



**GÜNEŞ TAKİP MEKANİZMALI BİR KURUTMA SİSTEMİNİN  
PERFORMANS VE OPTİMUM ÇALIŞMA  
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

**Mehmet DAŞ**

**Doktora Tezi**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Programı: Enerji**

**Danışman: Prof. Dr. Ebru AKPINAR**

**MART 2019**

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

**GÜNEŞ TAKİP MEKANİZMALI BİR KURUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANS VE  
OPTİMUM ÇALIŞMA ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet DAŞ  
(142120201)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.02.2019  
Tezin Savunulduğu Tarih : 08.03.2019**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ebru AKPINAR (F.Ü)**

**Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü)**

**Doç. Dr. Meral ÖZEL (F.Ü)**

**Doç. Dr. Atilla G. DEVECİOĞLU (D.Ü)**

**Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK (M.Ü)**

**MART 2019**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada sabit ve hareketli güneş kolektörüne sahip iki farklı kurutma sistemi incelenmiştir. Her iki kurutma sistemi için elde edilen çeşitli veriler için farklı hesapsal zeka yöntemleri uygulanmış ve kurutma sistemlerinin optimum çalışma şartları bu hesapsal zeka yöntemleri ile belirlenmiştir. Tez çalışması için gerekli deney seti FÜBAP koordinatörlüğü MF 16.54 numaralı proje ile temin edilmiştir. Bu çalışmada öncelikle her konuda desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ebru AKPINAR'a, hesapsal zeka yöntemleri için destek aldığımız Doç. Dr. Bilal ALATAŞ'a, tez çalışmamızın işleyişini takip eden Prof. Dr. Cengiz YILDIZ ve Prof. Dr. Ahmet Bedri ÖZER'e, doktora eğitimim boyunca yardımını esirgemeyen eşim Gül DAŞ'a ve iki sene önce aramız katılan kızım Elif Gülce DAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet DAŞ  
ELAZIĞ – 2019

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                           | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ .....                                                                               | III             |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                          | IV              |
| ÖZET .....                                                                                | VI              |
| ABSTRACT .....                                                                            | VII             |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                    | VIII            |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                                    | XII             |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                                                   | XIII            |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                                                 | XV              |
| 1.GİRİŞ.....                                                                              | 1               |
| 2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR.....                                                          | 5               |
| 3. DENEY SETİ.....                                                                        | 14              |
| 3.1. Ölçülen Değerlerin Hata Analizi .....                                                | 19              |
| 3.1.1. Sıcaklık ölçümünde yapılan hatalar.....                                            | 20              |
| 3.1.2. Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar .....                                         | 21              |
| 3.1.3. Ağırlık kayıplarının ölçümünden kaynaklanan hata.....                              | 21              |
| 3.1.4. Hız ölçümünden kaynaklanan hatalar.....                                            | 22              |
| 3.1.5. Havanın bağıl neminin ölçümünden kaynaklanan hatalar.....                          | 22              |
| 3.1.6. Örneklerin bünyesindeki nem miktarının tespit edilmesinde ortaya çıkan hatalar ... | 22              |
| 3.1.7. Güneş takip sisteminde ortaya çıkan hatalar .....                                  | 22              |
| 3.1.8. Diğer hatalar .....                                                                | 23              |
| 3.2. Ölçülen Değerlerden Kaynaklanan Toplam Hatalar .....                                 | 23              |
| 4. TEORİK BİLGİLER .....                                                                  | 28              |
| 4.1. Nemlilik Ölçüsü.....                                                                 | 28              |
| 4.2. Tarım Ürünlerinde Kurumanın Oluşum Kuramı ve Kurumanın Evreleri .....                | 28              |
| 4.3. İnce Tabaka Kuruma Kuramı .....                                                      | 31              |
| 4.3.1 Sabit Hızda Kuruma Evresi .....                                                     | 31              |
| 4.3.2. Azalan Hızla Kuruma Evresi .....                                                   | 34              |
| 4.3.2.1. Azalan hızla kuruma evresi ile ilgili teorik modeller .....                      | 34              |

|                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.2.2. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilmiş yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri ..... | 37         |
| 4.3. Aktivasyon Enerjisi .....                                                                                   | 39         |
| 4.4. Termodinamik analizi.....                                                                                   | 41         |
| 4.4.1. Enerji Analizi.....                                                                                       | 41         |
| 4.4.1.1. Güneş kolektörlü gıda kurutucunun enerji analizi.....                                                   | 42         |
| 4.4.2. Ekserji Analizi .....                                                                                     | 43         |
| 4.4.2.1. Güneş kolektörlü gıda kurutucunun ekserji analizi .....                                                 | 44         |
| 4.5. Konvektif Isı Transfer Katsayısı .....                                                                      | 47         |
| <b>5. HESAPSAL ZEKA YÖNTEMLERİ.....</b>                                                                          | <b>50</b>  |
| 5.1. Yapay Sinir Ağları.....                                                                                     | 51         |
| 5.2. Regresyon Analizi ve Karar Ağacı.....                                                                       | 52         |
| 5.3. Destek Vektör Makinesi .....                                                                                | 53         |
| 5.3.1. Doğrusal destek vektör regresyon .....                                                                    | 54         |
| 5.3.2. Doğrusal olmayan destek vektör regresyon.....                                                             | 55         |
| <b>6. BULGULAR .....</b>                                                                                         | <b>58</b>  |
| 6.1. Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Olarak Modellenmesi .....                                                   | 76         |
| 6.1.1. Zamanla Nem Oranı Değişiminin Modellenmesi.....                                                           | 77         |
| 6.2. Difüzyon Katsayısı Bulguları .....                                                                          | 79         |
| 6.3. Aktivasyon Enerjisi Hesabı Bulguları .....                                                                  | 80         |
| 6.4. Enerji ve Ekserji Analizi Bulguları .....                                                                   | 82         |
| 6.5. Hesapsal Zekâ Yöntemleri İle Konvektif Isı Transferi Tahminsel Değerleri .....                              | 88         |
| 6.5.1. YSA İle Elde Edilen Konvektif Isı Transferi Tahminsel Model Değerleri.....                                | 88         |
| 6.5.2. Karar Ağacı İle Elde Edilen Konvektif Isı Transferi Tahminsel Model Değerleri ...                         | 89         |
| 6.5.3. Destek Vektör Makinesi (DVM) İle Elde Edilen Konvektif Isı Transferi Tahminsel Model Değerleri.....       | 90         |
| 6.5.4. Hesapsal zekâ yöntemleri ile yapılan tahminsel modellerin hata analizleri.....                            | 95         |
| <b>7. SONUÇLAR.....</b>                                                                                          | <b>96</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                            | <b>100</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                            | <b>112</b> |

## ÖZET

Bu çalışmada sabit ve hareketli havalı güneş kolektörlerine sahip güneş enerjisi destekli gıda kurutma sistemleri tasarlanmıştır. Tasarlanan kurutma sistemlerinde iki adet 1400x800x100 mm ölçülerinde hava ısıtmalı güneş kolektörleri (HIGK) kullanılmıştır. Güneş ışınlarından yeterince faydalanmak için HIGK'ne programlanabilir kontrol sistemi (PLC) yardımı ile güneş takip özelliği kazandırılmıştır. Güneş takip özelliğine sahip HIGK'li kurutma sisteminin performansını karşılaştırmak için sabit HIGK'ne sahip kurutma sistemi ile aynı anda armut dilimleri kurutulmuştur. Her iki kurutma sisteminde kurutulacak armut numuneleri ortalama 10 mm kalınlığında eşit dilimler haline getirilerek kurutma işlemine alınmıştır. Kurutulacak armut dilimleri her iki kurutma sisteminde 3 farklı fan devrinde kurutulmuştur. Kurutma deney verilerinden armut dilimlerinin kuru baz nem içeriği, yaş baz nem içeriği, boyutsuz nem oranı, kuruma hızı, konvektif ısı transfer katsayısı, difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi değerleri ve güneş kolektörlerinin ısı verimleri hesaplanmıştır. Armut ürününün kuruma eğrileri, literatürde bulunan 13 adet kuruma modeli ile ifade edilmeye çalışılmış ve bu modeller arasından armut ürünü için en uygun kuruma modeli seçilmiştir. Ayrıca her iki kurutma sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda belirli periyotlarda elde edilen kütle kaybı, sıcaklık, bağıl nem değerleri ve güneş ışınım şiddeti değerleri kullanılarak kurutma kinetiği ve kurutma sisteminin performansı araştırılmıştır. Sabit ve hareketli güneş kolektörlerine sahip kurutma sistemlerinde ürün kalitesi ve kurutma etkinliği hakkında karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen kurutma verileri için destek vektör makinesi, karar ağacı ve yapay sinir ağı gibi hesapsal zekâ yöntemleri kullanılarak tahminsel modeller oluşturulmuştur. Elde edilen tahminsel modeller ile her iki kurutma sistemi için optimum çalışma şartları belirlenmiştir. Güneş takip özelliğine sahip kurutma sisteminin diğer kurutma sistemine göre %40 daha fazla ısı verime sahip olduğu, ortalama ekserji veriminin %45' den daha fazla olduğu ve ortalama kurutma süresinin %38 daha az olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kurutma, Güneş takip sistemi, Konvektif ısı transfer katsayısı, Destek vektör makinesi, Yapay sinir ağları, Karar ağacı

## ABSTRACT

### **Determination of Performance And Optimum Working Conditions of A Drying System With Solar Tracking Mechanism**

In this study, solar energy supported food drying systems with fixed and moving air solar collectors are designed. 2 units of 1400x800x100 mm air heated solar collectors (HIGK) are used in the designed drying systems. In order to benefit from the sun's rays, solar tracking feature is provided by HIGH ilene programmable control system (PLC). In order to compare the performance of the AHSC drying system with the solar tracking feature, the pear slices were dried at the same time with the fixed AHSC drying system. In both drying systems, the pear samples to be dried were made into pieces of slices with an average thickness of 10 mm. The pear slices to be dried were dried in 3 different fan cycles in both drying systems. Dry base moisture content, wet base moisture content, non-dimensional moisture content, drying rate, convective heat transfer coefficient, diffusion coefficient, activation energy values and thermal efficiency of solar collectors were calculated from drying experiment data. The drying curves of the pear product were tried to be expressed with the 13 model models in the literature and the most suitable drying model was selected for the pear product among these models. Energy and exergy analyzes of both drying systems were performed. As a result of the experiments, the drying kinetics and the performance of the drying system were investigated by using the mass loss, temperature, relative humidity values and solar radiation intensity obtained in certain periods. In drying systems with fixed and moving solar collectors, comparisons were made on product quality and drying efficiency. Predictive models have been developed using computational intelligence methods such as support vector machine, decision tree and artificial neural network for drying data obtained. Optimal working conditions for both drying systems were determined by the predicted models. It has been found that the solar tracking system has 40% more thermal efficiency than the other drying system, the average exergy efficiency is 45% more and the average drying time is 38% less.

**Keywords:** Drying, Solar tracking system, Convective heat transfer coefficient, Support vector machine, Artificial neural networks, Decision tree

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                          | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 3.1. PLC şematik gösterim .....                                                                                                                    | 14              |
| Şekil 3.2. Deney Seti (1-Hava ısıtmalı güneş kollektörü, 2-Kurutma odası) .....                                                                          | 15              |
| Şekil 3.3. Ölçüm noktaları.....                                                                                                                          | 17              |
| Şekil 3.4. PLC güneş takip sistemi.....                                                                                                                  | 18              |
| Şekil 3.5. Deney Seti Şematik Gösterimi .....                                                                                                            | 19              |
| Şekil 4.1. Arrhenius grafiği .....                                                                                                                       | 40              |
| Şekil 4.2. Güneş kollektörlü gıda kurutucunun kontrol hacmi .....                                                                                        | 42              |
| Şekil 4.3. Ekserji analizi için kurutma sisteminin kontrol hacmi.....                                                                                    | 45              |
| Şekil 4.4. Düz bir plaka üzerinde zorlanmış akış için konvektif ısı transferi.....                                                                       | 48              |
| Şekil 5.1. YSA yapısı .....                                                                                                                              | 51              |
| Şekil 5.2. Dört boyutlu özellik uzayına sahip üç sınıftan oluşan karar ağacı yapısı .....                                                                | 53              |
| Şekil 6.1. Hareketli HIGK kurutma sisteminde armut ürününün farklı fan devirlerindeki ürün ağırlığının zamana göre değişim değerleri .....               | 58              |
| Şekil 6.2. Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi .....                 | 59              |
| Şekil 6.3. Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan yaş baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi .....                  | 60              |
| Şekil 6.4. Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan nem oranı değerlerinin zamanla değişimi .....                            | 60              |
| Şekil 6.5. Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kurutma hızı değerlerinin zamanla değişimi .....                         | 61              |
| Şekil 6.6. Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan güneş kollektörü ısı verim ( $\eta$ ) değerlerinin zamanla değişimi..... | 62              |
| Şekil 6.7. Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan $h_c$ değerlerinin zamanla değişimi .....                                | 62              |
| Şekil 6.8. Sabit HIGK kurutma sisteminde armut ürününün farklı fan devirlerindeki ürün ağırlığının zamana göre değişimi değerleri.....                   | 63              |
| Şekil 6.9. Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi .....                     | 64              |

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.10.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan yaş baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi .....                                    | 64 |
| <b>Şekil 6.11.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan nem oranı değerlerinin zamanla değişimi .....                                              | 65 |
| <b>Şekil 6.12.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kuruma hızı değerlerinin zamanla değişimi .....                                            | 66 |
| <b>Şekil 6.13.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan güneş kollektörü ısı verim ( $\eta$ ) değerlerinin zamanla değişimi.....                   | 66 |
| <b>Şekil 6.14.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan $h_c$ değerlerinin zamanla değişimi .....                                                  | 67 |
| <b>Şekil 6.15.</b> Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması .....                                 | 69 |
| <b>Şekil 6.16.</b> Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde yaş baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması .....                                  | 69 |
| <b>Şekil 6.17.</b> Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde nem oranının zamanla değişiminin karşılaştırılması.....                                                       | 71 |
| <b>Şekil 6.18.</b> Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde kuruma hızının zamanla değişiminin karşılaştırılması.....                                                     | 72 |
| <b>Şekil 6.19.</b> Hareketli ve sabit HIGK kurutma sistemlerinde güneş kollektörlerinin ısı verim değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması.....                      | 73 |
| <b>Şekil 6.20.</b> Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin zamanla değişimi .....                                          | 75 |
| <b>Şekil 6.21.</b> Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde yapılan kurutma işlemlerinde armut ürününün zamana bağlı ağırlık değişim değerlerinin karşılaştırılması ..... | 75 |
| <b>Şekil 6.22.</b> Midilli ve Küçük modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneysel nem oranı değerleri .....                                                               | 79 |
| <b>Şekil 6.23.</b> Sabit ve Hareketli HIGK kurutma sisteminde fan devir sayısına göre difüzyon katsayısı değerlerinin değişimi.....                                            | 80 |
| <b>Şekil 6.24.</b> Hareketli HIGK kurutma sisteminde aktivasyon enerjisi değerlerinin ortalama kurutma sıcaklığına göre değişimi .....                                         | 81 |
| <b>Şekil 6.25.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde aktivasyon enerjisi değerlerinin ortalama kurutma sıcaklığına göre değişimi .....                                             | 81 |

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.26.</b> Hareketli HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki EKO değerlerinin zamanla değişimi.....                                                           | 82 |
| <b>Şekil 6.27.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % EKO değerlerinin zamanla değişimi.....                                                             | 83 |
| <b>Şekil 6.28.</b> Hareketli HIGK kurutma sisteminde 1690 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi.....                                          | 83 |
| <b>Şekil 6.29.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde 1690 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi .....                                             | 84 |
| <b>Şekil 6.30.</b> Hareketli HIGK kurutma sisteminde 1400 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi.....                                          | 84 |
| <b>Şekil 6.31.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde 1400 (dev/dak) fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi.....                                            | 85 |
| <b>Şekil 6.32.</b> Hareketli HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi.....                                           | 85 |
| <b>Şekil 6.33.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi .....                                              | 86 |
| <b>Şekil 6.34.</b> Hareketli HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % ekserji verim değerlerinin zamanla değişimi .....                                              | 87 |
| <b>Şekil 6.35.</b> Sabit HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % ekserji verim değerlerinin zamanla değişimi .....                                                  | 87 |
| <b>Şekil 6.36.</b> Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile YSA tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....                    | 88 |
| <b>Şekil 6.37.</b> Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile YSA tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....                        | 89 |
| <b>Şekil 6.38.</b> Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile Karar Ağacı tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....            | 89 |
| <b>Şekil 6.39.</b> Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile Karar Ağacı tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması .....               | 90 |
| <b>Şekil 6.40.</b> Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM Normalize Poly Kernel ile tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....     | 91 |
| <b>Şekil 6.41.</b> Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM Normalize Poly Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması ..... | 91 |

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.42.</b> Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM Poly Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması..... | 92 |
| <b>Şekil 6.43.</b> Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM Poly Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....     | 92 |
| <b>Şekil 6.44.</b> Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM PUK Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....  | 93 |
| <b>Şekil 6.45.</b> Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM PUK Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....      | 93 |
| <b>Şekil 6.46.</b> Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM RBF Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....  | 94 |
| <b>Şekil 6.47.</b> Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal $h_c$ değerleri ile DVM RBF Kernel tarafından tahmin edilen $h_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....      | 94 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                                       | <u>Sayfa No</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 4.1.</b> Literatürde bulunan bazı kuruma eğrisi modelleri .....                                                              | 39              |
| <b>Tablo 5.1.</b> DVM’de kullanılan temel kernel fonksiyonları ve parametreleri .....                                                 | 56              |
| <b>Tablo 5.2.</b> Hata analizleri.....                                                                                                | 57              |
| <b>Tablo 6.1.</b> Literatürde armut ürünü için hesaplanmış nem içerikleri değerlerleri .....                                          | 68              |
| <b>Tablo 6.2.</b> Literatürde armut ürünü için hesaplanmış nem oranı değerlerleri .....                                               | 70              |
| <b>Tablo 6.3.</b> Literatürde armut ürünü için hesaplanmış kuruma hızı değerlerleri .....                                             | 71              |
| <b>Tablo 6.4.</b> Literatürde armut ürünü için bulunan $h_c$ değerleri .....                                                          | 74              |
| <b>Tablo 6.5.</b> Armut örnekleri için elde edilen nem oranı değerlerine uygulanan modellerin<br>istatistiksel analiz sonuçları ..... | 78              |
| <b>Tablo 6.6.</b> Literatürde armut ürünü için difüzyon katsayısı hesaplamaları .....                                                 | 79              |
| <b>Tablo 6.7.</b> Hata analizi değerleri.....                                                                                         | 95              |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                         |                                                                                |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A<sub>c</sub></b>    | : Güneş ışınlamının direkt olarak vurduğu yutucu plaka yüzey (m <sup>2</sup> ) |
| <b>A<sub>k</sub></b>    | : Kollektörün çıkış kesit alanı (m <sup>2</sup> )                              |
| <b>C<sub>p</sub></b>    | : Kurutma havası özgül ısı değeri (Kj/kgK)                                     |
| <b>C<sub>v</sub></b>    | : Nemli havanın özgül ısısı (J/kg°C)                                           |
| <b>DR</b>               | : Kuruma hızı (g <sub>su</sub> /g <sub>kmadde.dak</sub> )                      |
| <b>EKO</b>              | : Enerji kullanım oranı %                                                      |
| <b>h, h<sub>c</sub></b> | : Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)                        |
| <b>I</b>                | : Kollektör yüzeyine gelen güneş ışınlamı (W/m <sup>2</sup> )                  |
| <b>MR</b>               | : Nem oranı (g <sub>su</sub> /g <sub>kmadde</sub> )                            |
| <b>M<sub>o</sub></b>    | : Ürünün ilk nem içeriği (g <sub>su</sub> /g <sub>kmadde</sub> )               |
| <b>M<sub>t</sub></b>    | : Ürünün t anındaki nem içeriği (g <sub>su</sub> /g <sub>kmadde</sub> )        |
| <b>M<sub>t+Δt</sub></b> | : Ürünü t+Δt anındaki nem içeriği (g <sub>su</sub> /g <sub>kmadde</sub> )      |
| <b>M</b>                | : Nem içeriği (% veya g <sub>su</sub> /g <sub>kmadde</sub> )                   |
| <b>Nu</b>               | : Nusselt sayısı                                                               |
| <b>Pr</b>               | : Prandtl sayısı                                                               |
| <b>Re</b>               | : Reynolds sayısı                                                              |
| <b>S</b>                | : Entropi (kJ/kgK)                                                             |
| <b>t</b>                | : Zaman (dk)                                                                   |
| <b>T<sub>i</sub></b>    | : Kollektör hava giriş sıcaklığı (°C)                                          |
| <b>T<sub>o</sub></b>    | : Kollektör hava çıkış sıcaklığı (°C)                                          |
| <b>K<sub>v</sub></b>    | : Nemli havanın ısı iletkenliği (W/m°C)                                        |
| <b>T<sub>a</sub></b>    | : Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (°C)                             |
| <b>T<sub>y</sub></b>    | : Ürün yüzey sıcaklığı (°C)                                                    |
| <b>T<sub>o</sub></b>    | : Ortam sıcaklığı (°C)                                                         |
| <b>T<sub>i</sub></b>    | : Ortalama sıcaklık                                                            |
| <b>V</b>                | : Hava akış hızı (m/s)                                                         |
| <b>W<sub>k</sub></b>    | : Ürün içerisindeki kuru madde kütlesi (g)                                     |
| <b>W<sub>s</sub></b>    | : Ürün içerisindeki suyun kütlesi (g)                                          |
| <b>ρ</b>                | : Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )                                       |
| <b>m</b>                | : Kütleli debisi (kg/s)                                                        |

|                       |                                                                |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|
| $\eta$                | : Isıl verimi (%)                                              |
| $\eta_{\text{ex}}$    | : Ekserjetik verim (%)                                         |
| $\mu_v$               | : Nemli havanın dinamik viskozitesi (kg/m)                     |
| $\rho_v$              | : Hava neminin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )                  |
| $\dot{E}x, \text{ex}$ | : Ekserji (kW)                                                 |
| $f$                   | : Etki faktörü                                                 |
| $r$                   | : Yarı çap (m)                                                 |
| $\omega$              | : Mutlak nem (kg <sub>subuhar</sub> /kg <sub>kuru hava</sub> ) |



## KISALTMALAR LİSTESİ

|            |                       |
|------------|-----------------------|
| <b>ç</b>   | : çıkış               |
| <b>g</b>   | : giriş               |
| <b>khg</b> | : kontrol hacim giriş |
| <b>khç</b> | : kontrol hacim çıkış |
| <b>k</b>   | : kayıp               |
| <b>kg</b>  | : kurutucu giriş      |
| <b>kç</b>  | : kurutucu çıkış      |

## 1.GİRİŞ

Türkiye İstatistik Kurumu (2018) verilerine göre Türkiye’de toplam meyve ve sebze üretimi 52.5 milyon ton olarak ifade edilmektedir. Bu üretim kapasitesinin 22.1 milyon tonunu meyve üretimi, 30.4 milyon tonunu ise sebze üretimi oluşturmaktadır [1].

Günümüzde ürünlerin daha teknik metotlarla kurutulup iç ve dış piyasaya daha kaliteli olarak sürülmesi son derece önemli hale gelmiştir. Üründeki kalite değerleri ürünün son nem miktarı (kurutma sonrası), ürünün kurutma sonrası su aktivitesi değeri, üründeki aflatoksin miktarı, ürünün aroması, ürünün rengi ve ürünün dayanıklılığı olarak sıralanabilir. Gıdaların kurutulması, insanlığın tabiattan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Kurutma işlemi tabiatla çoğu zaman kendi kendine gerçekleşmekte ve örneğin, çeşitli tahıllar, baklagiller ve zirai ürünler tarlada kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir. Gıda maddelerinde kurutma işlemi daha çok meyve ve sebzelere uygulanmaktadır. Kuru meyvelerin anavatanı ve binlerce yıllık üretim alanı olan Türkiye’de kuru meyveler tarih boyunca ve günümüzde özellikle dış ticaret gelirlerine önemli katkılarda bulunmaktadır [2].

Kurutma, bir madde içinde bulunan sıvının uzaklaşmasıdır. Kurutma ise; kurutulacak ürün neminin uzaklaştırılarak ürünün istenilen kuruluk değerine indirgenmesi olarak tanımlanır. Gıdalarda kurutma tekniği, insanlığın doğadan öğrendiği ve gıdaların bozulmadan uzun süre saklanabilmesi için çok eskiden beri uyguladığı bir yöntemdir. Endüstriyel bir proses olan kurutma işlemi kimya, tekstil, seramik, inşaat malzemeleri, kereste, kağıt, gıda ve tarımsal ürünlerin kurutulması gibi birçok alanda oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu alanlarda kurutma işlemi ile ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesinin yanı sıra, nemden korunması, hacim ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma ve işleme kolaylığı vb. avantajlar sağlanmaktadır [3].

Dünya’da ve Türkiye’de meyve ve sebzelerin kurutulmasında kullanılan en yaygın kurutma yöntemi açık havada güneş ile yapılan kurutmadır. Tropikal ülkelerde güneş altında kurutma yaygın olarak uygulanmaktadır. Çünkü güneş enerjisi tükenmez ve kirlenici olmayan yenilenebilir, ucuz ve çevre dostu kaynaktır. Güneş altında kurutmanın tek sorunu diğer kurutma proseslerine göre kurutma süresinin yavaş olmasıdır [4].

Güneş, insanlık tarihi boyunca mevcut en büyük karbon içermeyen enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinin birincil enerji kaynağı olarak nasıl kullanılacağını ve uygulanacağını

öğrenmek için birçok araştırma yapılmıştır [5]. Genellikle, güneş enerjisi uygulaması iki temel gruba ayrılır. Birincisi, doğrudan güneş enerjisini elektriğe dönüştüren fotovoltaik hücreleri kullanarak elektrik üretimi ve diğer ana grup ise güneşle kurutma işleminin dahil olduğu termal uygulama kategorisidir [6].

Güneş enerjisinden yararlanarak açık sergide yapılan kurutmada toz, toprak, yağmur, mikroorganizma üremesi, sergi yerlerinde dolaşan çeşitli böcek ve hayvanlar ve kurutma mevsimindeki kararsız meteorolojik şartlar ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla kontrollü şartlarda kurutmanın gerekliliği güneş enerjisinden yararlanma tekniklerini de değiştirmiştir [7].

Güneş enerjisi ile ısıtılan havanın kurutmada kullanımı ile ilgili çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Kabin, çadır, sera, tünel tipi güneş enerjili kurutucular ve havalı güneş kollektörlü kurutucular en yaygın sistemlerdir. Aktif ve pasif tip olarak bulunan kabin kurutucular; kurutulacak ürünlerin bir tabla içinde kurutulduğu ve üst yüzeyi güneş ışınımını geçiren saydam örtüyle kaplı bir ısı kutusu şeklindedir. Hava kurutucuya genellikle alttan girmekte, rafların altından, üstünden ve arasından geçerek üstten çıkmaktadır [8].

Kurutulacak ürün miktarının fazla olması ve yavaş kurutulması gereken ürünlerde tünel tipi kurutucular tercih edilmektedir. Kurutma için gerekli olan ısıtma işlemi direk tünel içinde yapılabileceği gibi tünel dışında bir güneş kollektörü ile yapıp bir fan yardımıyla tünel içine ulaştırılabilmektedir. Sera tipi kurutucular, bitkisel üretim için kullanılan seraların kurutma amacına uygun olarak değiştirilmiş biçimleridir. Kontrol imkânları daha geniş olup kurutulacak ürün miktarının çok olduğu durumlarda tercih edilmektedir [9].

Havalı güneş kollektörlü kurutucular ise bir güneş enerjili hava kollektörü, bir fan ve kurutma hücresinden oluşur. Klasik bir güneş enerjili hava kollektörü, bir yutucu plaka, hava akımının geçişi için paralel plaka veya plakalardan meydana gelmiş bir kısım, en üstte bir cam veya plastik örtü, alt ve yan kısımlarında ise yalıtılmış bir kasadan ibarettir. Güneş enerjili hava kollektörleri oldukça farklı tasarımlarda üretilmelerine rağmen, temel olarak çalışma prensipleri aynıdır. Yutucu yüzey olarak kullanılan çeşitli yüzey profillerine sahip levhalar, aralarında boşluk kalacak şekilde üst üste yerleştirilir ve bu boşluktan geçirilen havanın yutucu yüzeye temas etmesi sağlanır. Bu temas ile yutucu yüzey tarafından absorbe edilen ısı sayesinde sıcaklığı artan hava, kollektörden sıcak hava olarak dışarı çıkar [10, 11].

Bu çalışmada sabit ve hareketli havalı güneş kollektörlü gıda kurutma sistemlerinde armut ürünü kurutulmuştur. Seçilen armut cinsi Santa Maria'dır. Armut, gülgiller (Rosaceae) familyasının Maloideae alt familyasında sınıflanan *Pyrus* cinsine ait ağaç

nitelikli bitki türleriyle, bu türlerden bazılarının yenilebilir meyvelerinin ortak adıdır. Armut, elma ve üzümden sonra üçüncü önemli ılıman iklim meyvesini oluşturmaktadır [12].

Ülkemizde armut üretimi benzer yetiştirme, muhafaza ve değerlendirme özelliklerine sahip olan elma üretimi kadar hızlı bir gelişme gösterememiştir. Armut yumuşak çekirdekli meyveler içerisinde ikinci önemli meyve türüdür. Armut yetiştiriciliği genellikle kapama bahçeler halinde değil, değişik tarım arazilerinde dağınık popülasyon halindeki ahlut veya yabani armutlara aşılansarak yetiştirilmektedir. Kültüre alınan çeşitlerin çoğu ya *Pyrus communis* (Avrupa armudu) ya da *P. serotina* (Japon armudu) kökenlidir [13].

Yılın belirli sürelerinde bolca temin edilebilen tarımsal ürünlerin tüketilinceye kadar geçen süre içinde değerlerinden en az kayıpla saklanması için uygulanan işlemler arasında soğukta saklamak, dondurmak, kimyasallarla işlemek, kurutma vb. sayılabilir. Bu işlemler içinde bilinen en eski ve yaygın uygulama kurutmadır. Kurutulmuş gıdalar, diğer muhafaza yöntemlerinden farklı olarak, besin öğeleri açısından yoğunlaştırılmış nitelik kazanmaktadır. Ülkelerin tarımsal kalkınması ve ekonomisinde önemli yer tutan kuru ve kurutulacak meyvelerin, dünya pazarlarındaki yeri de oldukça önemlidir [14].

Gıdaların muhafazası içerisinde kendine en geniş uygulama alanı bulan yöntem kurutmadır, kurutmanın birçok amacı vardır. Bunlardan en önemli olanı depolama sırasında ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma ile ürünün nemi mikrobiyal gelişme ve diğer reaksiyonları sınırlamaya yeterli seviyeye düşürülerek bu amaca ulaşılır. Ayrıca nem miktarının düşürülmesiyle tat, koku ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin de korunması sağlanmaktadır. Kurutma işleminin diğer bir amacı da, ürün hacmini azaltarak, taşınma ve depolanmasında verimliliği arttırmaktır [15].

Gelişmekte olan ülkelerin çoğunda, uygun miktarda depolamanın bulunmaması nedeniyle büyük miktarda yiyecek ve tahıl depolanamaz. Yiyeceklerin kurutulması, raf ömrünü uzatmanın, kalitesinin artırılmasının ve depolama sırasında kayıpların en aza indirgenmesinin etkili bir yoludur; çünkü bu işlem sırasında suyun çoğu ürünün dışına çıkar. Güvenli kurutma için 45-60°C sıcaklık aralığında sıcak hava gerekir [16]. Güneş kurutucusunda ürün, güneş enerjisi ile hava ısıtıcısı olarak bilinen bir cihazda üretilen sıcak hava yardımıyla kapalı bir alanda veya bir kurutma dolabında yüksek bir sıcaklıkta kurutulur. Bu kurutma doğrudan açık güneş kurutmasıyla karşılaştırıldığında verimli bir kurutma işlemidir. Ürün, güneş kurutucusunda, açık güneş kurutmaya göre yüksek sıcaklık ve düşük bağıl nem ile kurutulur. Birçok tarımsal ürün için daha uygun kurutma havası

sıcaklığı 45 - 60°C arasındadır ve bu değerler arasındaki değişen kurutma havası sıcaklığında ürünler hava ısıtmalı güneş kolektörlü kurutma sistemleri ile kurutulabilir [17].

Güneş enerjisi ile havanın ısınmasını sağlayan hava ısıtmalı güneş kolektörlere sahip gıda kurutma sistemlerinde havalı kolektörün tasarımı kurutma performansı bakımından oldukça önemlidir. Genellikle kolektörlerin belirli açılarda güneş ışınlarından faydalanmak üzere sabitlenerek kullanıldığı bu kurutma sistemlerinin ısı verimleri güneşin hareketine göre değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada güneş enerjisinden etkin bir şekilde faydalanmak ve kurutma performansını arttırmak için havalı güneş kolektörüne güneş takip özelliği kazandırılmıştır. Güneş takip özelliği, programlanabilir kontrol sistemi (PLC) ile gerçekleştirilmiştir. Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesiyle oluşan güneşin farklı konumlarını ve farklı açılarını takip edebilen bu sistem sayesinde, güneş ışınları gün içerisinde kolektör yüzeyine sürekli olarak dik açı ile gelecek ve bu da kolektör verimini artıracaktır. Sabit ve hareketli havalı güneş kolektörlerine sahip kurutma sistemlerinde kurutulan armut ürününün kurutma değerleri, konvektif ısı transfer katsayısı ve kolektör verimleri hesaplanmıştır. Sabit ve hareketli kolektöre sahip kurutma sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar, her iki kurutma sistemine bağlı fan devir değerlerine göre yapılmıştır. Her iki sistemde kurutulan armut ürünü için kurutma davranışlarını ifade edebilen kurutma modelleri incelenmiş ve bu modeller içerisinde armut ürününün kuruma davranışlarını en iyi ifade eden model belirlenmiştir. Her iki sistemde kurutulan armut ürününe ait konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) hesaplanmıştır. Hesaplanan  $h_c$  değerleri için çeşitli hesapsal zekâ yöntemleri kullanarak tahminsel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan tahminsel modellerin hata analiz değerleri karşılaştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Kurutma ile ilgili yurtiçi ve yurtdışı birçok kıymetli çalışma bulunmaktadır. Armut kurutma ile alakalı güncel literatürde son yıllarda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Karacabey ve Buzrul [18], çalışmalarında sıcak havalı kurutucuda armut ürünü kurutmuşlardır. 40, 50, 60, 70 ve 80°C'de armut kurutma verilerini Weibull modeli ile tarif etmişler ve Weibull modelinin şekil parametresinin sıcaklığa bağlı olmadığını gözlemişlerdir. Yayınlanmış verilerle yapılan kinetik analizler, indirgenmiş Weibull modelinin, belirli meyvelerin kurutma verisini tanımlamak için başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Lahsasni ve ark. [19] çalışmalarında, hava debisi ayarlanabilir yardımcı bir ısıtma sistemi ile çalışan konvektif güneş kurutucusundaki armut meyvesinin kurutma kinetiği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. 50-60 °C kurutma sıcaklığı aralığında, 23-34 % retatif nem değerinde, 250-900 W/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu altına armutun kurutma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Proietti ve ark. [20], oluklu alüminyum plakalı güneş kollektörüne sahip gıda kurutma sisteminde armut ürünü kurutmuşlardır. Güneş kollektöründeki emici plaka, iki oluklu alüminyumdan oluşmuştur. İki oluklu levha, kollektör boyunca havanın dolaşmasına izin veren paralel silindirler şeklinde kollektör içine sabitlenmiştir. Armut numunelerinin kuruduktan sonra, kütlesinin 997.3 g'dan 135.13 g'a düştüğünü göstermişlerdir. Kurutma odasının ortalama ısı veriminin % 11.11 olduğunu belirtmişlerdir. Joardder ve ark. [21], sürekli bir konvektif kurutucuda armutların kuruma davranışını temsil etmek için önceden geliştirilmiş difüzyon bazlı modeller ile farklı çalışma koşullarında kurutma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Armut meyvesinin kimyasını, fiziksel ve ısı özelliklerini zamana bağlı değişmesini incelemişlerdir. Kurutma deneylerini, % 0.5 ile 1.5 m/s arasında değişen değişken bir hızda ve % 60 bağıl nem içeren bir hava ile 30, 40 ve 50°C'de gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları kurutma modellerinin, armut ürününün kurutma davranışlarını yeterince iyi açıkladığını göstermişlerdir. İzli [22], farklı kurutma uygulamaları ile armut meyvesini kurutmuş ve kuruma sırasında armut meyvesinin ürün kalite özelliklerini incelemiştir. Mikrodalga-sıcak hava kombinasyonlu kurutma sisteminde küp ve halka şeklinde hazırlanan armut meyvelerinin kurutma sonrası renk parametrelerini, toplam fenolik madde miktarını ve antioksidan kapasitesini tespit etmiştir. Laboratuvar tipi mikrodalga-sıcak hava fırını kullanılarak gerçekleştirdiği denemelerde iki

farklı mikrodalga gücü (90W ve 160W) ve üç farklı kurutma sıcaklığı (55, 65 ve 75°C) uygulanmıştır. Armut ürününün 160W ve 65°C değerlerinde yapılan kurutmada daha kaliteli olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada öncelikle hava kollektörü tip kurutucularla ilgili literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir. Kırbaş ve ark. [23], güneş takip mekanizması kullanarak hava ısıtılmalı güneş kollektörlerinde güneş enerjisinin etkin kullanımını sağlamışlardır. Çalışmalarında biri sabit biri hareketli olmak üzere iki adet kolektörün çıkış sıcaklıkları arasındaki farkı belirlenmek için ölçümler yapmışlardır. Sabah ve öğleden sonra hareketli tipteki kollektörün çıkış sıcaklığının sabit olan kollektöre göre ortalama 5-12 °C daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Onat [24], çalışmasında, farklı sıcaklık ve hava hızlarında çalışabilen, rezistans ile sıcaklık takviyeli güneş enerjisi kollektörlü bir gıda kurutma sisteminde kırmızı biber kurutmuştur. Teorik analiz yaparak biberin kurutulmasının matematik modelini oluşturmuştur. Biberdeki nem kaybı için yaptığı teorik deneysel sonuçları karşılaştırmıştır. Gülçimen ve ark. [25], reyhan kurutmuş ve kurutma parametrelerini, yeni geliştirilen güneş hava kollektörlü kurutucu kullanılarak deneysel ve teorik olarak araştırılmışlardır. Kurutma deneylerinin sonunda, toplam reyhan kütlesinin 0.250 kg'dan 0.029 kg'a düştüğünü belirlemişlerdir. Kollektör verimliliğinin aynı oranda arttığını, hava akışının %29 ile %63 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Kurutma eğrileri için literatürdeki modeller arasında, Page model'in reyhan kurutma için en uygun model olduğu bulmuşlardır. Ayrıca, fesleğen kurutma eğrileri için daha geçerli sonuçlar veren yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Yılmaz ve ark. [26], domates kurutma için güneş enerjisi destekli hava kollektörü, kurutma odası ve hava dolaşım sisteminden oluşan kabin tipi bir kurutma sistemi kurmuşlardır. Kurutma havasının dolaşımı için kullanılan 45 W'lık fan gücü, fotovoltaiik panellerden karşılanmıştır. Kurutucuda nem içeriğinin kurutma işlemi sırasında 5 günde %95'ten %17'ye düştüğünü ifade etmişlerdir. Hajar ve ark. [27], zorlanmış taşınımlı bir güneş kurutucusu ile armut kurutmuşlardır. Bu güneş kurutucusu için bir hava emicisi tasarlamışlardır. Bu emici iki oluklu alüminyum plakadan oluşmuştur. İki oluklu plaka, havanın toplayıcı boyunca dolaşımını sağlayan paralel silindirler oluşturmak üzere sabitlenmiştir. Bu şekilde elde edilen sonuçlarda, 24 saatlik kurutmanın ardından örneklerin kütlesinin 997.3 g'dan 135.13 g'a indirildiğini ortaya koymuşlardır. Kurutma odasının ortalama ısı verimini % 11.11 olarak hesaplamışlardır.

Kurutma işleminde bir diğer göz önünde bulundurulması gereken faktör de konvektif ısı transfer katsayısıdır. Konvektif ısı transfer katsayısı hava ve ürünün arasındaki sıcaklık

farkından dolayı kurutma performansı için önemli bir parametredir [28]. Kurutma üzerine bazı teoriksel ve deneysel çalışmalar yapılmasına karşın ısı transfer katsayısını incelemek için sınırlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ratti ve Crapiste [29], yiyeceklerin kurutulması esnasındaki ısı transfer katsayılarını, kurutma verileri ile ısı ve kütle transferi değişimlerinden hesaplamışlardır. Goyal ve Tiwari [30], kurutmada ısı ve kütle transferi analizi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Nohutun ve buğdayın ısı transfer katsayılarını 12.68 ve 9.62 W/m<sup>2</sup>°C olarak hesaplamışlardır. Anwar ve Tiwari [31], doğal taşınımında direkt güneş altında kurutmada ısı transfer katsayısının bulunması için çalışma yapmışlardır. Altı farklı tarımsal ürün için elde edilen deneysel verilerden yararlanılmış ve lineer regresyon analizini kullanarak ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır. Akpınar [32] doğal taşınımında direkt güneş altında sekiz farklı tarımsal ürünü (dut, çilek, sarımsak, patates, kabak, patlıcan ve soğan) kurutarak ısı transfer katsayılarını tespit etmiştir. Sahdev ve ark. [33], zorlanmış taşınımında kurutma yaparak eriştenin ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır. Eriştenin ısı transfer katsayı değerleri 0.98 – 1.10 W/m<sup>2</sup>°C aralığında değişim göstermiştir.

Günümüzde güneş enerjisinden daha etkili bir şekilde faydalanmak için güneş takip sistemli çalışmalar yapılmıştır. Demirtaş [34], bilgisayar kontrollü iki eksenli güneş takip sistemi tasarlamış ve imal etmiştir. Sistemin dikey ve yatay hareketini step motor (adım motoru) ile sağlamıştır. Elde edilen verileri bilgisayar ortamına kaydedebilmek için ve sistemi bilgisayar ile kontrol edebilmek için mikro denetleyici kontrollü bir ara birim kullanmıştır. Güneş takip sistemi ile fotovoltaik güneş paneli normal gün ışığında 12 Volt, güneşe dik olduğu zamanlarda 18.5 Volt, güneşi yeterli hassasiyette takip edemediği veya havanın kapalı olduğu zamanlarda ise 10 Volt civarında gerilim üretmiştir. Hareketli sistemin üretimlerini sabit sistem ile karşılaştırdığında %35 daha fazla üretim elde ettiğini savunmuştur. Seme and Štumberger [35], iki eksenli güneş takip sistemi üzerinde güneş radyasyonu ve Diferansiyel Evrim kullanarak güneş açıları için yeni bir tahmin algoritması geliştirmişlerdir. Kırbaç ve ark. [36], güneş takip mekanizması kullanarak hava ısıtılmalı güneş kollektörlerinde güneş enerjisinin etkin kullanımını sağlamışlardır. Çalışmalarında biri sabit biri hareketli olmak üzere iki adet kolektörün çıkış sıcaklıkları arasındaki farkı belirlenmek için ölçümler yapmışlardır. Sabah ve öğleden sonra hareketli tipteki kollektörün çıkış sıcaklığının sabit olan kollektöre göre ortalama 5-12 °C daha fazla olduğu belirlemişlerdir. Samimi ve ark. [37], güneş izleme sisteminin domatesin kurutma kinetiği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Kurutma işlemi sırasında domates dilimlerinin kuruma davranışlarını incelemek için, güneş izleme birimi ile

donatılmış, laboratuvar ölçekli bir fotovoltaik (PV) destekli güneş kurutma sistemi geliştirmişlerdir. Numuneleri, güneş izleme mekanizması uygulanan ve uygulanmayan farklı hava hızlarında (0.5-2 m/s) ve ürün kalınlıklarında (3-5 mm) kurutmuşlardır. Domates dilimlerinin kuruma davranışları için üzerine güneş izleme sisteminin etkisini, kurutma süresini, etkili nem yayılımını ve aktivasyon enerjisini göz önüne alınarak değerlendirmişlerdir. Genel olarak, güneş takip sisteminin, yalnızca güneşte kurutma sürecini hızlandırmak için değil, aynı zamanda bu kurutma teknolojisini endüstriyel uygulamalara doğru bir adım ileriye taşımak için umut verici bir yaklaşım olabileceğini belirtmişlerdir. Abdelghani-Idrissi ve ark. [38], güneş takip sistemli bir güneş enerjisi su ısıtma sisteminin termal verimlilik arttırma analizini ele almışlardır. Kendileri tarafından imalatı yapılmış otomatik bir mekanik sistem, güneş panelinin dönüşünü ve eğimini sağlamıştır. PLC kontrol sistemini güneş panellerini gün boyunca güneşe bakacak şekilde yerleştirmek için programlamışlardır. Güneş ışınlama yoğunluğunu, güneş panellerinin üzerine yerleştirilen bir piranometre ile ölçmüşlerdir. Güneş takip sistemine sahip güneş paneli ile depolanan termal enerjinin, sabit güneş paneline göre %40 daha fazla olduğunu hesaplamışlardır. Tina ve ark. [39], tek eksenli veya iki eksenli bir güneş takip sistemi ile donatılmış bir hibrid güneş rüzgâr enerjisi sistemine (HSWPS) uygulanan olasılıklı bir model oluşturmuşlardır ve güneş izleme sistemlerinin yıllık enerji kazancı üzerindeki etkisini tartışmışlardır. Özellikle, bir güneş izleme sisteminin bir fotovoltaik sistem (PVS) tarafından üretilen gücün olasılık yoğunluk fonksiyonuna (PDF) etkisini incelemişlerdir. Farooqui [40], kutu tipi güneş ocakları için gelişmiş bir güç gerektirmeyen güneş izleme sistemi geliştirmiş ve bu sistemle altı saate kadar pişirme yapabilmıştır. Azimuth açısı boyunca izleme gereksinimi, bir çift yaya bağlı bir su haznesinde depolanan yerçekimi potansiyel enerjisini kullanarak ele alınmıştır. Geliştirilen bu sistemin, güneşi 9 saat boyunca başarılı bir şekilde takip ettiğini göstermiştir.

Günümüzde bir çok veriyi tahmin etmek için çeşitli hesapsal zeka yöntemleri kullanılmaktadır. Literatürde bu konu ile ilgili birçok değerli çalışmalar mevcuttur. Destek vektör makinesi regresyon (DVMR) yöntemi ile alakalı Jing ve ark. [41], havalandırma sistemi için destek vektör makinesi kullanan bir hava dengeleme yöntemi geliştirmişlerdir. Havalandırma sistemlerinde hava dengeleme problemini çözmek için destek vektör makinesi kullanarak tahminsel bir yöntem elde etmişlerdir. Yöntemin performansını deneysel olarak beş terminalli bir hava kanalında test etmişlerdir. Deng ve ark. [42], çalışmalarında Lityum-iyon pil için en yüksek kullanılabilir kapasite (MAC) ve maksimum

kullanılabilir enerjiyi (MAE) tahmin etmek için destek vektör makinaları Regresyon yöntemini kullanmışlardır. Antonanzas ve ark. [43], çalışmalarında, jeostatistiksel interpolasyon tekniklerini destek vektör regresyon makineleri ile birleştirerek günlük küresel ışınlamanın haritalandırılmasını sağlamışlardır. Destek vektör regresyon makinelerinde eğitim süreci için meteorolojik değişkenleri (sıcaklık, yağış, nem ve rüzgâr hızı) ve İspanya kıtası üzerinden 35 piranometrenin verilerini kullanmışlardır. Elde ettikleri tahminsel model ile sensörler olmaksızın eksojen istasyonda güneş ışınlamı tahminini gerçekleştirmişlerdir. Zendeheboud ve ark. [44], güneş ve rüzgâr enerjisi kaynaklarının tahmini için destek vektör makinesi modelleri uygulamışlardır. Destek vektör makinesinin hızlı, kullanımı kolay, güvenilir ve doğru sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Kritik analizlere dayandırdıkları bulgular ile hibrid destek vektörü makinesi modellerinin, çoğu konum için hem güneş hem de rüzgâr enerjisi tahminlerini diğer modellerden çok daha yüksek doğruluklarla açıkladığını göstermişlerdir. Başer ve Demirhan [45], yatay küresel güneş radyasyonu tahmininde destek vektör makinesi yaklaşımı ile bulanık bir regresyon yöntemini kullanmışlardır. Karmaşık iklimsel ve karasal karakteristiklere sahip bir bölge üzerinde yatay küresel güneş radyasyonunun uzun vadeli tahmininde destek vektör makinesinden yararlanmışlardır. Ahmad ve ark. [46], bir güneş termal kollektöründen yararlı bir saatlik enerjiyi tahmin etmek için ağaç tabanlı topluluk makinesi öğrenme modellerini (rastgele orman - RF ve ekstra ağaçlar - ET), karar ağaçlarını (KA) ve destek vektör regresyonunu (DVR) kullanmış ve bu yöntemlerin doğruluk oranlarını karşılaştırmışlardır. Kullandıkları hesapsal zekâ yöntemleri içerisinde tahminsel model oluşturmada en az hataya sahip yöntemin destek vektör regresyon olduğunu göstermişlerdir.

Yapay sinir ağı ile ilgili çalışmalara bakacak olursak; Beigi ve ark. [47], pirinç kurutmada kurutma sisteminin enerji özelliklerini deneysel olarak ve yapay sinir ağı (YSA) kullanarak belirlemişlerdir. Mevcut çalışmalarında, pirinçlerin konveksiyon derin yataklı kurutucudaki kurutma kinetiğini farklı koşullarda incelemişlerdir. Prosesin enerji performansını, enerji, kurutma ve termal veriminin yanı sıra spesifik enerji tüketimi açısından incelemişlerdir. Kurutma süresinin tahmini, spesifik enerji tüketimi, enerji verimliliği, kurutma verimliliği ve termal verimlilik için YSA ile tahminsel modelleme gerçekleştirmişlerdir. Taheri ve ark. [48], çalışmalarında, hibrit yapay sinir ağı-genetik algoritması kullanarak, kurutulmuş tuzlu yaprakların nem içeriğinin modellenmesi ve tahmin edilmesi için çok yönlü bir yaklaşımın uygulanması sunmuşlardır. Kokulu yaprakların kurutma işleminde nem içeriğinin modellenmesi ve hesaplanması için en iyi

YSA yapısını bulmak amacıyla Genetik Algoritma kullanılmışlardır. Azadbakht ve ark. [49], patates küplerinin kurutulması için kullandıkları akışkan yataklı kurutucunun ekserji ve enerji analizlerine yapay sinir ağı yöntemini uygulamışlardır. Numunelerin kurutulmasını 45, 50 ve 55 °C giriş sıcaklıklarında, 3.2, 6.8 ve 9.1 m.s<sup>-1</sup> hava hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Enerji kullanım oranının sıcaklıktaki artışla birlikte azaldığını tesbit etmişlerdir. Ayrıca, ekserji kaybının ve verimliliğinin, yatağın hava hızının, sıcaklığının ve derinliğinin artmasıyla arttığını tespit etmişlerdir. Son olarak, istatistiksel analizlerin sonuçlarında, sinir ağlarının, gıda endüstrisinde büyük bir enerji kullanımı payına sahip olan akıllı kurutma işleminde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Aktaş ve ark. [50], yapay sinir ağını kullanarak defne yapraklarını kurutmak için kullandıkları kapalı devre ısı pompası kurutucusunun performansını analiz edip modellemişlerdir. Bağıl nem ve sıcaklıkları kontrol etmek için, düşük sıcaklıklı kurutma (40, 45 ve 50 °C) gerçekleştirmişlerdir. Deneysel verileri ve defne yaprağının kurutma kinetiğini Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanarak analiz etmiş ve modellemişlerdir. Beigi ve ark. [51], çalışmalarında konvektif derin yatak kurutma sisteminde kaba pirincin kurutma davranışlarını incelemişlerdir. Prosesin enerji performansı, enerji tüketimi, kurutma ve ısı verimlerinin tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) kullanılmışlardır. Yapay sinir ağı modelleme tekniği, kurutma koşullarının enerji verimliliğini tahmin etmek ve belirlemek için güçlü bir araç olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Karar ağacı (KA) ile ilgili literatürde çeşitli konularda çalışmalar yapılmıştır. Voyant ve ark. [52], KA yöntemini kullanarak küresel güneş ışıınımı tahmini için tahmin aralıkları oluşturmuşlardır. Tahmin aralığı için kuantum kestirim ve kümülatif dağılım fonksiyonu kullanmışlardır. Ortalama interval uzunluğu ve tahmin aralığı kapsama olasılığını kullanarak yeni bir güneş ışıınımı gama testi yapmışlardır. Ren ve Hartnett [53], çalışmalarında, bir deniz yenilenebilir enerji test sahası olan Galway Koyu'ndaki yüzey akımlarını tahmin etmek için KA kullanılmışlardır. Eğitim ve test modellerinde, rüzgâr hızı, rüzgar yönü ve gelgit su yükselmesini girdi değişkenleri olarak almışlardır. Yüzey hız bileşenlerini ise çıkış değişkeni olarak almışlardır. Sonuçlar, KA modelinin yüzey akımlarına yakın tahminsel değerler üretebildiğini göstermişlerdir. Persson ve ark. [54], çalışmalarında güneş enerjisi üretiminin çok alanlı tahmininde bir ile altı saatlik bir tahmini ufukta kullanılan parametrik olmayan bir KA yaklaşımını sunmuşlardır. Güneş enerjisi üretimini, hesapsal zeka yöntemleri ile tahmin etmenin zorluğunu belirtmişlerdir. Ahmad ve ark. [55], çalışmalarında bir güneş ışıınımından elde edilen faydalı saatlik enerjiyi tahmin etmek için bir ağaç kütesel

öğrenme makinelerinin öğrenme modellerini (rastgele orman - RO ve ekstra ağaçlar - EA), KA ve DVR kullanmış ve elde edilen tahminsel değerleri karşılaştırmışlardır. Çalıştıkları algoritmalar arasında KA yöntemine ait eğitim süresinin önemli ölçüde daha az olduğunu göstermişlerdir. Tso ve ark. [56], elektrik enerjisi tüketimini tahmin etmek için regresyon analizi, KA ve YSA yöntemlerini kullanmış ve bu yöntemleri karşılaştırmışlardır. Elektrik enerjisi tüketimini etkileyen faktörleri bulmak amacıyla, araştırmanın yaz ve kış evrelerinde elde edilen enerji tüketimi verileri için çoklu regresyon, sinir ağı ve KA modellerini oluşturmuşlardır. Hedef değişkeni, toplam haftalık elektrik enerjisi tüketimi olarak almışlardır. Konut tipi, hane halkı özellikleri ve cihaz tipi, elektrik enerjisi tüketimini ise etkileyen potansiyel faktörler olarak kabul etmişlerdir. Daş ve Akpınar [57], güneş enerjisi destekli bir kurutucu tasarlayarak nane kurutmuşlardır. Kurutma deney verilerinden kuru baz nem içeriği ( $MC_k$ ), ayrılabilir nem oranı (MR), kurutma hızı (DR) ve konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) değerlerini hesaplamışlardır. Deney çalışmalarından elde edilen  $h_c$  değerleri ile tahminsel modeli oluşturmak için lineer regresyon ve KA analizlerini uygulamışlardır. Elde ettikleri modellerin geçerliliğini belirlemek için, ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama karesel hata (RMSE), bağıl mutlak hata (RAE) ve kök bağıl mutlak hata (RRAE) analizlerini yapmışlardır. Sonuç olarak lineer regresyonu ve KA sonucu  $h_c$  değerleri için iki farklı model elde etmiş, lineer regresyon analizinin daha az hata ile tahmin yaptığını göstermişlerdir.

Kurutma endüstrisinde amaç, minimum miktarda enerji kullanarak üründen maksimum miktarda nem uzaklaştırmaktır. Bu durum kurutma işlemleri boyunca incelenecek olan enerjinin niteliğine ve miktarına bağlıdır. Enerji etkileşiminin ve kurutma havasının termodinamik davranışının bilinmesi için kurutma işleminin enerji ve ekserji analizleri yapılmalıdır [58]. Enerji analizi, enerji kullanım oranını (EUR) tahmin etmek için termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak gerçekleştirilir. Ekserji analizi ise termodinamiğin ikinci yasasını uygulayarak kurutma işlemi sırasında ekserji kayıplarının büyüklüğünü belirlemek için gerçekleştirilir [59]. Ekserji analizi, mevcut enerjiyi bir sistemdeki farklı noktalarda değerlendirir. Bir sistemin tasarımında, ekserji yöntemi uygun operasyon prosedürünü seçmek için yararlı bilgiler sağlar. Ekserji analizi; enerji sistemlerinin tasarımı, simülasyonu ve performans değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [60]. Güneş kurutucularının enerji analizi, araştırmacılar için ilginç bir konu olmuştur. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanan ekserji analizini kullanarak farklı türdeki enerjilerin gerçek potansiyelini ortaya çıkarmak mümkündür. Termodinamikte tersinmezlikler nedeniyle, yüksek enerji verimliliğine rağmen bir işlemin

ekserji verimliliği genellikle düşüktür [61]. Son yıllarda ekserji analizi, sistem tasarımı ve termal sistemlerin optimizasyonu için önemli bir araç olarak görülmüştür. Gıda kurutma sistemlerinin performansını değerlendirmek için enerji ve ekserji analizi yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Tarım ürünlerinin güneşte kurutma işleminin enerji ve ekserji analizleri üzerine bir dizi çalışma yapılmıştır. Rabha ve ark. [62], güneş tüneli kurutma makinesinde biberin kurutma işlemlerinin enerji ve ekserji analizlerini araştırmışlardır. Akpınar [63] konvektif tip bir kurutucuda kırmızıbiber dilimlerinin kurutulmasında enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmiştir. Zisopoulos ve ark. [64], gıda endüstrisinde enerji analizi kullanımının faydaları üzerine çalışmışlardır. Midilli ve Küçük [65], ekserji bazlı çevresel parametreleri, literatürdeki tek tabakalı kurutma işleminin sistem performansına etki eden etkileyici parametreler olarak tanımlamışlardır.

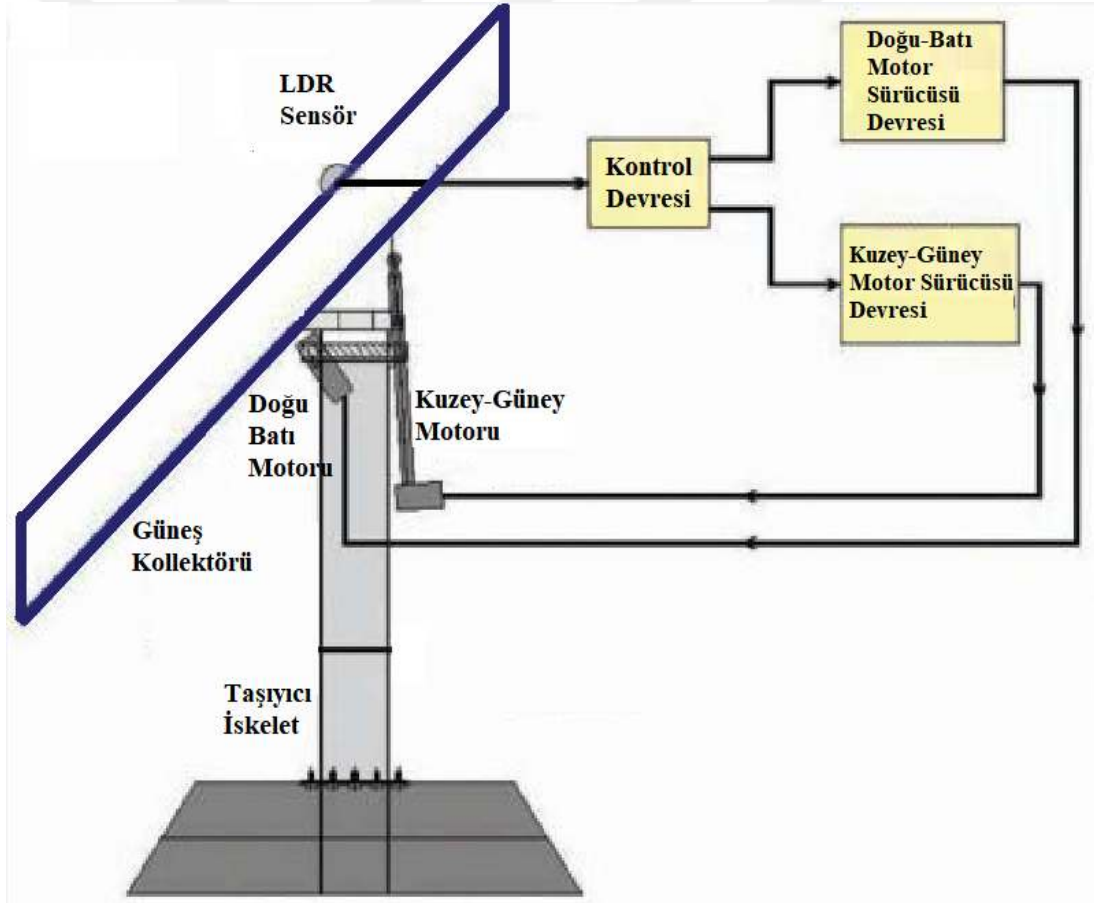
Gıda kurutmada kurutulan ürünün kuruma eğrilerini belirlemek ve en iyi kurutma davranışını tespit etmek için literatürde çeşitli kurutma modelleri mevcuttur. Özel [66], çalışmasında balkabağının (*Cucurbita moschata*) tek tabaka kuruma kinetiğini deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde konveksiyon tipi bir kurutma deney seti tasarlanıp imal etmiştir. Deneyler, nem içeriği %93.48 olan balkabağı kullanılarak gerçekleştirmiştir. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları 50 °C, 60 °C, 70°C, kurutma havası hızı 0.5, 1, 2 m/sn ve kurutma havası bağıl nemi de %5, %10, %20 olarak almıştır. Balkabağı kabukları soyulduktan sonra 30mmx30mm şeklinde kare dilimlere ayrılmış bu dilimler de 4 mm kalınlıklarında parçalara ayrılarak kurutulmuştur. Elde edilen veriler ile balkabağına ait kuruma eğrileri çizilmiş ve kurutma havası koşullarının kuruma işlemine etkisi belirlenmiştir. Deney sonuçlarını literatürde mevcut modellerden on farklı model sonuçları ile karşılaştırmış, balkabağının kuruma davranışını ifade etmede en uygun modelin Midilli ve arkadaşları modeli olduğunu göstermiştir. Yıldız ve Ertekin [67-68], yaptıkları çalışmalarda laboratuvar tipi bir kurutucuda havuç, pırasa ve patlıcanın kuruma karakteristiklerinin belirlenmeye çalışmışlardır. Kuruma süresinin belirli bir anında ürünün nem içeriğinin saptanması için literatürde bulunan mevcut kuruma modellerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu ürünleri 30, 40, 50, 60, 70 °C kurutma havası sıcaklıklarında ve 0.5, 1, 1.5 m/s kurutma havası hızlarında kurutarak kurutma sürelerini belirlemişlerdir. Deney sonuçlarından elde ettikleri kurutma eğrilerini, mevcut matematiksel modelleri uygulayıp en uygun modeli seçmişlerdir. Ayrıca patlıcan kurutma için yapılan çalışmada kuruma olayını en iyi açıklayan modelde bulunan katsayılar, kurutma havası sıcaklığı ve hızındaki değişimin etkilerini

çoklu regresyon yöntemiyle incelemişlerdir. Midilli ve ark. [69], mantar ve polenin kuruma periyotlarını araştırmışlardır. Mantar kurutma deneylerini hem laboratuvar tip bir kurutucuda hem de atmosferik şartlarda güneşte ve gölgede yapmışlardır. Poleni ise laboratuvar şartlarında ve güneşte kurutmuşlardır. Deneylerde ürünlerin kuruma eğrilerini, bu eğrilerin denklemlerini, kütle değişim oranlarını ve ortalama deneysel belirsizlik oranını tespit etmişlerdir. Mantarların 50°C sıcak hava kullanılarak laboratuvar tip bir kurutucuda 5-6 saatlik bir kuruma periyodunda kurutulabileceği, kurutulan ürünlerin ise vakum altında korunması gerektiği belirlenmiştir. Polenin ise 40-45°C'lik bir sıcaklıkta 2.5-3 saat gibi bir kuruma periyodunda renk, lezzet, koku ve yapı değişikliği olmaksızın kuruduğu tespit edilmiştir.



### 3. DENEY SETİ

Bu çalışmada 2 adet kurutma kabini, 6 adet kurutma tepsisi, 1 adet azimut açısına göre sabitlenmiş ( $42^\circ$  Güney) hava ısıtmalı güneş kollektörü (HIGK), 1 adet güneşi doğu, batı, kuzey ve güney yönlerinde takip edebilen programlanabilir kontrol sistemi (PLC) ile hareket özelliği kazandırılmış hava ısıtmalı güneş kollektörü, 2 adet sirkülasyon fanı, 2 adet yalıtımlı 100 mm çapında spiral bağlantı hortumu ve 1 adet kontrol ünitesi içeren 2 farklı kurutma sisteminden oluşan bir deney seti kullanılmıştır. Deney setinde PLC sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.1’de, deney setinin detaylı görüntüsü ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. PLC şematik gösterim



Şekil 3.2. Deney Seti (1-Hava ısıtmalı güneş kolektörü, 2-Kurutma odası)

Kurutma kabini alüminyum malzemeden (kalınlık 2 mm) yapılmış ve dikdörtgen boyutlarda (100 cm x 50 cm x 100 cm) tasarlanmıştır. Güneş kolektörü ve kurutma kabini arasındaki ısıtılmış havayı aktarmak için yalıtımlı spiral alüminyum tipi boru kullanılmıştır. Sıcak hava transferi için kullanılan alüminyum spiral boru bağlantılarının sızdırmazlığı sağlanmıştır. Kabinin alt tarafı kolektörden sıcak havayı kabine taşımak için davlumbaz olarak üretilmiştir. Kabindeki kurutma havası kabin üzerindeki menfezden gönderilmiştir. Kurutma kabinine üç kurutma tepsisi (90 cm x 40 cm) yerleştirilmiştir. Kurutma kabinine bağlı bir sirkülasyon fanı ( $0.9 \text{ m}^3 / \text{s}$ , 0.4 kW, 220 V, 50 Hz) güneş kolektörüne davlumbaz ile bağlanmıştır.

Deney setinde Santa Maria cinsi armut kurutulmuştur. Kurutulacak armut dilimlerinin başlangıçtaki nem içeriği % 83.1 ( $4.9 \text{ g su} / \text{g katı madde}$ ) olarak Shimadzu MOC63u nem tayin cihazı ile belirlenmiştir. Kurutulacak armutların dilim kalınlığı 10 mm olarak ölçülmüştür. Kurutma deneyleri, 2017 yılında Temmuz ayı döneminde Elazığ ilinde gerçekleştirilmiştir. Elazığ, Anadolu'nun doğu kesiminde,  $38^\circ 60' \text{ N}$  ve  $39^\circ 28' \text{ E}$  ve 950 m rakımda yer almaktadır. Güneşli havalarda deneyler yapılmıştır. Testler 08:00'da başlayıp, 18:00'a kadar devam etmiştir. Kurutma deneylerinde 30 dakikalık periyotlarda kurutulmuş armutların ağırlığı, dijital ağırlık ölçer ile ölçülmüştür. Deneyler, armut dilimlerindeki ağırlık değişene kadar devam etmiştir. Saat 18:00'dan sonra armut dilimlerinin ağırlık değişimi devam ederse, deneyler ertesi gün sabah 8.00'da yeniden başlatılmıştır. Deneylerin

yapılmadığı süre boyunca, armut dilimlerinin kütle kaybı ihmal edilmiştir. Kurutma havasının hızı, kurutma kabininin hava çıkışından bir anemometre kullanılarak ölçülmüştür. Deneylerde radyasyon ölçümü, güneş panellerine paralel yerleştirilmiş bir piranometre ile yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan HIGK'leri 1400mm x 800mm ebatlarında olup, saydam örtü, yutucu plaka, düz plaka, yalıtım malzemesi ve dış kasadan meydana gelmektedir. Saydam örtü olarak cam, yutucu plaka olarak siyah mat boyanmış oluklu paslanmaz çelik sac (kalınlık 0.5 mm), düz plaka olarak siyah mat boyanmış paslanmaz çelik sac (kalınlık 0.5 mm), yalıtım malzemesi olarak taş yünü (kalınlık 4 cm) ve kasa malzemesi olarak alüminyum (kalınlık 4mm) kullanılmıştır. HIGK nin hava girişi kısımlarına davlumbaz ile bağlı bir santrifüj fan (0.15 m<sup>3</sup>/s, 0.18 kW, 230 V, 50 Hz, 2800 dev/dak) şartlanmış havayı sağlamıştır. Santrifüj fan üzerinde devir ayarlaması yapılarak 1690, 1400 ve 840 dev/dak değerlerinde fan devri elde edilmiştir.

Deneylerde, panel giriş sıcaklığı, panel çıkış sıcaklığı, panel cam sıcaklığı, panel zemin sıcaklığı, kurutma kabini giriş sıcaklığı, kurutma kabini çıkış sıcaklığı, kurutma kabini sıcaklığı, kurutma kabini nem, güneş radyasyonu, kurutma kabini hava hızı ve armut dilimlerinin kütle kaybı 30 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Kurutma deney setinde, güneş paneli giriş sıcaklığı, güneş paneli çıkış sıcaklığı, güneş paneli cam sıcaklığı, güneş paneli zemini sıcaklığı, kurutma kabini giriş sıcaklığı, kurutma kabini çıkış sıcaklığı, kurutma kabini sıcaklığı ve kurutma kabini nem ölçüm noktaları Şekil 3.3'te sunulmuştur. Bu ölçüm noktaları için su geçirmez DS18B20 dijital sıcaklık sensörleri kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Ölçüm noktaları

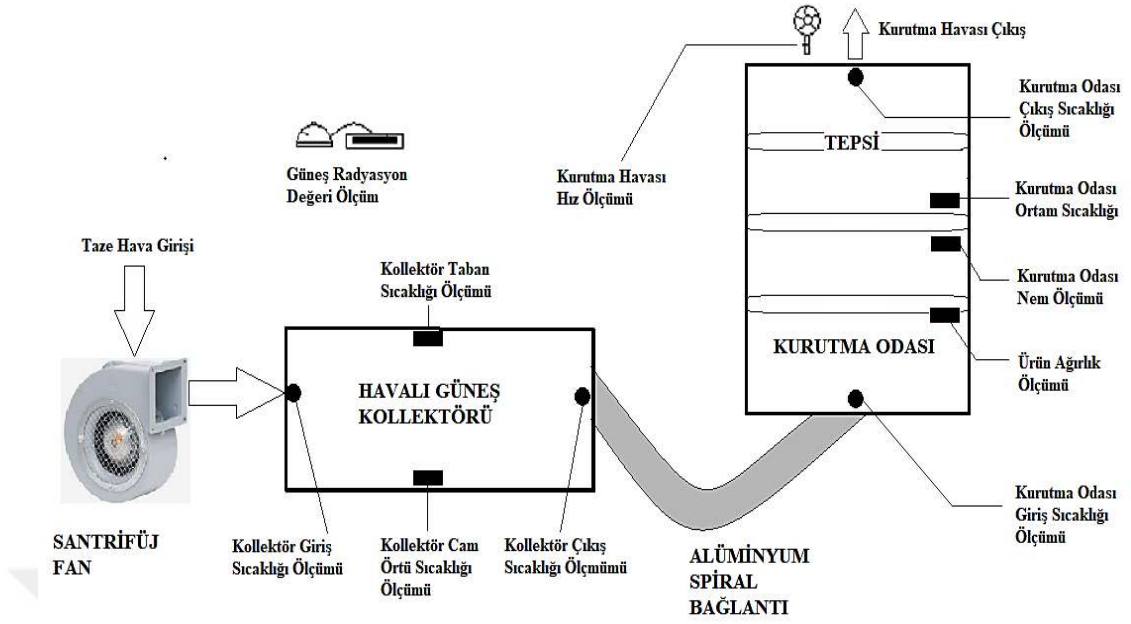
Şekil 3.3’te bulunan ölçüm noktaları sırası ile (1) Panel cam sıcaklığı; (2) panel zemin sıcaklığı; (3) panel giriş sıcaklığı; (4) panel çıkış sıcaklığı; (5) kurutma kabini giriş sıcaklığı; (6) kurutma kabini çıkış sıcaklığı; (7) kurutma kabini sıcaklığı ve kurutma kabini nemi; (8) ölçüm izleme ekranıdır.

Hava ısıtmalı güneş kollektörüne güneş takip özelliği için 1 adet LDR sensör, 1 adet CPU ünitesi, 2 adet step motor ve 1 adet güneş kollektörü tutucu iskeleti kullanılmıştır. Güneş takip sistemi Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.4.** PLC güneş takip sistemi (1-Cpu, 2-Pnomatik pistonlu Step motor, 3-Sonsuz dişli step motor, 4-Sensör)

Çevre sıcaklığı ( $T_c$ ) ve armutun yüzey sıcaklığı ( $T_y$ ) ölçümlerinde, J tipi demir-konstantan termokupllar, manuel olarak kontrol edilen 20 kanallı otomatik dijital termometre (ELIMKO, 6400) ile,  $\pm 0.1$  ° C okuma doğruluğu ile kullanılmıştır. Kurutma kabini hava hızı, 0–15 m/s dijital anemometre (LUTRON, AM-4201),  $\pm 0.1$  m / s okuma doğruluğu ile ölçülmüştür. Kurutma sırasında kütle kaybı, 0–3100 g'lık ölçüm aralığında ve  $\pm 0.01$  g'lık bir hassasiyette dijital denge (BEL, Mark 3100, Monza, İtalya) ile ölçülmüştür. Kurutma sisteminin çalışma periyodu sırasında güneş radyasyonu,  $\pm 0.1$  W/m<sup>2</sup> hassasiyetinde ve CC12 model dijital solar entegratöründe Kipp ve Zonen piranometre ile ölçülmüştür. Armutların başlangıç ve nihai nem içeriği, Unibloc nem analiz cihazı (Shimadzu MOC63u) tarafından  $\pm 0.001$  g ağırlık hassasiyetinde 80 °C sıcaklıkta belirlenmiştir. Deney setinin şematik gösterimi ve ölçüm noktaları Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Deney Seti Şematik Gösterimi

Şekil 3.5’de sıcaklık ölçümleri sensörler yardımıyla, hava hızı ölçümleri anemometre, nem ölçümleri dijital nemölçer, radyasyon ölçümleri piranometre ve ürün tartımları dijital hassas terazi ile ölçülmüştür.

### 3.1. Ölçülen Değerlerin Hata Analizi

Deneylerde ölçülen değerin tanımının gerçekleşmesinde; çevre koşullarının deneye etkisinin tam olarak belirlenememesi, analog cihazların kullanımı ve değerlerin okunmasındaki teknik hatalar, ölçüm cihazlarının üretiminden ve kullanımından dolayı oluşan hatalar, ölçüm yöntemi veya analizinde kullanılan yaklaşımlar, deney şartlarının görünürde sabit olduğu bir ortamda tekrarlanan deneylerde ölçülen değerin farklılıklar göstermesi gibi etkenler belirsizliğe yol açar. Bu yüzden oluşan hata deney sürecinde diğer bir adımdaki sonucu etkileyerek zincirleme olarak hatayı artırır [70]. Yukarıda bahsedilen hata kaynaklarının sonuca etkisini tahmin etmek amacıyla yapılan hata analizi, ölçüm parametrelerindeki ve ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan deney sonuçlarındaki belirsizliği belirlemek için kullanılır [71]. Deneysel verilerin doğruluğunun tespiti, “belirsizlik tahmini”, “belirsizlik aralığı” veya “hata analizi” şeklinde adlandırılır. Hata analizi ile ilgili en açıklayıcı bilgiler Kline ve McClintock [72] ve Holman [73] tarafından yapılmıştır.

Hata analizi deneysel çalışmalarda önemli bir analizdir. Hata analizi konusunda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Akpınar [74], çalışmasında siklon tipi bir kurutucudaki kurutma olayının hata analiziyle açıklamaya çalışmıştır. Kurutma sistemi için hata oluşturan kriterleri belirlemiş, hataların derecelerini ve miktarlarını vermiştir. Sistemdeki en büyük hata değerlerini sıcaklık ölçümünde elde etmiştir.

Tez çalışmasının bu kısmında ele alınan kriterler belirtilerek hataların dereceleri ve miktarları konusunda sistematik olarak bilgiler verilmiştir. Bu amaçla, sabit ve hareketli güneş kollektörlü kurutucularda yapılan kurutma deneyleri için hata analizi yapılmıştır. Ölçülen büyüklüklerin hata değerleri ise, ölçü araçlarının üretici firmaları tarafından önerilen hata değerleri yanında yapılan kalibrasyon çalışmalarından ve deneysel tecrübelerden teorik olarak belirlenmiştir. Her ne kadar hata analizi, rastgele hataların belirlenmesi de olsa yukarıda belirtildiği gibi sabit hatalarla rastgele hataların birbirinden ayırt edilmesinin zor olmasından dolayı her bir büyüklük için elde edilen hata değerleri, yukarıda belirtilen iki tip hatayı da kapsamaktadır. Bunun yanında diğer bir hata tipi olarak bahsedilen deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatı sırasında yapılmış herhangi bir hatanın olmadığı kabul edilmiştir. Bütün bunların göz önüne alınması ile her bir bağımsız değişken için ortaya çıkabilecek hatalar değerleri şu şekilde belirlenebilir.

### **3.1.1. Sıcaklık lmnde yapılan hatalar**

Sıcaklık lmnde ortaya çıkabilecek hatalar, deneylerde kullanılan ölçüm aletlerinin üretim kataloğundaki hassasiyet değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Deneyler sırasında sistemde çeşitli noktalarda yapılan sıcaklık ölçümlerinden kaynaklanan hatalar;

(a1) Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan hata =  $\pm 0.25-0.5$  C,

(b1) Dijital termometreden kaynaklanan hata =  $\pm 0.1$  C,

(c1) Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata =  $\pm 0.1$  C,

(d1) Sıcaklık sensörlerin yapısından, iletim kabiliyetinden ve hassasiyetinden kaynaklanan hata =  $\pm 0.25-0.5$  C,

(e1) Fan girişinde sıcaklık ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata =  $\pm 0.25$  C,

(f1) Isıtıcı çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata =  $\pm 0.5$  C,

(g1) Kurutma havasının kurutma odasına giriş sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.25$ C,

(h1) Kurutma havasının kurutma odasından çıkış sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ ,

(j1) Örneğin merkez sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ ,

(k1) Kurutma odası içerisindeki ve tepsiler arasındaki sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ ,

(ll) Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ ,

(m1) Fan girişindeki sıcaklığın okunması sırasındaki yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , şeklinde sıralanabilir.

### **3.1.2. Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar**

Kurutma deneyleri sırasında zaman değerleri dijital bir saat yardımıyla ölçülmüştür. Ölçülen zaman değerleri kurutma süresinin belirlenmesinde önemli bir faktör olduğundan ortaya çıkabilecek hatalar;

(a2) Zaman ölçerin titreşiminden kaynaklanan hata= $\pm 0.0003$  dakika

(b2) Periyodik olarak tartım alınmasında yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.10$  dakika

(c2) Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin alınmasında yapılabilecek ortalama hata= $\pm 0.10$  dakika şeklinde sıralanabilir.

### **3.1.3. Ağırlık kayıplarının ölçümünden kaynaklanan hata**

Ağırlık kayıplarının ölçümünde ortaya çıkabilecek hatalar, deneyler sırasında kullanılan hassas terazi ve okuyucuya bağlı değişmektedir. Deneyler sırasında ağırlık ölçümlerinden kaynaklanan hatalar,

(a3) Hassas teraziden kaynaklanan hata = $\pm 0.01$  g

(b3) Okumaktan kaynaklanan hata= $\pm 0.01$  g

(c3) Tepsilerin kurutma odası cidarına sürtünmesinden dolayı kaynaklanan hata= $\pm 0.5$  g şeklinde sıralanabilir.

#### **3.1.4. Hız ölçümünden kaynaklanan hatalar**

Deneyler sırasında kurutma havasının hız değerleri anemometreyle tespit edilmiştir. Ölçülen kurutma havası hızının belirlenmesinde ortaya çıkabilecek hatalar;

(a4) Anemometrenin hassasiyetinden kaynaklanan hata= $\pm 0.1$  m/s

(b4) Debi kaçaklarından kaynaklanan hata= $\pm 0.1$  m/s

şeklinde sıralanabilir.

#### **3.1.5. Havanın bağıl neminin ölçümünden kaynaklanan hatalar**

Güneş kollektörlerinden çıkan kurutma havasının nemi ve çevre havasının neminin belirlenmesinde ortaya çıkabilecek hatalar;

(a5) Nem sensörlerinin hassasiyetinden kaynaklanan hata= $\pm 0.1$  RH

(b5) Havanın bağıl neminin okunmasından kaynaklanan hata= $\pm 0.01$  RH

şeklindedir.

#### **3.1.6. Örneklerin bünyesindeki nem miktarının tespit edilmesinde ortaya çıkan hatalar**

Kurutulan ürünün başlangıç ve son neminin tespit edilmesinde ortaya çıkabilecek hatalar;

(a6) Nem tayin cihazının hassasiyetinden kaynaklanan hata= $\pm 0.001$  g

(b6) Nem tayin cihazındaki değerin okunmasından kaynaklanan hata = $\pm 0.0001$  g

şeklindedir.

#### **3.1.7. Güneş takip sisteminde ortaya çıkan hatalar**

Hareketli HIGK nün PLC sistemi ile güneş takibi sırasında ortaya çıkabilecek hatalar;

(a7) LDR ışık sensörünün hassasiyetinden kaynaklanan hata= $\pm 0.01$  s

(b7) Mekanik motorların dönme hassasiyeti = $\pm 0.5$  s

şeklindedir.

### 3.1.8. Diğer hatalar

Deneyler sırasında elde edilen deneysel verileri kullanarak yapılan hesaplamalarda ihtiyaç duyulan tablo değerlerinin ya da fiziksel değerlerin okunması sırasında yapılabilecek hatalarda hesap sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bu hata;

(a8) Fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek hata; şeklindedir.

### 3.2. Ölçülen Değerlerden Kaynaklanan Toplam Hatalar

Güneş kollektörlü kurutucularda yapılan kurutma deneylerinde sıcaklığın, zamanın, ağırlık kayıplarının, hızın, havanın neminin ve örneklerin kuru madde miktarının ölçülmesi sırasında, hem sabit hatalardan hem imalat hatalarından hem de rastgele hatalardan kaynaklanan hataların etkili olduğu tahmin edilmiştir. Ölçülen değerleri dikkate alarak güneş kollektörlü kurutucularda yapılan kurutma işlemleri için bu değerlerden kaynaklanan toplam hataların hesaplanması gerekir.

Bir parametrenin değerinin ölçülmesinde, sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hataları nedeniyle ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı (3.1) denklemindeki gibi yapılabilir [73].

$$W_x = \left[ (x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots \dots \dots (x_n)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Güneş kollektörlü kurutucularda yapılan ölçümlerdeki toplam hataların analitik ifadeleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

#### *a. Sıcaklık ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Fan girişinde hava sıcaklığının ( $T_{fg}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{T_{fg}}$ ), (3.2a) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_{fg}} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (d1)^2 + (e1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2a)$$

Güneş kollektöründe çıkan hava sıcaklığının ( $T_{1ç}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{T_{1ç}}$ ), (3.2b) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_{iç}} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (d1)^2 + (f1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2b)$$

Kurutma havasının kurutucu odasına giriş sıcaklığının ( $T_{kg}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{Tkg}$ ), (3.2c) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_{sg}} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (d1)^2 + (g1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2c)$$

Kurutma havasının kurutma odasından çıkış sıcaklığının ( $T_{kç}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{T_{kç}}$ ), (3.2d) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_{sç}} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (d1)^2 + (h1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2d)$$

Kurutulan örneklerin merkez sıcaklığının ( $T_m$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{Tm}$ ), (3.2e) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_m} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (J1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2e)$$

Kurutma havasının kurutma odası içerisindeki ve tepsiler arasındaki sıcaklığının ( $T_{kta}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{Tsta}$ ), (3.2f) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_{sta}} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (d1)^2 + (k1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2f)$$

Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ( $T_ç$ ) ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata ( $W_{T_ç}$ ), (3.2g) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_ç} = \left[ (a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (d1)^2 + (l1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2g)$$

Fan girişinde hava sıcaklığının sensörler yardımıyla ( $T_{ksf}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ölçümünde ( $W_{Tkyf}$ ), (3.2h) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{T_{ksf}} = \left[ (d1)^2 + (m1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2h)$$

*b. Zaman ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Kurutma deneylerinde periyodik olarak okunan ağırlık kayıplarının tespitinde her bir tartım periyodunda ( $t_a$ ) meydana gelebilecek toplam zaman hatası ( $W_{ta}$ ), (3.3a) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{ta} = \left[ (a_2)^2 + (b_2)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3a)$$

Deneylerde periyodik olarak okunan sıcaklık değerlerinin tespit periyodunda ( $t_s$ ) zaman bakımından meydana gelebilecek toplam hata ( $W_{ts}$ ), (3.3b) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{ts} = \left[ (a_2)^2 + (c_2)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3b)$$

*c. Ağırlık kayıplarının ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Kurutulan ürünlerin periyodik olarak ağırlık kayıplarının ( $W$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_w$ ), (3.4) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_w = \left[ (a_3)^2 + (b_3)^2 + (c_3)^2 \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

*d. Hız ölçümünden ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Kurutma havası hızının ( $V$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_v$ ), (3.5) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_v = \left[ (a_4)^2 + (b_4)^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

*e. Havanın bağıl neminin ölçümünden ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Kurutma havasının kurutucuya giriş ve çıkışındaki bağıl neminin ( $\phi$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_\phi$ ), (3.6) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_\phi = \left[ (a_5)^2 + (b_5)^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

*f. Örneklerin bünyesindeki nem miktarının tespit edilmesinde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Kurutulan örneklerin bünyesindeki nem içeriğinin ve kuru madde miktarının ( $M_{km}$ ) ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{Mkm}$ ), (3.7) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{Mkm} = [(a6)^2 + (b6)^2]^{1/2} \quad (3.7)$$

*h. Güneş takip sisteminde güneş izleniminde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri*

Hareketli HIGK de bulunan PLC sistemin güneş takibi (GT) sırasında meydana gelebilecek toplam hata ( $W_{GT}$ ), (3.8) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{GT} = [(a7)^2 + (b7)^2]^{1/2} \quad (3.8)$$

*g. Diğer hatalar*

Tablo yardımıyla hesaplanan yoğunluk ( $\rho$ ), Özgül ısı ( $C_p$ ) gibi değerlerin bulunmasında yapılacak toplam hata (3.9) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{\rho} = W_{cp} = [(a7)^2]^{1/2} \quad (3.9)$$

Tablo 3.1' de deneylerde yapılan hataların toplam değerleri sayısal olarak verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Kurutma Deneylerinde Yapılan Hataların Toplam Değerleri

| Hata oluşturan parametreler                                     | Birim  | Toplam hata             |
|-----------------------------------------------------------------|--------|-------------------------|
| Sıcaklık ölçümündeki toplam hata                                |        |                         |
| $W_{Tfg}$                                                       | °C     | $\pm 0.386 - \pm 0.583$ |
| $W_{Tıç}$                                                       | °C     | $\pm 0.583$             |
| $W_{Tkg}$                                                       | °C     | $\pm 0.386$             |
| $W_{Tkç}$                                                       | °C     | $\pm 0.386$             |
| $W_{Tm}$                                                        | °C     | $\pm 0.380$             |
| $W_{Tkta}$                                                      | °C     | $\pm 0.386$             |
| $W_{Tç}$                                                        | °C     | $\pm 0.386$             |
| $W_{Tkyf}$                                                      | °C     | $\pm 0.559 - \pm 0.707$ |
| Zaman ölçümündeki toplam hata                                   |        |                         |
| $W_{ta}$                                                        | dakika | $\pm 0.1$               |
| $W_{ts}$                                                        | dakika | $\pm 0.1$               |
| Ağırlık kaybının ölçümündeki toplam hata                        |        |                         |
| $W_w$                                                           | gram   | $\pm 0.5$               |
| Hız ölçümündeki toplam hata                                     |        |                         |
| $W_v$                                                           | m/s    | $\pm 0.14$              |
| Havanın bağıl neminin ölçümündeki toplam hata                   |        |                         |
| $W_{\phi}$                                                      | RH     | $\pm 0.1$               |
| Örneklerin bünyesindeki nem miktarının tespitindeki toplam hata |        |                         |
| $W_{Mkm}$                                                       | gram   | $\pm 0.001$             |
| Güneş takip sisteminde ortaya çıkan hatalar                     |        |                         |
| $W_{GT}$                                                        | s      | $\pm 0.506$             |
| Diğer hatalar                                                   |        |                         |
| $W_p = W_{cp}$                                                  | %      | $\pm 0.1 - 0.2$         |

## 4. TEORİK BİLGİLER

### 4.1. Nemlilik Ölçüsü

Tarım ürünlerinde bulunan nem miktarları, bünyede tutulmuş bulunan su ağırlığı olarak ele alınır. Su miktarı, % olarak oransal biçimde tanımlanır. Nem miktarının belirlenmesinde “Yaş baz” (y.b.), “Kuru baz” (k.b.) olmak üzere iki tanımdan biri kullanılmaktadır. Armut ürününün kuru esasa ve yaş esasa göre nem içeriği değerleri için sırasıyla Eşitlik (4.1) ve Eşitlik (4.2) kullanılmıştır [75].

$$MC_{y.b} = \frac{W_s}{W_s + W_k} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\%MC_{k.b} = \frac{W_s}{W_k} \quad (4.2)$$

Eşitlik (4.1) ve (4.2) 'de;  $W_s$  yaş ağırlık ve  $W_k$  kuru ağırlıktır. Boyutsuz nem oranı (MR) ve kuruma hızı (DR) değerleri Eşitlik (4.3) ve (4.4) kullanılarak hesaplanmıştır [75].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (4.3)$$

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.3) ve (4.4)'te;  $M$  nem,  $M_e$  denge nemi,  $M_o$  ilk nem, " $M_{t+dt}$ ", " $t + dt$ " de ki nem içeriğidir ve  $M_t$  ise " $t$ " deki nem içeriğidir.

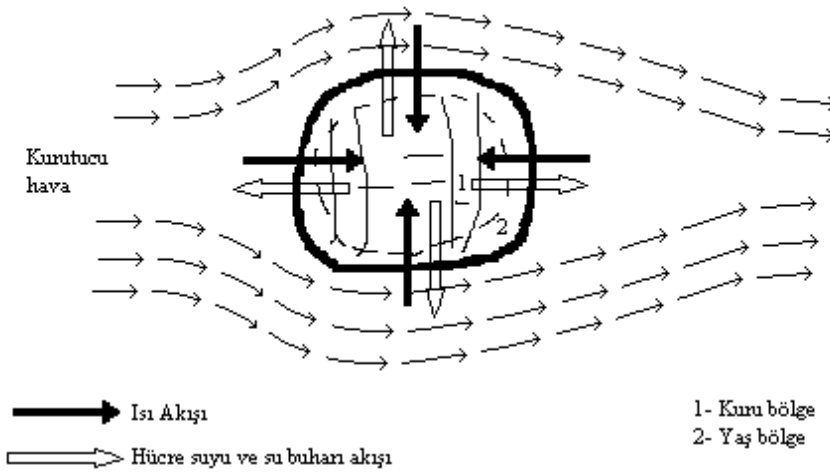
### 4.2. Tarım Ürünlerinde Kurumanın Oluşum Kuramı ve Kurumanın Evreleri

Kurutmada esas, kurutulacak malzemenin içindeki suyu önce buhar haline getirip sonrada bu buharı uzaklaştırmaktır. Suyu sıvı halden buhar haline getirmek için, buharlaştırma gizli ısısı kadar bir ısı vermek gerekmektedir. Bu ısı, normal sıcaklıklarda

buharlaştırılacak her gram su için yaklaşık 2.5 kJ'dir. Malzemeye bu ısıyı vermek için klasik ısı transfer yöntemleri ile di-elektrik ısıtma metotları kullanılır. Klasik ısı transfer yöntemleri kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyondur. Bu ısının verilmesi sırasında ısı transfer metotlarından biri veya birkaçı etkili olabilir. Hava akımı yardımıyla yapılan kurutmada konveksiyonla ısı iletimi daha etkindir [76].

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi bu ısıtmada, sıcaklık dokunun dışından hücrelere doğru olurken, buharlaşan su hücreden dışa doğrudur. Di-elektrik yolla ısı transferi ise bunun tam tersi olup, ısı içeriden dışa doğrudur. Su buharının ürünü terk edişi difüzyon, kapillar veya bu iki mekanizma ile olur.

Kuruma amacıyla yeterli ısının bulunduğu bir ortama konan nemli bir maddenin kuruma sürecinde genel olarak üç evre vardır. Bunlar ısınma evresi, sabit kuruma hızı ve azalan kuruma hızı evreleridir [76].

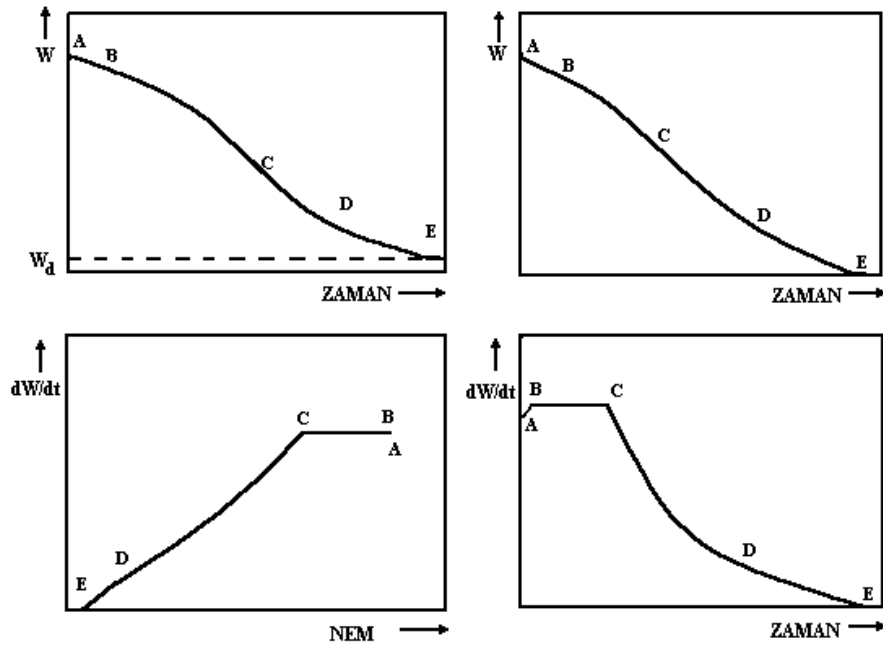


Şekil 4.1. Ürün hücresinde ısı ve suyun kuruma sırasındaki hareket yönleri [76]

Kurumakta olan bir maddenin nemliliğinde olan değişim Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekillerde AB ile gösterilen ısınma evresinde, ürünün sıcaklığı kurutma havasının sıcaklığı ile dengeye ulaşmaya kadar sürer. Ürün kalınlığı azaldıkça, ısınma evresi süresince oluşan nem kaybı dikkate alınmayacak ölçüde azalır [76].

Sabit kuruma hızı evresi, şekillerde BC çizgisiyle belirtilmiştir. Burada ürünün üzeri ince bir su tabakası ile kaplı olduğundan, önce bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Aslında bu durgun bir su yüzeyinden olan serbest buharlaşmaya benzer. Başlangıçta çok hızlı olan bu buharlaşma, bir süre sonra yüzeyin hemen üzerinde oluşan buhar tabakası nedeniyle

yavaşlar. Kurumanın devam etmesi için, bu buhar filminin, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi hareketli bir hava akımı ile dağıtılıp taşınması gerekir. Şekildeki C noktası (ürünün yüzeyindeki serbestçe buharlaşabilen nem sona erdiği zaman), sabit hızdaki kurumanın sona erdiğini belirtmekte olup, bu noktadaki nem “kritik nem” olarak bilinir. C noktasının görülebilmesi için, ürünün başlangıç nemi, kritik nem değerinden daha yüksek olmalıdır. Meyvelerde ve sebzelerde sabit kuruma hızı evresi, genellikle çok kısa sürer [76].



Şekil 4.2. Karakteristik kuruma eğrileri [76]

Şekildeki CDE eğrisi, sabit kuruma evresinden sonra başlayan azalan hızda kuruma evresini göstermektedir. Bu evrede buharlaşma ürünün içinde başladığından su yüzeye difüzyon ile ulaşır. Yüzeye yakın bölümler, hem doğrudan doğruya yüzeye ve hem de kapillarla nem verdiklerinden, iç katmanlara göre daha çok su kaybederler. Bunun sonucu olarak ürünün dış yüzeyinde kabuk bağlama, buruşma, çatlama ve yarılmalar görülür. Bu evrede kuruma süresi uzadıkça, birim zamanda buharlaşan nem miktarı azalmaktadır. Bu nedenle bu evreye azalan hızda kuruma evresi denir ve nem uzaklaşması sona erene kadar (E) devam eder. Birinci azalan hız evresinde, hem yüzeyden serbest buharlaşma ve hem de iç kısımlardaki buharlaşan suyun hareketi etkili olmaktadır. Bu bölüm bir geçiş aşamasıdır (CD arası). Hava hızı, sıcaklık ve nem bu bölümde etkili olmaktadır. İkinci bölümde kuruma hızı, bütünüyle içsel nem hareketine bağlı olarak oluşur. DE ile gösterilen bu bölüm denge nemine ulaşmaya kadar devam eder [76].

### 4.3. İnce Tabaka Kuruma Kuramı

İnce tabaka kavramı, kurutulacak ürünün yalnızca bir tanesinin kalınlığına sahip olacak şekilde serilmesiyle elde edilen, kuramsal bir ürün tabakasını belirtir. Bu kavram, kurutma havasının bu tabakanın içinden geçerken sıcaklık ve nem değerlerinde bir değişikliğin olmadığı kabulünün yapılabilmesini sağlamaktadır. Tarım ürünlerinin ince tabaka halinde kurutulması sırasında ısı ve kütle iletimi sabit ve azalan kuruma evreleri için ayrı ayrı incelenir [77].

#### 4.3.1 Sabit Hızda Kuruma Evresi

Sabit hızda kuruma evresi, ürünün içerdiği nem kritik nem değerinden daha fazla olduğunda görülebilir. Sabit hızla kuruma evresi süresince [78],

- Ürün yüzeyinin ince bir su filmiyle kaplı olduğu
- Kuruma hızının, kurutma havasının sıcaklığından, bağıl neminden ve hızından etkilendiği
- Kuruma hızının, ürünle ilgili unsurlardan etkilenmediği
- Ürün yüzey sıcaklığının, kurutma havasının yaşı termometre sıcaklığına eşit olduğu
- Ürün yüzeyindeki su buharı basıncının, yüzey sıcaklığına eşit sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına eşit olduğu

kabul edilir. Bu ön kabullerden de anlaşılacağı gibi, sabit hızla kuruma evresinde buharlaşan su miktarının aynı koşullardaki serbest su yüzeyinden buharlaşan su miktarına eşit olduğu varsayılmaktadır. Oysa yapılan gözlemler, bu evrede üründen buharlaşan suyun serbest su yüzeyinden buharlaşandan %30 daha az olduğunu göstermektedir [78].

Bu evre sırasında, kurutma havası ile ürün arasındaki ısı ve kütle iletimi aşağıdaki eşitliklerle belirtilebilir [78]. Kurutma havasından ürüne iletilen ısı miktarı Eşitlik (4.5) ile bulunur.

$$Q = h.A.(T_k - T_y) \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte,

Q, Isı miktarı (kJ)

h, Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)

T<sub>k</sub>, Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (°C)

T<sub>y</sub>, Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı (°C)

A, Ürünün yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

olarak tanımlanır.

Üründen kurutma havasına birim zamanda iletilen su buharı miktarı Eşitlik (4.6) ile bulunur.

$$m_s = h_D \cdot A \cdot (K_y - K_h) = \frac{h_D \cdot A \cdot M_s}{R \cdot T_m} (P_b' - P_b) \quad (4.6)$$

Burada,

m<sub>s</sub>, Birim zamanda üründen ayrılan su buharı (kg/s)

h<sub>D</sub>, Konveksiyonla kütle iletim katsayısı (kg/sm<sup>2</sup>)

K<sub>y</sub>, Ürünün yüzeyindeki su konsantrasyonu

K<sub>h</sub>, Kurutma havasındaki su konsantrasyonu

M<sub>s</sub>, Suyun mol ağırlığı (kg/mol)

R, Evrensel gaz sabiti (J/molK)

T<sub>m</sub>, Hava sıcaklığı (K)

P<sub>b</sub>', Havanın yaş termometre sıcaklığındaki buhar basıncı (Pa)

P<sub>b</sub>, Havadaki su buharının kısmi basıncı (Pa)

ile ifade edilir.

Üründen ayrılan suyun buharlaşabilmesi için gerekli enerji Eşitlik (4.7) ile bulunur.

$$E = m_s \cdot \lambda \quad (4.7)$$

Burada,

E, Buharlaşma için gerekli enerji (kJ)

λ, Suyun T<sub>w</sub> sıcaklığında buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)

ile ifade edilir.

Eşitlik (4.5-4.7) denklemlerinden faydalanarak, birim zaman içinde üründen ayrılan nem miktarı (kuruma hızı) Eşitlik (4.8) yardımıyla bulunur:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h.A.(T_a - T_w)}{\lambda} = h_D.A.(\omega_2 - \omega_1) \quad (4.8)$$

Burada,

$\omega_1$ , Havanın kurutucuya giriş şartlarında sahip olduğu mutlak nem ( $\text{kg}_{\text{subuhar}}/\text{kg}_{\text{kuru}} \text{ hava}$ )

$\omega_2$ , Havanın kurutucudan çıkış şartlarında sahip olduğu mutlak nem ( $\text{kg}_{\text{subuhar}}/\text{kg}_{\text{kuru}} \text{ hava}$ )

olarak tanımlamaktadır.

Isı ve kütle iletiminin birlikte yer aldığı işlemlerin analizinde Lewis sayısı (Le) önemli bir rol oynar. Eşitlik (4.8)'de kütle transfer katsayısı ( $h_D$ ) kolaylıkla ölçülemediği için Eşitlik (4.9)'de Lewis sayısından faydalanılır.

$$Le = \frac{h}{h_D.C} \quad (4.9)$$

Hava-su sistemlerinde Le sayısının 1'e eşit olduğu kabul edilir [82]. Burada, C, Havanın ısı kapasitesi,  $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{kuru}}\text{hava } ^\circ\text{C}$  dir.

Buna göre,  $C = 1.007 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$  alınıp  $1 = \frac{h}{h_D.1.007}$  ve buradan  $h_D = 0.093h$   $\text{kg}_{\text{kuru}}\text{hava}/\text{m}^2\text{s}$  bulunur. Sabit kuruma hızı döneminde kuruma hızının hesaplanmasında  $h_D$  yerine  $0.093h$  kullanılır.

Eşitlik (4.8)'de yer alan konveksiyonla ısı ve kütle iletimi katsayılarının kurutma işlemi sırasındaki değişimleriyle ilgili deneysel çalışmalar, bu katsayıların yaklaşık olarak,

- Hava akımının materyal yüzeyine paralel olması durumunda, hava hızının 0.8 kuvvetiyle,

- Hava akımının ürün tabakasının içinden geçirilmesi durumunda 0.6 ya da daha küçük bir kuvvetiyle orantılı olduğunu belirtmektedir.

Kurutma işlemi sırasında, kuruyan materyale konveksiyon yoluyla ısı iletiminin dışında, kondüksiyon ve/veya radyasyon yoluyla da ısı iletimi söz konusu olduğunda Eşitlik (4.8) bu yollarla olan ısı iletimini belirlemek için geliştirilmiş ifadelerin eklenmesi gerekir [78].

Bu çalışmada, azalan hızla kuruma işlemleri gerçekleştiğinden, sabit hızla kuruma evresi hakkındaki bilgiler konu bütünlüğü sağlanması bakımından önemlidir.

#### **4.3.2. Azalan Hızla Kuruma Evresi**

Azalan hızla kuruma evresi sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi, sabit hızla kuruma evresine göre daha karmaşıktır. Yalnızca materyalin yüzeyinden konveksiyonla ısı ve kütle iletimi söz konusu değildir. Bu evrede ürün içindeki ısı ve kütle difüzyonun da dikkate alınması gerekmektedir [79].

Azalan hızla kuruma evresi sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden yararlanmak mümkündür. Azalan hızla kuruma evresiyle ilgili teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin geliştirilmesi sırasında, işlemleri biraz daha kolaylaştırmak amacıyla, bazı ön kabuller yapılır. Bu kabuller aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir [79]:

- Ürün içindeki nem dağılımı tek düzedir.
- Kuruma, madde içindeki nemin su veya buhar fazında difüzyonu sonucu oluşur.
- Difüzyon
  - Nem konsantrasyonu farkı
  - Sıcaklık konsantrasyonu farkı
  - Buhar basınçları konsantrasyonu farkı gibi etkenlere bağlıdır.
- Kurutma havasının özellikleri (sıcaklık, hız, bağıl nem) kuruma süresince değişmez.
- Ürün ince bir tabaka şeklinde serilir.

##### **4.3.2.1. Azalan hızla kuruma evresi ile ilgili teorik modeller**

Luikov ve arkadaşları, herhangi bir materyalde suyun iletimi ve buharlaşarak ayrılmasını kontrol eden unsurları dikkate alarak kılcal borulu yapıya sahip, gözenekli

materyaller için teorik bir model geliştirmişlerdir. Bu matematiksel model üç kısmi diferansiyel denklem takımından oluşmaktadır [79].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P \quad (4.12)$$

Yukarıdaki Eşitlik (4.10-4.12)'de yer alan M, nemi, T sıcaklığı, P basıncı, t zamanı ve K ürün ve çevre ile ilgili doğal katsayıları belirtmektedir. Günümüzde, bu katsayıların tarım ürünleriyle ilgili olanlarının pek azı belirlenebilmiştir. Bu nedenle, yukarıdaki denklem takımlarını kullanılabilir duruma getirebilmek amacıyla bazı terimlerden vazgeçilip, sadeleştirmeler yapılır. Örneğin, toplam basınç farkı nedeniyle oluşacak nem iletimi, tarım ürünlerinin kurutulması sırasında söz konusu dahi olamayacak derecede yüksek sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek büyüklüğe geleceğinden, denklem takımlarındaki basınç terimi ihmal edilir [79]. İkinci bir sadeleştirme, sıcaklık konsantrasyonu farkından ötürü meydana gelen nem iletiminin ihmal edilmesiyle yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, nem konsantrasyon farkına bağlı olarak meydana gelen nem iletimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık farkına bağlı iletim, dikkate alınmayabilecek ölçülerdedir [79].

Yukarıda sıralanan sadeleştirmeler sonucunda, azalan hız evresi sırasındaki kuruma hızı, yalnızca bir kısmi diferansiyel denklemle ifade edilebilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.13)'de “K” katsayısı yerine, difüzyon katsayısı “D” kullanılabilir. Bu durumda elde edilen denklem D nin sabit değeri için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \cdot \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (4.14)$$

Kartezyen koordinatlar da  $c=0$ , silindir koordinatlar da  $c=1$ , küresel koordinatlar da  $c=2$  değerlerini almaktadır. Eşitlik (4.14)'te değişik şekilli katı cisimler için çözümü yapılarak kurutma denklemi olarak kullanılabilir. Eşitlik (4.14)'te aşağıdaki başlangıç ve sınır şartları kullanılarak çözülebilir.

$$M(r,0) = M_o$$

$$M(r_o, t) = M_e$$

Eşitlik (4.15)'de sonsuz yassı levha cisimlerin, herhangi bir “t” anındaki ortalama nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan analitik çözümü aşağıda verilmektedir [80-82]. Bu çözümde, difüzyon katsayısının sabit olduğu, katıyı çevreleyen ortamda kütle transferine karşı direnç olmadığı ve katı ve çözünen arasında kimyasal bir reaksiyon olmadığı kabulleri yapılmaktadır.

Sonsuz yassı levha için bir boyutlu durum [83],

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - (2n+1)^2 \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{D \cdot t}{L^2} \right] \quad (4.15)$$

şeklindedir.

Burada,

D, tüm azalan kuruma dönemine ait su buharının havaya difüzyon katsayısı ( $m^2/saat$ )

L, Kurutulan ürün kalınlığının yarısı, m

$M_e$ , Kurutulan ürünün denge bağıl nemi (ERH)

$M_o$ , Ürünün başlangıçtaki nem oranı ( $kg_{su}/kg_{kurumadde}$ )

olarak verilmektedir.

Eşitlik (4.15)'de serinin yalnızca ilk teriminin dikkate alınmasıyla yapılan çözümde hata %5' i geçmez. Bu hata tarım ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili işlemler için kabul

edilebilir olduğundan seri açılımının ilk terimi alınıp ayrıca  $\left[ \pi^2 \frac{D}{4L^2} \right]$  yerine k yazılarak yassı düz levhalarda bir boyuttaki durum için aşağıda belirtilen eşitlikler elde edilir [81-82]:

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (4.16)$$

Difüzyon katsayısı gerçekte sabit değildir, nem içeriği ile değişir. D değeri küçük nem içeriklerinde daha azdır ve kuruma yüzeyi yakınında çok küçük olabilir. Pratikte kurutulan materyalde ortalama bir D değeri deneysel olarak hesaplanabilir. Bu amaçla aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)} \quad (4.17)$$

Eğer yassı düz levha için  $\ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)}$  ifadesine karşı zaman grafiği çizilirse bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden D difüzyon katsayısı hesaplanır [81-82].

Difüzyon yavaş kuruyan materyallerin karakteristik davranışdır. Katı yüzeyinden havaya su buharının kütle transferi direnci genellikle ihmal edilir ve bütün kuruma hızını katıdaki difüzyon kontrol eder. Böylece yüzeydeki nem içeriği denge değerindedir veya denge değerine çok yakındır. Sıcaklıkla difüzyon katsayısı arttığından, katıdaki sıcaklığın artmasıyla kuruma hızı artar.

#### **4.3.2.2. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilmiş yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri**

Azalan hızla kuruma evresi sırasında materyalin içinde oluşan nem iletimi, Newton'un soğumasıyla ilgili yasasına benzetilerek açıklanmaya çalışılır. Söz konusu yasa, cisim ile çevre arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmaması şartıyla, sıcaklığı değişmez kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişim miktarının, cisim

ve çevre sıcaklıkları arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir. Bu yasa matematik olarak aşağıdaki eşitliklerle gösterilebilir [83]:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_e) \quad (4.18)$$

Nem içeriği değişmez kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir materyalin neminde meydana gelen değişim, Eşitlik (4.18) ile aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (4.19)$$

veya

$$\frac{dM}{(M - M_e)} = -k dt \quad (4.20)$$

Eşitlik (4.20)'deki diferansiyel eşitliğin çözümü aşağıdaki şekildedir,

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt) \quad (4.21)$$

Eşitlik (4.21)'de yer alan “k” kuruma sabiti olarak adlandırılır. Birimi  $h^{-1}$  veya  $s^{-1}$  dir. Kuruma sabiti kurutulacak ürün ve kurutma şartlarına göre deneysel verilerden yararlanılarak belirlenir. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulan Eşitlik (4.21) Newton modeli olarak tanımlanır. Eşitlik (4.21) yardımıyla hesaplanan sonuçlar, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elde edilen değerlerin azalan hız evresinin birinci bölümüyle iyi bir uyum gösterdiği, ancak ikinci bölümde bazı sapmaların ortaya çıktığı görülür [82-83]. Bu nedenle, kuruma eğrilerini açıklamak için bazı araştırmacılar tarafından yarı teorik ve ampirik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller Tablo 4.1’de sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** Literatürde bulunan bazı kuruma eğrisi modelleri

| No | Model name                   | Model                                        | Referans                 |
|----|------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|
| 1  | Newton                       | $MR = \exp(-kt)$                             | El-Beltagy ve ark.[84]   |
| 2  | Page                         | $MR = \exp(-kt^n)$                           | Akoy [85]                |
| 3  | Modified Page                | $MR = \exp[-(kt)^n]$                         | Vega ve ark. [86]        |
| 4  | Henderson and Pabis          | $MR = a.\exp(-kt)$                           | Hashim ve ark. [87]      |
| 5  | Logarithmic                  | $MR = a.\exp(-kt) + c$                       | Rayaguru ve Routray [88] |
| 6  | Two term                     | $MR = a\exp(-k_o t) + b\exp(-k_l t)$         | Sacilik [89]             |
| 7  | Two-term exponential         | $MR = a\exp(-k t) + (1 - a)\exp(-k a t)$     | Dash ve ark. [90]        |
| 8  | Wang and Singh               | $MR = 1 + at + bt^2$                         | Omolola ve ark. [91]     |
| 9  | Diffusion approach           | $MR = a\exp(-kt) + (1 - a)\exp(-k b t)$      | Yaldız ave Ertekin [92]  |
| 10 | Modified Henderson and Pabis | $MR = a\exp(-kt) + b\exp(-g t) + c\exp(-ht)$ | Zenoozian ve ark. [93]   |
| 11 | Verma <i>et al.</i>          | $MR = a\exp(-kt) + (1 - a)\exp(-g t)$        | Akpınar [94]             |
| 12 | Midilli and Kucuk            | $MR = a.\exp(-kt^n) + bt$                    | Midilli [95]             |
| 13 | Thompson                     | $t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$               | Pardeshi [96]            |

### 4.3. Aktivasyon Enerjisi

Aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) değeri, reaksiyon hızının sıcaklığa bağlı olarak hangi düzeyde değiştiğini göstermektedir. Aktivasyon enerjisi moleküllerin reaksiyona girebilmek için ihtiyaç duyduğu enerji bariyeri olarak da düşünülebilir. Deneylerde bir takım kinetik sabitler kullanılarak armut numunelerinin aktivasyon enerjisi hesaplamalarında Arrhenius tarafından 1889'da tanımlanmış olan ve bugün de geçerliliğini koruyan bu ifade Eşitlik (4.22)'de verilmiştir [97].

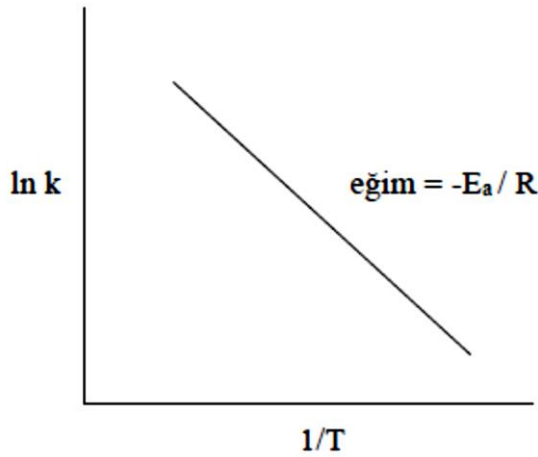
$$k = k_o \exp^{-E_a/RT} \quad (4.22)$$

Eşitlik (4.22)'de; k: Kinetik sabit ( $\text{h}^{-1}$ ),  $k_o$ : Arrhenius sabiti veya frekans faktörü,  $E_a$ : Aktivasyon enerjisi ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ), R: Gaz sabiti ( $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), T: Sıcaklık (K) dir. Eşitlik (4.22) ile verilen Arrhenius bağıntısının logaritması alınarak, Eşitlik (4.23) elde edilir.

$$\ln k = \ln k_o - \frac{E_a}{RT} \quad (4.23)$$

Bu eşitlikten yararlanılarak aktivasyon enerjisi hesaplanır.  $1/T - \ln k$  grafiği çizilerek (Şekil 4.1) elde edilen doğrunun eğiminden yararlanılarak ve Eşitlik (4.24) kullanılarak, aktivasyon enerjisi hesaplanır [97].

$$E_a = -(\text{eğim})R \quad (4.24)$$



Şekil 4.1. Arrhenius grafiği [97]

Dikdörtgenler prizması şeklinde kesilen armut örneklerinin kuruma kinetiğinin incelendiği çalışmada her bir durum için difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Bu amaçla

(4.17) eşitliği kullanılmıştır.  $\ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2(M - M_e)}$  ifadesine karşı zaman grafiğe geçirildiğinde

elde edilen doğrunun eğimi  $\frac{4l^2}{\pi^2 D}$  ifadesini verir. Buradan l (örnek kalınlığının yarısı)

bilindiğine göre difüzyon katsayısı  $\text{m}^2/\text{s}$  olarak hesaplanır. Hesaplar her bir kurutma havası giriş sıcaklığı ve kurutma havası hızında bu işlemler tekrarlanmıştır.

Arrhenius tipi bir denklem kullanılarak efektif difüzyon katsayısı değerleri ve kuruma şartları arasındaki korelasyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir [98].

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (4.25)$$

Her iki tarafın doğal logaritması alınıp  $\ln(D_{\text{eff}})$  karşı  $T^{-1}$  grafiği çizdirildiğinde, doğrunun eğimini  $E_a/R'$  ye karşılık gelmektedir. Buradan aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

#### 4.4. Termodinamik analizi

Tez çalışması kapsamında yapılan kurutma işlemlerinin ve bu işlemler için geliştirilen ve kullanılan güneş kollektörlü gıda kurutucunun termodinamik analizi yapılmıştır. Yapılan termodinamik hesaplamalar, birinci ve ikinci kanun analizlerini, başka bir deyişle; enerji ve ekserji analizlerini içermektedir. Bu analizler için, güneş kollektörlü gıda kurutucunun içerdği kurutma odasının kontrol hacimleri ayrı ayrı dikkate alınmış ve bu diyagramlar üzerinde enerji ve ekserji etkileşimleri gösterilmiştir.

##### 4.4.1. Enerji Analizi

Güneş kollektörlü gıda kurutucunun termodinamik analizinde ilk adım, analize konu olan elemanın sistem olarak tanımlanmasıdır. Bu aşamadan sonra analize konu olan sistemin termodinamik modelinin belirlenmesi ve seçilmesi gerekir. Bu nedenle, güneş kollektörlü gıda kurutucunun kurutma odası SASA modelinde düşünülmüştür.

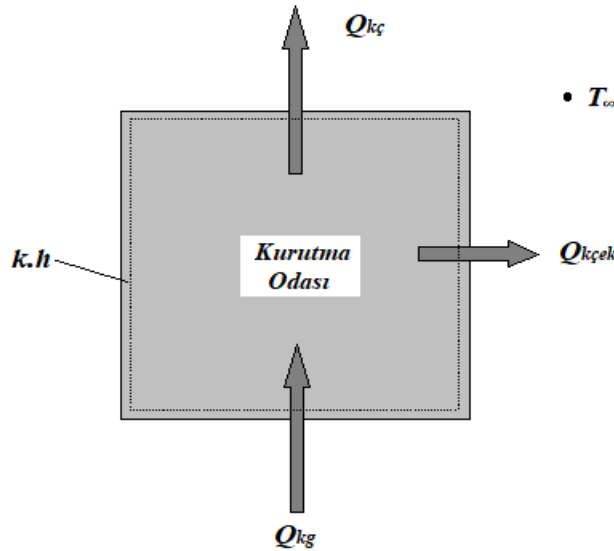
Sürekli akışlı açık sistem (SASA) modelinin kullanılması durumunda aşağıdaki kabuller dikkate alınmıştır [99].

- a. Seçilen kontrol hacmi içinde, yaygın hiçbir özellik zamanla değişmez. Böylece kontrol hacminin kütlesi, hacmi (sınır işi sıfırdır) ve toplam enerjisi sabit kalır.
- b. Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir özellik zamanla değişmez. Yani kontrol hacminin herhangi bir noktasında akışkan özellikleri sabittir.

- c. Kontrol hacminin çevresiyle ısı ve iş alışverişi zamanla değişmez. Yani sistemin çevresiyle birim zamanda yaptığı ısı veya iş alış verışı sabittir.

#### 4.4.1.1. Güneş kollektörlü gıda kurutucunun enerji analizi

Güneş kollektörlü gıda kurutucunun enerji analizini yapmak için kurutucu SASA modelinde düşünülmüştür. Kurutucunun kontrol hacmi Şekil 4.2’ de gösterildiği gibidir. Güneş kollektörlü gıda kurutucunun enerji analizi için, kurutma havasının kontrol hacmine getirdiği ve kontrol hacminden taşıdığı enerji değerlerini dikkate almak gerekir. Kurutma havasının kurutucuya taşıdığı enerjinin bir kısmı kurutucudaki ürünleri kurutmada, diğer kısmı da kurutucuda meydana gelen ısı kayıplara harcanmıştır. Eğer kurutucunun tamamen izole edildiği kabul edilirse, o zaman kurutma havasının kurutucuya getirdiği enerjinin tümü ürünlerdeki nemi almak yani ürünleri kurutmak için kullanıldığı düşünülebilir. Kurutucudaki ürünlerin çektiği enerji miktarı ile kurutucuda meydana gelen ısı kayıplar için kullanılan enerjinin toplamı kurutucunun çektiği toplam enerji miktarı olarak düşünülmüştür.



Şekil 4.2. Güneş kollektörlü gıda kurutucunun kontrol hacmi

Şekil 4.2’ deki güneş kollektörlü gıda kurutucunun kontrol hacmi dikkate alınarak ve Termodinamiğin Birinci Kanunu (TD1K)’dan yararlanarak kurutucunun enerji etkileşim değerleri aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilmiştir. Bu denklemlerde,  $\dot{m}_{khg} = \dot{m}_{khç} = \dot{m}_{kh}$  ve  $c_{p_{khg}} \cong c_{p_{khç}} \cong c_{p_{kh}}$  olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda;

kurutma odasına giren enerji miktarı,

$$Q_{kg} = \dot{m}_{khg} c_{p_{khg}} (T_{kg} - T_{\infty}) \text{ (kW)} \quad (4.26)$$

kurutma odasından zamana bağlı olarak çıkan enerji miktarı,

$$Q_{kç} = \dot{m}_{khç} c_{p_{khç}} (T_{kç} - T_{\infty}) \text{ (kW)} \quad (4.27)$$

O halde, (4.26) ve (4.27) denklemleri kullanılarak, kurutucu tarafından zamana bağlı olarak çekilen enerji miktarı,

$$Q_{kçek} = \dot{m}_{kh} c_{p_{kh}} (T_{kg} - T_{kç}) \text{ (kW)} \quad (4.28)$$

eşitlikleriyle hesaplanmıştır. Eşitlik (4.26-4.28) kullanılarak güneş kollektörlü gıda kurutucunun enerji kullanım oranı (EKO) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$EKO = \frac{Q_{kg} - Q_{kç}}{Q_{kg}} * 100 \quad (4.29)$$

#### 4.4.2. Ekserji Analizi

Termodinamiğin ikinci kanunu (TD2K), ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini, çevrenin iç enerjisinden yararlanarak iş elde edilemeyeceğini belirterek enerji dönüşümlerini sınırlamakta ve ayrıca, bütün doğal olayların tersinmez olduğuna dikkati çekerek enerjinin bir türden diğer bir türe dönüşümünde veya bir sistemden diğer bir sisteme transferinde, insanların faydalanabilecekleri kısmının azalacağını ve sürekli değer kaybedeceğini ifade etmektedir. O halde bir prosesin tersinmezliği, termodinamiğin ikinci kanunu ile bulunabilir ve entropi üretimindeki artışla ifade edilir [100]. Termodinamiğin ikinci kanunu kapsamında güneş kollektörlü gıda kurutucunun ekserji analizi yapılmıştır.

Enerji, ekserji ve anerji olmak üzere iki kısma ayrılır. Kısaca, enerjinin kullanılabilir kısmına ekserji, enerjinin kullanılmayan kısmına da anerji denir. Ekserji, referans şartlarına bağlı olarak bir akışkanın, gazın veya bir kütlenin dengede olmayan durumunun bir sonucu

olarak; bir gazdaki, akışkandaki veya kütledeki kullanılabilir işi ifade eder. Böylece, ekserji; bir sistemdeki her bir prosesin enerji dengesinden yararlanarak belirlenebilen diğer özelliklerden hesaplanabilir. Genel olarak ekserji, iç enerjideki değişimleri, entropi değişimini, iş değişimini, momentum ve yerçekimi gibi etkileri içerir [100].

Ekserji analizi, TD2K' na ve tersinmez durum değişimlerindeki entropinin genel ifadesine bağlıdır. Başka bir deyişle, TD2K' nun mühendislik sistemlerine uygulanmasını ve entropinin yoğun kullanımını gerektirir. Bir sistemin ekserji analizinde amaç, sistemin denge durumundaki ekserji değerini belirlemek ve belli şartlarda meydana gelen işlemler için ekserji dönüşümünün nedenini belirlemektir. Bunun için ilk hedef, ekserji kayıplarının bulunduğu yeri, bu kayıpların ne büyüklükte olduğunu, bu kayıpların ne zaman giderileceğini ve böylece sistemin ikinci kanun veriminin nasıl iyileştirileceğini bilmektir. Genel olarak ekserji kayıpları, gerçek sistemlerdeki veya elemanlardaki tersinmez durum değişimlerinde meydana gelen entropi üretiminden kaynaklanır [100].

Sistemdeki ekserjiyi değerlendirmede iki yaklaşım vardır. Bunlardan biri, yeni sistemler dizayn etmek; diğeri de , mevcut sistemleri değerlendirmektir. Bu durumda , çevre referans alınarak mevcut sistemdeki ekserji giriş-çıkışı ve ekserji kayıpları kolayca belirlenebilir. Eğer bir işlemde ve/veya sistemde yararlı iş yoksa o zaman ekserji de kayıp var demektir. Öyle ki, çevrenin sıfır enerji çizgisi olarak kullanılması, enerji destekli sistemlerin analizinde ve dizaynında mühendisler için bir çok avantaj sağlamaktadır [100].

Sonuç olarak; bir sistemin ekserji analizini yapmak, sistemdeki verimsiz işleri, elemanları ve çalışma durumlarını belirleyerek, ikinci kanun verimini iyileştirmek için gereklidir. İkinci kanun verimini iyileştirmek için, sistemin durum değişimlerindeki ısıya, işe ve kütsel debiye bağlı kayıplardan kaynaklanan ekserji kayıplarının miktarını, yerini ve türünü belirlemek gerekir [100].

#### **4.4.2.1. Güneş kollektörlü gıda kurutucunun ekserji analizi**

İkinci yasa analizi kapsamında, toplam ekserji girişi, kurutma odasının çıkış ve kayıp ekserji değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Kurutma odasının ekserji analizi için temel prosedür, kararlı durum noktalarındaki ekserji değerlerini ve işlem için ekserji değişiminin nedenini belirlemektir [101]. Ekserji değerleri, çalışma ortamının özellikleri kullanılarak birinci yasa enerji dengesinden hesaplanır [102]. Bu amaçla, ekserji denkleminin genel formu [103] kullanılmıştır. Ekserji genel denklemi Eşitlik (4.30) ile ifade edilmiştir.

$$\text{Ekserji} = (u - u_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{P}{J}(v - v_{\infty}) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_{\infty})\frac{g}{g_c J}$$

(iç enerji) (entropi) (iş) (momentum) (yerçekimi) (4.30)

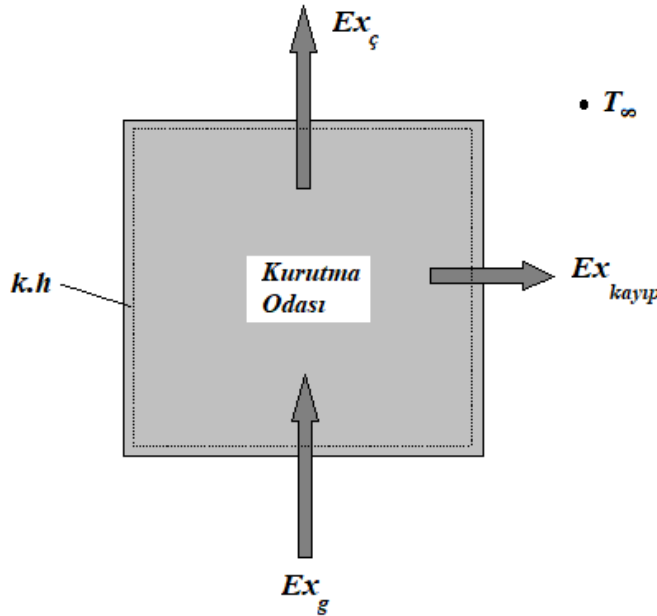
$$+ \sum (\mu_c - \mu_{\infty})N_c + E_i A_i F_i (3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty} T^3) + \dots$$

(kimyasal) (radyasyon emisyonu)

Bu genel ekserji denkleminin çeşitlemeleri vardır. Birçok sistemin analizinde Eşitlik (4.30)'da gösterilen terimlerin bazıları kullanılmıştır. Ekserji, herhangi bir kaynaktan elde edilebilen enerji olduğundan, yerçekimi, momentum terimleri, basınç değişiklikleri, iç enerji, radyasyon, kimyasal ve iş durumları ihmal edilebilir. Bu durumda Eşitlik (4.31) elde edilir.

$$\text{Ekserji} = \bar{C}_p \left[ (T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T}{T_{\infty}} \right] \quad (4.31)$$

Güneş kollektörlü gıda kurutucunun kontrol hacmi Şekil 4.3 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Ekserji analizi için kurutma sisteminin kontrol hacmi

Kurutucunun kontrol hacmindeki ekserji dengesi Eşitlik (4.32) ile ifade edilmiştir.

$$\sum Ex_g = \sum Ex_{\zeta} - \sum Ex_k \quad (4.32)$$

Bu durumda kontrol hacime giren net ekserji Eşitlik (4.31) yardımı ile aşağıdaki Eşitlik (4.33) elde edilerek hesaplanmıştır.

$$Ex_{kg} = \bar{C}_p \left[ (T_{kg} - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T_{kg}}{T_{\infty}} \right] \text{ (kJ/kg)} \quad (4.33)$$

Kontrol hacimden çıkan net ekserji Eşitlik (4.31) yardımıyla aşağıdaki Eşitlik (4.34) elde edilerek hesaplanmıştır.

$$Ex_{k\zeta} = \bar{C}_p \left[ (T_{k\zeta} - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T_{k\zeta}}{T_{\infty}} \right] \text{ (kJ/kg)} \quad (4.34)$$

Eşitlik (4.31-4.33)'te  $C_p$ ; Sıcaklık aralığındaki ortalama özgül ısıyı,  $\infty$  ifade ise referans alınan koşulu (çevre) belirtmektedir.

Ekserji verimliliği farklı bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir, ancak genel olarak, verim = ürün / bedel olarak ifade edilebilir. Ürün olarak buharlaştırılan suyun ve bedel olarak kurutma havasının sıcaklığı alınabilir [104].

Yaygın olarak kullanılan ekserji verimliliği bağlantısı Eşitlik (4.35) ve Eşitlik (4.36) ile ifade edilmiştir.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Ex}_{giren} - \dot{Ex}_{kayip}}{\dot{Ex}_{giren}} \quad (4.35)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Ex}_{cikan}}{\dot{Ex}_{giren}} \quad (4.36)$$

Bu çalışmada hesaplanan ekserji verimliliği kurutma odası ekserji çıkış ve kurutma odası ekserji giriş değerlerine ile hesaplanmıştır.

#### 4.4.3. Güneş kolektörünün ısı verimi

Kurutma sisteminde kullanılan güneş kolektörlerinin verimliliğini hesaplamak için kolektördeki faydalı enerji hesaplanmalıdır. Güneş enerjili hava kolektöründe faydalı enerji, kolektörden geçen akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığına bağlı olarak,

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_g - T_ç) \quad (4.37)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,  $\dot{m}$ , kolektörden geçen havanın kütleli debisi (kg/s),  $C_p$  havanın özgül ısıdır (J/kgK),  $T_g$  ve  $T_ç$  sırasıyla kolektör hava giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır (°C).

Kolektörden geçen havanın kütleli debisi Eşitlik (4.38) ile hesaplanır.

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A_k \quad (4.38)$$

Burada  $\rho$  havanın yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),  $V$  hava akış hızı (m/s),  $A_k$  ise kolektörün çıkış kesit alanı (m<sup>2</sup>)'dir.

Termodinamiğin I. kanunundan faydalanarak kolektörün ısı verimi Eşitlik (4.39) ile hesaplanır.

$$\eta_{kol} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_g - T_ç)}{I \cdot A_c} \quad (4.39)$$

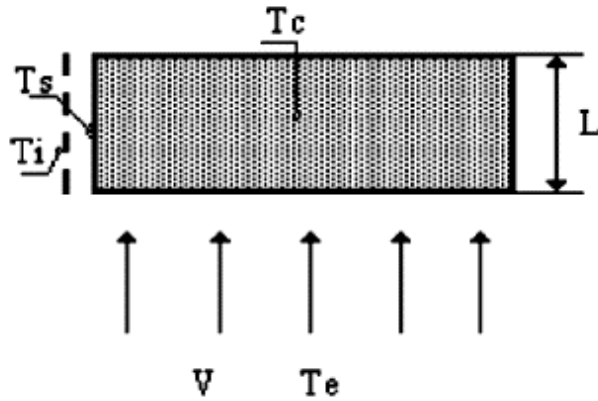
Eşitlik (4.39)'da,  $\eta_{kol}$  ısı verimi,  $I$  kolektör yüzeyine gelen güneş ışıması (W/m<sup>2</sup>),  $A_c$  ise güneş ışımasının direkt olarak vurduğu yutucu plaka yüzey alanıdır (m<sup>2</sup>).

#### 4.5. Konvektif Isı Transfer Katsayısı

Konvektif ısı transferi hareketli bir akışkan ile katı yüzey arasında gerçekleşir. Bu çalışmada düz plaka üzerinde zorlanmış konveksiyon akışı için konvektif ısı transferi araştırılmıştır. Akışkanın viskozitesi, akışkanın plakanın yüzeyinde sıfır hızına sahip

olmasını gerektirir. Bir sınır tabakası mevcut olduğu için akış ilk olarak laminerdir. Ancak akışın Reynolds sayısı yeterince yüksek olduğunda türbülansa ilerleyebilir [105].

Plakanın (armut örneği) iç sıcaklıkta ( $T_i$ ) tutulduğu ve plaka uzunluğunun ( $L$ ), türbülanslı akışın hiçbir zaman tetiklenmeyecek şekilde yeterince kısa olduğu kabul edilmiştir. Armut örneğinin üzerindeki zorlanmış akış için konvektif ısı transferi Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Düz bir plaka üzerinde zorlanmış akış için konvektif ısı transferi.

Ortalama ısı transfer katsayısı, laminar akış için Pohlhausen Eşitliği (Eşitlik 4.40) ve aşağıda verilen [106] diğer Eşitlikler (Eşitlik 4.41-4.43) kullanarak hesaplanmıştır.

$$Nu_{lam} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (Re < 2 \times 10^5) \quad (4.40)$$

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{K_v} \quad (4.41)$$

$$Re = \frac{L \cdot V \cdot \rho_v}{\mu_v} \quad (4.42)$$

$$Pr = \frac{\mu_v \cdot C_v}{K_v} \quad (4.43)$$

Reynolds sayısı (Re) ve Prandtl sayısı (Pr) hesaplamasında kullanılan nemli havanın farklı fiziksel özellikleri olan yoğunluk ( $\rho_v$ ), ısıl iletkenlik ( $K_v$ ), özgül ısı ( $C_v$ ) ve viskozite ( $\mu_v$ ) aşağıdaki polinom ifadelerini kullanarak belirlenmiştir [105-109]. Nemli havanın fiziksel özelliklerini elde etmek için Eşitlik (4.44-4.48) kullanılmıştır.

$$\rho_v = \frac{353.44}{(T_i + 273.15)} \quad (4.44)$$

$$K_v = 0.0244 + 0.6773 \times 10^{-4} T_i \quad (4.45)$$

$$C_v = 999.2 + 0.1434 T_i + 1.101 \times 10^{-4} T_i^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_i^3 \quad (4.46)$$

$$\mu_v = 1.718 \times 10^{-5} + 4.620 \times 10^{-8} T_i \quad (4.47)$$

$$T_i = \frac{(T_s + T_e)}{2} \quad (4.48)$$

Burada nemli havanın elde edilen fiziksel özellikleri için  $T_i$ , ortam sıcaklığı ( $T_e$ ) ve ürünün yüzey sıcaklığının ( $T_s$ ) ortalaması olarak alınmaktadır.

## 5. HESAPSAL ZEKA YÖNTEMLERİ

Hesapsal zeka yöntemleri içerisinde en çok kullanılan makine öğrenmesidir. Makine öğrenimi yapısal olarak öğrenebilen ve veriler üzerinde anlamlı tahminler yapabilen bilgisayar algoritmalarının genel adıdır. Bu algoritmalar temelde örnek verilerden model oluşturarak çalışmaktadırlar. Günümüzde çok büyük miktarda verinin elle işlenmesi ve analizinin yapılması mümkün değildir. Bu nedenle verilen bir problemi çözmek için probleme ait ortamdan elde edilen veriyi makine öğrenmesi algoritmalarıyla eğiterek çözüme ulaşmak amaçlanmaktadır.

Makine Öğrenme algoritmaları:

- 1-Gözetimli Öğrenme (Supervised Learning)
  - 2-Gözetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning)
- olarak 2 guruba ayrılır.

Gözetimli öğrenme (Supervised learning); gözetimli öğrenme yönteminde, eğitim verisi “label” (etiket) bilgisi içermektedir. Yani çözüm için model geliştirmede sonuçları bilinen verilerden yararlanılmaktadır. Bu sayede oluşturulan model temel alınarak veri kümesi içerisinde etiket bilgisi mevcut olmayan verilerin sonuçlarının tahmin edilmesi amaçlanmaktadır.

En çok kullanılan gözetimli öğrenme algoritmaları:

- En Yakın Komşuluk → k-Nearest Neighbors (KNN)
- Yapay Sinir Ağları → Artificial Neural Network (ANN)
- Destek Vektör Makinaları → Support Vector Machine (SVM)
- Karar Ağaçları → Decision Trees (DTs)
- Lojistik Regresyon → Logistic Regression

olarak sıralanabilir.

Gözetimsiz öğrenme (Unsupervised learning); gözetimsiz öğrenme yönteminde ise label bilgisi yoktur. Veri setindeki bileşenler temel alınarak saklı ilişkilerin veya grupların ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır.

En çok kullanılan gözetimsiz öğrenme algoritmaları:

- Kümeleme → Clustering
- Birlikte Kuralları → Association Rules

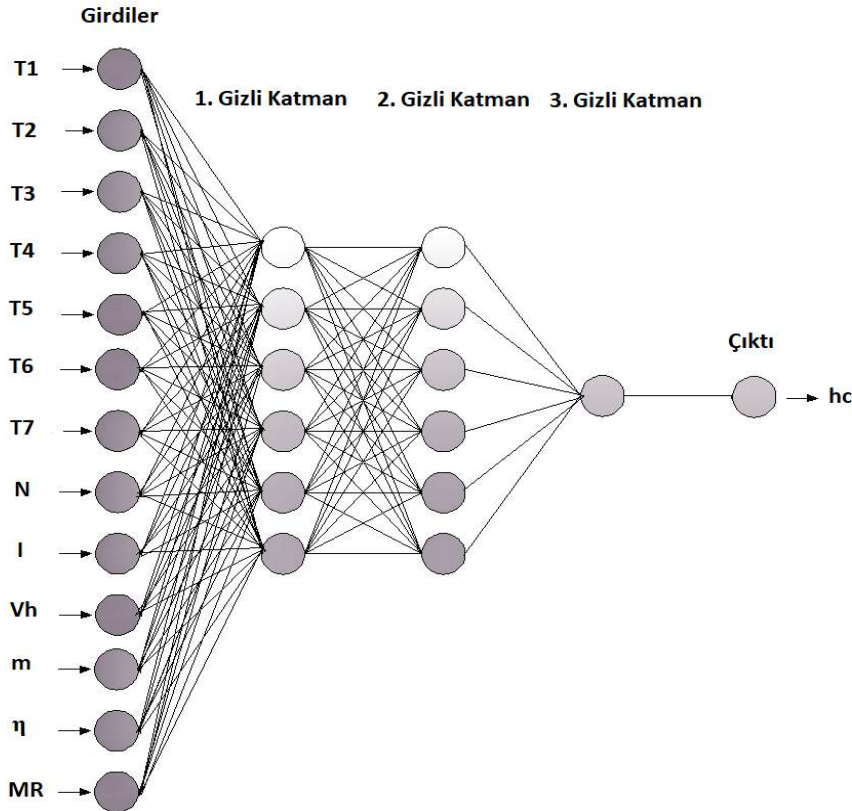
- Temel Bileşen Analizi → Principal Component Analysis (PCA)

olarak sıralanabilir.

### 5.1. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA); insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. YSA, belirli değerlere dayanarak, girdi alanında olan noktaları çıktı alanında olan eş noktalara belli bir fonksiyonla bağlamaktadır [110]. Yapay sinir ağları, örüntü tanıma, tahmin etme, sınıflandırma vb. geniş uygulama alanına sahiptir. Yapay sinir ağları, insanlara benzer olarak örnekler ile öğrenirler. Bu nedenle veri seti, eğitim ve test kümesi olarak iki kısma ayrılır [111].

Deneyisel veriler ile hesaplanmış konvektif ısı transferi katyasıyı değerleri tahmini için YSA'da kullanılan ağ, toplam olarak 5 katmandan oluşan modelin girdi katmanı 13 girdi için 13 nöron, birinci gizli katman 6 nöron, ikinci gizli katman 6 nöron, üçüncü gizli katman için 1 nöron ve çıktı katmanı ise sadece tek bir nöron içermektedir. Oluşturulan YSA modelinin yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. YSA yapısı

YSA'ya ait kullanılan ağ için; panel giriş sıcaklığı °C (T1), panel çıkış sıcaklığı °C (T2), panel cam sıcaklığı °C (T3), panel taban sıcaklığı °C (T4), kurutma odası giriş sıcaklığı °C (T5), kurutma odası çıkış sıcaklığı °C (T6), kurutma odası ortam sıcaklığı °C (T7), kurutma odası nem % (N), ısıtım W/m<sup>2</sup> (I), kurutma odası hava hızı (Vh), ürün ağırlığı (m), kollektör verimi % (η) ve boyutsuz nem oranı (MR) değerleri giriş verisi olarak seçilmiştir. Çıkış verisi olarak konvektif ısı transfer katsayısı (h<sub>c</sub>) W/m<sup>2</sup>K seçilmiştir.

## 5.2. Regresyon Analizi ve Karar Ağacı

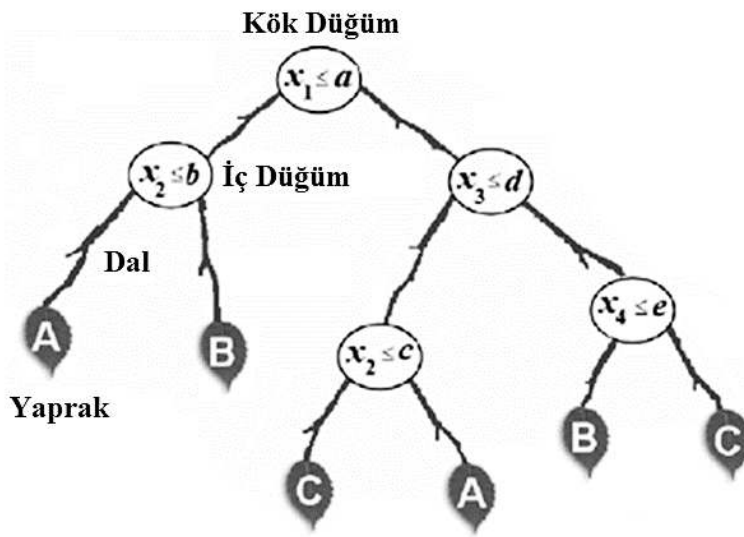
Doğrusal regresyon analizi belirlenmek istenen değişkenden daha kolay veya daha erken saptanabilen değişken(ler)den yola çıkarak belirlenmek istenen değişkeni tahmin eden bir model oluşturmaktır [112]. Bilinen normal dağılan sayısal bir değişkenden bilinmeyen, aralarında ilişki olan bir başka normal dağılan sayısal değişkeni tahmin için uygulanırsa basit doğrusal regresyon (simple linear regression), birden fazla değişkenden yararlanarak bir değişkeni tahmin etmek amacıyla modelleme yapıldığında ise “çoklu doğrusal regresyon” (multiple linear regression) olarak tanımlanır [113]. Eşitlik (5.1)'de çoklu doğrusal regresyon gösterilmiştir [114].

$$Y_i = (b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots b_nX_n) + e_i \quad (5.1)$$

Y bağımlı değişken, b<sub>0</sub>, regresyon eğrisinin y eksenini kesim noktası, b<sub>1</sub> ilk tahmin değişkeninin X<sub>1</sub> katsayısı, b<sub>2</sub> ikinci tahmin değişkeninin X<sub>2</sub> katsayısı, e<sub>i</sub> ise i'inci denek için Y'nin tahmin edilen değeriyle gözlenen değeri arasındaki farktır [115-116].

Karar ağaçları (KA) son yıllarda literatürde yaygın kullanımı olan bir sınıflandırma ve örüntü tanımlama algoritmasıdır. Bu yöntemin yaygın olarak kullanımının en önemli nedeni ağaç yapılarının oluşturulmasında kullanılan kuralların anlaşılabilir ve sade olmasıdır. KA sınıflandırma işleminin gerçekleştirilmesinde çok aşamalı veya ardışık bir yaklaşım kullanılmaktadır [117]. Bir KA'nın temel yapısı Şekil 5.2'de görüldüğü üzere düğüm, dal ve yaprak olarak adlandırılan üç temel kısımdan oluşur. Bu ağaç yapısında her bir öznelik (Hava hızı, Sıcaklık v.b.) bir düğüm tarafından temsil edilir. Dallar ve yapraklar ağaç yapısının diğer elemanlarıdır. Ağaçta en son kısım yaprak en üst kısım ise kök olarak adlandırılır. Kök ve yapraklar arasında kalan kısımlar ise dal olarak ifade edilir [117]. Başka bir ifadeyle bir ağaç yapısı; verileri içeren bir kök düğümü, iç düğümler (dallar) ve uç

düğümlerden (yapraklar) oluşur. Eğitim verilerine ait öznitelik bilgilerinden yararlanılarak bir KA yapısı oluşturulmasında temel prensip verilere ilişkin bir dizi sorular sorulması ve elde edilen cevaplar doğrultusunda hareket edilerek en kısa sürede sonuca gidilmesi olarak ifade edilebilir. Bu şekilde KA sorulara aldığı cevapları toplayarak karar kuralları oluşturur. Ağacın ilk düğümü olan kök düğümünde verilerin sınıflandırılması ve ağaç yapısının oluşturulması için sorular sorulmaya başlanır ve dalları olmayan düğümler ya da yapraklar bulunana kadar bu işlem devam eder [117].



Şekil 5.2. Dört boyutlu özellik uzayına sahip üç sınıftan oluşan karar ağacı yapısı [117]

KA'na ait tahminsel model için; panel giriş sıcaklığı °C (T1), panel çıkış sıcaklığı °C (T2), panel cam sıcaklığı °C (T3), panel taban sıcaklığı °C (T4), kurutma odası giriş sıcaklığı °C (T5), kurutma odası çıkış sıcaklığı °C (T6), kurutma odası ortam sıcaklığı °C (T7), kurutma odası nem % (N), ısıtım W/m<sup>2</sup> (I), kurutma odası hava hızı (Vh), ürün ağırlığı (m), kollektör verimi % (η) ve boyutsuz nem oranı (MR) değerleri giriş verisi olarak seçilmiştir. Çıkış verisi olarak konvektif ısı transfer katsayısı W/m<sup>2</sup>K (hc) seçilmiştir.

### 5.3. Destek Vektör Makinesi

Destek Vektör Makinesi (DVM) sınıflandırma ve regresyon için mükemmel bir kernel-tabanlı araçtır [118]. Bu öğrenme stratejisi Vapnik tarafından geliştirilmiş ve makineli öğrenme algoritmalarında ilkelere dayalı ve çok güçlü bir yöntemdir [119]. Destek

vektör makinelerinin regresyon problemlerinin çözümünde kullanılmasına ilişkin kapsamlı bir çalışma Smola ve Schölkopf tarafından yapılmıştır [120]. Eğitim örnekleri  $[(x_i - y_i)]_{i=1}^N = 1$  şeklinde verilmiş olsun. Regresyon problemlerinde yanıt değişkeni  $y_i \in \{+1, -1\}$  yerine  $y_i \in \mathbb{R}$  şeklinde tanımlanmaktadır.

### 5.3.1. Doğrusal destek vektör regresyon

$\varepsilon$ -duyarsız ( $\varepsilon$ -insensitive) destek vektör regresyonda ( $\varepsilon$ -DVR) amaç tüm eğitim verisi için gerçek yanıt değişkeni  $y_i$ 'lerden maksimum  $\varepsilon$  sapmaya sahip olan olası en düz  $f(x)$  fonksiyonunu bulmaktır. Diğer bir deyişle hatalar  $\varepsilon$ 'dan küçük olduğu sürece önemsenmeyecek, ancak bu değerden daha büyük bir sapma kabul edilmeyecektir [121-122].

İlk olarak doğrusal durum ele alınsın.  $f$  fonksiyonu aşağıdaki Eşitlik (5.2) ile ifade edilmektedir:

$$f(x) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b, \mathbf{w} \in \mathbb{R}^D, b \in \mathbb{R} \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.2) ile verilen fonksiyonun düz olması  $\mathbf{w}$ 'nin küçük olması anlamına gelmektedir. Bunu sağlamanın bir yolu  $\|\mathbf{w}\|^2$  normunu minimize etmektir. Konveks optimizasyon problemi aşağıdaki Eşitlik (5.3) ile ifade edilir:

$$\begin{aligned} \min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \\ y_i - (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \leq \varepsilon \\ (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - y_i \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (5.3)$$

Yukarıdaki ifadelerden görüldüğü üzere  $\mathbf{w}$  ağırlıkları  $\mathbf{x}_i$  örneklerinin doğrusal kombinasyonu şeklinde yazılabilmektedir. Böylece destek vektörler ile temsil edilen fonksiyonun kompleksliği girdi örneklerinin boyutundan bağımsız olacak ve sadece destek vektörlerin sayısına bağlı olacaktır. Şu noktaya da dikkat çekmek gerekir ki model  $\mathbf{x}_i$  örneklerinin çarpımları şeklinde ifade edilebilmektedir.

### 5.3.2. Doğrusal olmayan destek vektör regresyon

Destek vektörün nonlinear duruma genelleştirilmesi için  $\mathbf{x}_i$  örnekleri  $\Phi: \mathbb{R}^D \mapsto \mathcal{H}$  fonksiyonu yardımı ile özellik uzayına haritalanmaktadır. Destek vektör algoritmaları sadece  $\mathbf{x}_i$  örneklerinin iç çarpımlarına bağlı olduğundan  $\Phi$  fonksiyonunu bilmemize gerek kalmadan  $k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}_j)$  fonksiyonunu hesaplamak yeterli olacaktır. Optimizasyon problemi aşağıdaki Eşitlik (5.4) ile yazılır [121]:

$$\begin{aligned} \max \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) (\alpha_j^+ - \alpha_j^-) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) - \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \sum_{i=1}^N (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i^+ - \alpha_i^- \leq c \end{aligned} \quad (5.4)$$

Ağırlıklar ve tahmin fonksiyonu aşağıdaki Eşitlik (5.5-5.6) ile yazılır:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \phi(\mathbf{x}_i) \quad (5.5)$$

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b \quad (5.6)$$

Bu regresyonun doğrusal durumdan farkı  $\mathbf{w}$  ağırlıklarının açık olarak elde edilmemesidir. Bununla birlikte nonlinear durumda optimizasyon problemi girdi uzayında değil özellik uzayındaki en düz fonksiyonu bulmaktadır [123].

Destek vektör makineleri matematiksel olarak  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \varphi(\mathbf{x}_i) \cdot \varphi(\mathbf{x}_j)$  şeklinde ifade edilen bir kernel fonksiyonu yardımıyla doğrusal olmayan dönüşümler yapılabilen ve bu şekilde verilerin yüksek boyutta doğrusal olarak ayrımına imkân sağlamaktadır. Sonuç olarak, kernel fonksiyonu kullanarak doğrusal olarak ayrılamayan iki sınıflı bir problemin çözümü ile ilgili karar kuralı aşağıdaki Eşitlik (5.7) ile yazılabilir [124].

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left( \sum_i a_i y_i \varphi(\mathbf{x}) \cdot \varphi(\mathbf{x}_i) + b \right) \quad (5.7)$$

Destek vektör makineleri (DVM) ile gerçekleştirilecek bir sınıflandırma işlemi için kullanılacak kernel fonksiyonu ve bu fonksiyona ait optimum parametrelerin belirlenmesi esastır. Literatürde kernel fonksiyonu olarak en sık kullanılan polinom, radyal tabanlı fonksiyon, Pearson VII (PUK) fonksiyonu ve normalleştirilmiş polinom kernelleri Tablo 5.1’de formülleri ve parametreleriyle birlikte sunulmuştur. Tablodan görüleceği üzere her kernel fonksiyonu için bazı parametrelerin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekir.

**Tablo 5.1.** Destek vektör makinelerinde kullanılan temel kernel fonksiyonları ve parametreleri

| <i>Kernel Fonksiyonu</i>               | <i>Fomüller</i>                                                                                                                      | <i>Parametreler</i>                                |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Polinom Kerneli                        | $K(x, y) = ((x.y) + 1)^d$                                                                                                            | d: Polinom derecesi                                |
| Normalleştirilmiş Polinom Kerneli      | $K(x, y) = \frac{((x.y) + 1)^d}{\sqrt{((x.y) + 1)^d ((y.y) + 1)^d}}$                                                                 | d: Polinom derecesi                                |
| Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) Kerneli | $K(x, y) = e^{-\gamma \ x - y\ ^2}$                                                                                                  | $\gamma$ : Kernel Boyutu                           |
| Pearson VII (PUK) Kerneli              | $K(x, y) = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{2 \cdot \sqrt{\ x - y\ ^2} \sqrt{2^{(1/\omega)} - 1}}{\sigma} \right)^2 \right]^\omega}$ | $\omega, \sigma$ : Pearson genişliği parametreleri |

DVM’ye ait kullanılan ağ için; panel giriş sıcaklığı °C (T1), panel çıkış sıcaklığı °C (T2), panel cam sıcaklığı °C (T3), panel taban sıcaklığı °C (T4), kurutma odası giriş sıcaklığı °C (T5), kurutma odası çıkış sıcaklığı °C (T6), kurutma odası ortam sıcaklığı °C (T7), kurutma odası nem % (N), ışınlam W/m<sup>2</sup> (I), kurutma odası hava hızı (Vh), ürün ağırlığı (m), kollektör verimi % ( $\eta$ ) ve boyutsuz nem oranı (MR) değerleri giriş verisi olarak seçilmiştir. Çıkış verisi olarak konvektif ısı transfer katsayısı W/m<sup>2</sup>K ( $h_c$ ) seçilmiştir.

Bu çalışmada her iki kurutma sistemine ait  $h_c$  değerleri tahminsel modeli için YSA, KA ve DVM kullanılarak tahminsel modeller oluşturulmuştur. Tahminsel model oluşturmada MATLAB2016a yazılımı kullanılmıştır. Sabit kollektörlü kurutma sistemine ait  $h_c$  değerleri tahminsel modelleri için toplam 336 adet veri kullanılmıştır. Bu verilerin 236 adedi eğitim için 100 adedi test için kullanılmıştır. Hareketli kollektörlü kurutma sistemine

ait  $h_c$  değerleri tahminsel modeli için toplam 210 adet veri kullanılmıştır. Bu verilerin 147 adedi eğitim için 63 adedi test için kullanılmıştır.

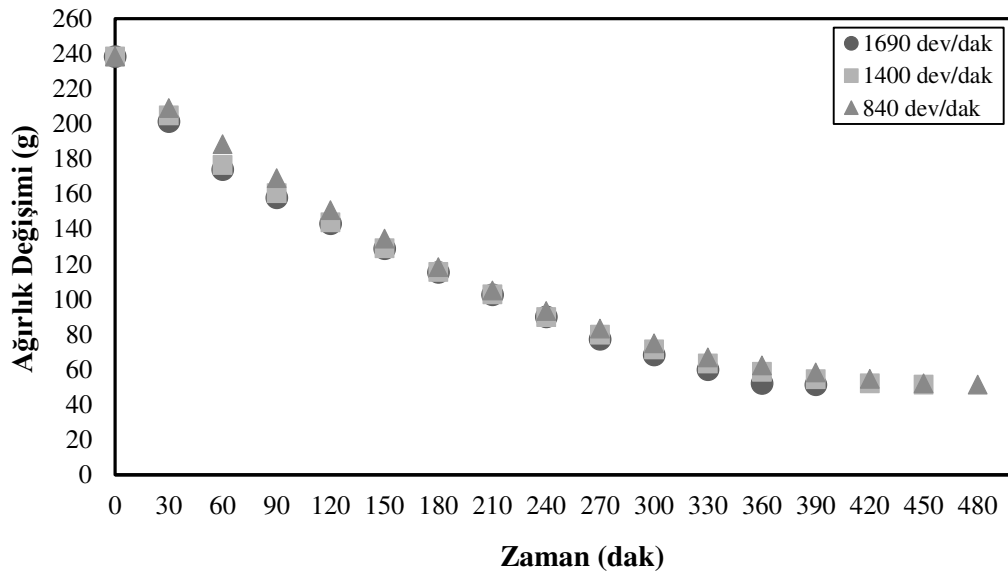
Konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) değerleri tahmini için kullanılan hesapsal zeka yöntemlerinin doğruluğunu belirlemek için Tablo 5.2’de ki hata analizleri yapılmıştır.

**Tablo 5.2.** Hata analizleri

| <i>Hata Analizi</i> | <i>Formülü</i>                                                                               | <i>Parametreler</i>                                                |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| MAE                 | $\frac{ P_1 - A_1  + \dots +  P_n - A_n }{n}$                                                | P: Tahmin Değeri<br>A: Gerçek Değer<br>n: Toplam Hata Değeri       |
| RMSE                | $\sqrt{\frac{(P_1 - A_1)^2 + \dots + (P_n - A_n)^2}{n}}$                                     | P: Tahmin Değeri<br>A: Gerçek Değer<br>n: Toplam Hata Değeri       |
| RAE                 | $\frac{ P_1 - A_1  + \dots +  P_n - A_n }{ A_1 - A'  + \dots +  A_n - A' }$                  | P: Tahmin Değeri<br>A: Gerçek Değer<br>A': Gerçek Değer Ortalaması |
| RRAE                | $\sqrt{\frac{(P_1 - A_1)^2 + \dots + (P_n - A_n)^2}{( A_1 - A' )^2 + \dots + (A_n - A')^2}}$ | P: Tahmin Değeri<br>A: Gerçek Değer<br>A': Gerçek Değer Ort.       |

## 6. BULGULAR

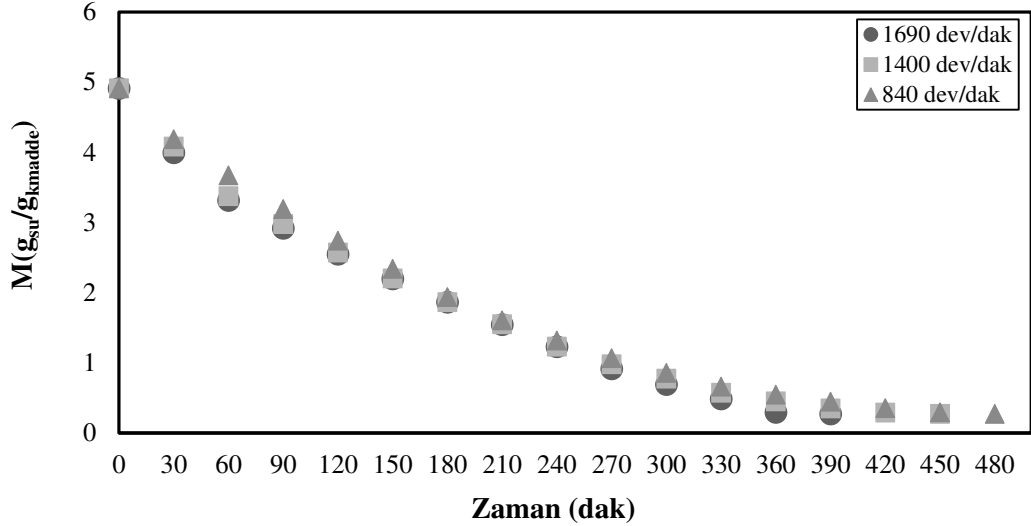
Sabit HIGK kurutma sisteminde ve hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut numuneleri et kalınlığı 10 mm olacak şekilde yassı kesitler halinde kesilmiştir. Hazırlanan armut numuneleri her iki kurutma sisteminde 1690, 1400 ve 840 dev/dak fan devir değerlerinde kurutulmuştur. Deneyler armut ürünlerinin denge nemi  $0.272 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde}}$  olana kadar devam etmiştir. Her iki kurutma sisteminde alınan verilerle, gram bazında ağırlık değişimi, M (kuru baz) nem içeriği, M (yaş baz) yüzde nem içeriği, boyutsuz nem oranı (MR), kuruma hızı (DR), kollektör ısı verimi ( $\eta$ ) ve armut ürünlerine ait konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerler, hareketli HIGK ve sabit HIGK kurutma sistemleri için ayrı ayrı Şekil 6.1-6.14 'de verilmiştir.



**Şekil 6.1.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde armut ürününün farklı fan devirlerindeki ürün ağırlığının zamana göre değişim değerleri

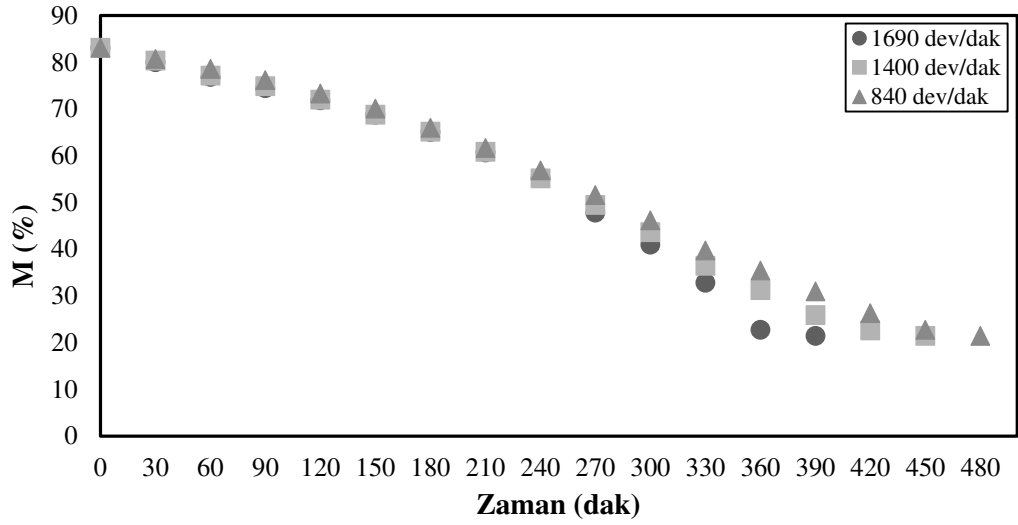
Üç farklı fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde armut ürünlerinin 51.3 g ağırlığına ulaşınca kadar tartımları yapılmış ve daha sonra tartım değeri 1 g altına düştüğü için deneyler sonlandırılmıştır. Şekil 6.1'e göre en hızlı gram cinsinden ürün ağırlığı değişimi 1690 dev/dak fan devrinde yapılan kurutmada gerçekleşmiştir. Bu devir değerindeki kurutma işlemi başladıktan 30 dakika sonra armut ürününün ağırlığı yaklaşık 37 g azalmıştır. 1400 dev/dak fan devrinde yapılan kurutma işleminde ilk 30 dakikada armut

ürününün ağırlığı yaklaşık 33 g azalmıştır. 840 dev/dak fan devrinde yapılan kurutma işleminde ise kurutma başladıktan 30 dakika sonra armut ürününün ağırlığı yaklaşık 30 g azalmıştır.



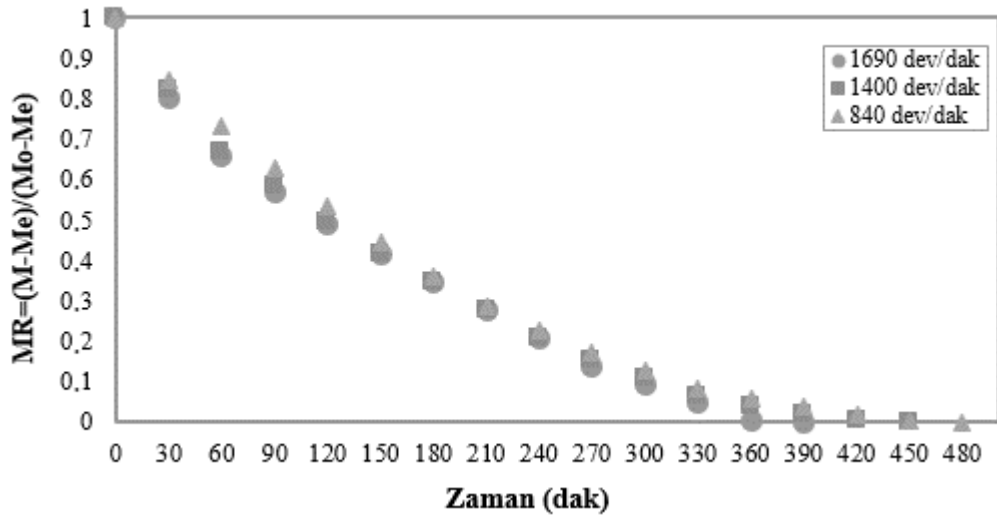
**Şekil 6.2.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.2’de hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut ürünlerinin kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Nem içeriğinin zamana karşı deney verileri çizildiği zaman elde edilen eğrinin kurutma eğrilerinin genel karakteristiği olan eksponansiyel bir formda olduğu belirlenmiştir. Kurutulan armut dilimlerine ait başlangıç nem miktarı  $4.921 \text{ g}_{su}/\text{g}_{katımadde}$  (ortalama değer) olup, kurutma işlemine nem içeriğinin sabit kaldığı  $0.272 \text{ g}_{su}/\text{g}_{katımadde}$  değerinde son verilmiştir. Bu değer denge nem içeriği olarak daha sonraki hesaplamalarda kullanılmıştır. En hızlı değişim 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. 1690 dev/dak fan devir değerinde kurutulan armut ürününün kuru baz nem içeriğinin 4.91 den  $0.27 \text{ g}_{su}/\text{g}_{katımadde}$  değerine kadar düşmesi yaklaşık 390 dakikada gerçekleşmiştir. Aynı şekilde 1400 dev/dak’da yapılan kurutma işleminde bu değişim 450 dakika, 840 dev/dak’da yapılan kurutma işleminde ise 480 dakika süresinden gerçekleşmiştir. Şekil 6.2’ye göre devir sayısının azalması ile kuru baz nem içeriği değerlerindeki değişim süresi artmıştır. Bu durum, armut ürününün kuru baz nem içeriği değerinin hızlı bir şekilde azalmasının, kurutma sistemindeki fan devir değerinin artmasıyla ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir.



**Şekil 6.3.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan yaş baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.3’de hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin yaş baz nem içeriği değerlerinin %83.1 değerinden %21.4 değerine kadar azaldığı gösterilmiştir. En hızlı değişim 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. Bu devirde yapılan kurutma işleminde yaş baz nem içeriği değişimi 390 dakika sonra bitmiştir. 1400 dev/dak fan devrinde yapılan kurutmada bu değişim 450 dakika, 840 dev/dak fan devrinde yapılan kurutmada ise 480 dakika sürmüştür.

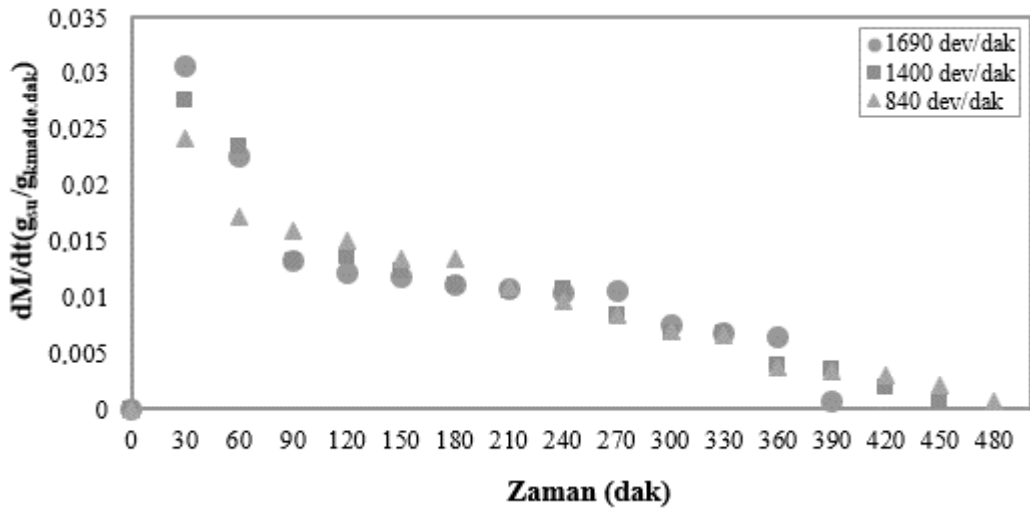


**Şekil 6.4.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan nem oranı değerlerinin zamanla değişimi

Nem içeriğinin zamana göre değişimi eğrilerinden kurumaya son verilen noktadaki nem içerikleri denge nem içeriği (0.272gsu/gkatımadde) olarak kullanılmıştır. Her bir zaman

dilimi için boyutsuz nem oranları  $\left( \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \right)$  belirlenmiştir. Şekil 6.4’de hareketli HIGK

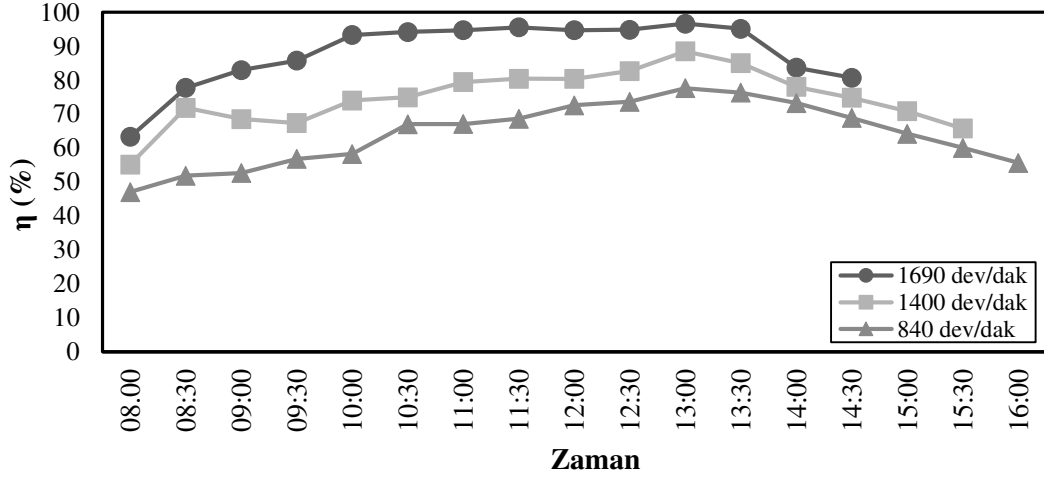
kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin MR değerleri 1 değerinden 0.000042 değerine kadar azaldığı gösterilmiştir. Nem oranı değişiminin en fazla olduğu kurutma 1690 dev/dak da yapılan kurutma işlemidir. Fan devir sayısı arttıkça nem oranındaki değişimde artmıştır. Nem oranındaki değişimi sırasıyla 1690, 1400 ve 840 dev/dak fan devir değerlerinde 390, 450 ve 480 dakika sürmüştür. 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde armut ürününün ortalama nem oranı 0.36, 1400 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde armut ürününün ortalama nem oranı 0.326 ve 840 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde ise armut ürününün ortalama nem oranı 0.324 değerinde olmuştur.



**Şekil 6.5.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kurutma hızı değerlerinin zamanla değişimi

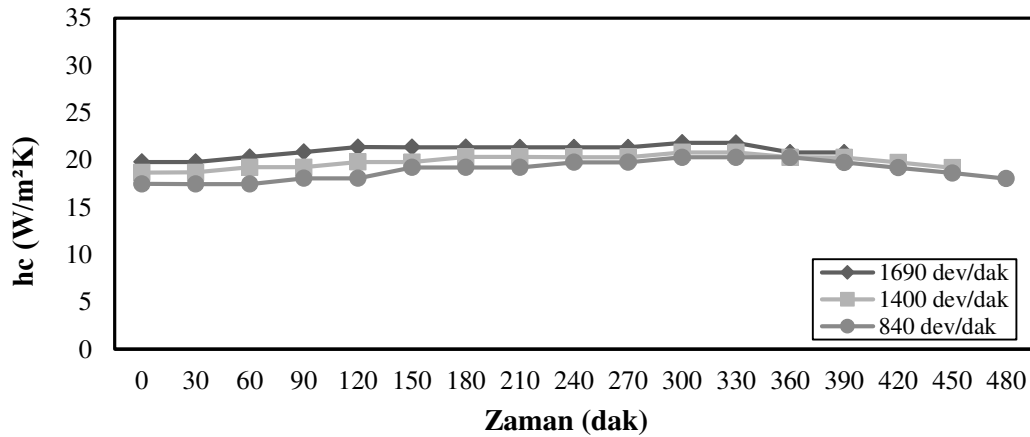
Şekil 6.5’de hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin kuruma hızı değişimi gösterilmiştir. Nem içeriğindeki değişimin zamana göre türevi alınarak kuruma hızı belirlenmiş ve her bir zaman aralığı için grafiğe geçirilmiştir. En hızlı kuruma hızı, 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. Fan devir değeri arttıkça kuruma hızıda artmıştır. 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde ortalama kuruma hızı değeri 0.011 gsu/gkatımadde.dak, 1400

dev/dak fan devir değeriindeki ortalama kurutma hızı değeri  $0.0096 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde}}\cdot\text{dak}$  ve 840 dev/dak fan devir değeriindeki ortalama kurutma hızı değeri ise  $0.0090 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde}}\cdot\text{dak}$  'dır.



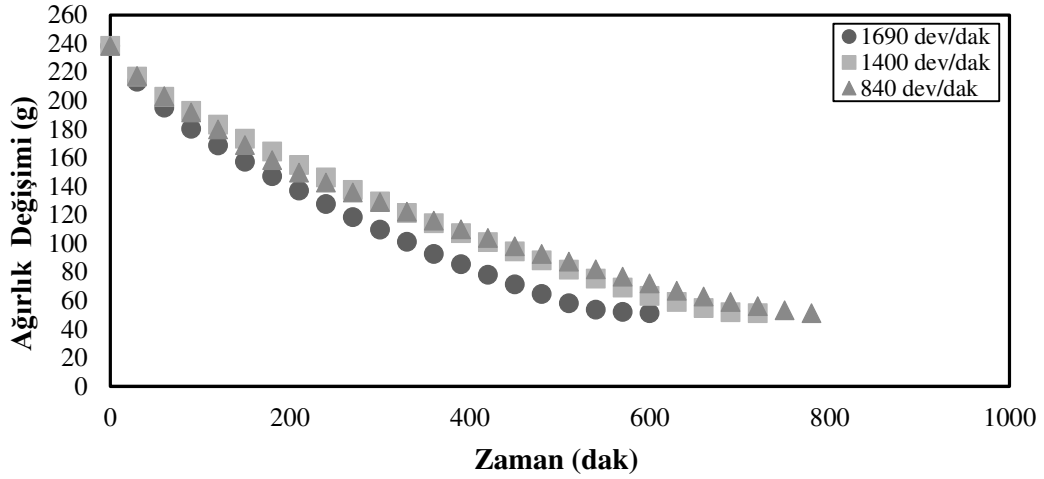
**Şekil 6.6.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan güneş kolektörü ısı verim ( $\eta$ ) değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.6'da hareketli HIGK kurutma sisteminde bulunan güneş kolektörünün ısı verim değerlerinin değişimi gösterilmiştir. En fazla ısı verime sahip kurutma, 1690 dev/dak fan devir değeriinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. Fan devir değeri arttıkça kolektör verim değeri de artmıştır. 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde güneş kolektörünün ortalama ısı verim değeri %88.1, 1400 dev/dak fan devir değeriindeki güneş kolektörünün ortalama ısı verim değeri %74.9 ve 840 dev/dak fan devir değeriindeki güneş kolektörünün ortalama ısı verim değeri ise % 64.2 olarak tespit edilmiştir.



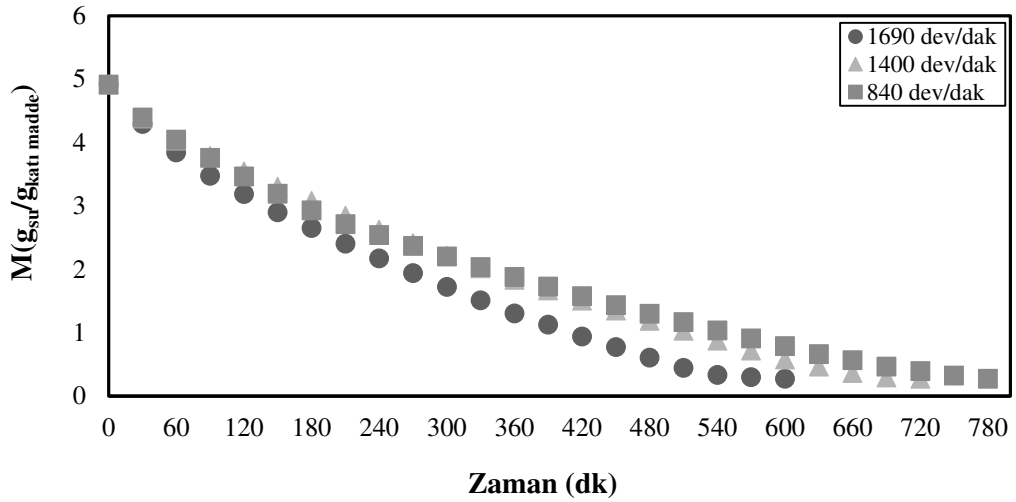
**Şekil 6.7.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan  $h_c$  değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.7’de hareketli HIGK kurutma sistemindeki  $h_c$  değerlerinin 21.8189 – 17.475 W/m<sup>2</sup>K değerleri arasındaki değişimi gösterilmiştir. En fazla  $h_c$  değer aralığına sahip kurutma 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. Fan devir değeri arttıkça konvektif ısı transfer katsayısı değeri de artmıştır. 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde ortalama konvektif ısı transfer katsayısı değeri 21 W/m<sup>2</sup>K, 1400 dev/dak fan devir değerindeki ortalama konvektif ısı transfer katsayısı değeri 19.9 W/m<sup>2</sup>K ve 840 dev/dak fan devir değerindeki konvektif ısı transfer katsayısı değeri ise 18.9 W/m<sup>2</sup>K olarak belirlenmiştir. Şekil 6.7’deki konvektif ısı transferi katsayısı değerlerinde görülen dalgalanma, kurutma odasındaki hava hızı değişimlerinden dolayı gerçekleşmektedir.



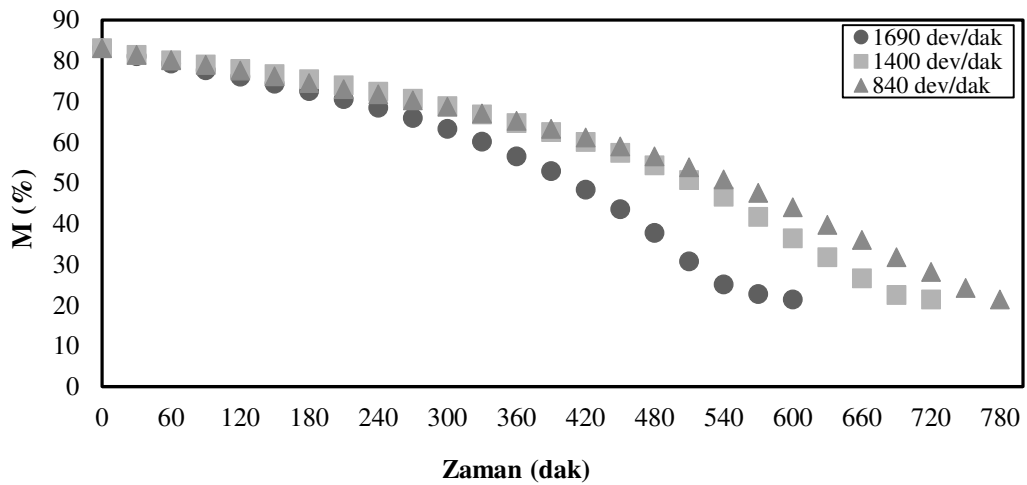
**Şekil 6.8.** Sabit HIGK kurutma sisteminde armut ürününün farklı fan devirlerindeki ürün ağırlığının zamana göre değişimi değerleri

Sabit HIGK kurutma sisteminde, her üç devirde yapılan kurutma işleminde Şekil 6.8’e göre armut numunelerinin 238.4 g değerinden 51.3 g ağırlığına kadar tartımları yapılmış ve daha sonra tartım değeri 1 g altına düştüğü için deneyler sonlandırılmıştır. En hızlı gram cinsinden ürün ağırlığı değişimi 1690 dev/dak fan devrinde yapılan kurutmada gerçekleşmiştir. Bu devir değerindeki kurutma işlemi başladıktan 30 dakika sonra armut ürününün ağırlığı yaklaşık 33 g azalmıştır. 1400 dev/dak fan devrinde yapılan kurutma işleminde ilk 30 dakikada armut ürününün ağırlığı yaklaşık 23 g azalmıştır. 840 dev/dak fan devrinde yapılan kurutma işleminde ise kurutma başladıktan 30 dakika sonra armut ürününün ağırlığı yaklaşık 20 g azalmıştır.



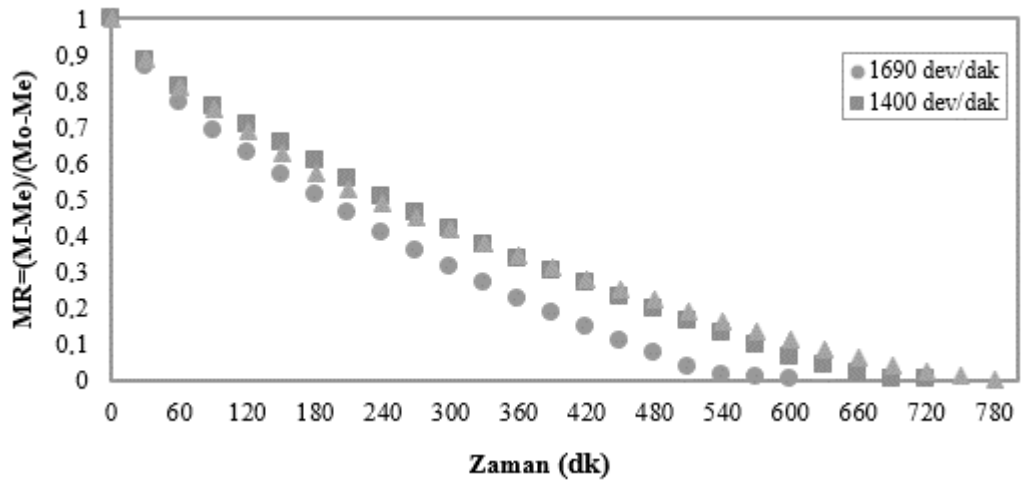
**Şekil 6.9.** Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.9’da sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin kuru baz nem içeriği değerleri 4.921  $g_{su}/g_{kmadde}$  değeri ile 0.272  $g_{su}/g_{kmadde}$  değeri arasında değişim göstermiştir. En hızlı değişim 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. 1690 dev/dak fan devir değerinde kurutulan armut ürününün kuru baz nem içeriğinin 4.921 den 0.272  $g_{su}/g_{kmadde}$  değerine kadar düşmesi yaklaşık 600 dakikada gerçekleşmiştir. Aynı şekilde 1400 dev/dak’da yapılan kurutma işleminde bu değişim 720 dakika, 840 dev/dak’da yapılan kurutma işleminde ise 780 dakika süresinden gerçekleşmiştir. Şekil 6.9’a göre devir sayısının azalması ile kuru baz nem içeriği değerlerindeki değişim süresi artmıştır.



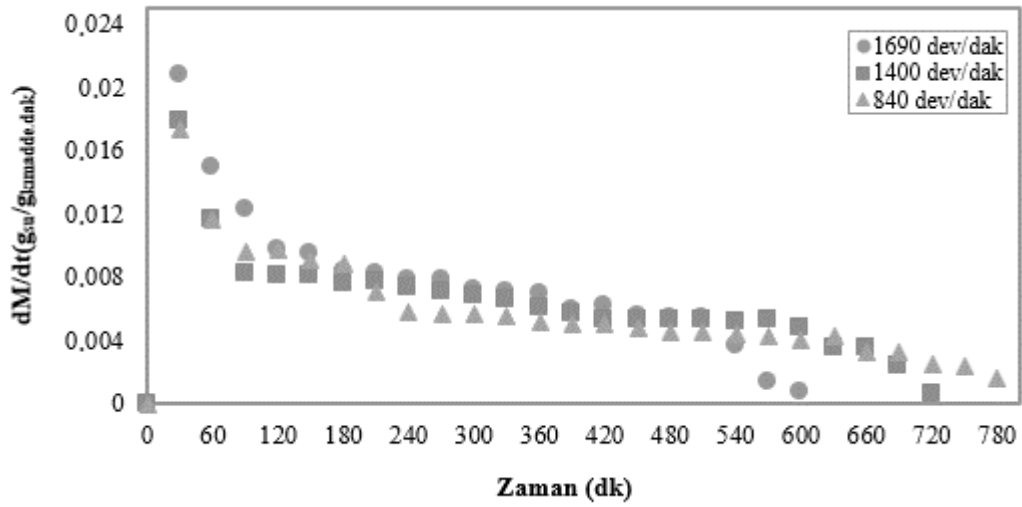
**Şekil 6.10.** Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan yaş baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.10’da sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin yüzde nem içeriği değerleri, %83.1 den %21.4 değerine kadar azalmıştır. En hızlı değişim 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. Bu devirde yapılan kurutma işleminde yaş baz nem içeriği değişimi 600 dakika sonra bitmiştir. 1400 dev/dak fan devrinde yapılan kurutmada bu değişim 720 dakika, 840 dev/dak fan devrinde yapılan kurutmada ise 780 dakikaya kadar devam etmiştir.



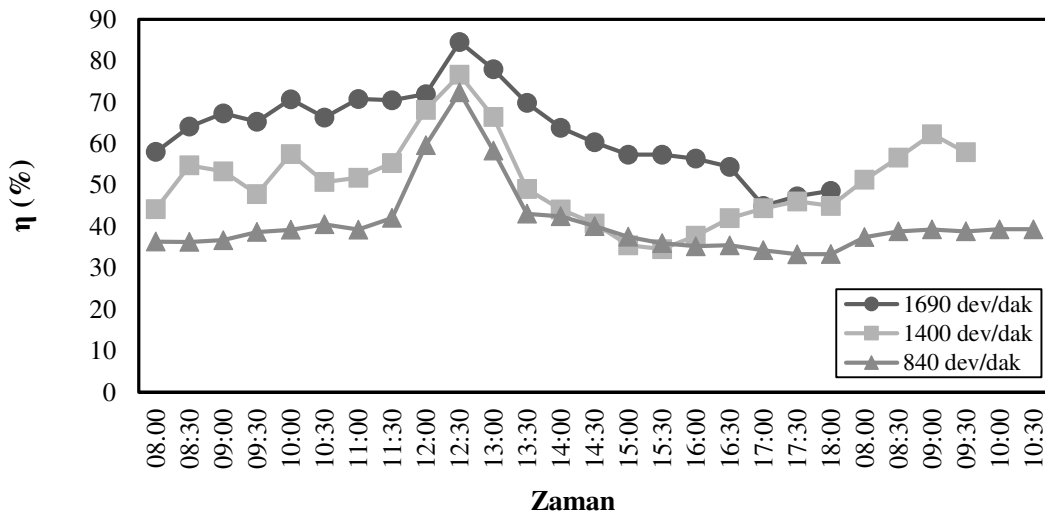
**Şekil 6.11.** Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan nem oranı değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.11’de sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin nem oranı değerlerinin 1 değerinden 0.000042 değerine kadar azaldığı gösterilmiştir. Nem oranı değişiminin en fazla olduğu kurutma 1690 dev/dak da yapılan kurutma işlemidir. Fan devir sayısı arttıkça nem oranındaki değişimde artmıştır. Nem oranı değişimi sırasıyla 1690, 1400 ve 840 dev/dak fan devir değerlerinde 600, 720 ve 780 dakika sürmüştür. 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde armut ürününün ortalama nem oranı 0.383, 1400 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde armut ürününün ortalama nem oranı 0.364 ve 840 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde ise armut ürününün ortalama nem oranı 0.362 olarak belirlenmiştir.



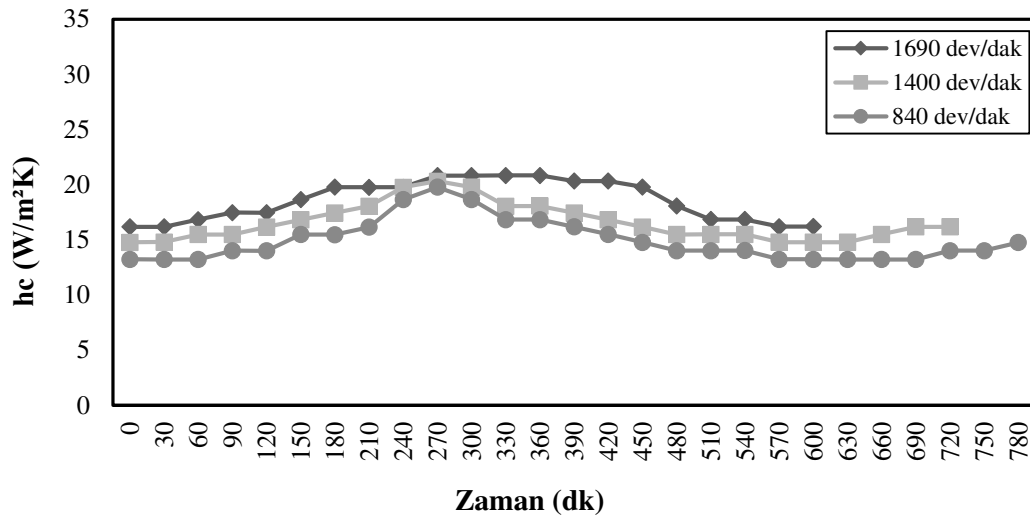
**Şekil 6.12.** Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan kuruma hızı değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.12’de sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada armut numunelerinin kuruma hızı değerlerinin değişimi gösterilmiştir. En yüksek kuruma hızı 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde elde edilmiştir. Fan devir değeri arttıkça kuruma hızıda artmıştır. 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde ortalama kurutma hızı değeri 0.0073 g<sub>su</sub>/g<sub>kmadde</sub>.dak, 1400 dev/dak değerinde 0.0061 g<sub>su</sub>/g<sub>kmadde</sub>.dak ve 840 dev/dak ‘da ise 0.0057 (g<sub>su</sub>/g<sub>kmadde</sub>.dak) olarak belirlenmiştir.



**Şekil 6.13.** Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan güneş kolektörü ısı verim (η) değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.13’de sabit HIGK kurutma sisteminde bulunan güneş kolektörüne ısı verim değerleri değişimi gösterilmiştir. 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde %82.4 değeri ile en yüksek ısı verim elde edilmiştir. Fan devir değeri arttıkça kolektörün ısı verim değeri de artmıştır. 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde güneş kolektörünün ortalama ısı verim değeri %63.2, 1400 dev/dak ‘da %50.9 ve 840 dev/dak’ da ise % 40.8 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.14. Sabit HIGK kurutma sisteminde farklı fan devirlerinde hesaplanan  $h_c$  değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.14’de sabit HIGK kurutma sistemindeki  $h_c$  değerlerinin 20.846- 13.215 W/m²K değerleri arasındaki değişimi gösterilmiştir. En yüksek  $h_c$  değerleri aralığına sahip kurutma 1690 dev/dak fan devir değerinde yapılan kurutma işleminde olmuştur. Fan devir değeri arttıkça konvektif ısı transfer katsayısı değeri de artmıştır. 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde ortalama konvektif ısı transfer katsayısı değeri 18.57 W/m²K, 1400 dev/dak ‘da 16.56 W/m²K ve 840 dev/dak ‘ da ise bu değer 14.92 W/m²K olarak belirlenmiştir. Şekil 6.14’deki konvektif ısı transferi katsayısı değerlerinde görülen dalgalanma, kurutma odasındaki hava hızı değişimlerinden dolayı gerçekleşmektedir.

Hareketli ve sabit HIG kurutma sistemlerinde gerçekleşen armut kurutma işlemine ait nem içerikleri, nem oranı, kuruma hızı, kolektör verimi, kütle değişimi ve konvektif ısı transferi değerlerinin zamana bağlı olarak değişimleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6.15-6.21’de bu karşılaştırmalar gösterilmiştir.

Literatürde armut ürünü için yapılan kurutma çalışmalarından elde edilen nem içeriği değerleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir. Tabloda kurutucu tipi, kurutulan armut ürününün

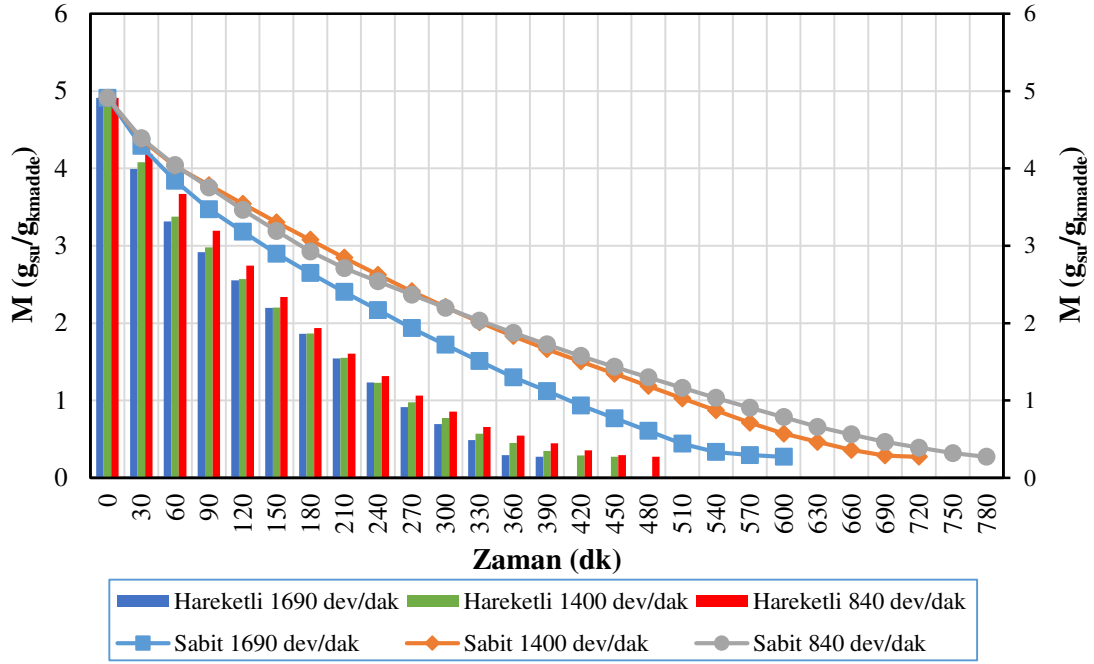
kalınlığı, kurutma sıcaklığı, hava hızı ve kurutma süresi değerlerine göre nem içerikleri değerleri verilmiştir.

**Tablo 6.1.** Literatürde armut ürünü için hesaplanmış nem içerikleri değerleri

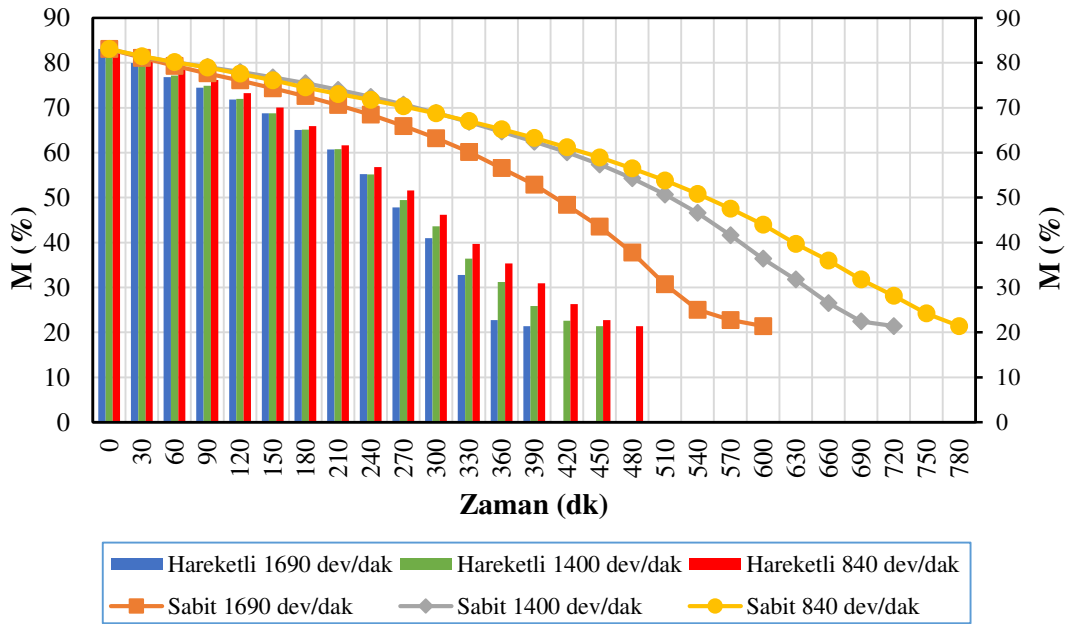
| Kurutucu Tipi       | Armut Ürün Kalınlığı | Kurutma Sıcaklığı (°C)- (Watt) | Hava Hızı (m/s) | Kurutma Süresi | M ( $g_{su}/g_{kmadde}$ ) | M (%)      | Referans               |
|---------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|------------|------------------------|
| Güneş Kurutucu      | 5 mm                 | 50                             | 1.7             | 476 dk         | 5.43-0.256                | 81-17      | Lahsasni ve ark. [125] |
| Konvektif Kurutucu  | 25 mm                | 50                             | 2.3             | 600 dk         | 7.53-0.19                 | 91.4-22.4  | Proietti ve ark. [126] |
| Güneş Kurutucu      | 45 mm                | 40                             | 1.1             | 4200 dk        | 4.1-0.32                  | 92.8-24.6  | Guine' ve ark. [127]   |
| Mikrodalga Kurutucu | 5 mm                 | 2000 Watt                      | yok             | 54 dk          | 5.97-0.18                 | 86.1-10.4  | Kuş [128]              |
| Güneş Kurutucu      | Tüm Armut            | 20-50                          | 1.2             | 12 gün         | 4.9-0.12                  | 83.1-19.6  | Guiné ve ark. [129]    |
| Güneş Altında       | 8 mm                 | 20-40                          | 1.3             | 450 dk         | 8.2-0.13                  | 81.2-10.6  | Lahsasni ve ark. [130] |
| Güneş Altında       | 10 mm                | 50                             | 1.2             | 24 saat        | 7.9-0.17                  | 86.41-19.4 | Guine' ve ark. [131]   |
| Güneş Panel         | 10 mm                | 35-60                          | 1-1.5           | 390-780 dk     | 4.91-0.27                 | 83.1-21.4  | Daş 2018               |

Tablo 6.1’de yapılan kurutma çalışmalarında armut ürününün kuru baz nem içeriği değerleri ortalama 5.6-0.25  $g_{su}/g_{katımadde}$  değerleri arasında, yaş baz nem içeriği değerleri ortalama %85.2-520.6 değerleri arasında değişmiştir. Hareketli ve sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürünlerinin nem içeriği değerlerinin, literatürde verilen nem içeriği değerleri aralığında olduğu görülmüştür.

Şekil 6.15-6.16’da nem içeriği değerleri, her iki kurutma sisteminde zamana bağlı olarak azalma göstermiştir. En hızlı nem içeriği değişimi; 1690 dev/dak fan devir değerinde hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir. 1690 dev/dak fan devirinde yapılan kurutma işleminde nem içeriği değerlerinin değişimi 390 dakika sürmüştür. En yavaş nem içeriği değişimi; 840 dev/dak fan devir değerinde sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde elde edilmiştir. 840 dev/dak fan devirinde yapılan kurutma işleminde nem içeriği değerleri değişimi 780 dakika sürmüştür. Yaş baz nem içeriği değerleri %83.1 ile %21.4 değeri arasında değişmiştir. Kuru baz nem içeriği değerleri ise 4.91  $g_{su}/g_{kmadde}$  ile 0.27  $g_{su}/g_{kmadde}$  arasında değişim göstermiştir.



Şekil 6.15. Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde kuru baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 6.16. Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde yaş baz nem içeriği değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

Literatürde yapılan kurutma çalışmaları içerisinde armut ürünü için hesaplanan nem oranı (MR) değerleri Tablo 6.2' de verilmiştir. Tabloda kurutucu tipi, kurutulan armut

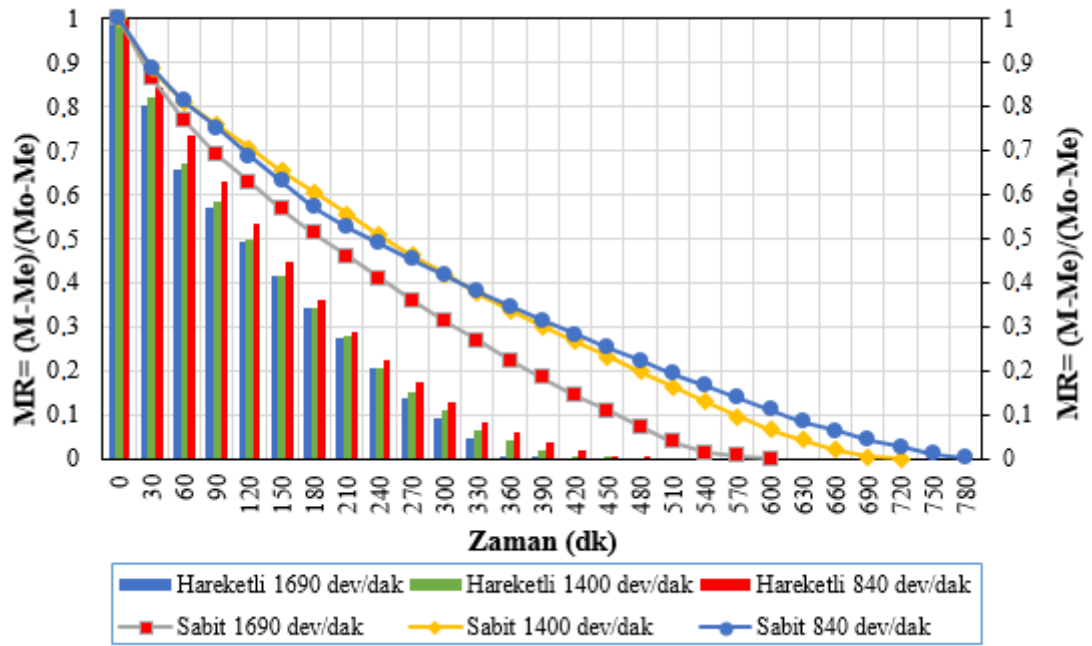
ürünün numune kalınlığı, kurutma sıcaklığı, hava hızı ve kurutma süresi değerlerine göre nem oranı değerleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 6.2.** Literatürde armut ürünü için hesaplanmış nem oranı değerleri

| Kurutucu Tipi           | Armut Ürün Kalınlığı | Kurutma Sıcaklığı (°C)-(Watt) | Hava Hızı (m/s) | Kurutma Süresi | MR değişim | Referans               |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------|------------------------|
| Güneş Kurutucu          | 5 mm                 | 50                            | 1.7             | 476 dakika     | 1-0.072    | Lahsasni ve ark. [125] |
| Konvektif Kurutucu      | 25 mm                | 50                            | 2.3             | 600 dk         | 1-0.065    | Proietti ve ark. [126] |
| Mikrodalga Kurutucu     | 5 mm                 | 2000 Watt                     | yok             | 54 dk          | 1-0.012    | Kuş [128]              |
| Güneş Altında           | 10 mm                | 50                            | 1.2             | 24 h           | 1-0.021    | Guine' ve ark. [131]   |
| Güneş Panel (Sabit)     | 10 mm                | 35-55                         | 1-1.5           | 600-780 dk     | 1-0.038    | Daş 2018               |
| Güneş Panel (Hareketli) | 10mm                 | 45-60                         | 1.4-1.9         | 390-480 dk     | 1-0.043    | Daş 2018               |

Tablo 6.2’de yapılan kurutma çalışmalarında armut ürününün nem oranı değerleri ortalama 1 - 0.03 değerleri arasında değişmiştir.

Şekil 6.17’de nem oranı değerleri, her iki kurutma sisteminde zamana bağlı olarak azalma göstermiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde gerçekleşen kurutma işleminde zamana bağlı olarak nem oranındaki değişim, sabit HIGK kurutma sistemine göre daha fazla olmuştur. En hızlı nem oranı değişimi; 1690 dev/dak fan devir değerinde hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde elde edilmiştir. En yavaş nem oranı değişimi ise; 840 dev/dak fan devir değerinde sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde gerçekleşmiştir.



Şekil 6.17. Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde nem oranının zamanla değişiminin karşılaştırılması

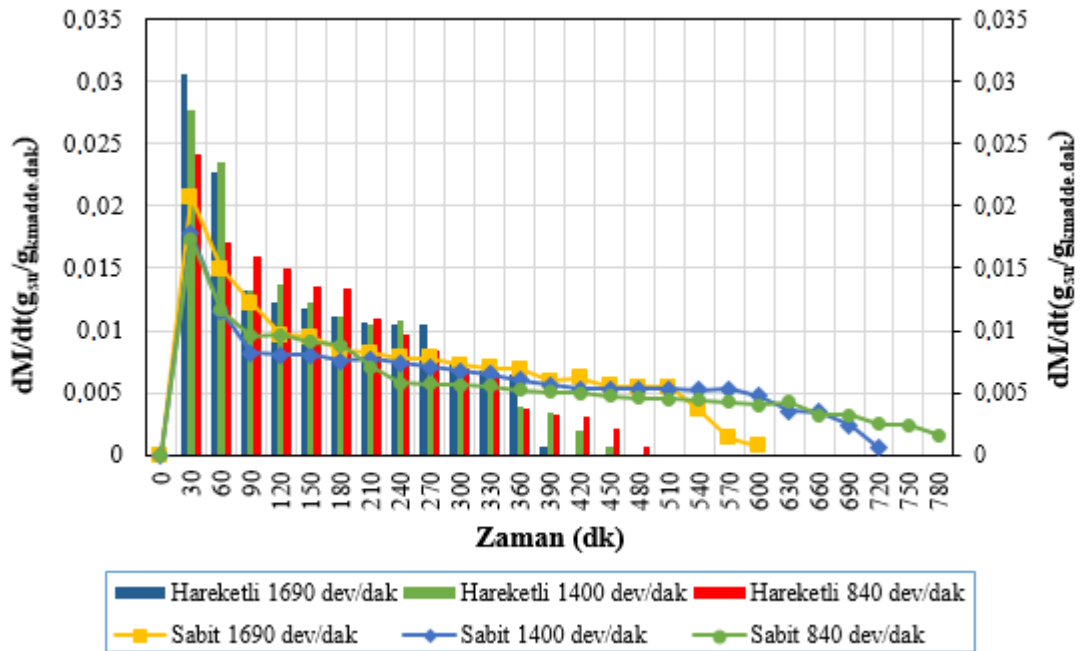
Literatürde yapılan kurutma çalışmaları içerisinde armut ürünü için hesaplanan kuruma hızı (DR) değerleri Tablo 6.3’ de gösterilmiştir. Tabloda kurutucu tipi, kurutulan armut ürününün numune kalınlığı, kuruma sıcaklığı, hava hızı ve kurutma süresi değerlerine göre kuruma hızı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.3. Literatürde armut ürünü için hesaplanmış kuruma hızı değerleri

| Kurutucu Tipi           | Armut Ürün Kalınlığı | Kurutma Sıcaklığı (°C)-(Watt) | Hava Hızı (m/s) | Kurutma Süresi | DR ( $g_{su}/g_{kmadde \cdot dak}$ ) | Referans               |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|------------------------|
| Güneş Kurutucu          | 5 mm                 | 50                            | 1.7             | 476 dak        | 0.027-0.00081                        | Lahsasni ve ark. [125] |
| Güneş Kurutucu          | 45 mm                | 40                            | 1.1             | 4200 dak       | 0.094-0.0006                         | Guine’ ve ark. [127]   |
| Güneş Altında           | 10 mm                | 50                            | 1.2             | 24 saat        | 0.038- 0.0007                        | Guine’ ve ark. [131]   |
| Güneş Panel (Sabit)     | 10 mm                | 35-55                         | 1-1.5           | 600-780 dak    | 0.0207-0.0007                        | Daş 2018               |
| Güneş Panel (Hareketli) | 10 mm                | 45-60                         | 1.4-1.9         | 390-480 dak    | 0.031-0.00062                        | Daş 2018               |

Tablo 6.3’ de özetlenen kurutma çalışmalarından, armut ürününün kuruma hızı değerlerinin ortalama 0.046-0.0007 arasında değişim gösterdiği görülmüştür.

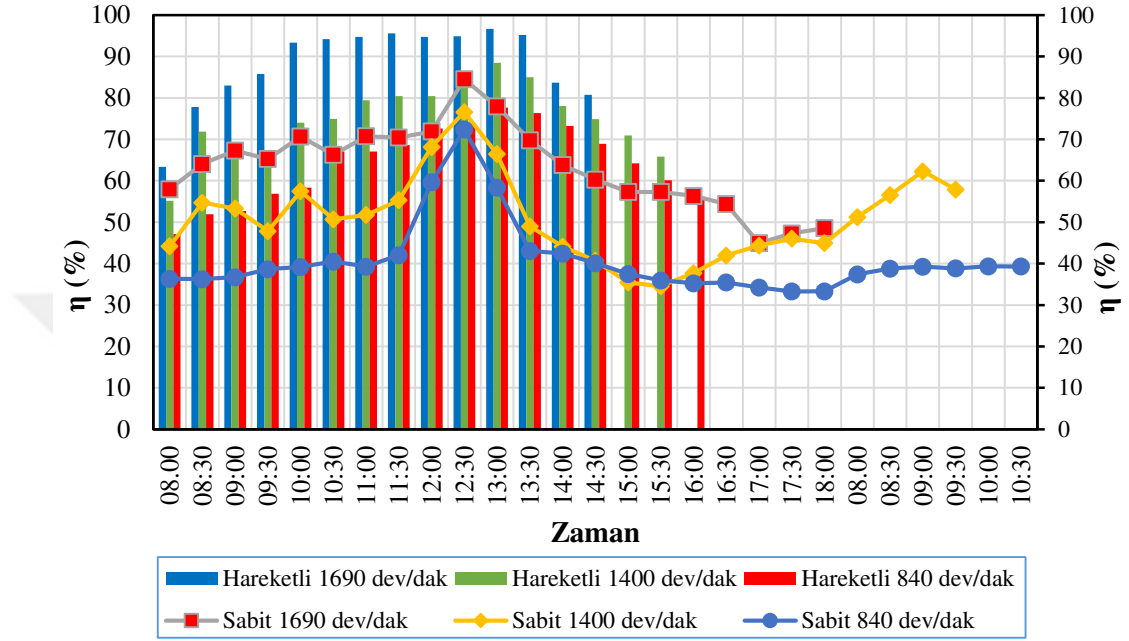
Şekil 6.18’de her iki kurutma sistemine ait kuruma hızı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde gerçekleşen kurutma işlemi, sabit HIGK kurutma sistemine göre daha hızlı olmuştur. Kuruma hızının en yüksek olduğu kurutma işlemi; 1690 dev/dak fan devir değerinde hareketli HIGK kurutma sisteminde elde edilmiştir. Bu devirde yapılan kurutma işlemine ait kurumu hızı, 0.03-0.007  $g_{su}/g_{kmadde.dak}$  değerleri arasında değişim göstermiştir. Kuruma hızının en düşük olduğu kurutma işlemi; 840 dev/dak fan devir değerinde sabit HIGK kurutma sisteminde olmuştur. Bu devirde yapılan kurutma işlemine ait kuruma hızı, 0.017-0.001  $g_{su}/g_{kmadde.dak}$  değerleri arasında belirlenmiştir.



**Şekil 6.18.** Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde kuruma hızının zamanla değişiminin karşılaştırılması

Şekil 6.19’da her iki kurutma sistemindeki güneş kolektörlerinin ısı verim değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Hareketli HIGK kurutma sistemindeki ısı verim değerleri, sabit HIGK kurutma sistemindeki ısı verim değerlerinden daha yüksek olmuştur. Hareketli ve sabit güneş kolektörlerinden elde edilen en yüksek verim; hareketli güneş kolektöründe, 1690 dev/dak fan devir değerinde, saat 13.00’da %94.6 olarak belirlenmiştir. En düşük verim değeri ise; sabit güneş kolektöründe, 840 dev/dak fan devir değerinde, saat 18.00’da elde edilen %33.3 değeri olmuştur. Şekil 6.19’da güneş kolektörlerinin ısı verim değerleri genel olarak incelendiğinde, hareketli güneş

kollektörünün ortalama ısı verim değeri, sabit güneş kollektörünün ortalama ısı verim değeri yaklaşık 1.4 katı kadar olduğu görülmüştür. Bu durumda PLC güneş takip sistemi; hareketli güneş kollektörünün ısı verimini, sabit güneş kollektörünün ısı verimine göre %40 oranında artırmıştır.



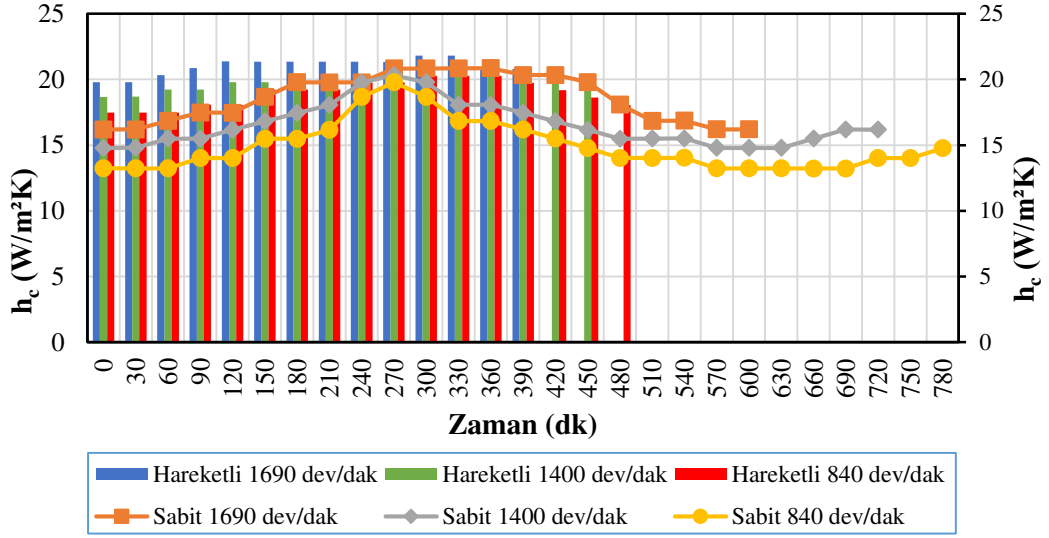
Şekil 6.19. Hareketli ve sabit HIGK kurutma sistemlerinde güneş kollektörlerinin ısı verim değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

Literatürde yapılan kurutma çalışmaları içerisinde armut ürünü için hesaplanan konvektif ısı transferi değerleri Tablo 6.4’ de özetlenmiştir. Tabloda armut ürününün hangi tip kurutucuda kurutulduğu, kurutma sıcaklığı ve hızı bilgileri verilmiştir. Kurutucu tipi, kurutma havası sıcaklığı ve hızı, konvektif ısı transfer katsayısı hesabı için önemli etkenler olmuştur. Bu tablodan konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin kurutulan ürünlerin şekil ve boyutlarından, gözenekliliğinden, nem miktarından, termofiziksel özelliklerden, deneysel çalışma koşullarından, deneysel kurulumdan ve iklim şartlarından dolayı değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

**Tablo 6.4.** Literatürde armut ürünü için bulunan konvektif ısı transfer katsayısı değerleri

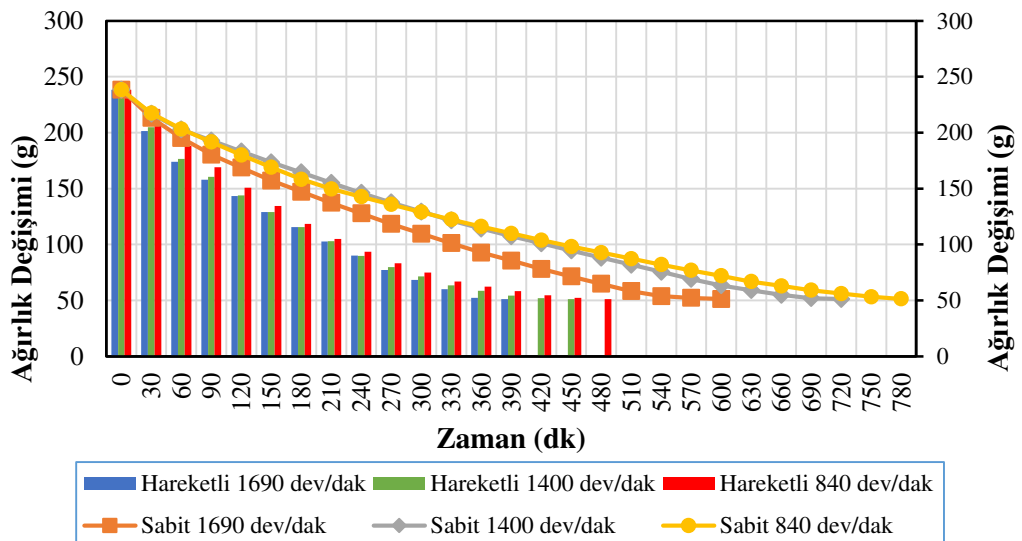
| Kurutucu Tipi           | Kurutma Sıcaklığı (°C) | Hava Hızı (m/s) | Ortalama $h_c$ ( $W/m^2K$ ) | Referans               |
|-------------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| Güneş Altında           | 30 - 50                | 1 - 1.5         | 16.765                      | Guiné ve ark. [131]    |
| Güneş Panel             | 30 - 65                | 1 - 1.5         | 18.302                      | Guiné [132]            |
| Tünel Kurutucu          | 30 - 40                | 1.25            | 15.2                        | Dotto ve ark. [133]    |
| Tünel Kurutucu          | 23                     | 1.2             | 10.2                        | Defraeye ve ark. [134] |
| Güneş Panel (Sabit)     | 35 - 55                | 1 - 1.5         | 16.6                        | Daş 2018               |
| Güneş Panel (Hareketli) | 45 - 65                | 1.4 - 1.9       | 19.92                       | Daş 2018               |

Bu çalışmada, sabit HIGK kurutucuda 35-55 °C kurutma havası sıcaklığı ve 1-1.5 m/s hızı aralığında armut ürününün konvektif ısı transfer katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Hareketli HIGK kurutucuda ise 45-65 °C kurutma havası sıcaklığı ve 1.4-1.9 m/s hızı aralığında armut ürününün konvektif ısı transfer katsayısı hesaplaması yapılmıştır. Şekil 6.20’de de her iki kurutma sistemi için konvektif ısı transferi katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde konvektif ısı transferi katsayısı değerleri 21.818 – 17.475 W/m<sup>2</sup>K arasında değişim göstermiştir. Sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde ise konvektif ısı transferi katsayısı değerleri 20.846- 13.215 W/m<sup>2</sup>K arasında belirlenmiştir. En yüksek konvektif ısı transferi katsayısı değeri; 1690 dev/dak fan devir değerinde hareketli HIGK kurutma sisteminde 21.818 W/m<sup>2</sup>K olarak hesaplanmıştır. En düşük konvektif ısı transferi katsayısı değeri ise; 840 dev/dak fan devir değerinde sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işleminde hesaplanan 13.215 W/m<sup>2</sup>K değeri olmuştur.



Şekil 6.20. Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.21’de kurutma işlemi boyunca armut ürününün ağırlık değişim değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Her iki kurutma sisteminde de ürün ağırlığı 238.4 g’den 51.4’g a kadar azalmıştır. Hareketli HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutma işlemindeki armut ürünlerinin ağırlığındaki azalma 480 dakika sürerken, sabit HIGK kurutma sisteminde bu süre 780 dakika olmuştur. Bu durumda aynı fan devir değerinde gerçekleşen kurutma işleminde hareketli HIGK kurutma sistemi, armut ürününü, sabit HIGK kurutma sisteminden 300 dakika daha erken kurutmuştur.



Şekil 6.21. Hareketli ve Sabit HIGK kurutma sistemlerinde yapılan kurutma işlemlerinde armut ürününün zamana bağlı olarak ağırlık değişim değerlerinin karşılaştırılması

### 6.1. Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Olarak Modellenmesi

Bu çalışmada, lineer olmayan regresyon analiz yöntemi yardımıyla deney sonuçlarından elde edilen nem oranı-zaman değişimi eğrileri ve kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrilerinin modellenmesi yapılmıştır. Çoğu kurutma deneylerinde modelleme, zamanla nem oranındaki değişimi ifade eden denklem araştırılarak yapılır. Nem oranı eğrileri ( $MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$ ) literatürde bulunan on üç farklı nem oranı denklemi ile karşılaştırılmıştır. Bunların içerisinde en uygun sonucu veren model deneysel sonuçları ifade etmek için kullanılmıştır. Kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrileri üssel fonksiyon esas alınarak modellenmiştir.

Regresyon analizleri STATISTICA programı kullanılarak yapılmıştır. Korelasyon katsayısı (R) ürünlerin kurutma eğrilerini tanımlayan en iyi denklemi seçmek için ana kriter olarak alınmıştır. Ayrıca tahminin standart hatası (RMSE) ve khi-kare ( $\chi^2$ ),

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{i,teorik} - MR_{i,deneysel})^2}{N}} \quad (4.1)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{i,deneysel} - MR_{i,teorik})^2}{N - n} \quad (4.2)$$

değerleri kullanılarak en uygun model saptanmıştır.

Burada  $MR_{teorik}$  model ile hesaplanan nem oranı değeri,  $MR_{deneysel}$  deneme sonuçlarından elde edilen nem oranı değeridir. N deneysel veri sayısı, n kullanılan modeldeki katsayı sayısını ifade etmektedir.

Tahminin standart hatası, teorik ve deneysel değerler arasındaki sapmayı gösterir. Bu değerin sıfıra yakın olması arzu edilmektedir. Ayrıca uyumun iyilik derecesini gösteren khi-kare değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir [94].

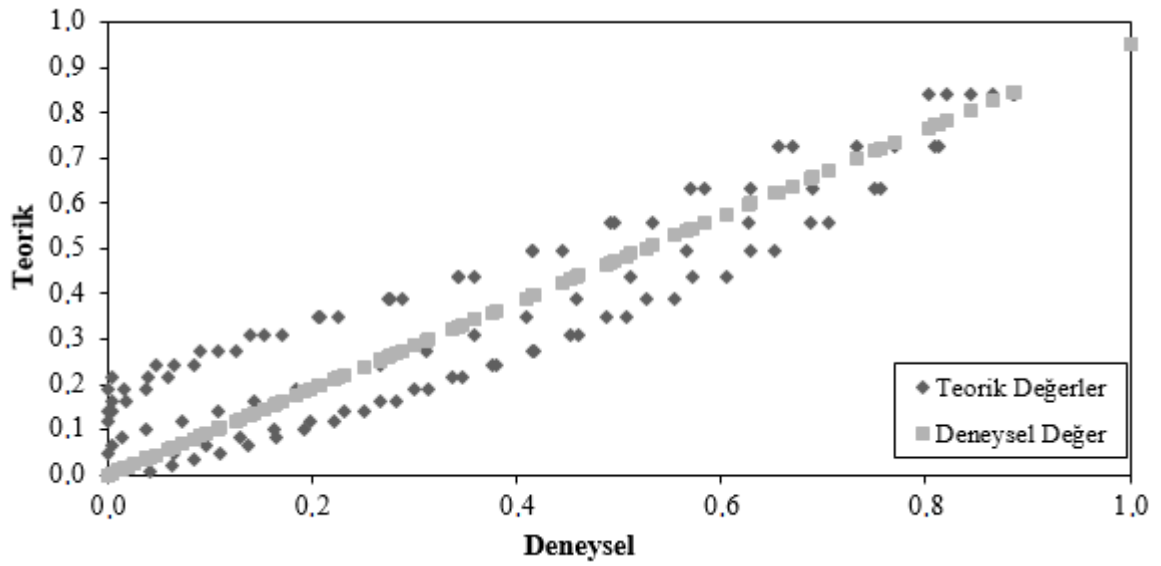
### 6.1.1. Zamanla Nem Oranı Değişiminin Modellenmesi

Literatürde bulunan on üç model, deney sonuçlarına göre elde edilen nem oranı değerlerinin hepsi için tek tek incelenmiştir. Korelasyon katsayısının (R) en yüksek olduğu ayrıca RMSE ve khi-kare değerlerinin en düşük olduğu model tespit edilmeye çalışılmıştır. Tablo 4.1’ de armut örnekleri için elde edilen nem oranı değerlerine uygulanan modeller ve bu modellerin korelasyon katsayısı ile khi-kare değerleri verilmektedir. Tablo 6.5 incelendiğinde armut örneklerinin nem oranının zamana göre modellenmesinde R değerleri 0.89132 ile 0.935432,  $\chi^2$  değerlerinin 0.01664503 ile 0.008039581, RMSE değerlerinin ise 0.128372145 ile 0.09080723 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Midilli ve Küçük modelinin,  $R=0.93532$ ,  $\chi^2=0.008039581$ ,  $RMSE=0.09080723$  istatistiksel analiz sonuçları ile nem oranı zaman değişimini en iyi şekilde açıkladığı belirlenmiştir.

**Tablo 6.5.** Armut örnekleri için elde edilen nem oranı değerlerine uygulanan modellerin istatistiksel analiz sonuçları

| Model no | Sabitler       | Modeldeki sabitler | R              | $\chi^2$           | RMSE              |
|----------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|
| 1        | k              | 0.01324            | 0.91378        | 0.008209601        | 0.091929973       |
| 2        | k              | 0.014004           | 0.90380        | 0.008147778        | 0.090910482       |
|          | n              | 0.98739            |                |                    |                   |
| 3        | k              | 0.01326            | 0.91370        | 0.008347778        | 0.090910481       |
|          | n              | 0.98743            |                |                    |                   |
| 4        | a              | 1.00055            | 0.91378        | 0.008251326        | 0.090929799       |
|          | k              | 0.01325            |                |                    |                   |
| 5        | a              | 0.98793            | 0.90425        | 0.008210649        | 0.090979886       |
|          | k              | 0.01411            |                |                    |                   |
|          | c              | 0.021478           |                |                    |                   |
| 6        | a              | 0.014695           | 0.85475        | 0.008151744        | 0.090873952       |
|          | ko             | -0.001235          |                |                    |                   |
|          | b              | 0.99403            |                |                    |                   |
|          | k <sub>1</sub> | 0.01397            |                |                    |                   |
| 7        | a              | 0.006795           | 0.89376        | 0.008254251        | 0.090945723       |
|          | k              | 1.933381           |                |                    |                   |
| 8        | a              | -0.0080            | 0.90555        | 0.016645036        | 0.128372145       |
|          | b              | 0.00002            |                |                    |                   |
| 9        | a              | -0.001407          | 0.90078        | 0.008293461        | 0.090929565       |
|          | k              | 0.157456           |                |                    |                   |
|          | b              | 0.084224           |                |                    |                   |
| 10       | a              | 0.413114           | 0.93525        | 0.008237399        | 0.092473952       |
|          | k              | 0.013970           |                |                    |                   |
|          | b              | 0.580933           |                |                    |                   |
|          | g              | 0.013974           |                |                    |                   |
|          | c              | 0.014680           |                |                    |                   |
|          | h              | -0.001238          |                | 0.008393536        | 0.094299781       |
| 11       | a              | -0.010909          | 0.90045        |                    |                   |
|          | k              | 0.013247           |                |                    |                   |
|          | g              | 0.013242           |                |                    |                   |
| 12       | a              | <b>1.052431</b>    | <b>0.93532</b> | <b>0.008039581</b> | <b>0.09080723</b> |
|          | k              | <b>0.000874</b>    |                |                    |                   |
|          | n              | <b>0.735755</b>    |                |                    |                   |
|          | b              | <b>-0.000003</b>   |                |                    |                   |
| 13       | a              | -0.0084            | 0.95378        | 0.008137399        | 0.150987566       |
|          | b              | 0.00012            |                |                    |                   |

Armut örnekleri için Midilli ve Küçük modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneyler sonucunda bulunan şartlardan elde edilen deneysel nem oranı değerleri Şekil 6.22’ de görülmektedir. Bu değerlerin düz çizginin üzerinde ve etrafında dağılım göstermesi kullanılan modellerin bir uyum içerisinde deneysel verileri açıklayabildiğinin göstergesidir.



Şekil 6.22. Midilli ve Küçük modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneysel nem oranı değerleri

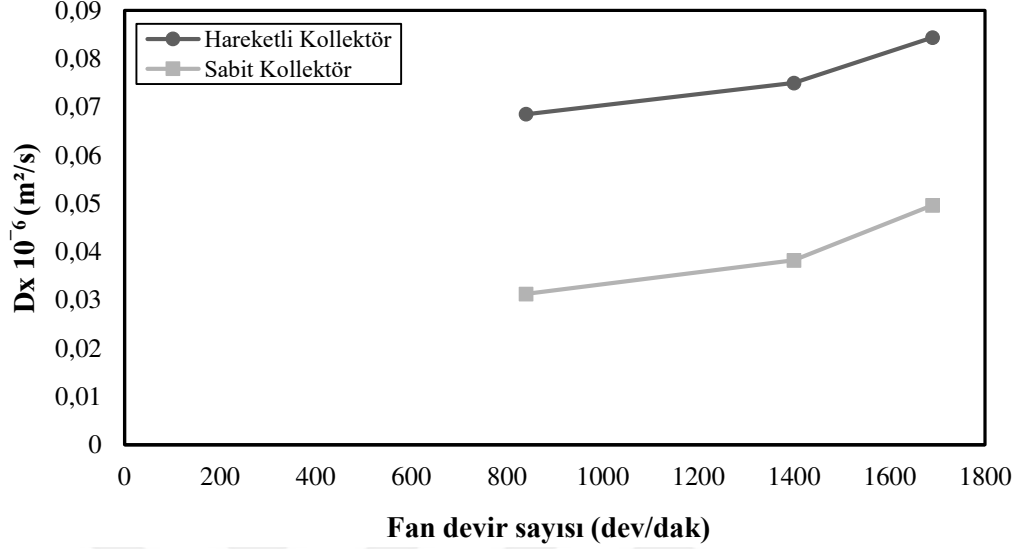
## 6.2. Difüzyon Katsayısı Bulguları

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, armut ürünü için çeşitli kurutma yöntemleri ile difüzyon katsayısı hesapları yapıldığı görülmüştür. Armut ürünü için hesaplanan difüzyon katsayısı değerlerinin bazıları Tablo 6.6’ da verilmiştir. Armut ürününün difüzyon katsayısı değerleri için belirleyici etkenler; kurutucu tipi, kurutma havası sıcaklığı ve hızı olmuştur.

Tablo 6.6. Literatürde armut ürünü için difüzyon katsayısı hesaplamaları

| Kurutucu Tipi           | Kurutma Sıcaklığı (°C) | Hava Hızı (m/s) | Difüzyon Katsayısı (m <sup>2</sup> /s) | Referans               |
|-------------------------|------------------------|-----------------|----------------------------------------|------------------------|
| Endüstriyel             | 30-50                  | 2.7             | $2.2 \times 10^{-10}$                  | Silva ve ark. [135]    |
| Tünel Kurutucu          | 40-50                  | 1.25            | $0.2 \times 10^{-8}$                   | Dotto ve ark. [133]    |
| Tünel Kurutucu          | 23                     | 1.2             | $1.5 \times 10^{-10}$                  | Defraeye ve ark. [134] |
| Sera Kurutucu           | 40-42                  | 1.3             | $4.7722 \times 10^{-9}$                | Guiné ve ark. [136]    |
| Güneş Altında           | 40-42                  | 1.3             | $3.3057 \times 10^{-9}$                | Guiné ve ark. [136]    |
| Tünel Kurutucu          | 40-42                  | 1.3             | $6.7904 \times 10^{-10}$               | Guiné ve ark. [137]    |
| Güneş Panel (Sabit)     | 35 - 55                | 1 - 1.5         | $0.039 \times 10^{-6}$                 | Daş 2018               |
| Güneş Panel (Hareketli) | 45 - 65                | 1.4 - 1.9       | $0.075 \times 10^{-6}$                 | Daş 2018               |

Sabit ve hareketli HIGK kurutma sisteminde, 840, 1400 ve 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutmada hesaplanan difüzyon katsayısı değerleri Şekil 6.23’de gösterilmiştir.

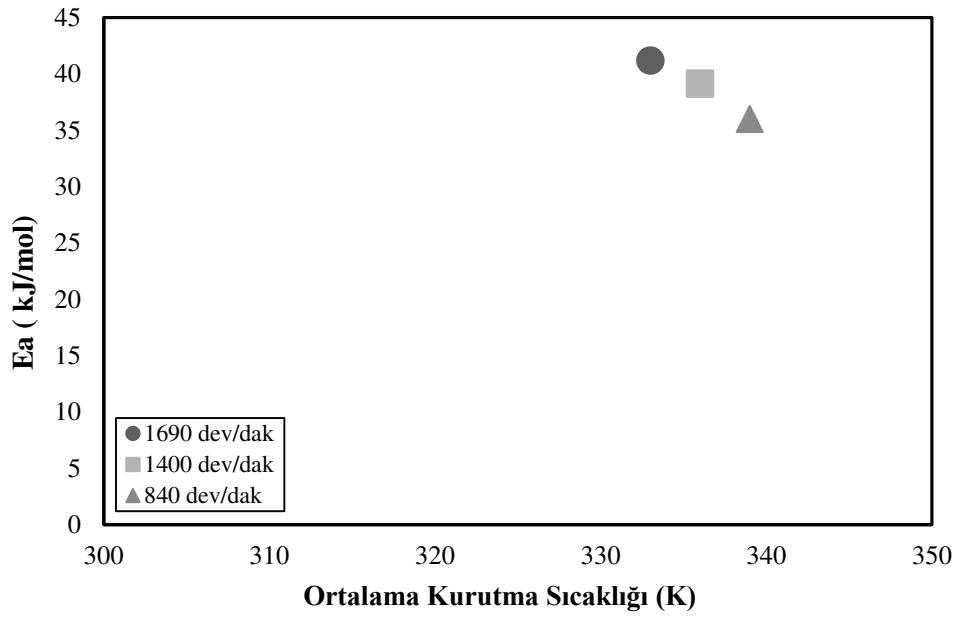


Şekil 6.23. Sabit ve Hareketli HIGK kurutma sisteminde fan devir sayısına göre difüzyon katsayısı değerlerinin değişimi

Şekil 6.23’e göre fan devir sayısı arttıkça difüzyon katsayısının değeri artmıştır. Hareketli HIGK kurutma sisteminde hesaplanan difüzyon katsayısı değerleri, sabit HIGK kurutma sisteminde hesaplanan difüzyon katsayısı değerlerinden daha büyük olmuştur. Bu durum, yüksek sıcaklık değerlerinde ürün içerisindeki nemin daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artmasıyla açıklanabilir. Üç farklı fan devrinde hesaplanan ortalama difüzyon katsayısı değeri hareketli HIGK kurutma sisteminde  $0.075 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , sabit HIGK kurutma sisteminde ise  $0.039 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak belirlenmiştir.

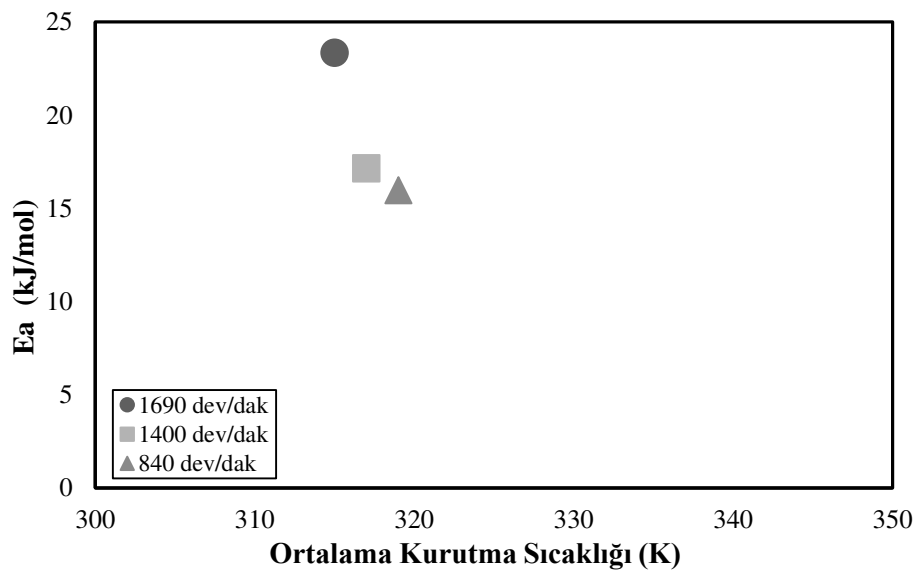
### 6.3. Aktivasyon Enerjisi Hesabı Bulguları

Sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemlerine ait aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) değerleri de 840, 1400 ve 1690 dev/dak fan devir değerlerine göre hesaplanmıştır. Hesaplamalarda her bir fan değerinde gerçekleşen kurutma işlemindeki kurutma odası sıcaklıklarının ortalaması alınarak tek bir sıcaklık değerinde hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de verilmiştir.



**Şekil 6.24.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde aktivasyon enerjisi değerlerinin ortalama kurutma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 6.24’de hareketli HIGK kurutma sitemine ait 3 farklı fan devrindeki aktivasyon enerjisi değerleri gösterilmiştir. En yüksek aktivasyon enerjisi değeri 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işlemine ait olmuştur. 1690 dev/dak fan değerinde aktivasyon enerjisi değeri 41.1 kJ/mol, 1400 dev/dak fan değerinde 39.1 kJ/mol ve 840 dev/dak fan değerinde ise 35.9 kJ/mol olarak belirlenmiştir.

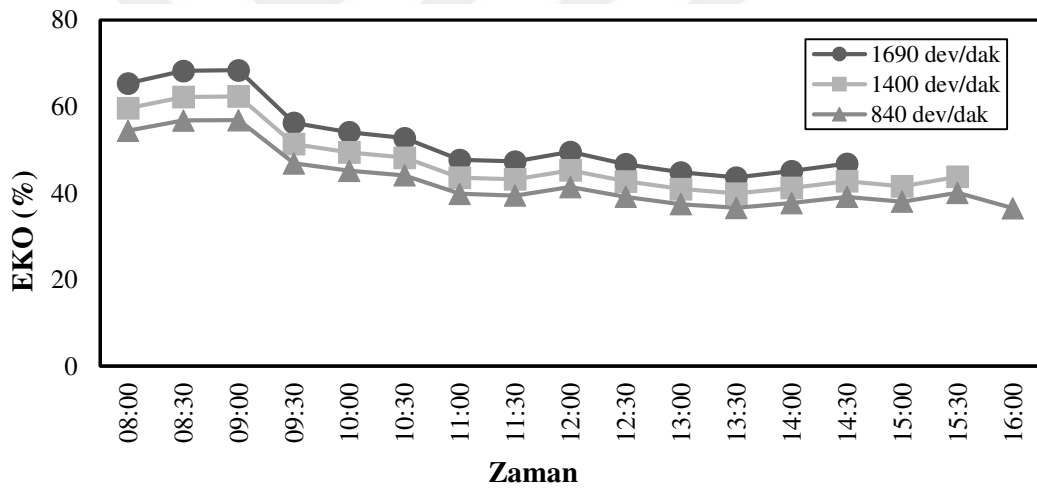


**Şekil 6.25.** Sabit HIGK kurutma sisteminde aktivasyon enerjisi değerlerinin ortalama kurutma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 6.25’de sabit HIGK kurutma sistemine ait 3 farklı fan devrindeki aktivasyon enerjisi değerleri verilmiştir. En yüksek aktivasyon enerjisi değeri 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde elde edilmiştir. Aktivasyon enerjisi değeri 1690 dev/dak ‘da 23.3 kJ/mol, 1400 dev/dak ‘ da 17.1 kJ/mol ve 840 dev/dak ‘da ise 15.9 kJ/mol olarak tespit edilmiştir.

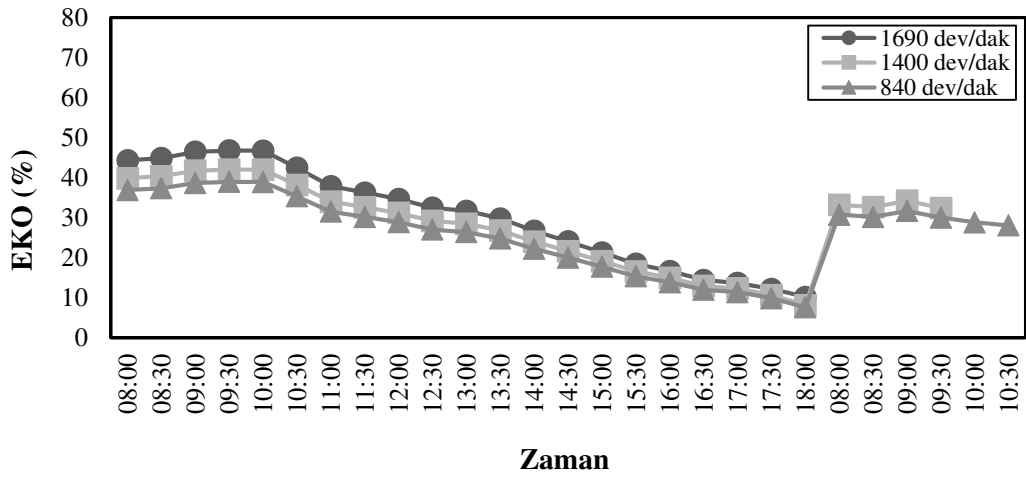
#### 6.4. Enerji ve Ekserji Analizi Bulguları

Sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemlerinde fanın 840, 1400 ve 1690 dev/dak devirde çalışmasına göre kurutma odası enerji kullanım oranı (EKO), ekserji girişi, ekserji çıkışı, ekserji kaybı ve ekserji verimi değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler Şekil 6.26-6.35’ de özetlenmiştir.



Şekil 6.26. Hareketli HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % EKO değerlerinin zamanla değişimi

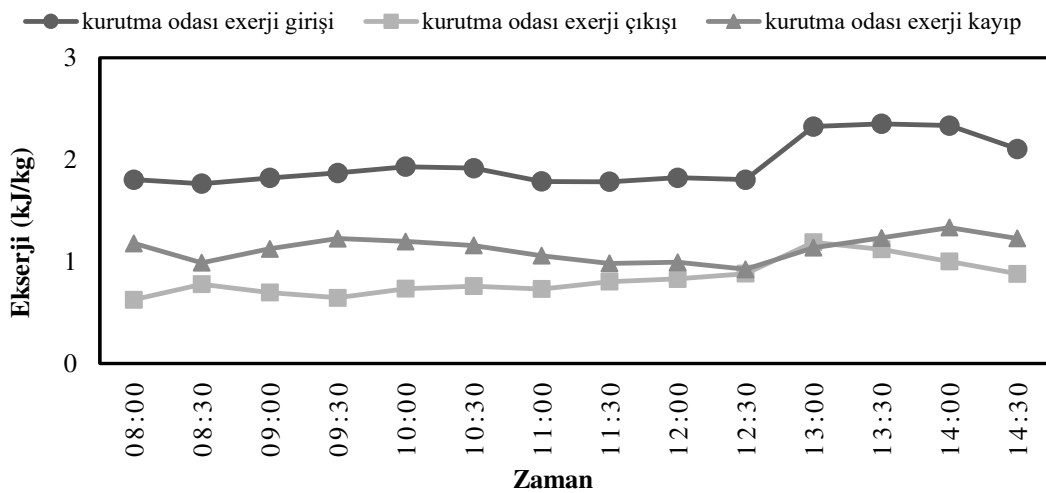
Şekil 6.26’da hareketli HIGK kurutma sisteminin enerji kullanım oranı değerleri verilmiştir. Enerji kullanım oranları (EKO) değerleri fan devir oranlarına göre değişim gösterilmiştir. Enerji kullanım oranı değerleri kurutma işlemi ilerledikçe azalım göstermiştir. Bu durumun nedeni ürünün nem içeriğine bağlı olarak kurutma odasındaki sıcaklık değişiminin azalmasıdır. En yüksek EKO değeri 1690 dev/dak fan devrinde yapılan kurutma işleminde saat 09.00’da hesaplanan %68.4 değeri olmuştur.



**Şekil 6.27.** Sabit HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % EKO değerlerinin zamanla değişimi

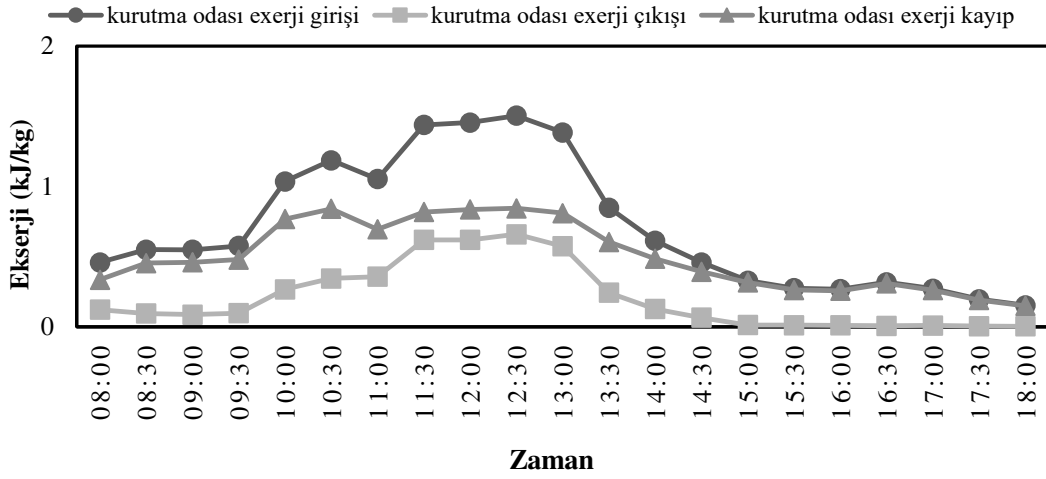
Şekil 6.27’de sabit HIGK kurutma sisteminin enerji kullanım oranı değerleri gösterilmiştir. En yüksek EKO değeri 1690 dev/dak fan devrinde yapılan kurutma işleminde %46.7 olarak belirlenmiştir. Sabit HIGK kurutma sisteminde yapılan kurutmada ürün kuruma işlemi tamamlanmadığından 18:00 ‘da deney sonlandırılıp, bir sonraki gün 08:00 ‘da kurutma işlemine devam edilmiştir. Bu durum Şekil 6.27’de EKO değerlerinde düzensizlik oluşturmuştur.

Sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemlerinin kontrol hacimleri için (kurutma odası) hesaplanan ekserji değerleri Şekil 6.28-6.33’de gösterilmiştir. Verilen ekserji giriş ve çıkış değerleri, kurutma havasının termofiziksel özelliklerine göre değişim göstermiştir. Tüm kurutma sistemlerinde giren ekserji ve kayıp ekserji değerleri zamanla azalan bir eğilim göstermiştir.



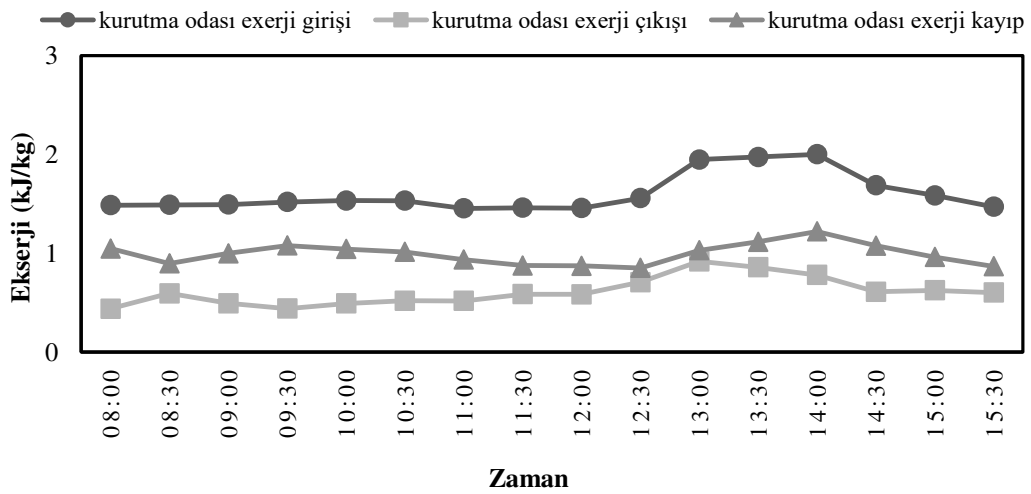
**Şekil 6.28.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde 1690 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.28’de 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde hareketli HIGK kurutma sistemine ait kurutma odası ekserji değerleri gösterilmiştir. Ortalama 1.957 kJ/kg ekserji girişine sahip kurutma odasında, ekserji çıkışı ortalama 0.832 kJ/kg değerine kadar düşmüştür. Kurutma işleminde gerçekleşen ekserji kaybı ise ortalama 1.125 kJ/kg değerindedir.



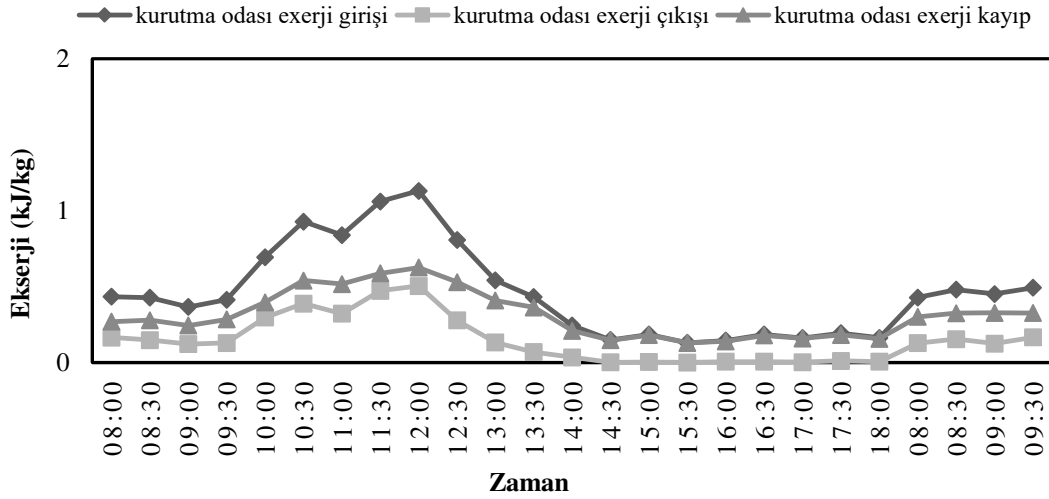
Şekil 6.29. Sabit HIGK kurutma sisteminde 1690 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.29’da 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde sabit HIGK kurutma sistemine ait kurutma odası ekserji değerleri verilmiştir. Ortalama 0.711 kJ/kg ekserji girişine sahip kurutma odasında, ekserji çıkışı ortalama 0.207 kJ/kg değerine kadar düşmüştür. Kurutma işleminde gerçekleşen ekserji kaybı ise ortalama 0.504 kJ/kg değerindedir.



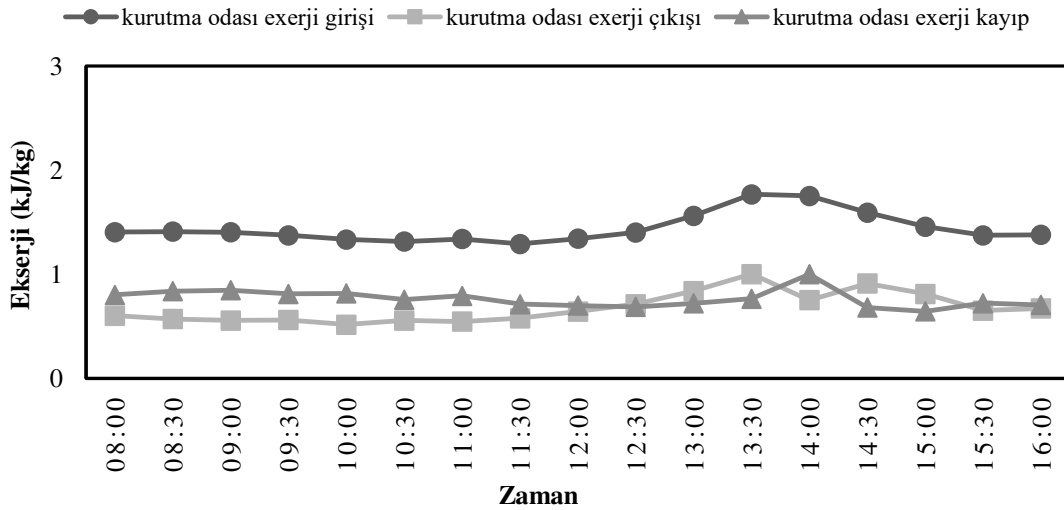
Şekil 6.30. Hareketli HIGK kurutma sisteminde 1400 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.30'da 1400 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde hareketli HIGK kurutma sistemine ait kurutma odası ekserji değerleri özetlenmiştir Ortalama 1.603 kJ/kg ekserji girişine sahip kurutma odasında, ekserji çıkışı ortalama 0.610 kJ/kg değerine kadar düşmüştür. Kurutma işleminde gerçekleşen ekserji kaybı ise ortalama 0.993 kJ/kg değerindedir.



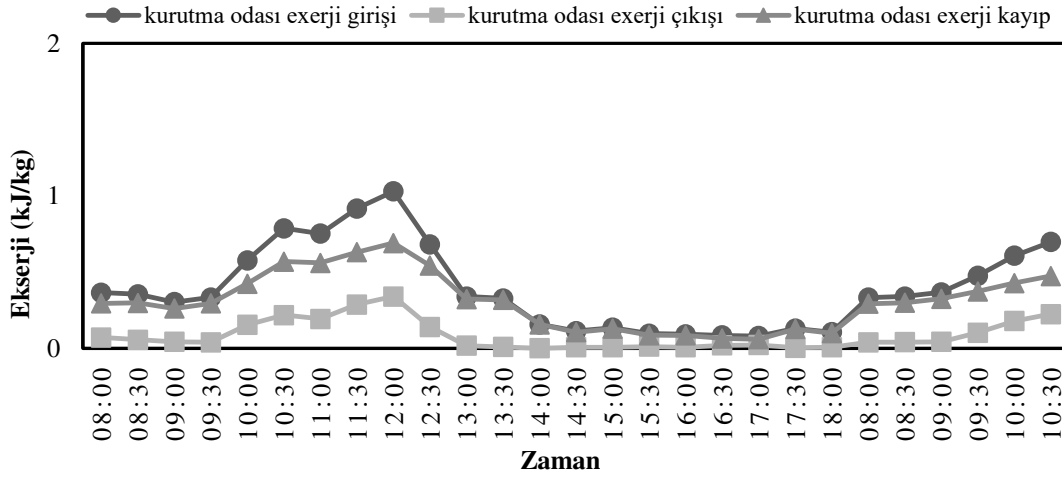
Şekil 6.31. Sabit HIGK kurutma sisteminde 1400 (dev/dak) fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi

1400 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde sabit HIGK kurutma sistemine ait kurutma odası ekserji değerleri Şekil 6.31'de verilmiştir. Ortalama 0.459 kJ/kg ekserji girişine sahip kurutma odasında, ekserji çıkışı ortalama 0.147 kJ/kg değerine kadar düşmüştür. Kurutma işleminde gerçekleşen ekserji kaybı ise ortalama 0.312 kJ/kg değerindedir.



Şekil 6.32. Hareketli HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi

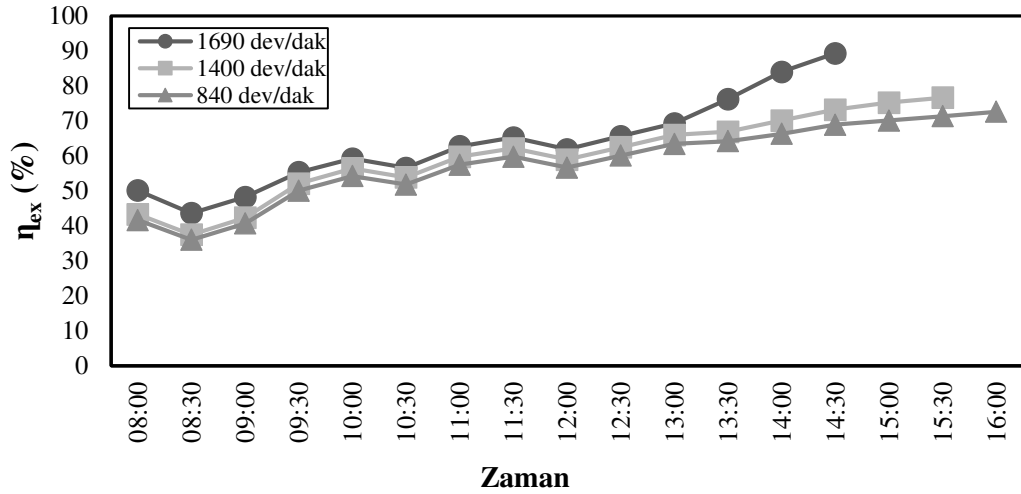
Şekil 6.32’de 840 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde hareketli HIGK kurutma sistemine ait kurutma odası ekserji değerleri gösterilmiştir. Ortalama 1.442 kJ/kg ekserji girişine sahip kurutma odasında, ekserji çıkışı ortalama 0.676 kJ/kg değerine kadar düşmüştür. Kurutma işleminde gerçekleşen ekserji kaybı ise ortalama 0.766 kJ/kg değerindedir.



Şekil 6.33. Sabit HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devrinde hesaplanan ekserji değerlerinin zamanla değişimi

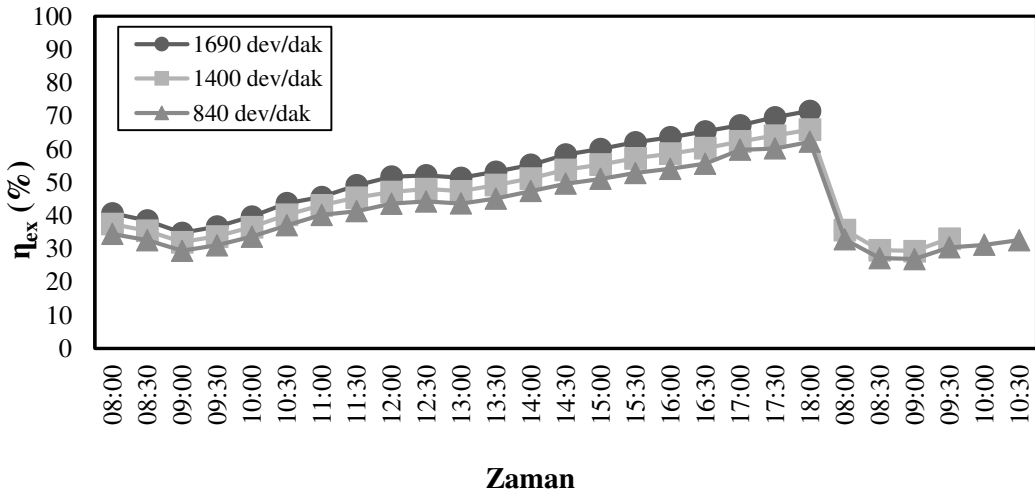
840 dev/dak fan devrinde gerçekleşen kurutma işleminde sabit HIGK kurutma sistemine ait kurutma odası ekserji değerleri Şekil 6.33’de verilmiştir. Ortalama 0.391 kJ/kg ekserji girişine sahip kurutma odasında, ekserji çıkışı ortalama 0.084 kJ/kg değerine kadar düşmüştür. Kurutma işleminde gerçekleşen ekserji kaybı ise ortalama 0.307 kJ/kg değerindedir.

Şekil 6.34 ve Şekil 6.35 ‘de sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemlerinin ekserji verim değerleri verilmiştir. Şekillerdeki ekserjetik verim değerlerinin artması veya azalması kurutma havasının giriş ve çıkış sıcaklık değerlerine bağlı değişim göstermiştir. Çıkış sıcaklığının girişe çok yakın bir değer alması ekserjetik verimi artırmıştır. Kurutma havasının sıcaklık değişimi ürünün nem içeriğindeki değişimi ile orantılı olmuştur. Nem içeriği değişimi artarsa kurutma havasının giriş çıkış sıcaklık farkıda artmıştır. Nem içeriği değişimi azalırsa, kurutma havasının giriş çıkış sıcaklığı farkıda azalmış ve dolayısıyla ekserjetik verimi artmıştır. Yukarıda verilen Şekil 6.26 ve 6.27’deki EKO değerleri incelendiğinde bu değerler, ekserjetik verim değerleri ile ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenebilir.



**Şekil 6.34.** Hareketli HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % ekserji verim değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 6.34’de hareketli HIGK kurutma sistemine ait ekserji verim değerleri gösterilmiştir. Ekserji verimi değerleri zamanla artan bir eğilim göstermiştir. En yüksek ekserji verimi, hareketli HIGK kurutma sisteminde, 1690 dev/dak fan devir değerinde, saat 14.30’da hesaplanan %89.3 değeri olmuştur. En düşük ekserji verim değeri ise, sabit HIGK kurutma sisteminde, 840 dev/dak değerinde, saat 08.30’da %36.02 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 6.35.** Sabit HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrindeki % ekserji verim değerlerinin zamanla değişimi

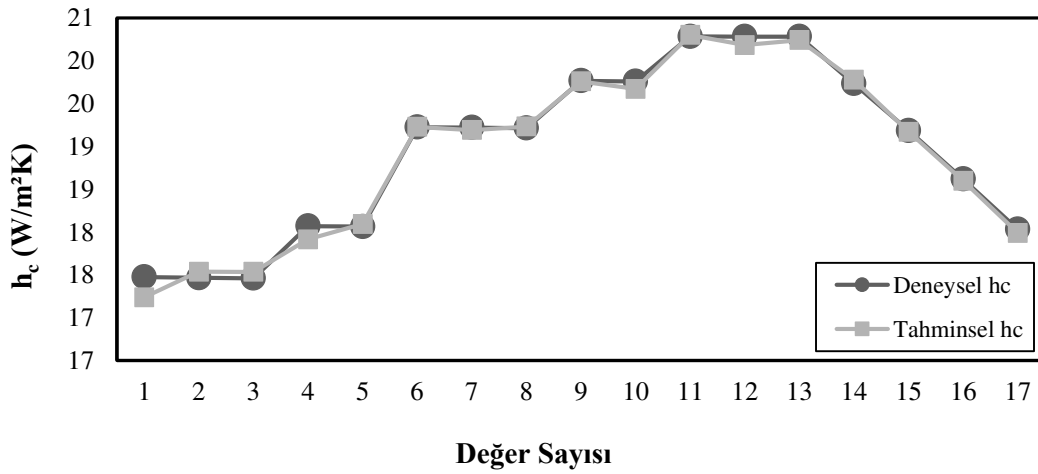
Şekil 6.35’de sabit HIGK kurutma sistemine ait ekserji verim değerleri verilmiştir. En yüksek ekserji verim değeri 1690 dev/dak fan devrinde saat 18.00’de hesaplanan %71.5, en düşük ekserji verim değeri ise 840 dev/dak ‘da saat 09.00’da hesaplanan %26.09 olarak belirlenmiştir.

## 6.5. Hesapsal Zekâ Yöntemleri İle Konvektif Isı Transferi Tahminsel Değerleri

Sabit ve Hareketli HIGK kurutma sisteminde sadece 1690 dev/dak fan motoru devrinde yapılan kurutma işlemindeki armut ürününe ait konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) değerleri için YSA'da, KA'da ve DVM'de tahminsel modeller elde edilmiştir. Kullanılan hesapsal zekâ yöntemlerinin yapmış olduğu tahminsel değerler aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

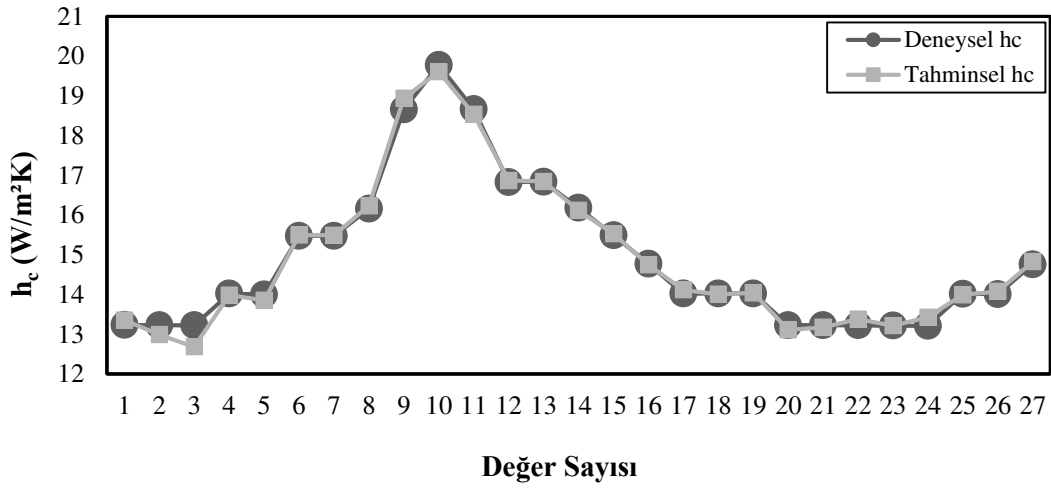
### 6.5.1. YSA İle Elde Edilen Konvektif Isı Transferi Tahminsel Model Değerleri

Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak sabit ve hareketli kurutma sistemlerindeki armut numunesine ait  $h_c$  değerleri tahmin edilmiştir. Tahminleme sonucu elde edilen değerler Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'de gösterilmiştir.



Şekil 6.36. Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile YSA tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.36'da hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait hesaplanmış ve YSA ile tahmin edilen 17 adet  $h_c$  değerleri gösterilmiştir. YSA ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri deneysel  $h_c$  değerlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. En iyi tahmin 6. değerde, en kötü tahmin 1. değerde gerçekleşmiştir.

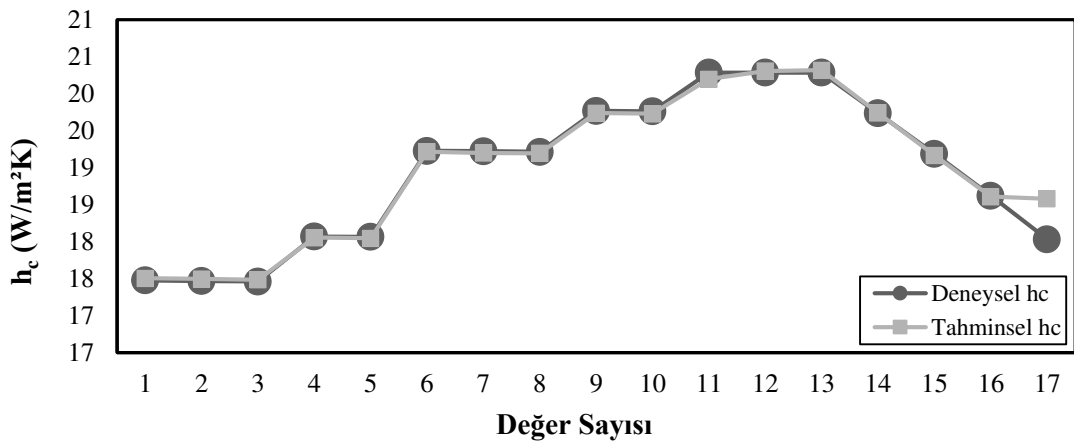


**Şekil 6.37.** Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile YSA tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.37’de sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait hesaplanmış ve YSA ile tahmin edilen 17 adet  $h_c$  değerleri gösterilmiştir. YSA ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri deneysel  $h_c$  değerlerine çok yakın değerler vermiştir. En iyi tahmin 14. ve 15. değerde, en kötü tahmin 2. ve 3. değerde gerçekleşmiştir.

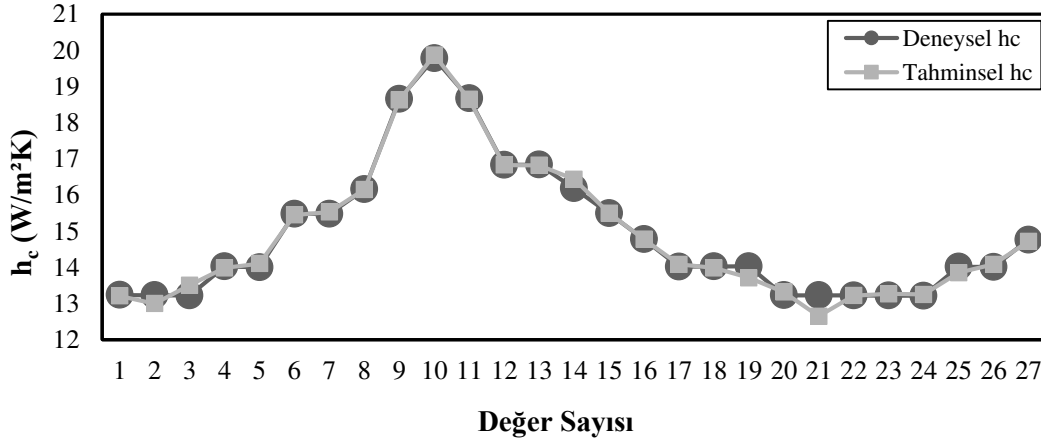
#### 6.5.2. Karar Ağacı İle Elde Edilen Konvektif Isı Transferi Tahminsel Model Değerleri

KA kullanılarak sabit ve hareketli kurutma sistemlerindeki armut numunesine ait  $h_c$  değerleri tahmin edilmiştir. Tahminleme sonucu elde edilen değerler Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da gösterilmiştir.



**Şekil 6.38.** Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile Karar Ağacı tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.38’de hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait hesaplanmış ve KA ile tahmin edilen 17 adet  $h_c$  değerleri gösterilmiştir. KA ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri deneysel  $h_c$  değerlerine çok yakın tahminler göstermiştir. En iyi tahmin 1. ve 13. değerde, en kötü tahmin 17. değerde gerçekleşmiştir.

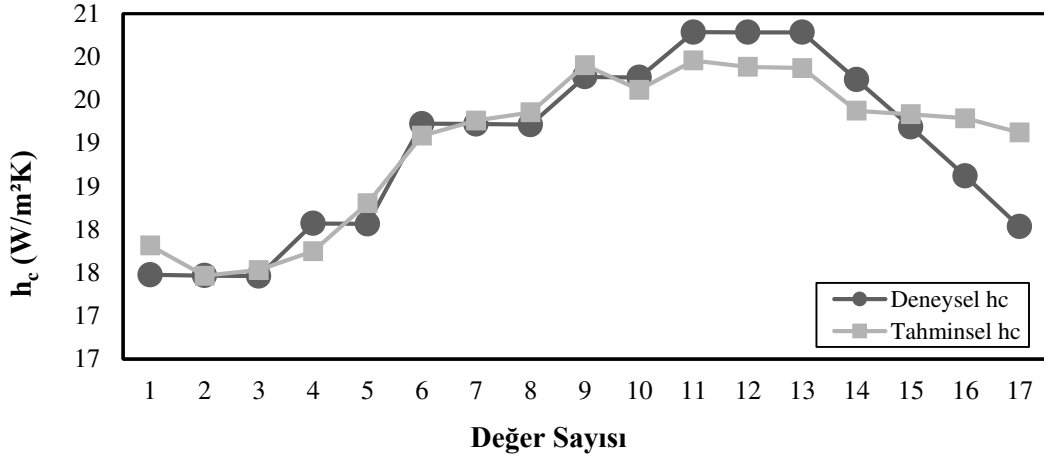


Şekil 6.39. Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile Karar Ağacı tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.39’da sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait hesaplanmış ve KA ile tahmin edilen 27 adet  $h_c$  değerleri gösterilmiştir. KA ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri deneysel  $h_c$  değerlerine oldukça yakın olmuştur. En iyi tahmin 16. ve 23. değerde, en kötü tahmin 3. ve 21. değerde gerçekleşmiştir.

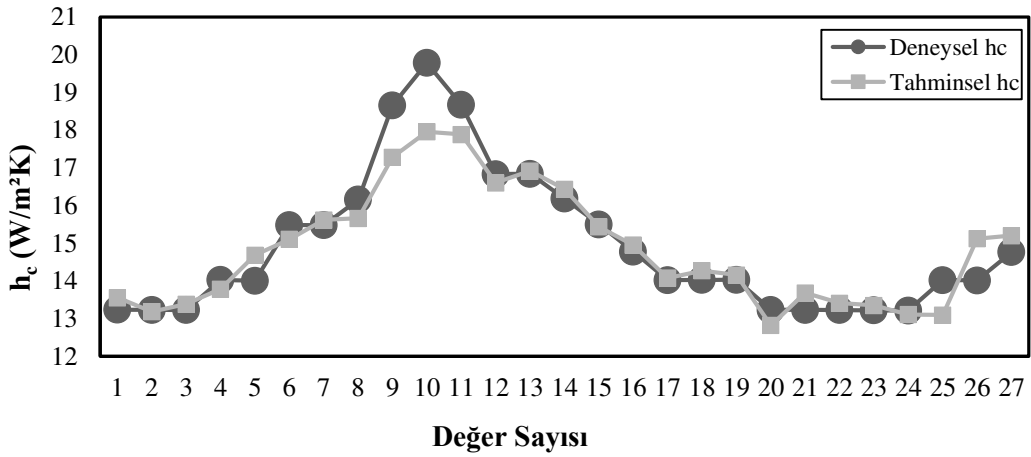
### 6.5.3. Destek Vektör Makinesi (DVM) İle Elde Edilen Konvektif Isı Transferi Tahminsel Model Değerleri

Armut kurutmak için kurulumu yapılan sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemlerinde yapılan kurutma sonucu elde edilen verilerle hesaplanan  $h_c$  değerleri için DVM kullanılarak tahminsel model oluşturulmuştur. DVM’de normalize poly kernel, poly kernel, PUK kernel ve RBF kernel olmak üzere 4 farklı kernel modeline göre tahminleme yapılmış ve elde edilen tahminsel değerler her iki kurutma sistemi için Şekil 6.40-Şekil 6.47’ de verilmiştir.



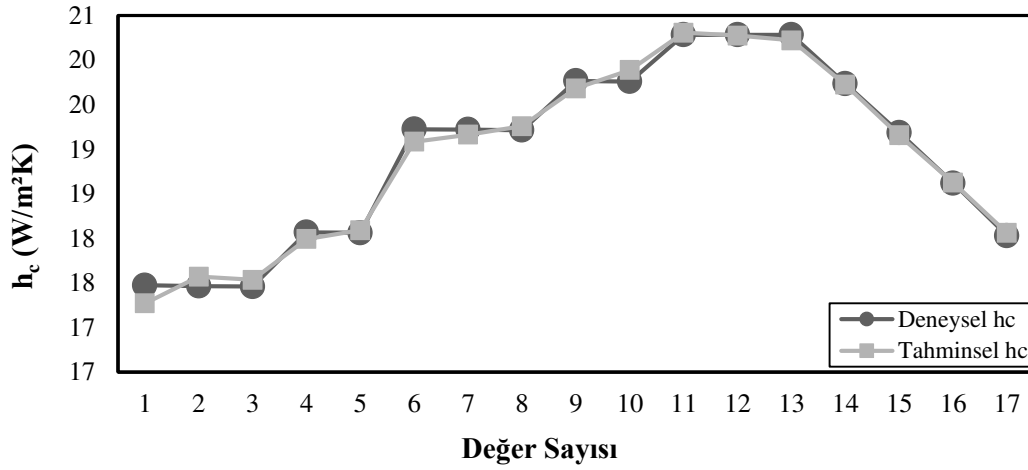
**Şekil 6.40.** Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM Normalize Poly Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.40'a göre hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait DVM normalize poly kernel ile yapılan en iyi  $h_c$  değeri tahminlemesi 2.,3. ve 7. değerde gerçekleşmiştir. En kötü  $h_c$  değeri tahminlemesi 17. değerde elde edilmiştir. Genel olarak başarılı bir tahminleme olmadığı, deneysel ve tahminsel değerlerin birbirlerine yakın olmadığından anlaşılmıştır.



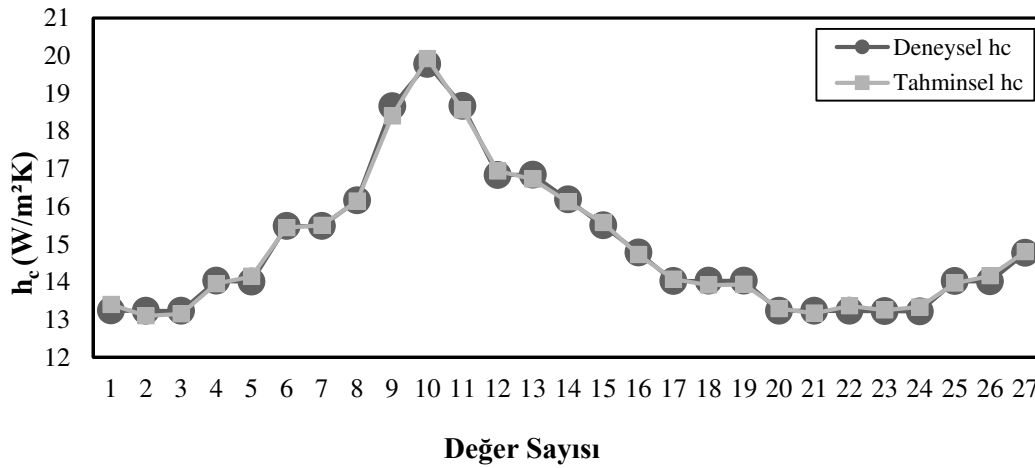
**Şekil 6.41.** Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM Normalize Poly Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.41'e göre sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait DVM normalize poly kernel ile yapılan en iyi  $h_c$  değeri tahminlemesi 2.,7., 15. ve 17. değerde gerçekleşmiştir. En kötü  $h_c$  değeri tahminlemesi 9., 10., ve 11. değerde belirlenmiştir.



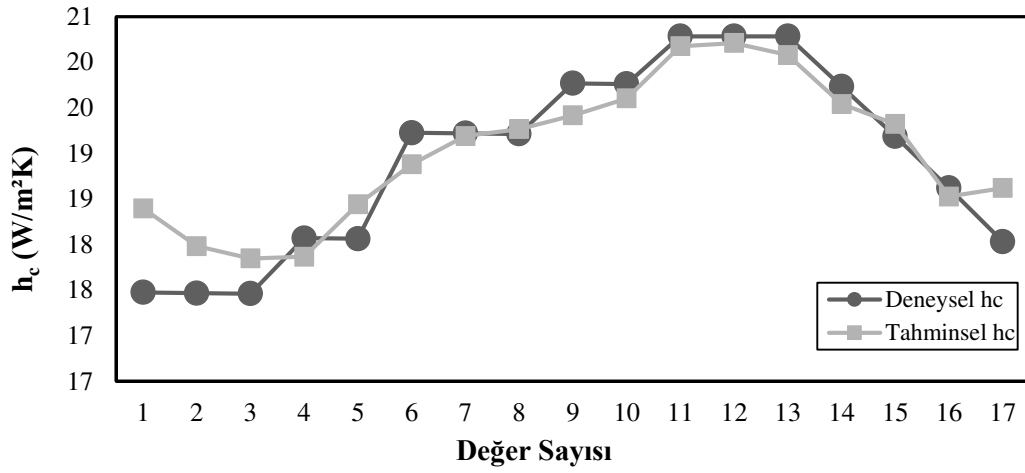
**Şekil 6.42.** Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM Poly Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.42’de görüldüğü gibi hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait DVM poly kernel ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri, deneysel  $h_c$  değerlerine yakın olmuştur. En kötü tahmin 1., en iyi tahmin 14. değerde elde edilmiştir.



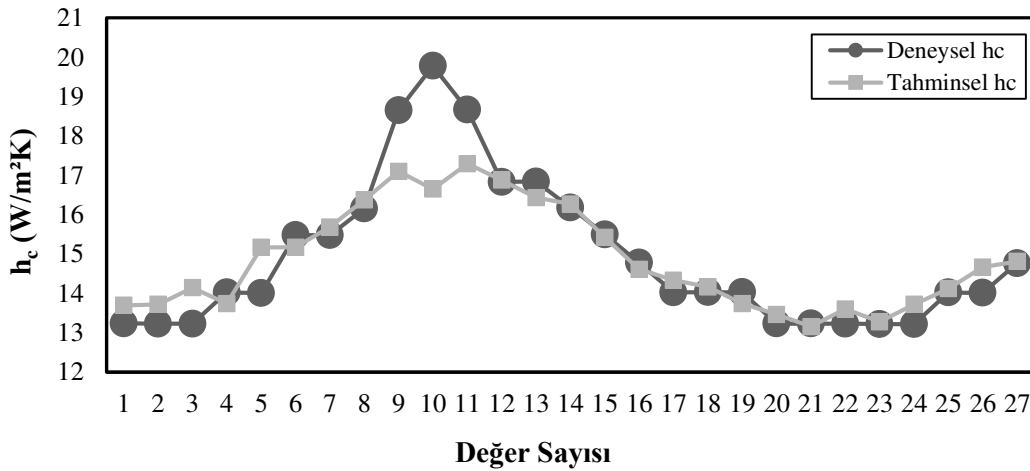
**Şekil 6.43.** Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM Poly Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.43’de görüldüğü gibi sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait DVM poly kernel ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri, deneysel  $h_c$  değerlerine yakın değerler vermiştir. En iyi tahmin 7., 15. ve 23. değerde, en kötü tahmin 1. ve 8. değerde gerçekleşmiştir.



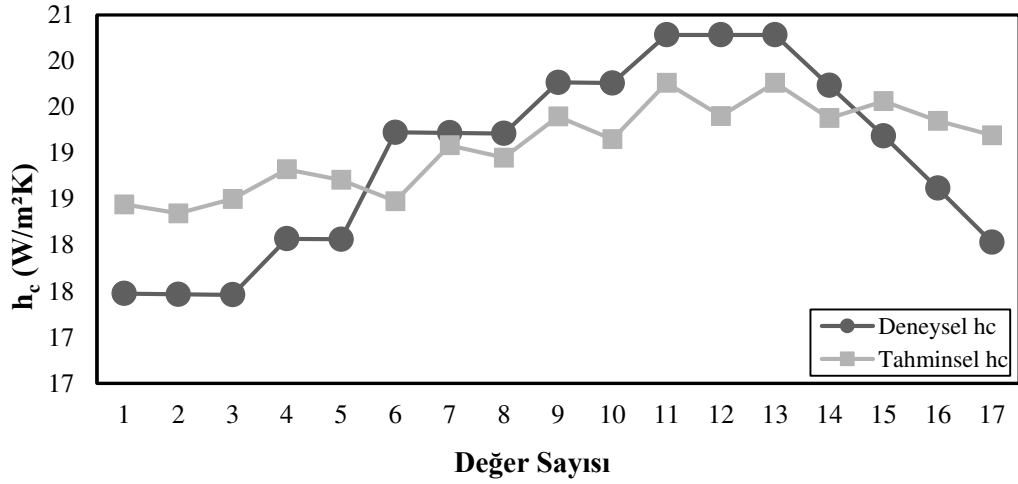
**Şekil 6.44.** Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM PUK Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.44'e göre hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe DVM PUK kernel ile yapılan en iyi  $h_c$  değeri tahminlemesi 8. değerde elde edilmiştir. Diğer değerlerde yapılan tahminlemeler yeterince başarılı olmamıştır.



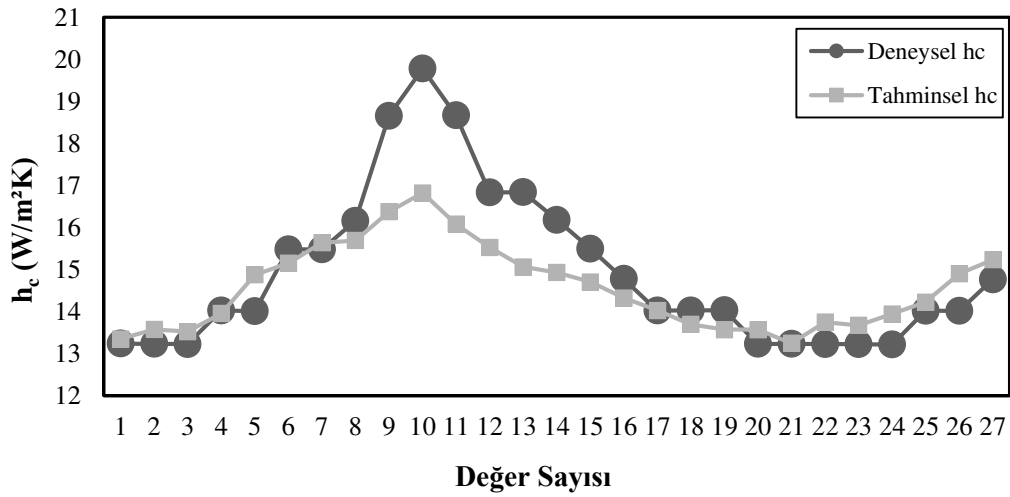
**Şekil 6.45.** Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM PUK Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.45'e göre sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe DVM PUK kernel ile yapılan en iyi  $h_c$  değeri tahminlemesi 21. değerde, en kötü  $h_c$  değeri tahminlemesi 9,10,11. değerde gerçekleşmiştir.



**Şekil 6.46.** Hareketli HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM RBF Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.46'ya göre hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait DVM RBF kernel ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen  $h_c$  değerleri, deneysel  $h_c$  değerlerine yakın değerde olmamıştır. Bu durum RBF kernelinin tahminleme işleminin başarısız olduğunu göstermiştir.



**Şekil 6.47.** Sabit HIGK kurutma sistemindeki hesapsal  $h_c$  değerleri ile DVM RBF Kernel tarafından tahmin edilen  $h_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.47'ye göre sabit HIGK kurutma sisteminde kurutulan armut ürününe ait DVM RBF kernel ile yapılan tahminleme sonucu elde edilen tüm  $h_c$  değerleri (17. ve 21. değerler hariç), deneysel  $h_c$  değerlerine yakın değerde olmamıştır. Bu durum RBF kernelinin tahminleme işleminin başarısız olduğunu göstermiştir.

#### 6.5.4. Hesapsal zekâ yöntemleri ile yapılan tahminsel modellerin hata analizleri

Kurutma deneylerinden elde edilen veriler ile hesaplanan  $h_c$  değerleri için hesapsal zeka yöntemleri kullanılarak yapılan tahminsel modellerin hata analiz değerleri sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemlerine göre Tablo 6.7’de özetlenmiştir.

**Tablo 6.7.** Hata analizi değerleri

| <b>HAREKETLİ HIGK KURUTMA SİSTEMİ</b> |            |           |                              |                    |                   |                   |
|---------------------------------------|------------|-----------|------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Hata Analizi</b>                   | <b>YSA</b> | <b>KA</b> | <b>DVM</b>                   |                    |                   |                   |
|                                       |            |           | <b>Normalize Poly Kernel</b> | <b>Poly Kernel</b> | <b>PUK Kernel</b> | <b>RBF Kernel</b> |
| <b>MAE</b>                            | 0.0657     | 0.0766    | 0.2928                       | 0.0587             | 0.2787            | 0.6454            |
| <b>RMSE</b>                           | 0.084      | 0.1362    | 0.39                         | 0.083              | 0.3588            | 0.7038            |
| <b>RAE</b>                            | 6.98%      | 6.01%     | 31.10%                       | 6.23%              | 29.59%            | 68.54%            |
| <b>RRSE</b>                           | 7.93%      | 12.86%    | 36.82%                       | 7.83%              | 33.88%            | 66.45%            |
| <b>SABİT HIGK KURUTMA SİSTEMİ</b>     |            |           |                              |                    |                   |                   |
| <b>Hata Analizi</b>                   | <b>YSA</b> | <b>KA</b> | <b>DVM</b>                   |                    |                   |                   |
|                                       |            |           | <b>Normalize Poly Kernel</b> | <b>Poly Kernel</b> | <b>PUK Kernel</b> | <b>RBF Kernel</b> |
| <b>MAE</b>                            | 0.1034     | 0.0983    | 0.4226                       | 0.0921             | 0.5061            | 0.7583            |
| <b>RMSE</b>                           | 0.1533     | 0.1622    | 0.6035                       | 0.1056             | 0.8237            | 1.0843            |
| <b>RAE</b>                            | 6.62%      | 6.29%     | 27.05%                       | 5.89%              | 32.39%            | 48.53%            |
| <b>RRSE</b>                           | 8.04%      | 8.51%     | 31.67%                       | 5.54%              | 43.23%            | 56.90%            |

Sabit HIGK kurutma sistemindeki armut ürününe ait  $h_c$  değerleri için yapılan YSA tahminlemesi, hareketli HIGK kurutma sistemindeki YSA tahminlemesine göre daha fazla hata oranına sahip olmuştur. Bunun sebebi hata analiz değerlerinin veri sayısına ve ağırlık eğitimine göre değişiklik göstermesidir.

## 7. SONUÇLAR

Gıda kurutma sistemleri içerisinde güneş enerjisi destekli kurutma sistemlerinin incelendiği bu tez çalışmasında öncelik güneş enerjisinden etkin bir şekilde faydalanabilmek olmuştur. Bu doğrultuda hava ısıtmalı güneş kollektörüne güneş takip özelliği kazandırılarak bir kurutma sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin güneş enerjisinden etkin bir şekilde faydalandığını göstermek için hareket özelliği kazandırılmış hava ısıtmalı güneş kollektörü ile aynı ölçülerde bir hava ısıtmalı güneş kollektörü (HIGK) tasarlanmış ve Güney Doğu yönüne 42° açıyla sabitlenmiştir. Sabitlenen HIGK ile hareketli HIGK, aynı ölçülerdeki gıda kurutma odalarına bağlanmıştır. Güneş enerjisi destekli sabit ve hareketli güneş kollektörüne sahip kurutma sistemlerinde armut ürünü kurutulmuş ve kurutma deney verileri ile çeşitli parametreler hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler içerisinde konvektif ısı transfer katsayısı değerleri için YSA, KA ve DVM kullanılarak tahminsel modeller elde edilmiştir. Çalışmamızın sonucunu aşağıdaki maddelerle sıralayabiliriz.

1- Hareketli HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devri için güneş kollektörü ısı verimi ortalama % 75.7 olarak hesaplanmıştır. Sabit HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devri için güneş kollektörü ısı verimi ortalama %51.7 olarak hesaplanmıştır. Her iki kurutma sisteminde en fazla ısı verim 1690 dev/dak fan devrinde hesaplanmıştır. PLC ile Güneş takip özelliği kazandırılmış hareketli HIGK, sabit HIGK'ne göre %24 daha fazla ortalama ısı verime sahip olmuştur.

2- Hareketli ve sabit HIGK kurutma sisteminde armut ürünlerine ait nem içeriği değerlerinin 3 farklı fan devrine göre değişimleri incelendiğinde, en hızlı kuru ve yaş baz nem içeriği değerleri değişimi 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşmiştir. Kurutma işleminde fan devrinin artmasından dolayı kurutma kabininden geçen sıcak hava debisinin artmış olması, armut ürününe ait nem içeriği değerlerinin daha hızlı azalmasına sebep olmuştur.

3- Her iki kurutma sistemi için boyutsuz nem oranı (MR) değerleri fan devir sayılarına göre değişim göstermiş, en hızlı MR değerleri değişimi 1690 dev/dak fan devrinde gerçekleşmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde MR değişimi 1690 dev/dak fan devrinde 390 dk, 1400 dev/dak fan devrinde 450 dk, 840 dev/dak fan devrinden 480 dk olmuştur. Sabit HIGK kurutma sisteminde MR değişimi 1690 dev/dak fan devrinde 600 dk, 1400 dev/dak fan devrinde 720 dk, 840 dev/dak fan devrinden 780 dk olarak belirlenmiştir.

4- Ortalama kuruma hızı (DR) değeri hareketli HIGK kurutma sisteminde 1690 dev/dak fan devri için  $0.0118 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde.dak}}$ , 1400 dev/dak fan devri için  $0.0103 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde.dak}}$  ve 840 dev/dak fan devri için  $0.0096 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde.dak}}$  değerinde olmuştur. Sabit HIGK kurutma sisteminde ise ortalama kuruma hızı değerleri 1690 dev/dak fan devri için  $0.0077 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde.dak}}$ , 1400 dev/dak fan devri için  $0.0058 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde.dak}}$  ve 840 dev/dak fan devri için  $0.005 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kmadde.dak}}$  olarak belirlenmiştir. Kuruma hızı her iki sistemde de 1690 dev/dak fan devrinde elde edilmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutma hızı değerleri 3 farklı fan devri için sabit HIGK kurutma sisteminden daha fazla olmuştur. Armut dilimlerinin kurutulmasında sabit hız evresi görülmemiş, tüm kuruma prosesi azalan kuruma hızı evresinde gerçekleşmiştir.

5- Konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) değeri, her iki sistem için farklı fan devirlerinde hesaplanmıştır. Hareketli HIGK kurutma sisteminde armut dilimleri için hesaplanan ortalama  $h_c$  değerleri 1690 dev/dak fan devri için  $21 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 1400 dev/dak fan devri için  $19.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve 840 dev/dak fan devri için  $18.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  olmuştur. Fan devir sayısı azaldıkça  $h_c$  değerleri de azalmıştır. Sabit HIGK kurutma sisteminde armut dilimleri için hesaplanan ortalama  $h_c$  değerleri ise 1690 dev/dak fan devri için  $18.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 1400 dev/dak fan devri için  $16.2 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve 840 dev/dak fan devri için  $14.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak belirlenmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde üç farklı fan devrinde yapılan kurutma işleminde hesaplanan  $h_c$  değerleri, sabit HIGK kurutma sisteminde üç farklı fan devrinde yapılan kurutma işleminde hesaplanan  $h_c$  değerlerinden daha fazla olmuştur.

6- Armut dilimlerinin ürün ağırlığı değişimi her iki kurutma sistemi için 30 dakikalık periyotlarla ölçülmüştür. Armut dilimlerinin ürün ağırlığındaki en hızlı azalma hareketli HIGK kurutma sisteminde 1690 dev/dak fan devrinde 390 dakikada gerçekleşmiştir. Armut ürününün ağırlığındaki en yavaş azalma ise sabit HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devrinde 780 dakikada gerçekleşmiştir. Genel olarak hareketli HIGK kurutma sisteminde 3 farklı fan devrinde kurutulan armut ürününün ortalama kuruma süresi 460 dakika olarak hesaplanmıştır. Sabit HIGK kurutma sisteminde ise bu süre 700 dakika olmuştur. Bu durumda hareketli HIGK kurutma sistemi, sabit HIGK kurutma sistemine göre 260 dakika daha kısa sürede armut dilimlerinin kurutma işlemini gerçekleştirmiştir.

7- Efektif difüzyon katsayısı değeri hareketli HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devri için  $0.068 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1400 dev/dak fan devri için  $0.074 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ve 1690 dev/dak fan devri için  $0.084 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak hesaplanmıştır. Sabit HIGK kurutma sisteminde 840 dev/dak fan devri için  $0.031 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1400 dev/dak fan devri için  $0.038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ve

1690 dev/dak fan devri için  $0.049 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminde gerçekleşen kurutmada difüzyon katsayısı değerleri, sabit HIGK kurutma sistemindeki değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklık değerlerinde ürün içerisindeki nemin daha kolay buharlaşması ve kuruma hızının artmasıyla açıklanabilir.

8- Aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) hesaplamalarında hareketli HIGK kurutma sistemi için elde edilen değerler; 840 dev/dak fan devri için 35.09 kJ/mol, 1400 dev/dak fan devri için 39.1 kJ/mol ve 1690 dev/dak fan devri için 41.15 kJ/mol olmuştur. Sabit HIGK kurutma sistemi için elde edilen değerler ise; 840 dev/dak fan devri için 15.9 kJ/mol, 1400 dev/dak fan devri için 17.1 kJ/mol ve 1690 dev/dak fan devri için 23.3 kJ/mol dır. Hareketli HIGK kurutma sisteminde gerçekleşen kurutmada hesaplanan  $E_a$  değerleri, sabit HIGK kurutma sistemindeki  $E_a$  değerlerinden daha yüksek olmuştur. Her iki kurutma sistemi için hava hızı arttıkça  $E_a$  değeri de artmıştır.

9- Literatürde bulunan nem oranı zaman değişimi modelleri nem oranı eğrilerine uygulanarak armut dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıklayan model araştırılmıştır. Nem içeriğinin zamana karşı deney verileri çizildiği zaman elde edilen eğrinin kurutma eğrilerinin genel karakteristiği olan eksponansiyel bir formda olduğu belirlenmiştir. Kuruma eğrisini en iyi ifade eden modelin seçiminde korelasyon katsayısı ( $R$ ), tahminin standart hatası (RMSE), ki-kare ( $\chi^2$ ) gibi istatistiksel parametreler esas alınmıştır. Bu parametreler doğrultusunda RMSE değeri en düşük olan en uygun sonuçlar Midilli ve Küçük modelinde elde edilmiştir.

10- Enerji kullanım oranları (EKO) hesaplamalarında hareketli HIGK kurutma sistemi kurutma odasına ait ortalama EKO % değerleri; 1690 dev/dak fan devri için %52.6, 1400 dev/dak fan devri için %47.3 ve 840 dev/dak fan devri için %42.9 olarak hesaplanmıştır. Sabit HIGK kurutma sistemi kurutma odasına ait ortalama EKO % değerleri ise; 1690 dev/dak fan devri için %30.08, 1400 dev/dak fan devri için %27.9 ve 840 dev/dak fan devri için %26.08 olarak hesaplanmıştır. Hareketli HIGK kurutma sisteminin enerji kullanım oran değerleri, sabit HIGK kurutma sistemin enerji kullanım oranı değerlerinden daha yüksek belirlenmiştir.

Ekserji verimi hesaplamalarında hareketli HIGK kurutma sisteminin fan devrine göre ortalama ekserji verimleri; 1690 dev/dak fan devri için %63.4, 1400 dev/dak fan devri için %59.8 ve 840 dev/dak fan devri için %57.9 değerlerinde olmuştur. Sabit HIGK kurutma sisteminin fan devrine göre ortalama ekserji verimleri ise; 1690 dev/dak fan devri için %52.8, 1400 dev/dak fan devri için %46.1 ve 840 dev/dak fan devri için %41.8 değerlerinde

belirlenmiştir. Hareketli HIGK kurutma sisteminin kurutma odası için hesaplanan ekserji verim değerleri sabit HIGK kurutma sistemin kurutma odası için hesaplanan ekserji verim değerlerinden daha yüksek olmuştur.

Ekserjetik verim ve EKO değerinin artması veya azalması kurutma havasının giriş ve çıkış sıcaklık değerlerine bağlı olmuştur. Çıkış sıcaklığının girişe çok yakın bir değer alması ekserjetik verimi artırmıştır. Aynı zamanda EKO değerleri de azalmıştır. Bu durum ekserjetik verim değerlerinin EKO değerleri ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir.

Hareketli ve sabit HIGK sistemleri için kurutma odası enerji ekserji analizleri yapılmıştır. Fan devir sayılarına göre hareketli HIGK kurutma sistemi için ortalama ekserji kaybı; 1690 dev/dak fan devrinde 0.112 kJ/kg, 1400 dev/dak fan devrinde 0.92 kJ/kg ve 840 dev/dak fan devrinde 0.76 kJ/kg değerlerinde olmuştur. Sabit HIGK kurutma sistemi için ortalama ekserji kaybı ise; 1690 dev/dak fan devrinde 0.504 kJ/kg, 1400 dev/dak fan devrinde 0.312 kJ/kg ve 840 dev/dak fan devrinde 0.307 kJ/kg değerlerinde elde edilmiştir. Hesaplanan sonuçlara göre hareketli HIGK kurutma sisteminde kurutma odası için hesaplanan ekserji kayıp değerleri sabit HIGK kurutma sistemi göre fazla olmuştur.

11- Hareketli ve sabit HIGK kurutma sistemlerinde kurutulan armut ürünlerine ait konvektif ısı transfer katsayısı ( $h_c$ ) değerleri için çeşitli hesapsal zekâ yöntemleri kullanarak tahminsel modeller oluşturulmuştur. Her iki sistemdeki  $h_c$  değerleri için seçilen hesapsal zekâ yöntemleri; YSA, KA ve DVM'dir. Bu yöntemler ile tahminsel model oluşturulmuş ve bu modeller ile  $h_c$  değerleri tahmin edilmiştir. Hareketli ve sabit HIGK kurutma sistemlerindeki  $h_c$  değerleri için yapılan tahminsel modeller içerisinde en az hataya sahip olan model, poly kernel ile yapılan DVM'ye ait tahminsel modeli olmuştur.

Sonuç olarak; tasarlanan HIGK kurutma sistemlerinden, güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde fayda sağlayan sistemin; üç farklı fan devir değerinde elde edilen deneysel veriler ile hesaplanan güneş kollektörü verim değerlerinin, kuruma hızı değerlerinin, konvektif ısı transfer katsayısı değerlerinin ve aktivasyon enerjisi değerlerinin büyük olması sebebiyle, güneş takip özelliği kazandırılmış hareketli HIGK kurutma sistemi olduğu belirlenmiştir. Sabit ve hareketli HIGK kurutma sistemleri  $h_c$  değerleri için 6 farklı hesapsal zekâ yöntemi ile yapılan tahminsel modeller içerisinde en başarılı tahmini poly kernel ile yapılan DVM olmuştur. Her iki kurutma sisteminde armut ürünü dışında farklı ürünler kurutarak daha fazla veri elde edilip, farklı hesapsal zekâ yöntemleri kullanılarak daha başarılı tahminsel modeller oluşturulabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.tuik.gov.tr/> Bitkisel Üretim 2018. 23.01.2019
- [2] **Atalay, H.**, 2017. Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolama Sistemli Kurutma Sisteminde Elma Kurutulmasının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [3] **Boğulur, H.**, 2014. Güneş Enerjili Hibrit Tip Bir Kurutma Sistem Tasarımı Ve Deneysel Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ş.Urfa.
- [4] **Sahdev, R.K.**, 2014. Open Sun and Greenhouse Drying of vAgricultural and Food Products: A Review, *International Journal of Engineering Research & Technology*, **3** (3). 1053-1066.
- [5] **Barlev, D., Vidu, R. and Stroeve, P.**, 2011. Innovation in concentrated solar power, *Solar Energy Mater Solar Cells*, **95**(10):2703–25.
- [6] **Mekhilef, S., Safari, A., Mustaffa, WES., Saidur, R., Omar R. and Younis MAA.**, 2012. Solar energy in Malaysia: current state and prospects, *Renew Sustain Energy Rev.*, **16**(1):386–96.
- [7] **Bulut, H., Boloğur, H., Beyazıt, N. İ., Demirtaş, Y. and Işıker, Y.**, 2017. Design and Experimental Analysis of A Solar Hybrid Type Drying System, *International Advanced Researches & Engineering Congress*, Osmaniye, 16-18 Kasım, s.1-9.
- [8] **Yağcıoğlu, A.**, 1999. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No:536, İzmir.
- [9] **Tarhan, S., Ergüneş, G. ve Tekelioğlu, O.**, 2007. Tarımsal Ürünler İçin Güneş Enerjili Kurutucuların Tasarım ve İşletme Esasları, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Sayı:9.
- [10] **Bulut, H. ve Durmaz, A.F.**, 2006. Bir Havalı Güneş Kollektörünün Tasarımı, İmalatı ve Deneysel Analizi, *I. Ulusal Güneş Ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, s.168-175.

- [11] Bulut, H., Durmaz, A.F. ve Aktacir, M. A., 2007. Bir Havalı Güneş Kollektörünün Isıl Performans Analizi, 3. *Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu*, Mersin, s.53-61.
- [12] Itai, A., 2007. Pear Genome mapping and molecular breeding in plants, *Fruit and Nuts*, 4: 157-170.
- [13] Ercişli, S., 2004. A short review of the fruit germplasm resources of Turkey, *Genetic Resources and Crop Evolution*, 51: 419-435.
- [14] Cemeroğlu, B. 2004. Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. Kurutma Teknolojisi. İkinci baskı. Ankara
- [15] Acar, J. ve Cemeroğlu, B., 1999. Meyve ve Sebze Teknolojisi. Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları Yayın No:43. Ankara.
- [16] Cohen, J. S. and Yang, T. C. S., 1995. Progress in Food Dehydration, *Trends in Food Science and Technology*, 6 (1):20–25.
- [17] Agrawal, A. and Sarviya, R.M., 2016. A review of research and development work on solar dryers with heat storage, *Int. J. Sustain. Energy*, 35. 583–605.
- [18] Karacabey, E. and Buzrul, S., 2017. Modeling and Predicting the Drying Kinetics of Apple and Pear: Application of the Weibull Model. *Chemical Engineering Communications*, 204(5), 573-579.
- [19] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. And Jaouhari, J. T. 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), 173-179.
- [20] Proietti, N., Adiletta, G., Russo, P., Buonocore, R., Mannina, L., Crescitelli, A. and Capitani, D., 2018. Evolution of physicochemical properties of pear during drying by conventional techniques, portable-NMR, and modelling, *Journal of Food Engineering*, 230, 82-98.
- [21] Joardder, M. U., Kumar, C., & Karim, M. A., 2017. Prediction of porosity of food materials during drying: Current challenges and directions, *Critical reviews in food science and nutrition*, 5. 1-12.
- [22] İzli, G., 2018. Farklı Kurutma Uygulamalarının Armut Meyvesinin Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri. *Turkish Journal of Agriculture: Food Science and Technology*, 6(4), 479-485.

- [23] Kırbaş, İ., Aydoğan, B. ve Uyumaz, A., 2013. Hava Isıtmalı Güneş Kollektörlerin’de Güneş Takip Mekanizması Kullanımı. *Mehmet Akif Erson Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 4: s74-84.
- [24] Onat A. 2002. Kırmızı Biberin Havalı Güneş Kollektörü Sistemi İle Kurutulması, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [25] Gulcimen, F., Karakaya, H. and Durmus, A., 2016. Drying of sweet basil with solar air collectors, *Renewable energy*, **93**. 77-86.
- [26] Yılmaz, H.Ö., Güngör, D. ve Özbalta, N., 1999. Domates İçin Kabin Tipi Bir Güneşli Kurutucunun Performans Analizi, 7. *Uluslararası Tarımsal Mekanizasyon Ve Enerji Kongresi*, Adana. 1999.
- [27] Hajar, E., Rachid, T., and Najib, B. M., 2017. Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer Pear Drying Test, *Energy Procedia*, **141**. 29-33.
- [28] Akpınar, E.K., 2004. Experinemtal determination of convective heat transfer coefficient of some agricultural product in forced convection drying, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, **31**(4): 585- 595. 2004.
- [29] Ratti, C. and Crapiste, G.H., 1995. Determination of heat transfer coefficients during of food stuffs, *Journal of Food Process Engineering*. **18**: 41-53.
- [30] Goyal, R.K. and Tiwari, G.N., 1998. Heat and mass transfer relations for crop drying, *Drying Technol.*, **16**(8): 1741-1754.
- [31] Anwar, S.I. and Tiwari, G.N., 2001. Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions, *Energy Convers. Mgmt.*, **42**(5): 627-637.
- [32] Akpınar, E.K., 2006. Experimental investigation of convective heat transfer coefficient of various agricultural products under open sun drying. *International Journal of Green Energy*, **1**(4): 429- 440.
- [33] Sahdev, R.K., Jain, N. and Kuma, M., 2012. Convective heat transfer coefficient for indoor forced convection drying of vermicelli, *IOSR Journal of Engineering*, **2**(6): 1282-1290.
- [34] Demirtaş, M., 2006. Bilgisayar Kontrollü Güneş Takip Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması, *Politeknik Dergisi*, **9**: s247-253.
- [35] Seme, S. and Štumberger, G., 2012. A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and Differential Evolution for dual-axis sun tracking purposes, *Solar Energy*, **85**: 2757-2770.

- [36] Kırbaş, İ., Aydoğan, B. ve Uyumaz, A., 2013. Hava Isıtmalı Güneş Kollektörlerin’de Güneş Takip Mekanizması Kullanımı, *Mehmet Akif Erson Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 4: s74-84.
- [37] Samimi-Akhijahani, H. and Arabhosseini, A., 2018. Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system, *Renewable Energy*, **123**:428–438
- [38] Abdelghani-Idrissi, M. A., et al., 2018. Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system, *Renewable Energy*, **119**:79-94.
- [39] Tina, G.M. and Gagliano, S., 2011. Probabilistic modelling of hybrid solar/wind power system with solar tracking system, *Renewable Energy*, **36**(6), 1719-1727.
- [40] Farooqui, S.Z., 2015. An improved power free tracking system for box type solar cookers, *Solar Energy*, **120**:100-103.
- [41] Jing, G., Cai, W., Chen, H., Zhai, D., Cui, C. and Yin, X., 2018. An air balancing method using support vector machine for a ventilation system, *Building and Environment*, **143**,487-495.
- [42] Deng, Z., Yang, L., Cai, Y. and Deng, H., 2017. Maximum Available Capacity and Energy Estimation Based on Support Vector Machine Regression for Lithium-ion Battery, *Energy Procedia*, **107**. 68-75.
- [43] Antonanzas, J., Urraca, R., Martínez-de-Pison, F.J. and Antonanzas-Torres, F., 2015. Solar irradiation mapping with exogenous data from support vector regression machines estimations, *Energy conversion and management*, **100**, 380-390.
- [44] Zendehboudi, A., Baseer, M.A. and Saidur, R., 2018. Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review, *Journal of Cleaner Production*, 199. 272-285.
- [45] Baser, F. and Demirhan, H., 2017. A fuzzy regression with support vector machine approach to the estimation of horizontal global solar radiation, *Energy*, **123**, 229-240.
- [46] Ahmad, M.W., Reynolds, J. and Rezgui, Y., 2018. Predictive modelling for solar thermal energy systems: A comparison of support vector regression. random forest. extra trees and regression trees. *Journal of Cleaner Production*, **200**, 212-222.

- [47] **Beigi, M., Torki-Harchegani, M. and Tohidi, M.**, 2017. Experimental and ANN modeling investigations of energy traits for rough rice drying, *Energy*, **141**, 2196-2205.
- [48] **Taheri-Garavand, A., Meda, V. and Naderloo, L.**, 2018. Artificial neural Network–Genetic algorithm modeling for moisture content prediction of savory leaves drying process in different drying conditions, *Engineering in Agriculture Environment and Food*, **11**(4), 232-238.
- [49] **Azadbakht, M., Aghili, H., Ziaratban, A. and Torshizi, M.V.**, 2017. Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes, *Energy*, **120**, 947-958.
- [50] **Aktaş, M., Şevik, S., Özdemir, M.B. and Gönen, E.**, 2015. Performance analysis and modeling of a closed-loop heat pump dryer for bay leaves using artificial neural network, *Applied Thermal Engineering*, **87**, 714-723.
- [51] **Beigi, M., Torki-Harchegani, M. and Tohidi, M.** 2017. Experimental and ANN modeling investigations of energy traits for rough rice drying. *Energy*, **141**, 2196-2205.
- [52] **Voyant, C., Motte, F., Notton, G., Fouilloy, A., Nivet, M.L. and Duchaud, J.L.**, 2018. Prediction intervals for global solar irradiation forecasting using regression trees methods, *Renewable Energy*, **126**. 332-340.
- [53] **Ren, L. and Hartnett, M.**, 2017. Prediction of Surface Currents Using High Frequency CODAR Data and Decision Tree at a Marine Renewable Energy Test Site, *Energy Procedia*, **107**. 345-350.
- [54] **Persson, C., Bacher, P., Shiga, T. and Madsen, H.**, 2017. Multi-site solar power forecasting using gradient boosted regression trees, *Solar Energy*, **150**. 423-436.
- [55] **Ahmad, M., Mouraud, A., Rezgui, Y. and Mourshed, M.**, 2018. Deep Highway Networks and Tree-Based Ensemble for Predicting Short-Term Building Energy Consumption, *Journal of Cleaner Production*, **11**(12), 3408.
- [56] **Tso, G.K. and Yau, K.K.**, 2007. Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis decision tree and neural networks, *Energy*, **32**(9). 1761-1768.

- [57] **Daş, M., Akpınar, E.**, 2018. Güneş Enerjisi Destekli Gıda Kurutma Sisteminde Nane Ürününün Kurutulması Ve Kuruma Değerlerinin Farklı Regresyon Analizleri, *4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*, 18-20 Nisan, Edirne, ss.281-293
- [58] **Akpınar, E.K., Midilli, A. and Bicer, Y.**, 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process, *Journal of Food Engineering*, **72**(4):320-331.
- [59] **Akpınar, E.K. and Sarsilmaz, C.**, 2004. Energy and exergy analyses of drying of apricots in a rotary solar dryer, *International Journal of Exergy*, **1**(4):457 - 474.
- [60] **Dincer, I. and Rosen, M.A.**, 2007. Exergy: Energy Environment and Sustainable Development. Elsevier.
- [61] **Sami, S., Etesami, N. and Rahimi, A.**, 2011. Energy and exergy analysis of an indirect solar cabinet dryer based on mathematical modeling results, *Energy*, **36**, 2847-2855
- [62] **Rabha, D.K. and Muthukumar, P.C.**, 2017. Somayaji Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger, *Renewable Energy*, 105. 764e773
- [63] **Akpınar, E.K.**, 2004. Energy and exergy analysis of drying of red pepper slices in a convective type dryer, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, **31** (8) pp. 1165-1176.
- [64] **Zisopoulos, F.K., Rossier-Miranda, F.J., Goot, A.J.V.D. and Boom R.M.**, 2016. The use of exergetic indicators in the food industry, *A review Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. **57**:1. 197-211.
- [65] **Midilli, A. and Kucuk, H.**, 2015. Assessment of exergetic sustainability indicators for a single layer solar drying system. *International Journal of Exergy (IJEX)*, **16**(3).
- [66] **Özel, Ö.F.**, 2010. Bal kabağının farklı kurutma şartlarındaki kuruma karakteristiklerinin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [67] **Yaldız, O. and Ertekin, C.**, 2001. Thin Layer solar Drying of Some Different Vegetables, *Dry. Tech.*, **19**. No.3. pp.583-56

- [68] **Yaldız, O., Ertekin, C.**, 2001. Patlıcan Kurutmada Kurumanın Çeşitli Modeller ile Açıklanması, *Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi*, Şanlıurfa, s.399-403.
- [69] **Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z.**, 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, **20**(7): 1503-1513.
- [70] **Benedict, R.P.**, 1964. Uncertainty in Measurement, Electro-Technol., p.51.
- [71] **ASME.**, 2005. Test Uncertainty. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [72] **Kline, S.J. and McClintock, F.A.**, 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, *Mechanical engineering*, **75**, 3-8, 1953.
- [73] **Holman, J.P.**, 1989. Experimental Methods for Engineers, 5th edition Mc-Graw Hill Company, New York.
- [74] **Akpınar, E.**, 2005. Deneysel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: kurutma deneylerindeki hata analizi, *Mühendis ve Makine*, **46**, 540.
- [75] **ASAE**, 1983. Moisture measurement-peanuts. ASAE Standard of ASAE S.410.1. Agr. Eng, Yearbook of Standards, 329-331.
- [76] **Doğantan, Z.S.**, 1986, Kahramanmaraş biberlerinin kurutmaya yönelik fiziksel ve kimyasal özelliklerinin saptanması ile doğal koşullarda ve plastik örtü altı güneş toplayıcılarıyla kurutma üzerine bir araştırma. *Doktora Tezi*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Mekanizasyon Anabilim Dalı, Adana.
- [77] **Hall, C.W., Kunze, O.R., Calderwood, D.L., Maddex, R.L., Shove, G.C. and Davis, D.C.**, 1980. Drying and storage of agricultural crops, Washington State Un., Pullman, WA 99164, USA.
- [78] **Yağcıoğlu, A.**, 1999. Tarım ürünleri kurutma tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:536, İzmir.
- [79] **Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W.**, 1974. Drying cereal grains. Westport AVI.
- [80] **Newman, A.B.**, 1931. The drying of porous solids: Diffusion and surface emission equations. Transactions of the AICHE 27:203-220.
- [81] **Crank, J.**, 1975. The Mathematics of Diffusion, 2nd Ed. London: Oxford University Press.

- [82] **Mujumdar, A.S. and McCabe, S.**, 2000. Fluidized Bed Drying Technology. Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying. (Devahastin, S. ed.). Exergex Corp. Canada.
- [83] **McCabe, W.L. and Smith, J.C.**, 1976. Unit Operations of Chemical Engineering, 3rd Ed., 521, McGraw-Hill, New York.
- [84] **El-Beltagy, A., Gamea, G.R. and Essa, A.H.A.**, 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *J Food Engr.*, **78**:456–64.
- [85] **Akoy, E.O.M.**, 2014. Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices, *Intl Food Res J.*, **21**(5):1911–7.
- [86] **Vega, A., Fito, P., Andr'es, A. and Lemus, R.**, 2007. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo), *J Food Engr.*, **79**: 1460–6.
- [87] **Hashim, N., Onwude, D. and Rahaman, E.**, 2014. A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer, *Agric Sci Procedia*, **2**(2):345–52.
- [88] **Rayaguru, K. and Routray, W.**, 2012. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics of stone apple slices, *Intl Food Res J.*, **19**(4):1503–10.
- [89] **Sacilik, K.**, 2007. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.), *J Food Engr.*, **79**(1):23–30.
- [90] **Dash, K.K., Gope, S., Sethi, A. and Doloi, M.**, 2013. Star fruit slices. *Intl J Agric Food Sci Technol*, **4**(7):679–86.
- [91] **Omolola, A.O., Jideani, A.I.O. and Kapila, P.F.**, 2014. Modeling microwave-drying kinetics and moisture diffusivity of Mabonde banana variety. *Intl J Agric Biol Engr.*, **7**(6):107–13.
- [92] **Yaldız, O. and Ertekin, C.**, 2007. Thin-layer solar drying of some vegetables, *Drying Technol.*, **19**(3–4):583–97.
- [93] **Zenoozian, M.S., Feng, H., Shahidi, F. and Pourreza, H.R.**, 2008. Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin, *J Food Process Preserv.*, **32**:88–102.
- [94] **Akpınar, E.K.**, 2006. Mathematical modeling of thin-layer drying process under open sun of some aromatic plants, *J Food Engr.*, **77**:864–70.
- [95] **Midilli, A., Küçük, H. and Yapar, Z.**, 2002. A New Model for Single-Layer Drying, *Drying Technol.*, **20**. 1503-1513

- [96] **Pardeshi, IL., Arora, S. and Borker, P.A.,** 2009. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technol.*, **27**(2):288–95.
- [97] **Villota, R. and Hawkes, D. R.,** 1992. Reaction kinetics in food systems, *Handbook of Food Engineering*, Newyork, s39-144.
- [98] **Akpınar, E. K. and Toraman, S.,** 2013. Estimation of the moisture diffusivity and activation energy in thin layer drying of ginger slices, *World Acad Sci Eng Technol*, **78**, 1308-1311.
- [99] **Çengel, Y.A. and Boles M.A.,** 1989, *Thermodynamics, An Engineering Approach*. McGraw-Hill Book Company.NY.
- [100] **Midilli, A.,** 2001, Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system, *International Journal of Energy Research*, **25**, 715-725.
- [101] **Bejan A.,** 1988, *Advanced engineering thermodynamics*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- [102] **Szargut J, Morris DR, Steward FR.,** 1988, *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York: Hemisphere Publishing Corp.
- [103] **Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y.,** 2005. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management*, **46**(15-16), 2530-2552.
- [104] **Çolak, G.N.,** 2009. Gıda kurutma sistemlerinin ekserji analizi, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir.
- [105] **Pitts, D.R. and Sissom, L.E.,** 1997. *Schaums's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer*; McGraw-Hill Inc, New York, NY, USA.
- [106] **Velic, D., Planinic, M., Tomas, S. and Bilic, M.,** 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *J. Food Eng.*, **64**, 97–102.
- [107] **Anwar, S.I. and Tiwari, G.N.,** 2001. Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions, *Energy Convers Mgmt.*, **42**(5):627-637.
- [108] **Anwar, SI. and Tiwari, G.N.,** 2001. Convective heat transfer coefficient of crop in forced convection drying-an experimental study, *Energy Convers Mgmt.*, **42**:1687-98.
- [109] **Tiwari, GN.,** 2002. *Solar Energy, Fundamentals, Design, Modelling and Applications*, Alpha Science Int'l Ltd.

- [110] **Özdemir, M.B., Aktaş, M., Şevik, S. and Khanlari, A.,** 2017. Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. *International Journal of Hydrogen Energy*, **28**. 18005-18013.
- [111] **Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G. and Dornfeld, D.,** 2010. Advanced monitoring of machining operations. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, **59** .717-739.
- [112] **Alpar, R.,** 2010. Basit Doğrusal Regresyon Çözümlemesi. Detay Yayıncılık. Ankara. 285-304.
- [113] **Kirkwood, B.R. and Sterne, J.A.C.,** 2003. Regression Modelling. Medical Statistics. Blackwell Science, Australia. 315-342.
- [114] **Pagano, M., Gauvreau, K.,** 1993. Simple Linear Regression. Principles of Biostatistics. Duxbury Press. USA. 379-424.
- [115] **Safavian, S.R. and Landgrebe, D.,** 1991. A survey of decision tree classifier methodology, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, **21**. 660-674. 1991.
- [116] **Quinlan, J.R.,** 1993. "C4.5: Programs for Machine Learning". Morgan Kaufmann. San Mateo. CA. 302 s.
- [117] **Pal, M. and Mather, P.M.,** 2003. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification, *Remote Sensing of Environment*, **86**. 554-565.
- [118] **Burges, C.J.C.,** 1998. A tutorial on support vector machines for pattern recognition, *Data Mining Knowledge Discovery*, **2**(2). 121- 167.
- [119] **Vapnik, V.N.,** 1998. Statistical learning theory. New York: Wiley.
- [120] **Smola, A.J. and Schölkopf, B.A.,** 2004. Tutorial on Support Vector Regression, *Statistics and Computing.*, **14**. 199-222. 2004.
- [121] **Vapnik, V.,** 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag, New York.
- [122] **Cortes, C. and Vapnik, V.,** 1995. Support-Vector Networks. *Mach. Learn.* **20**. 273-297.
- [123] **Yalçın, C.,** 2016. Analysis of instantaneous fuel consumption in aircrafts with support vector regression. *Doktora Tezi*, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [124] **Osuna, E., Freund, R. and Girosi, F., 1997.** Support vector machines: Training and applications. Massachusetts Institute of Technology and Artificial Intelligence Laboratory. Massachusetts.No:1602. C.B.C.L. Paper No. 144.
- [125] **Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Jaouhari, J. T. 2004.** Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). Journal of Food Engineering, 61(2), 173-179.
- [126] **Proietti, N., Adiletta, G., Russo, P., Buonocore, R., Mannina, L., Crescitelli, A. and Capitani, D. 2018.** Evolution of physicochemical properties of pear during drying by conventional techniques, portable-NMR, and modelling. Journal of Food Engineering, 230, 82-98.
- [127] **Guiné, R. P. F., Ferreira, D. M. S., Barroca, M. J. and Gonçalves, F. M. 2007.** Study of the drying kinetics of solar-dried pears. Biosystems Engineering, 98(4), 422-429.
- [128] **Kuş, S. 2016.** Mikrodalga enerjisiyle ayva ve armut meyvesinin kuruma davranışı ve modellenmesi Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi.
- [129] **Guiné, R. P. and AM Castro, J. A. 2003.** Analysis of moisture content and density of pears during drying. Drying Technology, 21(3), 581-591.
- [130] **Lahsasni, S. Kouhila, M., Mahrouz, M., Mohamed, L. A. and Agorram, B. 2004.** Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*). Journal of food process engineering, 27(2), 103-117.
- [131] **Guiné, R. P. and Castro, J. A. A. M. 2002.** Pear drying process analysis: drying rates and evolution of water and sugar concentrations in space and time. Drying Technology, 20(7), 1515-1526.
- [132] **Guiné, R. P., Rodrigues, A. E. and Figueiredo, M. M. 2007.** Modelling and simulation of pear drying. Applied Mathematics and Computation, 192(1), 69-77.
- [133] **Guiné, R. P. 2008.** Pear drying: experimental validation of a mathematical prediction model. food and bioproducts processing, 86(4), 248-253.
- [134] **Dotto, G. L., Souza, T. B., Simões, M. R., Morejon, C. F. and Moreira, M. F. P. 2017.** Diffusive-convective model considering the shrinkage applied for drying of pears (*pyrus spp.*). Journal of Food Process Engineering, 40(4), e12503

- [135] **Defraeye, T. and Verboven, P.** 2017. Convective drying of fruit: role and impact of moisture transport properties in modelling. *Journal of Food Engineering*, 193, 95-107.
- [136] **Silva, V., Costa, J. J., Figueiredo, A. R., Nunes, J., Nunes, C., Ribeiro, T. I. and Pereira, B.** 2016. Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient. *Journal of Food Engineering*, 180, 77-86.
- [137] **Guiné, R. P. F., Barroca, M. J. and Silva, V.** 2013. Mass transfer properties of pears for different drying methods. *International journal of food properties*, 16(2), 251-262.



## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Elazığ' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ' da tamamladı. 2003-2008 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi aldı. 2008-2011 yılları arasında Kahramanmaraş Erkoç Mühendislik A.Ş. de proje mühendisi olarak çalıştı. 2011 yılından beri Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İliç Dursun Yıldırım MYO da öğretim görevlisi olarak çalışmakta. 2010-2013 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.'nda yüksek lisans eğitimimi tamamladı. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Enerji B.D.'nda doktora eğitimine başlamıştır. Evli ve bir çocuk babası olarak Erzincan/İliç'te ikamet etmektedir.