

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA  
SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ VE  
MATEMATİKSEL MODELİ**

**Doğan KAYALAR**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Sunuş Tarihi: 15/02/2019**

**Bornova-İZMİR**

**2019**



Doğan KAYALAR tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ VE MATEMATİKSEL MODELİ” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 15/02/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı : Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA**

.....

**Raportör Üye : Doç. Dr. M.Turhan ÇOBAN**

.....

**Üye : Dr. Öğr. Üyesi Halil ATALAY**

.....



# EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ VE MATEMATİKSEL MODELİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, döküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

15/02/2019

Mak. Müh. Doğan KAYALAR



**ÖZET****GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANS  
ANALİZİ VE MATEMATİKSEL MODELİ**

KAYALAR, Doğan

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

Şubat 2019, 115 sayfa

Bu çalışmada, güneş enerjili ısıtıcı kurutma sisteminde portakalların kurutulma işlemi gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir. İnce dilimler halinde kesilen portakallar güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde kurutulmuş olup dilimler kurutma öncesi ve sonrası tartılmıştır. Aynı zamanda açık havada kurutulan portakallar da kurutma öncesi ve sonrası tartılarak kurutma makinesinde kurutulan portakalların kurutma sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır. Ölçümü yapılacak numunelerin tespiti için tel raflar kullanılmıştır. Bu raflar sayesinde numunelerin 30 dakikada bir ağırlık değişimlerinin ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerin amacı numunelerdeki ortalama nem miktarı ve kuruma hızındaki değişimlerin saptanmasıdır. Aynı zamanda, dış hava sıcaklığı, dış hava bağıl nemi, güneş ışıınımı değerleri, güneş enerjili ısıtıcı giriş ve çıkış sıcaklıkları ve kurutma kabini içi bağıl nemindeki değişim grafiklerle verilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen veriler MATLAB yardımıyla matematiksel olarak modellenmiş ve her numune için en uygun denklem seçilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Güneş enerjisi, kurutma, güneş enerjili ısıtıcı, güneşli kurutma, kurutma kabini.



**ABSTRACT****PERFORMANCE ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODEL OF  
SOLAR ASSISTED DRYING SYSTEM**

KAYALAR, Doğan

MSc. İn Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

February 2019, 115 pages

In this study, drying of oranges in solar heated drying system was performed and examined experimentally. The oranges cut in thin slices were dried in solar energy assisted drying system and the slices were weighed before and after drying. At the same time, open-air dried oranges were weighed before and after drying and compared to the drying results of the dried oranges in the drying machine. Wire racks were used for the detection of the samples to be measured. Thanks to these shelves, the weight changes of samples were measured every 30 minutes. These measurements are to determine the changes in the average amount of moisture and drying rate in the target samples. At the same time, outdoor air temperature, outdoor relative humidity, solar radiation values, solar energy heater inlet and outlet temperatures, and change in relative humidity inside the drying cabinet are given in the graphs. The results obtained from the experiments were mathematically modelled with MATLAB and the most appropriate equation was chosen for each sample.

**Keywords:** Solar energy, drying, solar enegy heater, solar drying, drying cabinet.



## TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında fikirleriyle ve uzman görüşleriyle bana destek olan değerli hocam Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA'ya, ayrıca öğrenim hayatım boyunca hep yanımda olan maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen canım annem Özden KAYALAR'a, canım babam Kadri KAYALAR'a ve biricik ağabeyim Ufuk KAYALAR'a teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin kullanılmasına izin veren Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN ve Dr. Öğr. Üyesi Halil ATALAY'a, kuru madde tayini deneyinde yardımcı olan Arş. Gör. Altan Aytaç KARAKUŞ'a teşekkür ederim.

Doğan KAYALAR

15/02/2019



**İÇİNDEKİLER**Sayfa

|                                                                          |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                               | vii   |
| ABSTRACT .....                                                           | ix    |
| TEŞEKKÜR .....                                                           | xi    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                    | xvii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                                   | xxiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                     | xxiv  |
| 1. GİRİŞ.....                                                            | 1     |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                               | 3     |
| 3. KURUTMA SÜRECİ.....                                                   | 22    |
| 3.1 Nemli Havanın Özellikleri .....                                      | 22    |
| 3.2 Havanın Nem Miktarını Tayin Yöntemleri .....                         | 26    |
| 3.2.1 Mekanik higrometreler .....                                        | 26    |
| 3.2.2 Elektrikli higrometreler .....                                     | 26    |
| 3.2.3 Gravimetrik yöntem.....                                            | 26    |
| 3.2.4 Çiy noktası (dew point) yöntemi .....                              | 27    |
| 3.2.5 Kuru termometre - yaş termometre (dry bulb-wet bulb) yöntemi ..... | 27    |
| 3.3 Katı Maddenin Nemi .....                                             | 30    |

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 Kurutma Eğrileri .....                                                                           | 30 |
| 3.5. Endüstriyel Kurutucular .....                                                                   | 34 |
| 3.5.1 Kurutma sistemi tipleri ve seçimi .....                                                        | 34 |
| 4. GÜNEŞ ENERJİLİ SİSTEMLER .....                                                                    | 37 |
| 4.1 Sera Tipi Güneş Enerjili Kurutucular .....                                                       | 38 |
| 4.2 Güneş Enerjili Isıtıcılı Kurutucular .....                                                       | 38 |
| 4.2.1 Güneş enerjili kabin kurutucular .....                                                         | 39 |
| 4.2.2 Güneş enerjili raflı kurutucular .....                                                         | 40 |
| 4.3 Güneş Enerjili Kurutmanın Doğal Kurutma ve Diğer Enerji Kaynaklarıyla<br>Karşılaştırılması ..... | 42 |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                                                         | 43 |
| 5.1 Kuru Madde Tayin Düzeneği .....                                                                  | 43 |
| 5.1.1 Nem tayini .....                                                                               | 43 |
| 5.1.2 Etüvde kuru madde tayini deney düzeneği .....                                                  | 45 |
| 5.2 Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Sistemi Deney Düzeneği ve Deneyin Yapılışı<br>.....              | 49 |
| 5.2.1 Güneş toplayıcı sistem .....                                                                   | 51 |
| 5.2.2 Kurutma kabini .....                                                                           | 51 |

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 5.2.3 Ölçüm ve test cihazları .....                   | 51 |
| 6. DENEY SONUÇLARI.....                               | 54 |
| 6.1 Kurutma Deneyi Sonuçları .....                    | 54 |
| 6.1.1 Birinci grup kurutma deneyi (Birinci gün) ..... | 54 |
| 6.1.2 Birinci grup kurutma deneyi (İkinci gün).....   | 56 |
| 6.1.3 Birinci grup kurutma deneyi (Üçüncü gün).....   | 58 |
| 6.1.4 İkinci grup kurutma deneyi (Birinci gün).....   | 60 |
| 6.1.5 İkinci grup kurutma deneyi (İkinci gün).....    | 62 |
| 6.1.6 İkinci grup kurutma deneyi (Üçüncü gün).....    | 64 |
| 6.1.7 İkinci grup kurutma deneyi (Dördüncü gün) ..... | 66 |
| 6.1.8 İkinci grup kurutma deneyi (Beşinci gün) .....  | 68 |
| 6.1.9 Üçüncü grup kurutma deneyi (Birinci gün).....   | 70 |
| 6.1.10 Üçüncü grup kurutma deneyi (İkinci gün).....   | 72 |
| 6.1.11 Üçüncü grup kurutma deneyi (Üçüncü gün) .....  | 74 |
| 6.1.12 Üçüncü grup kurutma deneyi (Dördüncü gün)..... | 76 |
| 6.2 Nem Oranı ve Kuruma Hızı Grafikleri .....         | 78 |

**İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1 Birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için nem oranı ve kuruma hızı grafikleri ..... | 78  |
| 6.2.2 İkinci grup kurutma deneyindeki numuneler için nem oranı ve kuruma hızı grafikleri .....  | 82  |
| 6.2.3 Üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için nem oranı ve kuruma hızı grafikleri .....  | 86  |
| 7. KURUTMA PRENSİPLERİ VE MATEMATİKSEL MODEL .....                                              | 91  |
| 7.1 Nem Yayınımı.....                                                                           | 91  |
| 7.2 Kuruma Eğrilerinin Matematik Modeli .....                                                   | 93  |
| 8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                                       | 105 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ .....                                                                          | 107 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                  | 115 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>                                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.1 Adyabatik doygunluk sıcaklığı ölçüm düzeneği.....                                        | 25           |
| 3.2 Kuru termometre – yaş termometre yöntemi ile havanın nem içeriğinin tayini<br>.....      | 27           |
| 3.3 Nem grafiği .....                                                                        | 29           |
| 3.4 Nem İçeriği-zaman eğrisi: kuruma eğrisi .....                                            | 31           |
| 3.5 Kuruma hızı eğrisi .....                                                                 | 32           |
| 4.1 Sera tipi kurutucu .....                                                                 | 38           |
| 4.2 Güneş enerjili kabin kurutucu .....                                                      | 39           |
| 4.3 Güneş enerjili raflı kurutucu .....                                                      | 41           |
| 5.1 Etüv .....                                                                               | 45           |
| 5.2 Vakum pompası .....                                                                      | 46           |
| 5.3 Desikatör .....                                                                          | 46           |
| 5.4 Hassas terazi .....                                                                      | 47           |
| 5.5 Kurutma deneyi sisteminin şeması .....                                                   | 49           |
| 5.6 Güneş enerjisi destekli kurutucunun önden görünüşü .....                                 | 49           |
| 5.7 Güneş enerjisi destekli kurutucunun arkadan kapakları açık bir şekilde<br>görünüşü ..... | 50           |
| 5.8 Datalogger .....                                                                         | 52           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 5.9 Bağıl nem ölçüm sensörü .....                                                              | 52           |
| 5.10 Thermocouple ve datalogger güç kaynağı .....                                              | 52           |
| 5.11 Piranometre .....                                                                         | 53           |
| 5.12 Hassas terazi .....                                                                       | 53           |
| 6.1 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                 | 55           |
| 6.2 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....  | 55           |
| 6.3 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağl değişimi .....                        | 56           |
| 6.4 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                 | 57           |
| 6.5 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....  | 57           |
| 6.6 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağl değişimi .....                        | 58           |
| 6.7 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                 | 59           |
| 6.8 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....  | 59           |
| 6.9 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağl değişimi .....                        | 60           |
| 6.10 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                | 61           |
| 6.11 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi ..... | 61           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 6.12 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değışimi .....                     | 62           |
| 6.13 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değışim .....                | 63           |
| 6.14 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değışimi ..... | 63           |
| 6.15 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değışimi .....                     | 64           |
| 6.16 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değışim .....                | 65           |
| 6.17 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değışimi ..... | 65           |
| 6.18 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değışimi .....                     | 66           |
| 6.19 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değışim .....                | 67           |
| 6.20 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değışimi ..... | 67           |
| 6.21 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değışimi .....                     | 68           |
| 6.22 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değışim .....                | 69           |
| 6.23 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değışimi ..... | 69           |
| 6.24 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değışimi .....                     | 70           |
| 6.25 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değışim .....                | 71           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>                                                                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 6.26 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....                               | 71           |
| 6.27 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değişimi .....                                                   | 72           |
| 6.28 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                                              | 73           |
| 6.29 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....                               | 73           |
| 6.30 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değişimi .....                                                   | 74           |
| 6.31 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                                              | 75           |
| 6.32 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....                               | 75           |
| 6.33 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değişimi .....                                                   | 76           |
| 6.34 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim .....                                              | 77           |
| 6.35 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi .....                               | 77           |
| 6.36 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağılı değişimi .....                                                   | 78           |
| 6.37 Kurutma kabinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi .....          | 78           |
| 6.38 Kurutma kabinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi ..... | 79           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>                                                                                                                | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 6.39 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi .....             | 79           |
| 6.40 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi .....    | 80           |
| 6.41 Kurutma kabinde kurutulmak üzere tepsiye dizilmiş yaş portakal dilimleri (Birinci grup kurutma deneyi) .....           | 80           |
| 6.42 Kurutma kabinde kurutulan portakal dilimlerin görünüşü (Birinci grup kurutma deneyi) .....                             | 81           |
| 6.43 Kurutulmak üzere açık havada güneşe bırakılan portakal dilimleri (Birinci grup kurutma deneyi) .....                   | 81           |
| 6.44 Açık havada güneşe bırakılan portakal dilimlerinin kurumuş hali (Birinci grup kurutma deneyi) .....                    | 82           |
| 6.45 Kurutma kabinde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi .....          | 82           |
| 6.46 Kurutma kabinde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi ..... | 83           |
| 6.47 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi .....              | 83           |
| 6.48 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi .....     | 84           |
| 6.49 Kurutma kabinde kurutulmak üzere tepsiye dizilmiş yaş portakal dilimleri (İkinci grup kurutma deneyi) .....            | 84           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>                                                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 6.50 Kurutma kabiniinde kurutulan portakal dilimlerin görünüşü (İkinci grup kurutma deneyi) .....                              | 85           |
| 6.51 Kurutulmak üzere açık havada güneşe bırakılan portakal dilimleri (İkinci grup kurutma deneyi) .....                       | 85           |
| 6.52 Açık havada güneşe bırakılan portakal dilimlerinin kurumuş hali (İkinci grup kurutma deneyi) .....                        | 86           |
| 6.53 Kurutma kabiniinde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi .....          | 86           |
| 6.54 Kurutma kabiniinde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi ..... | 87           |
| 6.55 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi .....                 | 87           |
| 6.56 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi .....        | 88           |
| 6.57 Kurutma kabiniinde kurutulmak üzere tepsiye dizilmiş yaş portakal dilimleri (Üçüncü grup kurutma deneyi) .....            | 88           |
| 6.58 Kurutma kabiniinde kurutulan portakal dilimlerin görünüşü (Üçüncü grup kurutma deneyi) .....                              | 89           |
| 6.59 Kurutulmak üzere açık havada güneşe bırakılan portakal dilimleri (Üçüncü grup kurutma deneyi) .....                       | 89           |
| 6.60 Açık havada güneşe bırakılan portakal dilimlerinin kurumuş hali (Üçüncü grup kurutma deneyi) .....                        | 90           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Şekil</u>                                                                                                  | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 7.1 Kurutma kabininde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli ..... | 101          |
| 7.2 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli .....       | 102          |
| 7.3 Kurutma kabininde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli .....  | 102          |
| 7.4 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli .....        | 103          |
| 7.5 Kurutma kabininde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli .....  | 103          |
| 7.6 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli .....        | 104          |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Çizelge</u>                                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.1 Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri .....                                                 | 35           |
| 3.2 Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler .....                            | 36           |
| 7.1 Kurutma kabiniinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi ..... | 98           |
| 7.2 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi .....        | 98           |
| 7.3 Kurutma kabiniinde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi .....  | 99           |
| 7.4 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi .....         | 99           |
| 7.5 Kurutma kabiniinde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi .....  | 100          |
| 7.6 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi .....         | 100          |
| 7.7 Kurutulan tüm numunelerin matematiksel modelleri.....                                                        | 101          |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u>                                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| $w$             | Mutlak nem (kg su / kg kuru hava)                        |
| $y_{ni}$        | Gaz fazında mutlak nem ve mol kesri arasındaki ilişki    |
| $\varphi$       | Bağıl nem                                                |
| $w_v$           | Yüzde nem                                                |
| $C_s$           | Nemli ısı (kj / kg°C)                                    |
| $v_h$           | Nemli hacim (m <sup>3</sup> / mol g)                     |
| $h$             | Entalpi (kj / kg)                                        |
| $\eta_{Ex}$     | Ekserji etkinliği                                        |
| $Ex_{loss}$     | Ekserji kaybı (W)                                        |
| $Q_c$           | İletim ile ısı geçişi (W)                                |
| $Q_k$           | Taşınım ile ısı geçişi (W)                               |
| $Q_r$           | Işınım ile ısı geçişi (W)                                |
| $bN$            | Bağıl nem                                                |
| $P_h$           | Havanın içerdiği nemin buhar basıncı (Pa)                |
| $P_d$           | Doymuş havanın neminin buhar basıncı (Pa)                |
| $H_h$           | Kurutucu havanın mutlak nemi (kg su / kg kuru hava)      |
| $H_d$           | Doymuş havanın mutlak nem içeriği (kg su / kg kuru hava) |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u>                                                                            |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $H_m$           | Kurutulacak maddenin yüzeyindeki su filminin oluşturduğu mutlak nem (kg su / kg kuru hava) |
| $dW/dt$         | Buharlaşma hızı (kg / s)                                                                   |
| $q$             | Isı aktarım hızı (J / s-w)                                                                 |
| $\lambda$       | Suyun latent buharlaşma ısısı (J / kg)                                                     |
| $k$             | Kütle aktarım katsayısı (kg / m <sup>2</sup> s)                                            |
| $A$             | Kurutulacak maddenin yüzey alanı (m <sup>2</sup> )                                         |
| $G$             | Kurutucu havanın kütleli hızı (kg / m <sup>2</sup> s)                                      |
| $k$             | Orantı sabiti                                                                              |
| $m_d$           | Malzemenin nem hariç kütlesi (kg)                                                          |
| $A$             | Kuruma yüzeyi (m <sup>2</sup> )                                                            |
| $\dot{N}$       | Kuruma hızı (kg / m <sup>2</sup> s)                                                        |
| $\Delta W_d$    | Malzemenin nem içeriğindeki değişim (kg su / kg kuru hava)                                 |
| $\Delta \tau$   | Zaman aralığı (s)                                                                          |
| $h_{my}$        | Gaz faza ait kütle transfer katsayısı (m / s)                                              |
| $w$             | Gaz akımının nem içeriği (kg su / kg kuru hava)                                            |
| $w_s$           | Sıvı yüzeyine komşu havanın nemi (kg su / kg kuru hava)                                    |
| $T_s$           | Sıvı yüzey sıcaklığı (°C)                                                                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u>    | <u>Açıklama</u>                                                |
|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| $M_v$              | Su buharının mol kütlesi (g / mol)                             |
| $M_a$              | Kuru havanın mol kütlesi (g / mol)                             |
| $P_v$              | Su buharının kısmi basıncı (Pa)                                |
| $P$                | Toplam basınç (Pa)                                             |
| $w_s$              | Doygunluk Nemi (g / m <sup>3</sup> )                           |
| $T$                | Kuru termometre sıcaklığı (°C)                                 |
| $P_g$              | Kuru termometre sıcaklığında su buharının doyma basıncı (Pa)   |
| $v_h$              | Nemli hacim (m <sup>3</sup> / mol g)                           |
| $(h_{fg})_{T=T_0}$ | T <sub>0</sub> sıcaklığındaki suyun buharlaşma gizli ısısı (J) |
| $m_w$              | Maddenin içerdiği nem kütlesi (kg)                             |
| $m_{km}$           | Kuru madde kütlesi (kg)                                        |
| $W_w$              | Nem içeriği (Yaş madde esaslı) (kg su / kg yaş madde)          |
| $W_d$              | Nem içeriği (Kuru madde esaslı) ( kg su / kg kuru madde)       |
| $M$                | Herhangi bir zamandaki nem içeriği (g / m <sup>3</sup> )       |
| $M_o$              | Başlangıçtaki nem içeriği (g / m <sup>3</sup> )                |
| $MR$               | Herhangi bir zamandaki nem içeriğinin başlangıçtakine oranı    |
| $MR_{prd}$         | Tahmin edilen nem oranı (kg su / kg kuru hava)                 |
| $MR_{exp}$         | Ölçümle bulunan deneysel nem oranı (kg su / kg kuru hava)      |
| $N$                | Gözlem sayısı                                                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u>    | <u>Açıklama</u>                                            |
|--------------------|------------------------------------------------------------|
| $R^2$              | Determinasyon katsayısı                                    |
| $CC$               | Korelasyon katsayısı                                       |
| $RMSE$             | Kök ortalama kare hatası                                   |
| $IP$               | İyileştirme potansiyeli (W)                                |
| $t$                | Zaman (s)                                                  |
| $x$                | Konum (m)                                                  |
| $D_{eff}$          | Etkin yayılım katsayısı                                    |
| $r$                | Yarıçap (m)                                                |
| $M_e$              | Yüzey denge nem içeriği (g / m <sup>3</sup> )              |
| $L$                | Levha kalınlığı (m)                                        |
| $\beta_n^2$        | Bessel fonksiyonu kökleri                                  |
| $E_a$              | Aktivasyon enerjisi (J / mol)                              |
| $D_0$              | Arrhenius denkleminin frekans faktörü (m <sup>2</sup> / s) |
| $R$                | Gaz sabiti (kJ / mol K)                                    |
| <u>Kısaltmalar</u> |                                                            |
| $SEC$              | Özgül enerji tüketimi                                      |
| $CFD$              | Hesaplama akışkanlar dinamiği                              |
| $DOB$              | %100 bağıl nem eğrisi                                      |

UV

Ultraviyole ışınları





## 1. GİRİŞ

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan veya katılardan su veya diğer sıvıların uzaklaştırılmasıdır. Bununla beraber kurutma teriminin en yaygın kullanım yeri katı maddelerden ısıtım yöntemlerle su veya uçucu diğer maddelerin uzaklaştırılması işlemi tanımlamaktadır (Güngör ve Özbalt, 1997). Kurutma gıda maddelerinin korunmasında kullanılan en önemli yöntemlerden biri olup kimya ve üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bir işlemdir (Özbalt ve Güngör, 2000).

Kimyasal süreçlerin en önemli basamaklarından biri kabul edilen kurutma, bir ürünün satışa sunulmasından önceki görünüm ve mukavemet özelliklerini en iyi yansıttığı rutubet seviyesine getirilmesi için uygulanan bir işlemdir. Kurutma işlemi ısı ve kütle aktarımının aynı anda gözlendiği karmaşık bir olaydır. İşlem sırasında kurutucu gazdan katıya doğru ısı aktarımı gerçekleşir. Ürünün kullanım kalitesi ile dayanım özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı, bu işlemde son kurutma derecesinin çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu sebeple kontrollü şartlarda gerçekleştirilmesi önemlidir (Başaran, Bitlisli, Sarı, Özbalt ve Güngör, 2004).

Kurutma işlemi daha az enerji harcamak için açık havada güneş ışığı altında yapılabilir. Ancak açık havada yapılan kurutma işleminde son ürünün kalitesinde ve ürün özelliklerinde belirgin farklılıklar görülebilmektedir. Ayrıca kuruma süresinin uzunluğu ve kurutma işleminin yapıldığı ortama bağlı olarak mikrobiyal risk ve çeşitli kontaminasyonların gelişme riski bulunmaktadır (Özbalt, Güngör, Küçük, 2011). Bu nedenle açık havada kurutma işlemine ek olarak çeşitli endüstriyel kurutucular geliştirilmiştir.

Ülkemiz güneş enerjisi açısından zengin bir potansiyele sahiptir. Bu sebeple, kurutma uygulamalarında güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanımı enerji ekonomisi açısından son derece önemlidir. Meyvelerin, sebzelerin, tahılların, balıkların, etlerin, odunun ve diğer tarım ürünlerinin muhafaza edilmesi için eski çağlardan beri uygulanan en uygun yöntem kurutma yöntemidir. Ayrıca ihracat için de önemi fazladır. Türkiye’de kuru meyve yetiştiriciliğinin çok eski ve üretimin fazla olmasında bu meyvelerin kolay hasat, muhafaza ve nakil edilebilir oluşlarının, ekolojik imkanların uygunluğunun ve doğal olarak yetişmiş olmalarının büyük payı vardır (Ceylan, Aktaş, Doğan, 2006). Ancak, büyük ölçekli üretim için güneş enerjili kurutmanın, hayvanlar, kuşlar ve kemirgenler tarafından mahsullere zarar verilmesi, güneş radyasyonuna veya yağmura maruz kalınması nedeniyle kalitedeki

bozulma, kir, toz veya artıklar tarafından kontaminasyon olarak bilinen dezavantajları vardır.

Ayrıca, gece ve kötü hava koşullarında mahsullerin kaplanması gerektiği ve evcil hayvanların saldırısına karşı korunması gerektiği için emek ve zaman harcanması gerekir. Aynı zamanda düzensiz kuruma nedeniyle böcek istilası ve mikroorganizmaların çoğalması ihtimali de vardır. Bu sebeple, güneş enerjili kurutma yapılabilmesi için geliştirilmiş güneş enerjili kurutucuların kullanılması bu dezavantajların engellenmesini sağlayacaktır (Tiwari, 2016).

Bu tez çalışması kapsamında, güneş enerjili kurutma sistemiyle portakalların, güneş enerjili hava ısıtıcıları yardımıyla absorbe edilen güneş enerjisi ile kurutma kabinine aktarılan sıcak hava ile kurutulması gerçekleştirilmiş, sistemin performans analizi ve matematiksel modeli incelenmiştir. Aynı zamanda kurutma sistemiyle eş zamanlı olarak, açık havada güneş enerjisi ile kurutulan numunelerin, kurutma sisteminde kurutulan numuneler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

(Tripathy and Kumar, 2009) Güneş kurutucularının modellenmesi ve optimizasyonunda gıda ürününün kurutulması sırasında nem difüzyonu ve konvektif kütle transferi katsayıları bilgisi gereklidir. Bu çalışmada kurutma (gecikme faktörü ve kurutma katsayısı) parametrelerinden, yararlanarak, bu katsayıların saptanması için bir yaklaşım önerilmiştir. Kurutma kinetiğinden yararlanarak, sıcaklığa bağlı bu değişkenleri elde etmek için, güneş enerjili kurutucuda silindirik geometride ve dilimlenmiş patates kurutulmuştur. Nem difüzyonu ve konvektif kütle transferi katsayılarının sıcaklıkla arttığı ve dilimlenmiş patatese göre silindirler biçimindeki patates örneklerinde daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmada kurutma dolabı ve güneş enerjili hava ısıtıcısından oluşan sistem kullanılmıştır. Yutucu yüzey olarak mat siyah boyalı alüminyum levha kullanılmıştır. Havanın doğal dolaşımı için güneş enerjili ısıtıcı girişinde ve kurutucu çıkışında 0,305 x 0,05 m boyutlarında iki dikdörtgen açıklık yapılmıştır. Kurutucu içindeki hava akışı, kurutucu içindeki ve dışındaki hava sıcaklıkları arasındaki farktan yararlanarak doğal dolaşımla sağlanmıştır.

(Fudholi et al., 2014) Bu çalışmada, kırmızıbiber kurutulan güneş enerjili kurutma sisteminin performans analizi incelenmiştir. Kırmızıbiber, bu sistemi kullanarak 33 saat içinde yaş medde esasına göre %80 nemden %10 nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Bu çalışmada, güneş enerjili kurutma sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Termodinamiğin birinci kanunundan yararlanarak, toplayıcıda kazanılan yararlı enerjiyi tahmin etmek için enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjili kurutma sistemi için termodinamiğin ikinci yasasından yararlanarak ekserji analizi yapılmıştır. Özgül enerji tüketimi (SEC) 5,26 kW h/kg olarak bulunmuştur. Buharlaşma kapasitesi ve iyileştirme potansiyeli değerleri sırasıyla 0,13 kg/s'den 2,36 kg/s'ye ve 0 W'dan 135 W'a yükselmiştir. İyileştirme potansiyeli kavramı (IP), sistemleri veya süreçleri daha etkili analiz etmede yararlı bir araç olarak düşünülebilir. Bir sistemin veya işlemin iyileştirme potansiyeli  $IP = (1 - \eta_{Ex}) Ex_{loss}$  olarak verilir (Fudholi et al., 2014 and Akpınar., 2010).  $\eta_{Ex}$  ekserji etkinliği,  $Ex_{loss}$  ise ekserji kaybıdır. 420 W/m<sup>2</sup> ortalama güneş ışınlamında ve 0,07 kg/s kütle debisinde güneş enerjili ısıtıcının, kurutma sisteminin, toplama sisteminin ve ekserjinin verimlilikleri sırasıyla %28, %13, %45 ve %57 olarak hesaplanmıştır.

Her deneyde toplam 0,4 kg taze kırmızıbiber kullanılmıştır. Yaklaşık 0,4 kg kırmızıbiber alınmış ve sabit bir ağırlığa ulaşılan  $120 \pm 1$  ° C'lik bir sıcaklıkta bir fırında kurutulmuştur. Kırmızıbiberin ilk ve son kütleleri bir elektronik terazi kullanılarak kaydedilmiştir. İşlem, kurutma işleminin sonuna kadar 1 saat aralıklarla tekrar edilmiştir. Ortalama nem içeriği %80,2 (yaş baz) idi.

- Kırmızı biberin güneş enerjili kurutma sistemiyle kurutulması, 33 saat içinde nem içeriğini %80'den (yaş baz) %10'a (yaş baz) düşürmüştür.
- Güneş enerjili kurutma sistemi sayesinde açık havada kurutmaya göre %49'luk bir tasarruf sağlanmıştır.
- Kuruma süresince, kurutma işlemi sırasında ekserji kayıplarının minimum ve maksimum değerlerinin ne zaman ve nerede olacağını belirlemek için gösterilmiştir.

Ekserji analizi, enerjinin en uygun kullanımının önemli olduğu güneş kurutma sistemlerinin tasarımı ve işletilmesi için stratejilerin oluşturulmasında yararlı bir yöntemdir. Bu nedenle, mümkün olan en yüksek termodinamik verimlilik ile güneş enerjili kurutma sistemlerinin performans değerlendirmelerini yapmak için ekserji analizi kullanılmalıdır.

(Ringeisen et al., 2014) İnsanların beslenmesi için çok önemli olan meyve ve sebzelerin, gelişmekte olan ve özellikle az gelişmiş ülkelerde hasat sonrası yaklaşık %40 oranında kayıp olması büyük bir ekonomik sorun oluşturur. Bu ülkelerde üretim sezonu dışında meyve ve sebzelerin tüketim süresini uzatacak soğuk depolama sorunun enerji maliyeti nedeni ile çözülememesi kurutma uygulamasını öne çıkarır. Bu amaçla meyve ve sebzeler güneş enerjili kurutucular kullanılarak kurutulabilir. Az gelişmiş olan birçok ülke tropik bölgelerdedir. Yüksek nem, kısmen bulutlu hava koşullarının etkin olduğu bu bölgede, düşük maliyetli, yerel olarak mevcut malzemelerden yapılmış, içbükey güneş yoğunlaştırıcı eklenerek etkinliği artırılmış güneş enerjili kurutucu deneysel olarak araştırılmıştır. İki özdeş güneş enerjili kurutucu, birisi kontrol amaçlı, diğeri ise güneş yoğunlaştırıcının etkisini test etmek üzere imal edilmiştir. Başlangıçtaki nem içeriği yaklaşık %90 olan Roma domatesleri ile yapılan kurutma denemeleri, yaz ve sonbahar boyunca çeşitli iklim koşullarında yürütülmüştür. Domatesle %10 nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Deneyler süresince her kurutucuda ve dış ortamda sıcaklık, bağıl nem ve güneş radyasyonu ölçülmüş ve güneş enerjisini yoğunlaştıran elemanın kullanımının, domateslerin kuruma hızını bir nasıl etkilediği incelenmiştir. Yoğunlaştıran elemanın kullanımının, kuruma süresini %21 oranında düşürdüğü,

kurutucu içindeki sıcaklığını arttırdığı, bağıl nemi de düşürdüğü ifade edilmiştir. Taze ve kurutulmuş domateslerin laboratuvar incelemesinde, pH, titrasyon asitliği, renk, Brix, likopen ve C vitamini içerikleri arasında önemli bir fark olmadığı belirlenmiştir.

(VijayaVenkataRaman et al., 2012) Kahve, tütün, çay, meyve, kakao çekirdekleri, pirinç, fıstık ve kereste gibi tarımsal ürünler genellikle göreceli olarak düşük sıcaklıkta kurutulurlar. Bu amaçla gereken sıcak kurutma havası, odun veya fosil yakıtların uygun yakma sistemlerinde yakılması veya güneş enerjili ısıtıcılar ile elde edilirler. Ancak bu yöntemlerin kullanımı bazı sorunları da beraberinde getirir. Odun veya fosil yakıt kullanımı hem pahalı hem de çevreye zarar verir. Güneş enerjisinden yararlanmak, iklimsel koşulların değişkenliğinden büyük ölçüde etkilenir. Bu çalışmada, gelişmekte olan ülkelerde güneş kurutma teknolojilerinin durumu incelenmiştir. Güneş kurutucularının çeşitli tasarımları, türleri ve performans analizi değerlendirilmiştir. Sebze kurutucusu, meyve kurutucu, tahıl kurutucu, üzüm kurutucusu ve benzeri özel bitkiler kullanılarak özel olarak tasarlanan veya test edilen güneş kurutucuları, özellikleri ve bulgular ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Gıda ve tarımsal kurutma için kullanılan tarımsal güneş kurutucuları, endüstriyel kurutma prosesleri için kullanılır. Bunlara, enerji tasarrufu açısından çok yararlı cihazlar olarak bakılabilir. Sadece enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz aynı zamanda çok fazla zaman kazandırır, daha az yer kaplar, ürünün kalitesini geliştirir, süreci daha verimli hale getirir ve çevreyi de korur. Güneşli kurutucular, klasik kurutmanın başlıca dezavantajlarının bazılarından etkilenmez. Güneş kurutma, tüm kurutma işlemi için veya suni kurutma sistemlerinin tamamlanması için kullanılabilir, böylece toplam yakıt enerjisi miktarı azaltılır.

Tarımsal güneş kurutmanın kullanımının artırılması için üç ana engel şunlardır:

- Güneş kurutma sistemlerinin maliyet, performans faktörü konusundaki bilinç eksikliği.
- Teknik bilgi eksikliği.
- Pratik deneyim eksikliği.

Geleneksel açık güneş kurutmanın dezavantajlarının üstesinden gelmenin en iyi alternatifi güneş kırıcı kurutucuların geliştirilmesidir. Fosil yakıt kullanımının

hafifletilmesine ek olarak, kurutulan ürünlerin kalitesi de daha yüksektir ve kurutulmuş ürünlerin kaybı önemli ölçüde azaltılır. İncelenen güneş kurutucularının son teknolojileri şu şekildedir:

- Çeşitli güneş kurutucularının tasarım, geliştirme ve performans değerlendirmeleri gözden geçirilmiştir.
- Doğal konveksiyon ve zorlanmış konveksiyonlu kurutucular, doğrudan ve dolaylı kurutucular, entegre kurutucular, sera kurutucuları, kabin kurutucuları, tünel kurutucuları, karışık kurutmalı kurutucular gibi çeşitli kurutucular tasarım ve performans açısından incelenmiştir.
- Güneş enerjisinden faydalanılamadığı süre zarfında bitkilerin kurutulmasını kolaylaştıran güneş kurutma teknolojilerine özel önem verilmiştir.
- Tahıl kurutucuları, üzüm kurutucuları, soğan kurutucuları, patates kurutucuları gibi belirli bir ürün için özel olarak tasarlanan güneş kurutucuları tasarımları, performans değerlendirmesi simülasyon sonuçlarıyla gözden geçirilmiştir.

(Manaa et al., 2013) Bu makalede kurutulan domateslerin su içeriği %68 ile %75 arasında değişmektedir. Deneyler zorlanmış taşınımlı dolaylı bir güneş kurutucu ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler, domates çeşitlerinin kurutma eğrileri üzerindeki etkisini, kurutma havasının sıcaklığını ve kesilmiş dilimlerin boyutlarını göstermektedir.

Deneylerde kullanılan yerel çeşitler şunlardır:

- Sezon ortası çeşidi olan damarlı kırmızı domatesler,
- Tatlı biber şeklindeki yumuşak Meksika domatesler.

Deneylerde kullanılan geliştirilmiş çeşit ise:

- Rusya'dan erken yetişen, küre veya kalp şeklindeki kırmızı domates çeşididir.

Deneyler, her biri 2,5 kg domates kapasitesinde 10 tepsi içeren bir grup araştırmacı tarafından zorlanmış taşınımlı bir güneş kurutucu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her tepsinin boyutu 1 x 0,5 m, vantilatörün maksimum debisi 1500 m<sup>3</sup>/sa'dır. Tepsiler 1 m yüksekliğinde bir desteğe konulmuştur. Kurutucu şu

kısımları içermektedir: Vantilatör, tepsi, güneş enerjili ısıtıcı, güneş paneli, kurutma kabini, dolap, elektriksel güç kaynağı.

Kurutma deneyleri, farklı nem içerikleri nedeniyle domates çeşidinin, güneş enerjili kurutucu performansını etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, 40°C nin altındaki düşük kurutma sıcaklıkları için, aynı koşullardaki domates çeşitlerinin kuruma hızlarının hemen hemen aynı hızda olduğu ancak 40 ° C'den daha yüksek sıcaklıklarda, kuruma hızlarının ürün çeşitlerine göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca diğer etkili faktör, domates dilimlerinin kalınlığıdır.

(Chouchia et al., 2013) Bu çalışmada, dilimlenmiş patateslerin güvenli depolanması için uygun koşulları sağlamak için, yerel olarak tasarlanmış ve üretilmiş dolaylı güneş kurutma makinelerinin araştırılması amaçlanmıştır. Güneş kurutma sisteminin performansını artırmak için araştırmalar yapılmıştır. Isıl verimliliği artırmak için değişken sayıda fotovoltaik pil ile sistem enerji ihtiyacına katkı sağlanmıştır. Mevcut bulgular ile, en iyi verimliliği sağlamak için en iyi çalışma koşullarının, düşük süre ve daha yüksek ürün kalitesinin aşağıdaki şekilde sağlandığını görülmüştür.

Bu çalışmada, paralel bağlı fotovoltaik modüller tarafından üretilen enerji etkisi ile bir ısıtıcı vasıtasıyla ekstra enerji kullanarak dolaylı güneş enerjili kurutucuda zorlanmış taşınım ile dilimlenmiş patateslerin güneş enerjili hibrit sistemde kurutulması incelenmiştir. Patatesin kuru madde tayini bir güneş panelinin kullanılmasıyla 3 saatte tamamlanmıştır. İki panel kullanılması durumunda bu süre 2 saat 45 dakika olarak bulunmuştur.

(Sallam et al., 2015) Aynı ebatlara sahip olan iki özdeş prototip güneş enerjili kurutucu (direkt ve indirekt), nane kurutmak için kullanılmıştır. Her iki prototip de doğal ve zorlanmış taşınım ile çalıştırılmıştır. İkincisinde, ortam havası kurutucuya 4,2 m s<sup>-1</sup> hızla girdi. Zorlanmış taşınımın ve güneş enerjili kurutucuların tipinin nanenin kuruma kinetiği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Zorlanmış taşınım ile kurutulan nanelerin kuruma hızının, doğal doğal taşınım ile kurutulan nanelere göre, özellikle ilk kuruma sürelerinin (ilk gün) daha yüksek olduğu görülmüştür.

Doğal taşınımlı kurutucuda yapılan çalışmalarda, direkt güneş enerjili kurutucudaki toplam kuruma süresi, indirekt olana göre daha düşüktür. Her iki güneş kurutucusu da aynı atmosfer şartlarında (ortam sıcaklığı, ortam havası hızı ve ortamın bağıl nemi) çalıştırılmıştır. Bununla birlikte, şeffaf plastik filmler ile

ilişkili sera etkisinden dolayı, direkt güneş enerjili kurutucu içindeki kurutma havası sıcaklığı, indirekt olanının hava sıcaklığından daha yüksek olmuştur. Dolayısıyla, kuruma süresindeki bu azalma direkt kurutucudaki her tepsinin üzerindeki yüksek kurutma havası sıcaklığına bağlı olabilir. Birinci tepsinin içindeki nanelerin kuruma süresi, güneş radyasyonuna doğrudan maruz kalmalarının sonucu olarak, bu tepsinin üzerindeki yüksek sıcaklık sebebiyle de düşüktür. Kurutma havası sıcaklığı, bağıl nem ve kurutma havası hızının, tam otomatik fırınlı kurutucu kullanılarak kurutucu kinetiğinin nane nemi üzerindeki etkisi araştırılıp, kurutma havası sıcaklığının nane kuruma hızını etkileyen başlıca faktör olduğu belirtilmiştir.

(Tzempelikos et al., 2015) Silindirik ayva dilimlerinin, tepsilere paralel havanın akışı ile kurutulmasında, ısı ve kütle transferi için sayısal bir model geliştirilmiştir. Model, Fick yasasının analitik çözümünün deneysel olarak türetilen kurutma eğrilerine uydurulmasıyla elde edilen etkin bir nem difüzyon katsayısı ile Fick difüzyonundan dolayı nem taşınımını varsayarak birleştirilmiş tek boyutlu ısı ve kütle taşınımı denklemlerinin sayısal çözümü üzerine kuruludur. Gerekli taşınım ısı ve kütle transfer katsayıları, ticari bir CFD paketi kullanılarak dilim çevresindeki türbülanslı akış alanının CFD hesaplamalarından elde edilmiştir. Özel geometrik akış yapılandırması için Prandtl ve Reynolds sayılarının bir fonksiyonu olarak Nusselt sayısının yeni bir korelasyonu önerilmiştir. Modelin sağlamlık ve hesaplama açısından verimli olması, sıcaklık ve nem kaybının zamanla değişiminin yeterli bir doğrulukla yakalayabilmesi, deneysel bir ayarlamaya minimum gereksinimi dolayısıyla mühendislik açısından uygun olduğu kabul edilmiştir.

Ayva diliminin verileri, dilim kalınlığı ve çapının doğrudan ölçümleri ve mükemmel bir silindirik geometri varsayımı ile elde edilmiştir. Kurutmanın ilk aşamasında, sabit koşullara ulaşıncaya dek dilim çevresindeki akış ve sıcaklık alanının sürekli olmayan rejimde olduğu varsayılmıştır. Bu geçiş dönemi çok kısadır. Girişte ölçülen hız ve sıcaklık ve çıkıştaki ölçülen basınç ve sıcaklık, sınır koşulları olarak varsayılmıştır.

Silindirik ayva dilimlerinin kurutulması sırasında sıcaklık ve nem içeriğinin geçici davranışını incelemek için bir boyutlu süreksiz rejimde ısı ve kütle transferi sayısal modeli geliştirilmiştir. Ayva içerisindeki ısı geçişinin iletimle gerçekleştiği kabul edilirken, nem transferinin yalnızca sıvı difüzyonu ile gerçekleştiği düşünülmektedir. Buharlaştırmanın yalnızca ayva diliminin yüzeylerinde gerçekleştiği varsayılmıştır. Model için gerekli olan ortalama ısı ve kütle transfer katsayıları CFD simülasyonları ile hesaplanmıştır. Taşınım ısı geçiş katsayısı için,

Reynolds ve Prandtl sayılarının fonksiyonu olarak, silindirik dilimlerin eksenine paralel hava akışı için yeni bir bağıntı türetilmiştir. Efektif difüzyon katsayısı, ürün içerisindeki difüzyonun basitleştirilmiş bir analitik çözümünü içeren tipik bir yöntem kullanılarak deneysel olarak tahmin edilmiştir.

(Dissa et al., 2011) Mango, her mevsim yaklaşık 300000 ton meyve ile Batı Afrika'nın üretilen en önemli mevsimlik meyvelerden biridir ve içerdiği A, C vitaminleri ve Beta Karoten ile önemli bir kaynaktır. Bununla birlikte, üretiminin yaklaşık %50'si, mevsimlik koruma eksikliği nedeniyle her sezon kaybedilir. Hasat sonrası kayıpları azaltmak için, kurutma prosesi, oldukça kolay bozulan bir ürün olan mangoların çoğunun, depolanabilir kuru ürüne dönüştürmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çok miktarda enerji gerektiren bu kurutma yöntemi, yüksek enerji maliyeti ve mango üretim alanlarındaki eksiklik nedeniyle gelişmemiştir. Bu bağlamda, mevcut çalışma, Batı Afrika'da üretilen iki ana mango çeşitinin (Amelie ve Brook) doğrudan güneş enerjisiyle kurutulması üzerine güneş enerjisinin doğrudan kullanım imkânlarını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir.

Son zamanlarda literatürde mangonun güneş enerjisi ile kurutulması üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır. Mango dilimlerinin ince tabaka dolaylı güneş enerjili kurutma modeli, Dissa ve diğerleri tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Rankins, Sathe ve Spicer, sera tipi bir güneş kurutucusu kullanarak Amelie ve Kent mango çeşitlerinin güneş enerjisiyle kurutulması üzerine deneyler gerçekleştirmiştir. Mangonun güneşte kurutulmasının Batı Afrika popülasyonları için önemli bir A vitamini kaynağı olduğunu göstermişlerdir. Bu ürünlerin nem içeriğinin değişimi ve temel kurutma parametreleri incelenmiştir. Bu çalışmalarda, Batı Afrika'da üretilen iki ana mango çeşidinin doğrudan güneş enerjisiyle kurutulması konusunda temel bilgilerin eldesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, Amelie ve Brooks mango çeşitlerinin doğrudan güneş enerjisiyle kurutulması, mango hasadı döneminin iklim koşulları altında direkt bir güneş kurutucusu kullanılarak karakterize edilmiş ve modellenmiştir. Direkt güneş enerjisi altında, kurutma kinetiği, deneysel olarak incelemiş ve modellenmiştir. Kurutma yapılan tepsilerin konumunun direkt güneş enerjili kurutucunun kurutma işlemine etkileri gösterilmiştir. Kuruma oranları, etkin nem dağılımı ve kurutma verimliliği her tepsi konumu ve her kurutma günü için tahmin edilmiştir. Aynı zamanda kurutucu verimliliği her tepsi konumu ve her kurutma günü için hesaplanıp elde edilen bu verilerle eğri uydurulmuş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tepsi konumunun kurutma kinetiği üzerinde önemli bir etkiye sahip

olduğunu göstermiştir. Kuruma oranları ve kurutma verimliliği, ilk kurutma tarihinden son kuruma gününe kadar kurumada önemli ölçüde azalmıştır. Direkt güneş enerjili kurutma modeli, Amelie ve Brooks mango çeşitlerinin dilimlerinin direkt güneş enerjili kuruma kinetiğini uygun şekilde simüle etmiştir. Literatür tarafından verilen gerekli su içeriğine yakın olan %24,83 nihai su içeriğine sahip Amelie mango çeşidi, mangonun direkt güneş enerjisiyle kurutma işlemleri için en uygun çeşidi olarak düşünülebilir.

(Sami et al., 2011) Bu çalışmada, bir indirekt güneş enerjili kurutucunun performans analizi için önceden geliştirilmiş bir dinamik matematiksel model kullanılarak, enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, uygun enerji ve ekserji modelleri geliştirilmiş ve hava akışının sıcaklığı ve entalpisi ile kurutulan katı maddenin sıcaklık, entalpi ve nem içeriği için öngörülen değerleri kullanılarak enerji ve ekserji verimliliği tahmin edilmiştir. Güneş enerjili ısıtıcının ve kurutucuda, ürün ve kurutma havasının konum ve zamanla değişimlerinin tahminlenmesi için model oluşturulmuş ve modelin geçerliliği bazı mevcut deneysel verilerle kontrol edilmiştir. Sonuçlar, yüksek enerji verimliliğine rağmen indirekt güneş kurutucusunun ekserji verimliliğinin göreceli olarak düşük olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, maksimum ekserji kayıplarının gün ortasında olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ekserji kaybı ve verimliliği üzerine, güneş enerjili ısıtıcının uzunluğu, yüzeyi ve hava akış hızı da dahil olmak üzere bazı çalışma parametrelerinin etkisi araştırılmıştır.

İndirekt bir güneş kurutucusunun enerji ve ekserji analizinin, matematiksel modelleme sonuçlarına dayanarak gerçekleştirildiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Toplam enerji verimliliği, toplam ekserji verimliliğinin düşük olmasına rağmen yüksektir. Bu sonuçlar endüstriyel süreçlerde termodinamik tersinmezliğin önemini göstermektedir. Aslında, ekserji verimi, geri tersinirlik nedeniyle prosesin fiili verimliliğidir.
- Çıkış hava sıcaklığı için maksimum değer 69°C'dir. Bu sıcaklıkta, maksimum çıkış ekserjisi ve toplayıcının enerjisi sırasıyla 2,5 kW ve 1,12 kW'dır.
- Azami ekserji kaybı gün ortasında meydana gelir. Bu kayıplar ilk iki gün sırasıyla 0,32 kW ve 0,16 kW'dır. Yine ilk iki gün toplam minimum ekserji verimlilikleri sırasıyla %32,3 ve %47,2'dir.

- Hava akış hızının artırılması, güneş enerjili ısıtıcının ekserji verimliliğini düşürür.

(Vijayan et al., 2016) Bu çalışmada, ısı depolama ünitesi içeren ve ısı geçişinin zorlanmış taşınım ile meydana geldiği indirekt bir güneş enerjili kurutucu geliştirilmiştir. Bu yöntemin kudret narı kurutmak için sistemin performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney düzeneği, bir oluklu soğurucu plakalı bir düz plakalı toplayıcı, fan ve bir kurutma odası içermektedir. Deneyler, çeşitli hava akış hızları ile gerçekleştirilmiş ve dilimlenmiş kudret narının kuruma davranışını açıklamak için farklı kurutma modelleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, kudret narının başlangıç nemi içeriği %92 (y.b), 7 saat içinde %9'a düşürülürken, açık havada kurutma süresi 10 saat olarak görülmüştür. Kurutma havası kütle akış hızı 0,0636 kg/s iken, kuruma hızı 0,215 kg/kWh olarak belirlenmiş ve ilgili özgül enerji tüketiminin 4,44 kWh/kg olduğu görülmüştür. Sistemin toplayıcı ve kurutma verimi sırasıyla %22 ve %19'dur. Isı depolama üniteli indirekt kurutucu ile elde edilen ürünün, açık havada güneş enerjisi ile kurutulan ürüne göre daha homojen özellikte ve daha kaliteli bir üründür.

Endüstriyel önem;

- Depolama imkanlarının olmaması nedeniyle her yıl hasat sonrası kayıplar hızla artmaktadır. Bu sistemler ile bunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.
- Güneş enerjili kurutucular, düşük maliyetli, kolayca bulunabilen ve kırsal alanlardaki çiftçilere gelir getirici bir seçenek olarak kullanılabilir en uygun teknoloji konumundadır.
- Güneş enerjili kurutucuların gıda işleme sanayilerindeki rolü özellikle gelişmekte olan ülkelerde aşağıdaki alanlarda önem taşıyor
  - Meyve ve sebzeleri korunması
  - Süt endüstrisi
  - Tarımsal ürünlerin kurutulması
  - Kereste kurutma
  - Sanayi atıklarının kurutulması

Sonuç olarak, güneşli kurutucu için uygun hava akış oranının seçilmesi, sistemin daha iyi performans göstermesi ve ayrıca kurutulmuş ürünün kaliteli elde edilmesi için çok önemlidir. Anlık ısı depolama tabanlı indirekt kurutucu içerisindeki kurutma, daha tutarlı ve daha iyi kalitede ürün çıkardığından kullanımı önerilir.

Simate (2003) Bu makalede mısır kurutmak için optimize edilmiş karma tipte ve indirekt tipte doğal taşınımlı güneş enerjili kurutucuların çalışma parametreleri incelenmiştir. Doğal taşınımlı güneş enerjili kurutucuların farklı türleri arasında karma tipteki kurutucunun kurutma hızında üstün olduğu belirtilmiştir. Bu tip kurutucuda, tahıl delikli bir yüzey üzerinde kurutulur ve şeffaf kurutma bölmesi kapağı boyunca üst yüzeyi doğrudan güneş ışınlarına maruz kalır ve bir güneş enerjili hava ısıtıcısı sayesinde tahıl yatağından geçen bir hava akımı bulunur. Tahıl, bu nedenle, ürün hem üst raftan gelen ısıtım etkisi ve güneş enerjili hava ısıtıcısından gelen sıcak havanın taşınımıyla ısı geçişi ile kurutulmuştur. Öte yandan indirekt tipte kurutucularda, tahıl, bir güneş enerjili hava ısıtıcısından gelen sıcak hava etkisiyle kurutulmaktadır. Bu yönden karma tipteki kurutucu daha üstündür.

Güneş enerjili kurutucular uygun maliyetli olmalıdır. Çünkü kırsalda, kurutucular minimum maliyetle kurutulabilmeli, çalıştırılabilmesi ve bakım yapılabilmesidir. Bu sebeple üretim için ucuz ve mevcut olan malzemeler kullanılmalıdır. Bununla birlikte, kurutucunun geometrisinin ve malzemelerinin seçimi, bilgisayar simülasyonları yoluyla fiziksel ve biyolojik bilimlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Simülasyon, araştırmacının, prototipin gerçek üretimi yapılmadan önce güneş enerjili kurutunun performansını değerlendirmesini sağlar. Simülasyon optimizasyon ile birleştirilirse, araştırmacı, maliyet olarak en uygun, yani minimum maliyet ve maksimum kurutma hızı ile güneş enerjili bir kurutucu tasarlayabilir. Bu çalışma için seçilen kapasite 90 kg'dır çünkü bu mısırın depolanması ve pazarlanmasında standart bir ölçüm birimidir. 90 kg'lık bir kapasite için optimizasyon, karma tipteki güneş enerjili kurutucu (1,8 m) için aynı kapasitenin indirekt tipteki kurutucudan (3,34 m) daha kısa bir güneş enerjili ısıtıcı uzunluğu ile sağlanmıştır.

Karma tipteki kurutma makinesinin kurutma maliyeti indirekt tipteki kurutucunun kurutma maliyetinden yaklaşık %26 daha düşüktür. Karma tipteki kurutucudan yıl boyunca elde edilen kuru hububat miktarı indirekt tipteki kurutucudan %15 daha düşüktür.

(Smitabhindu et al., 2008) Smitabhindu ve arkadaşları, bu çalışmada muz kurutma için güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. İlk olarak güneş enerjili ısıtıcı için güneş enerjili ısıtıcı örtüsü, güneş enerjili ısıtıcı absorberi ve güneş enerjili ısıtıcıdaki hava için enerji dengeleri verilmiştir. Ardından kurutma kabini ve kurutucudan geçen hava akımı için enerji

dengeleri verilmiştir. Optimizasyon modeli, ekonomik bir model ile kombine edilmiş bir güneş enerjili kurutma sisteminin simülasyon modelinden oluşmuştur. Simülasyon modeli, biri toplayıcı için, diğeri kurutma kabini için verilen iki diferansiyel denklem sisteminden oluşmuştur. Bu diferansiyel denklem sistemleri sonlu fark yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Model parametrelerinin değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Modeli oluşturulan kurutma sisteminin performansının eldesi için, FORTRAN'daki bir bilgisayar programı geliştirilerek denklemler çözülmüştür. Model, simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Bu simülasyon modeli, güneş enerjili kurutma sisteminin optimizasyonu için kullanılmıştır. Yıllık kurutma maliyetini hesaplamak için bir ekonomik model oluşturulmuştur. Optimizasyon problemi, kurutulan ürünün birim başına kurutma maliyetini en aza indirmek için kurutma sisteminin geometrisinin ve işletme parametrelerinin optimizasyonu olarak tanımlandı. Deneyde kullanılan güneş enerjili ısıtıcı alanı ve hava geri dönüşüm faktörü, kurutma sisteminin temel çalışma modu, sistem parametresi olarak düşünülmüştür. Güneş enerjili ısıtıcı alanının ve geri dönüşüm faktörünün optimum değerlerini bulmak için uygun model aranmıştır. Güneş enerjili ısıtıcı alanının optimum değeri ve hava geri dönüşüm faktörü sırasıyla  $26 \text{ m}^2$  ve %90 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar programı aynı zamanda benzer kurutma sistemlerini optimize etmek için de kullanılabilir.

Malzeme özellikleri genelde sabit olduğundan ve çevresel parametreler kontrol edilemediğinden optimize edilebilen parametreler, geometrik parametreler ve çalışma parametreleridir. Optimize edilecek gerekli parametreleri belirlemek için, optimizasyon modelinin performansı, fiziksel simülasyon modeli ve ekonomik model temelinde simüle edilmiştir. Yapılan maliyet hesaplaması sonucun, kurutma sistemi maliyetinin, gerçek değere göre yarı fiyatında olduğu belirlenmiştir.

(Dissa et al., 2009) Bu çalışmada, 8 mm kalınlığındaki mango dilimlerinin ince tabaka kurutma modeli ile kurutulması, laboratuvarında tasarlanmış ve üretilmiş bir güneş enerjili kurutucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, mangoların hasat dönemindeki meteorolojik koşullar altında, korunabileceği su içeriğine ulaşmak için 3 gün kurutulmasının gerekli olduğunu göstermiştir. Güneş enerjili kurutmanın bu 3 günü boyunca, serbest suyun sırasıyla %50, %40 ve %5'i yok edilmiştir. Elde edilen nihai su içeriği yaklaşık  $16 \pm 1,33$  (kuru baz) ve  $13,79$  (yaş baz) olarak verilmiştir. Bu nihai su içeriği ve buna tekabül eden su aktivitesi ( $0.6 \pm 0,02$ ) olarak verilmiştir. Kuruma hızı, çekme payı (ürünün kuruduktan sonra büzülmesi sebebiyle) ve kritik su içeriği göz önüne alınarak deneysel olarak

hesaplanmıştır. Kritik su içeriği kurutmadan önceki su içeriğinin %70'ine yakındı ve bu değer kurutma işlemi sonrası %6'ya düşürüldü. İnce tabaka kurutma modeli sonuçları ile mango dilimlerinin güneş enerjisiyle kurutulmasına ait deneysel sonuçlar arasında korelasyon katsayısının  $r^2 = 0,990$  olarak elde edilmiştir. Mango dilimlerinin ince tabakalı kurutulmasını modellemek için şu koşullar varsayılmıştır:

- Is ve kütle geçişi bir boyutludur;
- Kurutucu, hava akışı yönünde  $\Delta x$  kalınlığında küçük hacim elemanları düşünülmüş ve her parçada ısı ve kütle geçişi incelenmiştir;
- Her hacim elemanında sıcaklık ve nem içeriği sabit alınmıştır;
- $\Delta x$  kalınlığında her hacim elemanları özellikler, önceki hacim elemanından gelen kurutma havasının çıkış koşullarına göre belirlenmiştir;
- Nemli hava ve bileşenleri (su buharı ve kuru hava) kurutma basınçlarında ideal gazlardır;
- Hava akışı sabittir ve kurutucu tabandaki ısı kayıpları ihmal edilir.

(Ramos et al., 2015) Üzümlerin güneşte kurutulmasını modellemek için sonlu farklar yönteminden yararlanarak, ısı ve kütle transferi modelleri oluşturulmuştur. Çözümlemede değişken sınır koşulları dikkate alınmıştır. Oluşturulan modelde, ürünün büzülmesi, etkin nem yayılım katsayısındaki değişim, su içeriğinin ısı özelliklerinin etkisi ve sıcaklık dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada üzüm kurutulmuştur. Bulgular değerlendirilerek üzümün güneş enerjili kurutucuda kurutulması için matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin, diğer ürünlere ait termo-fiziksel özelliklerin bilinmesi durumunda bu ürünlerin güneş enerjili kurutucularda kurutulmasını ile ilgili tasarımlarda uygulanabileceği ifade edilmiştir. Geliştirilen modelle, doğru kuruma sürelerinin tahmininin ve dolayısıyla kurutulmuş gıdaların üretimini tasarımının, kontrolünün ve optimizasyonunun mümkün olacağı raporlanmıştır.

(Forson et al., 2007) Bu çalışmada, tek geçişli çift kanallı güneş enerjili hava ısıtıcısını kullanarak karma tipli doğal taşınımli güneş enerjili kurutucuda tarımsal ürünlerin kurutulması için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Ürün olarak manyok kurutulmuştur. Model, deneysel çalışmayla paralel olarak geliştirilmiştir. Model, hava ısıtma işlemi modeli, kurutma modeli ve teknik performans kriter modelini içermektedir. Kurutma havası sıcaklık ve nem oranı yönetim denklemleri, malzeme sıcaklığı ve nem içeriği ve performans kriterleri göstergeleri türetilmiştir. Model kapsamında oluşturulan doğrusal olmayan denklem takımı, eşzamanlı olarak çözülmüştür. Modeli doğrulamak için gerekli deneysel verilerin eldesi için deneysel

Çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Modelin kullanıldığı simülasyon çalışmaları sonuçları ile deney verileri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada modelin karma tipli doğal taşınımlı güneş enerjili kurutucusunun performansını oldukça doğru tahmin edebildiği ve bu nedenle prototip geliştirme için bir tasarım aracı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, aşağıdaki gibidir:

- Deneysel veriler, karma tipli doğal taşınımlı güneş enerjili kurutucusunun matematiksel modelinin eldesi için kullanılmıştır.
- Deneysel ve öngörülen sonuçlar, modelin karma tipli doğal taşınımlı güneş enerjisi kurutucusunun performansını makul bir şekilde öngörebildiğini ve bu nedenle bu tür kurutucular için yararlı bir tasarım aracı olacağını göstermiştir.
- Optimum ürün yükleme yoğunluğu  $18 \text{ kg/m}^2$  olmalıdır.
- Kullanılacak rafların maksimum kat sayısı ikidir.
- %67 nem içeriğindeki (yaş bazda) manyoğun kurutulmasında, sabit hız periyodu görülmez.
- Gece kurutma, güneşte yapılan kurutma sırasındaki nem kaybının %7 ile %30'unu sağlayabilir.
- Gece kurutma işlemini artırma araçlarının (ısı depolama gibi) geliştirilmesi gereklidir.

(Afriyie et al., 2011) Bu çalışmada, bir bacaya bağlı güneş enerjili kurutucusunun performans analizi yapılmıştır. Sistemin tasarımı için matematiksel model geliştirilmiştir. Sistemden kurutma havasının geçişinin, dış koşullarla ilişkilendirmek için kurutucuda herhangi bir ürün bulunmayan durumlar için (boş) ölçümler yapılmıştır. Model sonuçları, deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Kurutma odasının tavan eğimi ve bacanın yüksekliği, ekvatora yakın coğrafi bölgelerdeki tasarımlar için kritikken, ekvatora yakın bölgelerdeki belirleyici parametreler kurutma odası yüksekliği ve kurutucu tabanının bacanın kesit alanına oranıdır. Kısa bir güneş bacasına sahip yüksek kurutma odası genellikle ekvatora yakın konumlarda tercih edilirken, yüksek bir güneş bacasına sahip kısa bir kurutma odası ekvator'dan uzak bölgelere uygundur.

(Romero et al., 2014) Bu alışmada Meksika'daki Central del Caribe üniversitesinde 50 kg kapasiteli indirekt bir güneş enerjili kurutucu prototipinde vanilya kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu alışma, Meksika'nın Quintana Roo eyaletindeki vanilya tarımcılarının, geleneksel kurutma yöntemiyle elde edilen vanilyanın özelliklerini koruyabilecek bir güneş enerjili kurutucuya ihtiyaç

duymaları sonucunda yapılmıştır. Önceki çalışmalarda, vanilya içermeyen (boş) güneş kurutucu prototipi vasıtasıyla hava akımı özelliklerinde sadece değişiklikler gösteren simülasyon sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmada ise, vanilya kapsüllerinin kurutma deneylerinden elde edilen sonuçlar da sunulmuştur.

Güneş ışınlarının bir kısmı, toplayıcı geçirgen örtüsü polikarbonat tarafından yansıtılır, önemli bir bölümü de emici plakaya aktarılır. Yutulan ışınlam etkisiyle sıcaklığı artan yutucu yüzeyden kurutma havasına taşınım ve radyasyonla ısı geçişi meydana gelir. Isınan havanın yoğunluğu azalacağı için sistem içinde hava akışı meydana gelir. Buradaki fiziksel olguyu çözmek için ANSYS-FLUENT kodları kullanılmış ve aşağıdaki adımlar uygulanmıştır:

- ANSYS tasarım modelleyicisi programı kullanılarak kontrol hacminin geometrisi tasarlanmıştır.
- Her bir sistem elemanı için konstrüksiyon malzemesi özellikleri ve sınır koşulları tanımlanmıştır.
- Her bir zaman aralığı için ağın her bir elemanındaki koruma denklemleri çözülmüştür.

İlk vanilya kütlesi 1,6 kg ve kurutma süresi bir aydır, normalde geleneksel kurutma 3 ay sürer. Vanilyanın ağırlığı pratik olarak zamanla değişmeden sabit kaldığında kurutma işlemi durdurulur. Vanilyanın başlangıç ve son ağırlığı sırasıyla 1267,5 gram ve 491,2 gram olarak verilmiştir. Dolayısıyla üründen uzaklaşan su miktarı 776,3 gram yani, başlangıç kütlesinin yaklaşık % 61,25'i olarak verilmiştir.

(Doymaz ve İsmail, 2011) Paslanmaz çelikten yapılmış 0,54 m x 1,4 m x 1,02 m boyutunda tünel kurutucuda kirazın kurutma koşulları incelenmiştir. Kurutma havası, 0,3 m x 0,3 m boyutundaki rafa serilmiş ürün üzerinden raflara paralel olarak geçirilmiştir. Kararlı hal koşullarına ulaşmak için deneylere başlamadan önce belirlenen sıcaklıkta sistem yaklaşık 1,5 saat boş olarak çalıştırılmıştır. Deneylerde kurutma havası hızı 2 m/s değerinde sabit tutulurken, sıcaklığı 60 °C, 70 °C, 75 °C olarak değiştirilmiştir. Ürün kütle kaybı 30 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Ürüne uygulanan ön işlemin, kuruma hızına etkisi kontrol örneği ile karşılaştırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda (60 °C, 70 °C, 75 °C) kontrol ve ön işlem uygulanmış örneklerle ait kuruma eğrilerinin matematik modelleri elde edilmiştir. Etkin yayılım katsayısının sıcaklıkla değişimini veren eşitlikler elde edilmiştir. Kiraza ait aktivasyon enerjisi bulgularından hesaplanmıştır.

(Jain and Tiwari, 2004) Jain ve Tiwari çalışmalarında doğal ve zorlanmış taşınım koşullarında serada ve doğal taşınım koşullarında açık sergide taneli ürünlerin ısı davranışını incelemek için matematik model oluşturmuşlardır. Isıl modelde ürünün ince tabaka halinde kurutulduğu, örtü ve duvar malzemesinin ısı kapasitesinin ihmal edilebileceği, sera hava sıcaklığında tabakalaşma olmadığı, seranın doğu-batı konumunda yerleştirildiği varsayılmıştır. Bu amaçla açık sergi için oluşturulan model kapsamında: nemin buharlaştırılmasında ürün yüzeyinde enerji dengesi, ürün üzerindeki nemli hava enerji dengesi, nemin buharlaşma hız denklemleri, doğal taşınım koşullarında çalışan serada ısı model: ürün yüzeyinde enerji dengesi, yüzey enerji dengesi, dış hava ve sera havası sıcaklıkları farkına bağlı olarak kısmi basınç farkı ve kütle yayılım katsayıları kullanılarak serada enerji dengesi, zorlanmış taşınım koşullarında çalışan serada ısı model: ürün yüzeyinde enerji dengesi, zemin yüzeyinde enerji dengesi, serada enerji dengesi oluşturulmuştur. Yazılan bu denklemler aşağıdaki koşullar dikkate alınarak çözülmüştür: Üründeki büzülme ve nem içeriğindeki azalma nedeniyle, kuruma süresince ürün alanının azaldığı, bu nedenle güneş enerjisinin emildiği ürün yüzey alanının, kuruma süresince azaldığı, büzülmenin nem içeriğinin fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir. Kısmi buhar basıncının sıcaklıkla üstel olarak değişmesine karşın, çalışma sıcaklığı aralığında ( $25^{\circ}\text{C}$ - $55^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklıkla doğrusal değiştiği varsayılmıştır. Oluşturulan modelden, güneş ışıınımı ve dış hava sıcaklığına bağlı olarak, ürün sıcaklığı, sera ortam sıcaklığı, kuruma hızının değişimleri hesaplanmıştır. Model sonuçları deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır.

(Tchinda, 2009) Tchinda, bu çalışmada güneş enerjili kurutucu sistemlerini analiz etmek için matematiksel model geliştirmiştir. Burada ağırlıklı olarak güneş enerjili kurutucuların ısı transferi sürecini analiz eden çeşitli matematiksel modeller, modele, örtü sayısına, soğurucunun şekline göre sınıflandırılmıştır. Daha sonra tek örtüye sahip güneş enerjili kurutucu ve çift cam örtülü güneş enerjili kurutucu için tasarım bilgileri aktarılmıştır. Bunlar; cam örtü, yutucu yüzey ve hava akışı için kullanılan enerji dengeleridir. Bazı güneş enerjili kurutucular için örtü sayısı ve geçiş sayısına bağlı olarak Nusselt sayıları ve ısı taşınım katsayılarını veren bağıntılar verilmiştir. Bu modeller için geliştirilen denklemler için termodinamiğin 1. Yasası referans alınmıştır.

(Ondieki et al., 2014) Ondieki ve arkadaşları, bu çalışmada, trapez oluklu soğurucu plakalı bir güneş enerjili kurutucu sisteminin modeli oluşturulmuştur. Matematiksel modelde; cam örtü, soğurucu plaka ve hava akışına ait enerji dengeleri verilmiştir. Bu kapsamda, enerji denge denklemleri eşzamanlı olarak

çözölmüştür. Sistem elemanlarının çalışma parametreleri incelenmiştir. Bu çalışma, kanal derinliğı ve güneş enerjili ısıtıcı uzunluğı ve genişliğinin verimliliğe etkisi incelenerek tamamlanmıştır. İnceleme; 20-30-40°C giriş sıcaklıklarında ve 0,5-2,5 m arası uzunluklarda yapılmıştır. Aynı zamanda genişlik ise 0,25-2 m arasında değişmektedir. Güneş enerjili ısıtıcı uzunluğı ve genişliğı verimlilikle doğru orantılıdır. Ancak kanal derinliğıyle verimlilik ters orantılı olarak değişmiştir.

(Karaaslan ve Erdem, 2014) Karaaslan ve Erdem, mikrodalga fırında, portakal diliminin kurutulması için matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada mikrodalga fırında farklı güçlerde (180, 360, 540, 720 ve 900 W), mikrodalga ve taşınım ile kurutmada 180, 360 ve 540 W gücünde, taşınım ile kurutmada 100, 150 ve 200°C sıcaklıklarında portakal dilimlerinin kuruma süresi ve nem oranı üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, nem oranını veren Page, Henderson ve Pabis, Logaritmik, Wang ve Singh, Difüzyon Yaklaşımı, Verma, İki terimli, İki terimli Üssel, Midilli-Küçük olmak üzere dokuz farklı matematiksel modeller birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar istatistiksel olarak incelenmiştir. Mikrodalga fırın için belirli güçlerde yapılan deneylerde kuruma ve kuruma süresi arasındaki grafiğe bakıldığında en uzun kurutma işlemi 540 W gücünde gerçekleşmiştir. Mikrodalga ve taşınım ile kurutma işlemi yapıldığında ise, kurutma işlemi en uzun ise 540 W-200°C’de sürmüştür. Sadece taşınım ile kurutma işlemi yapıldığında ise 100°C’de kurutma en kısa sürmüştür.

Tiwari (2016) bu çalışmada tarım ürünlerinin güneşte kurutulmasını gözden geçirmiştir. Bu çalışmada öncelikle güneş kurutucuları sınıflandırılmıştır ve çeşitli ürünlerin hangi tip kurutmayla kurutulması gerektiğı belirtilmiştir. Güneş enerjisiyle kurutma işlemini gerçekleştirmek için çeşitli özelliklerde, güneş kollektörleri kullanılır. Güneş kurutucularının farklı bir biçimde çalışma organizasyonlarından kısaca bahsedilmiştir. Belli başlı sebze ve meyvelerin hangi tip kurutucuyla kurutulduğı ve bu kurutucuların seçilme sebebi belirtilmiştir. Bunlar, faz değişimli malzemelerin kullanıldığı güneş kurutma sistemleri, V oluklu güneş kollektörlü güneş kurutma sistemleri, kanatlardan oluşan çift geçişli güneş kollektörleri, kimyasal pompalı güneş kurutma sistemleri, nem alma sisteminin bulunduğu güneş kurutucusudur. Sera ürünü kurutucusu, ilk yatırım maliyeti en az olan kurutucu çeşididir. Ayrıca bakım ve çalışma maliyeti hiç yoktur. Hibrit PVT kurutma sisteminin ise yatırım maliyeti en fazladır. Aynı zamanda bakım ve çalışma maliyeti en fazladır. Bu kurutucular içinde hibrit PVT kurutma sisteminin çalışma ömrü 35 yıldır ve en fazladır.

Akman vd. (2018) bu çalışmada Güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve ilk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesini incelemişlerdir. Bu çalışmada tasarımı yapılan sistem, güneş kolektörü ve kurutma kabini olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Sistemde ayrıca kurutma havasının sirkülasyonu için bir fan, hava kanalı ve kontrol panosu yer almaktadır. Güneş kolektörüne giren taze hava, kolektör içinde ısınarak bir fan yardımıyla kurutma kabinine aktarılmakta ve ürün üzerindeki nemi alarak sistemden dışarı atılmaktadır. Ele alınan kurutma odalarındaki hız ve sıcaklık dağılımları inceleyebilmek amacıyla ANSYS Mechanical APDL paket programı ile geometriler ve sayısal ağ (mesh) işlemi gerçekleştirilmiş, çözümlemede ise ANSYS CFX paket programından faydalanılmıştır. Bu çalışma kapsamında tasarımı yapıp imal edilen güneş enerji destekli kurutma sisteminin Osmaniye iklim koşullarında performansının belirlenebilmesi amacıyla ilk test çalışması 2017 yılı Mayıs ayında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonunda tasarımı ve imalatı yapılan güneş enerjili kurutma sisteminin sorunsuz bir şekilde çalıştığı tespit edilmiştir. Dış hava şartlarına bağlı olarak Mayıs ayındaki iklim koşullarına göre sistemde kullanılan güneş kolektörü ile 40-45 °C sıcaklıkta kurutma havasının elde edilebildiği görülmüştür. Kurutma havası sıcaklığını etkileyen en önemli parametrenin güneş ışıınımı olduğu ve sıcaklığın ışıınım değerinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Kolektöre giriş hava sıcaklığının ortalama 10-14 °C artırılabilirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca üründen 6 saatlik kurutma süresince yaklaşık 950 gr nem çıkışı olmuştur. Ele alınan kurutma sisteminin Osmaniye iklim şartlarında kurutma prosesini başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiği sonucuna varılmıştır.

Yazıcı ve Daş (2018) bu çalışmada, Güneş enerjisi destekli bir kurutma sistemiyle elma ürününün kurutulması ve kurutma değerlerinin yapay sinir ağıyla modellenmesini incelemişlerdir. Elma kurutmak için hava ısıtılmalı güneş kollektörlü kurutma sistemi tasarlanmıştır. Elma hem açık havada hem güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde kurutulmuştur. Bu çalışmada güneş kollektörlü kurutma sisteminde ve açık güneş altında kurutulan elmanın konvektif ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Her iki kurutma yönteminin performansı incelenmiştir. Hesaplanan konvektif ısı transfer katsayıları değerleri ile yapay sinir ağı kullanılarak tahminsel bir model oluşturulmuştur. İlk olarak sistem analizi yapmaya yarayan belli başlı formüller verilmiştir. Ardından yapay sinir ağlarıyla ilgili bilgiler verilerek birtakım formüller sunulmuştur. Ardından elma kurutma deneyleri sonucu hesaplanan ısı transfer katsayısı ve kuru baz nem içeriğinin zamana bağlı olarak değişimi grafiklerde gösterilmiştir. Yapılan çıkarımlara göre Güneş enerjisi destekli kurutma sistemi elma ürününü güneş altında kurutmaya göre

5 saat daha erken kurutmuştur. Son olarak, elma ürününe ait ısı transfer katsayısı değerleri deneysel ve tahminsel olmak üzere kıyaslanmıştır. Deneyin sonuçlarına bakıldığında, güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin kurutma performansı, açık havada güneş altında yapılan kurutmaya göre daha iyidir. Kurutma deneylerinde güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde elmanın hc değerleri 13,5 – 15,5 ( $W/m^2$  °C) arasında hesaplanmıştır. Yapay sinir ağları ile tahmin edilen hc değerleri deneysel değerlere daha yakındır. Tahminsel model oluşumunda için 80 adet veri kullanılmıştır. Daha uzun kuruma süresine sahip ürünler kullanılarak daha fazla veri elde edilebilir ve farklı hesapsal zeka yöntemleri kullanarak daha başarılı tahminsel modeller elde edilebilir.

Çelen vd. (2018) bu çalışmada, güneş enerji destekli mikrodalga kurutucusunda 5 mm kalınlığındaki kabak dilimlerinin kuruma davranışlarına olan etkisi incelenmiştir. Mikrodalga kurutucusu 0,245 m/dk bant hızı kullanılarak farklı üç mikrodalga gücünde (0,7, 1 ve 1,4 kW) çalıştırılmıştır. Kurutma öncesi ön işlem olarak sadece yıkama gerçekleştirilmiştir. Ürünlerin başlangıç nem değerlerinin belirlenebilmesi için deneyler öncesinde ürünler etüv de 24 saat süre ile 105 °C de tutularak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Mikrodalga enerjisinden daha iyi yararlanmak, nem çıkışını kolaylaştırmak ve homojen bir yüzey teması amacıyla, dilimler belirli bir yüksekliğe konulmuştur. Deneylerde enerji sarfiyatını azaltmak için güneş enerjisinden elde edilen sıcak hava kurutma havası olarak kullanılmıştır. İstatistiksel yöntemler ile elde edilen veriler değerlendirilmiş ve doğrusal olmayan regresyon analizi yapabilen bir bilgisayar programı yardımı ile de kurutma sabitleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Page, Henderson&Pabis, Two term exponential ve Wang&Singh kurutma modelleri kullanılarak en uygun modelin tespiti için karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda tüm kuruma şartlarına göre Page Modelinin, ürünlerin kuruma davranışını açıklamada diğer modellere göre daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Bulut vd. (2017) bu çalışmada, Şanlıurfa iklim şartlarında biber, patlıcan ve yapraklı bitkilerin kurutulmasında kullanılmak üzere güneş enerjili hava kollektörü ve hava geçiş tüneli birleştirilerek hibrit tip bir kurutma sistemi tasarlanmıştır. Böylelikle kurutulacak ürünlerin güneş ışığına maruz kalmadan temiz ve doğal görümlü bir şekilde kuruması amaçlanmıştır. Hava hızının, sıcaklığının ve güneş ışınım miktarının kuruma süresine etkisi araştırılmıştır. Tasarımı ve imalatı yapılan sistem, kanatçıklı yapıda alüminyum yutucu plakalı bir hava kollektörü, bir tünel, bir fan ve bir konveyörden oluşmuştur. Ürünler yutucu plakanın altına bırakılmış ve güneş ışınlarına maruz kalmadan kuruması sağlanmıştır. Ürünlerin kabin

içerisine giriş ve çıkışı için konveyör bandı kullanılmıştır. Kurutma havasının hızı, fan üzerindeki bir hız anahtarı ile kontrol edilmiştir. Kurutma deneylerinde, giriş ve çıkış sıcaklığı ile bağıl nemi, kabin içinde farklı noktalardan sıcaklıklar ve zamana bağlı ürün kütlesi ölçülmüştür. Yapılan bu çalışmada güneş ışıınının, dış hava sıcaklığının ve hava hızının ürünlerin kuruma süresini etkileyen en önemli parametreler olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda güneş enerjisinden yararlanılarak tünel tipi hibrit kurutma sistemi içerisinde kuruması sağlanan kırmızıbiber, nane ve maydanozun, açık sergide güneş altında kurutulan ürünlere kıyasla daha hızlı kuruduğı, daha temiz ve doğal bir görünüme sahip olduğu tespit edilmiştir.



### 3. KURUTMA SÜRECİ

#### 3.1 Nemli Havanın Özellikleri

Nem alma ve nemlendirme işlemlerinde saf sıvı faz ve bu sıvı ile tepkimeye girmeyen gaz arasında madde transferi söz konusudur. Bu süreçlerdeki madde transferi bazı prosesler için kolay olmasına karşın bazılarında ise oldukça karmaşıktır. Kurutma işlemlerinde ısı ve madde transferi aynı anda birlikte meydana gelir. Sıcak gazdan kurutulan ürüne ısı transferi meydana gelirken kurutulan üründen de gaz akışkana madde transferi meydana gelir. Endüstriye kurutma proseslerinin çoğunda, ön ısıtılmış hava, kurutma ortamı olarak kullanılır. Kurutulan üründe de nem olarak su bulunur. Kurutma sistemlerinin mühendislik tasarımında hesaplamaların yapılabilmesi için bazı temel tanımlamaların yapılması gerekir.

##### **Kuru hava**

Su buharı (nem) içermeyen hava

##### **Nemli hava**

Su buharı içeren hava

##### **Mutlak nem (özgül nem)**

Kuru havanın  $a$  birim kütlesi tarafından taşınan su buharın  $v$  kütlesidir. Tanımından dolayı karışımdaki su buharın kısmi basıncına bağlıdır.

$$w = \frac{m_v}{m_a} \text{ (kg su buharı (kg}_w\text{)/ kg kuru hava (kg}_a\text{))} \quad (3.1)$$

$$w = \frac{M_v P_v}{M_a (P - P_v)} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (3.2)$$

Gaz fazında ise mutlak nem ve mol kesri arasındaki ilişki daha farklı şekilde sunulmuştur.

$$y_{ni} = \frac{w/M_v}{1/M_a + w/M_v} \quad (3.3)$$

$M_v$  : Su buharının mol kütlesi  
 $M_a$  : Kuru havanın mol kütlesi  
 $P_v$  : Su buharının kısmi basıncı  
 $P$  : Toplam basınç

### Doymuş hava (doygunluk nemi) özgül nemi:

Hava sıcaklığındaki sıvı su ile dengede olan su buharı içeren gazdır. Dalton yasasına göre doymuş bir gazda(hava), su buharın kısmi basıncı, hava sıcaklığındaki (kuru termometre sıcaklığı) suyun buhar basıncına eşittir.

$$w_s = \frac{M_v P_g}{M_a (P - P_g)} \quad (3.4)$$

$w_s$  : Doygunluk nemi,

$P_g$  : TKT sıcaklığında su buharının doyma basıncı.

### Bağıl nem ( $\phi$ )

Su buharının kısmi basıncının, gaz (hava) sıcaklığındaki suyun doyma buhar basıncına oranı olarak tanımlanır. Diğer bir tanımla, hava içindeki su buharı kütlesinin, doymuş hava içindeki buhar kütlesine oranıdır.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_g V / (R_v T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.5)$$

$$\% \phi = 100 \times \frac{P_v}{P_g} \quad (3.6)$$

şeklindeki ifade yüzde bağıl nem olarak adlandırılır. Bu değer %100 olması havanın doymuş nemli hava, %0 olması kuru hava olduğu anlamına gelir.

### Yüzde Nem ( $w_v$ )

Mutlak nemin, gaz (hava) sıcaklığındaki doygunluk nemine oranı olarak tanımlanır.

$$w_v = 100 \times \frac{w}{w_s} = 100 \times \frac{\frac{M_v P_v}{M_a (P - P_v)}}{\frac{M_v P_g}{M_a (P - P_g)}} = 100 \times \frac{P_v (P - P_g)}{P_g (P - P_v)} = (\% \phi) \times \frac{(P - P_g)}{(P - P_v)} \quad (3.7)$$

% 0 ve % 100'ün dışındaki tüm nemliliklerde yüzde nem, bağıl nemden daha düşüktür.

### Nemli Isı ( $C_s$ )

Bir gram kuru hava (B) ve onun içerdği su buharının(A) sıcaklığını bir derece arttırmak için gereken enerjidir.

$$C_s = C_{pa} + wC_{pv} \quad (3.8)$$

### Nemli Hacim ( $h_v$ )

Nemli hacim, kuru havanın birim kütlesinin hacmi ile içerdği su buharının hacminin toplamıdır. Gaz yasalarından yararlanarak belli bir nemlilik ve sıcaklıktaki hava-su buharı karışımı için nemli hacmi şu şekilde tanımlarız.

$$v_h = \frac{0,0224.T}{273} \left( \frac{1}{M_a} + \frac{w}{M_v} \right) \quad (3.9)$$

$v_h$  : nemli hacim, (m<sup>3</sup>/mol g)

$T$  : Kuru termometre sıcaklığı (°C)

### Toplam Entalpi

Kuru havanın birim kütlesinin entalpisi ile onun içerdği su buharının entalpisinin toplamıdır. Havanın sıcaklığı  $T$  , nemliliği  $w$  ise toplam entalpi üç terimden oluşur: su buharının duyulur ısısı,  $T_0$  sıcaklığındaki suyun gizli ısısı ve kuru havanın gizli ısısı.

$$h = C_{pa}(T - T_0) + w(h_{fg})_{T=T_0} + C_{pv}w(T - T_0) \quad (3.10)$$

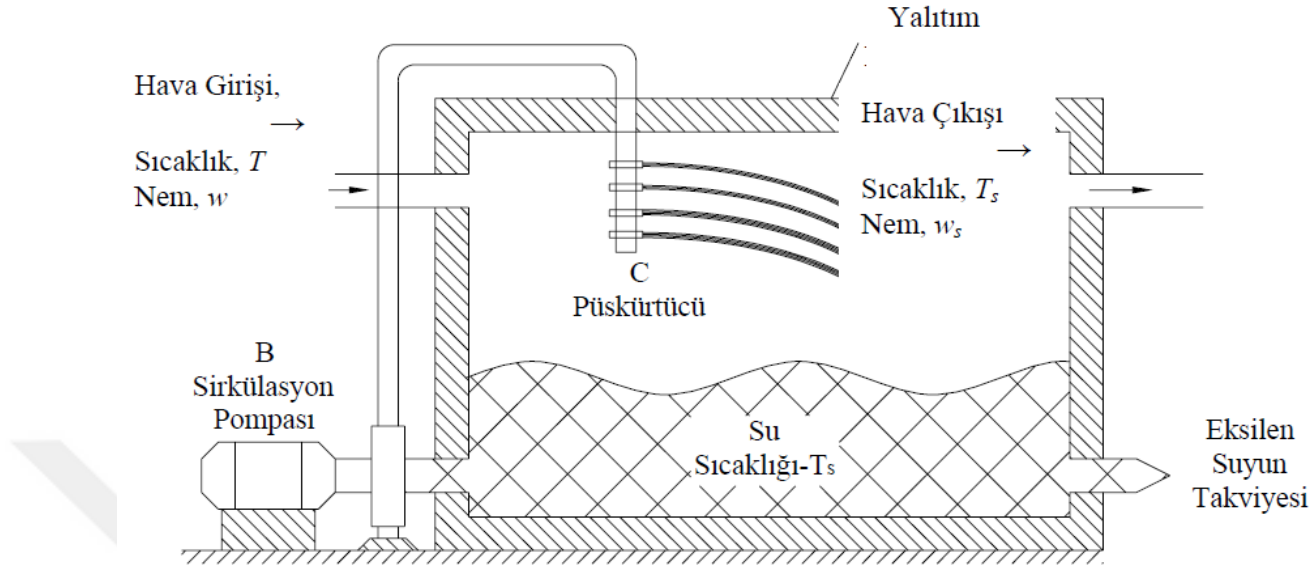
$(h_{fg})_{T=T_0}$  :  $T_0$  sıcaklığındaki suyun buharlaşma gizli ısısı

Nemli ısı tanımından yararlanılarak;

$$h = C_s(T - T_0) + w((h_{fg})_{T=T_0}) \quad (3.11)$$

ifadesiyle entalpi değeri elde edilir.

### Adyabatik Doymunluk Sıcaklığı



Şekil 3.1 Adyabatik doymunluk sıcaklığı ölçüm düzeneği (Özbalta, Güngör, Küçüka, 2011).

Şekil 3.1’de görülen adyabatik sistemi göz önüne alalım. Başlangıçtaki sıcaklığı  $T$ , nemi  $w$  olan gaz hacimden geçirilsin. Hacim adyabatik koşulları sağlayacak şekilde yalıtılmış olsun. Hacmin tabanındaki sıvı, pompa ile çekilerek püskürtme elemanları ile hacim içinden geçen hava içine püskürtülsün. Hacimden geçen gazın sıcaklığı azalır, nemliliği ise artar. Sıvının sıcaklığı, adyabatik doymunluk sıcaklığı olarak isimlendirilen bir kararlı hal sıcaklığına ulaşır. Eğer hava girişte doymun değilse, adyabatik doymunluk sıcaklığı, havanın giriş sıcaklığından daha düşüktür. Hava ile su arasındaki temas yeterli ise çıkışta hava sıvı ile dengeye ulaşır ve odadan çıkışta hava  $T_s$  sıcaklığında doymun hale gelmiş olur.

Sıvının, hava içine buharlaşması nedeniyle haznedeki su miktarında bir azalma söz konusudur. Bu eksilen su yine  $T_s$  sıcaklığında sisteme gönderilmelidir. Pompa işini ihmal ederek bir enerji dengesi yazalım. Referans noktası olarak  $T_s$ ’i seçelim. Bu seçim nedeniyle eklenen suyun entalpisi 0 olur ve giren gazın toplam entalpisi çıkan gazın entalpisine eşit olur.

$$C_s(T - T_s) + w((h_{fg})_{T=T_s}) = w_s((h_{fg})_{T=T_s} + C_s(T_s - T_s)) \quad (3.12)$$

$$C_s(T - T_s) + w((h_{fg})_{T=T_s}) = w_s((h_{fg})_{T=T_s}) \quad (3.13)$$

$$C_s(T - T_s) = (h_{fg})_{T=T_s} (w_s - w) \quad (3.14)$$

$$\frac{w - w_s}{T - T_s} = \frac{C_s}{(h_{fg})_{T=T_s}} = \frac{C_{pa} + C_{pv}w}{(h_{fg})_{T=T_s}} \quad (3.15)$$

Bu denklemde  $T$  ve  $w$  için farklı değerler kullanılarak psikometrik diyagramda yer alan adyabatik doyumluk eğrileri elde edilir.

### 3.2 Havanın Nem Miktarını Tayin Yöntemleri

Maddenin nem içeriği ile bulunduğu ortamdaki havanın nem içeriği arasındaki ilişkilerinin araştırılmasında ve maddenin nem çekme özelliklerinin incelenmesinde önemli olduğundan, havanın nem içeriğinin tayin yöntemlerinin iyi bilinmesi gerekir (Doğanay, 2009).

#### 3.2.1 Mekanik higrometreler:

Saç, kıl gibi biyolojik materyaller, polimer yapısında bazı sentetik lifler ve bazı bitkisel lifler havanın içerdiği neme göre az veya çok nem alıp hid rate olurlar.

Bunun sonucunda saç, kıl veya lifin boyu uzar, nem azalınca kısalır. Piyasadaki ibreli mekanik higrometrelerin çalışma prensibi budur (Doğanay, 2009).

#### 3.2.2 Elektrikli higrometreler:

Lityum klorür gibi havanın bağıl nemi ile denge oluşacak şekilde nem çeken (higroskopik) bazı maddelerin, filtre kağıdı gibi gözenekli bir yüzeye tespit edilip, bunların elektriksel dirençlerinin ölçülmesinden yararlanılarak ticari higrometreler yapılabilir (Doğanay, 2009).

#### 3.2.3 Gravimetrik yöntem:

Fosfor pentaoksit gibi çok hızlı nem çekici bazı maddeler üzerinden, bilinen miktarda hava geçirilir. Nem çekici madde tekrar tartılarak soğurduğu nem miktarı bulunur; havanın mutlak nemi hesaplanır (Doğanay, 2009).

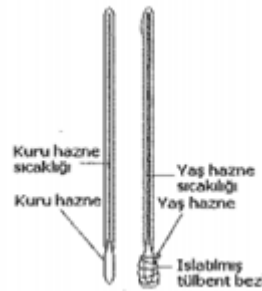
### 3.2.4 Çiy noktası (dew point) yöntemi:

Ayna gibi parlak (nikelajlı, kromajlı) bir yüzeyin belirli bir hızla soğutulması sonucu yüzeyle temasta olan hava filmi de soğur. Yüzeyle temasta olan havanın sıcaklığının azalması sonucu bağıl nemi gittikçe artar ve doymuşluğa ulaştığı sıcaklık derecesinde çiy oluşur. Bu sıcaklık derecesinde bağıl nemi bu şekilde belirlenen havanın mutlak nemi, nem grafiğinden yararlanılarak bulunur (Doğanay, 2009).

### 3.2.5 Kuru termometre - yağ (ıslak) termometre (dry bulb-wet bulb) yöntemi:

Bilimsel olarak nem miktarı tayini için en uygun yöntem, yağ termometre-kuru termometre yöntemidir ki eşdeğer termometrenin birinin termometresine iki üç kat sargı bezi sarılıp, ıslatıldıktan sonra, her iki termometrenin üzerine hafif bir esinti yapacak şekilde hava gönderilince termometre I (kuru termometre), havanın sıcaklığını gösterir; termometre II (yağ termometre) de ise, ıslak termometre üzerindeki buharlaşma sonucu oluşan soğuma nedeniyle sıcaklık düşüşü gözlenir. Belirli kuru termometre sıcaklıklarında, kuru termometre- yağ termometre sıcaklık farkları alınarak hazırlanan özel tablolardan yararlanılarak o sıcaklıktaki havanın bağıl nemi hesaplanabilir (Doğanay, 2009).

Bu iki termometre arasındaki sıcaklık farkı ne kadar fazla olursa bağıl nem o kadar düşük olacaktır.



Şekil 3.2 Kuru termometre – yağ termometre yöntemi ile havanın nem içeriğinin tayini (Doğanay, 2009).

Bunun nasıl gerçekleştiği, nem grafiği başlığı altında açıklanmıştır. Yağ termometre sıcaklığı ile kuru termometre sıcaklığı arasındaki ilişkiden ve nem

grafiğinden yararlanılarak havanın bağıl nemi ve mutlak nemi kolaylıkla bulunabilir.

Kurutma işleminde rol oynayan en önemli etken, kurutulacak maddenin üzerinden geçen havanın (veya gazın) nem (buhar) taşıma yeteneğidir. Havanın buhar taşıma yeteneği kurutma hızını ve kurutma süresini belirler. Hava ısıtılınca, onun buhar taşıma yeteneği artar. Havanın buhar derişiminin ve buhar taşıma yeteneğinin (kapasitesinin) saptanmasında nem grafiğinden yararlanılır.

**Nem grafiği:** Nem grafiği, sabit basınçta, havanın sıcaklığı ve nemi arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Şekil 3.2). Grafiğin dikey ekseninde havanın mutlak nemi (kg su/kg kuru hava), yatay ekseninde ise havanın sıcaklığı (kuru termometre sıcaklığı) yer almaktadır. Soldaki %100 doyunluk eğrisi (DOB eğrisi) doyunluk sınırını yani %100 bağıl nemi göstermektedir; ona paralel eğriler de bağıl nem eğrileridir (%90, %80 v.b.). Paralel yatay çizgiler ise mutlak neme aittir. Kuru termometre sıcaklığından çıkan dik çizgilerin DOB eğrisini (%100 bağıl nem eğrisini) kestiği noktalar yaş termometre sıcaklığını göstermektedir. Bu noktalardan geçen ve doymuşluk entalpi cetvelinden çıkan dik çizgiler, neme ve kuru termometre sıcaklığına göre değışen yaş termometre sıcaklığını göstermektedir.

Bu grafikte, normal atmosfer basıncında, belirli sıcaklıklarda, havanın bağıl nemi, nemle doyunluğu, çiy noktası ve yaş termometre sıcaklığı, kolaylıkla hesaplanabilir.

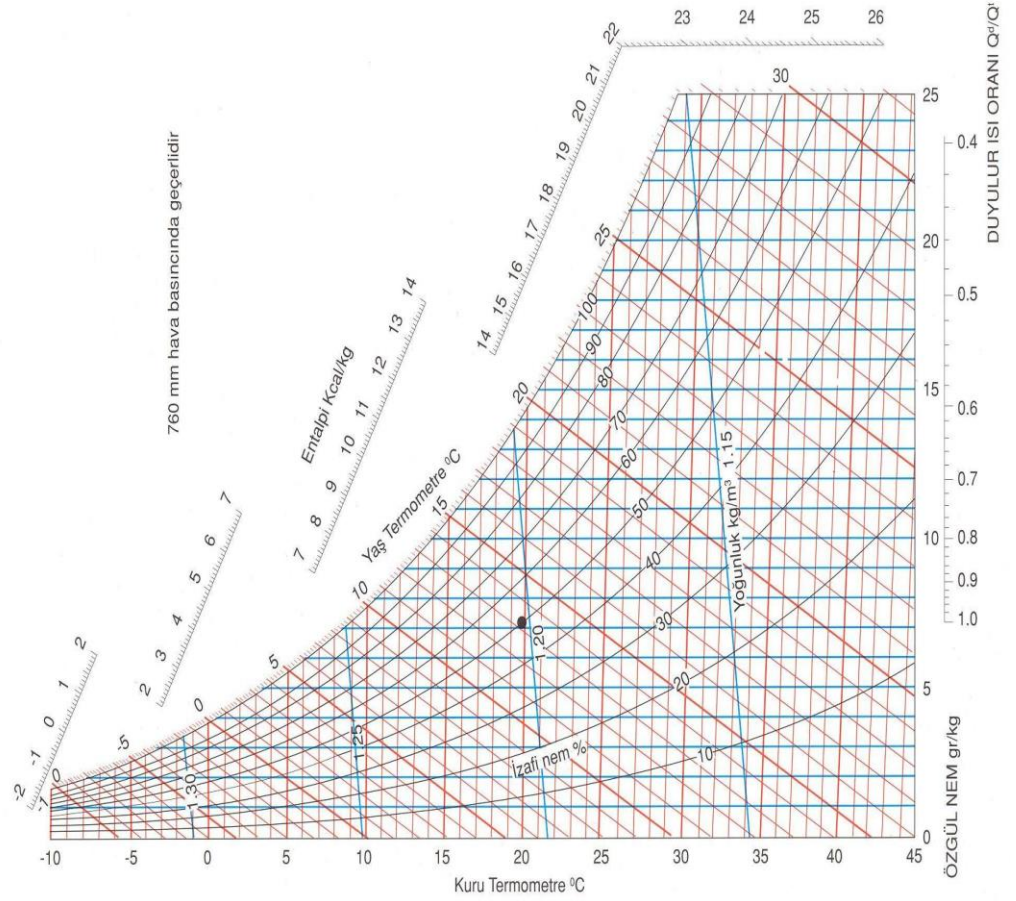
Havanın nem içeriğı, kuru termometre sıcaklığı - yaş termometre sıcaklığı arasındaki ilişkidten yararlanılarak havanın buhar taşıma yeteneğinin sıcaklıkla değışme mekanizması kolaylıkla açıklanabilir. Kuruma sürecinin büyük bölümü sabit hızda kuruma sürecinde olan maddelerin yüzey sıcaklığı (yaş termometre sıcaklığı) kolaylıkla belirlenip stabilite açısından değıerlendirilebilir.

Yaş termometre-kuru termometre sıcaklıkları arasındaki ilişkidten ve bunların yer aldığı nem grafiğinden yararlanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılabilir:

- I. Belirli bir sıcaklıkta (kuru termometre sıcaklığı) bağıl nemi bilinen havanın mutlak nemi, mutlak nemi bilindiğinde bağıl nemi hesaplanabilir.
- II. Havanın sıcaklığının belirli bir noktaya yükseltilmesi ile azalan bağıl nemi hesaplanabilir. Hava ısıtıldıkça havanın su tutma yeteneğı arttığından bağıl

nem düşer. Bundan yararlanılarak kurutucu havanın sıcaklığının kurutma üzerine etkisi kolaylıkla açıklanabilir.

- III. Havanın sıcaklığının belirli bir noktaya düşürülmesi ile artan bağıl nemi hesaplanabilir.
- IV. Havanın sıcaklığının, çiy noktasının altında belirli bir sıcaklığa düşürülmesi ile yoğunlaşan su miktarı hesaplanabilir. Bu sıcaklıktaki havanın mutlak nemi ve yükseltildiği sıcaklığa göre hangi bağıl nemlere sahip olacağı bulunabilir.
- V. Bağıl nemi belli bir değerin altında olması gereken üretim yerlerinin iklimlendirilmesinde bu bağıntılardan ve nem grafiğinden yararlanılabilir (Doğanay, 2009).



Şekil 3.3 Nem grafiği (Tutulum, 2010).

### 3.3 Katı maddenin nemi

Kurutma süreçlerinde ısı ve kütle transferi aynı anda gerçekleşir. Kurutulan maddeye kurutma ortamından değişik mekanizmalarla ısı transferi (iletim, taşınım, radyasyon gibi) meydana gelir (Treybal, 1968). Kurutulan maddenin içerdiği nem sıvı veya buhar halinde maddenin iç kısmından madde yüzeyine ve buradan da kurutma ortamına transfer olur. Kurutulan maddelerin çok değişik yapıya sahip olması (ağaç, kağıt, sabun, tuğla, sebze, meyve gibi) kurutma mekanizmalarının farklı olmasını gerektirir. Kurutucu tasarımında, kurutulan ürünün başlangıç ve son nemliliklerinin bilinmesi önemlidir.

Maddelerin içerdikleri nem değerleri yaş ve kuru madde esasına göre tanımlanır.

$$\text{Nem içeriği (Yaş Madde Esası)} = \frac{\text{Maddenin içerdiği nem kütlesi}}{\text{Kuru madde kütlesi} + \text{maddenin içerdiği nem kütlesi}}$$

$$W_w = 100x \frac{m_w}{m_{km} + m_w} \quad (3.16)$$

$$\text{Nem içeriği (Kuru Madde Esası)} = \frac{\text{Maddenin içerdiği nem kütlesi}}{\text{Kuru madde kütlesi}}$$

$$W_d = 100x \frac{m_w}{m_{km}} \quad (3.17)$$

Yaş madde esasına göre nemlilik ile kuru madde esasına göre nemlilik arasında bağıntı aşağıdaki bağıntılar vardır.

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (3.18)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (3.19)$$

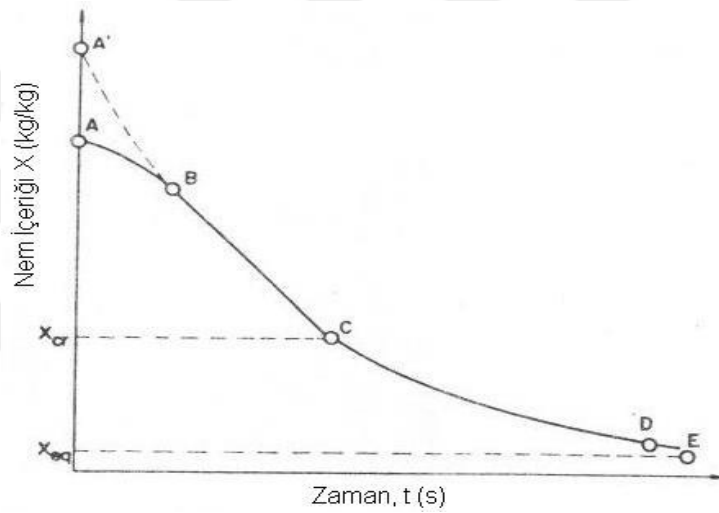
### 3.4 Kuruma Eğrileri

Kuruma kinetiği, kuruma süresi ile ortalama sıcaklığın ve malzemenin ortalama nem içeriğinin değişimi ile ilgilidir. Kurutma dinamiği ise kurutulan cisimdeki sıcaklık ve nem profillerinin değişimini tanımlar. Kurutma kinetiği bilgileri kullanılarak, kuruma süresi, uzaklaştırılan nemin miktarı, enerji tüketimi gibi parametreler, malzemenin fizikokimyasal özelliklerinden de yararlanılarak belirlenebilir. Malzemenin nem içeriği ve sıcaklığındaki değişim genellikle cismin

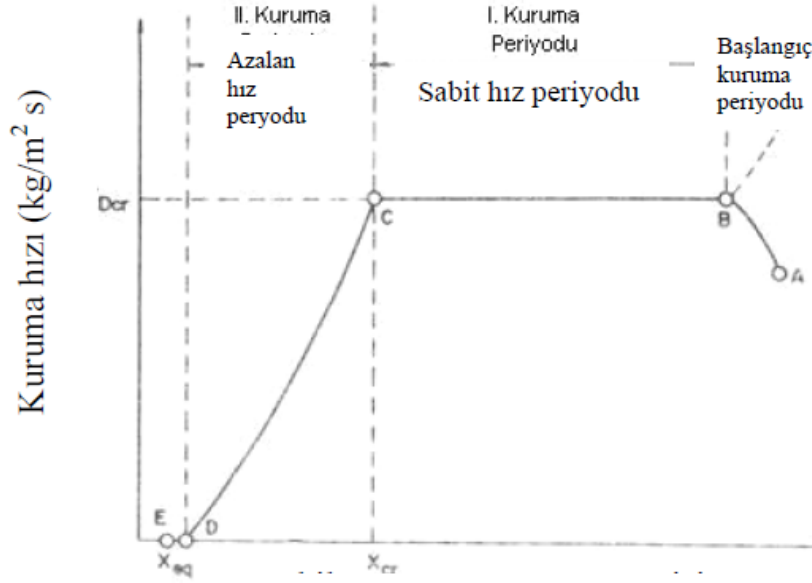
yüzeyi ve çevre arasındaki ısı ve kütle transferi tarafından kontrol edilir. Burada kurutulan maddenin içindeki ısı ve kütle transferi de çok önemlidir.

Kuruma süresi ile nem içeriğindeki değişimle ilgili olan kurutma yoğunluğu, sıcaklık, nem, havanın bağıl hızı, toplam basıncı gibi kuruma sürecine ait parametrelerden önemli ölçüde etkilenir. Kuruma hızı üzerine kurutma parametrelerinin etkisi basit bazı modellerle incelenebilir. Kuruma süreçleri koordinatları aşağıdaki gibi alınan bazı diyagramlarda örneklenebilir.

1. Malzeme-Nem İçeriği/Kurutma Süresi  $\Rightarrow$  Kuruma Eğrisi (Şekil 3.4)
2. Kuruma Hızı/Malzemenin Nem İçeriği  $\Rightarrow$  Kuruma Hızı Eğrisi (Şekil 3.5)
3. Malzeme Sıcaklığı/Malzeme Nem İçeriği  $\Rightarrow$  Sıcaklık Eğrisi



Şekil 3.4 Nem içeriği-zaman eğrisi: kuruma eğrisi (Özbalta vd., 2011).



Şekil 3.5 Kuruma hızı eğrisi (Özbalta vd., 2011).

Malzemenin nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimini veren kuruma eğrisi kullanılarak aynı koşullar altında farklı miktarlardaki maddeler için gerekli kuruma süresini doğrudan hesaplamak mümkündür. Bu grafikte yer alan A' ve A gibi iki başlangıç noktasının olduğunu görürüz. Eğer malzeme başlangıçta kurutma ortamı sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta ise prosesin başında malzemenin kuruma sıcaklığına kadar soğuması için belirli bir süre geçer. Başlangıç kuruma periyodu A'B eğrisi ile gösterilmektedir. Eğer malzeme kurutma ortamı sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta kurutucuya giriyorsa sürecin başlangıcındaki belli bir süre malzemenin kurutma ortamı sıcaklığına ısınması için harcanır. Başlangıç kuruma periyodu AB eğrisi ile gösterilmektedir.

Gerek A'B gerekse AB periyotları toplam kuruma süresi içinde önemsiz bir paya sahiptir. Kuruma eğrisi, kuruma hızı eğrilerine dönüştürülerek deney sonuçlarından daha fazla bilgi türetebilmesi mümkündür.

Kuruma hızı eğrilerini elde etmek için kuruma eğrilerine değişik noktalardan çizilen teğetlerin eğimini ölçerek veya belli bir  $\Delta\tau$  zaman aralığında malzeme-nem içeriğindeki değişimi ( $\Delta W_d$ ) ölçerek elde edilebilir. Bu veriler düzenlenerek kuruma hızını ( $\dot{N}$ ) veren eşitlik aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{N} = \frac{m_d}{A} \frac{\Delta W_d}{\Delta \tau} \quad (3.20)$$

Burada  $m_d$  malzemenin nem hariç kütlesi, A kuruma yüzeyidir. Kurutma ortamı hava, malzeme yüzeyine paralel olarak geçiyorsa kuruma yüzeyi gaz ile temas eden yüzeydir. İçten geçişli sistemlerde ise (akışkanlaştırılmış yatak ve sabit yatak) hava akışına dik yüzey alanıdır.

Kuruma hızı eğrileri incelendiğinde önemsiz olan başlangıç ısınma (AB) veya soğuma (A'B) periyodu dışında iki periyodun olduğu görülür. Bunlar sabit kuruma hızı periyodu ve azalan hız periyodudur. Malzeme başlangıçta yeterli nemde ise, sabit kuruma debisi periyodunda, kurutulan malzemenin yüzeyinin ince bir sıvı filmi ile kaplı olduğu (yani tamamen ıslak olduğu) varsayılır. Bu nemin tümünün bağlı olmayan su olduğunu söyleyebiliriz. Bu koşullarda malzeme kurutma ortamında havayla temas ederse buharlaşma yüzeyden başlar. Buharlaşma debisi bu periyotta katı madde özelliklerine bağlı değildir. Aynı koşullar altında bulunan sıvı yüzeyinden buharlaşma debisine eşittir. Nemin buharlaşma hızı, gaz faza ait kütle transfer katsayısı ( $h_{my}$ ), gaz akımının nem içeriği ( $w$ ) ve sıvı yüzeyine komşu havanın nemi ( $w_s$ ) arasındaki farktan hesaplanır. Eğer kurutma havası ya da gazı kurutulan malzemeye paralel geçiyorsa sabit debi periyodunda kuruma hızı;

$$\dot{N} = h_{my}(w_s - w) \quad (3.21)$$

Gaz faz kütle transfer katsayısı, malzeme üzerinden geçen gazın doğrultu ve hızı değişmediği sürece sabit olarak alınabilir.  $w_s$ , doygunluk nemi olup, sıvı yüzey sıcaklığının ( $T_s$ ) fonksiyonudur. Nemin buharlaşması gizli ısı gerektirdiğinden sıvı yüzeyinin sıcaklığı (malzeme üzerindeki sıvı) çevreden yüzeye olan ısı transferinin buharlaşma için gerekli ısıya eşit olduğu bir denge sıcaklığında sabit kalır. Ayrıca kuruma koşulları sabit olduğunda  $w$  değişmez. Bu periyotta yüzey tamamen ıslak kaldığı için nemin katı maddenin iç bölgelerinden yüzeyine geliş mekanizması kurutma prosesini etkilemez. Süreçte katı madde ısı transferi çoğunlukla taşınım ile meydana gelir. Eğer bu koşullar sağlanıyorsa ıslak yüzeyin sıcaklığı havanın bulunduğu koşullar için geçerli olan yaş termometre sıcaklığına eşittir ancak çoğu kurutma işlemlerinde ise yüzeye olan ısı transferi taşınımın yanında iletim ve radyasyonla meydana gelir. Böyle bir süreçte malzemenin yüzey sıcaklığı havanın yaş termometre sıcaklığından birkaç derece yüksektir (Özbalta vd., 2011).

### 3.5 Endüstriyel Kurutucular

#### 3.5.1 Kurutma sistemi tipleri ve seçimi

1. Uygun kurutucuların incelenmesi,
2. Değişik tiplerin ön maliyetlerinin tahminlenmesi,
  - Yatırım maliyeti,
  - İşletme maliyeti.
3. Prototip veya laboratuvar ünitesinde kurutma testi davranışları en uygun cihazın tipini belirleyebilir. Bazen bir örnek tesiste bu doğrulanabilir.
4. Kurutma deneylerinde kurutulan ürünlerin örnek ve kalitelerinin belirlenmesi. Değişik gereksinimler kurutucunun tasarım esaslarını belirler. Örneğin ürünün kurutucuda taşınması çok önemli olup kurutucuda kalma süresiyle yakından ilgilidir. Ürünün başlangıçtaki durumu (sıvı, pasta, katı, toz, granüler, levha vb.) tasarım esaslarında büyük etkiye sahiptir. Çizelge 3.1’de bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri verilmiştir. Çizelge 3.2’de ise çizelgede ise kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler görülmektedir.

Çizelge 3.1 Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri (Güngör ve Özbalta, 1997).

| Malzeme Cinsi                           | Kurutma Sıcaklığı (°C)           | Hafta | Gün  | Saat  |
|-----------------------------------------|----------------------------------|-------|------|-------|
| Meşe Tahtaları                          | 32-52                            | 1-4   |      |       |
| Yumuşak Tahtalar                        | 70-105                           |       | 2-14 |       |
| Tuğlalar                                | 77                               |       |      | 30    |
| Kahve                                   | 50-72                            |       |      | 12-48 |
| Kauçuk                                  | 36-60                            |       | 2-6  |       |
| Kabuksuz Hindistan Cevizi               | 65-92                            |       |      | 4-20  |
| Meşin ve Köseleler                      | 26-38                            |       | 2-6  |       |
| Meyveler                                | 55-80                            |       |      | 6-24  |
| Üzüm                                    | 60-65                            |       |      | 24    |
| Elma                                    | 1.Kademe 70-88<br>2.Kademe 74    |       |      | 8     |
| Şeftali, Armut                          | 68                               |       |      | 24-30 |
| Şerbetçi Otu                            | 50-65                            |       |      | 6-12  |
| Sebzeler                                | 50-65                            |       |      | 2-18  |
| Havuç                                   | 1.Kademe 70<br>2.Kademe 65       |       |      | 14-24 |
| Mantar                                  | 1.Kademe 44<br>2.Kademe 65       |       |      |       |
| Soğan                                   | 1.Kademe 70-88<br>2.Kademe 55-60 |       |      | 10-15 |
| Deriler                                 | 21-32                            |       |      | 2-150 |
| Fırın Boyaları                          | 105-175                          |       |      | ¼-6   |
| Sabun                                   | 38-52                            |       |      | 12-72 |
| Tütün Yaprakları                        | 29-55                            |       |      | 12    |
| Çay Yaprakları (Fanaj veya ilk kurutma) | 38                               |       |      | 4-8   |
| Çay yaprakları (Kurutma)                | 70-110                           |       |      | 1-2   |

Çizelge 3.2 Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler (Başaran, Bitlisli, Sarı, Özbaltı ve Güngör, 2004).

| Kurutucu Tipleri                                  | MJ/kg<br>Uzaklaştırılan Su |
|---------------------------------------------------|----------------------------|
| Isı Pompalı Kurutucu                              | 0,5-0,8                    |
| Direkt Egzoz Gazları ile Çalışan Kurutucu         | 3,2-3,8                    |
| Hava ile çalışan kurutucu 70-100°C                | 4,5-5,5                    |
| Kazandan alınan egzoz gazları ile kurutma (400°C) | 5,0-6,0                    |
| Kazandan alınan egzoz gazları ile kurutma (200°C) | 9,0-12,0                   |
| Bantlı ve Tünel Kurutucular                       |                            |
| Ters Akışlı Tepsili-Bantlı                        | 8,0-16,0                   |
| Ters Akışlı Rafı-Tünel                            | 6,0-16,0                   |
| Arasından Akışlı Tepsili-Bantlı                   | 5,0-12,0                   |
| Vakumlu Tepsili-Bantlı-Levhalı                    | 3,5-8,0                    |

Kurutma cihazlarının seçimi aşağıdaki sıralama dahilinde gerçekleştirilir.

**a) Kurutucuların ön seçimi:** Islak malzeme ve kuru ürün teminine en uygun kurutucu tipleri ön seçimi gerçekleştirilir. Kurutucularda bütün işlemlerin sürekliliği ve istenen fiziksel ve kalite özelliklerini elde etmesi ön koşulu aranır.

**b) Kurutucuların ön karşılaştırılması:** Ön seçilen kurutucular elde edilebilen veriler ışığında yaklaşık maliyet ve verimlilik açısından karşılaştırılır. Bu değerlendirmede verimlilik açısından uygunsuz veya ekonomik olmayan kurutucular sonraki değerlendirmelerde dikkate alınmaz.

**c) Kurutma denemeleri (testleri):** Bu denemeler halen değerlendirmeye alınmakta olan kurutucu tipleri için gerçekleştirilir. Bu testler en iyi çalışma koşullarını ve ürün karakteristiklerini belirler ve ayrıca cihaz satıcı firmaların aktardıkları bilgilerin doğruluğunun sınanmasını sağlayacaktır.

**d) Kurutucu seçiminde karar verme:** Kurutma testlerinden ve belirtilen özelliklerin değerlendirilmesiyle kurutucu seçimine karar verilebilir (Güngör ve Özbaltı, 1997).

#### 4. GÜNEŞ ENERJİLİ SİSTEMLER

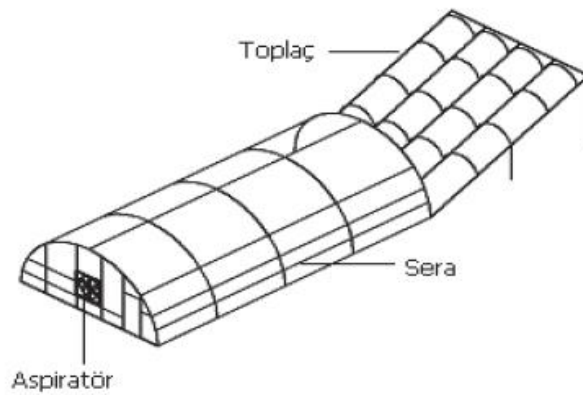
Güneş enerjisiyle açık havada doğal kurutma tarihinin ilk çağlarından beri bilinmekte olup kereste ve diğer tarım ürünlerinin kurutulmasında uygulanmaktadır. Doğal kurutmada meteorolojik şartların kontrol edilememesinden dolayı, sebze ve meyvelerin zarar görmesi, kalitesinde düşme olması, istenilen nem derecesine kadar düşürülemeyişi, sermayenin uzun süre bağlı kalması gibi sebeplerden dolayı önemli sakıncalar görülmektedir. Bu sakıncaların bazılarını giderebilmek için, sıcaklığın kontrol edilebildiği kapalı kurutma odaları yapıp kullanılmasına rağmen, bu defa da kurutma havasının nemi kontrol edilemediğinden istenilen kurutma kalitesine ulaşmak yine de mümkün olmamıştır.

Güneş enerjili kurutma sistemleri konusunda, 1950'lerden bu yana, birçok ülkede araştırmalar yapılmaktadır. Araştırmalarda kurutma enerjisinin toplanması, depolanması ve kullanma verimliliğini artıracak çeşitli sistemler önerilmektedir. Güneş enerjili sistemlerle kurutma yapılması düşünüldüğünde kurutmanın yapılacağı bölgenin iklim özellikleri dikkatle incelenmelidir. Çeşitli iklim özellikleri, güneş ışınımı, yoğunluğu, güneşlenme süresi, güneş enerjili kurutucuların tertibini ve verimini etkileyen önemli unsurlar olmaktadır. Güneş enerjili kurutucular, sera tipi ve güneş enerjili ısıtıcı olmak üzere iki ana aşamada değerlendirilir (Ceylan vd., 2006).

Güneş enerjisi, rezervi bitmeyen ve çevreyi kirletmeyen temiz bir enerji kaynağı olup kolayca ısı enerjisine çevrilebilme özelliğinden dolayı dünya genelinde tarımsal ürünlerin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemiz güneş kuşağı içerisinde yer aldığı için yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Güneş enerjisinden kurutmada en basit faydalanma şekli tarımsal ürünlerin sergi yerlerine yayılarak açık havada kurutulmasıdır. Bu tip kurutma şekli ülkemizde de yaygın olarak kullanılmakta ise de kurutma havası (çevre havası) sıcaklığı düşük olduğu için kuruma yavaş olmakta ve mikroorganizmalar ürün üzerinde büyüme fırsatı bulmaktadırlar. Sonuçta kurutma işlemi uzun surede tamamlanmakta ve elde edilen kurutulmuş ürünlerin kalitesi düşük olmaktadır. Ayrıca yağışlar, rüzgâr tarafından tozların ürün üzerine taşınması, böcekler ve kuşlar tarafından ürünlerin yenmesi sergi yerlerinde açık havada kurutulan ürünlerin sağlıklı olmasını sınırlamaktadır. Bu sebeple ülkemizde ticari amaçlı sebze ve meyvelerin kaliteli ve hızlı kurutulması için güneş enerjili kurutuculara ihtiyaç vardır (Tarhan vd., 2007).

#### 4.1 Sera Tipi Güneş Enerjili Kurutucular

Sera tipi kurutucularda, kurutma hacminin çatı ve/veya duvarları, güneş ışığının geçmesi için, saydam örtü malzemesi ile kaplanırlar. Saydam örtü malzeme-sinden geçen güneş ışınları, bu örtülerin altındaki yapı elemanlarınınca absorbe edilip, ısı taşıyıcı akışkan olarak hava yardımı ile taşınarak kurutulacak kereste, meyve ve sebze üzerine ulaştırılır. Güneş enerjisi ile ısıtılan hava yardımıyla alınan meyve veya sebzelerin nemi, yine aynı hava ile kurutma ortamından uzaklaştırılmaktadır. Sera tipi kurutucularda, güneş enerjisini toplayan yüzeyler, kurutma fırınının integral bir parçası olduğundan, tertiplerinde ve yüzeylerinin büyüklüğünün belirlenmesinde fırının geometrisine ve tertibine uyma zorunluluğu vardır. Yapıları basit olduğundan verimleri, güneş enerjili güneş enerjili ısıtıcılı kurutuculara göre daha düşük, kurutma süreleri uzundur. Isı kayıpları fazla olduğundan saydam örtü çift kat yapılmalıdır. Sıcak hava saydam örtünün altında sürekli dolaştırıldığında, hava içindeki toz ve diğer parçacıkların örtü malzemesinin altına yapışması mümkündür. Tozların temizlenmemesi halinde verimin düşeceği dikkate alınmalıdır. Şekil 4.1’de sera tipi kurutucu görülmektedir (Ceylan vd., 2006).



Şekil 4.1 Sera tipi kurutucu (Çakır, 2015).

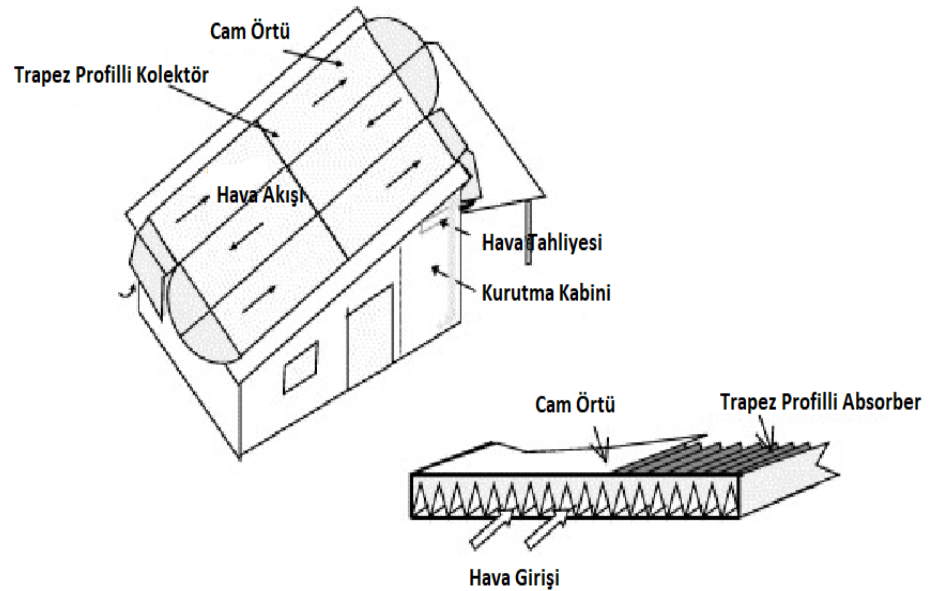
## 4.2 Güneş Enerjili Isıtıcı Kurutucular

Güneş enerjili ısıtıcılı kurutucularda, güneş enerjili ısıtıcılar kurutma fırınlarının ayrı birer parçasıdır. Güneş enerjili ısıtıcılarda toplanan enerji hava ya da su ile aktararak kurutulacak malzemeye iletilir. Fırının geometrisine ve tertibine bağlı kalınmayacağından, güneş enerjili ısıtıcı yüzeylerinin büyüklüğünün belirlenmesinde ve düzeninde daha esnek ve bağımsız hareket etme imkânı vardır. Özellikle termal depolama sistemlerinin uygulanması ve fırın ısı yalıtımı daha

iyidir. Kurutma işleminin kontrolü kolaylıkla başarılabilir. Bu fırınların tasarımı daha karışık ve sera tipine göre maliyeti daha yüksektir. Kurutma maliyeti ve süreleri yapılan kurutma işlemine göre değişiklik göstermektedir. Güneş enerjili ısıtıcılarda ısınan hava bir fan ile emilerek kurutma fırını içindeki meyve ve sebze yığını üzerinden geçirilmek suretiyle kurutulacak ürünün nemi alınır ve kuruma sağlanır (Ceylan vd., 2006).

#### 4.2.1 Güneş enerjili kabin kurutucular

En basit yapılı kurutuculardan bir tanesidir. Bu kurutucuya ait genel görünüş Şekil 4.2’de verilmiştir. Kurutucu, tek veya iki kat saydam örtüyle kaplanmış, belirli bir eğimle kapanan bir kapak ile yan yüzeyleri ve tabanı yalıtım maddeleri ile kaplanmış, ahşap veya metal saçtan yapılan, yan görünüşü yamuk şeklinde olan kabinden oluşmaktadır. Ayrıca havalandırma için tabanına, ön ve arka kenarlarına delikler açılmıştır. Kurutucunun iç yüzeyleri gelen güneş enerjisini daha iyi tutmak için siyaha boyanmalıdır. Kurutucu içinde hava hareketi; tabanda ve ön kenarda bulunan deliklerden çevre havasının içeri girmesiyle ve ısınmış ve nemli havanın arka kenardaki üst deliklerden kabini terk etmesiyle meydana gelmektedir.



Şekil 4.2 Güneş enerjili kabin kurutucu (Othman et al., 2006).

Güneş enerjili kabin kurutucuların imalatında aşağıda verilen kurallara uyulması tavsiye edilmektedir:

1. Yan yüzeylerin gölgeleme etkisini azaltmak için kabinin uzunluğu genişliğinin en az üç katı olmalıdır.
2. Kabinin bütün iç yüzeyleri siyaha boyanmalıdır.
3. Kurutma tepsilerinin altında ve ürün içerisinde yeterli ve düzenle hava akışını sağlamak için tepsinin alt yüzeyi ile kabinin tabanı arasında yeterli bir boşluk bırakılmalıdır.
4. Kapakta kullanılacak olan saydam örtü UV ısınlara dayanıklı olmalıdır. Bu sebeple plastik saydam örtüler yerine cam tercih edilmelidir.

Bu tip kurutucuların imalat masrafları diğer güneşli kurutuculara göre daha düşüktür. En büyük eksiklikleri ise nemli havanın etkin bir şekilde atılamamasına bağlı olarak kabin içerisinde 70-1000 °C'ye varan aşırı sıcakların meydana gelmesidir.

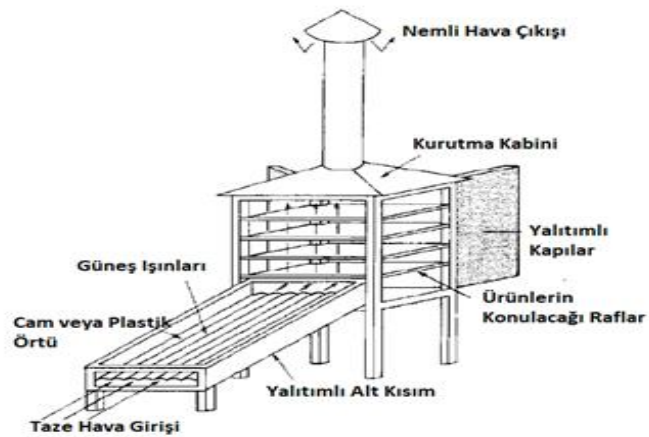
Güneş enerjili kabin kurutucularda havalandırma delikleri yerine güneş bacası ve hava giriş kanalı (plenum) kullanarak, düzgün hava dağılımı sağlanabilir ve kabin içerisinde aşırı sıcaklık yükselmesi önlenir. Tipik bir güneş bacası, dış yüzeyi siyaha boyanmış bir borudan olabileceği gibi, güneşi gören ön ve yan kenarları saydam örtü ile kaplanmış, arka kenarının iç kısmı siyaha boyanmış ve dış kısmı yalıtım maddeleri ile kaplanmış metal malzemeden imal edilmiş dikdörtgen prizma şeklinde de olabilir (Tarhan vd., 2007).

#### 4.2.2 Güneş enerjili raflı kurutucular

Güneş enerjili raflı kurutucu; güneş enerjili hava ısıtıcısı, kurutma odası ve güneş bacasından meydana gelmiştir. Bu kurutucuya ait genel görünüş Şekil 4.3'de verilmiştir. Güneş enerjili kabin kurutucuların geliştirilmiş tipidir.

Güneş enerjili hava ısıtıcısının görevi, üzerine gelen güneş ışınımını tutarak ısı enerjisine çevirmek ve kurutma havasına aktarmaktır. Toplaç içinde ısınan hava termal kuvvet etkisiyle kurutma odasına girer; ürünlerin yetirildiği ve raflar halinde yerleştirilmiş kurutma tepsilerinden geçerek urunun nemini alır ve bacadan dışarı çıkar. Bu tip kurutucuların kapasitelerini, maliyetlerini ve verimleri

etkileyen başlıca tasarım parametreleri; toplaç tipi ve boyutları, kurama odası tipi ve boyutları, rafların yerleştirme şekli ve sıklığıdır. Güneş enerjili hava ısıtıcısı; genelde düz yüzeyli olup, ışığı geçirebilen saydam örtü (tercihen cam örtü) güneş ışığını yutan, siyaha boyanmış ve metalden yapılmış (tercihen bakır) bir yutucu plaka, tabanı ve yan yüzeyleri içeriden yalıtılmış metal veya ahşaptan yapılmış bir kasadan meydana gelmektedir. Güneş ışınlamalarını yutan yüzey düz bir plaka şeklinde olabileceği gibi, havaya ısı transferini artırmak için değişik şekillerde biçimlendirilebilir veya çok sayıda plaka değişik şekillerde toplaç içine yerleştirilebilir. Ayrıca ısı iletimini artırmak ve kısmi bir depolama sağlamak için, toplaç içinde tutucu yüzey alt kısmına cam kırıkları, metal talaşları ve ısı depolayıcı kimyasallar konabilir. Kurutma odasının güneş gören yüzeyleri saydam örtü ile kaplanmalıdır. Kurutulacak ürünlerin güneş ısılarıyla direk temas etmelerinden dolayı kaliteleri düşüyor ise, ürünlerin üzeri siyah ve havayı geçirebilen bezlerle kapatılır. Ayrıca rüzgârla temas eden veya kuzeye bakan yüzeyleri yalıtım malzemeleri ile kaplanmalıdır. Kurutma tepsileri mümkün olduğunca hava akısına dirençleri en az olacak şekilde tabanında deliklere sahip sac malzemeden yapılmalı veya tel orgu ile kaplanmalıdır. Hava akış hızını artırmak için toplaç girişine veya bacaya elektrikli bir fan takılabilir. Elektrikli olmadığı bölgelerde ise baca uzunluğu artırılabilir veya bacaya rüzgâr türbini eklenebilir. Hava akısını engellemek için toplaç genişliği ile kurutucu odası genişliği eşit olmalıdır. Elektrikli fan kullanılacak ise toplaç genişliği ve sayısı daha fazla olabilir. Son durumda toplaçlar hava kanalları yardımıyla birbirine paralel veya seri bağlanır. Elektrikli fan kullanılması, toplaç verimini artırmakta ve ürünün daha hızlı kurumasını sağlamaktadır (Tarhan vd., 2007).



Şekil 4.3 Güneş enerjili raflı kurutucu (Tiwari et al., 2016).

### **4.3 Güneş Enerjili Kurutmanın Doğal Kurutma ve Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması**

Güneş enerjili kurutma doğal kurutmaya göre çok daha hızlı, klasik kurutmaya göre ise yavaştır. Klasik kurutmaya göre düşünülecek bu sakıncayı, kullanılacak enerjinin maliyeti dikkate alındığında, olumsuz bir faktör olarak değerlendirilmeyebilir. Kurutma sadece güneş enerjili kurutma fırınında yapılır ise, taze sebze ve/veya meyve doğrudan fırına konulur ve istenilen nem derecesine ulaşmaya kadar kurutulur. Bu yöntemle doğal kurutmayla ulaşamayacak nem derecelerine ulaşılır. Bu yöntem doğal kurutma ile yıl boyunca yeterli bir nem derecesine ulaşamayan bölgelerde uygulanır. Doğal kurutmanın uygun olmadığı yerlerde, güneş enerjili sistem klasik sistemlere bir ön kurutma temin eder. Böylece kurutma maliyeti düşürüldüğü gibi klasik sistemin kurutma süresi kısaltılır (Ceylan vd., 2006).

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu kısımda, kuru madde tayini ve kurutma deneylerinin deney düzeneklerinden söz edilmiştir.

### 5.1 Kuru Madde Tayin Düzeneği

#### 5.1.1 Nem tayini

##### 5.1.1.1 Gıdalarda nem tayininin önemi

Nem tayini gıda işleme ve gıda kontrolünde en fazla kullanılan temel analizlerdendir. Nem (su) miktarı gıdanın dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür. Bir gıdada kuru madde miktarı o gıdadaki su miktarı ile ters orantılıdır. Gıdadaki su miktarı arttıkça kuru madde miktarı azalır. Su miktarı azaldıkça da kuru madde miktarı artar (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

Gıdalarda bulunabilecek maksimum nem miktarı standart ve tüzüklerle sınırlandırılmıştır. Bu sınırlamada en önemli etkenler şöyle sıralanabilir (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011):

- i. Su miktarı belirli bir düzeyin üzerine çıktığında mikroorganizma aktivitesi artar. Nem miktarı düşük olan tahıllar ve kuru baklagillerde nem oranı arttıkça küf, kızılaşma, filizlenme, zararlı böcekler, toksinler vb istenmeyen durumlar ortaya çıkar.
- ii. Su miktarı arttıkça gıdalarda non enzimatik (enzimatik olmayan) esmerleşme reaksiyonları (maillard reaksiyonları) ortaya çıkar.
- iii. Üretici ham madde alırken fazla su satın almak istemez. Aynı durum tüketici için de geçerlidir.
- iv. Gıdaların optimum düzeyde işlenmesi için nem miktarı önemlidir. Örneğin; tahılların öğütülmesi, hamurun homojen biçimde karışması, dokusal açıdan kaliteli ve dayanıklı, ekmek, makarna üretilmesi için su miktarı çok önemlidir.
- v. Tuz, şeker, süt tozu, kakao gibi toz haldeki gıdalarda nem artışı topaklaşmaya neden olur.
- vi. Gıda işlemenin çeşitli aşamalarında konsantrasyon ve kıvam kontrolünün en basit yolu su miktarının bilinmesidir.

- vii. Gıdaların besleyici değerinin tayininde sonuçların standart şeklinde açıklanması için sonuçlar çoğunlukla kuru madde üzerinden verilir.

Gıdalarda nem üç şekilde bulunur (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011):

- i. **Bağıl nem:** Gıdadaki protein ve karbonhidrat moleküllerine veya kolloid yüzeylere bağlı olarak bulunur.
- ii. **Serbest su:** Hücreler arasında bulunan ve buharlaştırma ve kurutma ile uzaklaşabilen sudur.
- iii. **Absorbe olmuş (emilmiş) nem:** Gıdaların üst yüzeylerine bulunan sudur.

Sabit sıcaklıkta gıdanın nem içeriği;

- Kendini çevreleyen su buharı ile dengeye gelene kadar değişim gösterir.
- Gıda denge noktasına geldiğinde nem almaz veya nem kaybetmez. Buna gıdanın denge nem içeriği denir.

#### **5.1.1.2 Nem ve kuru madde tayininde dikkat edilmesi gereken hususlar** (Milli

Eğitim Bakanlığı, 2011)

- i. Şekerce zengin ürünler ve yağca zengin etler 70°C'tan fazla sıcaklıkta ve vakumlu fırında kurutulmamalıdır.
- ii. Her gıdanın dekompoze (parçalanmış) olduğu belli bir sıcaklık derecesi vardır. Fruktöz gibi şekerler 70°C'nın üstünde dekompoze olurlar. Şekerlerinde kompoze olması suyun çıkışını engeller.
- iii. Etüv içinde hava akımının olması kurutmanın sağlıklı yapılmasında etkilidir.
  - Etüvün hava deliğini kısmen açarak veya
  - Vakum etüvünde kuru havanın hareketini sağlayarak sirkülasyon meydana getirilmelidir.
- iv. Uçucu bileşiklerce zengin olan baharatlarda etüvde kurutma yöntemi uygun değildir. Toluen damıtma yöntemi kullanılır.
- v. Kurutma sırasında bağıl nem ve absorbe nem uzaklaştırılmaz.
- vi. Sature olmayan (doymamış) yağlarda oluşan oksidasyon kurutma sırasında sıcaklık etkisi ile kuru madde oranının da artırır.

Nem tayini daha çok kurubaklagil, tahıl ve tahıl ürünleri, baharatlar gibi nemi az olan gıdalara uygulanır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

## 5.1.2 Etüvde kuru madde tayini deney düzeneği

### 5.1.2.1 Yöntemin temel prensibi

Gıdalarda nem miktarı, genelde etüvde kurutma yöntemi ile yapılmaktadır. Belli bir sıcaklık altında örnekteki suyun uçurulması ve ağırlık kaybından nem miktarının bulunması ilkesine dayanır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

### 5.1.2.2 Kullanılan araç ve gereçler

- Etüv (Şekil 5.1)
- Vakum pompası (Şekil 5.2)
- Kurutma kabı
- Desikatör (Şekil 5.3)
- Hassas terazi (Şekil 5.4)



Şekil 5.1 Etüv.



Şekil 5.2 Vakum pompası.



Şekil 5.3 Desikatör.



Şekil 5.4 Hassas terazi.

#### **5.1.2.3 Kuru madde tayini deneyinin yapılışı**

Kuru madde tayini TS 3687 standardına göre yapılmıştır. Etüv sıcaklığı, çalışma sıcaklığı olan 70°C'a getirildi. Sıcaklığı kalibre etmek 1 saat kadar sürdü. Ardından istenilen sıcaklığa ulaşıldığında, güneş enerjili kurutucuda kurutulan portakallardan bir dilim hassas terazide tartıldıktan sonra kurutma kabının darası ile beraber not edildi. Daha sonra kurutma kabına konularak etüve yerleştirildi. 2 saat sonra vakum pompası durdurularak etüve yavaşça hava gönderildi ve etüv içi basınç ile dış ortam basıncının eşitlenmesi sağlandı. Daha sonra etüvün kapağı açılarak bir maşa yardımıyla kurutma kabı alınarak ortam havasından nem almaması için desikatöre yerleştirilerek soğuması beklendi. Soğuyan ürün, tekrar bir maşa yardımıyla kurutma kabı ile beraber desikatörden çıkarılıp hassas terazide kütlesi ölçüldü. 2 saatte bir bu işlemler tekrar edildi. İki kütle arasındaki fark azalırken, virgülden sonraki 3 hane sabitleninceye kadar ölçüm alındı.

#### **5.1.2.4 Kuru madde tayini deney sonuçları**

Kuru madde tayini yapılacak ürünün ortalama başlangıç kütlesi, 26,14 g'dır. 12,5 saatlik kurutma işlemi sonrası işlem sonlandırılmış ve yapılan ölçümler neticesinde, ortalama 4,37 g kuru madde elde edilmiştir.

A: Başlangıçta kurutulan ürünün kütlesi = 26,14 g.

Deney sonu:

B: Kuru madde kütlesi = 4,37 g.

#### **5.1.2.5 Rutubet miktarının hesaplanması**

Maddelerin içerdikleri nem değerleri yaş ve kuru madde esasına göre tanımlanır.

$$\text{Nem içeriği (Yaş Madde Esası)} = \frac{\text{Maddenin içerdığı nem kütlesi}}{\text{Kuru madde kütlesi} + \text{maddenin içerdığı nem kütlesi}}$$

$$W_w = 100 \times \frac{m_w}{m_{km} + m_w} \quad (5.1)$$

$$\text{Nem içeriği (Kuru Madde Esası)} = \frac{\text{Maddenin içerdığı nem kütlesi}}{\text{Kuru madde kütlesi}}$$

$$W_d = 100 \times \frac{m_w}{m_{km}} \quad (5.2)$$

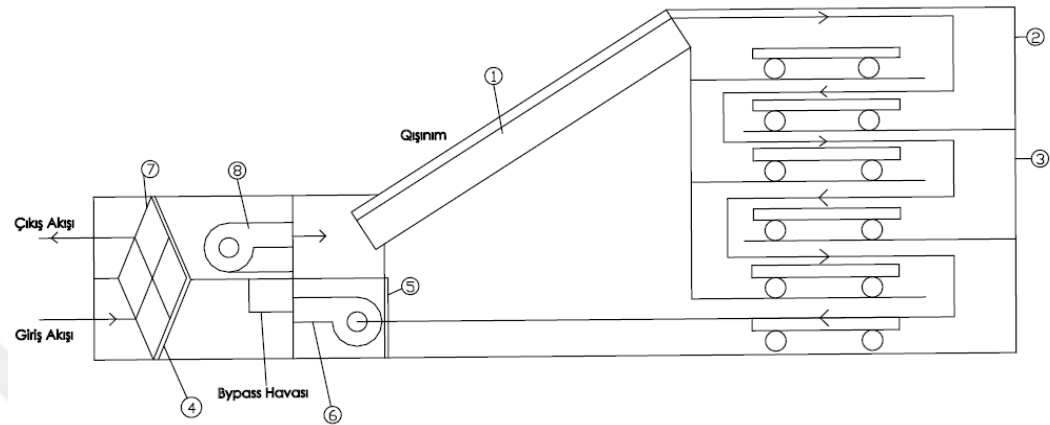
Yaş madde esasına göre nemlilik ile kuru madde esasına göre nemlilik arasında bağıntı aşağıdaki bağıntılar vardır.

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (5.3)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (5.4)$$

## 5.2 Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Sistemi Deney Düzenegi ve Deneyin Yapılışı

Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi şekil 5.5’de görülmektedir.



Şekil 5.5 Kurutma deneyi sisteminin şeması; 1.Güneş toplayıcı, 2.Kurutma çekmecesı, 3.Kurutma kabini, 4.Açılır kapanır panjur, 5.Filtre, 6.Fan, 7. Isı değıştirici, 8.Fan.



Şekil 5.6 Güneş enerjisi destekli kurutucunun önden görünüşü.



Şekil 5.7 Güneş enerjisi destekli kurutucunun arkadan kapakları açık bir şekilde görünüşü.

Daha önce tasarlanıp imalatı yapılan güneş enerjili kurutucu temel olarak; güneş enerjili hava ısıtıcısı, kurutma kabini, hava akışını sağlayan fan sistemi, deney düzeneğinin içerisindeki atık ısı geri kazanım sistemi ve test ünitelerinden oluşmaktadır. Bu sistemde sıcak hava güneş enerjili ısıtıcılar sayesinde elde edilmektedir. Güneş enerjili hava ısıtıcısına gelen ısı, fan yardımıyla kurutma kabineye iletilmekte ve üstten alta doğru dolaşarak sirkülasyon sağlanmaktadır. Kurutma kabini içerisindeki portakalların nemi güneş enerjili hava ısıtıcısından aldığı ısı ile buharlaşarak kurutma havasına karışmaktadır. Bu nedenle nemi artan kurutma havasının zamanla nem alma yeteneği azalacaktır. Bu çalışmada bir miktar dış hava sisteme açılır kapanır panjur yardımı ile karıştırılarak kurutma işlemi sırasında bağıl nemin artması önlenmiştir. Çevre havası bağıl nemi düşük olan bölgelerde, kurutma işlemi ile birlikte bağıl nemi yükselen havanın dışarı atılması ya da içerisindeki nemin soğuk yüzeyde yoğunlaştırılması yerine kontrollü olarak çevre havası ile karıştırılan sistem havası, kurutma sırasında bağıl nemin istenen değerlerde olmasını sağlayacaktır. Kurutma işlemi devam ederken hassas terazi ile kabin içindeki raftan ve açık sergiden alınan portakal dilimi numunelerinin ağırlıkları yarım saatte bir ölçülerek ağırlık değişimleri gözlemlenmektedir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki giriş ve çıkış sıcaklıkları, kurutma kabini içerisindeki bağıl nem, dış hava sıcaklığı ve dış havanın bağıl nemi de 30 dakikada bir ölçülmüştür.

### 5.2.1 Güneş Toplayıcı Sistem

Güneş enerjili hava ısıtıcısında yutucu yüzey olarak kanatlı alüminyum levha kullanılmıştır. Yutucu yüzey, seçici boya ile boyanarak yutma özelliği iyileştirilmiştir. Çalışma akışkanı hava, kanatların olduğu kanaldan geçirilmektedir. Hava kanalının alt yüzeyi polistiren ile yalıtılmıştır. Yutucu yüzeyin üst kısmında çift tabaka halinde polikarbon geçirgen örtü kullanılmıştır. Sistemin tamamı polimer malzemeden yapılmış kasa için alınmıştır. Kurutma kabineye iki adet güneş enerjili hava ısıtıcısı bağlanmıştır. Yutucu yüzeyin alanı  $4 \text{ m}^2$ 'dir.

### 5.2.2 Kurutma Kabini

Daha önce tasarımı ve imalatı tamamlanmış bu deney düzeneğinde portakal kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma kabininin temel malzemesi olarak izoboard kullanılmıştır. Taşıyıcı çerçeve malzemesi olarak da alüminyum malzeme kullanılmıştır. Kurutma kabininin içerisi bölmeler halinde olup raflar bu bölmelere yerleştirilmiştir. Hava sirkülasyonu bu bölmelerin içerisinde gerçekleşmektedir. Kabinin arkasında bulunan kapılar sayesinde ürünlerin yerleştirilip çıkarılması sağlanmaktadır.

### 5.2.3 Ölçüm ve Test Cihazları

Bu çalışma kapsamında kullanılan ölçüm ve test cihazları sırasıyla, datalogger (Şekil 5.8), bağıl nem ölçüm sensörü (Şekil 5.9), thermocouple Şekil 5.10), piranometre (Şekil 5.11) ve hassas terazidir (Şekil 5.12). Güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin performans analizi ve deney sonuçlarının elde edilmesi için bu cihazlar kullanılmıştır. Datalogger ölçümlerin yapılıp kaydedilmesinde kullandığımız cihazdır. Bağıl nem ölçüm sensörü; bir adet dışarıda, bir adet içeride olmak üzere hem dış hava hem de kurutma kabini içerisindeki bağıl nemin ölçümü için kullanılmıştır. Thermocouple, dış hava sıcaklığının ölçülmesinde kullanılmıştır. Piranometre ise güneş ışıını değeriinin ölçölüp kaydedilmesinde işimize yaramıştır.



Şekil 5.8 Datalogger.



Şekil 5.9 Bağıl nem ölçüm sensörü.



Şekil 5.10 Thermocouple ve datalogger güç kaynağı.



Şekil 5.11 Piranometre.



Şekil 5.12 Hassas terazi.

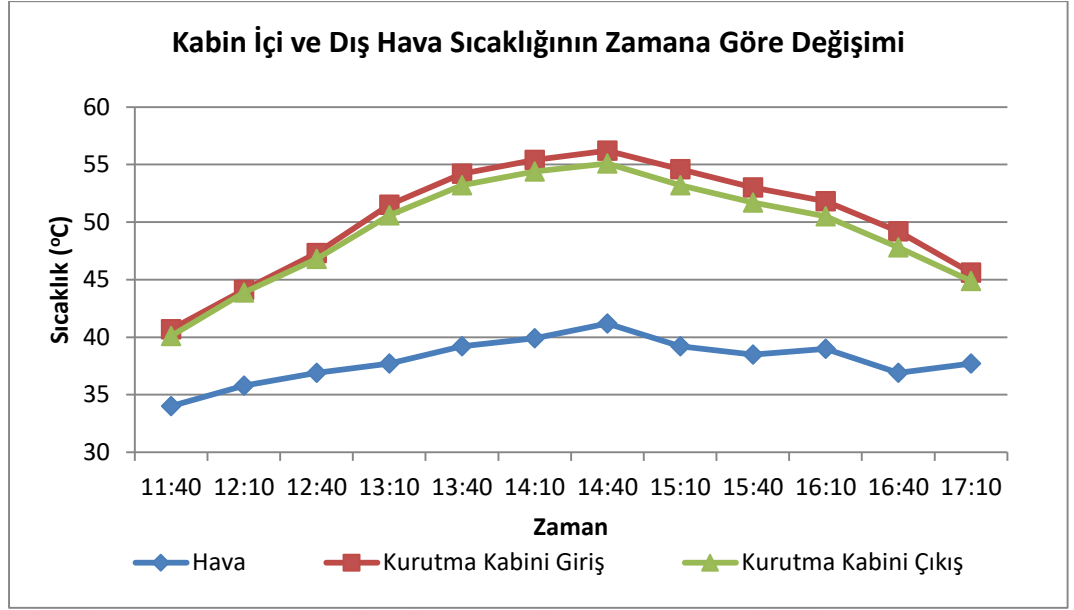
## 6. DENEY SONUÇLARI

Deneylerde kurutma ürünü olarak portakal kullanılmıştır. Portakallar deneylerden birer gün önce manavdan alınmış olup buzdolabında saklanmıştır. Deneyden önce portakallar yıkanıp ince dilimler haline getirilmiştir. Portakalların kurutulması için miktara göre bazen 2 bazen 1 raf kullanılmıştır. Toplamda yaklaşık 4,5 kg portakal kurutulmuştur. İnce dilimler halinde kesilen portakallar güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde kurutulmuş olup dilimler kurutma öncesi ve sonrası tartılmıştır. Aynı zamanda açık havada kurutulan portakallar da kurutma öncesi ve sonrası tartılarak kurutma makinesinde kurutulan portakalların kurutma sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır. Ölçümü yapılacak numunelerin tespiti için tel raflar kullanılmıştır. Bu raflar sayesinde numunelerin 30 dakikada bir ağırlık değişimlerinin ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerin amacı numunelerdeki nem miktarının değişiminin saptanmasıdır.

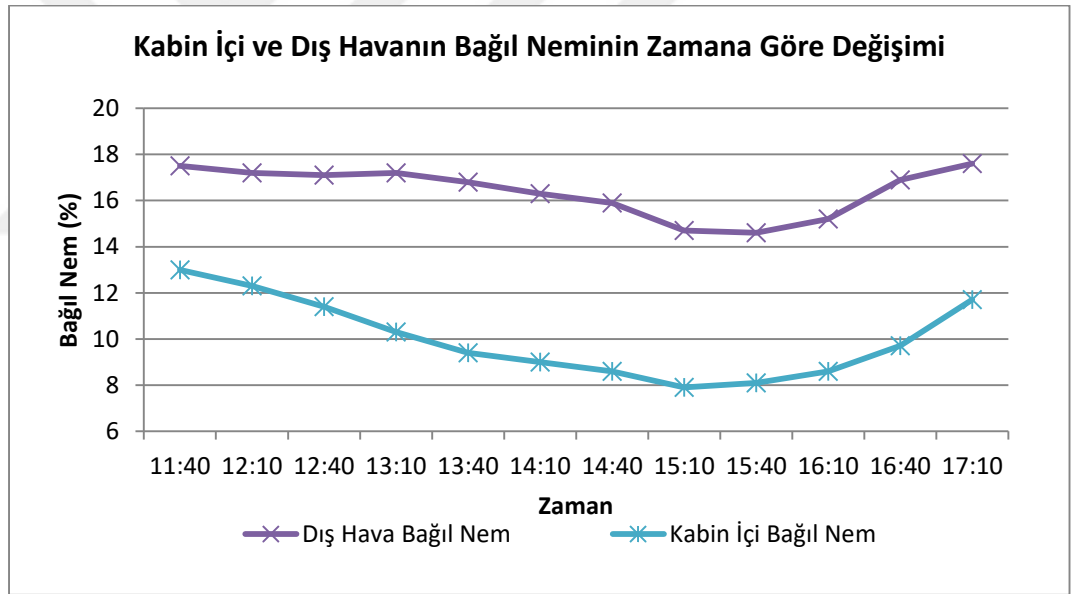
### 6.1 Kurutma Deneyi Sonuçları

#### 6.1.1 Birinci grup kurutma deneyi (Birinci gün)

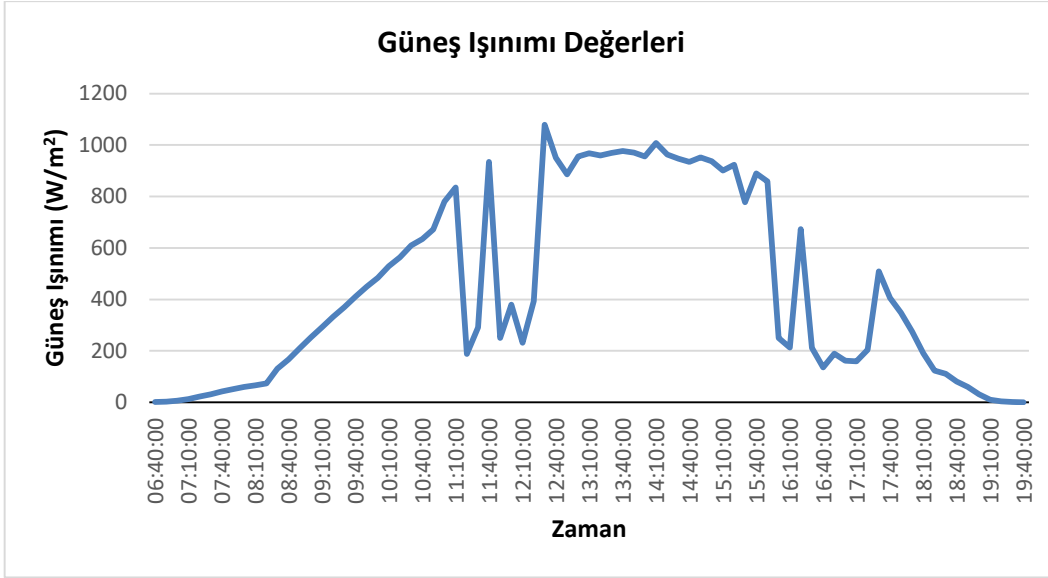
İlk kurutma deneyi için 630 gr portakal dilimlerine ayrılıp, atıklarından ayrıştırıldıktan sonra kurutulmak üzere kurutma kabiniinde tek bir raf üzerine ince dilimler halinde yerleştirilmiştir. Aynı zamanda açık havada güneşle kurutulmak üzere 6 dilim portakal işaretli tel raf üzerine ince dilimler halinde yerleştirilmiştir. İlk günlük kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık, kurutma kabini girişi tarafında maksimum 56,2°C olarak gözlemlenmiştir. Kurutulacak yaş ürün az olduğu için içerideki nem oranı çok yüksek olmamıştır. Bu sebeple bypass bacası gün boyunca açılmamıştır. Gün sonunda raflara serilen 630 gr yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 523 gr'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 147,45 g'dan 98,1 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 127,86 g'dan 85,95 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışıması değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



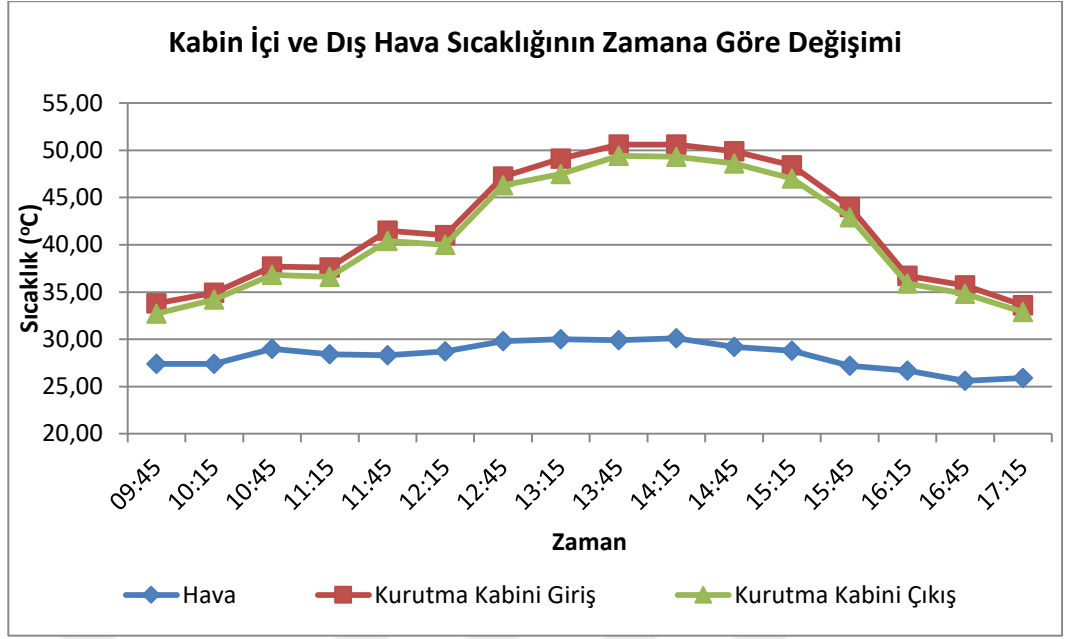
Şekil 6.2 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



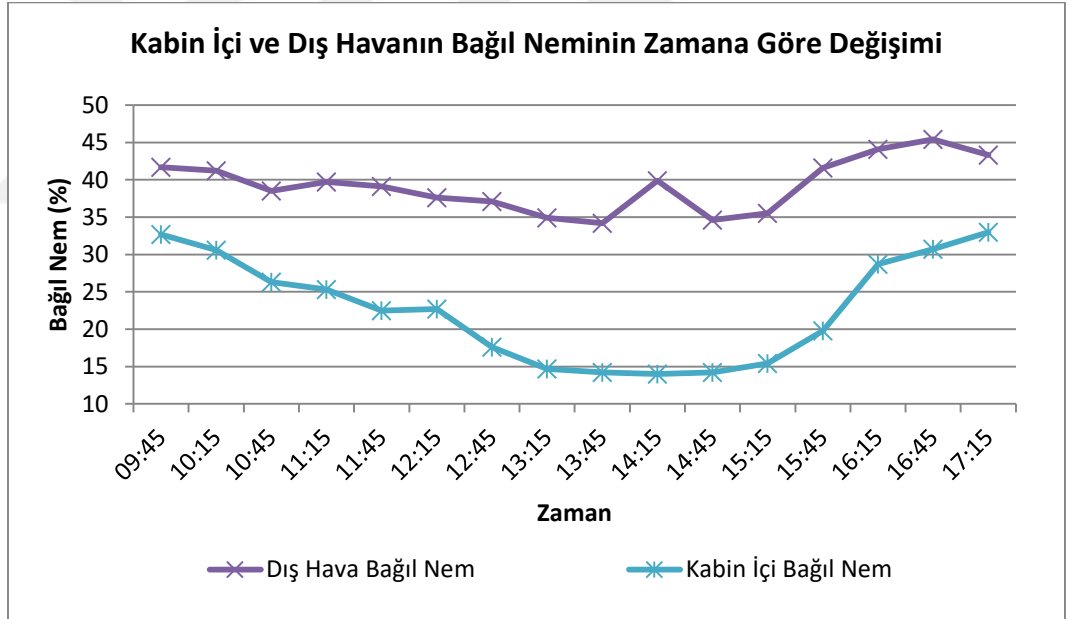
Şekil 6.3 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

### 6.1.2 Birinci grup kurutma deneyi (İkinci gün)

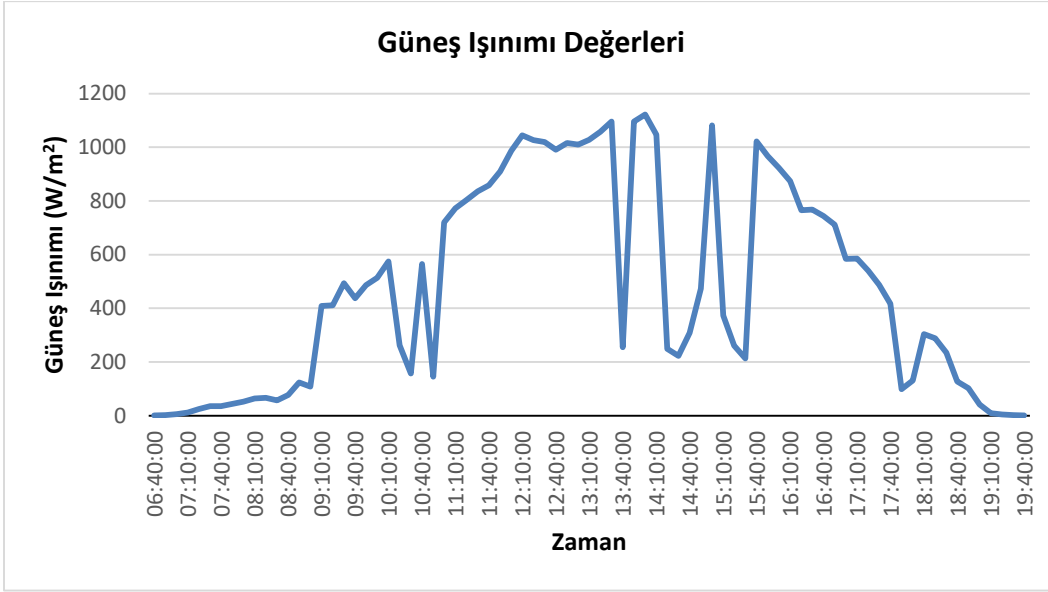
Kurutmanın ikinci gününde de ilk kullanılan ürünlerin kurutulması işlemine devam edilmiştir. İkinci kurutma gününde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık, kurutma kabini girişi tarafında maksimum 50,6 °C olarak gözlemlenmiştir. Kurutma kabini içerisindeki bağıl nem miktarı yine az olduğundan bypass bacası gün boyunca açılmamıştır. Sabah kütleleri ölçülen 493,64 gr portakal, gün sonunda kaybettikleri nem sonucu toplam 477,32 gr'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 93,72 g'dan 83,98 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 80,74 g'dan 74,16 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.4 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



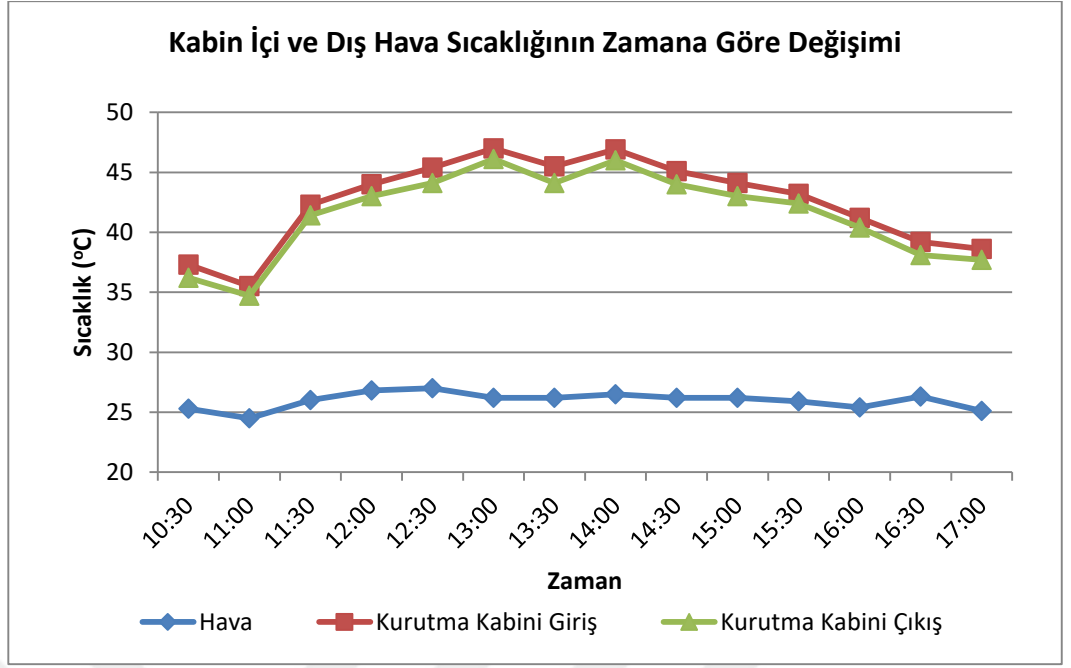
Şekil 6.5 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



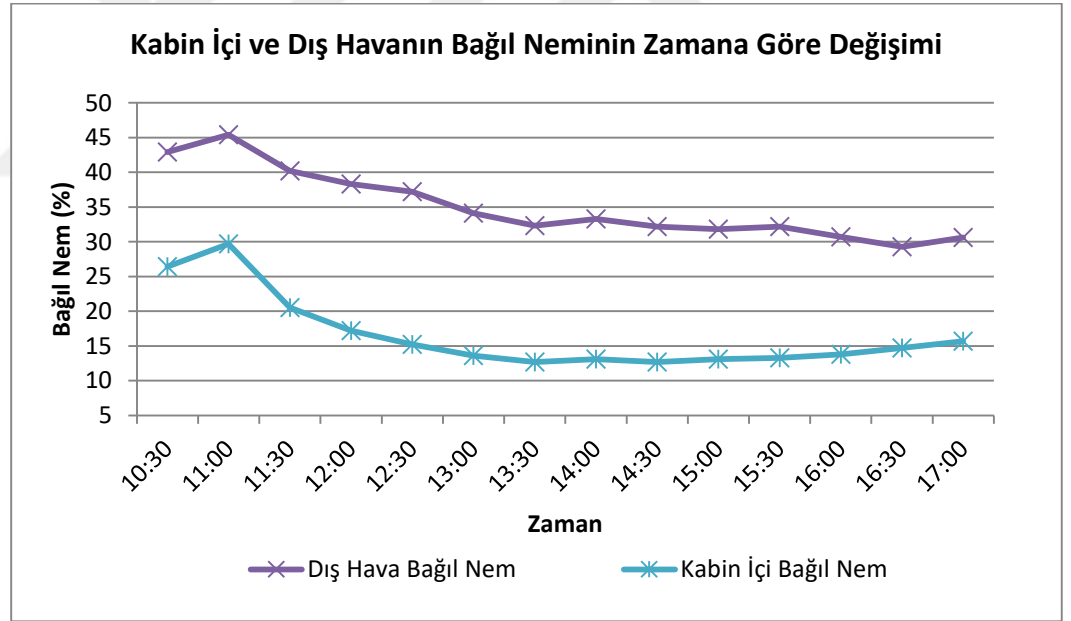
Şekil 6.6 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

### 6.1.3 Birinci grup kurutma deneyi (Üçüncü gün)

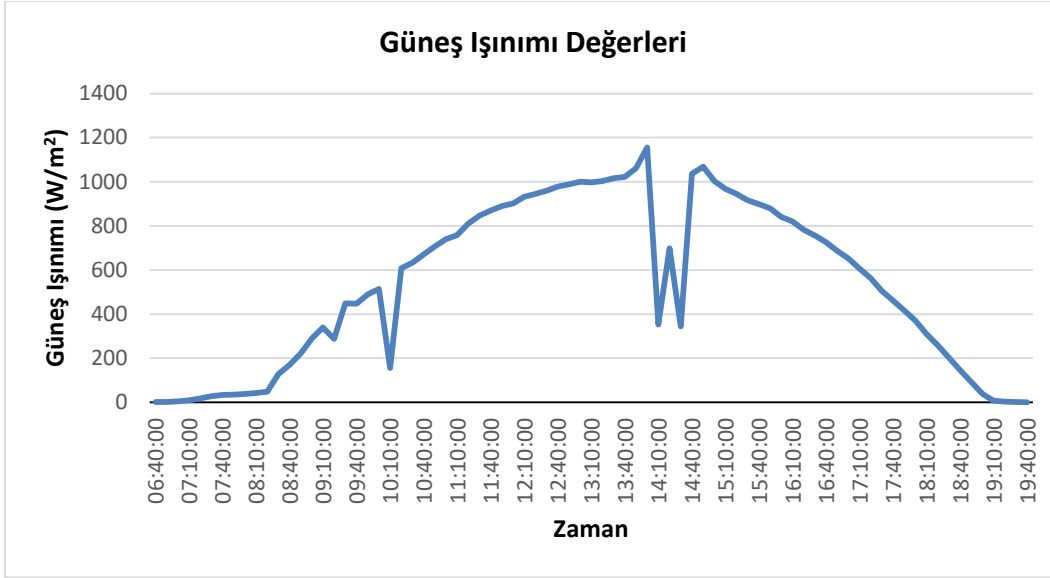
İlk numuneler için kurutmanın üçüncü ve son gününde ürünlerin kurutulması işlemine devam edilmiştir. Üçüncü kurutma gününde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık, kurutma kabini girişi tarafında maksimum 46,9 °C olarak ölçülmüştür. Kurutma kabini içerisindeki bağıl nem miktarı az ürün dolayısıyla düşük olduğundan bypass bacası gün boyunca açılmamıştır. Sabah kütleleri ölçülen 436,79 gr portakal, gün sonunda kaybettikleri nem sonucu toplam 390,7 gr'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 80,54 g'dan 73,58 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 73,32 g'dan 69,43 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.7 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



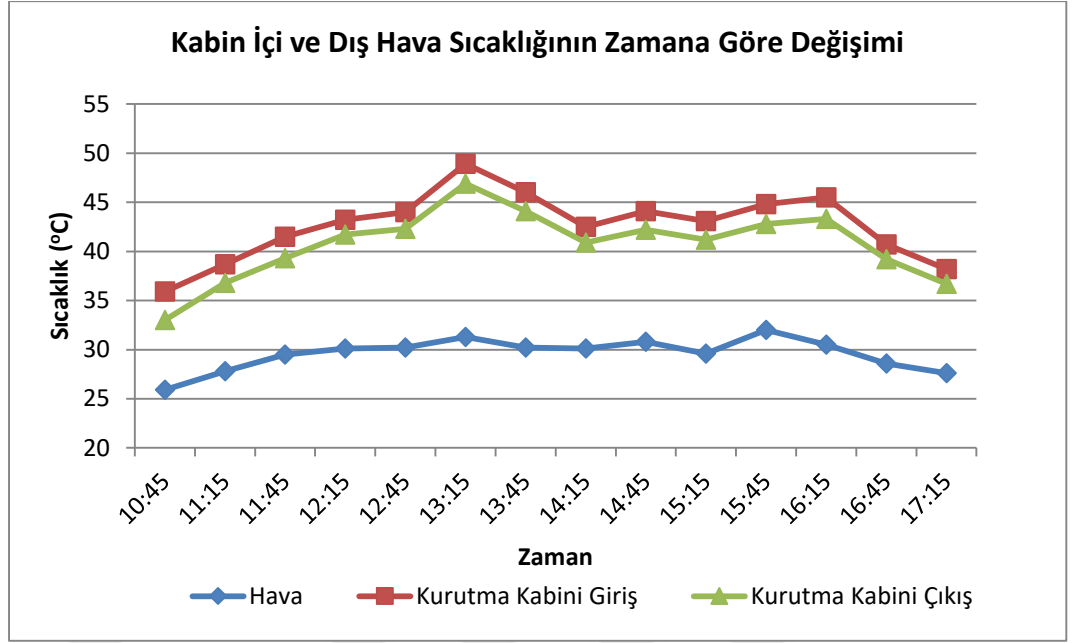
Şekil 6.8 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



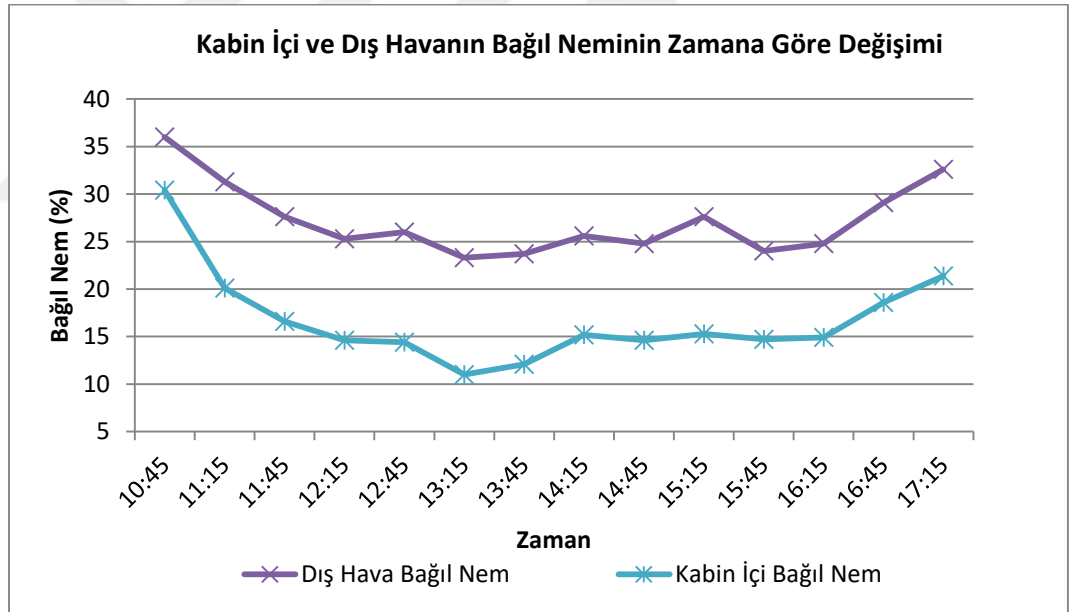
Şekil 6.9 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

#### 6.1.4 İkinci grup kurutma deneyi (Birinci gün)

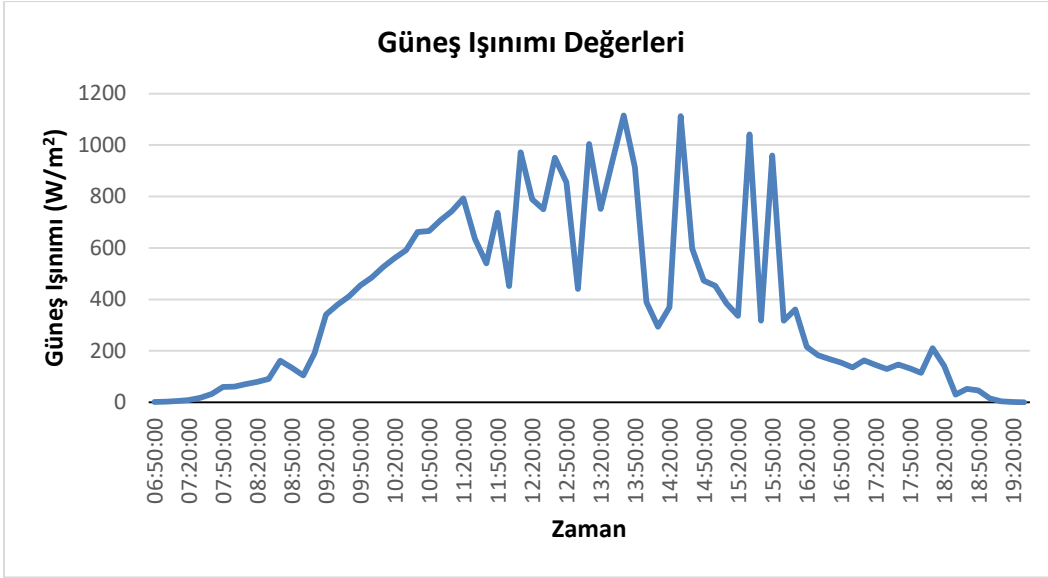
Kurutma deneylerinin 4. gününde 840,55 portakal ile deneye başlanmıştır. Daha sonra portakal dilimleri kurutulmak üzere kurutma kabiniinde tek bir raf üzerine ince dilimler halinde yerleştirilmiştir. Aynı zamanda açık havada güneşle kurutulmak üzere 6 dilim portakal işaretli tel raf üzerine ince dilimler halinde yerleştirilmiştir. 4. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık, havanın bulutlu olması nedeniyle kurutma kabini girişi tarafında maksimum 48,9°C olarak ölçülüp bu değerin üzerine çıkamamıştır. Kurutulacak yaş ürün az olduğu için içerideki nem oranı çok yüksek olmamıştır. Bu sebeple bypass bacası gün boyunca kullanıma alınmamıştır. Gün sonunda raflara serilen 840,55 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 696,5 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 89,65 g'dan 56,72 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 90,86 g'dan 59,03 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.10 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



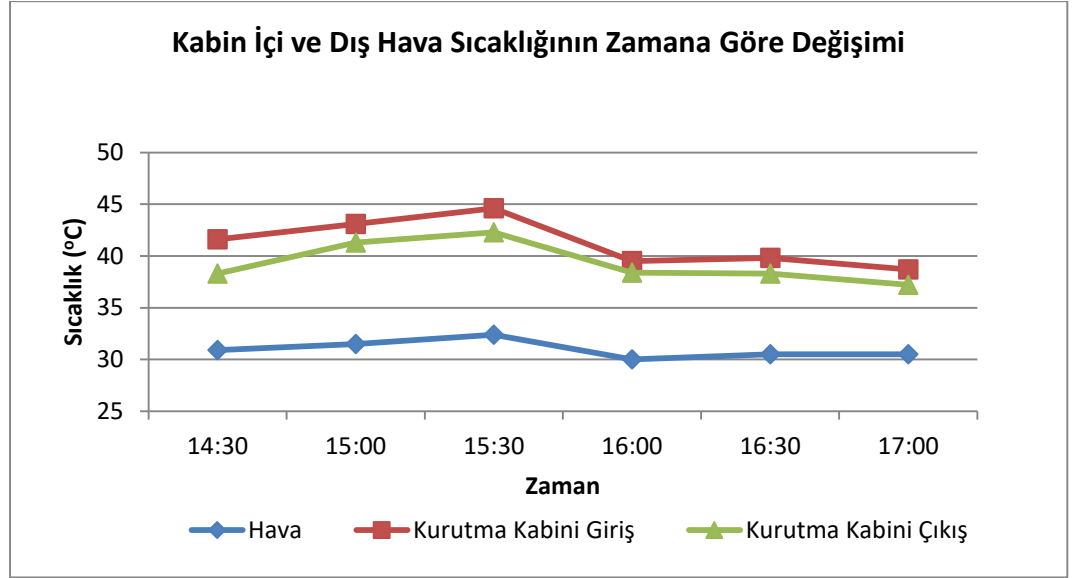
Şekil 6.11 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



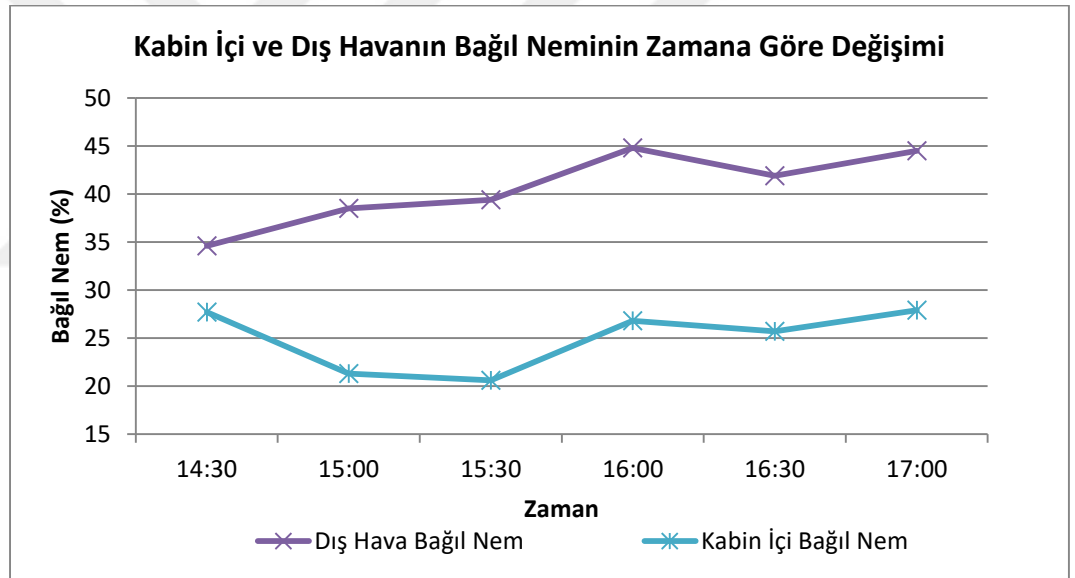
Şekil 6.12 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağlı değişimi.

### 6.1.5 İkinci grup kurutma deneyi (İkinci gün)

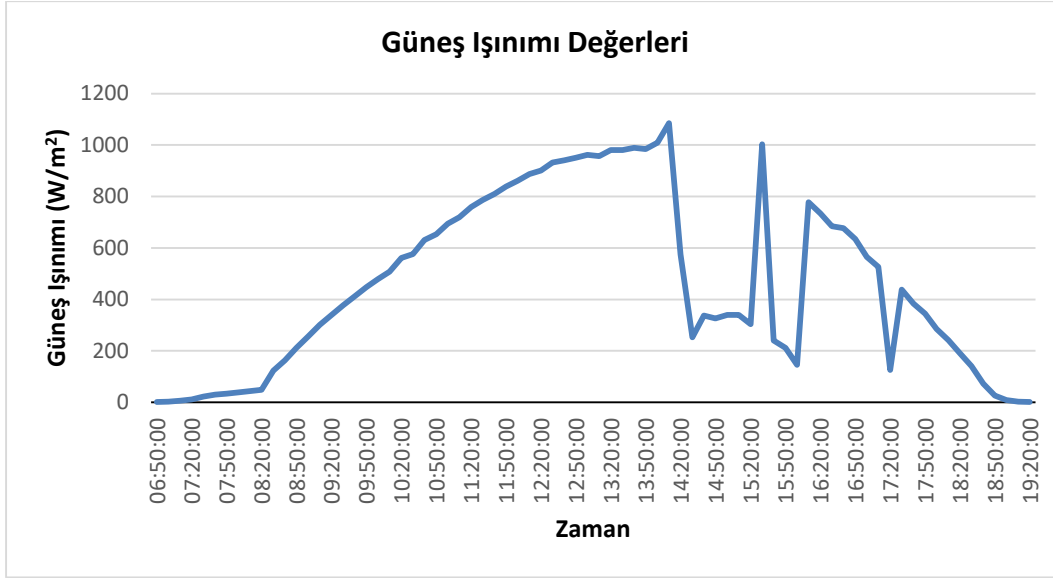
Kurutma deneylerinin 5. gününde kurutma işlemine kalan 693,97 g ürünle devam edilmiştir. 5. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık, kurutma kabini girişi tarafında maksimum 44,6 °C olarak ölçülmüştür. Kurutulacak yaş ürün az olduğu için içerideki nem oranı çok yüksek olmamıştır. Bu sebeple bypass bacası gün boyunca kullanıma alınmamıştır. Gün sonunda raflara serilen 693,97 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 672,56 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 51,08 g'dan 49,55 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 52,7 g'dan 51,52 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışıınımı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de verilmiştir.



Şekil 6.13 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



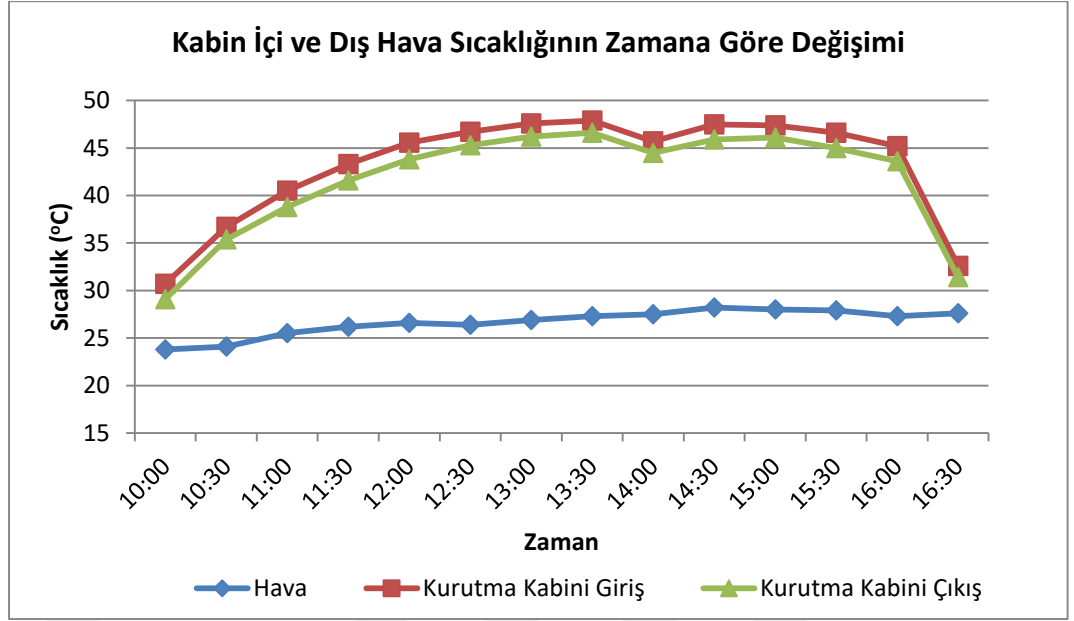
Şekil 6.14 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



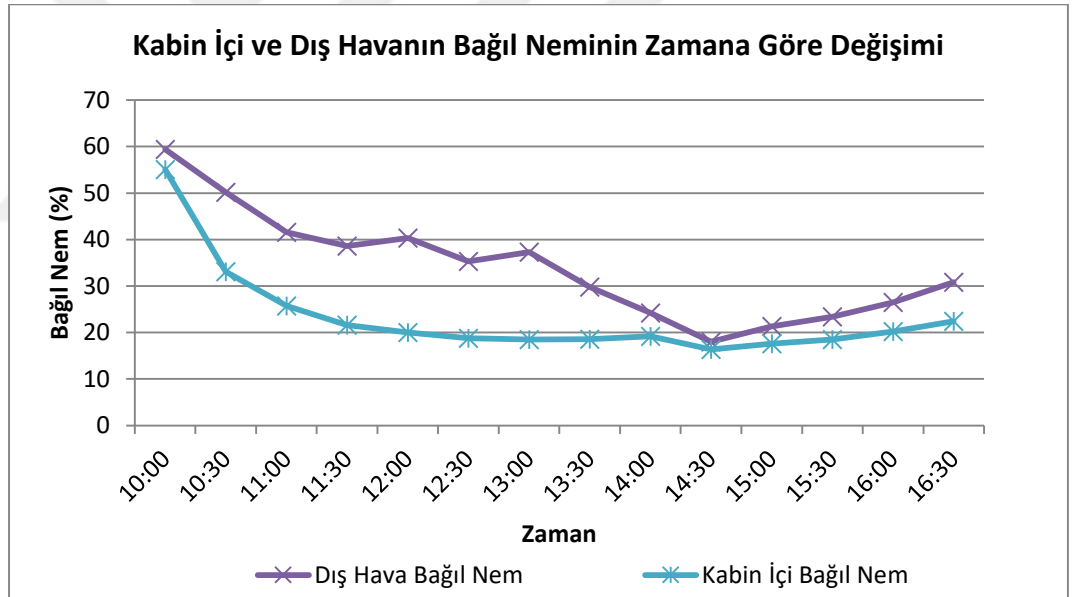
Şekil 6.15 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

#### 6.1.6 İkinci grup kurutma deneyi (Üçüncü gün)

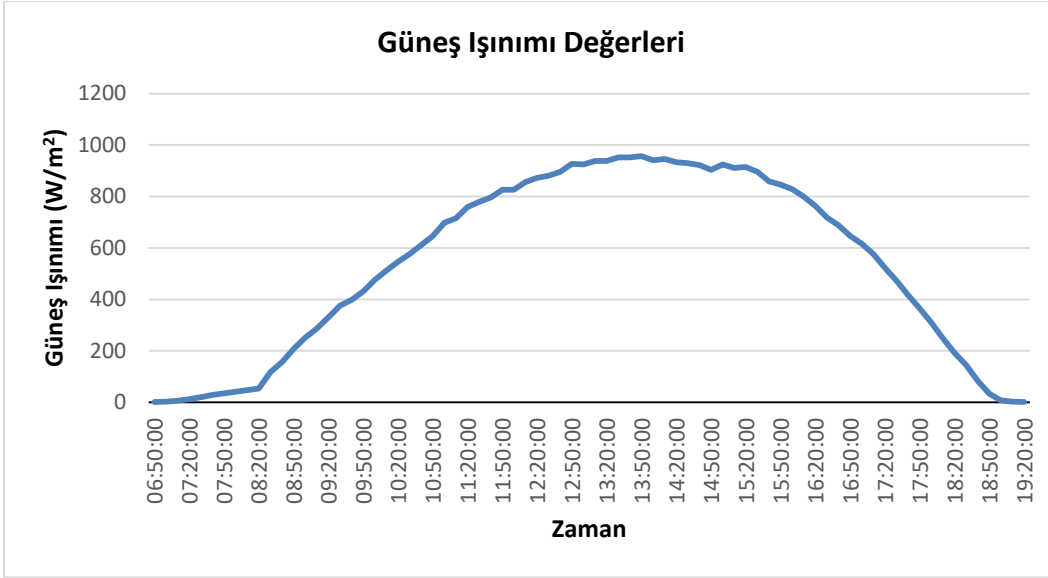
Kurutma deneylerinin 6. gününde ikinci numunelerin kurutma işlemine kalan 672,19 g ürünle devam edilmiştir. 6. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık havanın bir önceki güne göre daha açık olması sebebiyle, kurutma kabini girişi tarafında maksimum 47,9°C olarak ölçülmüştür. Kurutulacak yaş ürün az olduğu için içerideki nem oranı çok yüksek olmamıştır. Bu sebeple bypass bacası gün boyunca kullanıma alınmamıştır. Gün sonunda raflara serilen 672,19 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 586,06 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 49,45 g'dan 43,31 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 51,49 g'dan 47,66 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.16 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



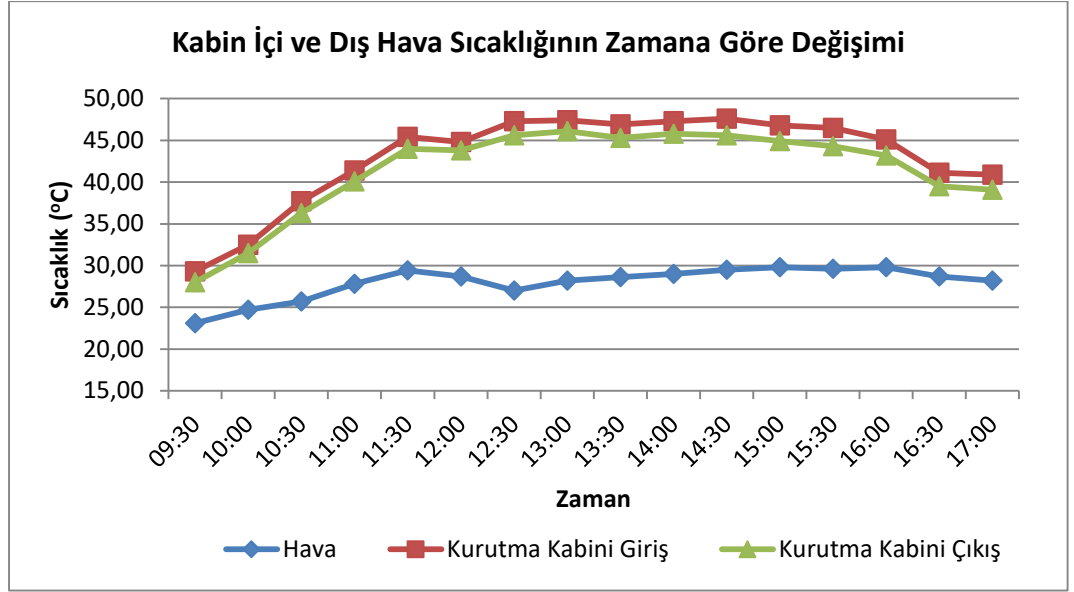
Şekil 6.17 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



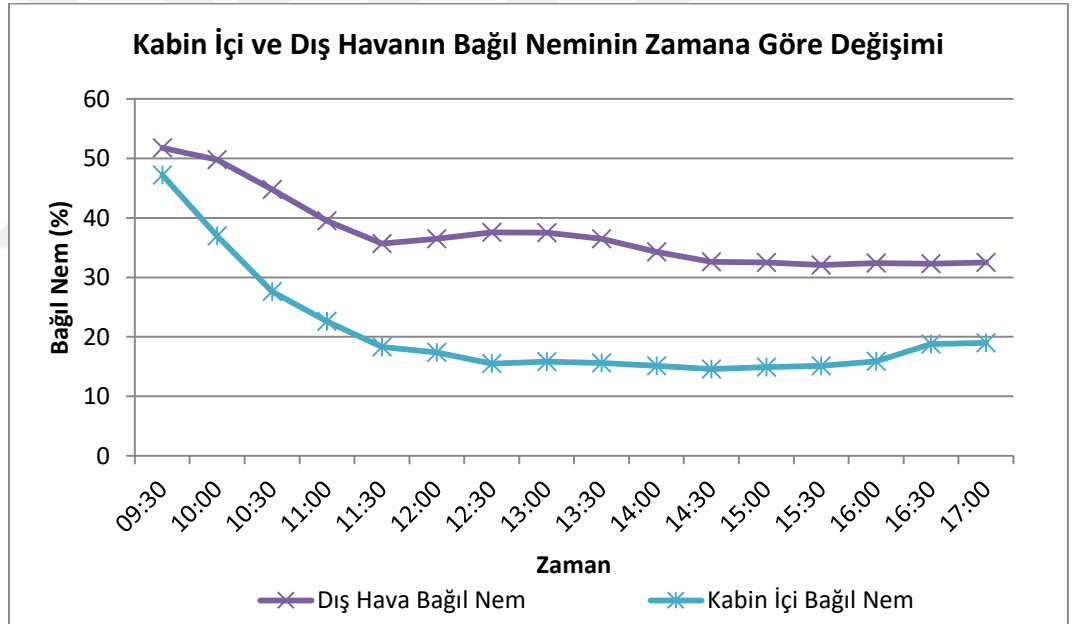
Şekil 6.18 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağlı değişimi.

#### 6.1.7 İkinci grup kurutma deneyi (Dördüncü gün)

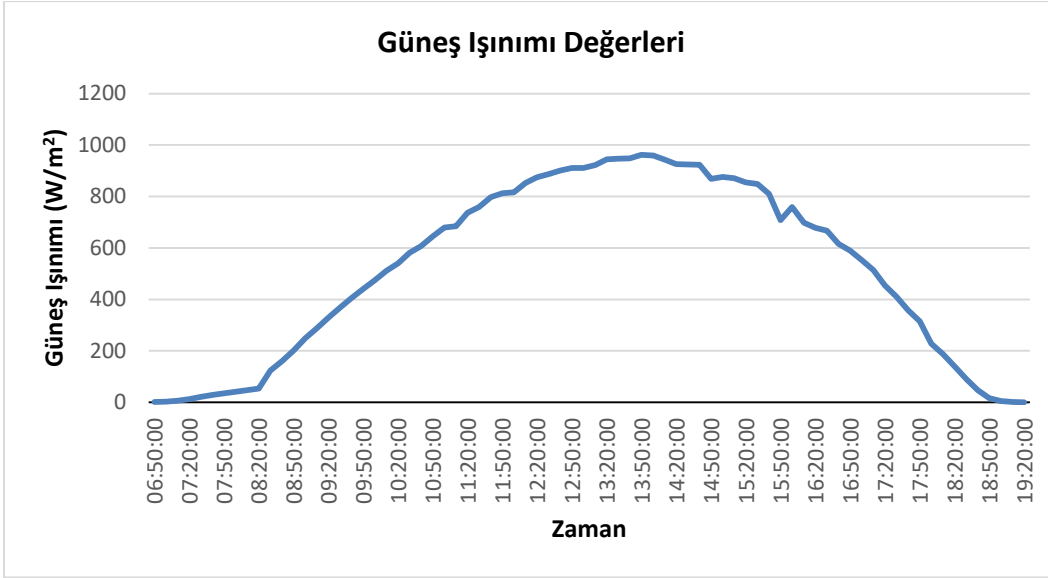
Kurutma deneylerinin 7. gününde ikinci numunelerin kurutma işlemine kalan 588,29 g ürünle devam edilmiştir. 7. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık kurutma kabini girişi tarafında maksimum 47,6 °C olarak ölçülmüştür. Kurutulacak yaş ürün az olduğu için içerideki nem oranı çok yüksek olmamıştır. Bu sebeple bypass bacası gün boyunca kullanıma alınmamıştır. Gün sonunda raflara serilen 588,29 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 507,03 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 43,45 g'dan 37,48 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 47,76 g'dan 44,19 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışıınımı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.19, Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.19 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



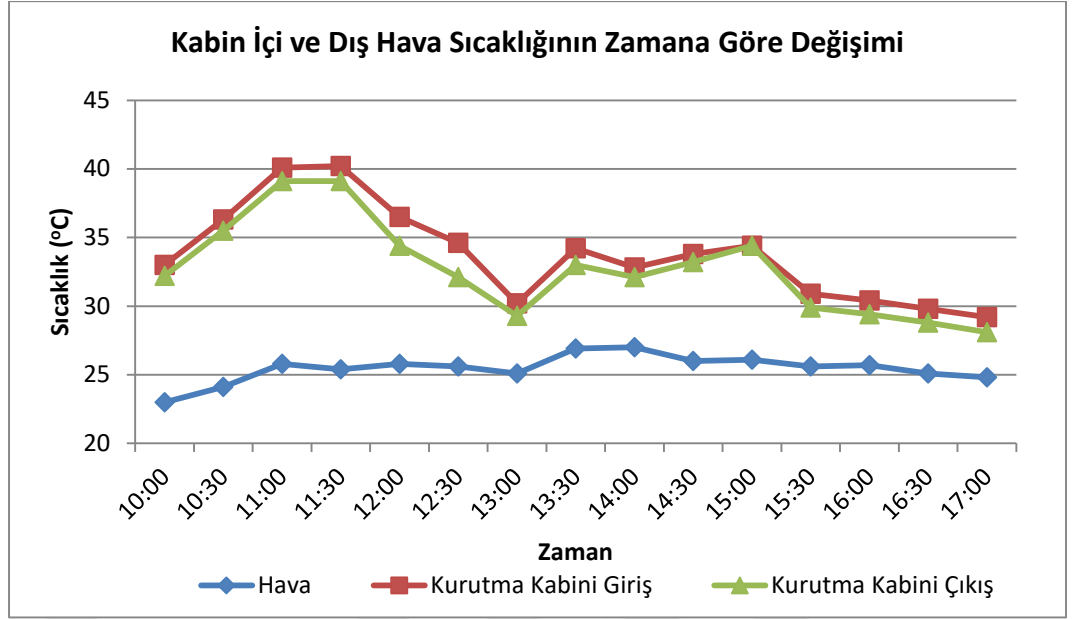
Şekil 6.20 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



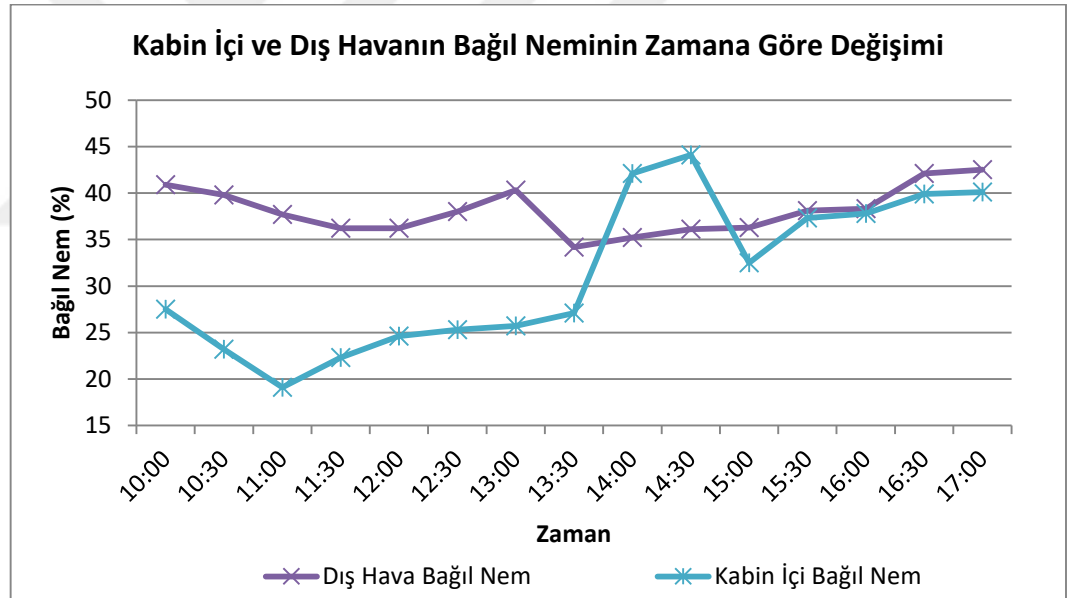
Şekil 6.21 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

### 6.1.8 İkinci grup kurutma deneyi (Beşinci gün)

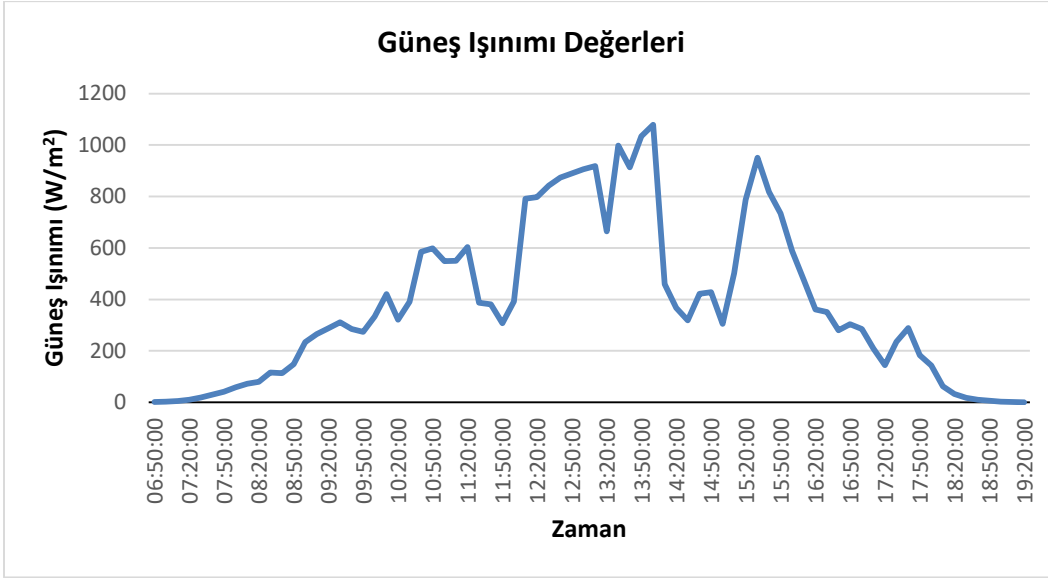
Kurutma deneylerinin 8. ikinci numuneler için son kurutma gününde kurutma işlemine kalan 486,48 g ürünle devam edilmiştir. 8. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık havanın yoğun bulutlu olmasından dolayı kurutma kabini girişi tarafında maksimum 40,2°C gibi oldukça düşük bir değer ölçülmüştür. Kurutma makinesinde deney dışında başka ürünler de kurutulmak üzere eklendiği için yaş ürün miktarı artmıştır. Bu sebeple kurutucu içerisindeki nem miktarı artmıştır. Bunu önlemek amacıyla gün içinde bypass bacası aralıklarla açılıp kapanmıştır. Gün sonunda raflara serilen 486,48 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 459,73 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 36,16 g'dan 34,81 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 43,71 g'dan 42,14 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'de verilmiştir.



Şekil 6.22 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



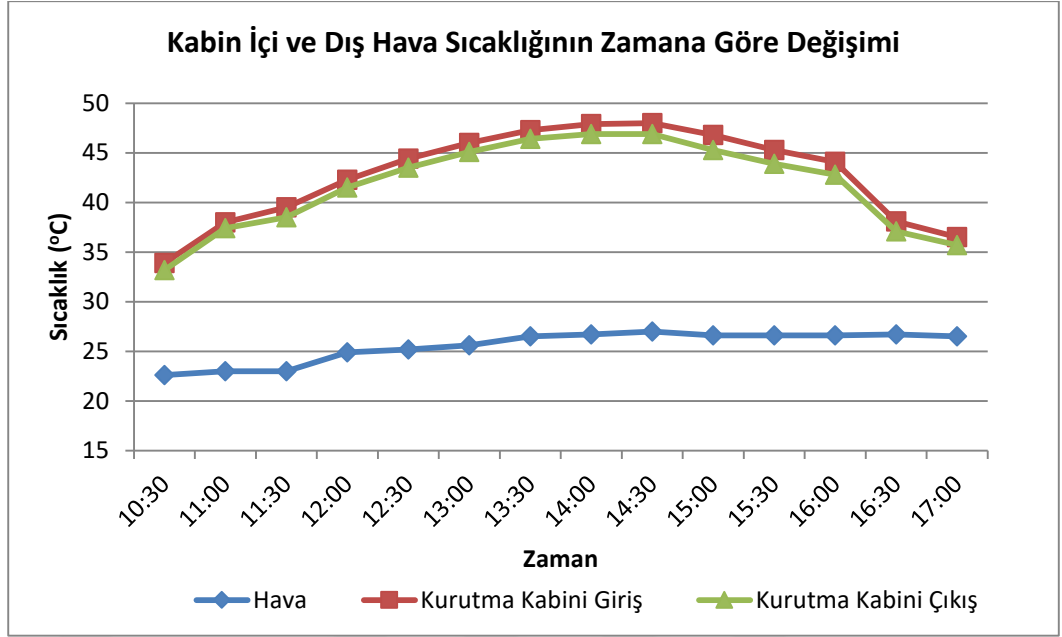
Şekil 6.23 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



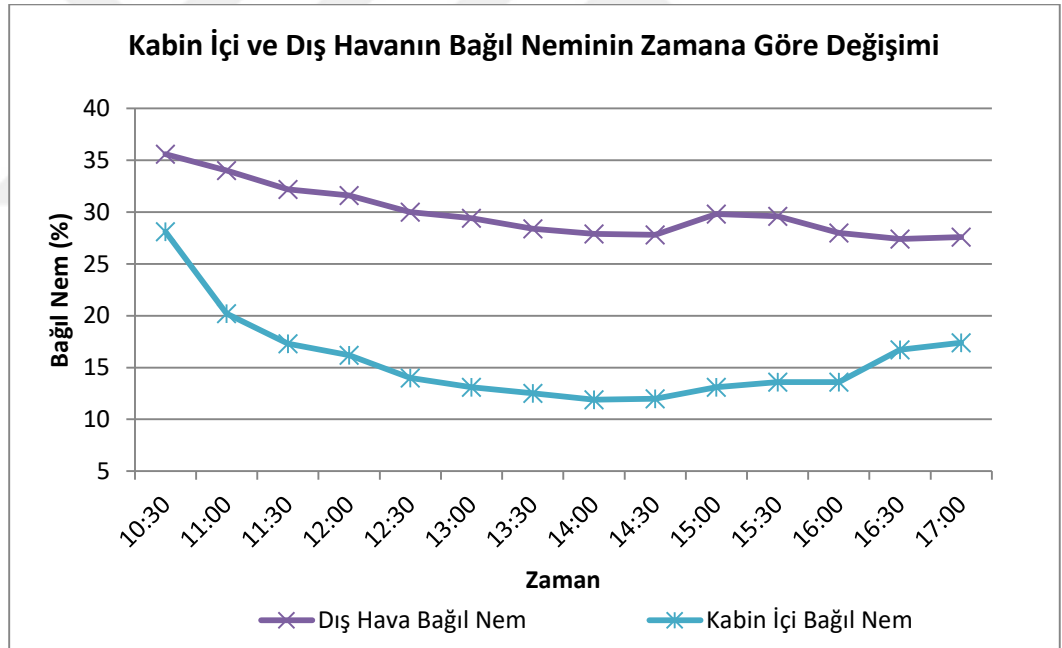
Şekil 6.24 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağlı değişimi.

### 6.1.9 Üçüncü grup kurutma deneyi (Birinci gün)

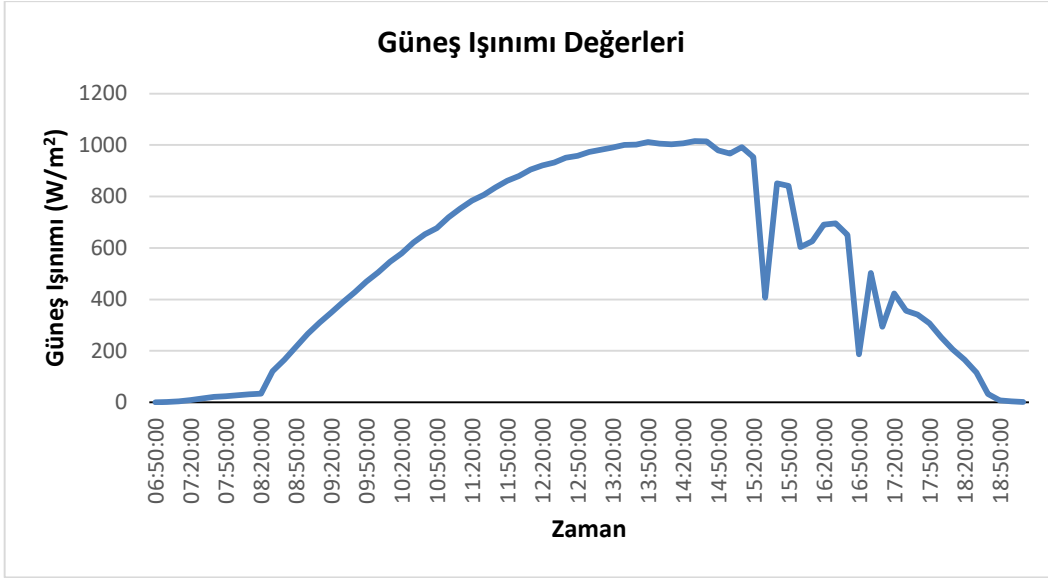
Kurutma deneylerinin 9. gününde üçüncü numunelerin kurutma işlemine 1090,01 g portakal ile başlanmıştır. 9. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık 47,9 °C olarak ölçülmüştür. Kurutma makinesinde deney dışında başka ürünler de kurutulmak üzere eklendiği için yaş ürün miktarı artmıştır. Bu sebeple kurutucu içerisindeki nem miktarı artmıştır. Bunu önlemek amacıyla gün içinde bypass bacası aralıklarla açılıp kapanmıştır. Bypass bacasının sürekli açık bırakılmamasının nedeni ise kurutma kabini sıcaklığının düşmesidir. Gün sonunda raflara serilen 1090,01 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 619,56 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 94,43 g'dan 47,72 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 115,08 g'dan 70,52 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışıınımı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.25 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



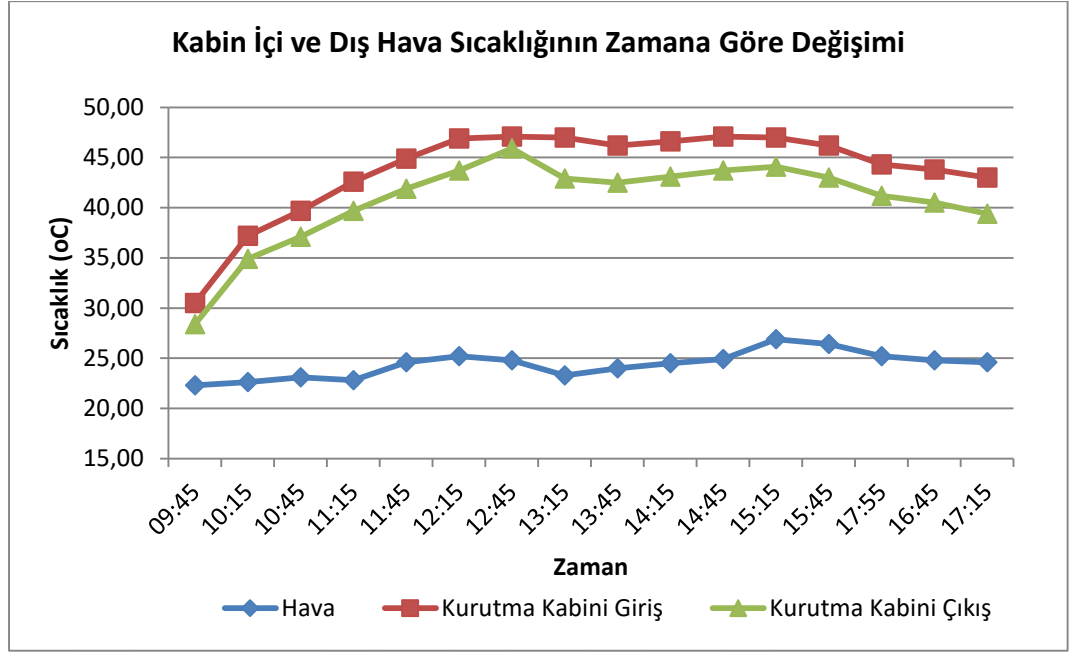
Şekil 6.26 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



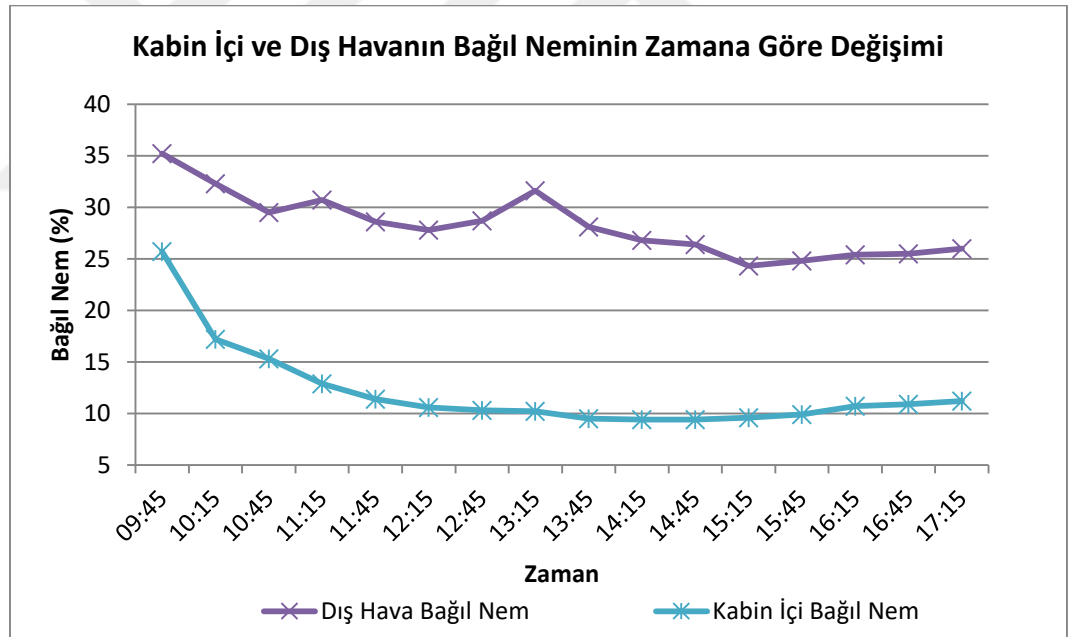
Şekil 6.27 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

#### 6.1.10 Üçüncü grup kurutma deneyi (İkinci gün)

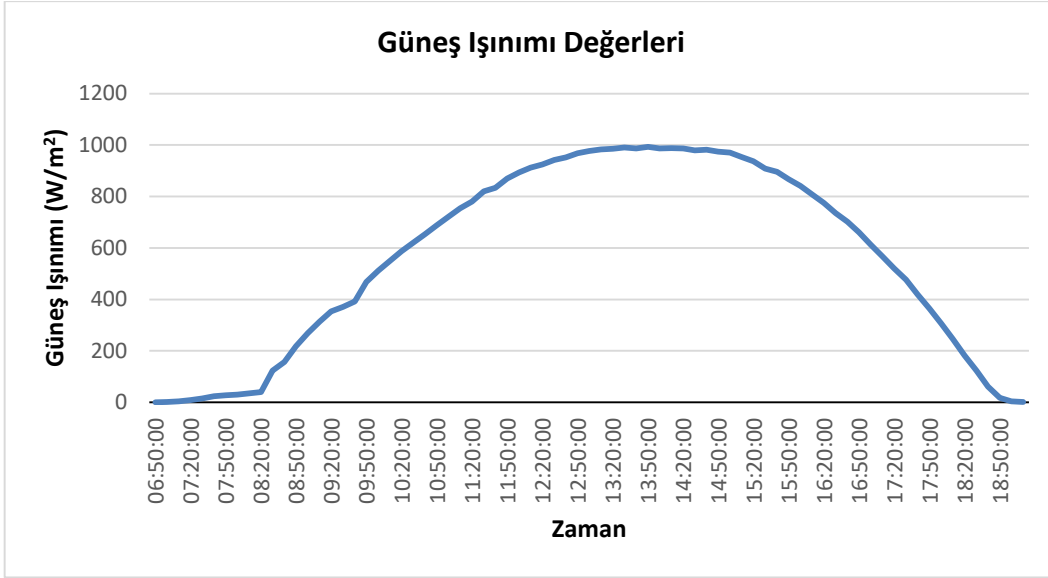
Kurutma deneylerinin 10. gününde üçüncü numunelerin kurutma işlemine kalan 548,85 g ürünle devam edilmiştir. 10. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık kurutma kabini girişi tarafında maksimum 47,1 °C olarak ölçülmüştür. Kurutma makinesinde deney dışında başka ürünler de kurutulmaya devam ettiği için kabin içerisindeki nem miktarı artacağından, bypass bacası gün içerisinde açılıp kapatılarak kabin içerisindeki bağıl nem düşük tutulmuştur. Gün sonunda raflara serilen 548,85 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 487,9 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 44,32 g'dan 37,93 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 63,75 g'dan 58,77 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.28, Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.28 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



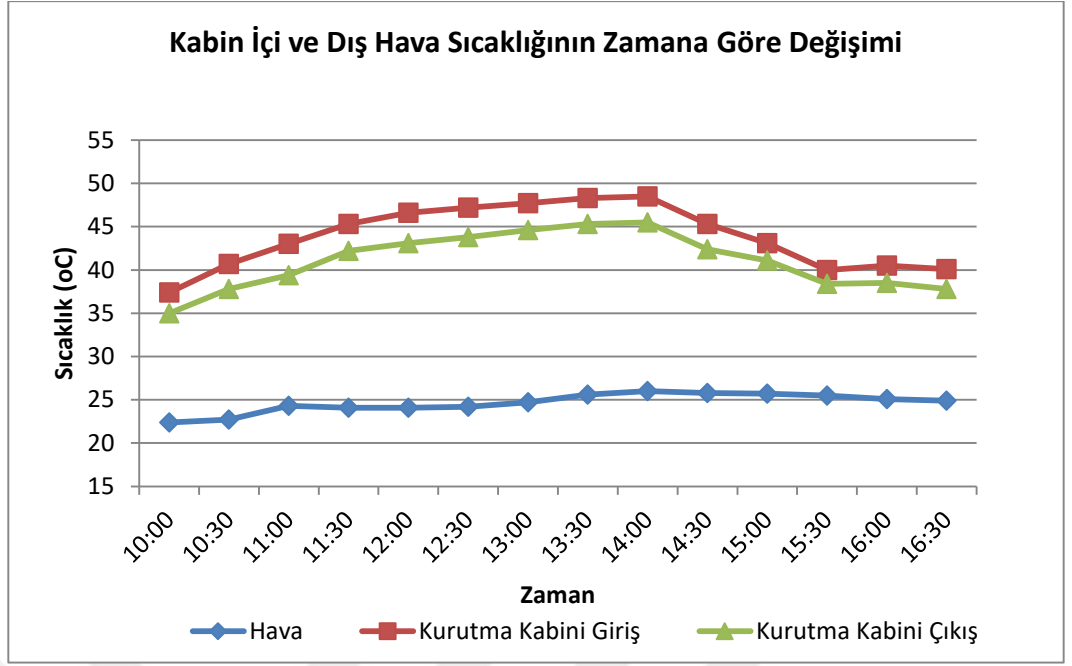
Şekil 6.29 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



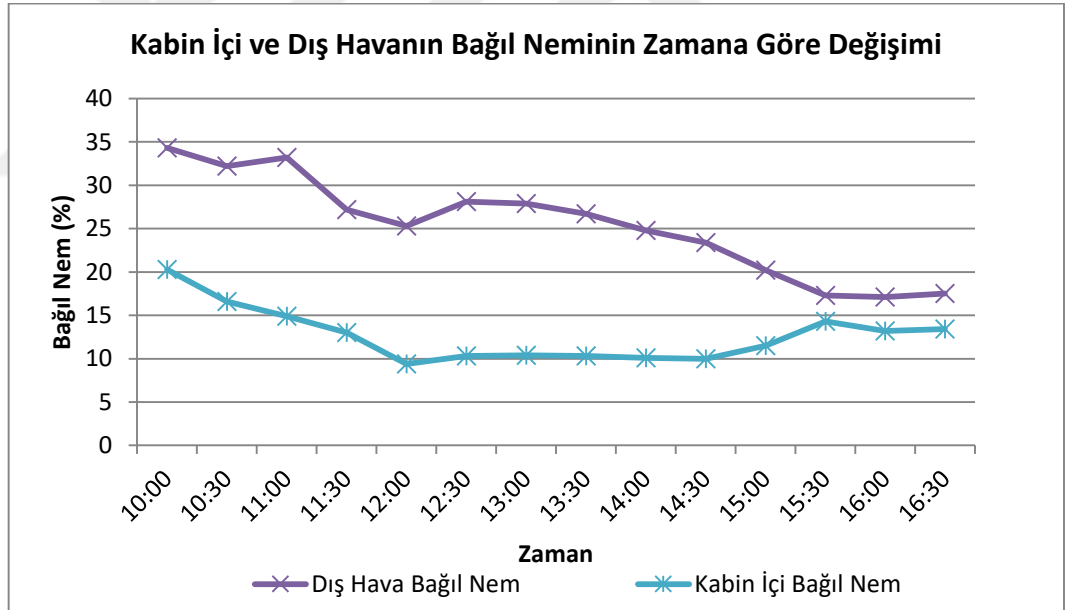
Şekil 6.30 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

#### 6.1.11 Üçüncü grup kurutma deneyi (Üçüncü gün)

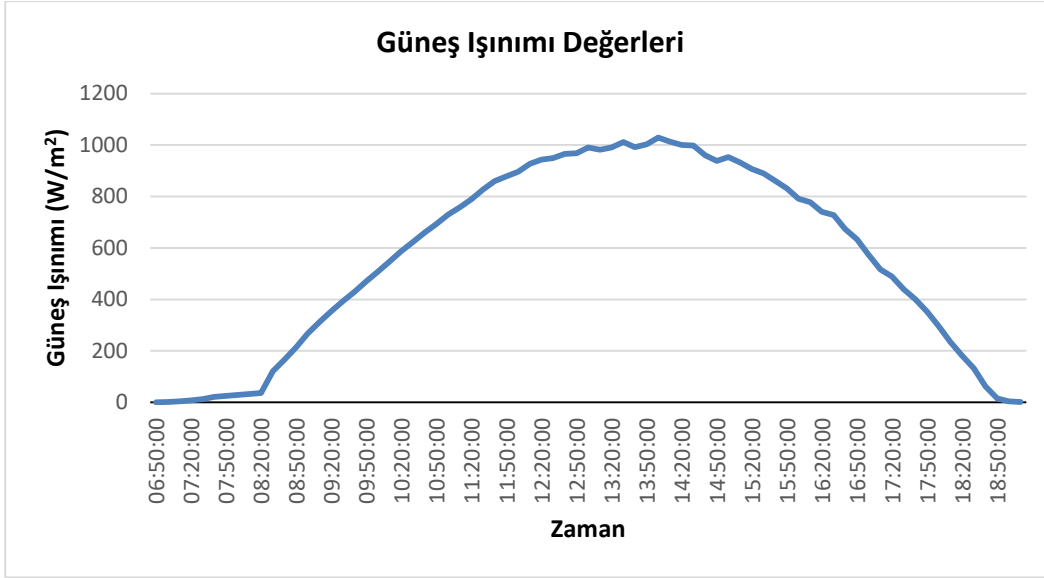
Kurutma deneylerinin 11. gününde üçüncü numunelerin kurutma işlemine kalan 468,52 g ürünle devam edilmiştir. 11. gün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık kurutma kabini girişi tarafında maksimum 48,5 °C olarak ölçülmüştür. Kurutma makinesinde deney dışında başka ürünler de kurutulmaya devam ettiği için kabin içerisindeki nem miktarı artacağından, bypass bacası gün içerisinde açılıp kapatılarak kabin içerisindeki bağıl nem düşük tutulmuştur. Gün sonunda raflara serilen 468,52 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 424,66 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 36,75 g'dan 32,35 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 58,39 g'dan 55,61 g'a kadar düşmüştür. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışınlamı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.31, Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'de verilmiştir.



Şekil 6.31 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



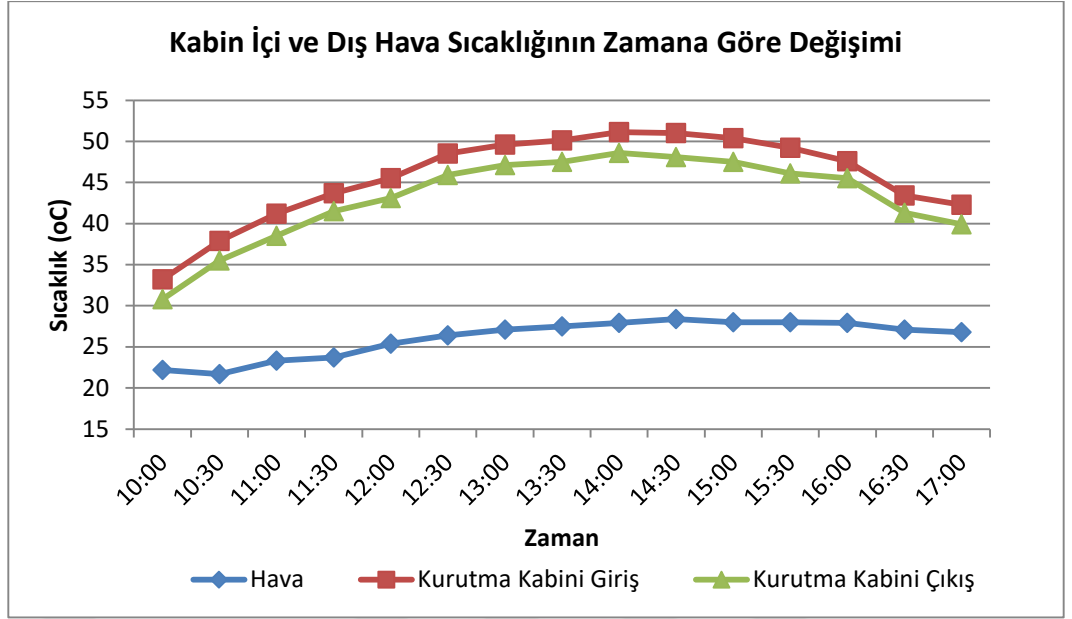
Şekil 6.32 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



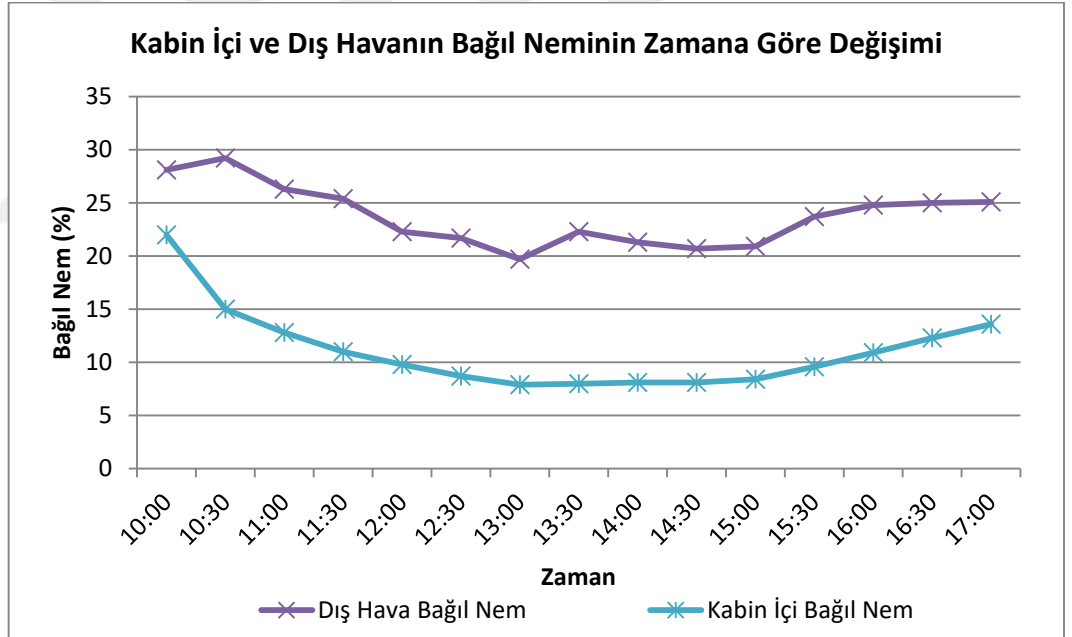
Şekil 6.33 Gün içerisinde güneş ışıınım verilerinin zamana bağlı değişimi.

#### 6.1.12 Üçüncü grup kurutma deneyi (Dördüncü gün)

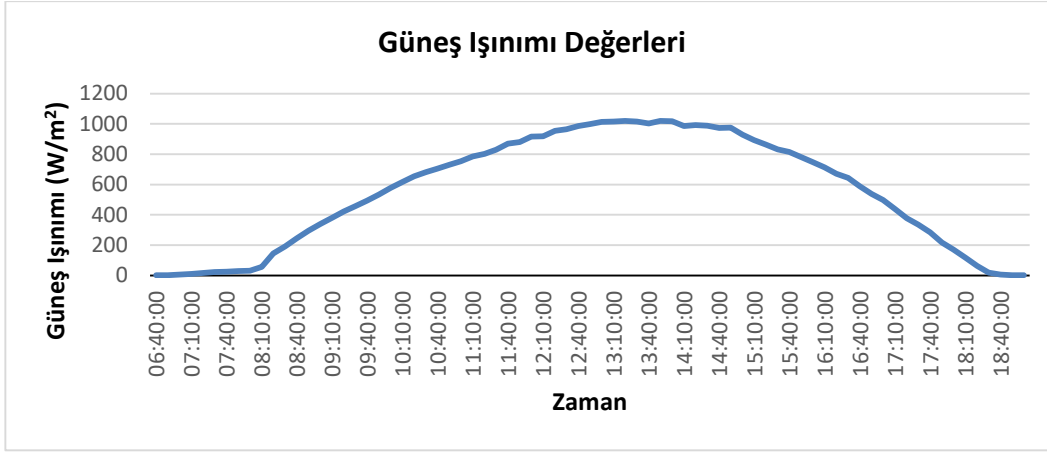
Kurutma deneylerinin 12. aynı zamanda son gününde üçüncü numunelerin kurutma işlemine kalan 411,75 g ürünle devam edilmiştir. Bugünün kurutma verilerinde, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık kurutma kabini girişi tarafında maksimum 51,11°C olarak ölçülmüştür. Kurutma makinesinde deney dışında başka ürünler de kurutulmaya devam ettiği için kabin içerisindeki nem miktarı artacağından, bypass bacası gün içerisinde açılıp kapatılarak kabin içerisindeki bağıl nem düşük tutulmuştur. Gün sonunda raflara serilen 411,75 g yaş portakal dilimlerinden uzaklaşan nem sonucu gün sonunda toplam kütle 360,05 g'a kadar düşmüştür. Kabin içerisindeki tel rafta bulunan portakal dilimlerinin kütlesi 31,29 g'dan 26,14 g'a, açık havada tel raf üzerinde kurutma işlemi yapılan portakal dilimlerinin kütlesi ise 55,23 g'dan 52,76 g'a kadar düşmüştür. Kurutma sırasında amacımız doğrultusunda portakal dilimlerinin kaybettiği nem miktarı farkları çok azaldığından deney sonlandırılmıştır. Aynı zamanda gün içerisinde ölçülen, kurutma kabini girişi hava sıcaklığı, kurutma kabini çıkışı hava sıcaklığı, iç ve dış bağıl nem değerleri ve güneş ışıınımı değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da verilmiştir.



Şekil 6.34 Gün içerisinde kabin içerisindeki ve dış hava sıcaklığındaki değişim.



Şekil 6.35 Gün içerisinde kabin içerisindeki bağıl nemin ve dış havanın bağıl neminin değişimi.



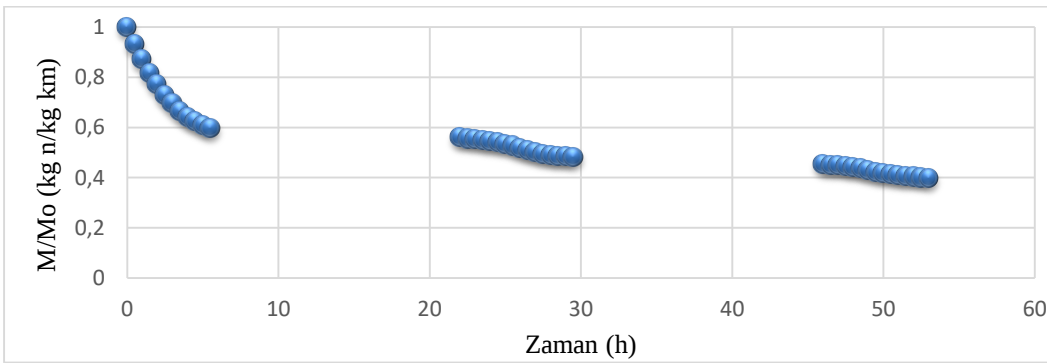
Şekil 6.36 Gün içerisinde güneş ışınlam verilerinin zamana bağlı değişimi.

## 6.2 Nem Oranı ve Kuruma Hızı Grafikleri

Kurutma deneylerine ait nem oranının zamana göre değişimini ve kuruma hızının ortalama neme göre değişimini veren grafikler her kurutma deneyi için o güne ait veriler olarak ayrı ayrı verilmiştir. Aynı zamanda kurutma numunelerinin her biri için, hem kurutma kabini içinde hem de açık havada kurutma işlemi öncesinde ve sonrasındaki fotoğrafları da bu kısımda yer almaktadır.

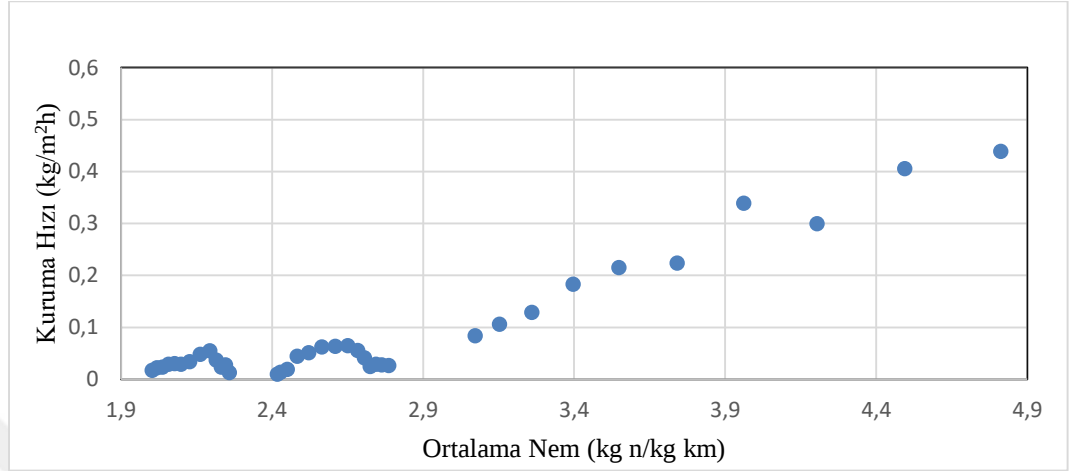
### 6.2.1 Birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için nem oranı ve kuruma hızı grafikleri

Kurutma kabini içinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için  $M/M_0$  nem oranı değerleri maksimum 1 (kg nem/kg kuru madde) ve minimum 0,398403779 (kg nem/kg kuru madde) olup bu değerler arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.37’de gösterilmiştir.



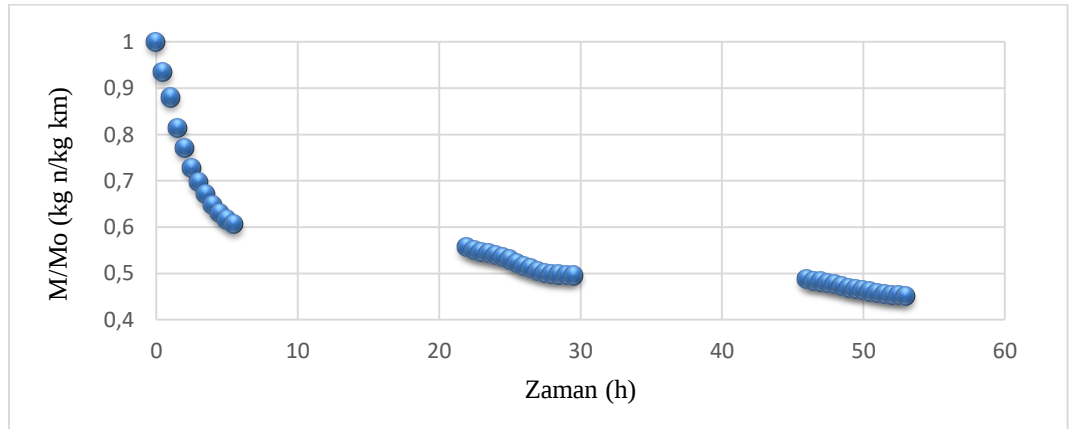
Şekil 6.37 Kurutma kabini içinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi.

Kurutma kabiniinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için kuruma hızı değerleri maksimum 0,486896243 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) ve minimum 0,01709442 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) değerleri arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.38’de gösterilmiştir.



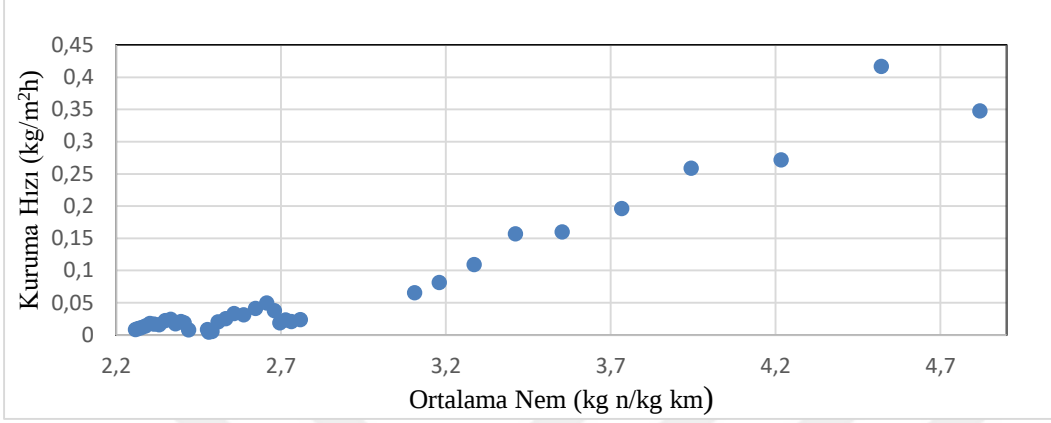
Şekil 6.38 Kurutma kabiniinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi.

Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için M/Mo nem oranı değerleri maksimum 1 ( $\text{kg nem/kg kuru madde}$ ) ve minimum 0,451258452 ( $\text{kg nem/kg kuru madde}$ ) olup bu değerler arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.39’da gösterilmiştir.



Şekil 6.39 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi.

Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için kuruma hızı değerleri maksimum 0,406729307 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) ve minimum 0,008252479 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) değerleri arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.40'da gösterilmiştir.



Şekil 6.40 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi.

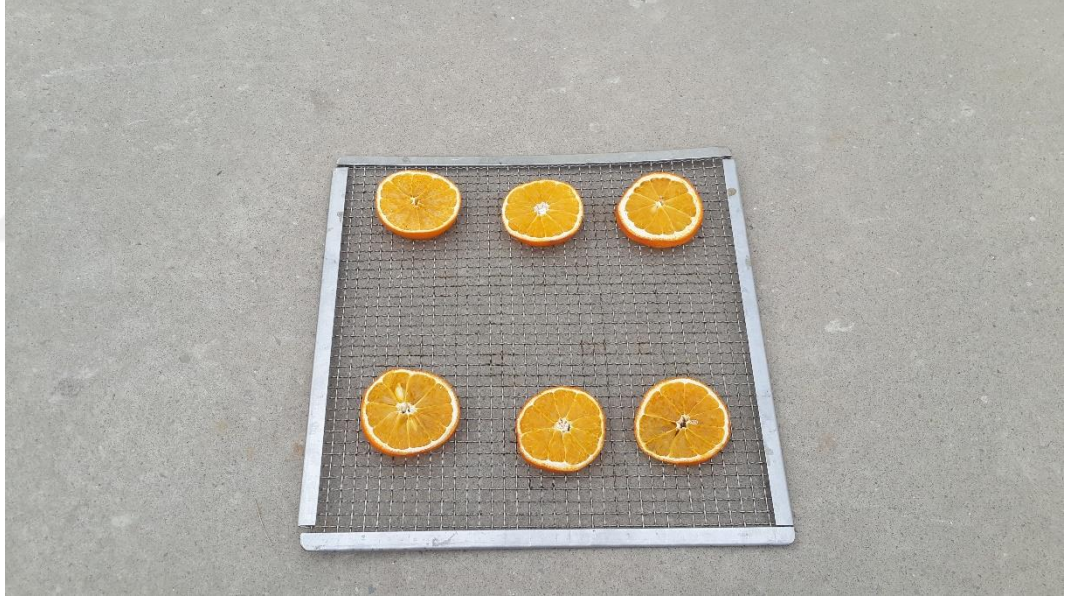
Birinci grup kurutma deneyi için kurutma kabini ve açık havada kurutulan portakal dilimlerinin, kurutulmadan önceki ve kurutulduktan sonraki görünüşleri sırasıyla aşağıdaki fotoğraflarda verilmiştir.



Şekil 6.41 Kurutma kabini kurutulmak üzere tepsiye dizilmiş yaş portakal dilimleri (Birinci grup numuneler).



Şekil 6.42 Kurutma kabinde kurutulan portakal dilimlerin görünüşü (Birinci grup numuneler).



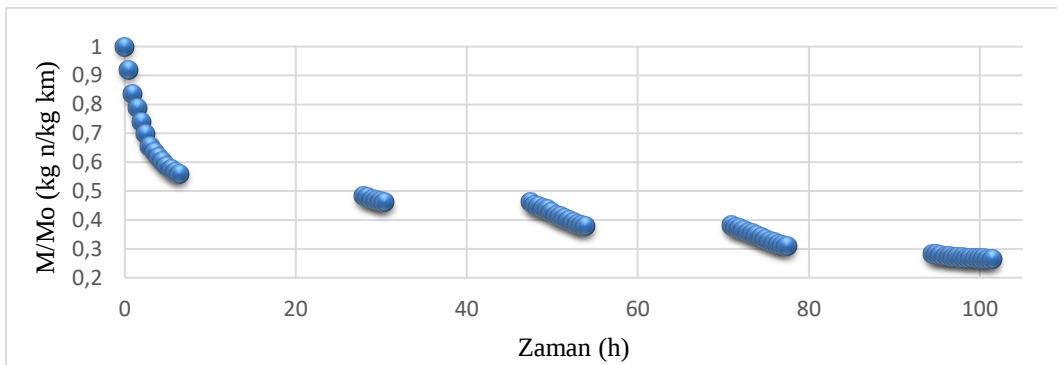
Şekil 6.43 Kurutulmak üzere açık havada güneşe bırakılan portakal dilimleri (Birinci grup numuneler).



Şekil 6.44 Açık havada güneşe bırakılan portakal dilimlerinin kurumuş hali (Birinci grup numuneler).

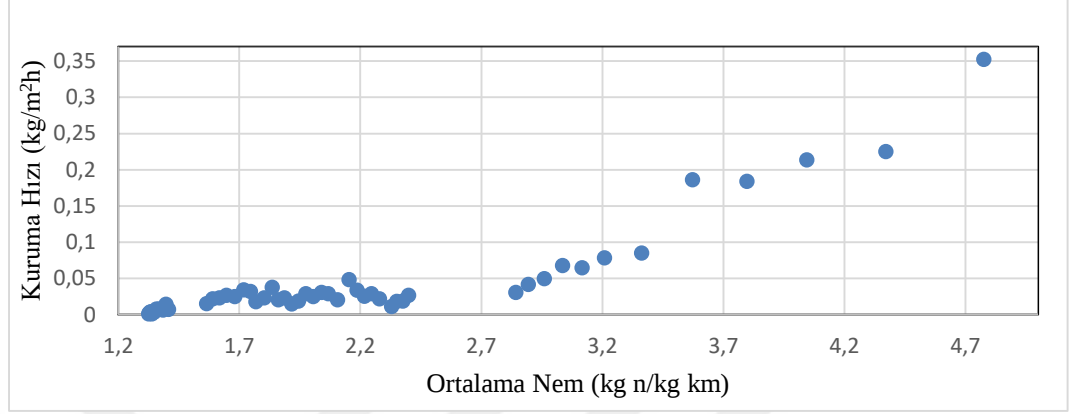
### 6.2.2 İkinci grup kurutma deneyindeki numuneler için nem oranı ve kuruma hızı grafikleri

Kurutma kabiniinde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için  $M/M_o$  nem oranı değerleri maksimum 1 (kg nem/kg kuru madde) ve minimum 0,265470131 (kg nem/kg kuru madde) olup bu değerler arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.41’de gösterilmiştir.



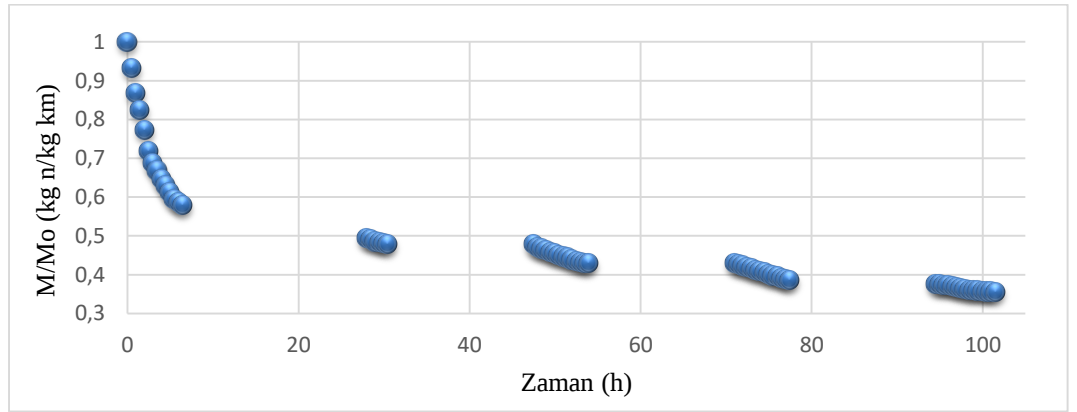
Şekil 6.45 Kurutma kabiniinde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi.

Kurutma kabininde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için kuruma hızı değerleri maksimum 0,361930137 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) ve minimum 0,001178926 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) değerleri arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.42’de gösterilmiştir.



Şekil 6.46 Kurutma kabininde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi.

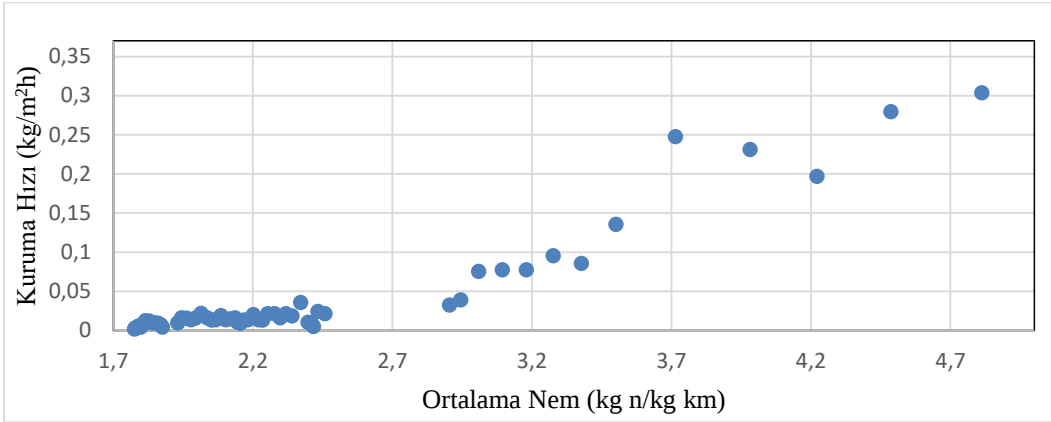
Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için M/Mo nem oranı değerleri maksimum 1 ( $\text{kg nem/kg kuru madde}$ ) ve minimum 0,42910004 ( $\text{kg nem/kg kuru madde}$ ) olup bu değerler arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.43’de gösterilmiştir.



Şekil 6.47 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi.

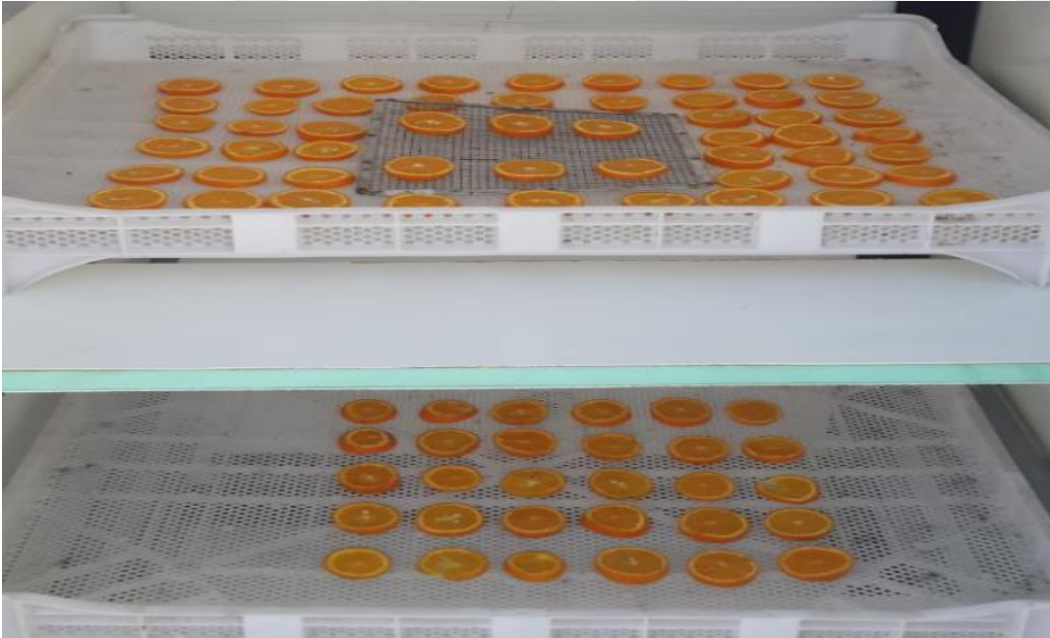
Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için kuruma hızı değerleri maksimum 0,303573323 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) ve minimum 0,01061033

(kg/m<sup>2</sup>h) değerleri arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.44’de gösterilmiştir.



Şekil 6.48 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi.

İkinci grup kurutma deneyi için kurutma kabini ve açık havada kurutulan portakal dilimlerinin, kurutulmadan önceki ve kurutulduktan sonraki görünüşleri sırasıyla aşağıdaki fotoğraflarda verilmiştir.



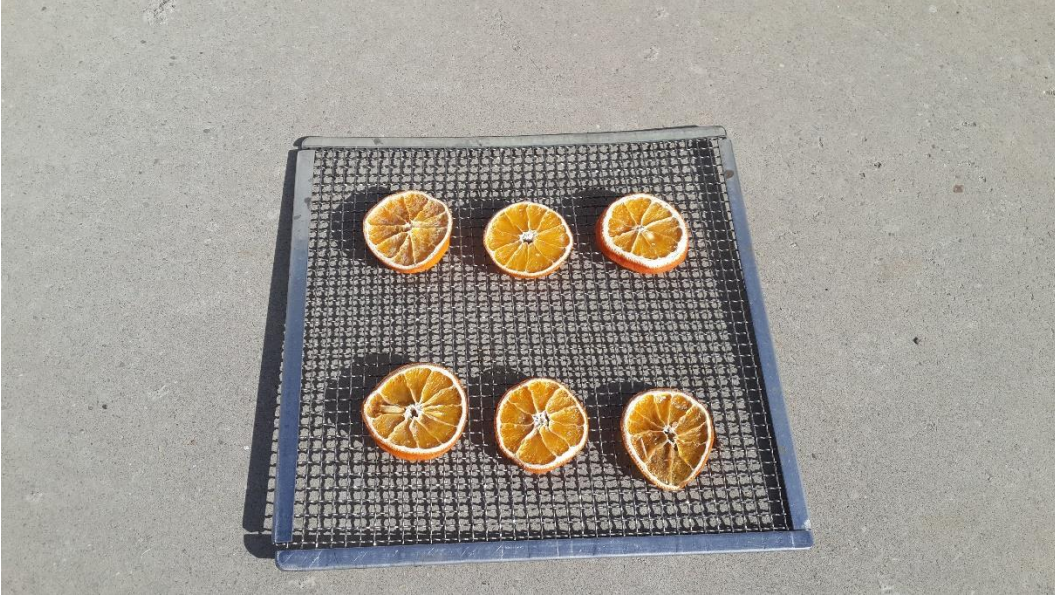
Şekil 6.49 Kurutma kabini kurutulmak üzere tepsiye dizilmiş yaş portakal dilimleri (İkinci grup kurutma deneyi).



Şekil 6.50 Kurutma kabininde kurutulan portakal dilimlerin görünüşü (İkinci grup kurutma deneyi).



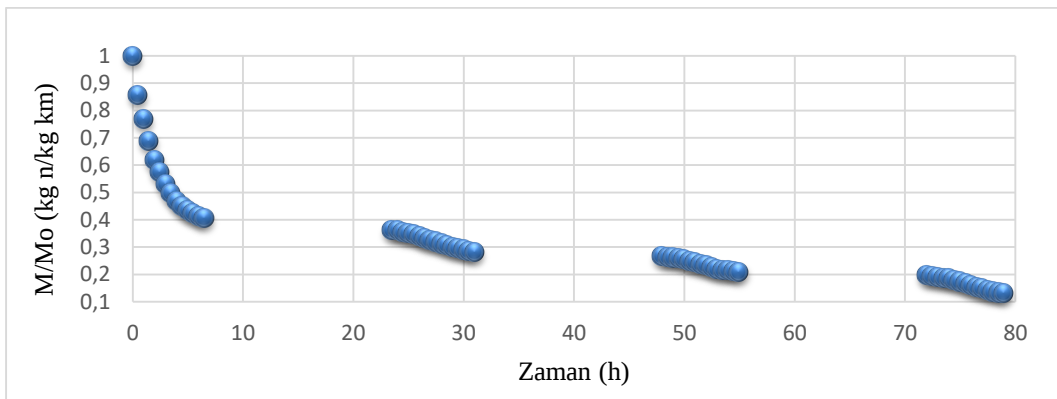
Şekil 6.51 Kurutulmak üzere açık havada güneşe bırakılan portakal dilimleri (İkinci grup kurutma deneyi).



Şekil 6.52 Açık havada güneşe bırakılan portakal dilimlerinin kurumuş hali (İkinci grup kurutma deneyi).

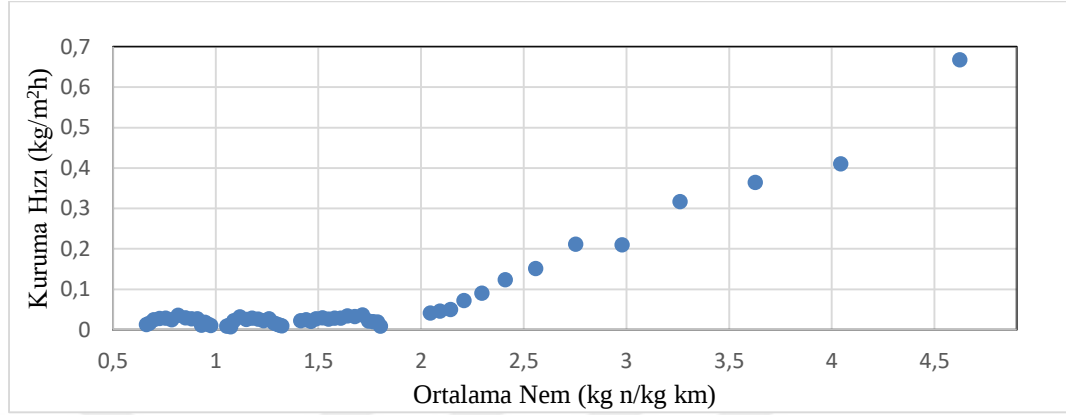
### 6.2.3 Üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için nem oranı ve kuruma hızı grafikleri

Kurutma kabinde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için  $M/M_0$  nem oranı değerleri maksimum 1 (kg nem/kg kuru madde) ve minimum 0,210579858 (kg nem/kg kuru madde) olup bu değerler arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.45’de gösterilmiştir.



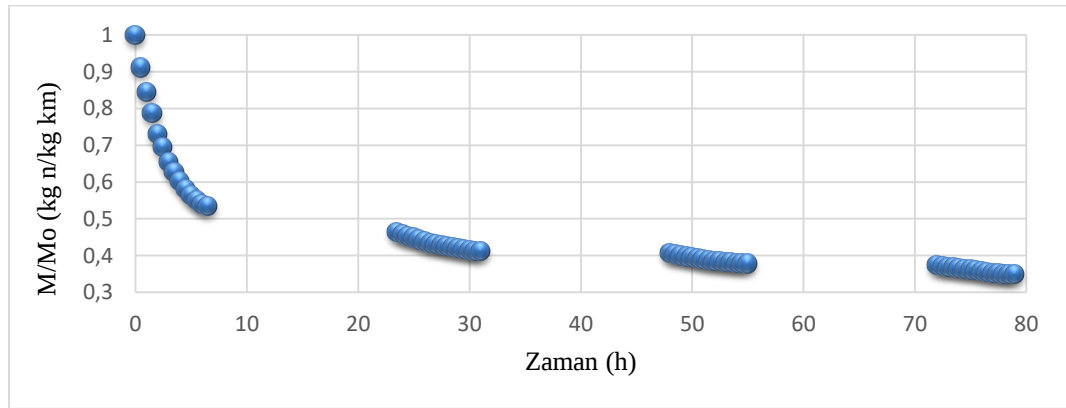
Şekil 6.53 Kurutma kabinde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi.

Kurutma kabininde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için kuruma hızı değerleri maksimum 0,667271848 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) ve minimum 0,008841941 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) değerleri arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.46'da gösterilmiştir.



Şekil 6.54 Kurutma kabininde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi.

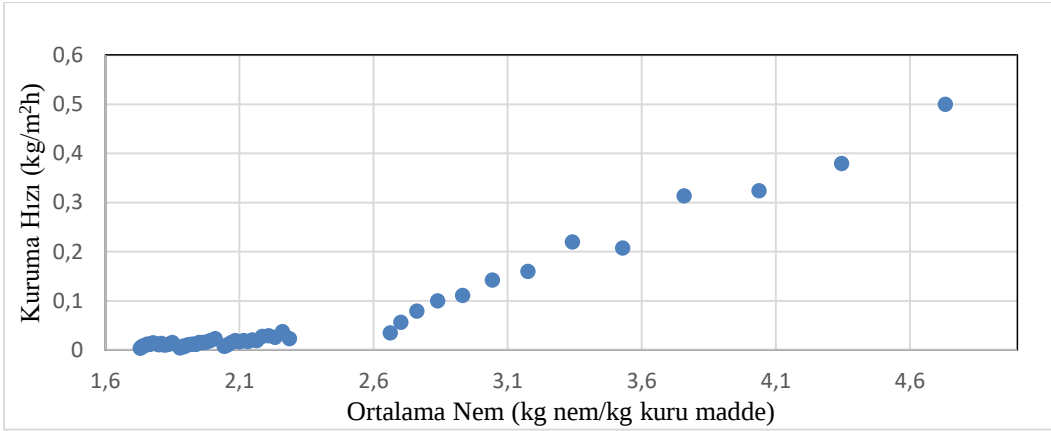
Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için M/Mo nem oranı değerleri maksimum 1 ( $\text{kg nem/kg kuru madde}$ ) ve minimum 0,349070399 ( $\text{kg nem/kg kuru madde}$ ) olup bu değerler arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.47'de gösterilmiştir.



Şekil 6.55 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin nem oranının zamana göre değişimi.

Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için kuruma hızı değerleri maksimum 0,499864424 ( $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) ve minimum 0,003536777

(kg/m<sup>2</sup>h) değerleri arasında değişim göstermiştir. Bu değişimi veren grafik Şekil 6.48’de gösterilmiştir.



Şekil 6.56 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin kuruma hızının ortalama neme göre değişimi.

Üçüncü grup kurutma deneyi için kurutma kabini ve açık havada kurutulan portakal dilimlerinin, kurutulmadan önceki ve kurutulduktan sonraki görünüşleri sırasıyla aşağıdaki fotoğraflarda verilmiştir.



Şekil 6.57 Kurutma kabini kurutulmak üzere tepsiye dizilmiş yaş portakal dilimleri (Üçüncü grup kurutma deneyi).



Şekil 6.58 Kurutma kabininde kurutulan portakal dilimlerin görünüşü (Üçüncü grup kurutma deneyi).



Şekil 6.59 Kurutulmak üzere açık havada güneşe bırakılan portakal dilimleri (Üçüncü grup kurutma deneyi).



Şekil 6.60 Açık havada güneşe bırakılan portakal dilimlerinin kurumuş hali (Üçüncü grup kurutma deneyi).

## 7. KURUTMA PRENSİPLERİ VE MATEMATİKSEL MODEL

Kurutulan bir malzemenin davranışları sabit kurutma koşullarında (kurutma havası nemi, sıcaklığı, hızı ve basıncı) incelendiğinde malzeme neminin zamanın fonksiyonu olarak değiştiği gözlenir. Kuruma işleminde başlangıçta, malzeme sıcaklığının kuruma sıcaklığına kadar ısıtılma veya soğutulmasını gözlenir. Sabit kuruma debisinde periyodu süresince iç bölgeden malzeme yüzeyine nem difüzyonu yüzeyin ıslak kalmasını sağlayacak düzeydedir. Kurutma işleminde bu periyot serbest su yüzeyinden buharlaşma olarak değerlendirilebilir. Kurutma havasının sıcaklığı ve nemi bu periyotta etkin olan parametrelerdir. Taşınım etkili bir kurutmada yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak yaş termometre sıcaklığındadır. İletim veya ısıma etkisi de dikkate alındığında yüzey sıcaklığı yaş termometre ve kurutma havası sıcaklıkları arasındadır. Kurutma ilerledikçe malzeme yüzeyinin tamamen ıslak olmadığı gözlenir ve bu andan itibaren azalan debi periyodu başlar. Azalan debi periyodunda kuruma hızını, katı maddenin iç gözenek yapısı ve içindeki nemin yüzeye akış modeli belirler. Kurutma havasının özelliklerinin kurutma debisi üzerine etkisi sabit kuruma debisi periyoduna göre daha azdır. Bu aşamada malzeme içindeki nemin yüzeye erişmesi güçleşir. Bu periyotta malzemenin yüzeyinde ve içerisinde sıcaklık yükselmesi gözlenir. Azalan debi periyodunun başladığı noktadaki nem içeriği kritik nem olarak isimlendirilir ve kurutulan malzemenin başta kalınlığı olmak üzere özellikleri ile kurutma havası koşullarına bağlıdır. Malzeme yüzeyinin tamamen kuru olduğu andan itibaren ikinci azalan debi periyodu başlar. Buharlaşma malzeme yüzeyi yerine iç bölgelerde gerçekleşir. Buharlaşma için gerekli ısı kurutma havasından malzeme yüzeyine ve buradan ise buharlaşma bölgesine iletimle ulaşır. Buharlaşan nem ise malzeme içinden yüzeye gelir ve kurutma havası tarafından uzaklaştırılır.

### 7.1 Nem Yayınımı

Gıda maddelerinde nem transferi endüstriyel önemi olan bir konudur. Nemin malzeme içindeki transfer mekanizmaları farklılıklar gösterir ve oldukça karmaşıktır. Farklı transfer mekanizmaları mümkün olmasına karşın, genelde yayınlımla taşınım mekanizmasının geçerli olduğu kabul edilir. Nem transfer hızı etkin yayılım katsayısı ile tanımlanır. Bu yaklaşım teorik olarak tümüyle geçerli olmasa da kurutma işlemi süresince nem içeriğindeki değişimi tanımlamak için oldukça uygun ve basit bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın uygulanabilmesi için gerekli parametreler örnek boyutu ve etkin yayılım katsayısıdır. Buna karşın daha karmaşık incelemelerde ise sıvı ve buhar iletkenlikleri, geçirgenlik gibi deneysel

olarak belirlenmesi oldukça güç olan bazı katsayılarla ihtiyaç duyulur. Nemin yayım ile transferini tanımlamak için Fick yasasından yararlanılır (Heldman, Lind, 1972).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (7.1)$$

Burada M: kuru madde esasına göre yerel nem içeriği, t: zaman, x: konumdur. Fick yasasının uygulanmasında gıda maddesinin bir boyutlu olduğu, başlangıç nem içeriğinin düzgün ve nem transferine esas direncin malzeme içinde olduğu kabul edilir.

Fick yasasını uygulamak için önce geometri belirlenir, ardından bu geometriye uygun olarak elde edilen çözümden yararlanılır.

Küresel geometri için Fick denkleminin çözümü aşağıda verilmiştir (Ünal, Saçılık, 2011, Abe, Afzal, 1997, Toğrul, 2010, Perez-Alonso, Cruz-Olivares, Ramiez, Rôman-Guerrero, Vernon-Carter, 2010).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left( -n^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (7.2)$$

Burada M: nem içeriği,  $M_0$ : başlangıçtaki nem içeriği,  $M_e$ : yüzey denge nem içeriği,  $D_{eff}$  etkin yayılım katsayısı, r: yarıçap, t: zamandır. Küresel geometriye sahip ürünler olarak buğday, soya fasulyesi, ceviz sayılabilir.

Levha şeklindeki geometriye sahip malzemeler için Fick denkleminin çözümü aşağıda verilmiştir (Wang, Sun, Chen, Liao, Hu, 2007, Di Scala, Crapiste, 2008, Ramesh, Wolf, Tevini, Jung, 2001).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left( -(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2} \right) \quad (7.3)$$

Burada L: levhanın yan kalınlığıdır. Bu geometri kapsamında incelenebilecek ürünlere dilimlenmiş elma, şalgam verilebilir.

Silindirik geometriye sahip malzemeler için Fick denkleminin çözümü aşağıda verilmiştir. Burada a: silindir yarıçapı,  $\beta_n^2$ : Bessel fonksiyonu kökleridir.

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{4}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-D_{eff} \beta_n^2 t) \quad (7.4)$$

Zaman yeterli uzunlukta ise Fick denkleminin çözümlerini veren serilerde ilk terimin dikkate alınması yeterlidir. Ancak zaman kısa ise serilerde daha fazla terimin dikkate alınması gerekir. Bu geometriye sahip malzemelere örnek olarak makarna, patates verilebilir.

Etkin yayınım katsayısı sabit bir değer olmaktan çok sıcaklık ve nem içeriğinin fonksiyonudur. Eğri uydurma teknikleri ile elde edilir. Yayınım katsayısı ve nem içeriği ilişkisi farklı yapıdaki denklemlerle ifade edilmiştir. Yayınım katsayısı-sıcaklık ilişkisi ise Arrhenius denklemi ile verilir (Heldman, Lind, 1972).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left( \frac{E_a}{RT} \right) \quad (7.5)$$

Burada  $D_{eff}$  : etkin yayınım katsayısı,  $E_a$ : aktivasyon enerjisi,  $T$ : mutlak sıcaklıktır. Aktivasyon enerjisi  $[\ln(D_{eff}) - 1/T]$  grafiğinden elde edilir. Aktivasyon enerjisi, nem içeriği ile ters orantılıdır.

$D_{eff}$  'nin bağımlılığı, aşağıdaki denklemle verilen Arrhenius tipi ilişki ile açıklanabilir (Okos, Narasimhan, Singh and Witnauer, 1992; Simal et al., 1996):

$$D_{eff} = D_0 \exp \left( - \frac{E_a}{R(T+273,15)} \right) \quad (7.6)$$

Burada  $D_0$ , Arrhenius denkleminin frekans faktörüdür ( $m^2/s$ ),  $E_a$  aktivasyon enerjisidir ( $kJ / mol$ ),  $T$ , kurutma havasının sıcaklığıdır ( $^{\circ}C$ ) ve  $R$ , gaz sabitidir ( $kJ / mol K$ ).

## 7.2 Kuruma Eğrilerinin Matematik Modeli

Kurutma süreci teorik olarak; ısınma veya soğuma periyodu, sabit kuruma debisi periyodu ve azalan kuruma debisi periyodu olmak üzere üç periyottan oluşur. Ürünün başlangıç yüzey sıcaklığı, kurutma havasının yaş termometre sıcaklığından daha düşük ise ısınma periyodu gözlenir. Sabit debi periyodunda kuruma hızı sabittir. Malzeme başlangıçta yeterli nemde ise, sabit kuruma debisi periyodunda, kurutulan malzemenin yüzeyinin ince bir sıvı filmi ile kaplı olduğu (yani tamamen ıslak olduğu) varsayılır. Bu nemin tümünün bağlı olmayan su olduğunu söyleyebiliriz. Bu koşullarda malzeme kurutma ortamında havayla temas ederse buharlaşma yüzeyden başlar. Buharlaşma debisi bu periyotta katı madde özelliklerine bağlı değildir. Aynı koşullar altında -bulunan sıvı yüzeyinden buharlaşma debisine eşittir. Nemin yüzeye geliş debisi, yüzeyden buharlaşma

debisine eşittir. Radyasyon ve iletimle ısı transferinin olmadığı koşullarda ürün yüzey sıcaklığı, kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına eşittir. Azalan kuruma debisi periyodunda, nemin malzeme içinde yayınımına direncin artması nedeniyle nemin buharlaşma debisi üssel olarak azalır ve denge nemine ulaşıldığında buharlaşma debisi sıfıra düşer. Bu periyot süresince nemin iç bölgeden yüzeye yayınımı, yüzeyden nemin uzaklaşma debisinden daha düşüktür. Bu nedenle yüzeyin tümü tamamen ıslak değildir ve kuru bölgelerin oranı artar. Gıda maddelerinin kurutulması, çoğunlukla azalan kuruma debisi periyodunda gerçekleşir. Süreç sıvı yayınım mekanizması ile kontrol edilir ve Fick yasası yardımıyla tanımlanır (Kashaninejad, Mortazavi, Safekordi, Tabil, 2007). Kurutma sürecini tanımlayan ince tabaka kurutma modeli; teorik, yarı teorik ve tümüyle deneysel olmak üzere üç ana grupta incelenir. Bu gruplar arasındaki temel fark, teorik modelde nem transferinin esas olarak iç direnç mekanizmaları, yarı teorik ve tümüyle deneysel modellerde ise yalnızca dış direnç tarafından kontrol edildiklerinin varsayılmasıdır. Yan teorik model, bazı basitleştirici kabuller yardımıyla Fick denkleminin genel çözümünden elde edilir. Deneysel model, zaman ile nem içeriği arasındaki istatistiksel ilişkiler kullanılarak türetilir. Deneysel ve yarı deneysel modeller belli bir sıcaklık, hava hızı, nem içeriği aralığında geçerlidir. Deneysel modeller, kuruma süresi ve ortalama nem içeriği arasındaki ilişkiyi doğrudan yansıtır. Ancak kuruma sürecinin temellerini ve bu sürece ait parametrelerin fiziksel anlamlarını dikkate almaz (Panchariya, Popovic, Shanna, 2002).

İnce tabaka kurutma sürecini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan temel eşitlik, Newton 'un soğuma yasasına benzerdir. Lewis tarafından önerilen bu modelde, tarımsal ürün ve gıoâ maddelerinde nem transferinin, soğuk bir akışkana daldırılan sıcak bir cisimden ısı akımına benzerlik gösterdiği varsayımına dayanmaktadır. Bu modelde kuruma hızının, kurutulmakta olan malzeme nem içeriği ve kurutma ortamı koşullarındaki denge nem içeriği arasındaki fark ile orantılı olduğu kabul edilmiştir. (Tiris, Özbalt, Tiris, Dincer, 1994, Karathanos, Vasilios, . Belessiotis, 1999, Ghazanfari, Tabil Jr., Sokhansanj, 2003, Jain, Pathare, 2004).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt) \quad (7.7)$$

Oldukça basit olan bu model yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu modelde, kurutma eğrilerinin ilk kademelerinde sonuçların büyük, son kademelerinde ise sonuçların küçük olarak tahminlenmesi olasıdır.

Tarımsal ürün ve gıda maddelerinin kurutma karakteristiklerinin modellenmesinde yayılım modelinin farklı yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri de sonsuz serinin yalnızca birinci terimini dikkate alan Henderson ve Pabis modelidir. (Diamante, Munro, 1993, Doymaz, 2004, Panchariya, Popovic, Shanna, 2002, Doymaz, 2004).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) \quad (7.8)$$

Eğer kuruma süreci azalan debi periyodunda meydana geliyor ve süreci sıvı yayılımı kontrol ediyorsa modele ait denklemin eğimi (k katsayısı) etkin yayılım katsayısı ile ilişkilidir. Özellikle meyveler için önerilen logaritmik model

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) + c \quad (7.9)$$

şeklinde olup, a ve c sabitleri modele bağlı sabitlerdir (Doymaz, 2004, Lahsasni, Kouhila, Mahrouz, Jaouhari, 2004, Toğrul, Pehlivan, 2002, Diamante, Ihns, Savage, Vanhanen, 2010).

İki terimli üstel model, tohum benzeri ürünlerin ince tabaka halinde kurutulmasında uygun olan yarı deneysel bir yaklaşımdır. Yayılım denkleminin genel çözümünden elde edilmiştir. Sonsuz serinin negatif üslü parçasıdır. Bu yaklaşımın uygulanmasında sınır koşulları ve tanecik geometrisi önemli değildir. Ancak yayılım katsayısının sabit olduğu varsayılır. Bu yaklaşım da ürün sıcaklığının kuruma süresince sabit olduğu anlamına gelir. Bu yaklaşım kuruma sürecinin ileri aşamasında modelin doğruluğunda iyileşme sağlar. (Vega-Galvez, Miranda, Diaz, Lopez, Rodriguez, Di Scala, 2010, Doymaz, 2004, Babalis, Papanicolaou, Kyriakis, Belessiotis, 2006, Panchariya, Popovic, Sharma, 2002).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1 t) \quad (7.10)$$

Page tarafından önerilen model, birçok tarımsal ürün ve gıda maddesinin kuruma eğrisinin tanımlanmasında uygun sonuç vermektedir (Karathanos, Vasilios, Belessiotis, 1999, Munro, 1993, Dandamrongrak, Young, Mason, 2002, Chen, Wu, 2001 ). Page modeli aşağıda verilmiştir:

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt^n) \quad (7.11)$$

İyileştirilmiş Page modeli, soya fasulyesi ve patlamış mısırın kurutma eğrisini tanımlamak üzere Page modelinden türetilmiştir (Vega-Gálvez, Miranda, Diaz, Lopez, Rodriguez, Di Scala, 2010, Ertekin, Yaldiz, 2004, Toğrul, Pehlivan, 2002, Doymaz, 2004). Model için önerilen denklem aşağıda verilmiştir:

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp[-(kt)^n] \quad (7.12)$$

Pirincin kesikli kurutulması incelemek için kullanılan Wang ve Sing modeline ait eşitlik aşağıda verilmiştir (Panchariya, Popovic, Sharina, 2002, Doymaz, 2004, Lahsasni, Kouhila, Mahrouz, Jaouhari, 2004, Babalis, Papanicolaou, Kyriakis, Belessiotis, 2006, Xanthopoulos, Lambrinos, Manolopoulou, 2007).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = 1 + at + bt^2 \quad (7.13)$$

Thompson modeli ile Wang ve Sing modeli tümüyle deneysel modeldir. Kuruma süresi ve ortalama nem içeriği arasındaki ilişkiyi verir.

Mısır koçanı gibi karmaşık formdaki ürün için deneysel olarak geliştirilen yaklaşım

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt) \quad (7.14)$$

eşitliği ile verilmiştir. (Chen, Wu, 2001, Bal, Kar, Satya, Naik, 2010, Fang, Wang, Hu, 2009).

Kuruma süresi ve ortalama nem içeriği arasındaki ilişkiyi tanımlamak üzere türetilen diğer denklemler aşağıda verilmiştir:

İyileştirilmiş Henderson ve Pabis yaklaşımı (Bal, Kar, Satya, Naik, 2010, Fang, Wang, Hu, 2009, Xanthopoulos, Lambrinos, Manolopoulou, 2007, Karathanos, 1999):

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (7.15)$$

Yayınım yaklaşımı (Lahsasni, Kouhila, Mahrouz, Jaouhari, 2004, Bal, Kar, Satya, Naile, 2010, Ertekin, Yaldiz, 2004, Toğrul, Pehlivan, 2004):

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (7.16)$$

Weibull dağılımı (Vega-Gálvez, Miranda, Dfaz, Lopez, Rodriguez, Di Scala, 2010, Corzo, Bracho, Pereira, Vasquez, 2008).

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^a\right] \quad (7.17)$$

Verma ve çalışma arkadaşlarının yaklaşımı (Bal, Kar, Satya, Naik, 2010, Fang, Wang, Hu, 2009, Toğrul, Pehlivan, 2004, Kaleta Gomicki, 2010)

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt) \quad (7.18)$$

Her bir güne ait deney sonuçları ile en iyi uyum gösteren matematiksel modeller MR nem oranı ile aşağıdaki gibi verilmiştir. Burada MR boyutsuz olup,  $M-M_e/M_0-M_e$  eşitliği ile bulunur. Bunu da sadeleştirirsek  $MR = M/M_0$  olacaktır.  $M/M_0$  ise ürünün anlık ölçülen kütlelerinin başlangıç kütlelerine oranıdır. Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), en iyi denklemin seçilmesinde birincil kriterlerden biriydi. Determinasyon katsayısına ek olarak; uyumun kalitesini belirlemek için korelasyon katsayısı (CC) ve kök ortalama kare hata oranı (RMSE) kullanıldı. Bu denklemler aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum (MR_{prd} - \sum MR_{exp})^2}{\sum (MR_{prd} - \sum MR_{exp})^2} \right] \quad (\text{Younis, Abdelkarim, El-Abdein, 2018}) \quad (7.19)$$

$$CC = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{prd,i} - \overline{MR_{prd}})(MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_{prd,i} - \overline{MR_{prd}})^2][\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2]}} \right] \quad (\text{Kırtepe, Özbalta, 2018}) \quad (7.20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{prd,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (\text{Younis, Abdelkarim, El-Abdein, 2018}) \quad (7.21)$$

En uygun kuruma eğrisi seçilirken bu kriterler dikkate alındı. Modeller birbirleriyle bu kriterlere göre karşılaştırıldı ve sonuçlar aşağıdaki gibi elde edildi.

Çizelge 7.1 Kurutma kabiniinde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi.

| Modeller                          | Model Denklemleri                                                                     | R <sup>2</sup> | RMSE    | CC      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Henderson ve Pabis                | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$                                                       | 0,8117         | 0,06505 | 0,93603 |
| Logaritmik                        | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$                                                   | 0,9054         | 0,04669 | 0,95153 |
| İki terimli üstel                 | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$                          | 0,9873         | 0,01172 | 0,99392 |
| Page                              | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$                                                             | 0,9492         | 0,03378 | 0,97438 |
| Verma                             | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$                        | 0,9866         | 0,01759 | 0,99342 |
| İyileştirilmiş Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$ | 0,9734         | 0,02573 | 0,98700 |
| Yayınım                           | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$                | 0,9866         | 0,01759 | 0,99342 |

Çizelge 7.2 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi.

| Modeller                          | Model Denklemleri                                                                     | R <sup>2</sup> | RMSE    | CC      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Henderson ve Pabis                | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$                                                       | 0,7382         | 0,07063 | 0,90679 |
| Logaritmik                        | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$                                                   | 0,9593         | 0,02819 | 0,97944 |
| İki terimli üstel                 | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$                          | 0,9931         | 0,01172 | 0,99674 |
| Page                              | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$                                                             | 0,9444         | 0,03255 | 0,97202 |
| Verma                             | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$                        | 0,9927         | 0,01195 | 0,99644 |
| İyileştirilmiş Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$ | 0,8705         | 0,05228 | 0,99708 |
| Yayınım                           | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$                | 0,9927         | 0,01195 | 0,99644 |

Çizelge 7.3 Kurutma kabininde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi.

| Modeller                          | Model Denklemleri                                                                     | R <sup>2</sup> | RMSE    | CC      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Henderson ve Pabis                | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$                                                       | 0,8651         | 0,06253 | 0,95674 |
| Logaritmik                        | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$                                                   | 0,8791         | 0,05967 | 0,95903 |
| İki terimli üstel                 | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$                          | 0,9902         | 0,01712 | 0,99441 |
| Page                              | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$                                                             | 0,952          | 0,03728 | 0,97553 |
| Verma                             | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$                        | 0,99           | 0,01715 | 0,99506 |
| İyileştirilmiş Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$ | 0,9850         | 0,0216  | 0,99477 |
| Yayınım                           | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$                | 0,99           | 0,0171  | 0,99505 |

Çizelge 7.4 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi.

| Modeller                          | Model Denklemleri                                                                     | R <sup>2</sup> | RMSE    | CC      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Henderson ve Pabis                | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$                                                       | 0,7895         | 0,06847 | 0,92448 |
| Logaritmik                        | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$                                                   | 0,9296         | 0,03992 | 0,96432 |
| İki terimli üstel                 | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$                          | 0,9966         | 0,0089  | 0,99831 |
| Page                              | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$                                                             | -              | -       | -       |
| Verma                             | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$                        | 0,9964         | 0,00897 | 0,99824 |
| İyileştirilmiş Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$ | 0,9963         | 0,00945 | 0,99819 |
| Yayınım                           | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$                | 0,9964         | 0,00897 | 0,99820 |

Çizelge 7.5 Kurutma kabiniinde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi.

| Modeller                          | Model Denklemleri                                                                     | R <sup>2</sup> | RMSE    | CC      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Henderson ve Pabis                | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$                                                       | 0,7947         | 0,08152 | 0,93899 |
| Logaritmik                        | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$                                                   | 0,8794         | 0,06304 | 0,93865 |
| İki terimli üstel                 | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$                          | 0,9914         | 0,01702 | 0,99570 |
| Page                              | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$                                                             | 0,9527         | 0,03912 | 0,97615 |
| Verma                             | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$                        | 0,9913         | 0,01692 | 0,99567 |
| İyileştirilmiş Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$ | 0,9927         | 0,01597 | 0,99645 |
| Yayınım                           | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$                | 0,9913         | 0,01692 | 0,99567 |

Çizelge 7.6 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için matematiksel model seçimi.

| Modeller                          | Model Denklemleri                                                                     | R <sup>2</sup> | RMSE    | CC      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Henderson ve Pabis                | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$                                                       | 0,6908         | 0,08164 | 0,88691 |
| Logaritmik                        | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$                                                   | 0,9607         | 0,02937 | 0,98042 |
| İki terimli üstel                 | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$                          | 0,9969         | 0,00831 | 0,99846 |
| Page                              | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$                                                             | 0,9483         | 0,03339 | 0,97401 |
| Verma                             | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$                        | 0,9969         | 0,00826 | 0,99845 |
| İyileştirilmiş Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$ | 0,9971         | 0,00780 | 0,99767 |
| Yayınım                           | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$                | 0,9969         | 0,00826 | 0,99844 |

Kurutma deneylerinde elde edilen sonuçlar; determinasyon katsayısı (R<sup>2</sup>), korelasyon katsayısı (CC), kök ortalama kare hata oranı (RMSE) kriterleri dikkate alındığında kurutma kabiniinde kurutulan birinci grup numuneler, açık havada kurutulan birinci, ikinci ve üçüncü grup numuneler için iki terimli üstel modelin, kurutma kabiniinde kurutulan üçüncü grup numuneler için iyileştirilmiş Henderson ve Pabis modelinin, kurutma kabiniinde kurutulan ikinci grup numuneler için ise

Verma modelinin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kullanılan bu kurutma modelleri Çizelge 7.7’de verilmiştir.

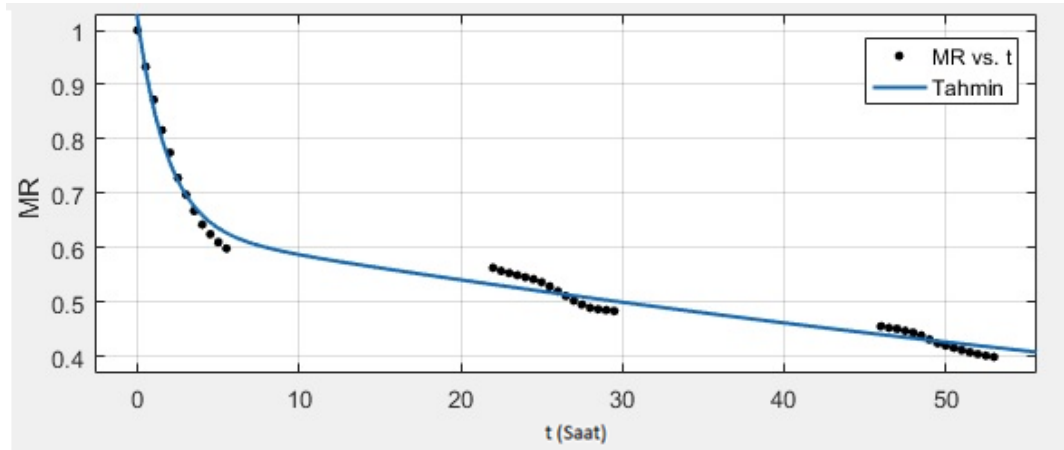
Çizelge 7.7 Kurutulan tüm numunelerin matematiksel modelleri .

|                                       |                                                                                                                       |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kurutma kabini 1. grup kurutma deneyi | $MR_{1iç} = 0,3871 \cdot \exp(-0,5326 \cdot t) + 0,6331 \cdot \exp(-0,007925 \cdot t)$                                |
| Açık hava 1. grup kurutma deneyi      | $MR_{1dış} = 0,4253 \cdot \exp(-0,4291 \cdot t) + 0,5892 \cdot \exp(-0,004719 \cdot t)$                               |
| Kurutma kabini 2. grup kurutma deneyi | $MR_{2iç} = 0,5961 \cdot \exp(-0,007611 \cdot t) + (0,4039) \cdot \exp(-0,5379 \cdot t)$                              |
| Açık hava 2. grup kurutma deneyi      | $MR_{2dış} = 0,4532 \cdot \exp(-0,3762 \cdot t) + 0,556 \cdot \exp(-0,004247 \cdot t)$                                |
| Kurutma kabini 3. grup kurutma deneyi | $MR_{3iç} = 0,4639 \cdot \exp(-0,01329 \cdot t) + 11,64 \cdot \exp(-0,3677 \cdot t) - 11,12 \cdot (-0,03596 \cdot t)$ |
| Açık hava 3. grup kurutma deneyi      | $MR_{3dış} = 0,513 \cdot \exp(-0,3464 \cdot t) + 0,4832 \cdot \exp(-0,004 \cdot t)$                                   |

Birinci grup kurutma deneyindeki numuneler için kurutma kabinindeki ve açık havadaki portakalların kuruma eğrilerinin matematiksel modelleri sırasıyla  $MR_{1iç}$  ve  $MR_{1dış}$  olarak aşağıdaki gibidir:

$$MR_{1iç} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$$

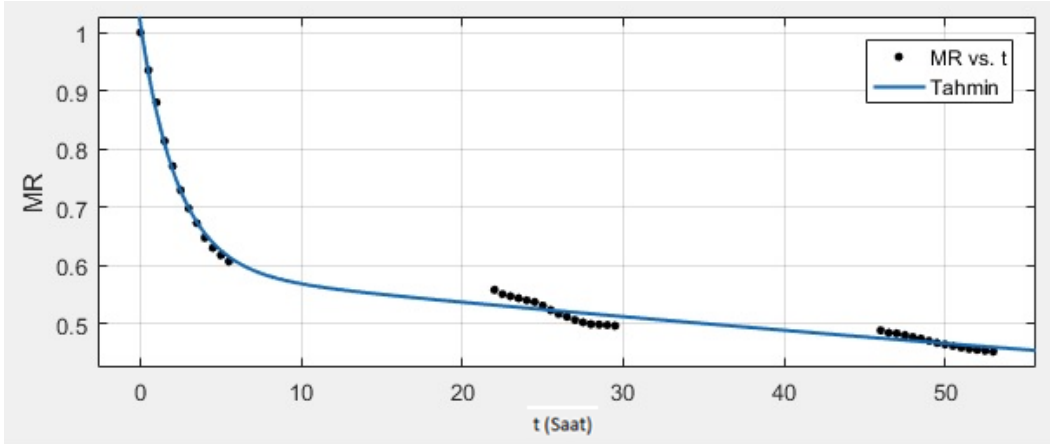
$$a = 0,3871 \quad b = 0,6331 \quad k = 0,5326 \quad k_1 = 0,007925$$



Şekil 7.1 Kurutma kabininde kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli.

$$MR_{1dış} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$$

$$a = 0,4253 \quad b = 0,5892 \quad k = 0,4291 \quad k_1 = 0,004719$$

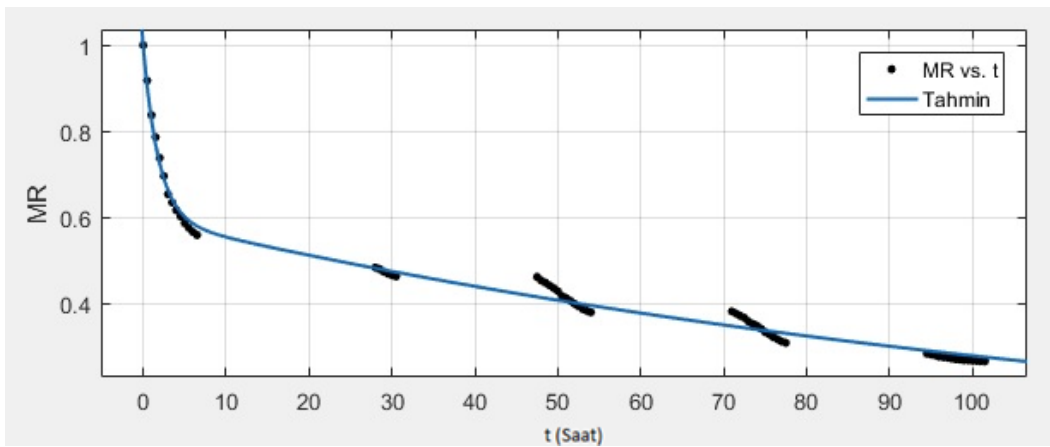


Şekil 7.2 Açık havada kurutulan birinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli.

İkinci grup kurutma deneyindeki numuneler için kurutma kabinindeki ve açık havadaki portakalların kuruma eğrilerinin matematiksel modelleri sırasıyla  $MR_{2iç}$  ve  $MR_{2dış}$  olarak aşağıdaki gibidir:

$$MR_{2iç} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$$

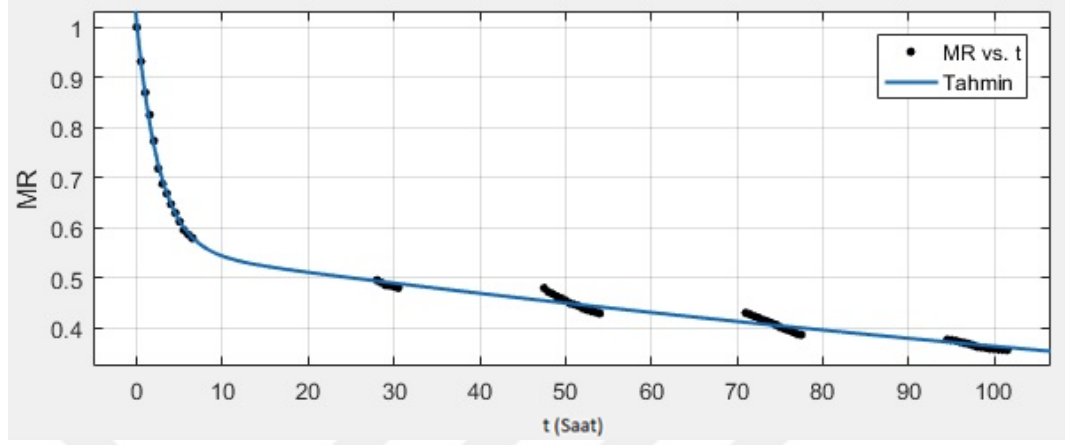
$$a = 0,5961 \quad g = 0,5379 \quad k = 0,007611$$



Şekil 7.3 Kurutma kabininde kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli.

$$MR_{2dış} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$$

$$a = 0,4532 \quad b = 0,556 \quad k = 0,3762 \quad k_1 = 0,004247$$

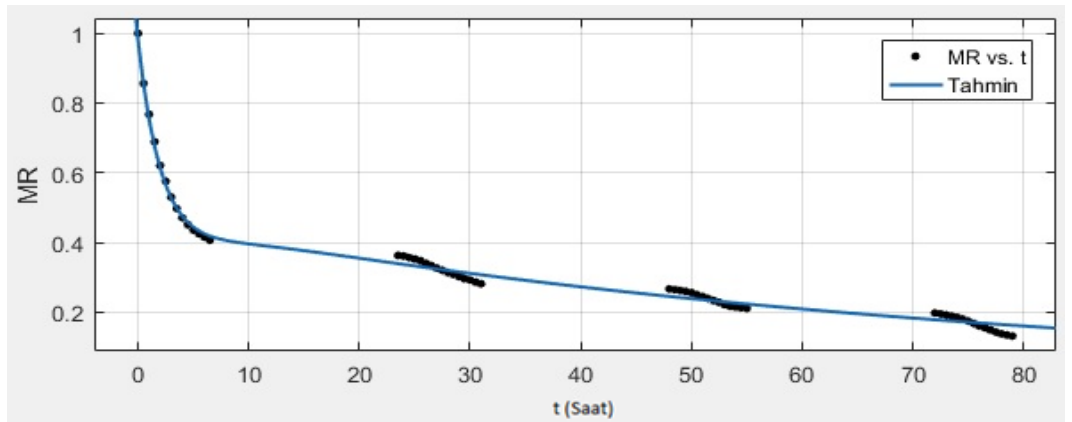


Şekil 7.4 Açık havada kurutulan ikinci grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli.

Üçüncü grup kurutma deneyindeki numuneler için kurutma kabinindeki ve açık havadaki portakalların kuruma eğrilerinin matematiksel modelleri sırasıyla  $MR_{3iç}$  ve  $MR_{3dış}$  olarak aşağıdaki gibidir:

$$MR_{3iç} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t) + c \cdot \exp(-h \cdot t)$$

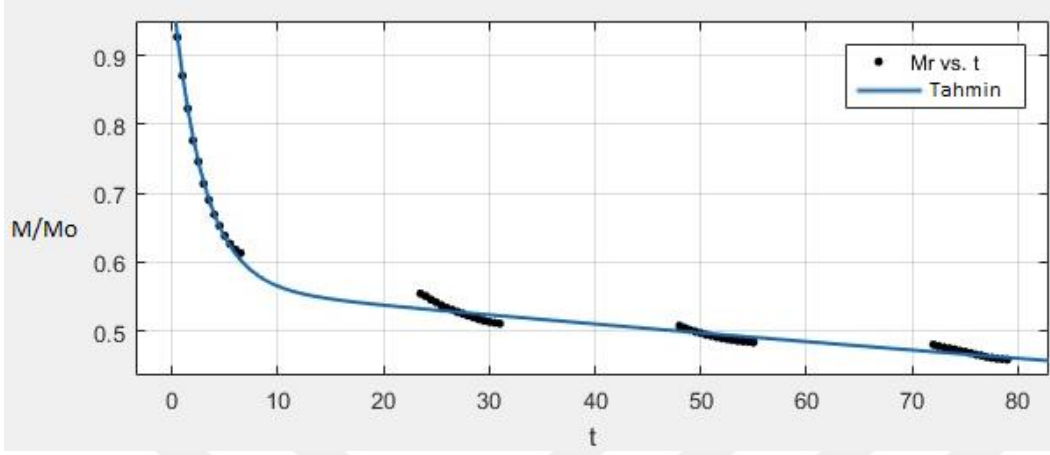
$$a = 0,4639 \quad b = 11,64 \quad c = -11,12 \quad g = 0,3677 \quad h = 0,03596 \quad k = 0,01329$$



Şekil 7.5 Kurutma kabininde kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli.

$$MR_{3dış} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$$

$$a = 0,513 \quad b = 0,4832 \quad k = 0,3464 \quad k_1 = 0,004$$



Şekil 7.6 Açık havada kurutulan üçüncü grup kurutma deneyindeki numunelerin matematiksel kuruma modeli.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş enerjili kurutmanın temeli eski zamanlara dayanmaktadır. Kurutulacak ürünlerin güneş altına serilip beklenmesi en yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemidir. Bu yöntemin maliyet olarak çok uygun olmasıyla beraber getirdiği oldukça olumsuz durum da mevcuttur. Bunlar, kirlilik, böceklenme, tozlanma gibi durumlardır. Aynı zamanda kurutma işleminde harcanan enerji tüketiminin azaltılması için en büyük yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden daha fazla yararlanmak için bu yönde çalışmalar hız kazanmıştır. Bu kapsamda yapılan bu tez çalışmasında, güneş enerjili ısıtıcılı kurutma sisteminde portakal numuneleri için kurutma işlemi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde, ince dilimler halinde kesilen portakallar güneş enerjili ısıtıcılı kurutma sisteminde kurutulmuş olup dilimler kurutma öncesi ve sonrası kütle ölçümleri yapılmıştır. Aynı zamanda açık havada kurutulan portakallar da kurutma öncesi ve sonrası tartılarak kurutma makinesinde kurutulan portakalların kurutma sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır. Ölçümü yapılacak numunelerin tespiti için tel raflar kullanılmıştır. Bu raflar sayesinde numunelerin 30 dakikada bir kütle değişimlerinin ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerin amacı numunelerdeki ortalama nem miktarı ve kurutuma hızının saptanmasıdır. Aynı zamanda, dış hava sıcaklığı, dış hava bağıl nemi, güneş ışıınımı değerleri, güneş enerjili ısıtıcı giriş ve çıkış sıcaklıkları, kurutma kabini içerisindeki bağıl neminin gün boyunca değişimi grafikler ile verilmiştir.

Kurutma deneyleri Eylül-Ekim aylarında yapılmıştır. Güneş ışıınımı değerleri yaz aylarında göreceli olarak daha yüksek olacağından, deneyler yaz aylarında yapılmış olsaydı kuruma sürelerinin daha düşük olabileceğini öngörebiliriz.

Değerlendirme aşamasında, açık havada ve kurutma kabiniinde kurutulan numuneler incelendiğinde, güneş enerjili ısıtıcılı sistemde kurutulan ürünlerin, açık sergide kurutulan ürünlere göre hem daha kaliteli olduğu, hem de kurumanın daha hızlı gerçekleştiği gözlenmiştir. Açık havada kurutulan ürünlerde kararmalar mevcutken, güneş enerjili ısıtıcılı kurutma sisteminde kurutulan ürünlerde herhangi bir kararma gözlenmemiştir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abe, T., Afzal, T.M., 1997**, Thin-layer infrared radiation drying of rough rice, *J. Agric. Engng Res.*, 67, 289-297 pp.
- Afriyie, J.K., Rajakaruna, H., Nazha, M.A.A., Forson, F.K., 2011**, Simulation and optimisation of the ventilation in a chimney-dependent solar crop dryer, *Solar Energy*, 85, Leicester, London, Kumasi, 1560-1573 pp.
- Akman, H., Çerçi, K.N., Hürdoğan, E., Büyükalaca, O., 2018**, Güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve ilk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 1-9 s.
- Akpınar, E.K., 2010**, Drying of mint leaves in solar dryer and under open sun: Modeling, performance analyses, *Energy Conversion and Management*, 51, Elâzığ, 2407–2418 pp.
- Babalıs, S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., Belessiotis, V.G., 2006**, Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*ficus carica*), *Journal of Food Engineering*, 75, 205-214 pp.
- Bal, L.M., Kar, A., Satya, S., Naik, S.N., 2010**, Drying kinetics and effective moisture diffusivity of bamboo shoot slices undergoing microwave drying, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 2321-2328 pp.
- Başaran, B., Bitlisli, B.O., Sarı, Ö., Özbaltı, N., Güngör, A., 2004**, Deri kurutulmasında yeni teknolojiler: Isı pompalı kurutucular, *I. Ulusal Deri Sempozyumu*, İzmir.
- Bulut, H., Boloğur, H., Beyazıt, N.İ., Demirtaş, Y., İşiker, Y., 2017**, Design and experimental analysis of a solar hybrid type drying system, *International Advanced Researches & Engineering Congress*, Şanlıurfa.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., 2006**, Güneş enerjili kurutma fırınında elma kurutulması, *Politeknik Dergisi*, 9(4), 289-294 pp.
- Chen, C., Wu, P. C., 2001**, Thin-layer drying model for rough rice with high moisture content, *J. Agric. Engng Res.*, 80(1), 45-52 pp.
- Chouchia, S., Boubekri, A., Mennouche, D., Berrbeuh, M.H., 2013**, Solar drying of sliced potatoes an experimental investigation, *Energy Procedia*, 36, Ouargla, 1276-1285 pp.

- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., Vasquez, A.,** 2008, Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices, *LWT – Food Science and Technology*, 41, 2023-2028 pp.
- Çakır, M.T.,** 2015, Güneş enerjisinden yararlanarak tarım ürünlerinin kurutulması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 41-56 s.
- Çelen, S., Arda, S.O., Karataşer, M.A.,** 2019, Güneş enerji destekli mikrodalga konveyör kurutucu kullanılarak kuruma davranışının modellenmesi, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 267-271 s.
- Dandamrongrak, R., Young, G., Mason, R.,** 2002, Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models, *Journal of Food Engineering*, 55, 139-146 pp.
- Diamante, L. M., Ihns, R., Savage, G.P., Vanhanen, L.,** 2010, A new mathematical model for thin layer drying of fruits, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1956-1962 pp.
- Di Scala, K., Crapiste, G.,** 2008, Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper, *LWT – Food Science and Technology*, 41, 789-795 pp.
- Doğanay, T.,** 2009, Kurutma, *Modern Farmasötik Teknoloji*.
- Doymaz, İ.,** 2004, Convective air drying characteristics of thin layer carrots, *Journal of Food Engineering*, 64, 359-364 pp.
- Doymaz, İ.,** 2004, Effect of dipping treatment on air drying of plums, *Journal of Food Engineering*, 64, 465-470 pp.
- Doymaz, İ.,** 2004, Drying kinetics of White mulberry, *Journal of Food Engineering*, 61, 341-346 pp.
- Doymaz, I., İsmail, O.,** 2011, Drying characteristics of sweet cherry, *Food and Bioproducts Processing*, 89, İstanbul, 31-38 pp.
- Dissa, A.O., Bathiebo, D.J., Desmorieux, H., Coulibaly, O., Koulidiati, J.,** 2011, Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes, *Energy*, 36, Ouagadougou, Lyon, 2517-2527 pp.
- Dissa, A.O., Bathiebo, J., Kam, S., Savadogo, P.W., Desmorieux, H., Koulidiati, J.,** 2009, Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices, *Renewable Energy*, 34, Kadiogo, Ouagadougou, Lyon, 1000-1008 pp.

- Ertekin, C., Yaldiz, O.,** 2004, Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359 pp.
- Fang, S., Wang, Z., Hu, X.,** 2009, Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*zizyphus jujuba miller*):thin layer mathematical modelling, *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 1818-1824 pp.
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Gabbasa, M., Kazem, H.A.,** 2014, Performance analysis of solar drying system for red chili, *Solar Energy*, 99, Bangi, Sohar, Oman, 47-54 pp.
- Forson, F.K., Nazha, M.A.A., Rajakaruna, H.,** 2007, Modelling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop-dryer, *Solar Energy*, 81, Kumasi, Leicester, 346-357 pp.
- Ghazanfari, A., Tabil Jr., L., Sokhansanj, S.,** 2003, Evaluating a solar dryer for in-shell drying of split pistachio nuts, *Drying Technology*, 21, 1357-1368 pp.
- Güngör, A., Özbalta, N.,** 1997, Endüstriyel kurutma sistemleri, *TMMOB, MMO, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*.
- Heldman, D.R., Lund, D.B., Dekker M.,** 1987, Handbook of Food Engineering, *Drying Technology*, New York, Basel, Hong Kong, 11(2), 415-146 pp.
- Jain, D., Pathare, P.B.,** 2004, Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices, *Biosystems Engineering*, 89(3), 289-296 pp.
- Jain, D., Tiwari, G.N.,** 2004, Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation, *Energy Conversion and Management*, 45, Ludhiana, New Delhi, 2777-2793 pp.
- Kalet, A., Gornicki, K.,** 2010, Evaluation of drying models of apple (var. mcintosh) dried in a convective dryer, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 891-898 pp.
- Karaaslan, S., Erdem, T.,** 2014, Mathematical modelling of orange slices during microwave, convection, combined microwave and convection drying, *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2, Isparta, Adana, 143-149 pp.
- Karathanos, V.T., Vasilios G, Belessiotis, V.G.,** 1999, Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits, *J. Agric. Engng Res.*, 74, 335-361 pp.

- Karathanos, V.T.**, 1999, Determination of water content of dried fruits by drying kinetics, *Journal of Food Engineering*, 39, 337-344 pp.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., Tabil, L.G.**, 2007, Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts, *Journal of Food Engineering*, 78, 98-108 pp.
- Kırtepe, E., Ozbalta, N.**, 2018, Experimental investigation of heat transfer and friction characteristics in l-footed spiral fin-tube banks, *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 38-44 pp.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Jaouhari, J.T.**, 2004, Drying kinetics of prickly pear fruit (*opuntia ficus indica*), *Journal of Food Engineering*, 61, 173-179 pp.
- Manaa, S., Younsi, M., Moummi, N.**, 2013, Solar drying of tomato in the arid area of Touat, *Energy Procedia*, 36, Adrar, Biskra, 511-514 pp.
- Milli Eğitim Bakanlığı**, “Gıdalarda nem ve kuru madde tayini, Gıda Teknolojisi”, [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Gıdalarda Nem Ve Kuru Madde Tayini.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Gıdalarda_Nem_Ve_Kuru_Madde_Tayini.pdf) (2011) (Erişim tarihi: 10 Ekim 2017)
- Ondieki, H.O., Koech, R.K., Tonui, J.K., Rotich, S.K.**, 2014, Mathematical modeling of solar air collector with a trapezoidal corrugated absorber plate, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8, Eldoret, 2277-8616 pp.
- Özbalta, N., Güngör, A.**, 2000, Kurutma sistemlerinde ısı pompası kullanım potansiyeli, III. GAP Mühendislik Kongresi, Şanlıurfa.
- Özbalta, N., Güngör, A., Küçüka, S.**, 2011, *Kurutmanın Temelleri ve Endüstriyel Kurutucular*, İzmir.
- Özdemir, M., Devres, Y.O.**, 1999, The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting, *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233 pp.
- Panchariya, P.C., Popovic, D., Sharma, A.L.**, 2002, Thin-layer modelling of black tea drying process, *Journal of Food Engineering*, 52, 349-357 pp.
- Perez-Alonso, C., Cruz-Olivares, L., Ramiez, A., Roman-Guerrero, A., Vernon-Carter, E.J.**, 2010, Moisture diffusion in allspice (*pimenta dioica* L. merril) fruits during fluidized bed drying, *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 308-312 pp.
- Ramesh, M.N., Wolf, W., Tevini D., Jung G.**, 2001, Influence of processing on the drying of spice paprika, *Journal of Food Engineering*, 49, 63-72 pp.

- Ramos, I.N., Brandao, T.R.S., Silva, C.L.M.,** 2015, Simulation of solar drying of grapes using an integrated heat and mass transfer model, *Renewable Energy*, 81, Porto, 896-902 pp.
- Ringeisen, B., Barrett, D.M., Stroeve, P.,** 2014, Concentrated solar drying of tomatoes, *Energy for Sustainable Development*, 19, California, 47-55 pp.
- Romero, V.M., Cerezo, E., Garcia, M.I., Sanchez, M.H.,** 2014, Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program, *Energy Procedia*, 57, Mexico, 1651-1658 pp.
- Sallam, Y.I., Aly, M.H., Nassar, A.F., Mohamed, E.A.,** 2015, Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection, *Journal of Advanced Research*, 6, Giza, 171-178 pp.
- Sami, S., Etesami, N., Rahimi, A.,** 2011, Energy and exergy analysis of an indirect solar cabinet dryer based on mathematical modeling results, *Energy*, 36, Isfahan, 2847-2855 pp.
- Simate, I.N.,** 2003, Optimization of mixed-mode and indirect mode natural convection solar dryers, *Renewable Energy*, 28, Lusaka, 435-453 pp.
- Smitabhindu, R., Janjai, S., Chankong, V.,** 2008, Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas, *Renewable Energy*, 33, Bangkok, Nahkon Pathom, Cleveland, 1523-1531 pp.
- Tarhan, S., Ergüneş, G., Tekelioğlu, O.,** 2007, Tarımsal ürünler için güneş enerjili kurutucuların tasarım ve işletme esasları, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, (99), 26-32 s.
- Tchinda, R.,** 2009, A review of the mathematical models for predicting solar air heaters systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, Bandjoun, Trieste, 1734-1759 pp.
- Tiris, C., Özbalta N., Tiris M., Dincer I.,** 1994, Experimental testing of a new solar dryer, *International Journal of Energy Research*, 18, 483-490 pp.
- Tiwari, A.,** 2016, A review on solar drying of agricultural produce, *Journal of Food Processing & Technology*, 7(9).
- Toğrul, İ.T.,** 2010, Modelling of heat and moisture transport during drying black grapes, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1146-1152 s.
- Toğrul, İ.T., Pehlivan, D.,** 2002, Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216 pp.

- Toğrul, İ.T., Pehlivan, D.,** 2004, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process, *Journal of Food Engineering*, 65, 413-425 pp.
- Treybal, Robert, E.,** 1968, Mass transfer operations, 2(1), New York.
- Tripathy, P.P., Kumar, S.,** 2009, A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: Application to solar drying, *Journal of Food Engineering*, 90, New Delhi, 212-218 pp.
- Tutulum.,** “Psikrometrik Diyagram”, <http://tutulum.wordpress.com/2010/03/19/psikrometrik-diyagram> (2010) (Erişim tarihi : 4 Ekim 2017)
- Tzempelikos, D.A., Mitrakos, D., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios A.E., Margaris D.P.,** 2015, Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices, *Journal of Food Engineering*, 156, Patras, Purdue, Piraeus, 10-21 pp.
- Ünal, H.G., Saçılık, K.,** 2011, Drying characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer, *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 272-279 pp.
- Yaldız, O., Ertekin, C.,** 2001, Thin layer solar drying of some vegetables, *Drying Technology*, 19(3-4), 583-597 pp.
- Yazıcı, A.D., Daş, M.,** 2018, Güneş enerjisi destekli kurutma sistemi ile elma ürününün kurutulması ve kurutma değerlerinin yapay sinir ağı ile modellenmesi, *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2(1), 8-13 pp.
- Younis, M., Abdelkarim, D., El-Abdein, A.Z.,** 2018, Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25, 332-338 pp.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Díaz, L.P., Lopez, L., Rodriguez, K., Di Scala, K.,** 2010, Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake, *Bioresource Technology*, 101, 7265-7270 pp.
- Vijayan, S., Arjunan, T.V., Kumar, A.,** 2016, Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, Coimbatore, Hat Yai, Songkhla, Bhopal, 59-67 pp.

- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., Goic, R.,** 2012, A review of solar drying technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, Chennai, Split, 2652-2670 pp.
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., Hu, X.,** 2007, Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying, *Journal of Food Engineering*, 80, 536-544 pp.
- Xanthopoulos, G., Lambrinos, Gr., Manolopoulou, H.,** 2007, Evaluation of thin-layer models for mushroom (*agaricus bisporus*) drying, *Drying Technology*, 25, 1471-1481 pp.





## ÖZGEÇMİŞ

Doğın KAYALAR, 6 Temmuz 1993 yılında İzmir’de doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Şemikler İlköğretim Okulu’nda tamamlamıştır. Şemikler Lisesi’nden 2011 yılında mezun olmuştur. 2011’de başladığı Celal Bayar Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde başladığı lisans eğitimini 2015 yılında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı’na 2015 yılında başlamıştır.



