**Şekil 5.20.** Alg-2 örneğine ait türetilmiş model eşitlikleri için istatistiksel parametrelerin değişimi

Tablo 5.6'dan Alg-1 örneğinin kuruma olayı için nem oranının süre ve sıcaklıkla değişimi 6 nolu denklem gereği aşağıdaki eşitlikteki gibidir:

$$MR = (0,116 \exp(0,0045T)) \exp(-(0,1185 \exp(0,0036T))t) + \dots \quad (5.9)$$

$$\dots (1 - 0,116 \exp(0,0045T)) \exp(-(0,1185 \exp(0,0036T))(0,0612T^{0,00001})t)$$

Alg-2 örneği için ise benzer bir eşitlik Tablo 5.7'deki 5 nolu eşitlik gereği aşağıdaki şekilde verilebilir:

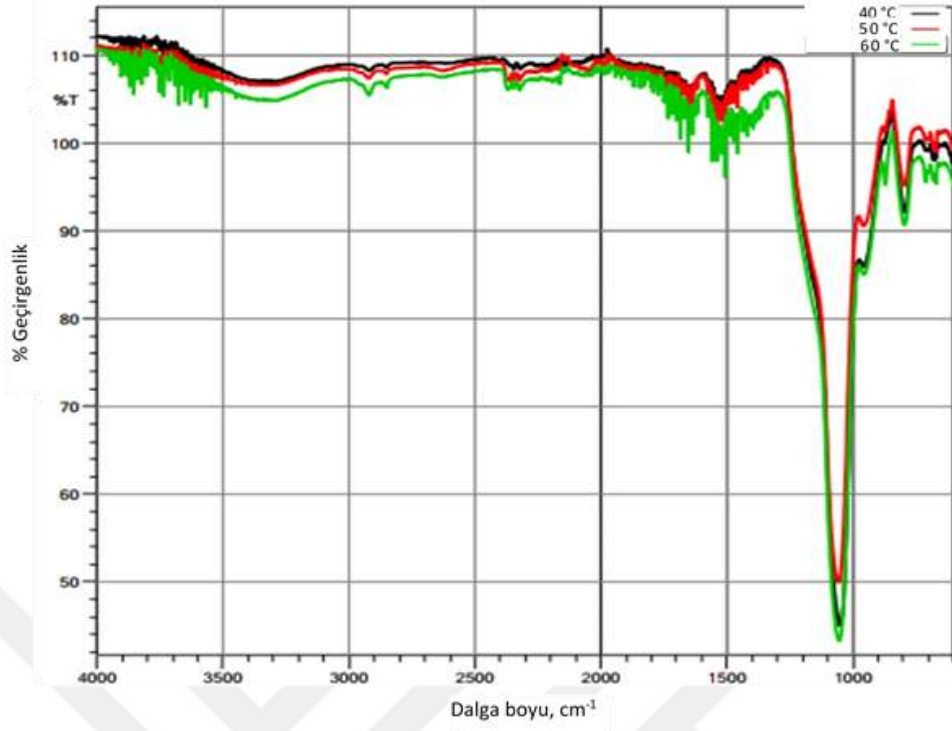
$$MR = 0,0376T^{0,4635} \exp(-(0,1146 \exp(0,3890T))t) + \dots \quad (5.10)$$

$$\dots (1 - 0,0376T^{0,4635}) \exp(-(0,1146 \exp(0,3890T))(0,057 \exp(0,386T))t)$$

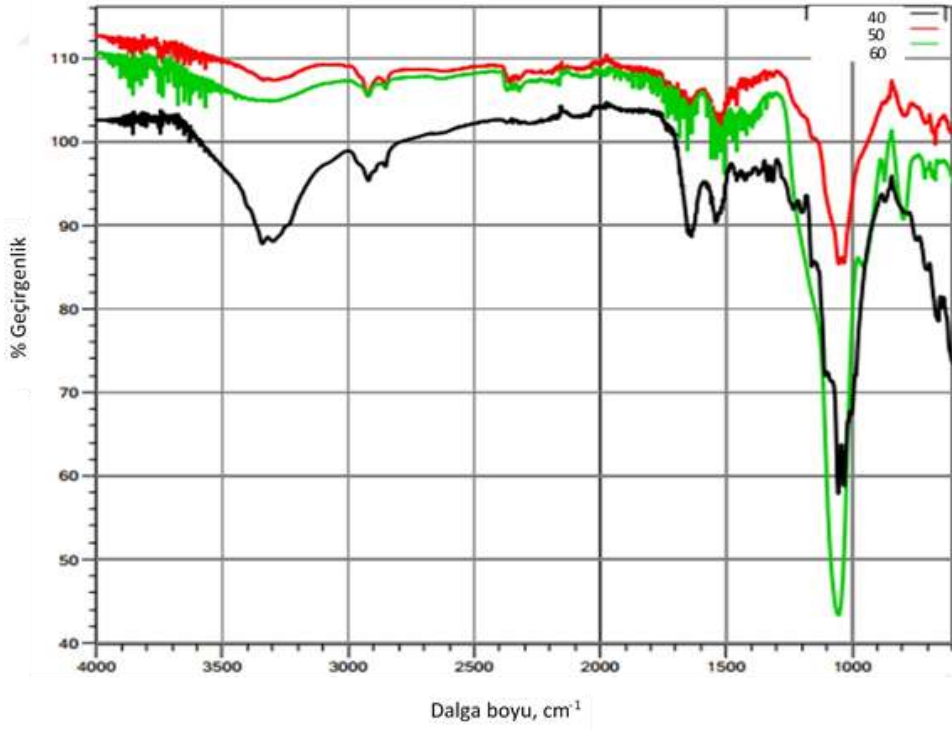
## 5.4. Tatlı Su Alglerinin Karakterizasyon Sonuçları

### 5.4.1. FTIR Sonuçları

Temin edilen tatlı su alg örneklerinin 1,5 m/s hava akış hızında farklı sıcaklıklardaki (40,50,60 °C) FTIR analizi sonucu elde edilen spektrumlar Şekil 5.22 ve 5.23'te verilmiştir. Şekil 5.22'de görüldüğü gibi Alg-1 örneğinin FTIR spektrumlarının farklı sıcaklıklarda değişmediği söylenebilir. Alg-2 örneğinin FTIR spektrumlarından 50 ve 60 °C sıcaklıklarında yaklaşık aynı spektrumlar elde edilirken 40 °C sıcaklıkta diğer sıcaklıklardan farklı spektrum elde edilmiştir. Her iki alg türü için de taranan dalgaboyu aralıklarında benzer spektrum pikleri elde edildiği Şekil 5.21 ve 5.22'ten açıkça görülmektedir.



Şekil 5.21. Alg-1 örneği için farklı sıcaklıklarda ve 1,5 m/s hava akış hızındaki FTIR spektrumları

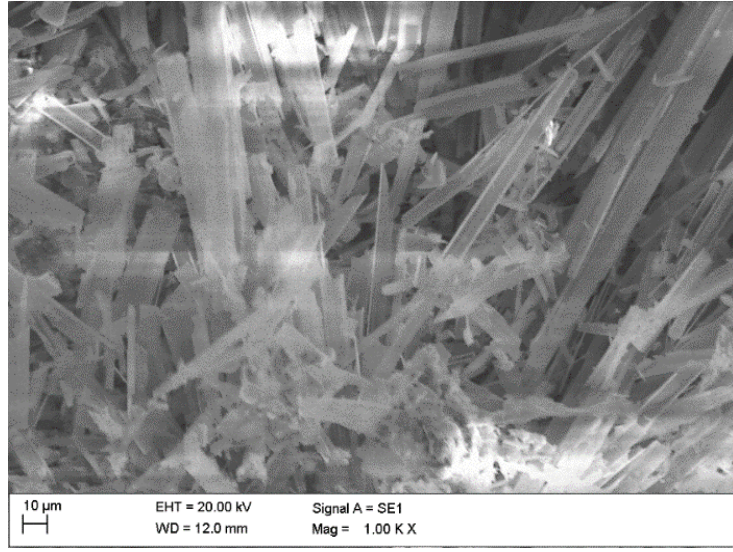


Şekil 5.22. Alg-2 örneği için farklı sıcaklıklarda ve 1,5 m/s hava akış hızındaki FTIR spektrumları

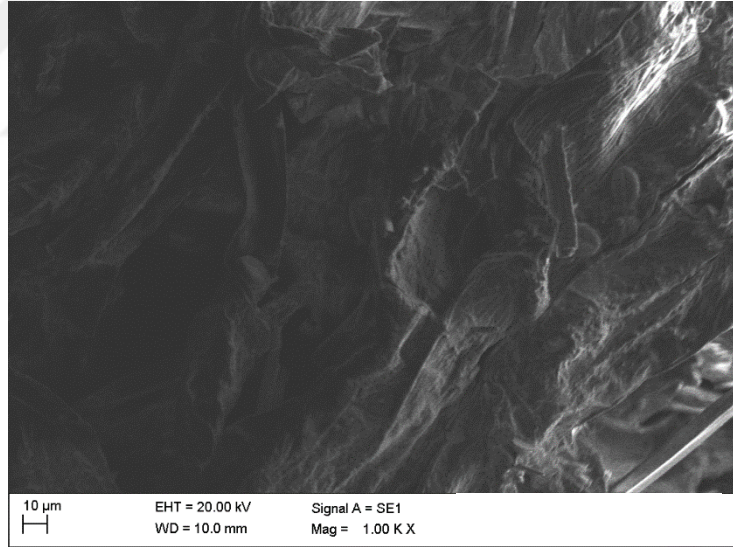
Murdock ve Wetzel yapmış oldukları bir çalışmada FTIR sonuçlarına bakıldığında, yeşil algler için 3400-3300  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında  $\nu$  O-H /  $\nu$  N-H gibi bağlarla su ve protein gruplarının var olduğu ifade edilmiştir (Murdock ve Wetzel, 2009). Alg-1 örneğinde 3400-3300  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında çalışılan üç sıcaklık değeri için de çok az miktarda pik oluşumu gözlenmiştir. Alg-2 örneğinde ise 40 °C hariç Alg-1 için elde edilen sonuca benzer spektrumlar elde edilmiştir. Kurutma çalışmasının incelendiği bu çalışmada, 3400-3300  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında genel olarak su moleküllerinin bulunabileceği Alg-2 örneği için 40 °C’de ise FTIR analizi yapılan numunede az miktarda suyun kaldığı düşünülmektedir. 2850-2920  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında  $\nu_{\text{as}}$  CH<sub>3</sub>,  $\nu_{\text{as}}$  CH<sub>2</sub>, ve  $\nu_{\text{as}}$  CH<sub>2</sub> CH<sub>3</sub> formlarında lipidlerin olabileceği aynı çalışmada belirtilmiştir. Alg-2 örneği spektrumlarında daha baskın olmakla beraber, çalışılan her iki alg türü için de lipidlerin varlığı açıkça görülmektedir. FTIR spektrumlarından 1500-1630  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında, Alg-2’de biraz daha yüksek olmakla beraber, her iki alg örneği için de düşük absorptans şiddetlerinde pikler elde edilmiştir. Murdock ve Wetzel bu dalga boyu aralığı için karboksilik asit ve su gruplarının olabileceğini öne sürmüşlerdir (Murdock ve Wetzel, 2009). Her iki alg türü için de FTIR spektrumlarından elde edilen en şiddetli ve geniş absorptans değerleri 800-1200  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında elde edilmiştir. Bu aralıkta rastlanan bileşen ve formları spesifik dalga boyu aralıklarına göre şu şekildedir:  $\nu$  C-O-C /  $\nu_{\text{as}}$  P=O formlarında temel polisakkarit halkaları/ DNA, RNA nükleik asit (900-1200  $\text{cm}^{-1}$ ), 1165, 1152, 1110, 1081, 1050 ve 1030 dalga boylarında  $\nu$  C-O selüloz,  $\nu$  C-O /  $\nu$  Si-O polisakkarit / siloksan (karbonhidrat pikleri, siloksan omuz, 1000-1150  $\text{cm}^{-1}$ ),  $\nu$  P=O nükleik asitler (1030-1090  $\text{cm}^{-1}$ ),  $\nu$  O=S=O sülfat (1030  $\text{cm}^{-1}$ ), P-O-P polifosfat (940-980  $\text{cm}^{-1}$ ),  $\nu$  Si-H/ $\nu$ Si-OH silan/silanol (950  $\text{cm}^{-1}$ ), C<sub>4</sub>-O-S sülfat (840  $\text{cm}^{-1}$ ) ve  $\nu$  Si-O siloksan/SiO<sub>4</sub> halkası (800  $\text{cm}^{-1}$ ). FTIR spektrumlarından iki alg türü için karşılaşılan en önemli farklılığın Alg-2 örneğinin 800-1200  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında sıcaklıkla pik şiddetlerinin değişkenlik göstermesidir. Bu durum Alg-1 örneğinde gözlenmemekte olup üç sıcaklık için de aynı pik şiddetleri elde edilmiştir. Sıcaklıkla yapısal anlamda değişimlerin olduğu Alg-2 örneğinde düşük sıcaklık kurutma işleminde sabit hız periyodunun belirgin bir şekilde gözlemlenirken, yüksek sıcaklıklarda bu periyodun çok fazla gözlenmemesinin ilişkili olduğu düşünülmektedir.

#### 5.4.2. SEM Sonuçları

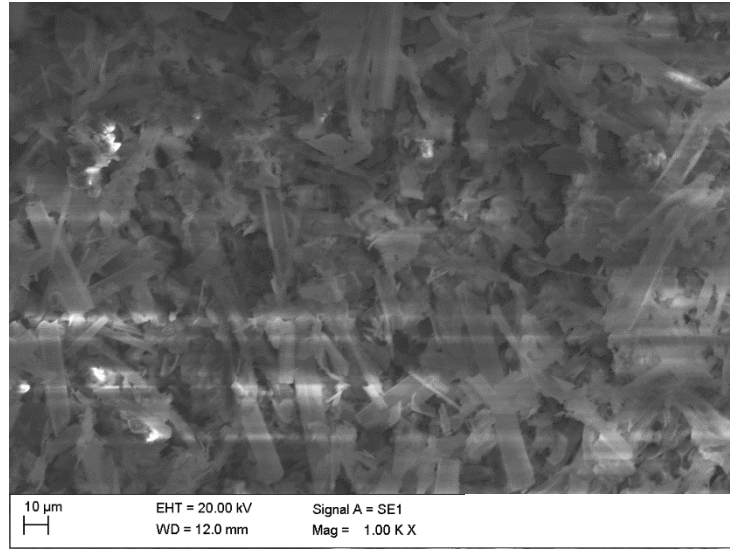
Alg-1 ve Alg-2 örneklerinin 40,50,60 °C sıcaklıklarda ve 1,5 m/s hava akış hızında kurutulan numunelerinin 1000x büyütmelemlerde taramalı elektron mikroskopundaki (SEM) sonuçları Şekil 5.24-5.29 arasında gösterilmiştir.



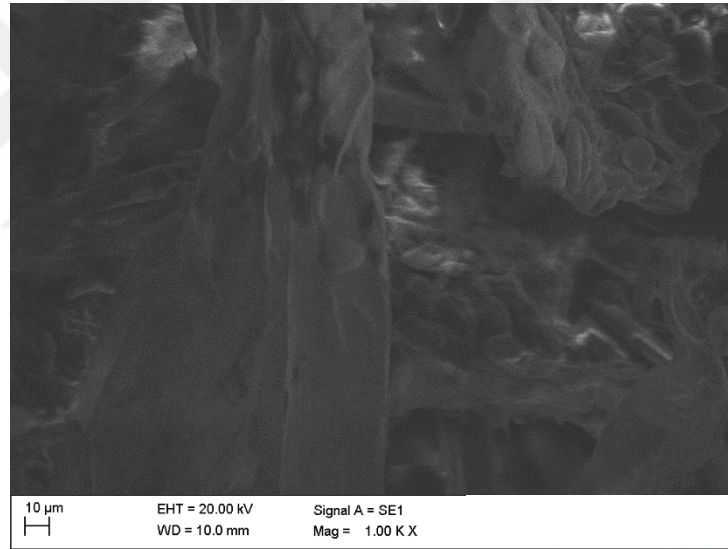
**Şekil 5.23.** Alg-1 örneğinin 40 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü



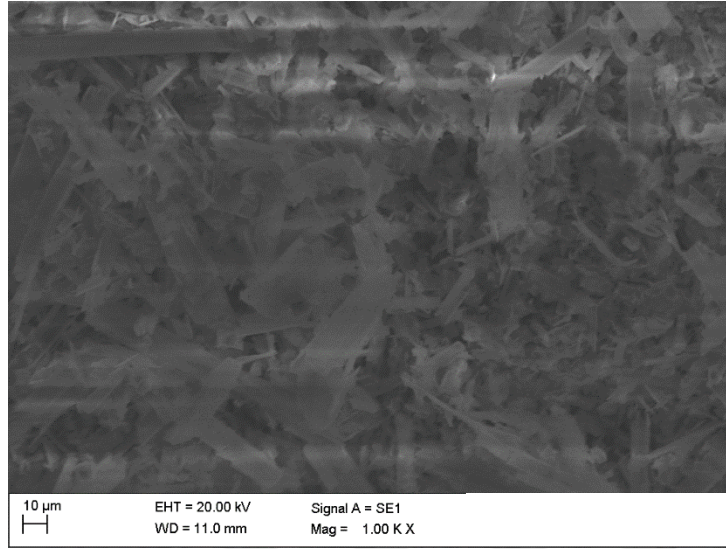
**Şekil 5.24.** Alg-2 örneğinin 40 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü



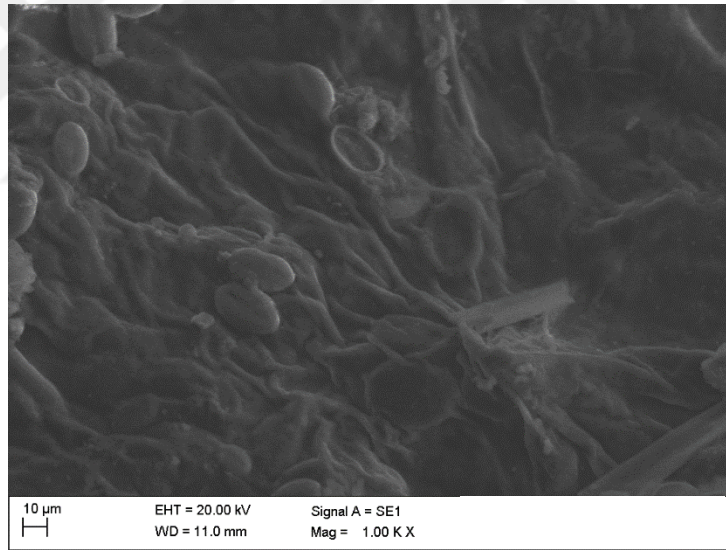
**Şekil 5.25.** Alg-1 örneğinin 50 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü



**Şekil 5.26.** Alg-2 örneğinin 50 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü



**Şekil 5.27.** Alg-1 örneğinin 60 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü



**Şekil 5.28.** Alg-2 örneğinin 60 °C sıcaklık ve 1,5 m/s hava akış hızındaki SEM görüntüsü

SEM ile elde edilen görüntüler incelendiğinde Alg-1 ve Alg-2 örneklerinin gözenekli bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Alg-1 örneğinin daha gözenekli, uzun ve çubuk şeklinde görünümü olduğu gözlemlenmiştir. Alg-2 örneğinin ise gözenekliliği daha düşük ve oval bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmadaki Alg-1 ve Alg-2 örneklerinin SEM görüntüleri literatürde elde edilen SEM görüntüleri ile uyumlu olduğu söylenebilir (Aras, 2020)

#### 5.4.3. Protein Analizi Sonuçları

50 °C sıcaklık ve 1 m/s hava akış hızında kurutulan alg numunelerinin Kjeldahl yöntemi ile yapılan protein analizi sonucunda Alg-1 örneği; %6,56 Alg-2 örneği ise; %11 oranlarında azot miktarlarına sahip olduğu hesaplanmıştır. 6,25 dönüşüm faktörüyle Alg-1 örneğinde %41, Alg-2 örneğinde ise %68,75 miktarında protein tayin edilmiştir. Becker'in 2007 yılında yapmış olduğu bir çalışmada çeşitli mikroalg türleri için kuru madde başına protein içerikleri verilmiştir (Becker, 2007). Alg-1 türü içinde de bulunan *Spirogyra* türü için Becker %20 seviyelerinde ham protein olabileceğini belirtmiştir. *Arthrospira maxima* türü için aynı çalışmada %71 ham protein içeriği verilmiştir. Böylece, karışık türlerden oluşan Alg-1 ve Alg-2 örneklerinin protein analizlerinin literatürle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 5.4.4. Yağ Analizi Sonuçları

Ekstrakte edilen yağ analizi sonucunda yağ miktarları; Alg-1 örneğinde %8,70 Alg-2 örneğinde ise %4,69 olarak belirlendi. Elcik ve Çakmakçı'nın 2017 yılında yapmış oldukları bir çalışmada alg örneklerindeki yağ miktarlarının bu çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (Elcik ve Çakmakçı, 2017).

## 6. SONUÇLAR

Elazığ Yedigöze yöresine ve havuz suyuna ait tatlı su kaynaklarından toplanan alg örneklerinin tepsili kurutucuda kuruma karakteristiği ve modelleme çalışmalarının yapıldığı bu tez çalışmasında aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

- Yapılan tür analizi sonucunda temin edilen tatlı su alglerinden Alg-1 örneğinde 4 türe (*Zygnema*, *Synedra*, *Surirella* ve *Amphora*,) Alg-2 örneğinde ise 2 türe (*Spirogyra* ve *Synedra*) rastlanmıştır.
- Çalışılan alg örneklerinin beklenildiği üzere yüksek nem içeriğine sahip (Alg-1 için %89 ve Alg-2 için %92) oldukları belirlenmiştir.
- Kuruma eğrilerinden her iki alg türü için de sıcaklık arttıkça kuruma zamanının gözlemlenmiştir. Hava akış hızının kuruma üzerine sıcaklık yanında neredeyse pek bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kuruma eğrilerinden ayrıca Alg-1 örneğinin Alg-2 örneğine göre daha kısa sürede kuruma işlemi gerçekleştirdiği görülmüştür. Başlangıç nem oranının daha yüksek olması, Alg-2 örneğinin daha uzun sürede kurumasının sebebi olduğu söylenebilir.
- Kuruma hızı eğrilerinden Alg-1 örneğinde sabit hız periyoduna sadece düşük sıcaklık ve düşük hava akış hızı değerlerinde rastlanırken, Alg-2 örneğinde tüm düşük hava akış hızında tüm sıcaklıklarda sabit hız periyoduna rastlandığı görülmüştür. Bu durumun büyük ölçüde çalışılan iki alg türünün gözenek yapısının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM sonuçlarından, Alg-2 numunesine göre daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu anlaşılan Alg-1 numunesinde literatürde de belirtildiği üzere sabit hız periyoduna çok fazla rastlanmamıştır. Bununla beraber, daha sağlıklı yorumların yapılabilmesi için BET analiziyle gözenek boyutlarının da ölçülmesi gerektiği not edilmektedir. FTIR analizleri sonucunda çalışılan alg örnekleri için elde edilen  $800-1200\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki piklerin, özellikle Alg-2 örneğinde farklı olmasının da kuruma periyotları üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Bu bölgede nem transferini kolaylaştıracak ya da engelleyecek bileşen ya da bileşenlerin daha ayrıntılı başka yöntemlerle analiz edilerek kuruma olayı ile ilişkilendirilmesi bundan sonraki çalışmalar için önerilmektedir.
- Bu tez çalışmasında, her iki alg türü için de elde edilen deneysel nem oranı değerleri çeşitli kuruma model eşitlikleri ile kıyaslanmıştır. STATİSTİCA programıyla gerçekleştirilen non-lineer hesapla yapılan değerlendirmeler sonucunda iki alg türü için de en iyi kuruma modelinin Difüzyon modeli olduğu tespit edilmiştir. İstatistiksel analizler Difüzyon modelindeki sabitlerin sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade edilmesiyle elde edilen türetilmiş model eşitlikleri ile de gerçekleştirilmiştir.

Türetilmiş model eşitliklerle yapılan modelleme sonuçlarından Alg-1 örneği için 6 nolu; Alg-2 örneği için 5 nolu model ile en iyi uyumun elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

- Tepsili kurutucuda kurutulan alg örneklerinin FTIR spektrumlarının literatürde tatlı su alg örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen FTIR spektrumlarına benzer olduğu görülmüştür. Alg-1 örneğinin FTIR spektrumları tüm kurutma sıcaklıklarında değişme göstermemiştir. Buna karşılık, Alg-2 örneğinin 40 °C'deki FTIR spektrumunun 50 ve 60 °C'deki spektrumlardan, absorbans şiddetleri bakımından, farklı olduğu belirlenmiştir. Alg-2 örneği için 800-1200 cm<sup>-1</sup>'deki pik şiddetlerinin ise tüm sıcaklık değerlerinde farklı olduğu FTIR sonuçlarından saptanmıştır. Alg-2 örneğinin FTIR spektrumlarındaki bu farklılıkların kuruma olayı üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.
- Kurutulan alg örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde alg örneklerinin gözenekli bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Alg-1 örneğinin Alg-2 örneğinden daha fazla gözenekli olduğu da belirlenmiştir. Alg-1 örneğinin lif yapısının uzun ve çubuk şeklinde, Alg-2 örneğinin oval bir yapıya sahip olduğu SEM analizlerinden görülmektedir.
- Alg örnekleri için yapılan protein analizi sonuçlarından, Alg-2 örneğinin protein değerinin daha zengin olduğu sonucuna varılmıştır. İki alg örneğinin yağ içeriği analizi sonucu literatür bilgileriyle uyumaktadır.

## KAYNAKLAR

- Altuner, Z., (2010). *Sistematik Botanik-I*, Aktif Yayınevi, İstanbul
- Aras A., (2020). “Denizel Makroalg, *Ulva Intestinalis* (Chlorophyta), *Ellisolandia Elongata* (Rhodophyta), *Dictyota Dichotoma* Ve *Sargassum Vulgare* (Pheophyta)’Nin Lipit İçeriği Ve Antimikrobiyal Etkilerinin Belirlenmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Atay, D., (1978). *Deniz Yosunları ve Değerlendirme Olanakları*, Başbakanlık Basımevi, Ankara ss.128.
- Bahadar A., Bilal Khan M., (2013). Progress in energy from microalgae: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, ss.27, 128-148.
- Banchero, J.T., Badger, W.L., (1973). Kimya Mühendisliğine Giriş:Ünit operasyonlar, (Çev:Çataltaş, İ.), İstanbul
- Becker E.W., (2007). Micro-algae as a source of protein, *Biotechnol. Adv.*, 25 (2), ss.207-210.
- Behera, B., Acharya, A., Gargey, I.A., Aly, N. ve Balasubramanian, P., (2019). Bioprocess engineering principles of microalgal cultivation for sustainable biofuel production, *Bioresource Technology Reports*, (5) ss.297-316.
- Blair M.F., Kokabian B., Gude V.G., (2014). Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2 (1), ss.665-674.
- Borowitzka, M.A. (1998). Limits to growth, in *Wastewater treatment with algae*, Y.-S. Wong and N.F.Y. Tam, Editors. Springer Verlag. 203–226.
- Bowen H J M, (1966). *Trace Elements in Biochemistry*, Academic Press, London and New York.
- Brennan, L., Owende, P. (2010). Biofuels from Microalgae A Review of Technologies for Production, Processing and Extractions of Biofuels and Coproducts. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14: 557-77.
- Cai, T., Park, S.Y. ve Li, Y., (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (19) 360-369.
- Casal Garcia M N, Ramirez I, Leets I, Pereira A C, Quiroga M F, (2009). Antioxidant capacity, polyphenol content and iron bioavailability from algae (*Ulva sp.*, *Sargassum sp.* and *Porphyra sp.*) in human subjects, *British Journal of Nutrition*, 101, 79-85.
- Ceylan, İ. (2007). *Programlanabilir (PLC) Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı, İmalatı ve Kereste Kurutma İşleminde Deneysel İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara
- Chapman R L, Buchheim M. A, (1992). *Green algae and the evolution of land plants; inferences from nuclear-encoded rRNA gene sequences*, *Biosystems*, 28, ss.127-137.
- Charlier R H, Chaineux M C P, (2009). The healing sea: a sustainable coastal ocean resource: thalassotherapy, *Journal of Coastal Research*, 25 (4), 838-856.
- Chen C, Yeh K, Aisyah R, Lee D, Chang J. (2011). “Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review”. *Bioresource Technology*, 102, 71-81.
- Chisti Y. (2008). “Biodiesel from microalgae beats bioethanol”. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126-131.
- Chisti Y., (2007). Biodiesel from microalgae, *Biotechnol. Adv.*, 25 (3), 294-306.
- Chokshi K., Pancha I., Trivedi K., George B., Maurya R., Ghosh A., Mishra S., (2015). Biofuel potential of the newly isolated microalgae *Acutodesmus dimorphus* under temperature induced oxidative stress conditions, *Bioresour. Technol.*, 180, 162-171.
- Chorus, I and Bartram, J. (1999). *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. E & FN Spon, London, on behalf of the World Health Organization, p. 400. Geneva.
- Christensen, B.E., Kjosbakken, J. & Smidsrod, O. (1985). Partial chemical and physical characterization of two extracellular polysaccharides produced by marine periphytic *Pseudomonas sp.* Strain NCMB 2021. *Applied and Environmental Microbiology*, 50: 837–845.

- Christenson L., Sims R., (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts, *Biotechnol. Adv.*, 29 (6), 686-702.
- Chu JC, Lane AM, Conklin D, (1953). "Evaporation of liquids into their superheated vapors", *Industrial and Engineering Chemistry*, p.1586, 45.
- Chua K.J., Mujumdar A.S., Hawlader M.N.A., Chou S.K., Ho J.C., (2001). Batch drying of banana pieces- effect of stepwise change indrying air temperature on drying kinetics and product colour, *Food Research International*, 34 (8), 721-731.
- Chua, K.J. and Chou, S.K., (2005). A comparative study between intermitten microwave and infrared drying of bioproducts, *international T.FoodSci and Tecnol.*,40,23-39
- Cirik Ş, Cirik S, (2011). Su bitkileri I-Deniz Bitkilerinin Biyolojisi, Ekolojisi ve Yetiştirme Teknikleri, Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayınları, 58, 135-145.
- Cirik, S. ve Gökpinar, Ş. (1993). *Plankton Bilgisi ve Kültürü*. Ege Üniversitesi Su Ürünleri Yayınları (Ders Kitabı), s. 274. İzmir.
- Cirik, Ş., Cirik, S., (2004). Su Bitkileri (Deniz Bitkilerinin Biyolojisi, Ekolojisi Yetiştirme Teknikleri). Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayınları, Bornova – İzmir.
- Cohen, Y., Jørgensen, B.B., Revsbech, N.P. &Poplawski, R. (1986). Adaptation to hydrogen sulfide of oxygenic and anoxygenicphotosynthesis among cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 51: 398–407.
- Converti A., Casazza A.A., Ortiz E.Y., Perego P., Del Borghi M., (2009). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 48 (6), 1146-1151.
- Coulson, J.M., Richardson, J.F., (1991). *Chemical Engineering*, Volume 1, 4th ED, Pergamon Press, Oxford.
- Çağatay, S., Kıymaz, T., Koç, A., Bölük, G., Bilgin, D. (2012). Dünya ve Türkiye biyoenerji piyasalarındaki gelişmelerin ve potansiyel değişikliklerin Türk tarım ve hayvancılık sektörleri üzerindeki etkilerinin modellenmesi ve Türkiye için biyoenerji politika alternatiflerinin oluşturulması. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü. TEPGE Yayın No: 204.
- Çakı, Z. (2009). Ege Denizi Kıyılarında Bulunan Bazı Makro Alg Türlerinin Antimikrobiyal ve Antioksidan Aktivitelerinin Saptanması. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pp. 119, Manisa.
- De Bhowmick G., Subramanian G., Mishra S., Sen R., (2014). Raceway pond cultivation of a marine microalga of Indian origin for biomass and lipid production: A case study, *Algal Res.*, 6, Part B, 201-209.
- Dębowski M, Zieliński M, Krzemieniewski M, Dudek M, Grala A. (2012). "Microalgae-cultivation methods". *Polish Journal of Natural Sciences*, 27(2), 151-164.
- Delele, M.A. Weiglera, F. Mellmann, J. (2015). Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: A Review. *Drying Technology*, 33(5), 541-558.
- Demirbas A., (2010). Use of algae as biofuel sources, *Energy Convers. Manage.*, 51 (12), 2738-2749.
- Demirbaş, A., (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49: 2106-2116.
- Devahastin S., (2000). Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying. Exerges Corporation, Montreal.
- Dring M.J. (1986). *The Biology of Marine Plants*. Edward Arnold (Australia) Pty Ltd. 80 Waverley Road, Caulfield East Victoria 3145, Australia.
- Dural B, (1989). Taxonomic investigation of the order Ulvales in Çandarlı Bay II. Ulvaceae A) *Ulva* L. species, *Doğa Turkish Journal of Botany*, 13, 474-486,.
- Eksis, (2017). Endüstriyel Kurutma Sistemleri, İnternet Sayfası, [www.kurutma.net/boru%20tipi%20kurutucu.html](http://www.kurutma.net/boru%20tipi%20kurutucu.html).
- Elcik, H. ve Çakmakçı, M., (2017). Mikroalglerden Yenilenebilir Biyoyakıt Üretimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32,3.

- Erbay, B. ve Küçüköner, E., (2008). “Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri”, Türkiye 10. Gıda Kongresi, Erzurum.
- Ersöz, M. A. (2008). Isı geri kazanımlı akışkan yatak sürekli kurutucu tasarımı, imalatı ve tuz kurutmasında enerji analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Gamal A A, (2010). Biological importance of marine algae, Saudi Pharmaceutical Journal, 18, 1- 25.
- Geankoplis C. J., (2003). Transport Processes and Separation Processes Principles Prentice-Hall, 4th edition, NJ, J. D. Seader, E. J. Henley, Separation Process.
- George B., Pancha I., Desai C., Chokshi K., Paliwal C., Ghosh T., Mishra S., (2014). Effects of different media composition, light intensity and photoperiod on morphology and physiology of freshwater microalgae *Ankistrodesmus falcatus* – A potential strain for bio-fuel production, Bioresour. Technol., 171, 367-374.
- Ginzburg, A.S., (1996). Application of İnfrared radiation in food processing, Leonard Hill, 174-254, London
- Gonçalves A.L., Simões M., Pires J.C.M., (2014). The effect of light supply on microalgal growth, CO<sub>2</sub> uptake and nutrient removal from wastewater, Energy Convers. Manage., 85, 530-536.
- Gross M. (2013). Development and Optimization of Algal Cultivation Systems. MSc Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, US.
- Guner H, Aysel V, (1989). Tohumuz Bitkiler I. Cilt Algler, Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, p. 45-56.
- Guner H, Aysel V, A (1977). taxonomic study on some species *Ulva* (Chlorophyta) in Izmir Bay, Ege University Journal of Faculty of Science B1, 241-251.
- Güven K C, Bora A, Sunam G, (1969). Alkaloid content of marine algae: I. Hordenine from *Phyllophora nervosa*, Eczacılık Bülteni XI., 177-184.
- Gümüş G, (2006). Deniz Marulunun Kimyasal Kompozisyonunun Araştırılması, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Güngör, A. (2013). Sebze ve meyve kurutmada kullanılan kurutucular ve kurutma teknolojileri. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 43-63.
- Güngör, A. ve Özbalta, N., (1997). Endüstriyel kurutma sistemleri, TMMOB, MMO, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı.
- Hacıfazlıoğlu, H . (2019). Madencilik Endüstrisinde Kurutma İşlemi ve Alternatif Kurutucu Tiplerinin Tanıtılması. MT Bilimsel , (15) , 1-20 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mtb/issue/43064/521674>
- Hacıfazlıoğlu, H. (2016). Kömür Hazırlama Ders Notları, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, s.253.
- Haris R S, (1963). Vitamin K in Comprehensive Biochemistry Vol. 9: Pyrrole Pigments, Isoprenoid Compounds and Phenolic Plant Constituents. Florkin M, Stotz E (Eds.), Elsevier, New York, 192-198.
- Harun R., Singh M., Forde G.M., Danquah M.K., (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products, Renewable Sustainable Energy Rev., 14 (3), 1037-1047.
- Hoppe Heinz A, Levring T, Tanoka Y, (1979). Marine Algae in Pharmaceutical Science, de Gruyter, Berlin, New York.
- Hossain A.S., Salleh A., Boyce A.N., Chowdhury P., Naqiuddin M., (2008). Biodiesel fuel production from algae as renewable energy, Am. J. Biochem. Biotechnol., 4 (3), 250-254.
- Huang, L.; Kumar, K. Mujumdar, A.S. (2003). A parametric study of the gas flow patterns and drying performance of co-current spray dryer: Results of a computational fluid dynamics study. Drying Technology 21 (7), 957-978.
- Ivanova V, Rouseva R, Kolarova M, Serkedjieva J, Rachev R, Manolova N, (1994). Isolation of a polysaccharid with antiviral effect from *Ulva lactuca*, Preparative Biochemistry and Biotechnology, 24, 83-97.

- Jankowska, E., Sahu, A.K. ve Oleskowicz-Popiel, P., (2017). Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (75) 692-709.
- Jin, H.-F., Lim, B.-R. ve Lee, K., (2006). Influence of nitrate feeding on carbon dioxide fixation by microalgae, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41,(12) 2813-2824.
- Johnston J. (2008). New world for biofuels. *Energy Law*;86:10e4
- Karabacak, M. S., Esin, A., & Cekmecelioglu, D. (2014): Drying Behavior of Meat Samples at Various Fiber Directions and Air Conditions. *Drying Technology*, 32: 695–707.
- Karthikeyan, M., Zhonghua, W., Mujumdar A.S. (2009). Low-Rank Coal Drying Technologies-Current Status and New Developments, *Drying Technology*, 27, 403-415.
- Katarzyna L., Sai G., Singh O.A., (2015). Non-enclosure methods for non-suspended microalgae cultivation: literature review and research needs, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 42, 1418-1427.
- Khan S.A., Rashmi, Hussain M.Z., Prasad S., Banerjee U.C., (2009). Prospects of biodiesel production from microalgae in India, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 13 (9), 2361-2372.
- Kıran, E. Ve Arkadaşları, (1980). Studies on seaweeds for Paper Production. *Botanica Marina*. Vol. XXII.
- Kim T.-H., Lee Y., Han S.-H., Hwang S.-J., (2013). The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using *Scenedesmus* sp. for wastewater treatment, *Bioresour. Technol.*, 130, 75-80.
- Kingman, S.W., Rowson, N.A. (2000). The Effect of Microwave Radiation on the Magnetic Properties of Minerals, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 35, 144-150.
- Komolafe O., Velasquez Orta S.B., Monje-Ramirez I., Noguez I.Y., Harvey A.P., Orta Ledesma M.T., (2014). Biodiesel production from indigenous microalgae grown in wastewater, *Bioresour. Technol.*, 154, 297- 304.
- Kumar A., Ergas S., Yuan X., Sahu A., Zhang Q., Dewulf J., Malcata F.X., van Langenhove H., (2010). Enhanced CO<sup>2</sup> fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions, *Trends Biotechnol.*, 28 (7), 371-380.
- Lakaniemi A.M., (2012). Microalgal cultivation and utilization in sustainable energy production, Ph. D., Tampere University of Technology, Department of Chemistry and Bioengineering, Tampere.
- Langrish, T.A.G.; Fletcher, D.F. (2003). Prospects for the modelling and design of spray dryers in the 21st century. *Drying Technology*, 21 (2), 197-215.
- Lee C.S., Lee S.-A., Ko S.-R., Oh H.-M., Ahn C.-Y., (2015). Effects of photoperiod on nutrient removal, biomass production, and algal-bacterial population dynamics in lab-scale photobioreactors treating municipal wastewater, *Water Res.*, 68, 680-691.
- Lewicki, P., Arboix, J. A., Botó, P. G., Beringues, J. C., & Moreno, I. M. (2014). Drying. M. Dikeman, & C. Devine içinde, *Encyclopedia of Meat Science* (Second Edition) (s. 471-479). London: Elsevier Ltd.
- Liu, H., Ji, H. W., Xin, M. (1998). The carbon dioxide system in Jiaozhou Bay. *Marine Sciences*, 6, 44–47.
- Manial A, Sujith S, Selvin J, Shakir C, Kiran G S, Sephal G, (2009). Antibacterial activity of *Falkenbergia hillebrandii* (Born) from the Indian coast against human pathogeny, *Phyton– International Journal of Experimental Botany*, 78, 161-166.
- Mason C P, (1977). Studies of marine algal proteins using acrylamide gel electrophoresis, Abstracts of the IX. International Seaweed Symposium, Santa Barbara, California, *Journal of Phycology*, 13. Supplement.
- Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S., (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14 (1), 217-232.
- Max, (2017). MAX Industrial Microwave, <http://www.maxindustrialmicrowave.com/>
- McCabe, W.L, Smith, J.C., Peter, H., (1993). Unit Operations of Chemical Engineering, 5th ED., McGraw-Hill Inc., New York

- McGinn, P.J., Dickinson, K.E., Bhatti, S., Frigon, J.-C., Guiot, S.R. ve O’Leary, S.J., (2011). Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations, *Photosynthesis Research*, 109,(1-3) 231-247.
- Medeiros D.L., Sales E.A., Kiperstok A., (2015). Energy production from microalgae biomass: carbon footprint and energy balance, *J. Cleaner Prod.*, 96, 493-500.
- Moyers CG, Baldwin GW, (1999). "Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying" *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Ed.: RH Perry, DW, Green, JO Maloney), McGraw-Hill, New York, s.12/1-90.
- Mujumdar, A.S., (2000). *Mujumdar’s Practical Guide to Industrial Drying* (Edited by Sakamon Devahastin).
- Murdock, J.N. and Wetzel, D.L. (2009). FT-IR Microspectroscopy Enhances Biological and Ecological Analysis of Algae, *Applied Spectroscopy Reviews* 44(4): 335–361.
- Nigam, P.S. and Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1): 52–68.
- Nwosu F, Morris J, Lund V A, Stewart D, Ross H A, McDougall G J, (2011). Antiproliferative and potential antidiabetic effects of phenolic rich extracts from edible marine algae, *Food Chemistry*, 126, 1006-1012.
- Orhan B S, Atici T, Brun R, Perozza R, Tasdemir D, (2006). Turkish freshwater and marine macrophyte extracts in vitro anti protozoal activity and inhibit FabI, a key enzyme of *Plasmodium falciparum* fatty acid byosynthesis, *Phytomedicine*, 13, 388-393.
- Otsuka K., Yoshino A., (2004). A fundamental study on anaerobic digestion of sea lettuce, *Oceans '04. Mts/Ieee Techno-Ocean '04*, Kobe, 1770-1773, November 9-12.
- Park, J.H. Lee, C.H. Park, Y.C. Shun, D. Bae, D.H. (2014). Drying efficiency of Indonesian lignite in a batchcirculating fluidized bed dryer. *Drying Technology* 32(3), 268-278.
- Perry, R., H., Green, D., W., (1984). *Perry’s Chaimical Engineer Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill. , New York
- Raesossadati M.J., Ahmadzadeh H., McHenry M.P., Moheimani N.R., (2014). CO<sup>2</sup> bioremediation by microalgae in photobioreactors: Impacts of biomass and CO<sup>2</sup> concentrations, light, and temperature, *Algal Res.*, 6, Part A, 78-85.
- Raheem A, Wan Azlina WAKG, Taufiq Yap YH, Danquah MK, Harun R. (2015). “Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 990-999.
- Ranga Rao A., Ravishankar G.A., Sarada R., (2012). Cultivation of green alga *Botryococcus braunii* in raceway, circular ponds under outdoor conditions and its growth, hydrocarbon production, *Bioresour. Technol.*, 123, 528-533.
- Rankel AS, Lieberman HA, Shiffmann RF, (1986). "Drying" *The Theory and Practice of Industrial Pharmacy*, Ed.: L Lachman, HA Lieberman, JL Kanig, Lea and Febiger, s. 47-65.
- Rashid N., Ur Rehman M.S., Sadiq M., Mahmood T., Han J.-I., (2014). Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 40, 760-778.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review, *Journal of Food Engineering*, 49, 4, 311-319.
- Razzak S.A., Hossain M.M., Lucky R.A., Bassi A.S., de Lasa H., (2013). Integrated CO<sup>2</sup> capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 27, 622- 653.
- Sakamoto T., Bryant D.A., (1998). Growth at low temperature causes nitrogen limitation in the cyanobacterium *Synechococcus* sp. PCC 7002, *Arch. Microbiol.*, 169 (1), 10-19.
- Saldamlı, İ., & Saldamlı, E. (2000). *Gıda Endsütrisi Makinaları*, Ankara: Savaş Yayınevi.
- San Pedro A, González-López CV, Acien FG, MolinaGrima E. (2014). “Outdoor pilot-scale production of *Nannochloropsis gaditana*: Influence of culture parameters and lipid production rates in tubular photobioreactors”. *Bioresource Technology*, 169, 667-676.

- Schiffmann, R.F., (1995). Microwave and dielectric drying. In: Handbook of Industrial Drying (edited by A.S Mujumdar). Pp. 345–372. New York, USA: Marcel Dekker Inc
- Scott, S.A., Davey, M.P., Dennis, J.S., Horst, I., Howe, C.J., LeaSmith, D.J. and Smith, A.G. (2010). Biodiesel from algae: challenges and prospects, *Current Opinion in Biotechnology*, 21:277-286
- Shibata H., ve Hirohashi Y., (2013). Effect of Segment Scale in a Pore Network of Porous Materials on Drying Periodsi *Drying Technology*, 31 : 743-751.
- Si, C., Wu, J. Wang, Y. Shang, X. (2015). Drying of low-rank coals: A review of fluidized bed Technologies. *Drying Technology*, 33(3), 277-287.
- Silva CEF, Bertucco A. (2016). "Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: A review and technological Outlook". *Process Biochemistry*, 51, 1833-1842.
- Singh A., Nigam P.S., Murphy J.D., (2011). Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels, *Bioresour. Technol.*, 102 (1), 26-34.
- Singh, A., Pant, D., Korres, N.E., Nizami, A.S., Prasad, S., Murphy, J.D. (2010). Key Issues in Life Cycle Assessment of Ethanol Production From Lignocellulosic Biomass: Challenges and Perspectives. *Bioresource Technology* 101 (13): 5003-12.
- Slegers PM, van Beveren PJM, Wijffels RH, van Straten G, van Boxtel AJB. (2012). "Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors". *Applied Energy*, 105, 395-406.
- Spiegel, M., Stephens, L., Çeviri Ed: Esin, A. ve Çelebioğlu, S. (1999). İstatistik, Nobel yayınları, Ankara.
- Stal L. (2002). *Cyanobacterial Mats and Stromatolites..Eds: Whitton, B.A., Potts, M., in: The Ecology of Cyanobacteria: Diversity in time and space*. Springer, Netherlands, Dordrecht. doi: 10.1007/0-306-46855-7\_4
- Suali E., Sarbatly R., (2012). Conversion of microalgae to biofuel, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 16 (6), 4316-4342.
- Suganya T, Varman M, Masjuki HH, Renganathan S. (2016). "Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 909-941.
- Tan, X., Kong, F., Yu, Y. (2009). Effects of Enhanced Temperature on Algae Recruitment and Phytoplankton Community Succession. *China Environmental Science*, 29(6), 578-582.
- Toğrul, H., (2006) . *Journal of Food Engineering* (77), 610–619.
- Travers DN, (1990). "Drying" *Pharmaceutics: The Science of Dosage Form Design*, (Ed. ME Aulton), Churchill Livingstone, s. 629-646.
- Treybal, R. E., (1981). *Mass Transfer Operations*, 3rd. ED., McGraw-hill Inc., New York.
- Vardar Y, (1979). Bitki Morfolojisinde Temel Bilgiler, Barış Yayınları, İzmir, p. 35-38.
- Vega, A., Fito, P., Andrés, A. ve Lemus, R., (2007). "Mathematical Modeling of Hot-Air Drying Kinetics of Red Bell Pepper (var. Lamuyo)", *Journal of Food Engineering*, 79: 1460-1466.
- 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, *Bioresour. Technol.*, 129, 7-11.
- Wang H, Ji C, Bi S, Zhou P, Chen L, Liu T. (2014). "Joint production of biodiesel and bioethanol from filamentous oleaginous microalgae *Tribonema* sp. ". *Bioresource Technology*, 172, 169-173.
- Wilson, W.G., Young, B.C. Irwin. W. (1992). Low-rank coal drying advances. *Coal* 1992, 24-27.
- Xu M., Bernards M., Hu Z., (2014). Algae-facilitated chemical phosphorus removal during high-density *Chlorella emersonii* cultivation in a membrane bioreactor, *Bioresour. Technol.*, 153, 383-387.
- Yağcıoğlu A, (1999). Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 536, Bornova-İzmir.
- Yeh K.-L., Chang J.-S., Chen W.-m., (2010). Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31, *Eng. Life Sci.*, 10 (3), 201-208.

- Yılmaz HK. (2006). “Mikroalg üretimi için fotobiyoreaktör tasarımları”. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 23(1/2), 327-332.
- Zeng X., Danquah M.K., Chen X.D., Lu Y., (2011). Microalgae bioengineering: From CO<sub>2</sub> fixation to biofuel production, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 15 (6), 3252-3260.
- Zeybek N, Zeybek U, Saygıner B, (2003). *Farmasötik Botanik*, Meta Basımevi, İzmir, p. 102-103.
- Zhao, R., Bean, S.R., Wang, D., Park, S.H., Schober, T.J., Wilson, J.D. (2009). Small-scale Mashing Procedure for Predicting Ethanol Yield of Sorghum Grain. *Journal of Cereal Science* 49 (2): 230-38.
- Zhou J, Ashoori F, Susuki S et al, (1993). Protective effect of chlorogenic acid on paraquatinduced in the liver of rats by carbon tetrachloride or 60Co-irradiation, *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 15, 119-125.
- Zhu L., (2015). Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 41, 1376-1384.
- Zhu, J., Rong, J. ve Zong, B., (2013). Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel, *Chinese Journal of Catalysis*, (34,1) 80-100.



## ÖZGEÇMİŞ

# Ebru CÖMERT

---

| Category   | Value   |
|------------|---------|
| Category 1 | Value 1 |
| Category 2 | Value 2 |
| Category 3 | Value 3 |
| Category 4 | Value 4 |
| Category 5 | Value 5 |
| Category 6 | Value 6 |
| Category 7 | Value 7 |

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

[illegible]

\_\_\_\_\_

| Gender | Should take action | Should not take action |
|--------|--------------------|------------------------|
| Men    | 85%                | 15%                    |
| Women  | 85%                | 15%                    |

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

| Government          | Percentage |
|---------------------|------------|
| Current government  | 85%        |
| Previous government | 15%        |