

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ, ISI POMPALI  
AKIŞKAN YATAKLI BİR KURUTUCUNUN  
TASARIMI, İMALATI VE DENEYSEL ANALİZİ**

**2015  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ**

**Ali Etem GÜREL**

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ, ISI POMPALI AKIŞKAN YATAKLI BİR  
KURUTUCUNUN TASARIMI, İMALATI VE DENEYSEL ANALİZİ**

**Ali Etem GÜREL**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Eğitimi Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2015**

Ali Etem GÜREL tarafından hazırlanan “GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ, ISI POMPALI AKIŞKAN YATAKLI BİR KURUTUCUNUN TASARIMI, İMALATI VE DENEYSEL ANALİZİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlhan CEYLAN

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 20/ 01/ 2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Doç. Dr. Sezayi YILMAZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. İlhan CEYLAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ (GÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin KAYA (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN (KBÜ)

İmzası

.../.../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Ali Etem GÜREL

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ, ISI POMPALI AKIŞKAN YATAKLI BİR KURUTUCUNUN TASARIMI, İMALATI VE DENEYSEL ANALİZİ**

**Ali Etem GÜREL**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. İlhan CEYLAN**

**Ocak 2015, 120 sayfa**

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisi destekli, ısı pompalı akışkan yataklı bir kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve farklı çalışma koşullarında deneysel olarak test edilmiştir. İmal edilen akışkan yataklı kurutucu beş farklı çalışma modunda işletilmiştir. Bunlar sırasıyla; ısı pompalı çalışma modu, parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu, ısı pompalı ve parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu, havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu ve tümleşik çalışma modlarıdır. Akışkan yataklı kurutma sisteminde, kurutma havası sıcaklıkları oransal-integral-türevsel (PID) kontrol yöntemi kullanılarak sağlanmıştır. Kurutma havası sıcaklıkları her bir sistemde  $\pm 0,254^{\circ}\text{C}$  ile  $\pm 0,538^{\circ}\text{C}$  arasında değişen hassasiyetlerde kontrol edilmiştir. Kurutma sisteminde her bir çalışma modu için termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda ısı pompası sisteminin tüm sistem performans katsayısı ( $\text{COP}_{\text{ts}}$ ) değeri ortalama 3,68 olarak bulunmuştur. Havalı güneş kolektörü için Isıtma Performans Katsayısı değeri (IPK) ortalama 14,9 olarak

bulunurken, sistem verimi ortalama %80,17 olarak hesaplanmıştır. Benzer şeklide; parabolik oluklu güneş kolektörünün IPK değeri ortalama 5,02 olarak bulunurken, sistem verimi ortalama %22,35 olarak hesaplanmıştır. Akışkan yataklı kurutucunun farklı çalışma modlarına göre ekserji verimleri %20,71 ile %63,37 arasında değişmiştir.

**Anahtar Sözcükler** : Akışkan yatak, enerji, ekserji, güneş enerjisi, ısı pompası.

**Bilim Kodu** : 708.1.038

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **SOLAR-ASSISTED HEAT PUMP FLUIDIZED BED DRYER DESIGN, MANUFACTURING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS**

**Ali Etem GÜREL**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Machine Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

**January 2015, 120 pages**

In this thesis study, a solar-assisted heat pump fluidized bed dryer was designed, manufactured and experimentally tested under various operation conditions. The manufactured fluidized bed dryer was operated in five different operation modes. These respectively were; operation mode with heat pump, operation mode with parabolic trough solar collector, operation mode with heat pump and parabolic trough solar collector operation mode with air solar collector and heat pump and integrated operation mode. In fluidized bed drying system, drying air temperatures were achieved by proportional-integral-derivational (PID) control method. Drying air temperatures were controlled in each system with accuracies varying from  $\pm 0,254^{\circ}\text{C}$  to  $\pm 0,538^{\circ}\text{C}$ . Thermodynamical analysis was realized for each operation mode in drying system. As a result of these analyses, whole system coefficient of performance of heat pump system ( $\text{COP}_{\text{ws}}$ ) was averagely found to be 3,68. Heating Performance Coefficient (HPC) for air solar collector was averagely found to be

14,9 while average system efficiency was calculated as 80,17%. Similarly the IPK value of parabolic trough solar collector was averagely found to be 5,02 while average system efficiency was calculated as 22,35%. Exergy efficiencies of fluidized bed dryer according to different operation modes varied between 20,71% and 63,37%.

**Key Word** : Fluidized bed, energy, exergy, solar energy, heat pump.

**Science Code** : 708.1.038



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Doç. Dr. İlhan CEYLAN'a teŐekkürlerimi sunarım. Ayrıca tecrübe ve bilgilerinden yararlandığım değerli tez izleme komitesi üyelerim, Doç. Dr. Sezayi YILMAZ ve Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN hocalarıma, her aşamada bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Alper ERGÜN'e, bugünlere gelmemde büyük emekleri bulunan aileme ve son olarak, birbirimize olan destek ve sevgimiz ile bütün zorlukların üstesinden geldiğimiz eŐim Zehra GÜREL'e teŐekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
LİTERATÜR TARAMASI.....	4
BÖLÜM 3 .....	25
KURUTMA VE KURUTMA SİSTEMLERİ.....	25
3.1. KURUTUCU SEÇİMİ .....	26
3.2. KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI.....	29
3.2.1. Kurutulacak Ürüne Isı Geçişine Göre Kurutucular .....	29
3.2.1.1. İletimli Kurutucular .....	29
3.2.1.2. Taşınımlı Kurutucular.....	30
3.2.1.3. Işınımlı Kurutucular.....	30
3.2.2. Kurutma İşleminin Gereksinim Duyduğu Sıcaklık ve Basınca Göre Kurutucular .....	30
3.2.3. Ürünün Kurutucuda Tutulma Durumuna Göre Kurutucular .....	31
3.3. KURUTUCU TIPLERİ.....	31
3.3.1. Döner Kurutucular .....	31
3.3.2. Püskürtmeli (Sprey) Kurutucular.....	31

	<u>Sayfa</u>
3.3.3. Tünel Kurutucular .....	32
3.3.4. Dielektik ve Mikrodalga Kurutucular .....	32
3.3.5. Bantlı Kurutucular .....	33
3.3.6. Kızılötesi (Radyant) Kurutucular .....	33
3.3.7. Pnömatik (Flaş) Kurutucular .....	33
3.3.8. Dondurarak Kurutma.....	34
3.3.9. Silindirik Kurutucular.....	34
3.3.10. Akışkan Yataklı Kurutucular.....	34
BÖLÜM 4 .....	35
AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMLERİ.....	35
4.1. AKIŞKANLAŞMA TANIMI VE AKIŞKAN YATAK .....	35
4.2. AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU TİPLERİ .....	38
4.2.1. Geleneksel Akışkan Yataklı Kurutucular .....	38
4.2.1.1. Yığın Tip Akışkan Yataklı Kurutucu.....	38
4.2.1.2. Yarı Zamanlı Akışkan Yataklı Kurutucu .....	39
4.2.1.3. Tam Zamanlı Akışkan Yataklı Kurutucu.....	40
4.2.2. Farklı Tipteki Akışkan Yataklı Kurutucular.....	40
4.2.2.1. Kademeli ve Çok Süreçli Akışkan Yataklı Kurutucular.....	41
4.2.2.2. Hibrid Akışkan Yataklı Kurutucular.....	41
4.2.2.3. Titreşimli Akışkan Yataklı Kurutucular .....	42
4.2.2.4. Püskürtmeli Akışkan Yataklı Kurutucular .....	42
4.2.2.5. Çevrimli Akışkan Yataklı Kurutucular.....	43
4.2.2.6. Karıştırıcı Akışkan Yataklı Kurutucular.....	44
4.2.2.7. Daldırmalı Isı Değiştiricili Akışkan Yataklı Kurutucular.....	45
4.2.2.8. Isı Pompalı Akışkan Yataklı Kurutucular.....	46
BÖLÜM 5 .....	48
DENEYSEL OLARAK İNCELENEN AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMİNİN TANITIMI.....	48
5.1. ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU .....	48
5.2. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ ÇALIŞMA MODU .....	50

	<u>Sayfa</u>
5.3. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU.....	53
5.4. HAVALI GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU.....	54
5.5. TÜMLEŞİK ÇALIŞMA MODU.....	56
BÖLÜM 6 .....	59
MATERYAL VE METOD .....	59
6.1. ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ.....	59
6.2. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ .....	62
6.3. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ.....	67
6.4. HAVALI GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ.....	67
6.5. TÜMLEŞİK ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ.....	69
6.6. BELİRSİZLİK ANALİZİ.....	69
BÖLÜM 7 .....	71
DENEYSEL ANALİZ .....	71
7.1. ISI POMPALI ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ.....	71
7.2. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ .....	76
7.3. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ .....	82
7.4. HAVALI GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ .....	86
7.5. TÜMLEŞİK ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ.....	92
7.6. BELİRSİZLİK ANALİZİNİN SONUÇLARI.....	101
BÖLÜM 8 .....	103
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	103
8.1. SONUÇLAR .....	103
8.2. ÖNERİLER .....	106

	<b><u>Sayfa</u></b>
KAYNAKLAR .....	108
EK AÇIKLAMALAR A. DENEYSEL SİSTEMİN FOTOĞRAFLARI .....	115
ÖZGEÇMİŞ .....	118

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Nazghelichi vd. tarafından incelenen AYK. ....	4
Şekil 2.2. Soponronnarit vd. tarafından incelenen AYK .....	5
Şekil 2.3. Isı geri kazanımlı akışkan yataklı sürekli kurutucu .....	6
Şekil 2.4. Akışkan yatakta fındık kavurma için tasarlanan ve incelenen AYK. ....	6
Şekil 2.5. Atık çamurun kurutulmasında kullanılan AYK.....	7
Şekil 2.6. Buğday kurutulmasında kullanılan AYK.....	8
Şekil 2.7. Endüstriyel ölçekli yığın tipi AYK.....	8
Şekil 2.8. Tane mısır kurutulmasında kullanılan mikrodalga destekli AYK.....	9
Şekil 2.9. Birleşik mikrodalga AYK.....	10
Şekil 2.10. Mikrodalga destekli bir AYK .....	10
Şekil 2.11. Kuş biberlerinin kurutulmasında kullanılan AYK.....	11
Şekil 2.12. Isı pompalı elma kurutma fırını .....	11
Şekil 2.13. Isı pompalı portakal kabuğu kurutma fırını .....	12
Şekil 2.14. Farklı atmosferik şartlarda incelenen ısı pompalı kurutucu.....	13
Şekil 2.15. Isı pompalı PID kontrollü fındık kurutucusu. ....	14
Şekil 2.16. Isı pompalı elbise kurutucusu .....	15
Şekil 2.17. Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kırmızıbiber kurutma fırını.....	15
Şekil 2.18. Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırını.....	16
Şekil 2.19. Isı pompalı ve güneş enerjili kurutucu.....	17
Şekil 2.20. Güneş enerjili ve ısı pompalı kivi kurutucusu .....	18
Şekil 2.21. Güneş enerjili elma kurutma fırını.....	18
Şekil 2.22. Fotovoltaik ve termal güneş enerjili domates kurutucusu .....	19
Şekil 4.1. Akışkan yatak için farklı yatak rejimleri .....	37
Şekil 4.2. Tipik bir akışkan yataklı kurutucu .....	38
Şekil 4.3. Yığın tipi akışkan yataklı kurutucu.....	39
Şekil 4.4. Yarı zamanlı akışkan yataklı bir kurutucu. ....	39
Şekil 4.5. Tam zamanlı akışkan yataklı kurutucu. ....	40
Şekil 4.6. Hibrid siklon akışkan yataklı kurutucu. ....	41
Şekil 4.7. Titreşimli akışkan yataklı bir kurutucu .....	42

Şekil 4.8. Püskürtmeli akışkan yataklı bir kurutucu .....	43
Şekil 4.9. Çevrimli akışkan yataklı bir kurutucu.....	44
Şekil 4.10. Karıştırıcı tip akışkan yataklı kurutucu.....	45
Şekil 4.11. Daldırmalı ısı değiştiricili bir akışkan yataklı kurutucu .....	46
Şekil 4.12. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu .....	47
Şekil 5.1. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu .....	49
Şekil 5.2. Isı pompalı çalışma modu için kontrol sistemi akış diyagramı.....	50
Şekil 5.3. Parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucu.....	51
Şekil 5.4. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için kontrol sistemi akış diyagramı.....	52
Şekil 5.5. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu. ....	53
Şekil 5.6. Isı pompalı ve parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için akış diyagramı .....	54
Şekil 5.7. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu .....	55
Şekil 5.8. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu için akış diyagramı.....	56
Şekil 5.9. Havalı güneş kolektörlü, parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu .....	57
Şekil 5.10. Tümleşik çalışma modu için akış diyagramı .....	58
Şekil 6.1. Isı pompalı çalışma modu için termodinamik akış diyagramı .....	59
Şekil 6.2. Parabolik oluklu kolektörün kenar açısı uzunlukları .....	63
Şekil 6.3. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için termodinamik akış diyagramı .....	64
Şekil 6.4. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu için termodinamik akış diyagramı .....	67
Şekil 7.1. Nem içeriklerinin zamana göre değişimi .....	71
Şekil 7.2. Nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.....	72
Şekil 7.3. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi .....	73
Şekil 7.4. Atılan ısı miktarı ve hava hızının kurutma süresine göre değişimi .....	74
Şekil 7.5. Tüm sistem performans katsayısı (COPTs) değerinin kurutma süresine göre değişimi.....	75
Şekil 7.6. Ekserji kaybı ve veriminin kurutma süresine göre değişimi.....	76
Şekil 7.7. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.....	77
Şekil 7.8. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi .....	78
Şekil 7.9. IPK ve sistem verimi değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.....	79

## Sayfa

Şekil 7.10. Hava hızı ve pompa debisinin kurutma süresine göre değişimi .....	80
Şekil 7.11. Isıtma santrali için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi.....	81
Şekil 7.12. Akışkan yatak için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi .....	82
Şekil 7.13. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.....	83
Şekil 7.14. Kurutma havası sıcaklıklarının kurutma süresine göre değişimi .....	84
Şekil 7.15. Sistem verimi, IPK ve COPts değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.....	85
Şekil 7.16. Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi .....	86
Şekil 7.17. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.....	87
Şekil 7.18. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi .....	88
Şekil 7.19. IPK ve COPts değerlerinin kurutma süresine göre değişimi .....	89
Şekil 7.20. Sistem veriminin kurutma süresine göre değişimi.....	89
Şekil 7.21. Atılan ısı miktarı ve kurutma havası hızının kurutma süresine göre değişimi.....	91
Şekil 7.22. Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi .....	92
Şekil 7.23. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.....	93
Şekil 7.24. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi .....	94
Şekil 7.25. IPK ve COPts değerlerinin kurutma süresine göre değişimi .....	95
Şekil 7.26. Sistem verimi değerlerinin kurutma süresine göre değişimi .....	95
Şekil 7.27. Atılan ısı miktarı ve kurutma havası hızının kurutma süresine göre değişimi.....	97
Şekil 7.28. Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi .....	98
Şekil Ek. A.1. Akışkan yatak imalatı .....	116
Şekil Ek. A.2. Deneysel sistem .....	117



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Değişik kurutucu tipleri için kurutma etkinlikleri .....	25
Çizelge 3.2. Bazı gıda ürünlerinin nem değerleri ve kurutma sıcaklıkları.....	27
Çizelge 3.3. Gıdaların kurutulmasında kullanılan bazı kurutucuların özellikleri .....	28
Çizelge 7.1. Sisteme ait bazı analizlerin sonuçları.....	999
Çizelge 7.2. Literatürdeki bazı COP değerlerinin karşılaştırılması .....	100
Çizelge 7.3. Çalışmada kullanılan cihazların teknik özellikleri ve belirsizlikleri....	102

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $A$  : kolektör yüzey alanı (m<sup>2</sup>)
- $C_p$  : özgül ısı (kJ/kgK)
- $C_r$  : konsantrasyon oranı
- $COP_{ip}$  : ısı pompası sistemi için performans katsayısı
- $COP_{ts}$  : tüm sistem için performans katsayısı
- $e$  : ekserji (kJ/kg)
- $h$  : entalpi (kJ/kg)
- $I_t$  : toplam güneş radyasyonu (W/m<sup>2</sup>)
- $\dot{m}$  : kütleli debi (kg/s)
- $\dot{m}_d$  : kuruma miktarı (g)
- $MC$  : nem içeriği (g su/g kuru madde)
- $MR$  : nem oranı
- $M$  : herhangi bir zamandaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
- $M_e$  : denge nem içeriği (g su/g kuru madde)
- $M_0$  : başlangıç nem içeriği (g su/g kuru madde)
- $M_i$  : kurutulan ürünün başlangıç kütlesi (g)
- $M_i$  : kurutulmuş halde ürün kütlesi (g)
- $SMER_{ts}$  : tüm sistem özgül nem çekme oranı (g/Wh)
- $\dot{Q}$  : atılan ısı miktarı (kJ/s)
- $T$  : sıcaklık (K)
- $V$  : hava hızı (m/s)

$\dot{W}$  : harcanan güç (kW)  
 $\eta$  : verim (%)  
 $\phi$  : kenar açısı (°)

## KISALTMALAR

AYK : akışkan yataklı kurutucu  
aykg : akışkan yataklı kurutucu girişi  
aykç : akışkan yataklı kurutucu çıkışı  
çev : çevre  
evap : evaporatör  
f : fan  
h : hava  
ıd : ısı değiştirici  
IPK : ısıtma performans katsayısı  
komp : kompresör  
kond : kondenser  
p : pompa  
PID : oransal-integral-türevsel  
sant : santral  
SMER : özgül nem çekme oranı  
sgh : sistem giriş havası

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Kurutma; bir madde içinde bulunan sıvının kontrollü veya kontrolsüz yöntemler kullanılarak uzaklaştırılmasıdır. Teknik kurutmada, kuruma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem değişik metotlarla alınır. Bu nedenle kurutma, kuruyacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine düşürülmesini sağlayan bir süreç olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, buharlama vb.) ünitelerin bütününe de kurutma sistemi denir [1].

Geçmişten günümüzde kurutma işlemi endüstriyel ihtiyaçları karşılayacak biçimde gelişmiş ve kendisine geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bugün endüstriyel uygulamalarda kurutmanın kullanılmadığı alan neredeyse yok gibidir. Kurutma işlemi yaygın olarak gıda, kimya, tekstil, deri ve kereste sanayi gibi endüstri dallarında uygulanmaktadır.

Bu kullanım alanlarını biraz daha irdelemek gerekirse kurutma işlemi gıda maddelerinin uzun süre korunmasında, tarımsal ürünlerin depolama sürelerinin uzatılmasında, orman ürünlerinin kalitesinin ve işlenebilme özelliğinin iyileştirilmesinde, kimyasal ürünlerin kurutulması neme karşı korunmasında, silah sanayinde barutun kurutulmasında kullanılmaktadır.

Bütün bu sıralanan uygulama alanları arasında kurutma işleminin gıda maddelerine uygulanmasının en önemli nedeni bu ürünlerin içerilerinde oluşabilecek mikotoksinler ve küfleri önlemektir. Kurutma işlemi ile mikotoksinlerin ve küflerin oluşumunu önleyecek en az su aktivitesi değerinin altına düşülmektedir [2].

Kurutma işlemi endüstriyel açıdan birçok faydayı beraberinde getirmesine rağmen, kullanılan sistemlerin yüksek enerji tüketimleri bu sistemlerin enerji verimliliği açısından geliştirilmesini zorunlu ve alternatif enerji kaynaklarına entegrasyonunu cazip hale getirmiştir.

Bu nedenle günümüze kadar gerek endüstri kuruluşları gerek üniversitelerde enerji verimliliği yüksek, ilk yatırım ve işletme maliyetleri düşük, kullanımı karmaşık olmayan ve çevre dostu kurutucu tasarımları üzerine çalışmışlardır.

Bu tasarımlardan en başarılıları güneş enerjili kurutuculardır. Bu durumun başlıca nedenleri; basit yapıdaki güneş enerjisi sistemlerinden bile elde edilecek kurutma havası sıcaklıklarının birçok ürünün kurutulması için uygun aralıklarda olması, kullanılan sistemlerin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması, tarım ürünlerinin yetişmesinin yaz aylarına gelmesi ve bu dönemde güneş ışınımının oldukça verimli olması, güneş enerjisinin çevreci ve bedava bir enerji kaynağı olmasıdır.

Yukarıda sayılan tüm bu olumlu yönlerine karşın güneş enerjili kurutucuların, kurutma prosesini engelleyebilecek bazı dezavantajları da vardır. Bunların başında güneş enerjisinin sürekli bir enerji kaynağı olmaması gelmektedir. Bu durum özellikle endüstriyel alanda yapılacak kurutma uygulamaları için ciddi bir problem oluşturmaktadır.

Yukarıda sayılan avantaj ve dezavantajlar bir arada değerlendirildiğinde güneş enerjisinin kurutma sistemlerinde tek başına kullanımının birçok uygulama için yeterli olmadığı görülmektedir. Bu durum güneş enerjisinin ikincil enerji kaynağı olarak kurutma prosesini desteklediği sistemleri ortaya çıkarmıştır.

Bu sistemlerden biri güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutuculardır. Bu tip kurutucularda kurutma işlemi için gereken sıcaklık güneş ışınımının yeterli olduğu zamanlarda sisteme entegre edilmiş olan güneş enerjisi sisteminden veya sistemlerinden elde edilirken, güneş ışınımının yetersiz olduğu günlerde veya gece

saatlerinde ısı pompası sisteminden elde edilmektedir. Bu sayede kurutma işleminin kesintisiz olarak sürdürülmesi sağlanmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı; akışkan yataklı kurutma sistemlerinde genel olarak kullanılan elektrikli ısıtıcılar veya mikrodalga enerjisi yerine kullanılabilir, alternatif enerji kaynağı ile desteklenmiş, düşük enerji tüketimine sahip bir kurutucu tasarlamak, imal etmek ve deneysel olarak analizini gerçekleştirmektir. İmal edilen kurutucu farklı çalışma şartlarında test edilmiştir. Her bir çalışma koşulu için termodinamiğin birinci ve ikinci kanun analizleri ile sistem performansları değerlendirilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

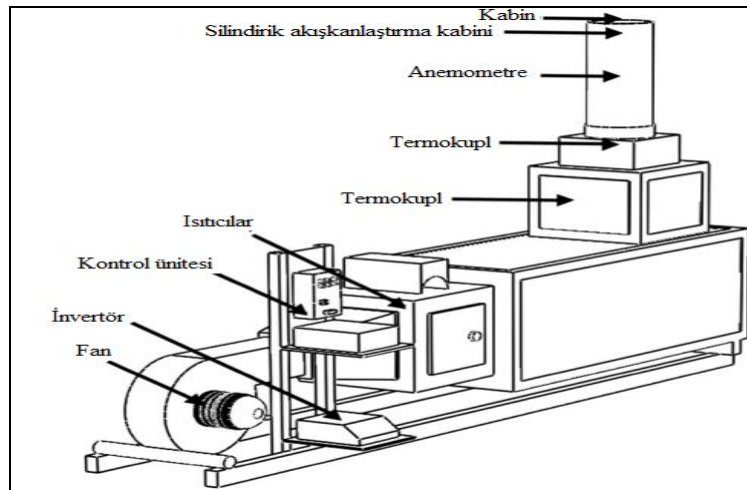
Çalışmada, kurutucu sistem olarak akışkan yatağın seçilmesinin nedeni; bu tip kurutucularda kurutma havasının ürünün her bir noktasına homojen olarak dağılması ve bu sayede yüksek bir kurutma performansına sahip olması olarak açıklanabilir. Ayrıca bu tip kurutucular, ülkemizde bol miktarlarda bulunan bakliyat, tahıl gibi ürünlerin kurutulmasında da çok kullanışlıdır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI

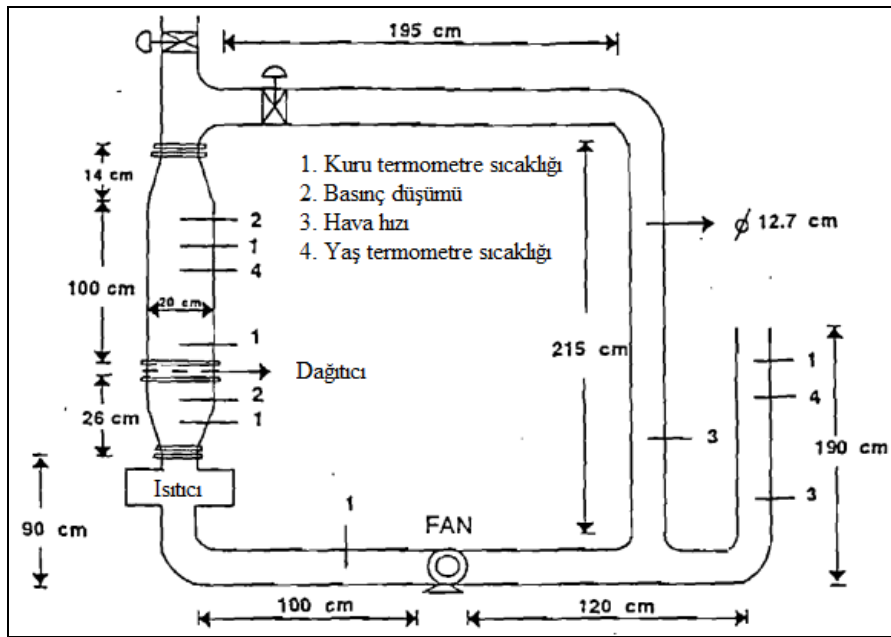
Akışkan yataklı kurutucular (AYK) üzerine mevcut literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar genel olarak sistemin kurutma performansını irdeleyen, akışkan yatakta kütle ve ısı transferini inceleyen çalışmalardır. Sistemde güneş enerjisi destekli ısı pompası sisteminden yararlanılacaktır. Bu nedenle AYK'ların yanında ısı pompalı ve güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutuculara yönelik yapılmış olan çalışmalardan bazıları incelenmiş ve aşağıda verilmiştir.

Nazghelichi vd. yaptıkları çalışmada, havuç küplerinin kurutulmasında akışkan yatağın enerji ve ekserji analizlerini araştırmışlardır. Kurutma deneyleri 50, 60 ve 70°C giriş havası sıcaklığında, yatak derinlikleri 30, 60 ve 90 mm ve kare-küp havuç ölçüleri 4, 7 ve 10 mm ölçülerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar faydalı enerji ve faydalı enerji oranının sırasıyla 0,105 – 1,949 kJ/s ve 0,074 – 0,486 arasında değiştiğini göstermiştir. Ekserji kaybı ve ekserji verimi sırasıyla 0,206 – 1,612 kJ/s ve 0,103 – 0,707 değerleri arasında bunmuştur. Şekil 2.1’de kullanılan kurutucu görülmektedir [3].



Şekil 2.1. Nazghelichi vd. tarafından incelenen AYK.

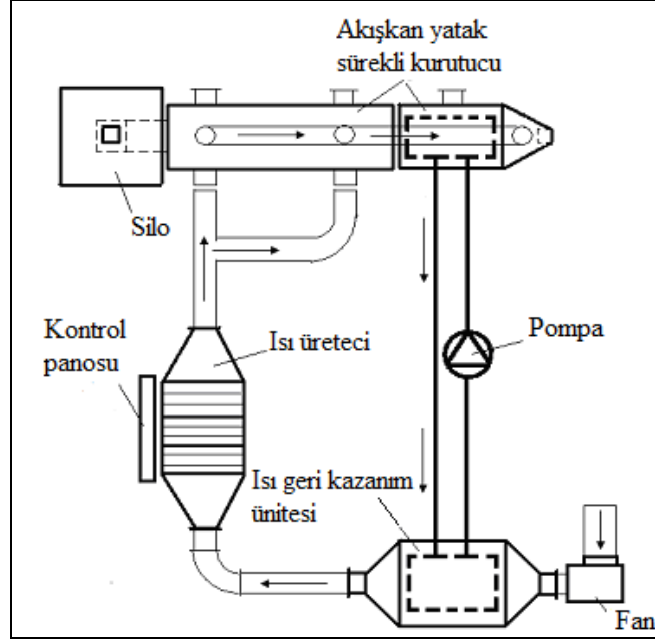
Soponronarit vd. çeltiğin akışkanlaştırma tekniği ile kurutulması üzerine bir fizibilite çalışması yapmışlardır. Çalışmada, ürün kalitesini etkileyen işletme parametreleri, kurutma kapasitesi ve enerji tüketimi incelenmiştir. Çalışmada geliştirilen bir matematik modeli ile optimum işletme parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler hava geri dönüşüm oranı için % 80, hava hızı için 4,4 m/s yatak kalınlığı için 9,5 cm ve özgül hava debisi için 0,1 kg/s-kg kuru madde olarak belirlenmiştir. Şekil 2.2’de Soponronarit vd. tarafından incelenen AYK sistemi görülmektedir [4].



Şekil 2.2. Soponronarit vd. tarafından incelenen AYK.

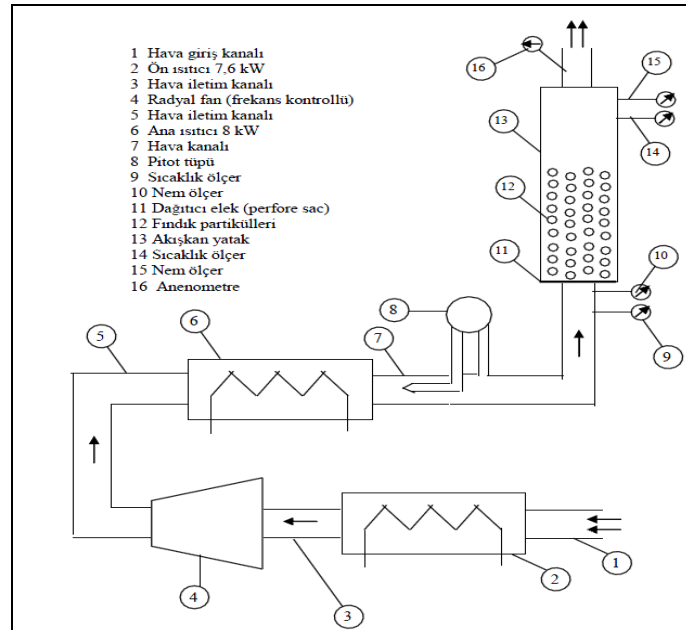
Ersöz, doktora çalışmasında tuz kurutulması için ısı geri kazanımlı akışkan yataklı sürekli kurutucunun tasarımını ve deneysel analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada ısı geri kazanımlı akışkan yataklı sürekli kurutucu, akışkan yataklı sürekli kurutucunun deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler, her iki kurutucuda da 4920 W, 7380 W ve 10250 W elektrikli ısıtıcı güçlerinde yapılmıştır. Her iki kurutucuda da eşit miktarda enerji kullanılmasına karşın ısı geri kazanımlı akışkan yataklı sürekli kurutucu ile akışkan yataklı sürekli kurutucudan daha fazla kurutma havası sıcaklığı elde edilmiştir. Şekil 2.3’te deneysel sistem görülmektedir [5].





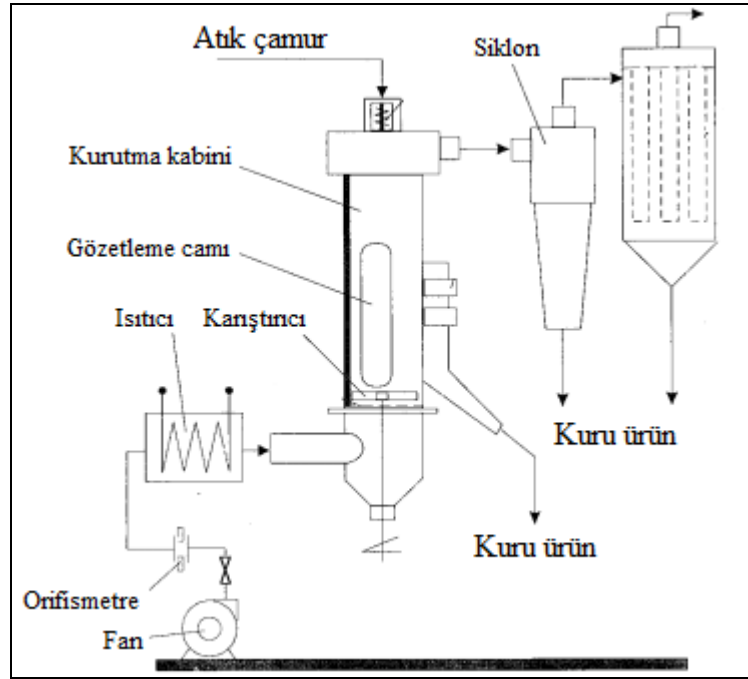
Şekil 2.3. Isı geri kazanımlı akışkan yataklı sürekli kurutucu.

Güney, akışkan yatakta fındık kavurma işlemini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Çalışmanın amacı kavurma işlemi esnasında oluşan gelen iç fındık partiküllerinin kuruma özelliklerinin incelenmesi ve diğer sistemlere göre nasıl bir etki gösterdiğinin belirlenmesidir. Şekil 2.4'te deneysel sistem görülmektedir [6].



Şekil 2.4. Akışkan yatakta fındık kavurma için tasarlanan ve incelenen AYK.

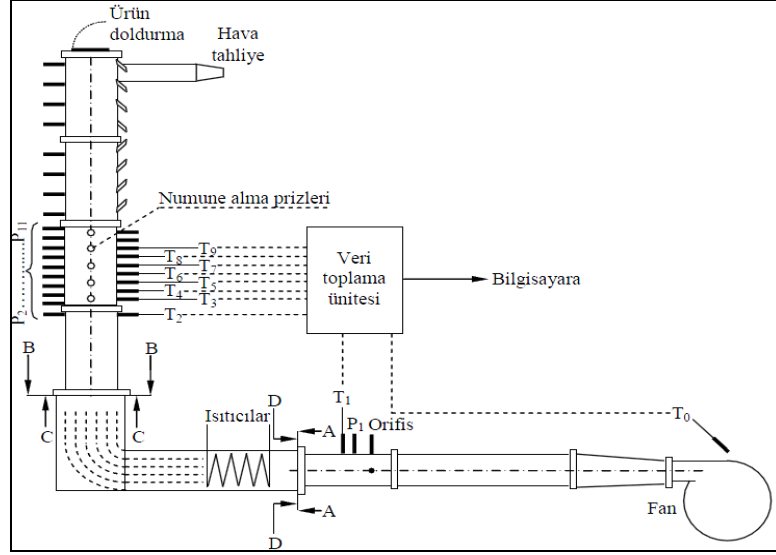
Adamiec yaptığı çalışmada, atık çamurların karıştırıcılı akışkan yataklı bir kurutucuda kurutulmasını incelemiştir. Çalışmada iki farklı atık tipinin kurutulması araştırılmıştır. Karıştırıcılı akışkan yataklı bir kurutucuda kurutulan çamurun laboratuvar deneyleri akışkan yatak hidrodinamiğini, etkilerini ve çamur kurutulmasının avantajlarını göstermiştir. Deneysel sistem Şekil 2.5'te verilmiştir [7].



Şekil 2.5. Atık çamurun kurutulmasında kullanılan AYK.

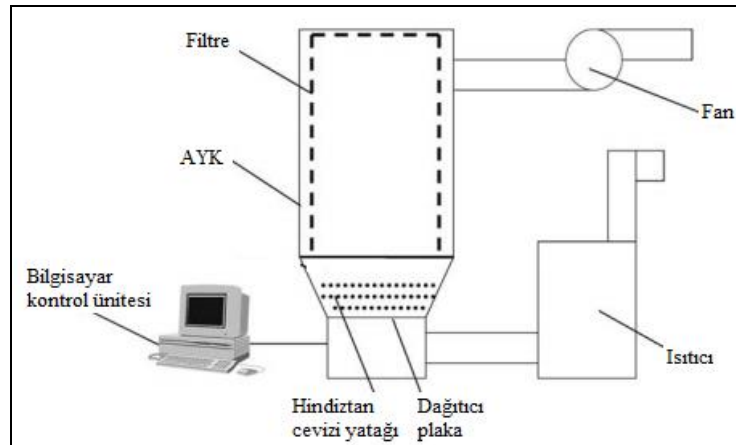
Erçetin doktora çalışmasında, buğdayın kurutulması işleminin, geleneksel yöntemler yerine akışkan yataklı kurutucuda gerçekleştirilmesi incelemiştir. Bu amaçla kurulan bir akışkan yataklı kurutucuda, buğdayın kuruma karakteristiğine çeşitli parametrelerin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, mevcut matematik modeller ile karşılaştırılmıştır. Akışkan yatağın karakteristiklerini belirlemek üzere, yatağın farklı yüksekliklerine sıcaklık, basınç ve nemölçerler yerleştirilmiş ve bunlar bir veri toplama sistemine bağlanmıştır. Ayrıca, yatağın çeşitli yüksekliklerinden alınan buğday numunelerinde de nem miktarı tayini yapılmıştır. Kurutma esnasında, buğdayın kuruma hızına ve yatağın enerji sarfiyatına etki eden, kurutucu ortamın sıcaklığı, bağıl nemi ve hızı, akışkan yatağa giren ürünün miktarı ve nem miktarı gibi parametreler kontrol edilmiştir. Bu parametrelerin, buğdayın kuruma karakteristiğine

ve enerji sarfiyatına etkileri araştırılmıştır. Bu enerji tüketimi, bulgur üretiminde kullanılan geleneksel buğday kurutma sistemlerinin enerji tüketimi ile kıyaslanmıştır. Söz konusu çalışmaya ait deneysel sistem Şekil 2.6’da verilmiştir [8].



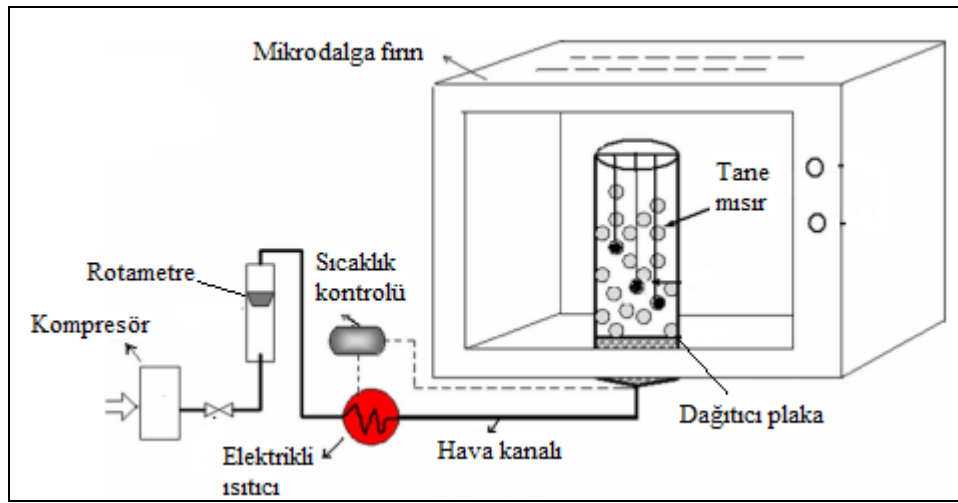
Şekil 2.6. Buğday kurutulmasında kullanılan AYK.

Niamnuay ve Devahastin yaptıkları çalışmada, endüstriyel ölçekli yığın tipi akışkan yataklı bir kurutucuda kıyılmış Hindistan cevizinin kurutma kinetiklerini ve kalitesini araştırmışlardır. Çalışmada kurutma kinetikleri üzerinde çeşitli işletme şartlarının etkileri, ürün kalitesi üzerine de kurutulmuş ürünün rengi ve yüzey yağ içeriği incelenmiştir. İmal edilen deneysel sisteme ait şematik görünüm Şekil 2.7’de verilmiştir. [9].



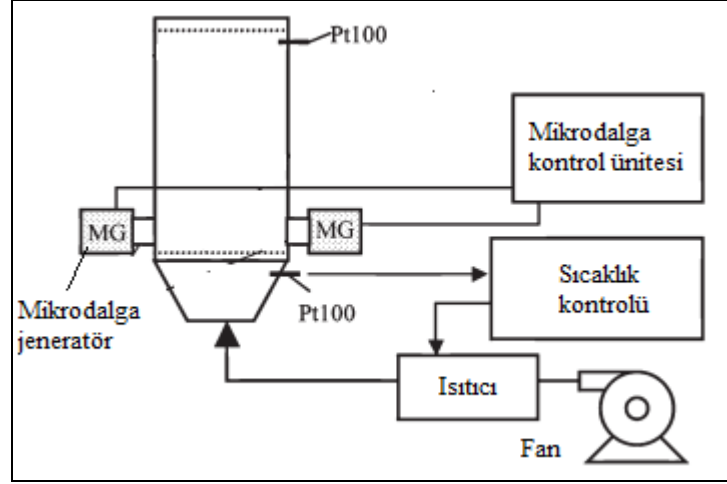
Şekil 2.7. Endüstriyel ölçekli yığın tipi AYK.

Momenzadeh vd. mikrodalga destekli akışkan yataklı bir kurutucuda tane mısır kurutulmasını yapay sinir ağları kullanarak teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyle dört farklı hava sıcaklığında (30, 40, 50 ve 60°C) ve beş farklı mikrodalga güçte (180, 360, 540, 720 ve 900 W) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kurutma süresinin tahmini için yapay sinir ağları uygulaması incelenmiştir. Model için giriş parametreleri olarak mikrodalga gücü, kurutma havası sıcaklığı ve nem içeriği değerleri kullanılmıştır. İmal edilen mikrodalga destekli akışkan yataklı kurutucu Şekil 2.8’de gösterilmiştir [10].



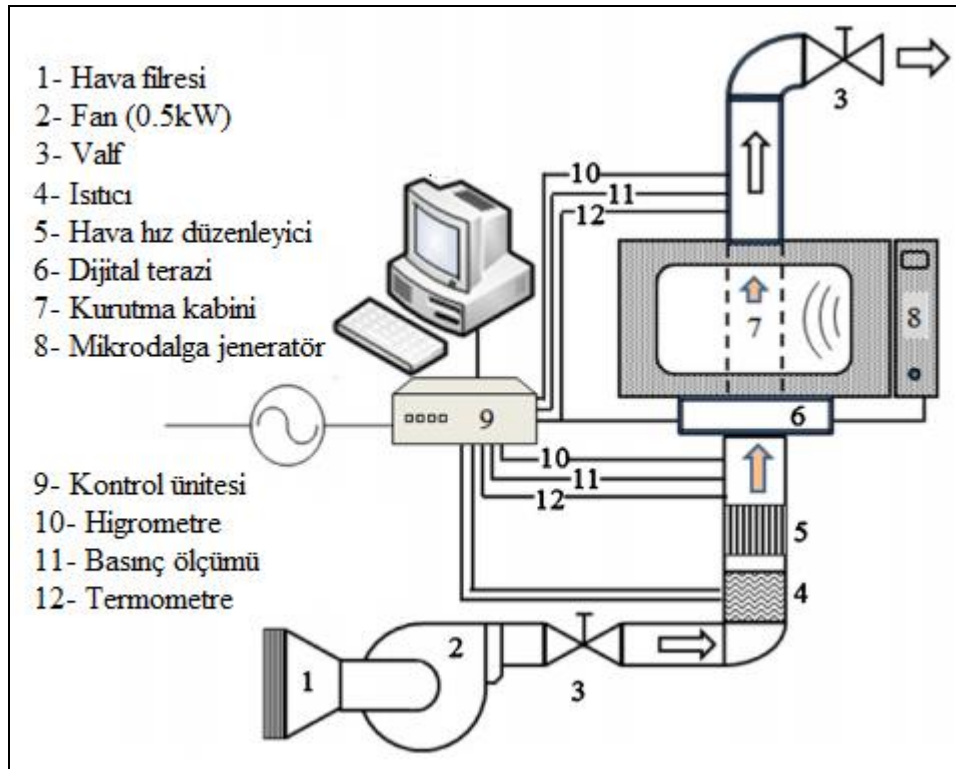
Şekil 2.8. Tane mısır kurutulmasında kullanılan mikrodalga destekli AYK.

Stanislowski yaptığı çalışmada, doğranmış havucun kurutulmasını laboratuvar tipi mikrodalga akışkan yataklı kurutucusunda ve standart akışkan yataklı kurutucuda incelemiştir. Çalışmada mikrodalga akışkan yataklı kurutucuda kurutma süresi, standart akışkan yataklı kurutucuya göre 2–5 kat daha kısa olarak belirlenmiştir. Mikrodalga akışkan yataklı kurutucu için kurutma verimi daha yüksek olarak elde edilmiştir. Deneysel sistem Şekil 2.9’da verilmiştir [11].



Şekil 2.9. Birleşik mikrodalga AYK.

Askari vd. mikrodalga destekli bir akışkan yataklı kurutucu tasarlamış ve bu kurutucuda elma küplerinin kurutulmasını incelemişleridir. Kombine mikrodalga destekli akışkan yataklı kurutucuda kurutulan elma küplerinde ısı ve kütle transferinin tanımlanmasında bir model geliştirilmiştir. Tasarlanan ve imal edilen mikrodalga destekli AYK Şekil 2.10'da verilmiştir [12].



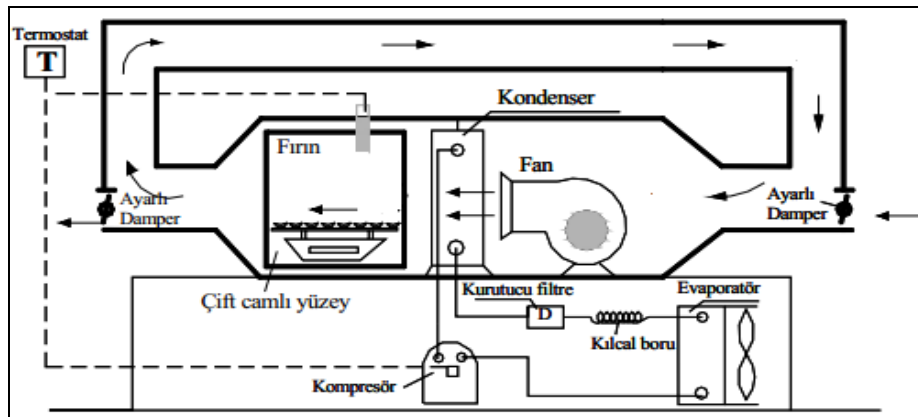
Şekil 2.10. Mikrodalga destekli bir AYK.

Tasirin vd. akışkan yataklı bir kurutucuda kuş biberinin kurutma kinetiklerini incelemişleridir. Kurutma deneyleri 2 - 4 cm yatak derinliklerinde, 0,85, 0,97 ve 1,09 m/s hava hızlarında ve 50, 60, 70°C sıcaklık şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma sonrası yapılan karşılaştırmalar, akışkan yatakta kurutulan biberin, güneş altında kurutulandan biberden daha iyi bir kaliteye sahip olduğunu göstermiştir. İmal edilen deneysel sistem Şekil 2.11’de verilmiştir [13].



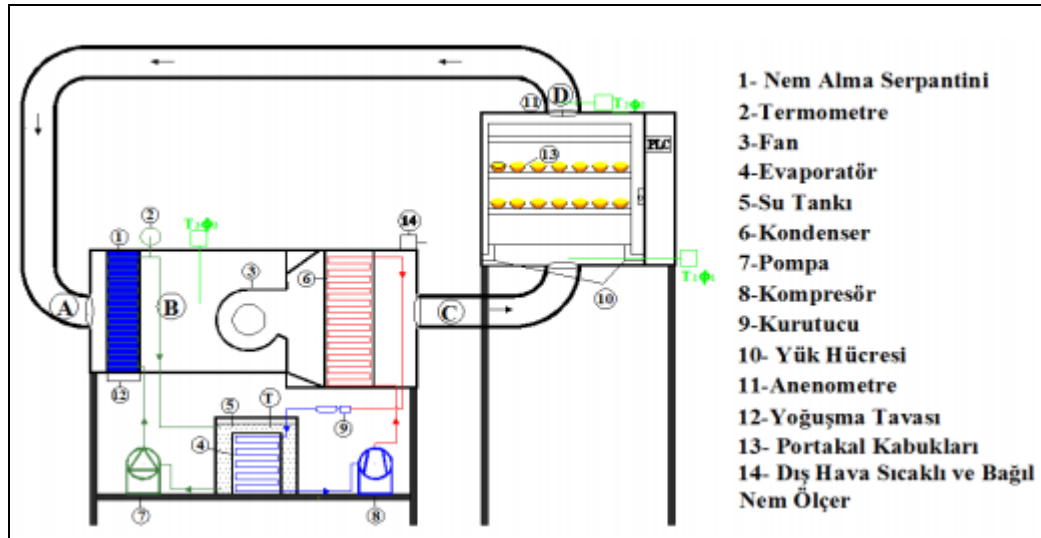
Şekil 2.11. Kuş biberlerinin kurutulmasında kullanılan AYK.

Ceylan vd. yaptıkları çalışmada, ısı pompalı bir kurutucuyu elma kurutulmasında deneysel olarak incelemişlerdir. 4 mm kalınlığında dilimlenmiş elmalar 40 °C’de ortalama % 20 bağıl nemde 2,8 m/s hava hızında 4,8 g su/g kuru madde su oranından 0,18 g su/g kuru madde su oranına kadar üç buçuk saatte kurutulmuştur. Elmaların ulaşılan son kuru kütledeki su aktivitesi ise 0,65 olarak ölçülmüştür. Isı pompalı kurutucu Şekil 2.12’de verilmiştir [14].



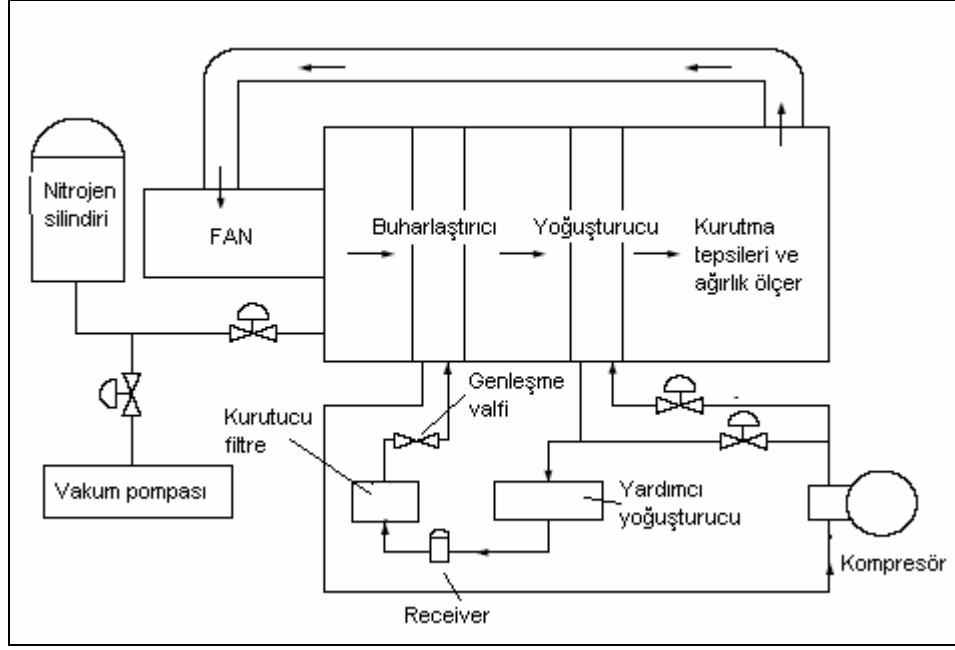
Şekil 2.12. Isı pompalı elma kurutma fırını.

Aktaş vd. çalışmalarında, ısı pompalı bir kurutucuda deneysel olarak portakal kabuğu kurutulmasını incelemişlerdir. Kurutucuda kurutma havası için istenilen bağıl nem, sıcaklık ve hız değerleri Programlanabilir Lojik Kontrolör (PLC) ekranından girilmiş ve set değerlerine göre kontrol edilmiştir. Denejde nem alma sistemi kullanılarak üfleme havası bağıl nemi %14 ila %7 aralığında tutulmuştur. Denej 45 °C kurutma havası sıcaklığı ve 1 m/s hava hızında yapılmıştır. Denej sonucunda tüm sistem için performans katsayısı ( $COP_{ts}$ ) değeri ortalama 3,83 olarak hesaplanmıştır. Portakal kabukları 8 saat 45 dakikada 3 g su/g kuru madde nem miktarından 0,09 g su/g kuru madde nem miktarına kadar kurutulmuştur. Şekil 2.13'te ısı pompalı portakal kabuğu kurutma fırını görülmektedir [15].



Şekil 2.13. Isı pompalı portakal kabuğu kurutma fırını.

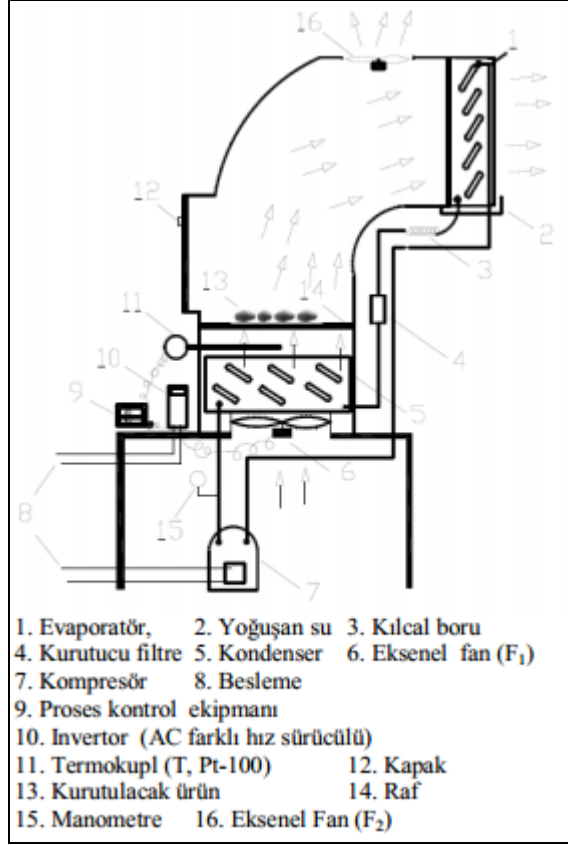
Hawlder vd. tarafından yapılan çalışmada ısı pompalı yiyecek kurutucusunun performansı elma, patates ve tropikal meyve kurutulması için deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma fırını atmosferini değiştirmek için karbondioksit ve nitrojen gazları inert gaz olarak kullanılmıştır. Kurutma kabini üzerine monte edilen bir manometre ile basınç değişimi okunmuştur. Sistemde kullanılan inert gaz hızı mekanik anenometre ile ölçülmüştür. Kurutma sonrası ürünlerin renk, sertlik, gözeneklilik ve tekrar su alma kabiliyetleri kalite testlerinde değerlendirilmiştir. İmal edilen deneysel sistem Şekil 2.14'te verilmiştir [16].



Şekil 2.14. Farklı atmosferik şartlarda incelenen ısı pompalı kurutucu.

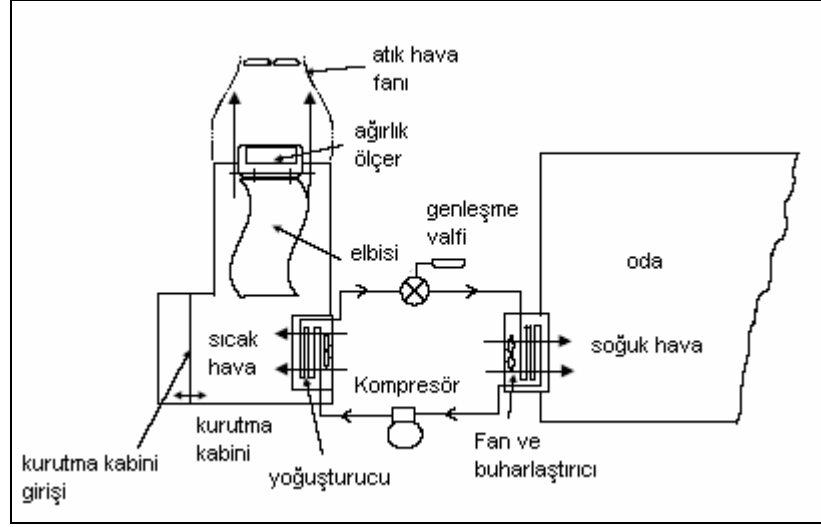
Ceylan ve Aktaş yaptıkları çalışmada, ısı pompalı kurutma fırınında fındık kurutulması deneysel olarak incelemiştir. Kurutma sonrası fındıklar duyusal olarak analiz edilmiş ve nem miktarı kütle ölçüm metodu ile takip edilmiştir. Gerekli ön hazırlık ve son kontrol işlemleri uygulanarak fındıkların kurutma işlemi sonrası kalitelerinin artırılması, üreticilerin ihtiyacı olan ilk yatırım masrafı düşük ve enerji giderleri az olan bu kurutma fırını ile sağlanmıştır. Tasarlanan ve imal edilen ısı pompalı fındık kurutma fırını Şekil 2.15'te verilmiştir [17].





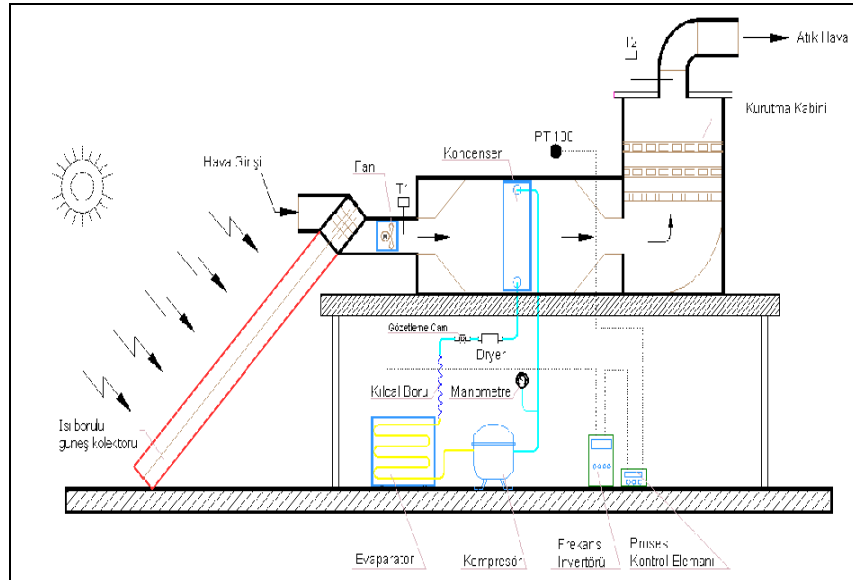
Şekil 2.15. Isı pompalı PID kontrollü fındık kurutucusu.

Ameen ve Bari, nemli bölgeler için ısı pompalı elbise kurutucusunu deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sistem, içerisinde ısı pompası sisteminin yoğuşturucusunu barındıran tahtadan yapılmış bir kurutma odası ve fandan oluşmaktadır. Sistemin buharlaştırıcısı ise soğutmak istenen odaya konulmuştur. Bu şekilde sistem iki amaca uygun bir şekilde tertip edilmiştir. Kurutma odasının en üst kısmı atmosfere açık olup, sıcak ve nemli havanın dışarı atılmasını sağlamıştır. Elbiseler 1 g hassasiyetteki ağırlık ölçer ucundaki askılara takılmış ve ağırlık değişimi göstergeden izlenmiştir. Şekil 2.16’da imal edilen ısı pompalı elbise kurutucusu gösterilmiştir [18].



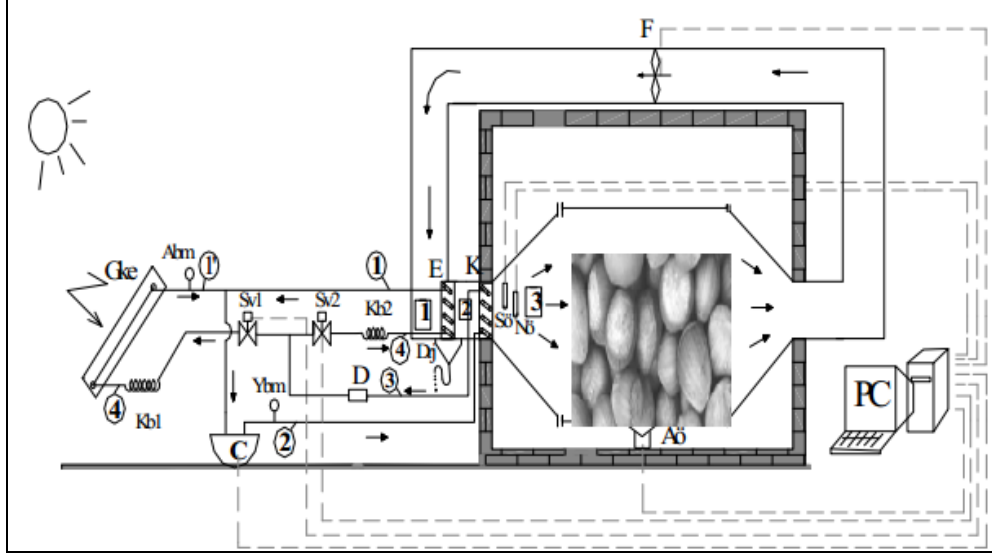
Şekil 2.16. Isı pompalı elbise kurutucusu.

Aktaş yaptığı çalışmada, güneş enerjisi ve ısı pompası destekli bir kurutucuda kırmızıbiber kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Kurutma sisteminde kırmızıbiberler başlangıç nem miktarından (0,914 g su/g yaş madde) son nem miktarına (0,11 g su/g yaş madde) kadar kurutulmuştur. Çalışmada, PID (oransal, integral ve türevsel) kontrollü kurutucuda güneş kolektörü ön ısıtıcı olarak kullanılmıştır. Şekil 2.17’de güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kırmızıbiber kurutma fırını görülmektedir [19].



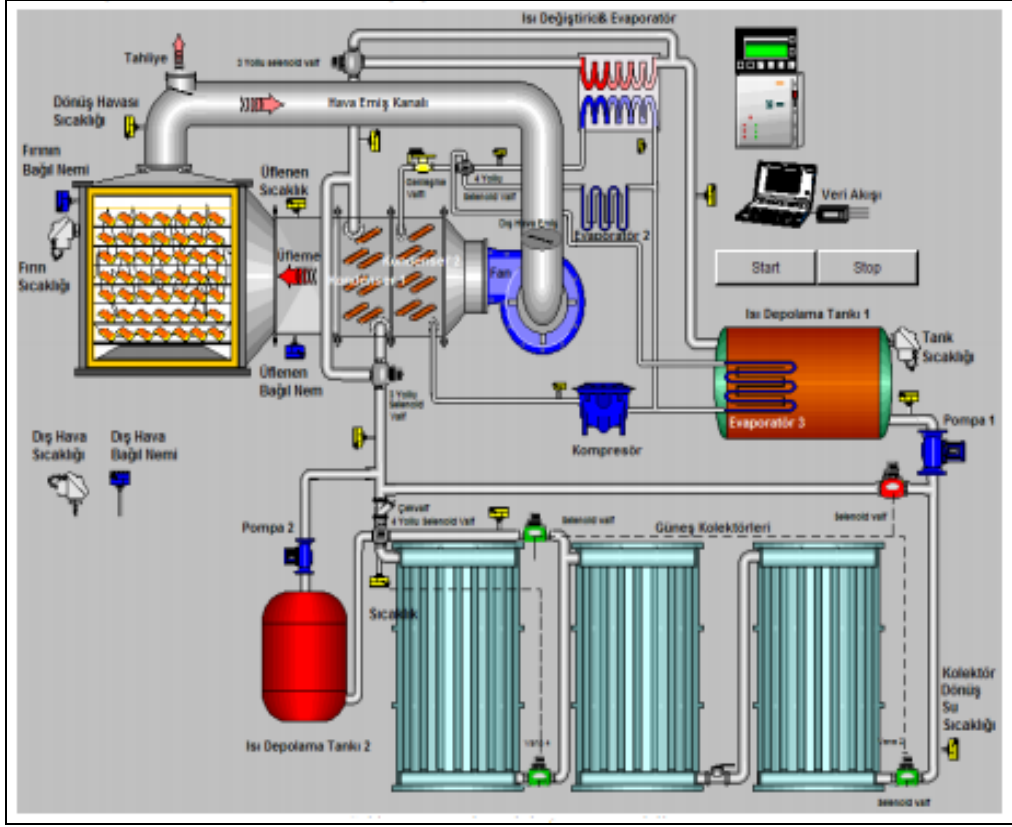
Şekil 2.17. Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kırmızıbiber kurutma fırını.

Aktaş vd. fındık kurutma şartlarını göz önünde bulundurarak ısı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellemesini yapmışlardır. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfiyatı olurken, diğer zamanlarda kurutma işleminin devamlılığının ısı pompası yardımı ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Deneysel sistem Şekil 2.18’de verilmiştir [20].



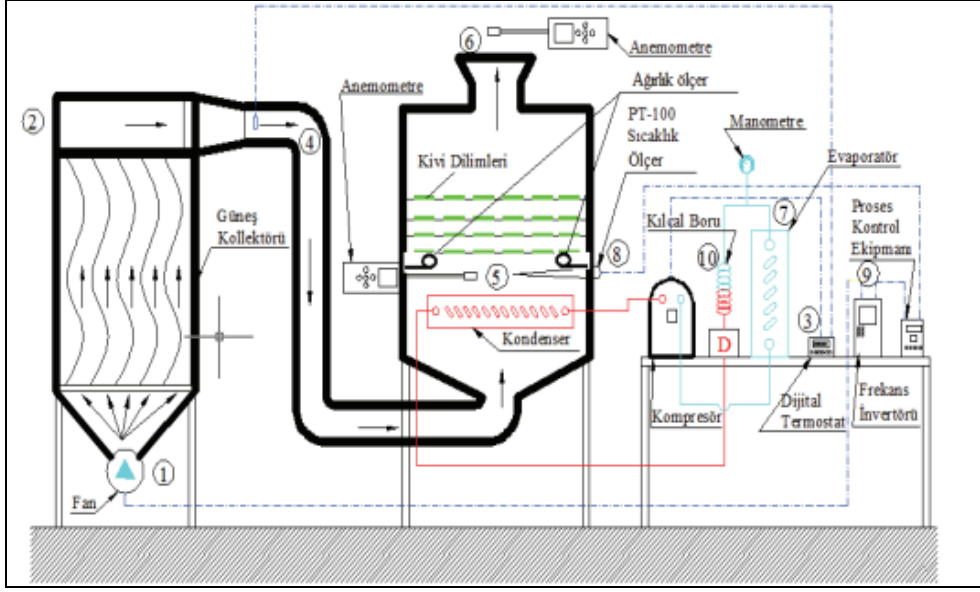
Şekil 2.18. Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırını.

Şevik vd. ısı pompası ve güneş enerjisi destekli ısıtma ve kurutma prosesini modellemişlerdir. Bu sistem tasarımında enerji ihtiyacı güneş enerjisi ve ısı pompası ile sağlanmıştır. Daha az enerji girdisi ile ve daha kaliteli olarak kurutulmuş ürün, oransal-integral-türevsel (PID) kontrol tasarımı kullanılarak sağlanabilecektir. Bu sistem dizaynının enerji analizi yapılmıştır. Deneysel sistem Şekil 2.19’da verilmiştir [21].



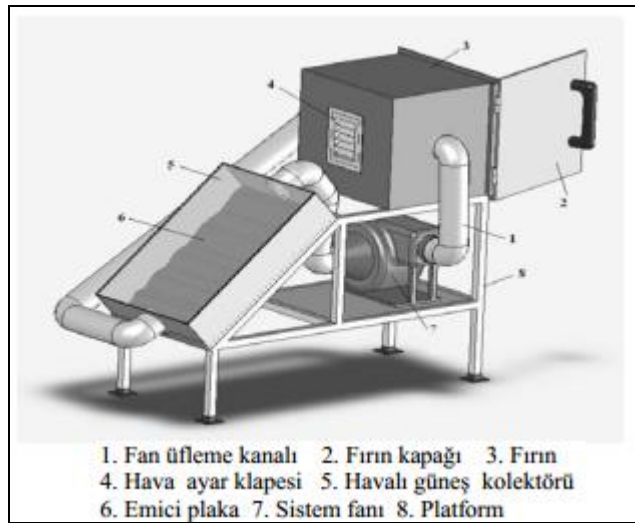
Şekil 2.19. Isı pompalı ve güneş enerjili kurutucu.

Aktaş ve Kara güneş enerjili ve ısı pompalı bir kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve kivi kurutulmuş deneysel olarak incelenmiştir. 5 mm kalınlığında dilimlenmiş kivi dilimleri 6 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 35 °C sıcaklıkta 0,53 g su/g kuru madde, 40 °C sıcaklıkta 0,25 g su/g kuru madde, 45 °C sıcaklıkta 0,14 g su/g kuru madde ve 50 °C sıcaklıkta 0,15 g su/g kuru madde nem miktarına kadar kurutulmuştur. Sistemde için  $COP_{ts}$  değeri ortalama 2.27 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.20’de imal edilen deneysel sistem gösterilmiştir [22].



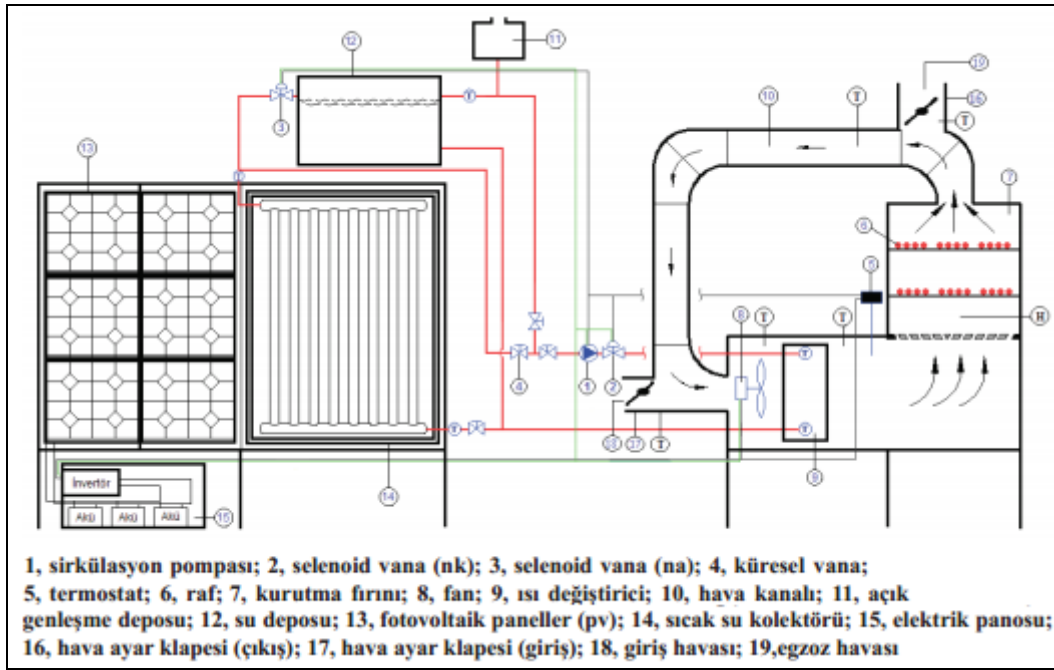
Şekil 2.20. Güneş enerjili ve ısı pompalı kivi kurutucusu.

Ceylan vd. yaptıkları çalışmada, güneş enerjili havalı kolektörlü bir kurutma fırınında elma kurutulması deneysel olarak incelemişlerdir. Kurutma sonrası fiziksel şartlar duyuşal olarak analiz edilmiş ve nem değişimi kütle ölçüm metodu ile takip edilmiştir. Gerekli ön hazırlık ve son kontrol işlemleri uygulanarak elmaların kurutma işlemi sonrası kalitelerinin artırılması, üreticilerin ihtiyacı olan ilk yatırım masrafı düşük ve enerji giderleri az olan bu kurutma fırını ile sağlanmıştır. Şekil 2.21’de bu çalışmada kullanılan kurutucu gösterilmiştir [23].



Şekil 2.21. Güneş enerjili elma kurutma fırını.

Aktaş vd. yaptıkları çalışmada, güneş enerjili 10 kg kapasiteli bir kurutucunun tasarımı, imalatı ve domates kurutularak analizini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen kurutucu farklı şartlarda domates kurutmak için kullanılmıştır. Gerekli olan elektrik ve ısı enerjisi tamamıyla güneş enerjisiyle sağlanmıştır. 5 mm kalınlığında dilimlenmiş domatesler, 16,39 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 0,21 g su/g kuru madde son nem miktarına düşünceye kadar kurutulmuştur. Şekil 2.22’de fotovoltaiik ve termal güneş enerjili domates kurutucusu gösterilmiştir [24].



Şekil 2.22. Fotovoltaiik ve termal güneş enerjili domates kurutucusu.

Yukarıda sıralanan sistemlerin yanında çok farklı kullanım amaçlarına karşılık verebilecek birçok kurutucu tasarlanmıştır. Bu kurutuculardan bazılarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

Oktay ve Hepbaşlı yaptıkları çalışmada, ısı pompası destekli mekanik açık tip bir kurutucu tasarlamış ve bu kurutucunun performansını yün kurutulmasında analiz etmişlerdir. İncelenen kurutucuda özgül nem çekme oranları (SMER) 0,65-1,75 kg/kWh arasında değişirken, COP<sub>ip</sub> değeri 2,45-3,95 arasında bulunmuştur [25].

Banister vd. yaptıkları çalışmada kereste kurutulması amacıyla, ısı pompalı bir kurutucu sistemi tasarlamışlardır. Sistemde kurutma sıcaklığı kontrol edilerek, kurutma kusurlarının giderilmesi hedeflenmiştir [26].

Kaewkiew vd. yaptıkları çalışmada, Tayland'da biber kurutulması amacıyla geniş ölçekli sera tipi bir güneş enerjili kurutucunun deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Biberler sera tipi kurutucuda, %74 başlangıç neminden (yaş baza göre) %9 nem değerine kadar üç günde kurutulmuşlardır [27].

Mohajer vd. çalışmalarında, hibrid bir güneş enerjili kurutucu ve su ısıtma sisteminin deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistem; 100 litre hacimli su deposu, 5 raflı kurutucu ve çift amaçlı bir kolektörden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlar tasarlanan sistemin sebze kurutulmasında ve aynı anda kullanım sıcak suyunun hazırlanmasında kullanılabileceğini göstermiştir [28].

Hossain ve Bala yaptıkları çalışmada, tropikal bir iklime sahip olan Bangladeş'te yeşil ve kırmızıbiberlerin kurutulması amacıyla tünel tipi bir güneş enerjili kurutuma sistemini analiz etmişlerdir. Tünel tipi kurutucuda ortalama hava sıcaklığı 21,62°C artarken, kırmızıbiberlerin 20 saatte ve yeşilbiberlerin 22 saatte kurutulduğu rapor edilmiştir [29].

Saleh ve Badran yaptıkları çalışmada, evsel kullanıma uygun güneş enerjili bir kurutucunun modellenmesini ve deneysel olarak analizini gerçekleştirmişlerdir. İncelenen kurutucuda nane yaprakları ve ebgümececi kurutulması incelenmiştir [30].

Rathore ve Panwar çalışmalarında, güneş enerjili tünel tip bir kurutucuda üzüm kurutulmasını incelemişlerdir. Tünel tip kurutucuda, açık bir günde sıcaklık değişiminin 10–28°C olduğu bildirilmiştir [31].

Amer vd. yaptıkları çalışmada, muz kurutma işlemi için, hibrid bir kurutma sisteminin tasarımını, imalatını ve deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. İmal edilen kurutucu; güneş kolektörü, yansıtıcı, ısı değiştirici ve kurutma kabini kısımlarından oluşmaktadır [32].

Akbulut ve Durmuş, güneş enerjili bir kurutucuda beyaz dut kurutulmasını deneysel olarak incelemişler ve kurutucunun enerji ve ekserji analizini değerlendirmişlerdir. Kurutma deneyleri, 0,014 ve 0,036 kg/s değerleri arasında değişen beş farklı kütleli debide gerçekleştirilmiştir. Kurutma sisteminde enerji kullanım oranları beş farklı kütleli debi değeri için %20,5 ve %50,2 arasında değişmiştir. Ekserji kaybı ise yine beş farklı kütleli debi değeri için 2,65 W ve 10,82 W değerleri arasında değişmiştir [33].

Sarsavadia yaptığı çalışmada, soğan kurutulmasında kullanılması amacıyla güneş enerjisi destekli bir kurutucu tasarlamış, imal etmiş ve deneysel olarak analiz etmiştir. Söz konusu kurutucu, kurutma havası sıcaklığının yeterli olması durumunda güneş enerjisi kullanırken, sıcaklığın düşmesi durumunda ek olarak elektrikli ısıtıcılardan yararlanmaktadır [34].

Şahin vd. çalışmalarında, güneş enerjisi destekli püskürtmeli bir akışkan yataklı kurutucuda bezelye kurutulmasını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Çalışma sonuçları açık güneş altında kurutma işlemi ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kurutulan bezelyelerin kuruma kaliteleri de incelenmiştir. Sistemde güneş enerjisi destekli püskürtmeli akışkan yataklı kurutucuya giren havanın sıcaklığı 35,3 ile 65,3°C arasında değişirken, bu değerler açıkta kurutmada 20 ile 27,4°C arasında değişmiştir. Güneş enerjisi destekli püskürtmeli akışkan yataklı kurutucuda kuruma oranı açıkta kurutmanın 3 buçuk katı olmuştur [35].

Şevik çalışmasında, güneş enerjili ve ısı pompalı yeni tasarım bir kurutucunun performansını farklı iklim şartlarında test etmiştir. Kurutucuda ihtiyaç duyulan ısı enerjisi çift geçişli güneş kolektörü ve ısı pompası sisteminden elde edilirken, sistemin elektrik enerjisi ihtiyacı da fotovoltaik sistemden karşılanmaktadır. Sistemde domates, çilek, nane ve maydanoz kurutulması incelenmiştir. Kurutucuda ısı pompası için tüm sistem performans katsayısı ( $COP_{ts}$ ) değerleri kurutulan ürüne göre 1,96 ile 2,28 arasında değişirken, tüm sistem özgül nem çekme oranı ( $SMER_{ts}$ ) değerleri 0,03 ile 0,46 kg/kWh arasında değişmiştir. Sistemin termal verimi ise kurutulan ürüne bağlı olarak %16 ile %79 arasında değişmiştir [36].



Fadhel vd. yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi destekli kimyasal ısı pompalı bir kurutucunun tasarımı, imalatı ve deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin performans analizleri Malezya iklim koşulları altında yapılmıştır. Sistem; vakum borulu güneş kolektörü, kimyasal ısı pompası ünitesi ve kurutucu kabinden oluşmaktadır. Çalışmada bir simülasyon geliştirilmiş ve tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Vakum borulu güneş kolektörünün maksimum verimi %80 olarak tahmin edilmesine karşılık, deneysel sonuçlarda %74 olarak hesaplanmıştır. Kimyasal ısı pompası sisteminin deneysel COP<sub>ip</sub> değeri 2 olarak bulunurken simülasyon sonuçları 2,2 olarak elde edilmiştir [37].

Akpınar yaptığı çalışmada, nane yapraklarının açık güneş altında ve güneş enerjili kurutucuda kurutulmasını modellemiş ve deneysel olarak analiz etmiştir. Çalışmada kurutma prosesinin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kurutucu kabinde enerji kullanım oranı değerlerinin %7,826 ile %46,285 arasında değiştiği, ekserji verimlerinin ise %34,760 ile %87,717 arasında elde edildiği rapor edilmiştir [38].

Bala vd. yaptıkları çalışmada, tünel tipi güneş enerjili bir kurutucuda ananas kurutulmasını incelemişlerdir. Tasarlanan ve imal edilen tünel tip kurutucu 120–150 kg yükleme kapasitesine sahiptir [39].

Chen vd. yaptıkları çalışmada, limon dilimlerinin kapalı tip bir güneş enerjili kurutucuda kurutulmasını incelemişlerdir. Söz konusu kurutucu transparan bir kurutma kabine sahiptir ve bu kurutucuya bir fotovoltaiik sistem entegre edilmiştir [40].

Mancini vd. yaptıkları çalışmada, CO<sub>2</sub> ısı pompalı bir kurutucunun termodinamik analizini gerçekleştirmiş ve sistemi deneysel olarak analiz etmişlerdir. Tasarlanan ve imal edilen kurutucuda, evlerde elbise kurutulması incelenmiştir [41].

Fatouh vd. çalışmalarında, ısı pompalı bir kurutucuda farklı bitkilerin kurutulmasını incelemişlerdir. Sistemde soğutucu akışkan olarak R-134a kullanılmıştır. Sistemde nane, maydanoz ve ebegümece kurutulması incelenmiştir [42].

Çolak vd. yaptıkları çalışmada toprak kaynaklı bir ısı pompasında nane yapraklarının kurutulma prosesinin ekserji değerlendirmesini yapmışlardır. Sistemde üç farklı kurutma havası sıcaklığı (40°C, 45°C ve 50°C) kullanılmıştır. Sistemin ekserji verimi %76,03 ve %97,24 arasında olmuştur [43].

Aktaş vd. yaptıkları çalışmada, güneş enerjili ve ısı pompalı bir kurutucuda elma kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada elma kurutma işlemi güneş enerjili ve ısı pompalı kurutucularda ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Elma dilimleri ısı pompalı kurutucuda 4,8 g su/g kuru madde nem içeriğinden 0,18 g su/g kuru madde nem içeriğine kadar üç buçuk saatte kurutulmuştur. Güneş enerjili kurutucuda ise elma dilimleri, aynı kurutma süresinde, 4,8 g su/g kuru madde nem içeriğinden 1 g su/g kuru madde nem içeriğine kadar kurutulmuştur [44].

Hawlder vd. yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutucu ve su ısıtıcısının tasarımı, imalatı ve deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin performans analizleri Singapur iklim koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Sistemde COP<sub>ip</sub> değerleri simülasyon programında ve deneylerde sırasıyla 7 ve 5 olarak hesaplanmıştır [45].

Artnaseaw vd. çalışmalarında, yeni tasarım vakum ısı pompalı bir kurutucuda kırmızıbiber kurutulmasını incelemişlerdir. Çalışmada basınç ve kurutma sıcaklığı gibi etkenlerin ürünlerin kurutulması üzerindeki etkileri araştırılmıştır [46].

Klöcker vd. çalışmalarında, çalışma akışkanı olarak karbondioksit kullanan ısı pompalı bir kurutucu tasarlamış ve deneysel olarak incelemişlerdir. Tasarlanan ve imal edilen ısı pompalı kurutucu yığın tipi bir kurutucu olup, 12 kW ısıtma kapasitesine sahip ve kapalı hava çevrimlidir [47].

Ganjehsarabi vd. tambur tipi ısı pompalı bir kurutucunun ekserjoekonomik analizini, gerçek termodinamik ve maliyet verilerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kurutma materyali olarak ıslak pamuklu kumaş kullanılmıştır. Sistemde özgül nem çekme oranı (SMER) ve buharlaşma oranı değerleri sırasıyla 1,08 kg/kWh

ve 0,018 kg/s olarak bulunurken, ısı pompası sisteminin ve tüm sistemin ekserji verimleri sırasıyla 0.07 ve 0.11 olarak bulunmuştur [48].

Pal vd. yaptıkları çalışmada, yeşil tatlı biberin ısı pompalı bir kurutucuda kurutulmasını incelemişlerdir. Çalışmada kurutma havası sıcaklıkları 30°C, 35°C, 40°C ve 45°C olarak ayarlanırken, bağıl nem değerleri %19 ve %55 arasında olmuştur [49].

Queiroz vd. yaptıkları çalışmada, ısı pompalı ve elektrikli ısıtıcılı bir kurutucuda domates kurutulmasını incelemişlerdir. Her iki sistemde de domates tipi, kurutma havası sıcaklığı ve hava hızının domates kurutma kinetikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Sistemde ısı pompası için COP<sub>ip</sub> değeri 2,56 ile 2,68 arasında bulunmuştur. Elektrik rezistanslı kurutma sistemi ile karşılaştırıldığında ısı pompalı kurutma sisteminin yaklaşık %40 daha fazla bir enerji ekonomisi sağladığı rapor edilmiştir [50].

Mevcut literatür incelendiğinde, akışkan yataklı kurutma sistemlerinde enerji kaynağı olarak çoğunlukla elektrikli ısıtıcılar veya mikrodalga enerjisinden yararlandığı görülmektedir. Akışkan yatak uygulamalarının dışında kalan farklı kurutma sistemlerinde ise enerji kaynağı olarak çoğunlukla düzlemsel güneş kolektörleri ve/veya ısı pompası sistemlerinden yararlandığı görülmektedir. Yapılan tez çalışmasında ise; akışkan yataklı kurutma sistemlerinde alternatif enerji kaynağı olarak güneş enerjisinden ve ısı pompası sisteminden yararlanılması amaçlanmaktadır. Bunun yanı sıra, sistemde parabolik oluklu güneş kolektörü kullanılarak düşük güneş ışınımı değerlerinde dahi sistem için ihtiyaç duyulan kurutma havası sıcaklıklarının sağlanması hedeflenmiştir.

## BÖLÜM 3

### KURUTMA VE KURUTMA SİSTEMLERİ

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan veya katılardan su veya diğer sıvıların giderilmesidir. Bununla beraber kurutma teriminin en yaygın kullanım yeri katı maddelerden ısıtma yöntemleri ile su veya uçucu diğer maddelerin giderilmesi işlemi tanımlamaktadır. Kurutma gıda maddelerinin korunmasında kullanılan en önemli yöntemlerden biri olup kimya ve üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bir işlemdir.

Birçok sektörde kurutma için tüketilen enerji toplam enerji tüketimi içinde önemli bir paya sahiptir. Bu oran kimyada % 6, tekstilde % 5, seramik ve diğer inşaat malzemeleri üretiminde % 11, kereste kurutmada % 11, gıda ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında % 12 ve kağıt endüstrisinde % 33 düzeylerine ulaşabilmektedir [51].

Enerji yoğun bir süreç olan kurutmada kurutma etkinliği kurutucu tipine bağlı olarak % 20 ile % 90 arasında değişmektedir. Değişik kurutucu tipleri için kurutma etkinlikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Değişik kurutucu tipleri için kurutma etkinlikleri [51].

<b>Kurutucu tipi</b>	<b>Etkinlik (%)</b>	<b>Kurutucu tipi</b>	<b>Etkinlik (%)</b>
Direkt sürekli		Endirekt sürekli	
Konvektif	20–40	Silindirik	85
Flaş	50–75	Döner	75–90
Bantlı	40–60	Kesikli	
Döner	40–70	Karıştırıcı, tepsili	90
Püskürtmeli	50	Vakumlu döner	70
Tünel	35–40	İnfrared	30–60
Akışkan yatak	40–80	Dielektik	60
Kesikli raflı	85		

### 3.1. KURUTUCU SEÇİMİ

Kurutma işleminin başarısı, gerek ürün kalitesi gerekse işletmenin karlılığı bakımından uygun bir kurutucunun seçilmesine bağlıdır. Her türlü ürünün kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeni ile ilk adım olarak kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimi büyük önem taşımaktadır [5].

Verilen bir uygulama için ön kurutma ve son kurutma işlemleri ile uygun kurutucu seçimi arasında önemli bir ilişki vardır. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise farklı kurutucu tipleri (ya da kurutma sistemleri) verilen bir uygulama için aynı derecede (teknik ve ekonomik olarak) uygun olabilir. Seçimi etkileyecek mümkün olduğunca çok faktörün değerlendirilmesi elimizdeki opsiyonların sayısını düşürecektir. Yeni bir uygulama için (yeni ürün ya da yeni proses) kurutucu seçiminde dikkatli bir prosedür izlenmesi çok önemli bir rol oynamaktadır. Kurutucu seçimi yapılırken kurutucuların karakteristik özellikleri göz önünde tutulmalıdır. Aynı kurutucunun çalışma şartlarında yapılan değişiklik ürünün kalitesini etkileyebilir. Bu yüzden kurutucu tipinin yanında optimum kalite ve ısı nem almanın maliyeti için doğru çalışma şartlarını da seçmek ayrıca önemlidir [51].

Kurutma sistemlerinin seçiminde aşağıdaki sıralama belirleyici olmaktadır.

1. Kurutucuların ön seçimi: Islak malzeme ve kuru ürün teminine en uygun kurutucu tipleri ön seçimi gerçekleştirilir. Kurutucularda bütün işlemlerin sürekliliği ve istenen fiziksel ve kalite özelliklerini elde etmesi ön koşulu aranır.
2. Kurutucuların ön karşılaştırılması: Ön seçilen kurutucular elde edilebilen veriler ışığında yaklaşık maliyet ve verimlilik açısından karşılaştırılır. Bu değerlendirmede verimlilik açısından uygunsuz veya ekonomik olmayan kurutucular sonraki değerlendirmelerde dikkate alınmaz.
3. Kurutma denemeleri (testleri): Bu denemeler halen değerlendirmeye alınmakta olan kurutucu tipleri için gerçekleştirilir. Bu testler optimum çalışma

koşullarını ve ürün karakteristiklerini belirler ve ayrıca cihaz satıcı firmaların aktardıkları bilgilerin doğruluğunun sınanmasını sağlayacaktır.

4. Kurutucu seçiminde karar verme: Kurutma testlerinden ve belirtilen özelliklerin değerlendirilmesiyle kurutucu seçimine karar verilebilir [51].

Gıdaların kurutulmasında bilinmesi gereken en önemli verilerden biri de kurutmanın başlangıcındaki nemliliği ve kurutma işlemi sonunda ulaşacağı nemlilik değerleridir. Çizelge 3.2’de bazı ürünler için ilk ve son nem değerleri ile yine bu ürünler için izin verilen en yüksek kurutma sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı gıda ürünlerinin nem değerleri ve kurutma sıcaklıkları [51].

Ürün adı	Başlangıç nemi (yaş baza göre) (%)	Son nem miktarı (yaş baza göre) (%)	İzin verilen en yüksek kurutma sıcaklığı
Çeltik (ham)	22–24	11	50
Çeltik (kısmi kaynatılmış)	30–35	13	50
Mısır	35	15	60
Buğday	20	16	45
Tahıl	24	14	50
Pirinç	24	11	50
Bakliyat	20–22	9–10	40–60
Yağlı tohumlar	20–25	7–9	40–60
Yeşil bezelye	80	5	65
Karnabahar	80	6	65
Havuç	70	5	75
Yeşil fasulye	70	5	75
Soğan	80	4	55
Sarımsak	80	4	55
Lahana	80	4	55
Tatlı patates	75	713	75
Patates	75	5	75
Biber	80	24	65
Elma	80	18	70
Kayısı	85	18	65
Üzüm	80	15–20	70
Muz	80	15	70
Bamya	80	20	65
Ananas	80	10	65
Domates	96	10	60

Çizelge 3.3’te endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan bazı kurutucu tiplerinin karakteristik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Gıdaların kurutulmasında kullanılan bazı kurutucuların özellikleri [51].

Kurutucu tipi	Yüklemeli/Sürekli	Katı/Sıvı	Başlangıç nem miktarı	Kuruma hızı	Tipik en çok buharlaşma kapasitesi (kg/h)	Kullanıldığı alanlar
Yığın	Yüklemeli	Katı	Düşük	Yavaş	-	Sebzeler
Kabin	Yüklemeli	Katı	Orta	Orta	55-75	Meyveler ve sebzeler
Konveyör/bantlı	Sürekli	Katı	Orta	Orta	1820	Kahvaltı tahılları, meyve ürünleri, şekerleme, sebze, bisküvi, fındık
Drum	Sürekli	Katı	Orta	Orta	410	Çözelti, mısır şurubu, patates, jelatin
Foam-mat	Sürekli	Sıvı	-	Hızlı	-	Meyve suları
Akışkan yatak	Yüklemeli/Sürekli	Katı	Orta	Orta	910	Bezelye, doğranmış veya dilimlenmiş sebze, toz veya kalıplanmış gıdalar, meyveler, Hindistan cevizi, tıbbi bitkiler (otlar)
Kiln	Yüklemeli	Katı	Orta	Yavaş	-	Elma halkaları, şerbetçiotu
Mikrodalga-dielektik	Yüklemeli/Sürekli	Katı	Düşük	Hızlı	-	Ekmek yapım ürünleri
Pnömatik/sirkülasyonlu	Sürekli	Katı	Düşük	Hızlı	15900	Nişastalar, sos veya çorba tozu, püre patates
Işınımlı	Sürekli	Katı	Düşük	Hızlı	-	Ekmek yapım ürünleri
Döner	Yüklemeli/Sürekli	Katı	Orta	Orta	1820-5450	Kakao tanesi, fındık, posa, pişmiş tahıllar
Spin flaş	Sürekli	Sıvı	Orta	Hızlı	7800	Pastalar, kekler, çamurlar, viskoz sıvılar
Püskürtmeli	Sürekli	Katı	-	Hızlı	15900	Tozlar, hazır kahve, süt tozu
Güneş enerjili	Yüklemeli	Katı	Orta	Yavaş	-	Meyveler ve sebzeler
Arasından geçmeli (Trough)	Sürekli	Katı	Orta	Orta	-	Bezelye, doğranmış sebzeler
Tünel	Sürekli	Katı	Orta	Orta	-	Meyveler ve sebzeler
Vakum bantlı/raflı	Sürekli	Sıvı	-	Hızlı	18200	Et özleri, çikolata kırıntıları

## **3.2. KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI**

Endüstriyel alanda kullanılan kurutucuları aşağıdaki üç grupta sınıflandırmak mümkündür.

1. Kurutulacak ürüne ısı geçişine göre,
2. Kurutma işleminin gereksinim duyduğu sıcaklık ve basınca göre,
3. Kurutulacak ürünün kurutucuda tutulma durumuna göre.

### **3.2.1. Kurutulacak Ürüne Isı Geçişine Göre Kurutucular**

Kurutulacak ürüne ısı geçişine göre kurutucular iletimli, taşınımli ve ışınımli kurutucular olmak üzere üç başlık altında incelenir.

#### **3.2.1.1. İletimli Kurutucular**

Dolaylı kurutucular olarak da adlandırılırlar ve ince maddeler veya çok ıslak katıların kurutulması için uygun kurutuculardır. Ürün içindeki nemin buharlaşması için gerekli ısı sabit veya hareketli ısıtıcı yüzeyler vasıtasıyla sağlanır. Buharlaştırılan nem vakum ile veya gaz akısı ile üründen uzaklaştırılır. Isıya karşı duyarlı maddeler için vakumlama işlemi tavsiye edilir.

Taşınımli kurutucularda kurutma havası ile ısı kaybı büyük olduğu için bunların ısı verimleri düşük, iletimli kurutucularda ise ısı verim daha yüksektir. Hamurumsu maddeleri kurutmak için kullanılan küçük tepsili kurutucular, içlerinde buhar boruları bulunan döner kurutucular ve silindirik kurutucular iletimli kurutuculara örnek olarak verilebilir [8].



### **3.2.1.2. Taşınımlı Kurutucular**

Bu tip kurutucularda kurutma için gerekli ısının transferi ıslak ürün ile sıcak gazlar arasında direkt temas yoluyla gerçekleşir. Buharlaşan sıvı ise kurutma ortamı, örneğin sıcak gazlar tarafından kurutma hacminden uzaklaştırılır. Bu kurutucular direkt kurutucular olarak da adlandırılırlar. Akışkan yataklı, döner ve püskürtmeli tipindeki kurutucular bu kurutma türüne birer örnektir [51].

### **3.2.1.3. Işınımlı Kurutucular**

Kurutulacak malzemeye 0,76–400 µm dalga boyunda elektromanyetik radyasyon ile ısı enerji uygulanır. Bu dalga boyundaki radyasyon kızılötesi radyasyon diye adlandırılır ve malzemenin yüzeyine nüfuz eder. Madde yüzeyi ise gelen radyasyonun bir bölümünü soğurur. Genellikle kaplamaları, ince filmleri ve tabakaları kurutmak için kullanılır. Bu sistemlerin pahalı bir yatırım ve işletim maliyetleri vardır. Bu sistemler daha çok nem uzaklaştırma süreci zor olan malzemelerin son nem kesrini düzeltmede veya değerli ürünlerin kurutulmasında tercih edilen bir yöntemdir [5].

### **3.2.2. Kurutma İşleminin Gereksinim Duyduğu Sıcaklık ve Basınca Göre Kurutucular**

Birçok kurutucu atmosfer basıncı civarındaki basınçlarda çalışır. Küçük bir pozitif basınç dışarıdan içeriye olan sızıntıyı önler. Eğer dışarıya sızıntı olması istenmiyorsa bu sefer negatif basınç kullanılır. Negatif basınç yani vakum işlemi pahalıdır ve sadece ürünün düşük sıcaklıklarda kurutulması veya oksijensiz yerlerde kurutulması gerektiğinde kullanılması tavsiye edilir. Dondurarak kurutma, suyun üçlü noktasının altındaki bir sıcaklıkta vakum altında kurutmanın özel bir durumudur ki burada buz, sıvı faza geçmeden buharlaşır. Dondurarak kurutmada süblimleşme için gerekli ısı normalden birkaç kat daha az olmasına rağmen vakumlama işlemi pahalıdır. Örneğin kahveyi dondurarak kurutma işlemi sprey kurutmaya göre 2–3 kat daha pahalıdır. Ancak ürün kalitesi ve tadı dondurarak kurutmada daha iyidir [8].

### **3.2.3. Ürünün Kurutucuda Tutulma Durumuna Göre Kurutucular**

Kurutucu seçiminde kurutulan maddenin kurutucuda tutulma durumu en önemli etkenlerden biridir. Çünkü kurutucudan çıkan son ürünün özellikleri ve kalitesi, kurutucular tarafından belirlenir. Bazı durumlarda kaliteli bir son ürün için iki veya daha fazla kurutucunun birleşimi ile yapılan kurutma daha uygun bir seçim olabilir [8].

## **3.3. KURUTUCU TİPLERİ**

### **3.3.1. Döner Kurutucular**

Bu tip kurutucularda malzeme döner silindir içinde hem taşınır, hem de serbest düşmeyle duşlama benzeri silindir alt yüzeyine düşer. Bu esnada malzeme sıcak gaz akımı ile temas ederek kuruma işlemi gerçekleşir. Bazı döner kurutucular endirekt ve direkt tiplerin birleşimidir. Örneğin sıcak gazlar önce iç gövde ve sonra iç ve dış gövde arasından geçer ve ıslak katı madde ile temas eder [51].

### **3.3.2. Püskürtmeli (Sprey) Kurutucular**

Püskürtmeli kurutucular genellikle süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılırlar. Sprey formundaki toz haline getirilmiş besleme ürünü özel olarak tasarlanmış bir kurutma haznesinde sıcak gazla temas eder. Atomizörün uygun tasarlanması ve seçimi püskürtmeli kurutucu için çok önemlidir çünkü kurutucu besleme türü (viskozite), besleme ürününün aşındırıcı etkisi, besleme oranı, arzu edilen parçacık boyutu ve parçacık dağılımı ile paralel, karşıt ve karışık akım için kurutma haznesi ve akış türünün tasarlanması püskürtmeli kurutucunun çalışmasını etkilemektedir [51]. Bu kurutucularda, solüsyonlar, süspansiyonlar, pompalanabilen hamurumsu maddeler ve çamurlar kurutulabilir. Bu kurutucuların en büyük üstünlüğü, hızlı olması ve parçaların hiçbir yere temas etmemesidir. Sprey kurutucularda çok yüksek kurutucu ortam sıcaklıkları kullanılabilir. Yüksek buharlaşma hızı ve ısı verime ulaşılabilir. Hızlı bir şekilde çalıştırılabilir ve

kapatılabilirler. Kapalı çevrimde uçucu ve yanıcı maddelerin kurutulmasına imkân verirler [8].

### **3.3.3. Tünel Kurutucular**

Bu tip kurutucularda malzeme bir tünel içinde hareket eden kurutma vagonları içine uygun bir biçimde yerleştirilir [51]. Bu esnada malzeme sıcak gazlarla temastadır. Vagonlar üzerindeki tepsilere yerleştirilen kurutulacak madde uzun olan tünelin içerisinden geçirilir. Bu işlem ya devamlı vagonlar şeklinde veya bir vagon tüneli terk ederken yüklenmiş diğer bir vagon tünele girecek şekilde düzenlenir. Çeşitli tipteki tünel kurutucularda hava ve ürünün birbirlerine göre hareket yönleri farklıdır. Eğer vagonlar ile sıcak hava aynı yönde hareket ederse bu tip tünellere “paralel akış tüneli” denir. Bu tip tünel kurutucularda kurutma havası, önce yeni ürünle karşılaşır. Kurutma havasının süreç içinde soğuyup nemi artarken daha ileri düzeyde kurumuş olan ürünle temas eder. Bu durum kurutulan ürünün az da olsa tekrar nem almasına neden olur [5].

Tünel kurutucularda değişik hava hızı ve yönü, sıcaklık, nem uygulamaları mümkündür. Giriş ve çıkışta sıcak hava kayıplarını önlemek için gereken önlemler alınmalıdır [8].

### **3.3.4. Dielektrik ve Mikrodalga Kurutucular**

Mikrodalga ve dielektrik kurutma kavramı, kurutulacak ürüne elektromanyetik sinyaller gönderilmesi sonucu, ürün içindeki iyonların veya çift kutuplu maddelerin moleküllerinin hareket etmesi ve bunun sonucunda madde içinde ısı üretilmesi ilkesine dayanır.

Elektromanyetik dalgalar, frekansları veya dalga boyları ile tanımlanırlar. 1 ile 100 MHz frekanslarda yapılan elektromanyetik uygulamalar dielektrik ısıtma olarak tanımlanırlarken, 300 MHz'den 300 GHz'e kadar yapılan uygulamalar, mikrodalga ısıtma olarak adlandırılır. Dielektrik ısıtmada dalga boyları yaklaşık 3 metreden 700

metreye kadar değişirken, mikrodalgada 1mm ile 1 metre arasındadır. Dolayısıyla bu tür kurutma sistemlerinde, frekans veya dalga boyu kurutma çeşidini belirler [8].

### **3.3.5. Bantlı Kurutucular**

Bu kurutucularda malzeme sürekli bir iletim bandı üzerinde kurutucu içinde hareket eder ve bu esnada arasından sıcak kurutma havası üflenir. Bu tip kurutucular çok yönlüdür ve aynı zamanda hem ısıya duyarlı hem de kırılğan olan büyük miktardaki gelişigüzel şekilli yükleri taşıyabilir. Çok büyük ticari bant tipi kurutucuların tasarımında, bant üzerindeki ürünün düzgün bir şekilde dağılması ve ayrıca kurutucunun bulunduğu kurutma odasında ürünün dengeli bir neme sahip olması için havanın da eşit bir şekilde dağılması çok önemlidir [51].

### **3.3.6. Kızılötesi (Radyant) Kurutucular**

Radyant ısılı kurutucuların çalışması, infrared ışınların üretimi, geçişi ve absorplanmasına bağlıdır. Otomobil gövdesi gibi metal malzeme üzerindeki boya tabakasının kurutulmasında kullanılır. Radyasyon genellikle kızılötesi ışın veren lambalarla temin edilir ve kurutma, bir sıra lambanın yer aldığı bir tünel kurutucuda yapılır. Bu kurutma operasyonu sadece metal yüzeyler üzerindeki ince boya filmleri için uygundur, çözücü olarak suyun yer aldığı haller hiçbir zaman kullanılamaz. Çok pahalı bir kurutucudur [51].

### **3.3.7. Pnömatik (Flaş) Kurutucular**

Pnömatik veya flaş kurutucular, yüzeyinden yayılımın kolay olduğu veya serbest neminin hızla hareket etmesinden dolayı hızla kuruyan veya kurutulması uygun olan ürünler için kullanılır ve birkaç saniye içinde kuruma gerçekleşir. Islak malzeme, ısıtılan hava veya başka bir gaz akımıyla karıştırılır ve bu gaz akımı katıyı kurutma bölgesi boyunca taşır ki, bu esnada yüksek ısı ve kütle geçiş katsayısı sayesinde ürün hızlı bir şekilde kurutulur. Yani tanecikli malzeme dağıtılır, hava akımına karışır ve havada taşınır. Eğer hava sıcak ise malzeme kurutulur. Kurutulan malzeme siklonda ayrılır ve daha sonra başka siklonlara, filtrelere veya toz tutuculara giden malzeme

tamamen ayrıştırılır. Bu sistem ısıya duyarlı olan ve çabuk kurutulması gereken malzemeler için uygundur. Yapışkan veya yağlı maddeler bu sisteme uygun değildir [8].

### **3.3.8. Dondurarak Kurutma**

Kurutulacak ürün önce dondurulur, sonra derin vakuma tabi tutulur. Derin vakum haznesi bir derin soğutma kondenserine (yoğuşturucu) veya kimyasal nem alıcıya bağlıdır. Sonra vakum haznesi yavaş yavaş ısıtılmaya başlanır ve ıslaklığı veren madde (genellikle sudur), ani olarak donmuş halden buhar haline geçip kondenserde veya kimyevi nem alıcıda tekrar yoğuşturulur ve atılır. Çoğu dondurarak kurutma işlemleri -40 °C ile -10 °C sıcaklıkta ve birkaç yüz mikron vakum altında yapılır. Bu süreç yavaş ve pahalı bir kurutma seklidir. Fakat ısıya karşı hassas maddeler için birçok üstünlükler sağlar. Kan plazması, ilaçlar, serum, bakteriyel maddeler, asıllar, meyve suları, kahve ve çay özü, deniz ürünleri, et ve süt gibi ürünlerin kurutulmasında kullanılır [5].

### **3.3.9. Silindirik Kurutucular**

Bu kurutucular devamlı bir tabaka halindeki kağıt ve tekstil gibi maddelerin kurutulmasında kullanılırlar. Bunlar pek çok sayıda buharla ısıtılan silindirlerden meydana gelmiş olup, kurutulacak madde bu silindirler üzerinden devamlı geçer [51].

### **3.3.10. Akışkan Yataklı Kurutucular**

Akışkanlaştırılmış yatakta tanecik yapısındaki maddeler arasından gaz akımı geçirilir. Gaz hızı çok iyi ayarlanmalıdır. Toz ve taneli yapıdaki kurutulan malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olduğundan, kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir. Bu mekanizma ile büyük sıcaklık farkları sakıncası olmaksızın malzemelerin kurutulması mümkündür. Otomatik yükleme ve boşaltmanın mümkün olduğu bu sistemin en büyük avantajı kurutma işleminin kısa sürede tamamlanmasıdır [52].

## BÖLÜM 4

### AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMLERİ

Akışkan yataklı kurutucular tanecikli maddelerin kurutulmasında birçok üstünlüğe sahiptir. Bu kurutucular günümüzde gıda endüstrisinden ilaç sanayisine kadar her yerde kullanılmaktadır.

#### 4.1. AKIŞKANLAŞMA TANIMI VE AKIŞKAN YATAK

Akışkan yataklı kurutucuların bu geniş kullanım oranına rağmen endüstriyel ölçekte bir akışkan yataklı kurutucu tasarlamak üzerinde uğraşılması gereken bir konu olup, bu süreç ampirik ifadelerle dayanmaktadır. Akışkan yatak teknolojisini diğer kurutma yöntemleri ile karşılaştırdığımızda bu teknoloji ile sunulan başlıca üstünlükleri şunlardır:

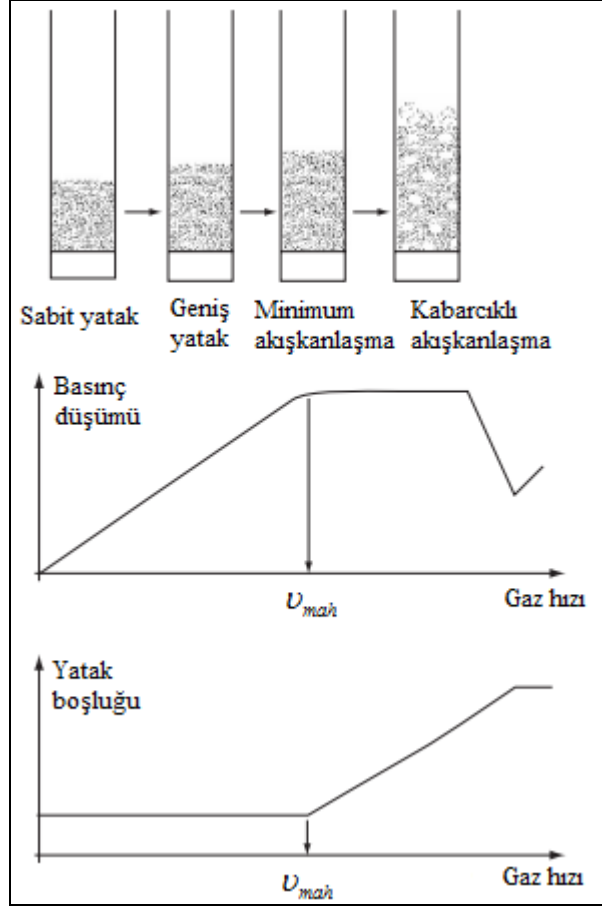
1. Kurutulacak parçaların düzenli akışı sayesinde, ürünün kolayca beslenmesi ve çıkarılması sağlanabilir ve büyük ölçekli kurutma işlemleri gerçekleştirilebilir.
2. Mekanik olarak hareket eden parçaların sayısı çok az olduğu için bakım masrafları düşüktür.
3. Gaz ve parçacıklar arasında ısı ve kütle geçişinin hızlı olması sayesinde ısıya duyarlı parçacıkların aşırı ısıtılması önlenir.
4. Akışkan yatak içine ısıtıcı paneller yerleştirilerek, yatak içindeki malzemeler ile daldırılmış nesnelere arasındaki ısı geçişi oranı artırılabilir.

5. Kurutulacak katıların hızlı karışımı, akışkan yatak boyunca hemen hemen sabit sıcaklık şartlarının oluşmasını sağlar ve böylece kurutma sürecinin sıcaklık ve nem kontrolü kolaylıkla sağlanabilir [8].

Bu sistemlerin başlıca dezavantajları ise; yüksek basınç düşümü, yüksek elektrik enerjisi tüketimi, partikül ürünlerin bazılarının kötü akışkanlaşma kalitesi, akışkan yataklı kurutucuların belirli türleri için düzenli olmayan ürün kalitesi, boru ve kanalların erozyonu, ince parçacıkların sürüklenmesi ve parçacıkların aşınması yada pülverizasyonu olarak sıralanabilir.

Akışkan yataklı sistemlerin temel prensibi, kurutulacak tanecikli ürünlere akışkan özelliklerine benzer özellikler kazandırılmasıdır. Bu sistemlerde kurutulacak ürünler akışkan bir ortam (hava) içinde askı halinde tutulurken kuruma işlemi gerçekleşir.

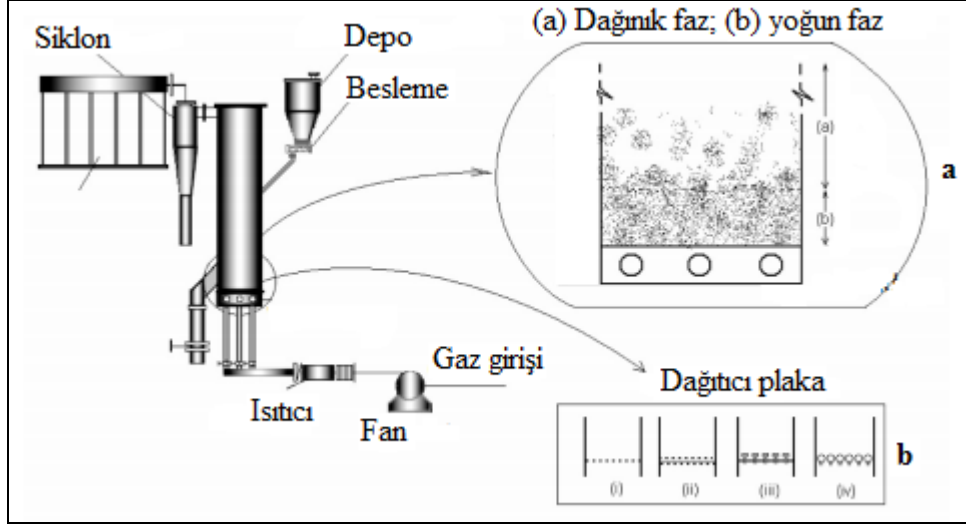
Geleneksel akışkan yatak, katı parçacıklardan oluşmuş bir yatağın altından bir gaz (genellikle hava) akımının geçirilmesi ile elde edilir. Düşük gaz hızlarında yatak statiktir. Partikül yatağı bir dağıtıcı plaka üzerindedir. Akışkanlaştırıcı gaz dağıtıcı plakadan geçer ve akışkan yatak boyunca homojen bir biçimde dağılır. Akışkanlaştırıcı gaz hızı arttıkça bu durum yatak boyunca basınç düşümünün artmasına neden olur. Belirli bir gaz hızında akışkan yatak içerisindeki gaz akımı tüm yatağın ağırlığını destekleyecek düzeye ulaştığında yatak akışkanlaşır. Bu durum minimum akışkanlaşma ve bu durumu oluşturan gaz hızı da minimum akışkanlaşma hızı,  $v_{mah}$  olarak ifade edilir. Şekil 4.1'de gaz hızının artmasıyla sabit yataktan kabarcıklı yatağa farklı yatak rejimleri gösterilmiştir. Grafiklerde ise farklı yatak rejimlerinde yatak basınç düşümlerinin ve yatak boşluklarının değişimleri gösterilmiştir [53].



Şekil 4.1. Akışkan yatak için farklı yatak rejimleri.

Akışkan yatak içerisinde ısı ve kütle transferi daha kolay gerçekleşir ve katı partikül maksimum karışma özelliği ile homojen kurur. Tipik bir akışkan yataklı kurutucu Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Akışkan yatak içerisinde iki faz oluşur (Şekil 4.2 a). Bu fazlar yoğun faz ve dağınık faz olarak isimlendirilir. Yoğun faz akışkan yatağın alt kısmında yer almaktadır. Yoğun faz bölgesinin üzerinde katı parçacıkların ağırlığının ve yoğunluğunun azaldığı dağınık faz bölgesi vardır. Bu tip kurutucularda genel olarak akışkan yatak üzerine besleme üstten gerçekleşir. Isı taşıyıcı akışkan olarak kullanılan hava alttan üste doğru ters yönde ilerleyerek kurutulacak malzeme üzerinden geçer. Hava malzeme üzerine dağıtıcı plakalar ile iletilir. Bu plakalar farklı konstrüksiyonlara sahip olabilmektedirler (Şekil 4.2 b). Şekilde dört farklı dağıtıcı tipi görülmektedir. Bunlar sırasıyla; normal (i), sandviç (ii), kabarcık kapaklı ve püskürtücü (iv) dağıtıcı plakalardır. İyi ve homojen bir akışkanlaştırma elde edebilmek için basınç düşüşü dağıtıcı plaka boyunca yeterince yüksek olmalıdır [53].





Şekil 4.2. Tipik bir akışkan yataklı kurutucu [53].

## 4.2. AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU TİPLERİ

Geçmişten günümüze işlem, ürün, işletim güvenliği ve çevresel ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak çok sayıda endüstriyel uygulama için çeşitli akışkan yataklı kurutucuların üzerine çalışmalar yapılmıştır. Uygun maliyetli ve mantıklı bir seçim yapabilmek için farklı akışkan tiplerinin belirli özelliklerine aşina olmak çok önemlidir.

Endüstride kullanım alanı bulamamış bazı yeni tasarım akışkan yataklı kurutucuların dezavantaj ve güçlüklerinin üstesinden geleneksel tip akışkan kullanılarak gelinebilir. [53].

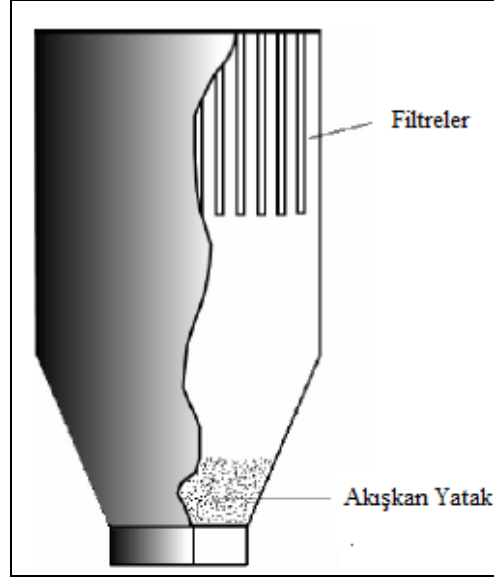
### 4.2.1. Geleneksel Akışkan Yataklı Kurutucular

Geleneksel akışkan yataklı kurutucular; yığın tip, yarı zamanlı ve tam zamanlı akışkan yataklı kurutucular olarak sınıflandırılabilir.

#### 4.2.1.1. Yığın Tip Akışkan Yataklı Kurutucu

Kapasitesi genel olarak 50 kg/h ile 1000 kg/h arasında olan küçük işletmeler için uygundur. Kurutma havası sıcaklığı ve hızı genel olarak sabit değerlerdedir. Fakat

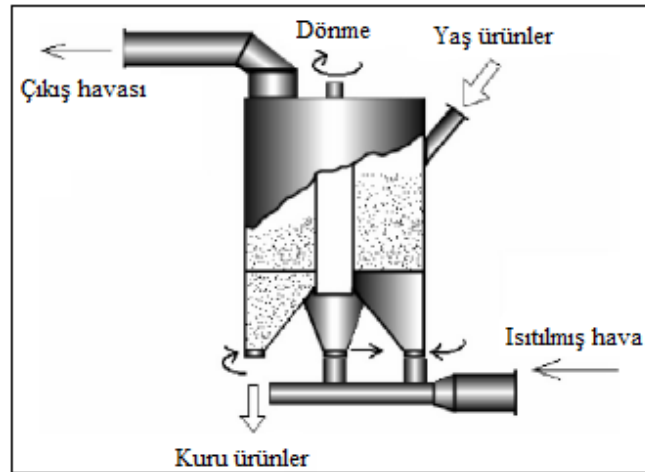
hava hızını ve sıcaklığını kontrol etmek enerji giderlerini azaltacaktır. Şekil 4.3'te genişletilmiş iç yapısı ve partikül önleyici torba filtreleri bulunan akışkan yataklı kurutucu gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Yığın tipi akışkan yataklı kurutucu.

#### 4.2.1.2. Yarı Zamanlı Akışkan Yataklı Kurutucu

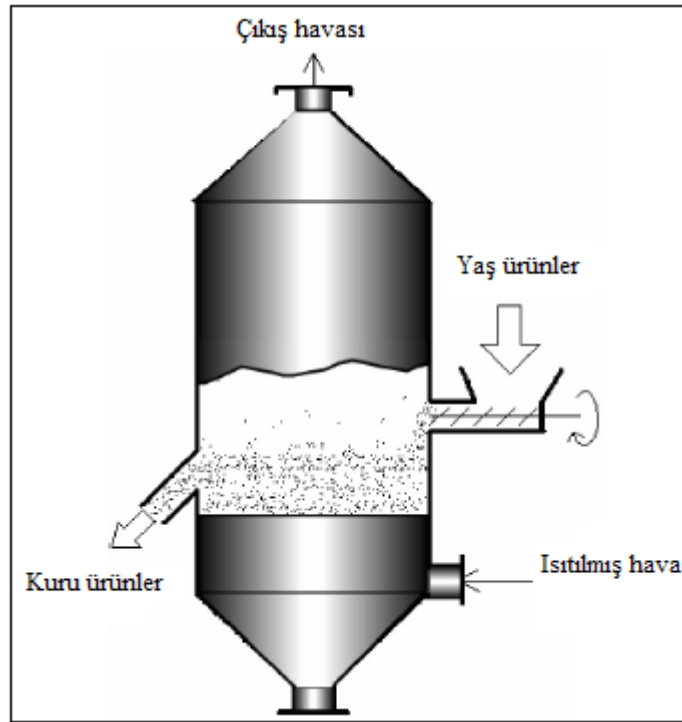
Yarı zamanlı akışkan yataklı kurutucularda bir dizi alt procesten meydana gelir. Yüklenen ürünler işlem hattı boyunca bir işlemciden diğer işlemciye döndürülerek taşınır. Şekil 4.4'te yarı zamanlı akışkan yataklı bir kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.4. Yarı zamanlı akışkan yataklı bir kurutucu.

#### 4.2.1.3. Tam Zamanlı Akışkan Yataklı Kurutucu

Endüstride en çok kullanılan akışkan yataklı kurutuculardır. Akışkan yataktaki partiküller kusursuz bir şekilde karışırlar. Akışkan yataktaki sıcaklık dağılımı homojendir. Akışkan yatak içerisindeki malzemenin sıcaklığı egzoz sıcaklığına eşittir. Partiküllerin siklonda bekleme ve karışma süresi uzundur bu sırada ürün nemi dağılarak artabilir. Kurutucu içerisine bir miktar kuru partikül eklenerek ürün nemi dengelenebilir. Şekil 4.5'te tam zamanlı akışkan yataklı bir kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.5. Tam zamanlı akışkan yataklı kurutucu.

#### 4.2.2. Farklı Tipteki Akışkan Yataklı Kurutucular

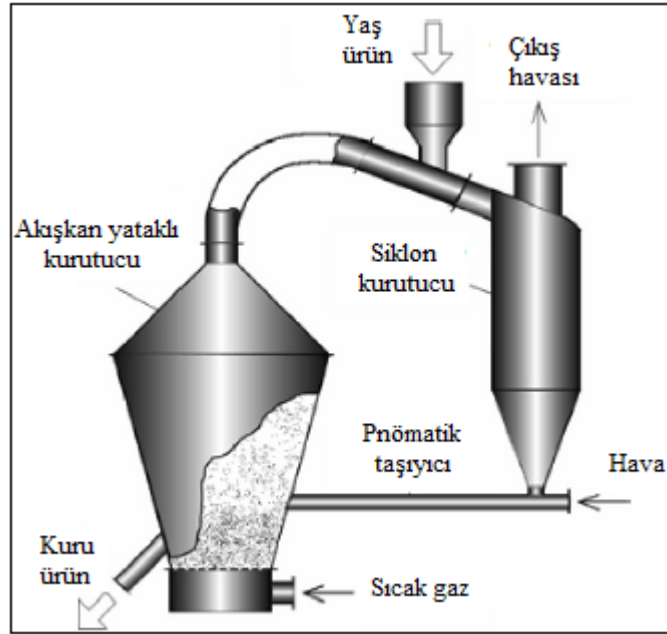
Birçok endüstriyel uygulama için farklı modifikasyonlara sahip çok sayıda akışkan yataklı kurutucular bulunmaktadır. Bu akışkan yataklı kurutucular, geleneksel tipteki akışkan yataklı kurutucuların bazı problem ve dezavantajlarını ortadan kaldırabilmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu akışkan yataklı kurutuculardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

#### 4.2.2.1. Kademeli ve Çok Süreçli Akışkan Yataklı Kurutucular

Akışkan yataklar parçacıklı malzemelerin işlenmesinde birçok farklı özellik ve avantajlar sunduğundan, bir akışkan yatak içerisinde iki veya daha fazla işlem gerçekleştirilebilir. Bu işlemler; karıştırma, kurutma, soğutma vb. işlemler olarak sıralanabilir.

#### 4.2.2.2. Hibrid Akışkan Yataklı Kurutucular

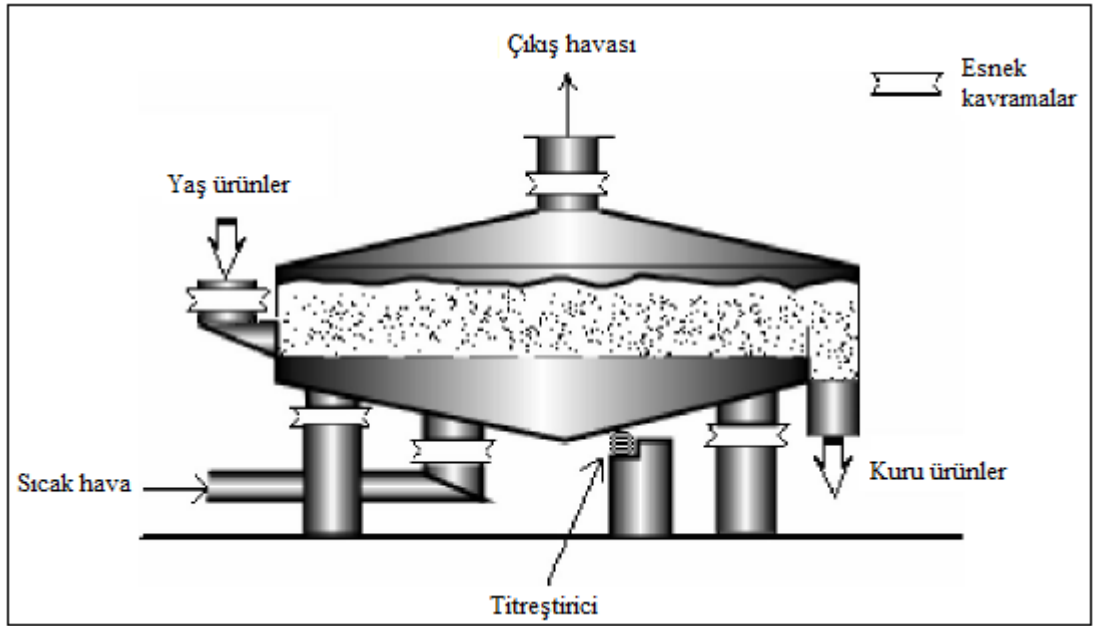
Hibrid akışkan yataklı kurutucular yüzey ve iç nem içeren katların kurutulmasında kullanılırlardır. Yüzey nemi flaş ya da siklon tip kurutucu kullanılarak ilk aşamada çıkarılabilir. Kurutmanın ikinci aşaması kolaylıkla kontrol edilebilen kurutma süresi ile akışkan yatak içerisinde gerçekleştirilir. Şekil 4.6'da örnek bir hibrid siklon tipi akışkan yataklı kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.6. Hibrid siklon akışkan yataklı kurutucu.

#### 4.2.2.3. Titreşimli Akışkan Yataklı Kurutucular

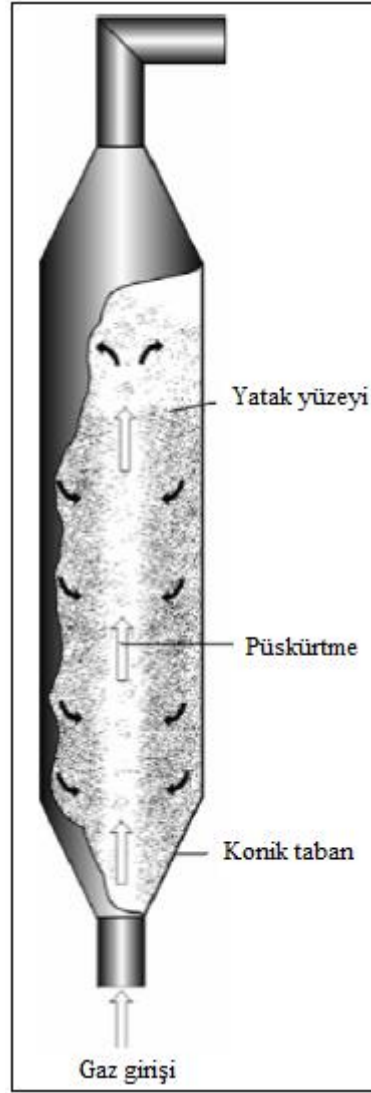
Bu tip akışkan yataklı kurutucularda titreşim kombinasyonu ile ürünler titreştirilerek sahte bir akışkan yatak ortamı oluşturulur. Minimum akışkanlaşma için ihtiyaç duyulan gaz hızı, geleneksel akışkan yataklı kurutucularda ihtiyaç duyulan gaz hızından daha azdır. Şekil 4.7’de titreşimli akışkan yataklı bir kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.7. Titreşimli akışkan yataklı bir kurutucu.

#### 4.2.2.4. Püskürtmeli Akışkan Yataklı Kurutucular

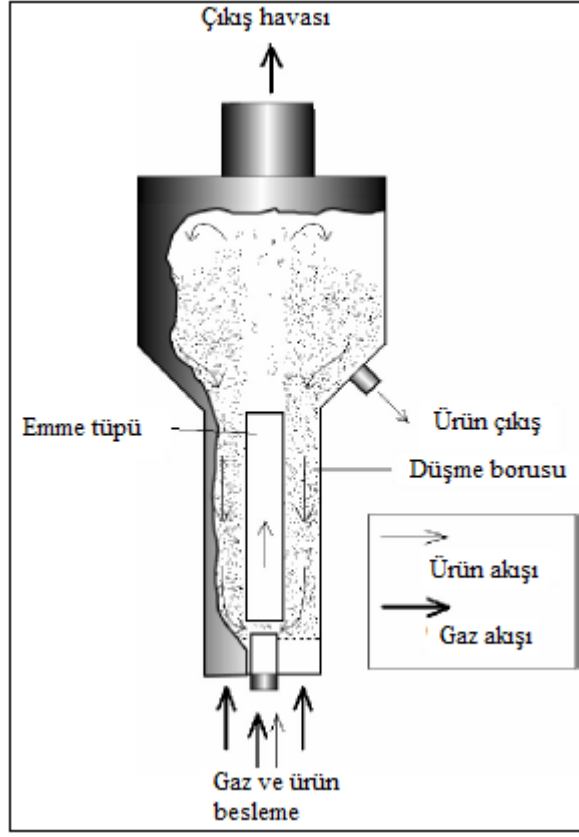
Püskürtmeli tip akışkan yataklı kurutucular geniş parçacıkların ( $> 5\text{mm}$ ) kurutulmasında oldukça kullanışlılardır. Püskürtmeli yatakta, yüksek gaz hızı yatağın altından girer ve parçacıklar boyunca hareket ederek parçacıkları taşır. Şekil 4.8’de püskürtmeli tip bir akışkan yataklı kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.8. Püskürtmeli akışkan yataklı bir kurutucu.

#### 4.2.2.5. Çevrimli Akışkan Yataklı Kurutucular

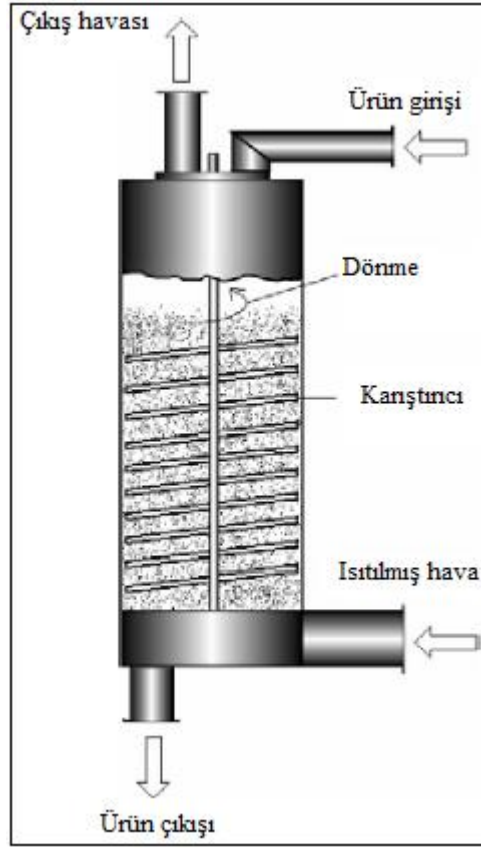
Sıradan bir püskürtmeli akışkan yataklı kurutucu içerisine bir emme tüpü yerleştirilmesiyle, bu yatağın kurutma karakteristikleri değişir. Bu tip akışkan yataklar çevrimli akışkan yatak olarak bilinir. Püskürtmeli akışkan yatağın aksine çevrimli akışkan yataklı kurutucuda maksimum püskürtme yatak yüksekliği ve minimum püskürtme hız limitleri yoktur. Şekil 4.9'da çevrimli akışkan yataklı bir kurutucu görülmektedir.



Şekil 4.9. Çevrimli akışkan yataklı bir kurutucu.

#### 4.2.2.6. Karıştırıcılı Akışkan Yataklı Kurutucular

Kurutulacak ince partiküllerde akışkanlaşma kalitesini arttırmannın yolların biride mekanik bir karıştırıcı kullanmaktır. Karıştırıcı sistem akışkan yatak boyunca homojen bir akışkan yatak formu oluşmasını sağlar. Bu tip kurutucular hamur gibi ince partiküllü malzemelerin kurutulması için çok kullanışlıdır. Karıştırıcının dönme etkisiyle hamurun sürekli olarak karışması ve macunumsu yapısının dağılması sağlanır. Bu tip bir kurutucu Şekil 4.10'da görülmektedir.

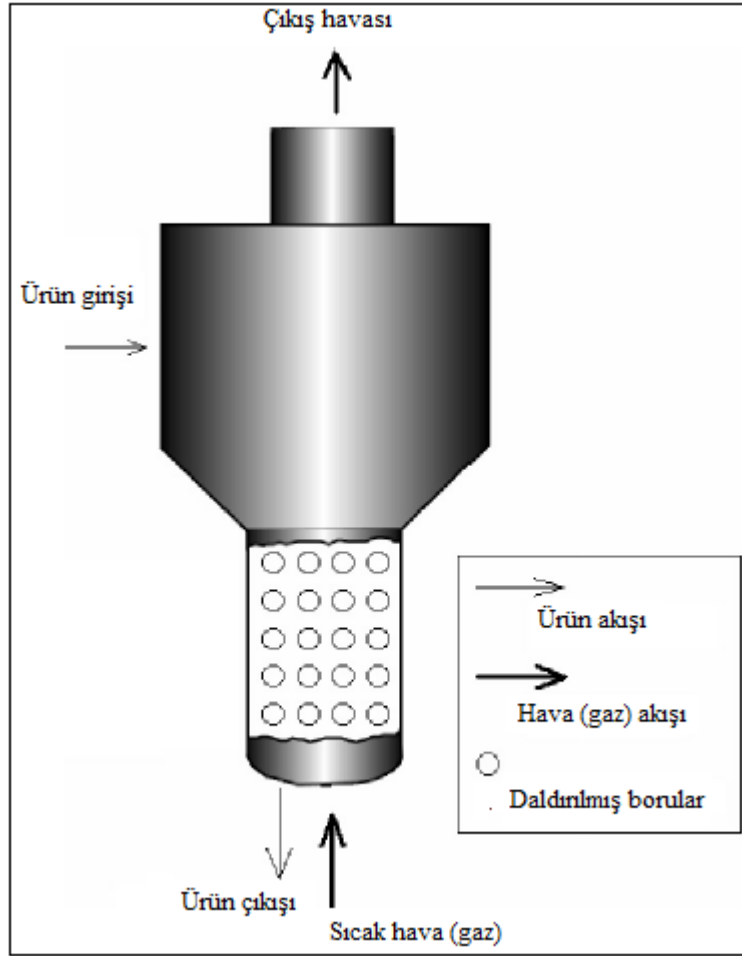


Şekil 4.10. Karıştırıcılı tip akışkan yataklı kurutucu.

#### 4.2.2.7. Daldırmalı Isı Değiştiricili Akışkan Yataklı Kurutucular

Dahili ısıtıcılar ya da daldırma tipi ısı değiştiricileri ile donatılmış akışkan yataklar kurutulan malzemeye endirekt olarak ısı transfer ederler. Bu sistemlerde, yatay boru demetleri dikey boru demetlerine göre daha geniş bir kullanım alanına sahiptir. Dahili ısıtıcılı ya da daldırma borulu akışkan yataklı kurutucular ince tozlar ve küçük boyutlu kurutma uygulamalarında kullanılır. Şekil 4.11’de daldırmalı ısı değiştiricili bir akışkan yataklı kurutucu görülmektedir.





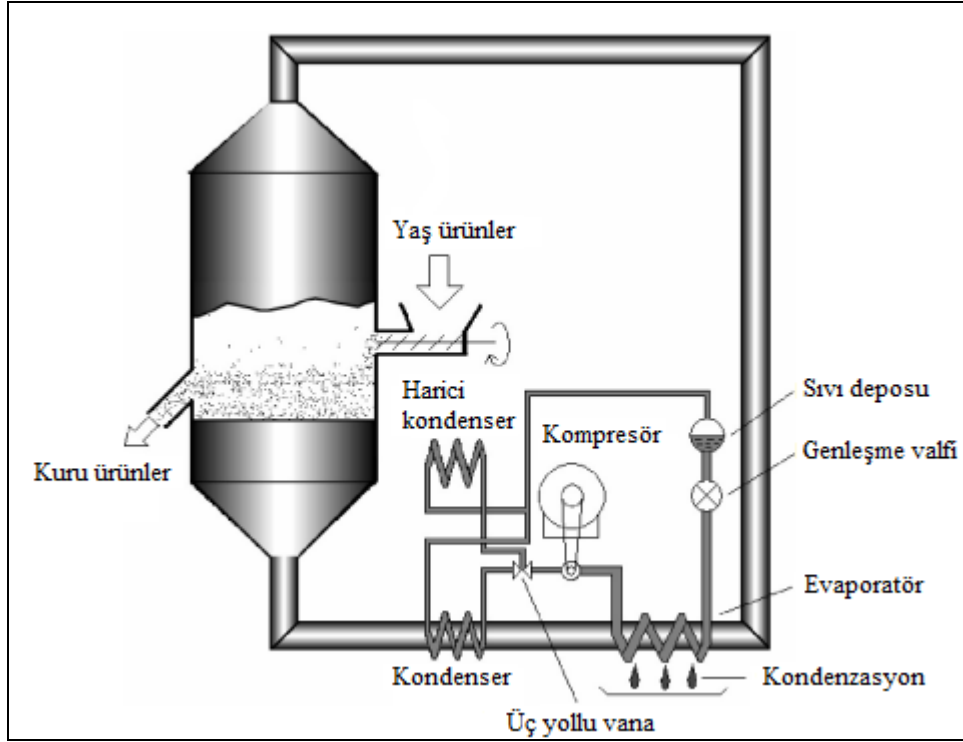
Şekil 4.11. Daldırmalı ısı değıştiricili bir akışkan yataklı kurutucu.

#### 4.2.2.8. Isı Pompalı Akışkan Yataklı Kurutucular

Sıradan bir akışkan yataklı kurutucu; fan, ısıtıcı, nem alıcı, akışkan yatak ve siklon kısımlarından oluşurken, sıradan bir ısı pompası sistemi ise; evaporatör, kondenser, kompresör ve genleşme valfi kısımlarından oluşur. Isı pompalı akışkan yataklı bir kurutucu kombinasyonunda kondenser ısıtıcı ve evaporatör nem alıcı olarak işlev yapmaktadır. Bu tip kurutucuların başlıca avantajları: yüksek özgül nem çekme oranına karşın düşük enerji tüketimi, yüksek performans katsayısı (COP), geniş bir kurutma sıcaklığı ( $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $110^{\circ}\text{C}$  arasında), çevreye dost olmaları ve yüksek ürün kalitesidir [53].

Tipik bir ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu sistemi Şekil 4.12'de görülmektedir. Sistemde ısı pompasının kondenserinden elde edilen kurutma havası akışkan yatağa

iletilmekte ve bu sayede kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Söz konusu sistem kapalı bir sistem olup, akışkan yataktan çıkan kurutma havası tekrar sisteme dahil edilmektedir. Bu sayede enerji tasarrufu da yapılmaktadır. Bu sistemde, kurutma havasının sistem evaporatöründen geçirilerek taşıdığı nemin yoğunlaşarak alınması hedeflenmiştir. Bu sayede dönüş havasının kurutma kabiliyetinin artırılması sağlanmaktadır.



Şekil 4.12. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu [53].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL OLARAK İNCELENEN AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMİNİN TANITIMI

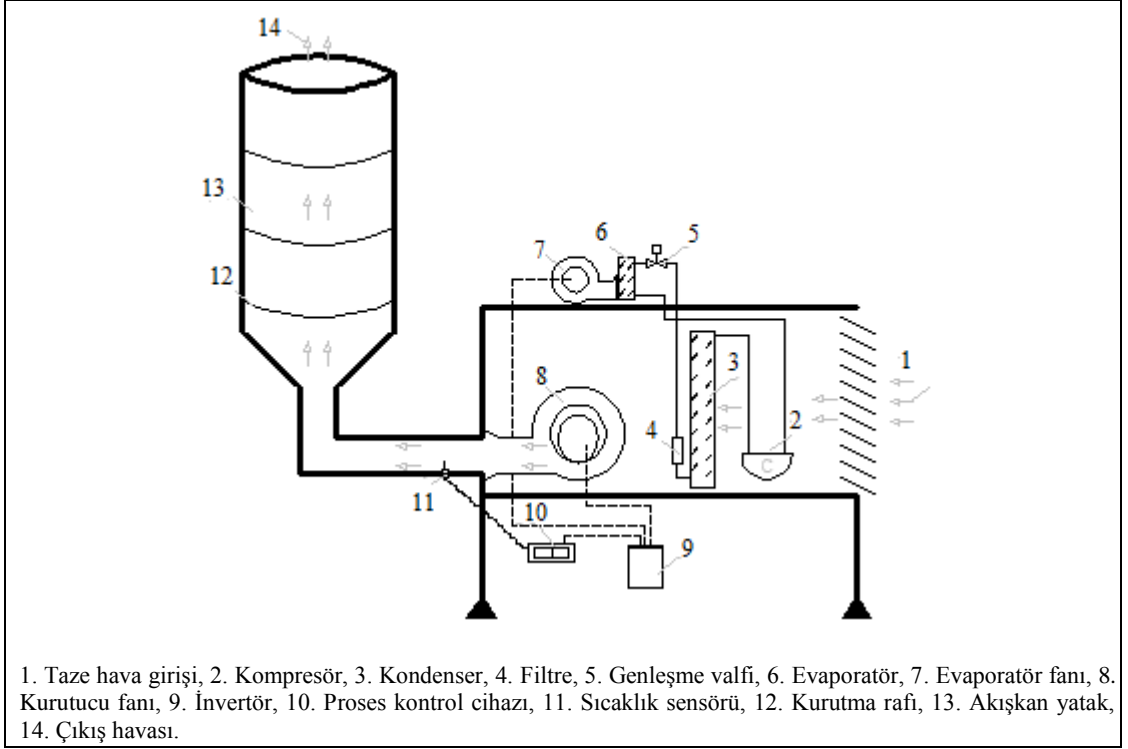
Bu bölümde tasarlanan ve imal edilen kurutma sisteminin her bir çalışma koşulu için şematik gösterimleri verilecek ve işletim prosedürleri açıklanacaktır.

Tasarlanan ve imal edilen ısı pompalı ve güneş enerjili akışkan yataklı kurutucunun kurutma performansı beş farklı çalışma modunda test edilmiştir. Bu çalışma modları sırasıyla şunlardır:

1. Isı pompalı çalışma modu,
2. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu,
3. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu,
4. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu,
5. Tümüleşik çalışma modu.

#### 5.1. ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU

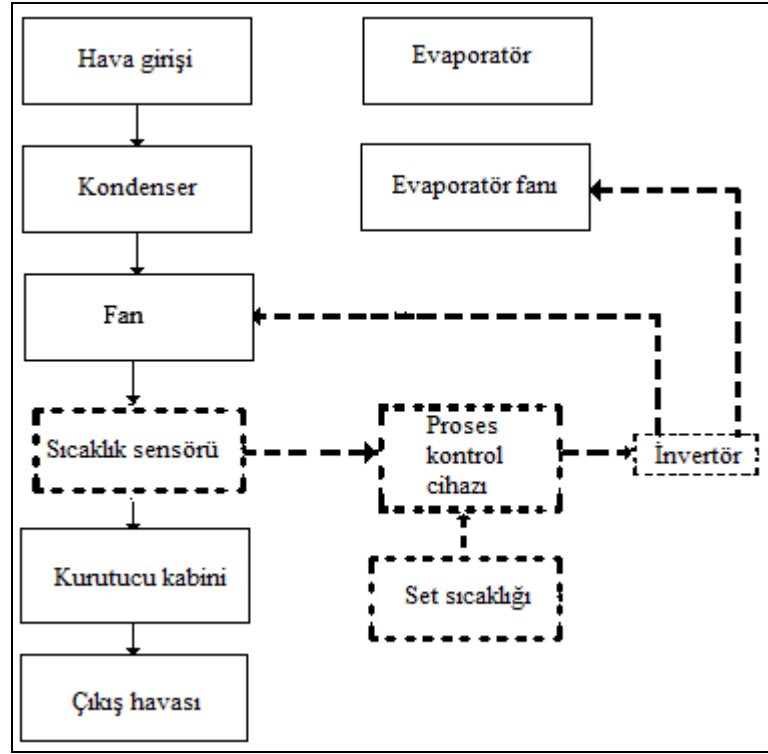
Bu çalışma modunda, sistem gerekli olan kurutma havası sıcaklığını sağlayabilmek amacıyla sadece ısı pompası sisteminin kondenserinden faydalanılmıştır. Sistem; kondenser, evaporatör, kompresör, genişleme valfi, kurutucu fanı, evaporatör fanı, invertör, proses kontrol cihazı ve akışkan yatak (kurutucu kabin) bölümlerinden oluşmaktadır. Isı pompalı kurutma sistemine ait şematik görünüm Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu.

Sistemde giriş damperinden (1) alınan hava, kompresör (2) ve kondenser (3) üzerinden geçirilmekte ve buradan atılan ısı kurutucu fanı (8) yardımıyla akışkan yatağa taşınmaktadır. Fan çıkışında bulunan sıcaklık sensörü (11) bu noktadan aldığı sıcaklık değerlerini proses kontrol cihazına (10), proses kontrol cihazı da bu verileri invertöre (9) aktarmaktadır. İnvörtör ayarlanan (set edilen) sıcaklık değerine göre fan debilerini kontrol eder. Kurutma havası ayarlanan sıcaklık değerinin altına düştüğünde, invertör kurutucu fanı ve dışarıda evaporatöre ait fanın (7) debilerini azaltarak sıcaklığı ayarlanan değere ulaştırır. Benzer şekilde bu durumun tersi de mümkündür. Sistemde kurutucudan çıkan hava tekrar kullanılmamıştır. Tekrar kullanılması ile kurutma havası nemi artacak ve havanın nem alma kapasitesi de düşecektir ve böylelikle kurutma süresi de uzayacaktır. Sistemde kullanılan havanın evaporatör üzerinden geçirilerek tekrar kullanılması mümkündür literatürde bu şekilde yapılan onlarca çalışma mevcuttur. Fakat bu durumda da kurutma havası sıcaklığının istenilen set sıcaklığında tutulması oldukça zorlaşacaktır. Keza evaporatör ve kondenser aynı ortamda olduğundan termodinamik denge için dışarıya bir yardımcı kondenser konulması gerekecektir. Yine bu şekilde yapılmış çalışmalar literatürde görülecektir. Bu çalışmayı literatürdekilerden farklı kılan en önemli etken

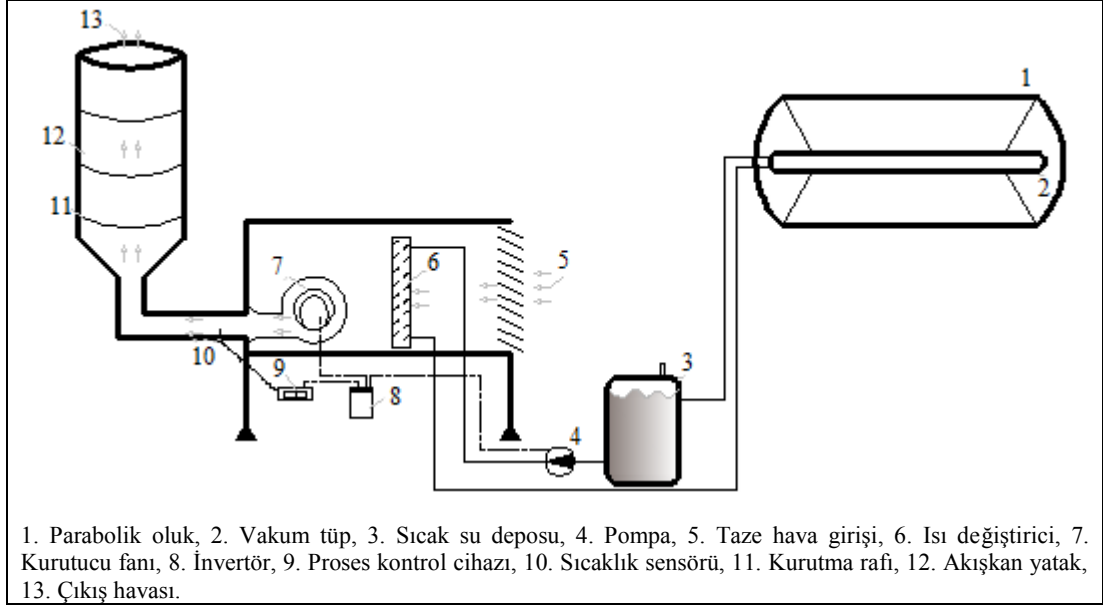
dışarıda evaporatöre ait fanın hızının kuruma havası sıcaklığına göre kontrol edilmesi olmuştur. Bu sayede diğer sistemlere oranla önemli miktarda elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmıştır. Sisteme ait mantıksal akış diyagramı Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Isı pompalı çalışma modu için kontrol sistemi akış diyagramı.

## 5.2. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ ÇALIŞMA MODU

Diğer bir çalışma modu olan, ısı kaynağının güneş enerjisinden sağlandığı parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucunun şematik gösterimi Şekil 5.3’te verilmiştir. Sistem; parabolik oluklu güneş kolektörü (1), vakum tüpü (2), sıcak su deposu (3), sirkülasyon pompası (4), kurutucu fanı (7), invertör (8), proses kontrol cihazı (9) ve akışkan yatak bölümlerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.3. Parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucu.

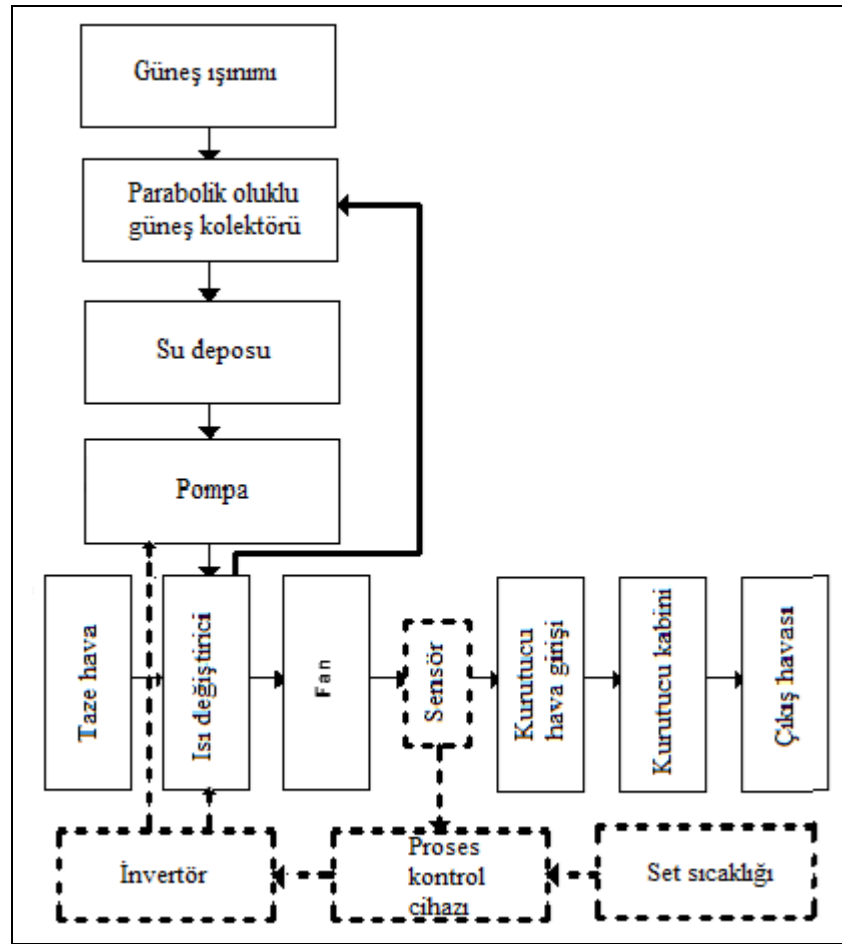
Sistemde parabolik oluklu güneş kolektöründe kullanılan vakum tüp içerisinde dolaşan su, sıcak su deposuna aktarılmakta ve pompa aracılığı ile ısı değiştiricisinden geçirilmektedir. Isı değiştiricisinden atılan ısı (6), fan (7) ile akışkan yatağa iletilmektedir. Fan çıkışında bulunan sıcaklık sensörü (10) bu noktadan aldığı sıcaklık değerlerini proses kontrol cihazına (9), proses kontrol cihazı da bu verileri invertöre (8) aktarmaktadır.

Eğer ayarlanan kurutma hava sıcaklığı, ölçülen değerden yüksek ise kurutucu fanının debisi ve dolayısıyla kurutma havası hızı azalır. Böylece ısı değiştiricisi üzerinden geçen hava debisi azalır ve kurutma havası sıcaklığı ayarlanan değerine ulaştırılır. Benzer şekilde, ayar değeri kurutma hava sıcaklığından yüksek olduğunda pompa debisi azalır. Bu durumda parabolik oluklu kolektörden geçen suyun debisi de azalır. Kolektör çıkış sıcaklığı pompa debisinin azalmasıyla artar. Böylece kurutma havası sıcaklığı ayar değeri sıcaklığına doğru yükselmeye başlar.

Eğer ayar değeri kurutma havası sıcaklığından düşük ise, kurutucu fanının debisi artar. Böylece ısı değiştirici üzerinden geçen taze havanın debisi de artar ve kurutma havası sıcaklığı ayar değerine doğru düşmeye başlar. Benzer şekilde, ayar değeri kurutma hava sıcaklığından düşük olduğunda pompanın debisi artar. Bu durumda

parabolik oluklu kolektörden (1) geçen su debisi de artar ve su sıcaklığı düşer. Başka bir ifadeyle, kurutma havası sıcaklıkları hava ve su hızlarının invertör tarafından ayarlanması ile set değerine ulaştırılır. Sistemin mantıksal akış diyagramı Şekil 5.4’te verilmiştir.

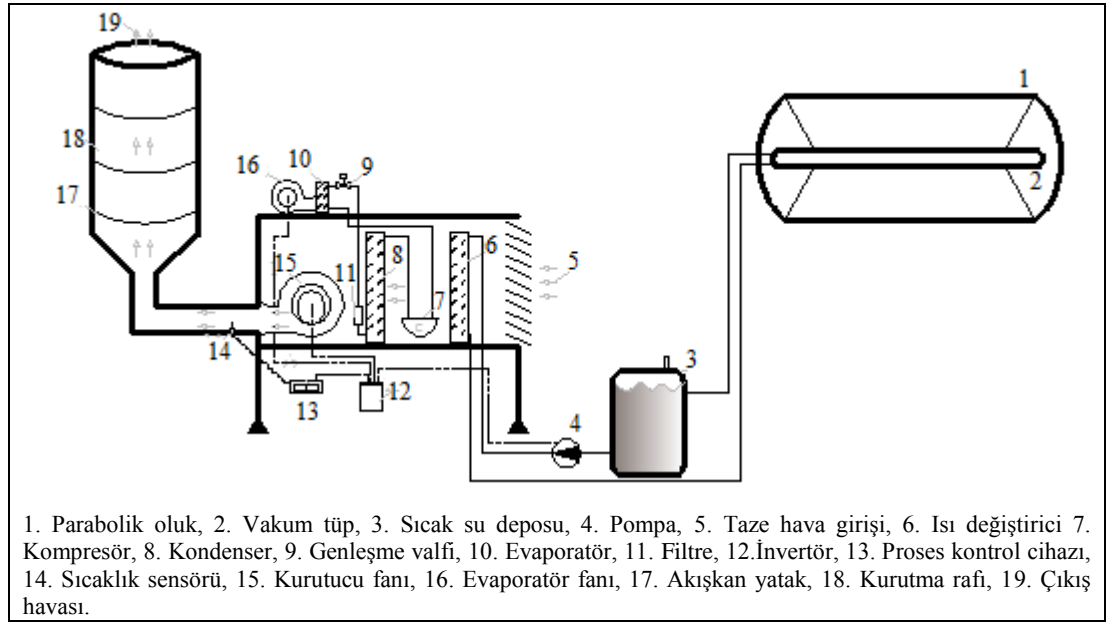
Sistemde düzlemsel sıvılı kolektörler kullanılması yerine parabolik oluklu güneş kolektörünün seçilmiş olmasının nedeni; düşük güneş ışınımlarında da istenilen kurutma havası sıcaklığına ulaşılabilmesi içindir. Kurutma havası sıcaklığı, kurutulacak ürün için en önemli parametrelerden biridir.



Şekil 5.4. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için kontrol sistemi akış diyagramı.

### 5.3. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU

Bu çalışma modu, parabolik oluklu güneş kolektörü ve ısı pompası sistemlerinin birleşiminden oluşmaktadır. Çalışma moduna ait şematik görünüm Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Sistem, güneş ışınımının yeterli olduğu zamanlarda parabolik oluklu güneş kolektörü yardımıyla gerekli olan enerjiyi sağlarken, güneş ışınımının yetersiz kaldığı veya gece saatlerinde ihtiyaç enerji, ısı pompası sisteminden sağlanmaktadır.



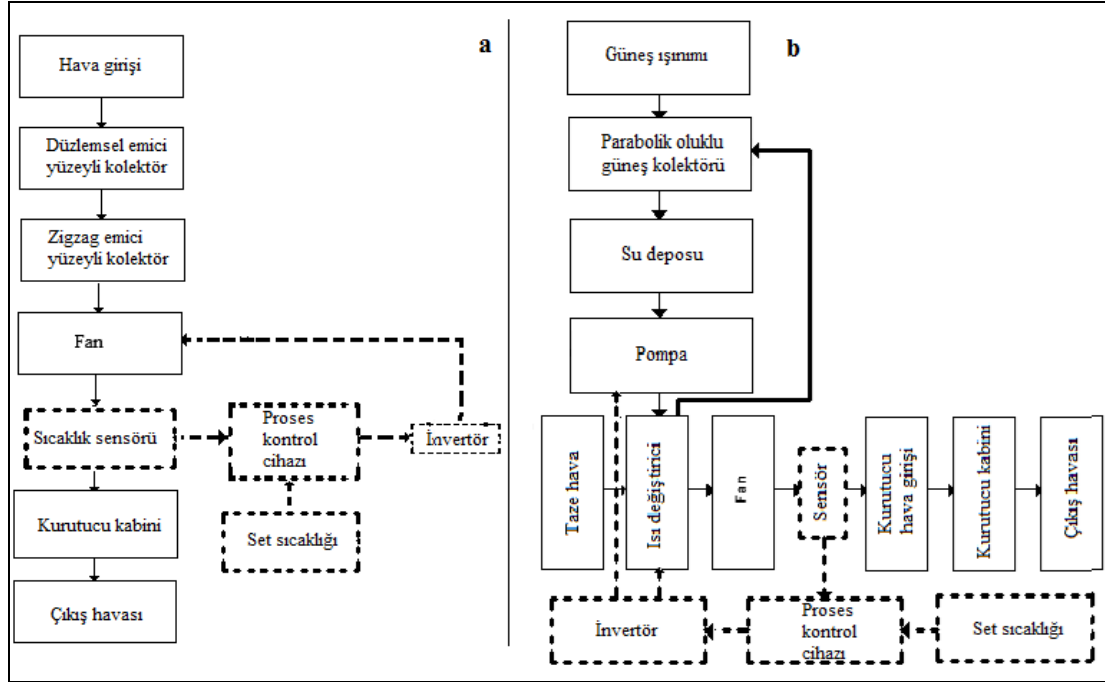
Şekil 5.5. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu.

Sistemi literatürdeki benzer çalışmalardan farklı kılan; parabolik oluklu güneş kolektörü ile kurutma için gerekli olan sıcaklığın sağlanabilmesidir. Düşük güneş ışınımı şiddetinde dahi sistem gün boyunca gerekli enerjiyi parabolik oluklu kolektör aracılığı ile sağlayacak ve kontrol sistemi ile istenilen sıcaklıkta tutabilecektir. Bunun için parabolik oluklu güneş kolektörüne entegre edilmiş vakum tüpte dolaşan sıcak su depoya aktarılmakta ve pompa aracılığı ile ısı değiştiricisinden geçirilmektedir. Ayarlanan kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak kurutucu fanı (15) ve pompa debileri (4) kontrol edilmektedir. Kurutma işleminin devam edebilmesi amacıyla, güneş ışınımı yetersiz veya akşam saatlerinde sistem ısı pompası modunda çalışmaya



devam edecektir. Ayarlanan kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak kurutucu fanı ve evaporatör fan debileri ve böylelikle kontrol edilebilmektedir.

Sisteme ait mantıksal akış diyagramının şematik gösterimi Şekil 5.6'da verilmiştir.

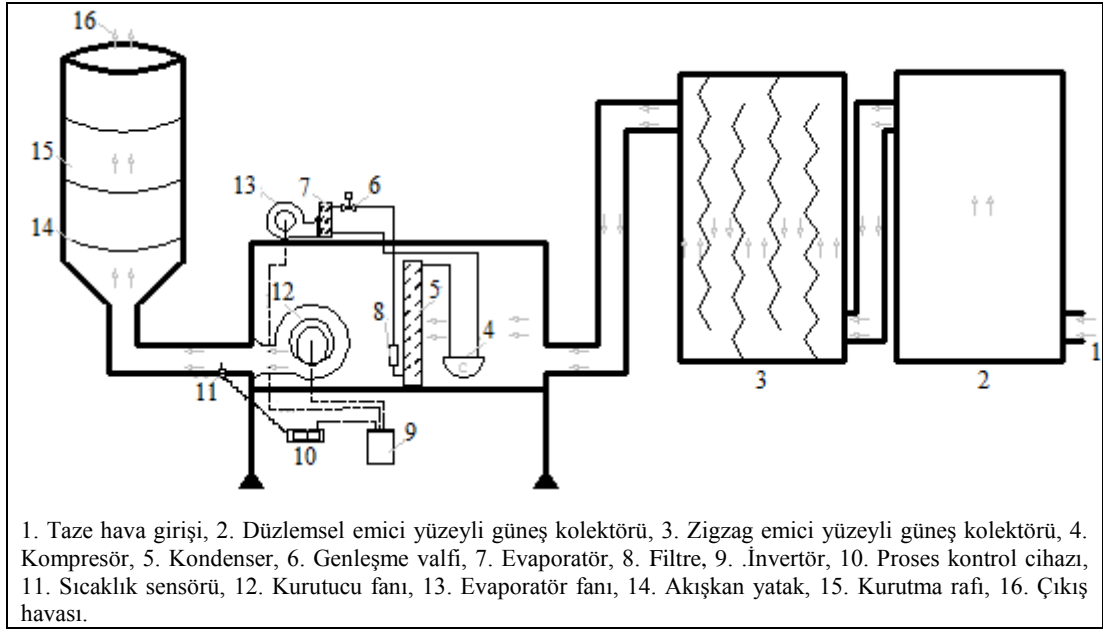


Şekil 5.6. Isı pompalı a) ve parabolik oluklu güneş kolektörlü b) çalışma modu için akış diyagramı.

#### 5.4. HAVALI GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU

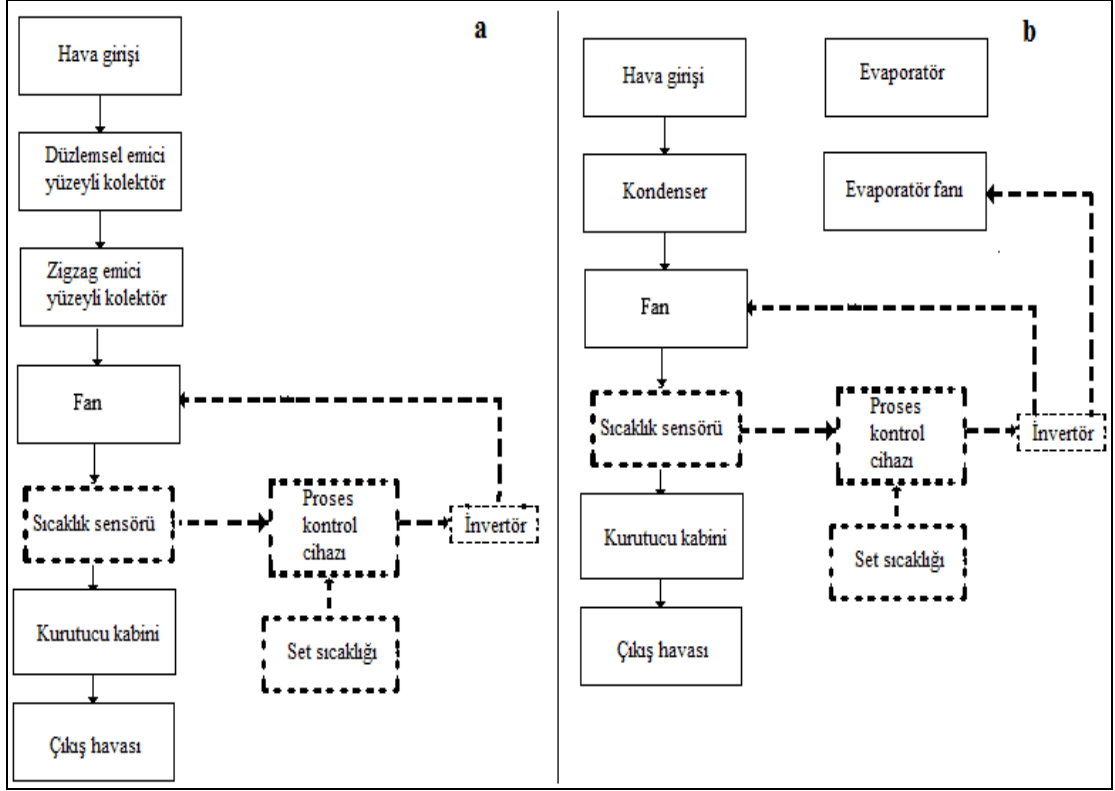
Bu çalışma modu, havalı güneş kolektörleri ve ısı pompası sisteminin birleşiminden oluşmaktadır. Sistemde farklı yapılaraya sahip iki adet güneş kolektörü (2 ve 3) kullanılmıştır. Bu kolektörlerden biri düzlemsel (2) bir emici yüzeye sahip olup, dış hava önce bu kolektöre giriş yapmaktadır. Bu kolektörde ısıtılan dış giriş havası ikinci kolektöre (3) girmektedir. İkinci kolektörün yapısı, ısıtılmış havanın daha fazla yüzey alanı ile temas edebilmesine imkan tanımak amacıyla zigzag şeklinde tasarlanmıştır. Bu kolektörden çıkan ısıtılmış kurutma havası kurutucu fanı yardımıyla (12) akışkan yatağa gönderilmektedir. Bu çalışma modunda gün boyu havalı güneş kolektörlerinden faydalanılmakta, akşam saatlerinde ya da güneş ışınımının kurutma için yeterli olmadığı diğer zamanlarda ısı pompası sisteminden

yararlanılmaktadır. Havalı güneş kolektörlerinden geçen havanın debisi, diğer çalışma modlarında olduğu gibi, kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak proses kontrol cihazı ve invertör yardımıyla kontrol edilir. Eğer kurutma havası sıcaklığı ayarlanan değerin üstüne çıkarsa, kurutucu fan debisi artırılarak sıcaklık ayar değerine ulaştırılır. Kurutma havası sıcaklığı ayar edilen değerin altına düşerse, kurutucu fan debisi düşürülerek sıcaklık set değerine ulaştırılır. Sistemin şematik görünümü Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu.

Sisteme ait mantıksal akış diyagramı Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Havalı güneş kolektörlü a) ve ısı pompalı b) çalışma modu için akış diyagramı.

## 5.5. TÜMLEŞİK ÇALIŞMA MODU

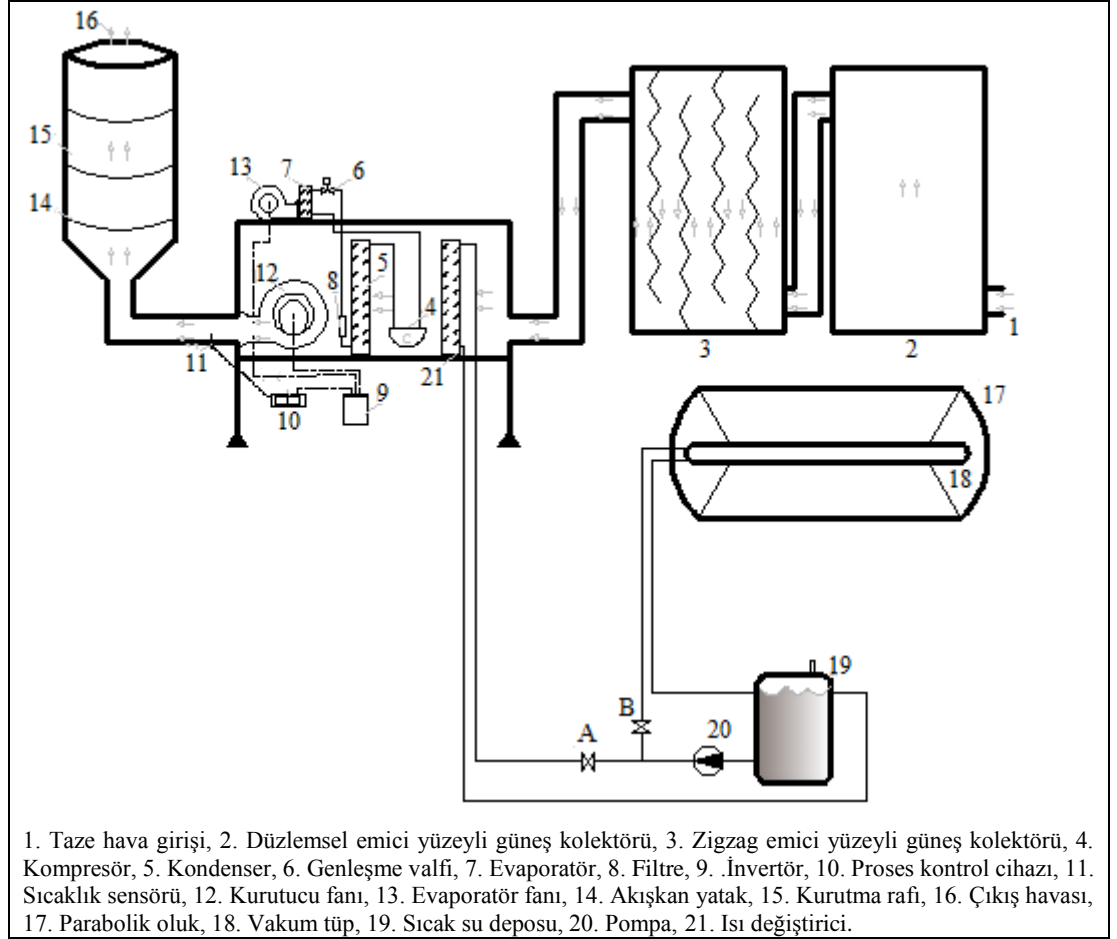
Bu çalışma modu, havalı güneş kolektörleri, parabolik oluklu güneş kolektörü ve ısı pompası sisteminin birleşiminden oluşmaktadır. Sistemin çalışma prensibi aşağıda açıklandığı gibidir:

1. Havalı güneş kolektörlü çalışma modu; havalı güneş kolektörlerinden gün boyunca kurutma işlemi için faydalanılır. Kurutma havası sıcaklığı, kolektörlerden geçen havanın debisi değiştirilerek ayar değerinde tutulmaya çalışılır.
2. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu; havalı güneş kolektörleri kurutma işlemi için gerekli ısı enerjisini sağladığı sırada, parabolik oluklu güneş kolektörü vasıtasıyla ısı enerjisi yalıtımlı bir depoda su yardımıyla toplanır. Havalı kolektörlerin kurutma havası sıcaklığını sağlayamadığı akşam

saatlerinde parabolik oluklu güneş kolektörü vasıtasıyla gündüz depolanan enerji kullanılmaya başlanır.

3. Isı pompalı çalışma modu; bu çalışma modu havalı güneş kolektörlerinin gün boyunca kullanılması ve devamında parabolik oluklu güneş kolektörü aracılığıyla depolanan enerjinin kullanımından sonra gelmektedir.

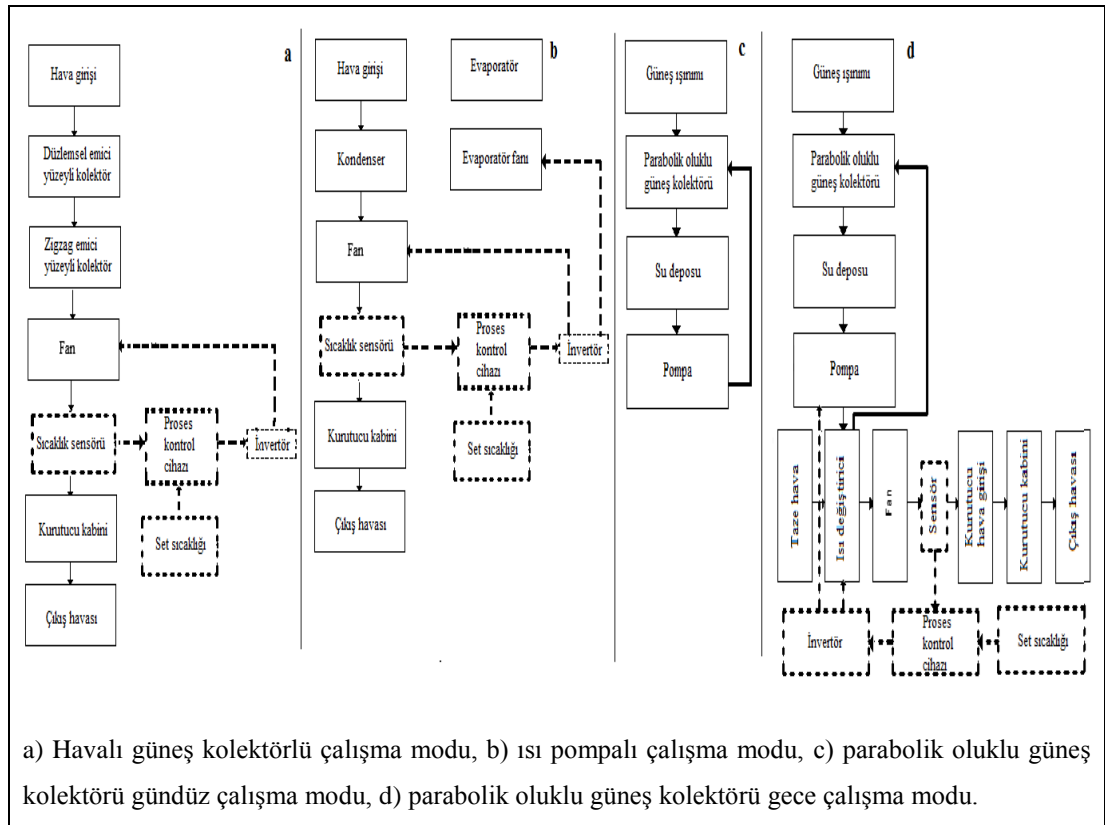
Üç farklı sistemin sırasıyla kullanılması tümleşik sistemi oluşturmaktadır. Sisteme ait şematik görünüm Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. Havalı güneş kolektörlü, parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu.

Sistemde, parabolik oluklu güneş kolektöründe dolaşan suyun gün boyunca sıcak su deposunda toplanabilmesi ve akşam saatlerinde ısı değiştiricisinden geçirilebilmesi iki adet vana yardımıyla sağlanmıştır. Bu vanalardan “A vanası” kapalı, “B vanası”

açık olduğunda, parabolik oluklu güneş kolektöründe dolaşan su, sıcak su deposuna dolmaktadır. Güneş ışımının yetersiz olup, havalı güneş kolektörlerinden elde edilen ısı miktarı düştüğünde, “A vanası” açık, “B vanası” kapalı konuma getirilir. Böylece, depolanmış olan sıcak su ısı değiştiricisinden geçmeye başlar. Bu sayede depolanmış olan enerji, kurutma havasına aktarılır. Sisteme ait mantıksal akış diyagramı Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10. Tümleşik çalışma modu için akış diyagramı.

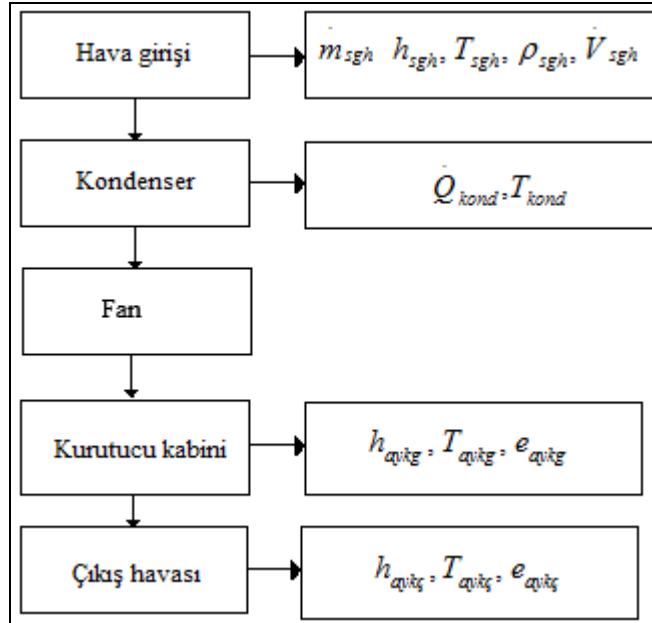
## BÖLÜM 6

### MATERYAL VE METOD

Bu bölümde deneysel sistemlerin teorik analizinin yapılabilmesi için kullanılan eşitlikler verilmiştir. Her bir sistemin çalışma prosedürleri ve akış diyagramları farklı olduğundan, sistemler ayrı ayrı ele alınacaktır. Bu bağlamda, Bölüm 5'te sıralanan başlıklara bağlı kalınarak sistemlerin teorik çözümleri gerçekleştirilmiştir.

#### 6.1. ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ

Çalışma modunun Teorik analizini gerçekleştirebilmek için kullanılan ölçüm noktalarına ait akış diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Isı pompalı çalışma modu için termodinamik akış diyagramı.

Kurutulan ürünlere ait kuru baza dayalı başlangıç nem içeriği aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$MC_{kb} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \quad (6.1)$$

Eşitlikte,  $M_i$  kurutulan ürünün başlangıç kütlesi ve  $M_d$  kurutulmuş halde ürün kütlesidir.

Nem oranı nem içeriklerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır [54,55].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (6.2)$$

Eşitlikte  $M$ ,  $M_e$ ,  $M_o$  sırasıyla, herhangi bir zamandaki nem içeriği, denge nem içeriği ve başlangıç nem içeriğidir. Nem oranı ifadesi aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir [56].

$$MR = \frac{M}{M_o} \quad (6.3)$$

Kurutma havası için kütle korunumu kanununun genel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum \dot{m}_{sgh} = \sum \dot{m}_{aykç} \quad (6.4)$$

Açık sistem için termodinamiğin birinci kanununa göre enerjinin korunumu ilkesinin genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{Q}_{kond} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{sgh} \cdot \left( h_{aykç} - h_{sgh} + \frac{V_{aykç}^2 - V_{sgh}^2}{2} \right) \quad (6.5)$$

Akışkan yataklı kurutucu içerisinde nem atma süreci boyunca kullanılan ısı miktarı aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\dot{Q}_{ayk} = \dot{m}_{sgh} \cdot (h_{aykg} - h_{aykç}) \quad (6.6)$$

Isı pompası sisteminde kondenserden birim zamanda atılan ısı miktarı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{sgh} \cdot C_{p,h} \cdot (T_{kond} - T_{sgh}) \quad (6.7)$$

$$\dot{m}_{sgh} = \rho_{sgh} \cdot \dot{V}_{sgh} \quad (6.8)$$

Isı pompası sisteminin performans katsayısı ( $COP_{ip}$ ) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$COP_{ip} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp}} \quad (6.9)$$

Sistemde kullanılan tüm ekipmanların güç tüketimlerine bağlı olarak tüm sistem performans katsayısı ( $COP_{ts}$ ) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilir.

$$COP_{ts} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_f + \dot{W}_{evap,f}} \quad (6.10)$$

Sistemin kurutma performansının değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biri özgül nem çekme oranıdır (SMER). Bu tanım, kurutulan üründen 1 kg nem çekebilmek için gereken enerji miktarını ifade eder. Tüm sistem için  $SMER_{ts}$  değeri aşağıdaki gibi ifade edilir [57].

$$SMER_{ts} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_f + \dot{W}_{evap,f}} \quad (6.11)$$



Akışkan yataklı kurutucuya ekserji girişi:

$$e_{aykg} = C_{p,h} \cdot \left[ (T_{aykg} - T_{\zeta ev}) - T_{\zeta ev} \ln \left( \frac{T_{aykg}}{T_{\zeta ev}} \right) \right] \quad (6.12)$$

eşitliği ile hesaplanır. Benzer şekilde ekserji çıkışı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$e_{ayk\zeta} = C_{p,h} \cdot \left[ (T_{ayk\zeta} - T_{\zeta ev}) - T_{\zeta ev} \ln \left( \frac{T_{ayk\zeta}}{T_{\zeta ev}} \right) \right] \quad (6.13)$$

Akışkan yataklı kurutucuda toplam ekserji kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\sum e_{kay} = \sum e_{aykg} - \sum e_{ayk\zeta} \quad (6.14)$$

Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi aşağıdaki gibi hesaplanır [58].

$$\eta_{e, ayk} = \frac{e_{ayk\zeta}}{e_{aykg}} \quad (6.15)$$

## 6.2. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ

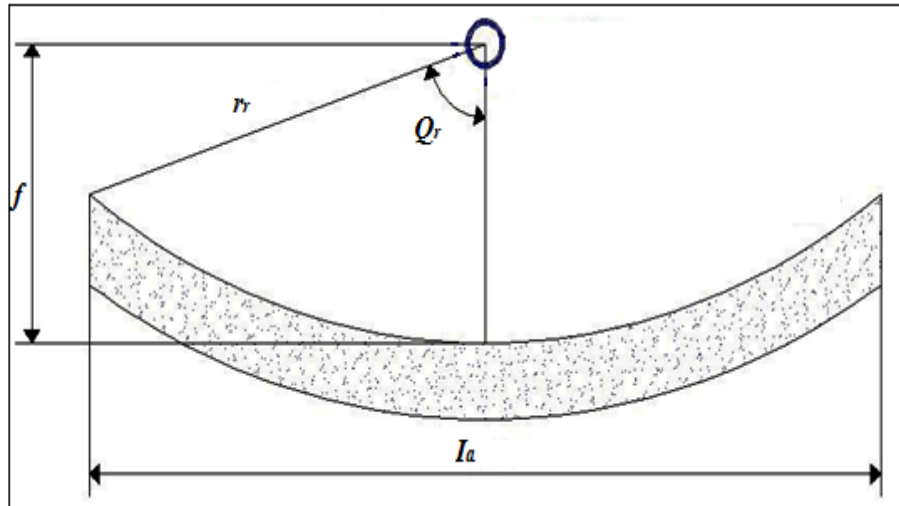
Parabolik oluklu güneş kolektörü kullanımında, kolektörden en fazla verimi elde edebilmek amacıyla bazı tasarım kriterlerine uyulması son derece önemlidir. Bu kriterlerden biri de konsantrasyon oranı olarak adlandırılır. Konsantrasyon oranı, parabolik oluklu güneş kolektörünün absorber borunun toplam alanı ve kolektörün açık yüzey alanı arasındaki orandır. Bu tanımın yanı sıra, iki güneş ışını arasında oluşabilen maksimum geliş açısı olarak da ifade edilebilir. Bu sayede güneş ışınları parabolik düzlem tarafından yansıtılır ve absorber boru tarafından yutulur. Konsantrasyon oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [59].

$$C_r = \frac{l_a \cdot l}{\pi \cdot d_o \cdot l} = \frac{l_a}{\pi \cdot d_o} \quad (6.16)$$

Eşitlikte  $d_o$  absorber borunun dış çapı,  $l$  kolektör uzunluğu ve  $l_a$  kolektör genişliği olarak ifade edilir. Geliş açısı geniş olduğunda daha az doğruluk takip sistemine ihtiyaç duyulacaktır. Bu sayede kolektörün konumunu sürekli değiştirmeye gerek kalmayacaktır.

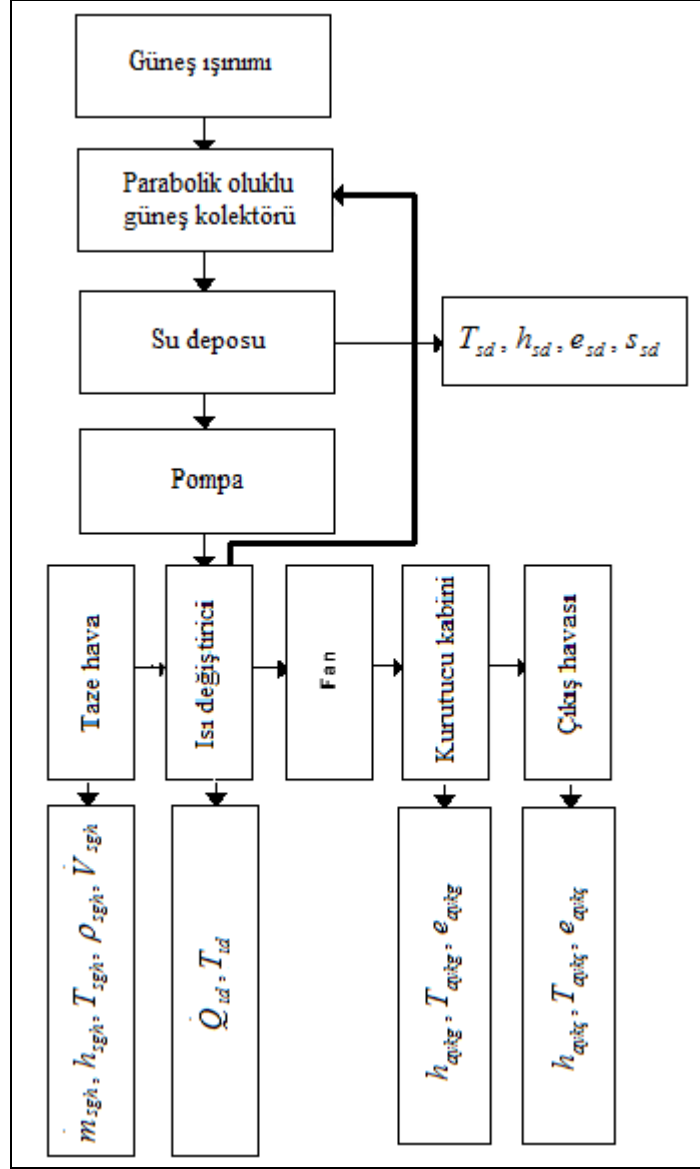
Parabolik oluklu güneş kolektörlerinde kullanılan kenar açısı değerleri genellikle  $70^\circ$  ve  $110^\circ$  arasındadır. Küçük kenar açıları tavsiye edilmez. Bu çalışmada tasarlanan parabolik oluklu güneş kolektöründe kenar açısı  $90^\circ$  olarak tasarlanmış ve Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Parabolik oluklu kolektör  $2 \text{ m}^2$  alüminyum levha ve  $2 \text{ m}$  vakum cam tüp kullanılarak imal edilmiştir. Kenar açısı  $\phi$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir [60-62].

$$\frac{l_a}{4f} = \tan \frac{\phi}{2} \quad (6.17)$$



Şekil 6.2. Parabolik oluklu kolektörün kenar açısı uzunlukları.

Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modunun teorik analizini gerçekleştirebilmek için kullanılan ölçüm noktalarına ait akış diyagramı Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için termodinamik akış diyagramı.

Parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucunun ısı değiştiricisinden atılan ısı miktarı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\dot{Q}_{id} = \dot{m}_{sgk} \cdot C_{p,h} \cdot (T_{id} - T_{sgk}) \quad (6.18)$$

Sistemin genel enerji verimi Eş. 6.19 kullanılarak ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{id}}{A.I_t + \dot{W}_f + \dot{W}_p} \quad (6.19)$$

Sistemin ısı değiştiricisinden elde edilen enerji miktarının, sistem bileşenleri tarafından harcanan enerjiye oranı Isıtma Performans Katsayısı (IPK) olarak tanımlanmış ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır. Buradaki ısıtma performans katsayısı, soğutma sistemleri için hesaplanan ısıtma tesir katsayısı (COP) değildir. Güneş enerjili sistemler için türetilmiş bir eşitlik olup, kolektörden elde edilen faydalı ısının sistem bileşenlerinde tüketilen elektrik enerjisine oranıdır [63].

$$IPK = \frac{\dot{Q}_{id}}{\dot{W}_f + \dot{W}_p} \quad (6.20)$$

Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için tüm sistem SMER değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$SMER_{ts} = \frac{\dot{m}_d}{A.I_t + \dot{W}_f + \dot{W}_p} \quad (6.21)$$

Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma sistemi için akışkan yataklı kurutucuya ekserji girişi:

$$e_{aykg} = C_{p,h} \cdot \left[ (T_{aykg} - T_{ev}) - T_{ev} \ln \left( \frac{T_{aykg}}{T_{ev}} \right) \right] \quad (6.22)$$

eşitliği ile hesaplanır. Benzer şekilde ekserji çıkışı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$e_{ayk} = C_{p,h} \cdot \left[ (T_{ayk} - T_{ev}) - T_{ev} \ln \left( \frac{T_{ayk}}{T_{ev}} \right) \right] \quad (6.23)$$

Akışkan yataklı kurutucuda toplam ekserji kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\sum e_{kay} = \sum e_{aykg} - \sum e_{aykç} \quad (6.24)$$

Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\eta_{e, ayk} = \frac{e_{aykç}}{e_{aykg}} \quad (6.25)$$

Parabolik oluklu güneş kolektörlü sistemin ısıtma santraline ait ekserji girişi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$e_{sg} = C_{p,su} \cdot \left[ (T_{sd} - T_{çev}) - T_{çev} \ln \left( \frac{T_{sd}}{T_{çev}} \right) \right] \quad (6.26)$$

Benzer şekilde ısıtma santraline ait ekserji çıkışı aşağıdaki gibidir.

$$e_{sç} = C_{p,su} \cdot \left[ (T_{aykg} - T_{çev}) - T_{çev} \ln \left( \frac{T_{aykg}}{T_{çev}} \right) \right] \quad (6.27)$$

Parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucunun ısıtma santralinde toplam ekserji kaybı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\sum e_{kay} = \sum e_{sg} - \sum e_{sç} \quad (6.28)$$

Isıtma santrali için ekserji verimi, çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı olarak, aşağıdaki gibi ifade edilir.

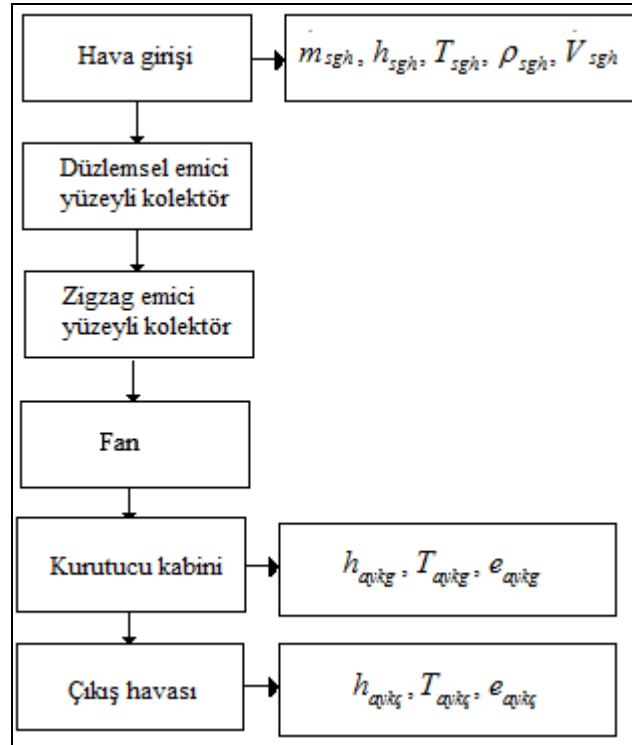
$$\eta_{e, sant} = \frac{e_{sç}}{e_{sg}} \quad (6.29)$$

### 6.3. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ

Bu çalışma moduna ilişkin teorik çözümler, Bölüm 6.1 ve Bölüm 6.2’de verilen eşitliklerin birleşiminden oluşmaktadır. Sistemin parabolik oluklu güneş kolektörlü veya ısı pompalı olarak çalışmasına göre ilgili eşitlikler kullanılarak termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

### 6.4. HAVALI GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ

Havali güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunun teorik analizini gerçekleştirebilmek için kullanılan ölçüm noktalarına ait akış diyagramı Şekil 6.4’te verilmiştir.



Şekil 6.4. Havali güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu için termodinamik akış diyagramı.

Havalı güneş kolektörlerinden akışkan yataklı kurutucuya aktarılan ısı miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{Q}_{hgk} = \dot{m}_{sgk} \cdot C_{p,h} \cdot (T_{aykg} - T_{sgk}) \quad (6.30)$$

Eş. 6.20'de tanımlanan IPK değeri, havalı güneş kolektörlü sistem için aşağıdaki gibi düzenlenir. Buradaki IPK havalı kolektörlerden elde edilen ısının, sistem üzerindeki fanın tüketmiş olduğu elektrik enerjisine oranıdır.

$$IPK = \frac{\dot{Q}_{hgk}}{\dot{W}_f} \quad (6.31)$$

Havalı güneş kolektörlü çalışma sistemi için sistem verimi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{hgk}}{A \cdot I_t + \dot{W}_f} \quad (6.32)$$

Havalı güneş kolektörlü çalışma modu için tüm sistem SMER değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$SMER_{ts} = \frac{\dot{m}_d}{A \cdot I_t + \dot{W}_f} \quad (6.33)$$

Havalı güneş kolektörlü çalışma sistemi için akışkan yataklı kurutucuya ekserji girişi:

$$e_{aykg} = C_{p,h} \cdot \left[ (T_{aykg} - T_{\zeta ev}) - T_{\zeta ev} \ln \left( \frac{T_{aykg}}{T_{\zeta ev}} \right) \right] \quad (6.34)$$

eşitliği ile hesaplanır. Benzer şekilde ekserji çıkışı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$e_{aykç} = C_{p,h} \cdot \left[ (T_{aykç} - T_{çev}) - T_{çev} \ln \left( \frac{T_{aykç}}{T_{çev}} \right) \right] \quad (6.35)$$

Akışkan yataklı kurutucuda toplam ekserji kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\sum e_{kay} = \sum e_{aykg} - \sum e_{aykç} \quad (6.36)$$

Sistemin ısı pompası ile çalışmasına yönelik hesaplamalarda, Bölüm 6.1’de verilen eşitlikler kullanılmıştır. Bu nedenle eşitliklerin yeniden yazımına gerek duyulmamıştır.

## 6.5. TÜMLEŞİK ÇALIŞMA MODU İÇİN TEORİK ANALİZ

Bu çalışma modu, havalı güneş kolektörleri, parabolik oluklu güneş kolektörü ve ısı pompası sisteminin birleşiminden oluşmaktadır. Sisteme ait teorik çözümler yapılırken, yukarıdaki bölümlerde açıklanan eşitlikler kullanılmıştır. Bu nedenle ilgili eşitliklerin yeniden yazılmasına gerek duyulmamıştır.

## 6.6. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Belirsizlik analizi verilen bilgilerin doğruluk sınırlarını belirler. Kurutucuda kullanılan ölçüm cihazının standart sapmaları göz önünde bulundurularak belirsizlikleri Eş. (6.37)-(6.41)’den hesaplanmıştır.

$$X_m = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (6.37)$$

$$V = \frac{1}{(N-1)} \sum (X_i^2 - X_m^2) \quad (6.38)$$



$$S = \sqrt{V} \quad (6.39)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (6.40)$$

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R a_i^2 \cdot S_i^2} \quad (6.41)$$

Eşitliklerde “ $X_m$ ” gözlemlerin aritmetik ortalaması, “ $X_i$ ” yapılan gözlemler, “ $N$ ” gözlem sayısı, “ $a$ ” hassasiyet, “ $S$ ” standart sapma, “ $V$ ” varyans, “ $U$ ” belirsizliktir [64,65].

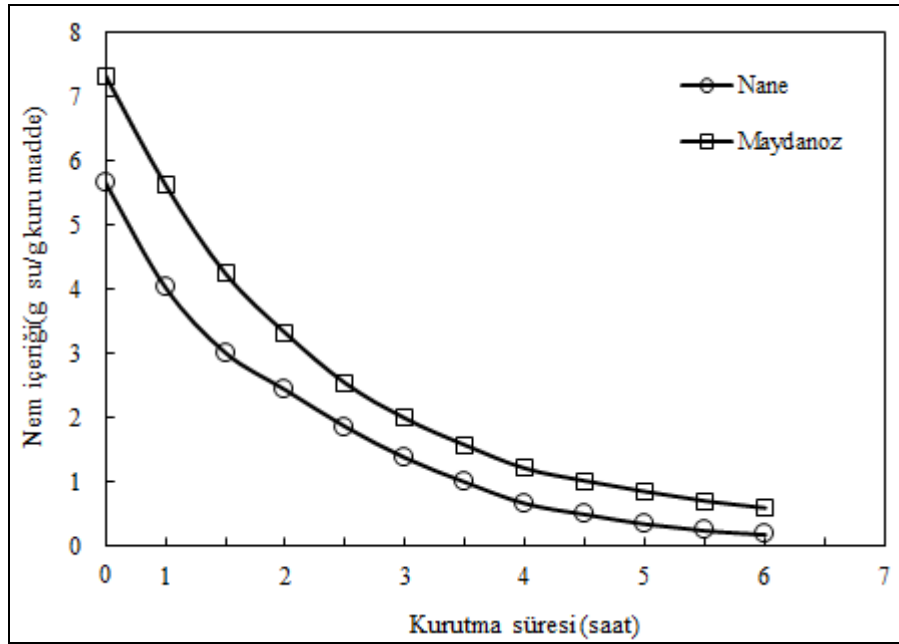
## BÖLÜM 7

### DENEYSEL ANALİZ

Bu bölümde deneysel sistemlerin sonuçları analiz edilerek yorumlanmıştır. Önceki bölümlerde olduğu gibi bu bölümde de her bir çalışma modu için ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır.

#### 7.1. ISI POMPALI ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

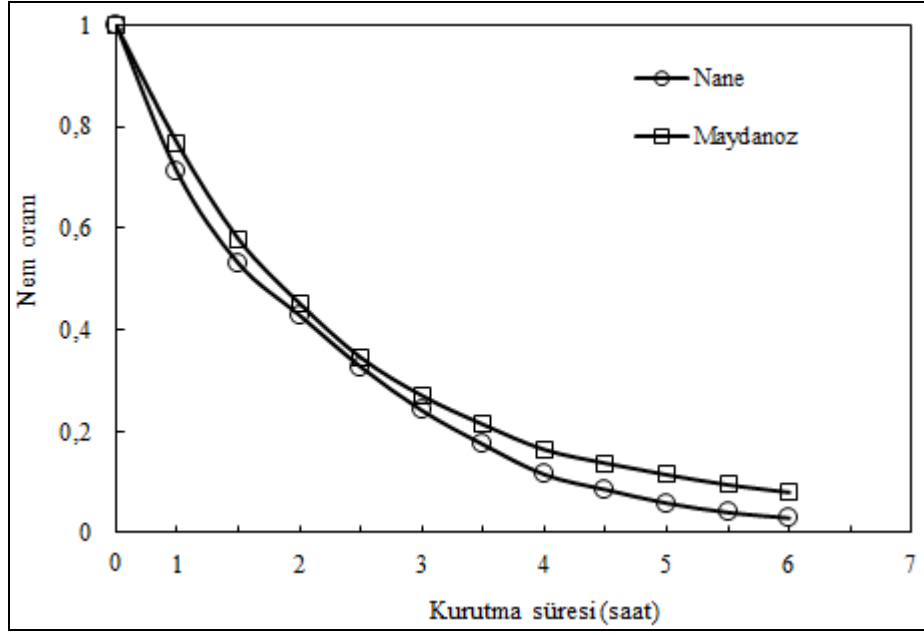
İlk deneysel sistem olan ısı pompalı akışkan yataklı kurutucunun deneysel analizinde nane ve maydanoz olmak üzere iki farklı ürün aynı anda kurutulmuştur. Sistemde kurutulan ürünlerin nem içeriklerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Nem içeriklerinin zamana göre değişimi.

Nane ve maydanoz sırasıyla; 5,67 g su / g kuru madde ve 7,33 g su / g kuru madde başlangıç nem içeriklerinden, 0,167 g su / g kuru madde ve 0,587 g su / g kuru madde son nem içeriklerine kadar 6 saatte kurutulmuştur.

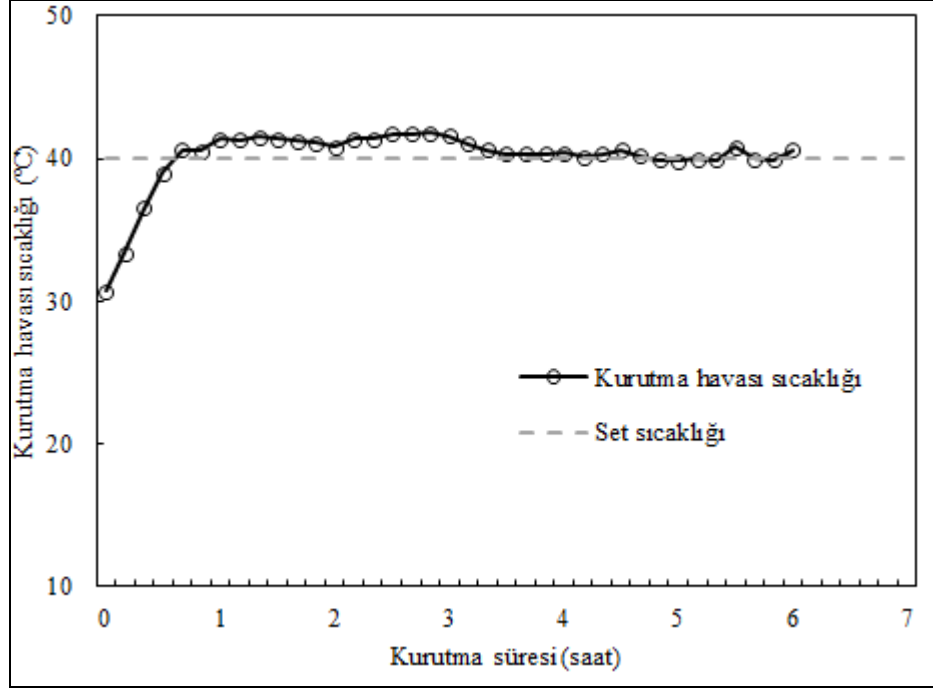
Kurutulan ürünlerin kurutma zamanına göre nem oranlarının değişimi Eş. 6.2 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, nem oranının kurutma süresinin başlangıcında oldukça hızlı bir biçimde düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün nedeni kurutma havasının sıcaklığı ile birlikte ürünlerin üzerinde bulunan serbest nemin hızlı bir biçimde atılmasıdır. Kurutma süresinin sonlarına yaklaşıldığında nem oranındaki değişim miktarı azalmıştır.

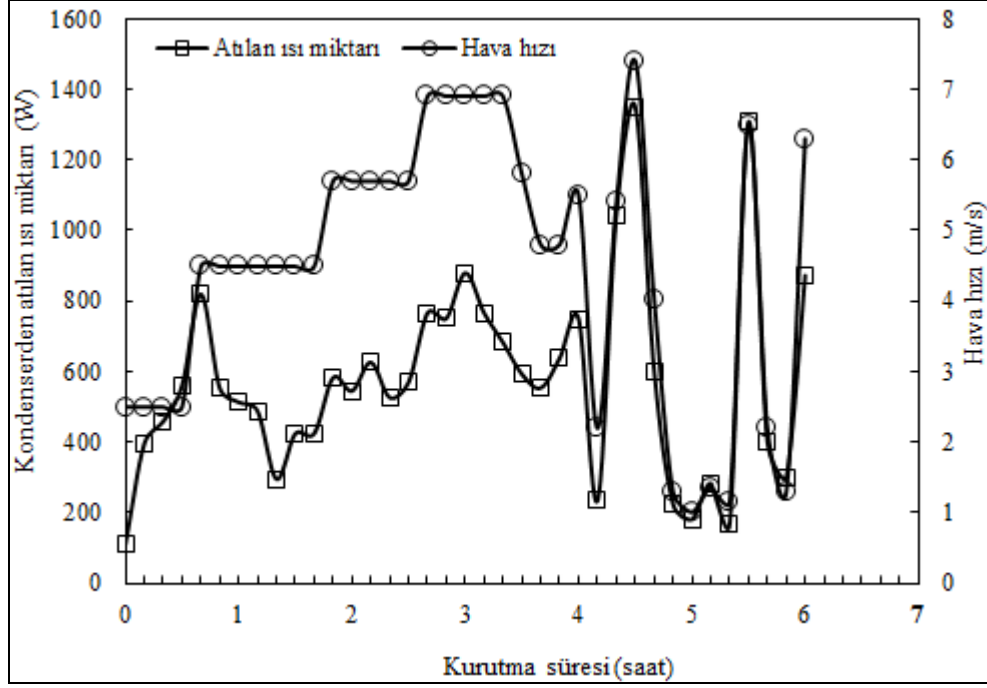
Sistemde kurutma havası sıcaklığı PID olarak kontrol edilmiştir. Sistemin set sıcaklığı 40°C olarak ayarlanmıştır. Şekil 7.3’te kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 7.3. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, kurutma havası sıcaklığının ayar değerine oldukça yakın bir seviyede kontrol edildiği görülmektedir. Kurutma süresinin yaklaşık bir saatlik periyodunu kapsayan ve geçici rejim olarak adlandırabileceğimiz kısım aşıldıktan sonra kurutma havası sıcaklığı iyi bir hassasiyetle set değerinde tutulmuştur. Bu hassasiyet veya salınım  $\pm 0,254$  °C olmuştur.

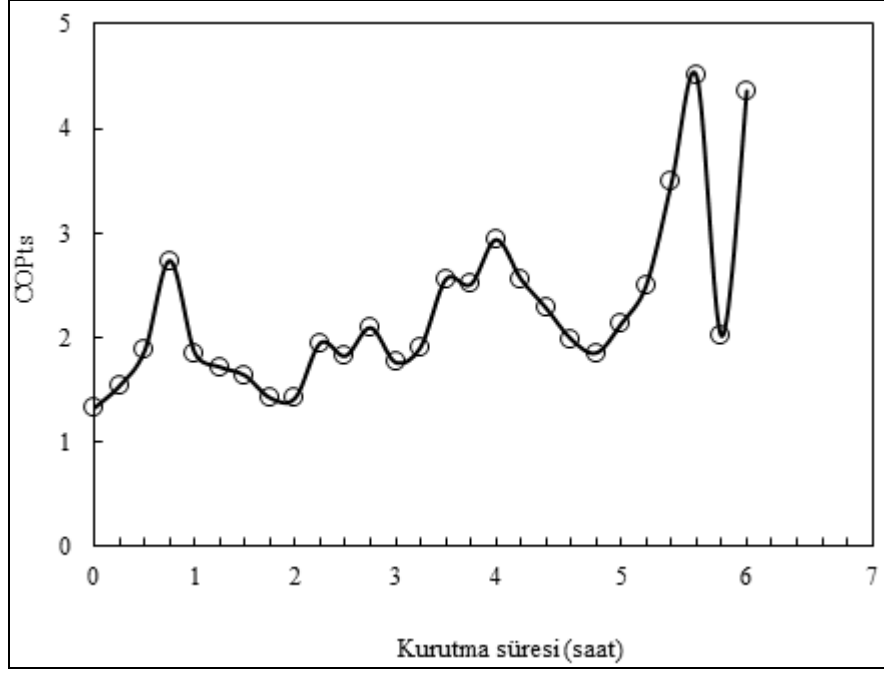
Isı pompalı kurutucunun kondenserinden atılan ısı miktarı ve kurutma havasının hızının kurutma süresine göre değişimlerini gösteren grafik Şekil 7.4'te verilmiştir. Isı pompası sisteminin kondenserinden atılan ısı miktarı Eş. 6.7 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.4. Atılan ısı miktarı ve hava hızının kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde kurutma havasının hızı, kurutma havası sıcaklığına göre kontrol edilmektedir. Bu nedenle kurutma havasının hızındaki artış, kurutma havası sıcaklığının azalması anlamına gelmektedir. Başka bir ifadeyle, kurutma havası sıcaklığı ve kurutma havasının hızı doğrudan ilişkilidir. Şekil 7.4 incelendiğinde, kurutma havasının hızının artışıyla birlikte Eş. 6.7 kullanılarak hesaplanan ısı değiştiricilerinden atılan ısı miktarlarının da arttığı görülmektedir.

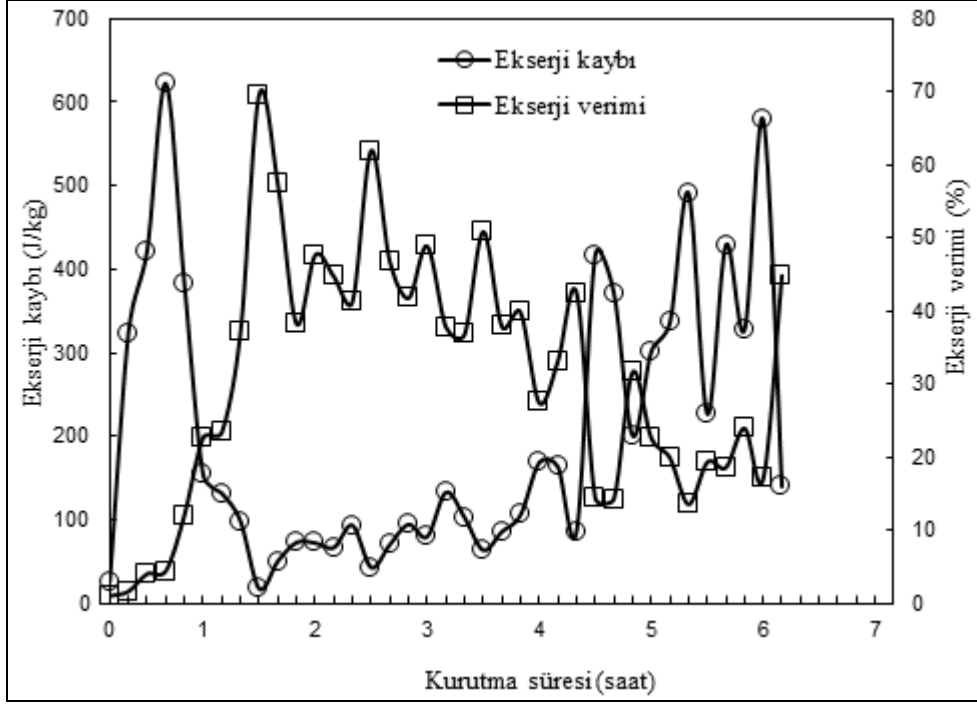
Gerek ısı pompalarında gerekse de soğutma makinelerinde verimin en önemli göstergesi performans katsayısı olan “COP” değeridir. Bu değer, birim zamanda atılan veya çekilen ısı miktarının kompresör tarafından tüketilen güce oranı olarak ifade edilir. Eğer kompresör tarafından tüketilen gücün yanı sıra diğer elemanların güç tüketimleri de hesaba katılırsa bu ifade tüm sistem performans katsayısı “COP<sub>ts</sub>” olarak ifade edilir. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için tüm sistem performans katsayısı (COP<sub>ts</sub>) Eş. 6.10 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 7.5’te gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Tüm sistem performans katsayısı (COP<sub>ts</sub>) değerinin kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, COP<sub>ts</sub> değerinin kurutma süresi boyunca salınımlı bir süreç geçirdiği görülmektedir. Bu salınımların nedeni, kurutma havası sıcaklığına göre sistem bileşenlerinin (kurutucu fanı ve evaporatör fanı) devrinin yavaşlaması veya hızlanmasıdır. Deneysel sonuçta ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu için COP<sub>ts</sub> değeri ortalama 1,91 olarak bulunmuştur.

Ekserji tersinir bir süreç sonucunda çevre ile denge sağlandığı takdirde, teorik olarak elde edilen maksimum iş miktarıdır. Yani ekserji en basit anlamda, enerjinin kullanılabilen kısmıdır ve kullanılabilirlik olarak da ifade edilir. Isı pompalı kurutucuda akışkan yatak için toplam ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin kurutma süresine göre değişimleri Şekil 7.6’da verilmiştir.



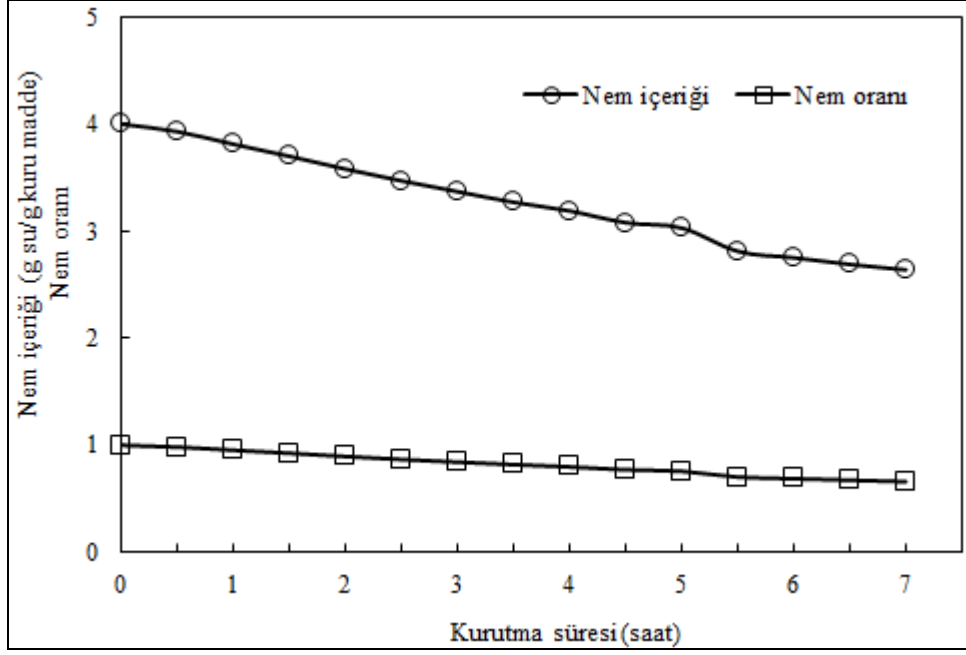
Şekil 7.6. Ekserji kaybı ve veriminin kurutma süresine göre değişimi.

Şekil incelendiğinde, akışkan yatak için toplam ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin salınımlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu durumun nedeni sistem bileşenlerinin güç tüketimlerinin, kurutma sıcaklığına göre değişebilmeleridir. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için ortalama ekserji kaybı 203,97 J/kg olarak hesaplanırken, ortalama ekserji verimi % 31,1 olarak hesaplanmıştır.

## 7.2. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

Bu çalışma modunda parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucuda beyaz dut kurutulma prosesi incelenmiştir. Beyaz dutlar 4 g su/g kuru madde nem içeriğinden, 2,64 g su/g kuru madde nem içeriğine kadar 7 saat süreyle kurutulmuşlardır.

Kurutulan dutlara ait nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik Şekil 7.7’de verilmiştir.

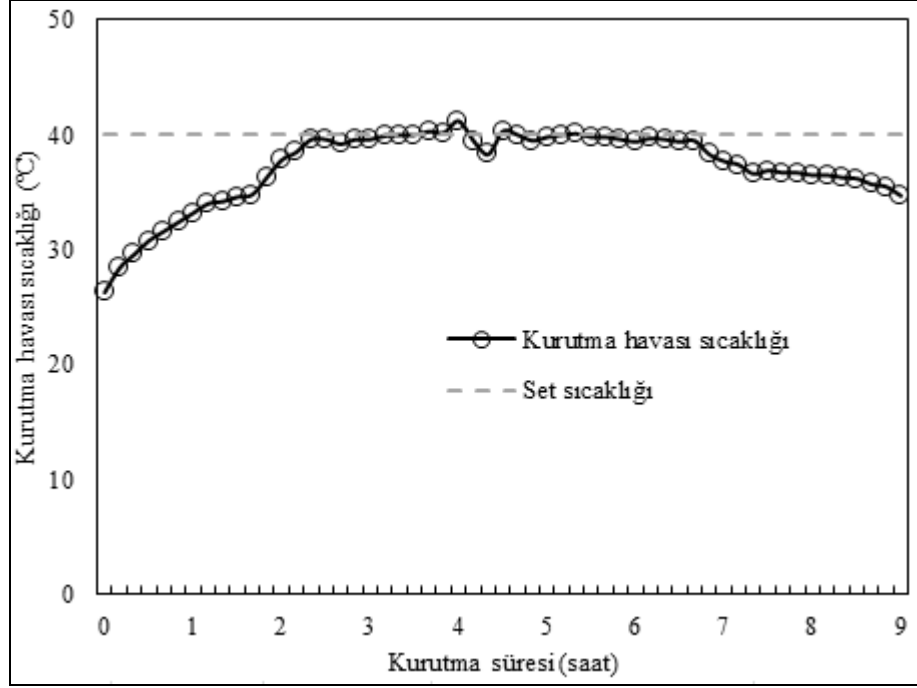


Şekil 7.7. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresinin başlangıcında, serbest nemde etkisiyle hızlı bir düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir. Dutlar yedi saatlik kurutma periyodunda kurutulmuşlardır. Güneş ışınımının azalmasıyla birlikte kurutma işlemine son verildiğinden, dutlar tam kuru ağırlıklarına yakın bir nem içeriğine indirilememişlerdir. Ancak elde edilen sonuçlar termodinamik analiz için yeterli olduğundan bu nem içeriği değeri uygun bulunmuştur.

Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik Şekil 7.8'de verilmiştir. Bu sistemde de set sıcaklığı 40 °C olarak ayarlanmıştır.



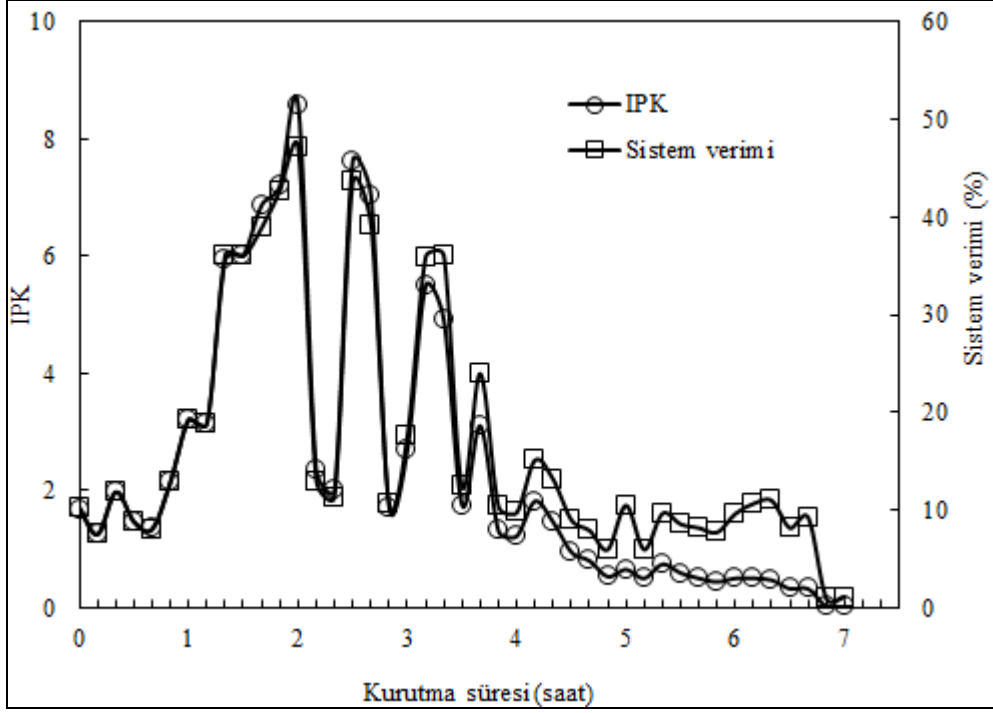


Şekil 7.8. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, parabolik oluklu güneş kolektörlü sistem için kontrol edilen kurutma havası sıcaklığının geçici rejiminin uzun olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni sistem için sağlanan kurutma havası sıcaklığının güneş ışınımı ile doğrudan ilişkisi olmasıdır. Özellikle güneş ışınımının düşük olduğu sabah saatlerinde, sistem uygun kurutma hava sıcaklığını sağlayamadığı için geçici rejim süresi de uzamıştır. Geçici rejim aşıldıktan sonra kurutma havası sıcaklığı set değerine yakın bir değerde kontrol edilmiştir. Bu sistem için hassasiyet  $\pm 0,369$  °C olarak hesaplanmıştır.

Daha iyi bir analiz yapabilmek adına hem ürüne ait hesaplamalarda hem de termodinamik analizlerde geçici rejim aşıldıktan sonraki şartlar için hesaplama yapılmıştır. Şekil 7.8’de kurutma süresinin dokuz saat olarak görülmesinin nedeni yaklaşık iki saatlik geçici rejim süresidir.

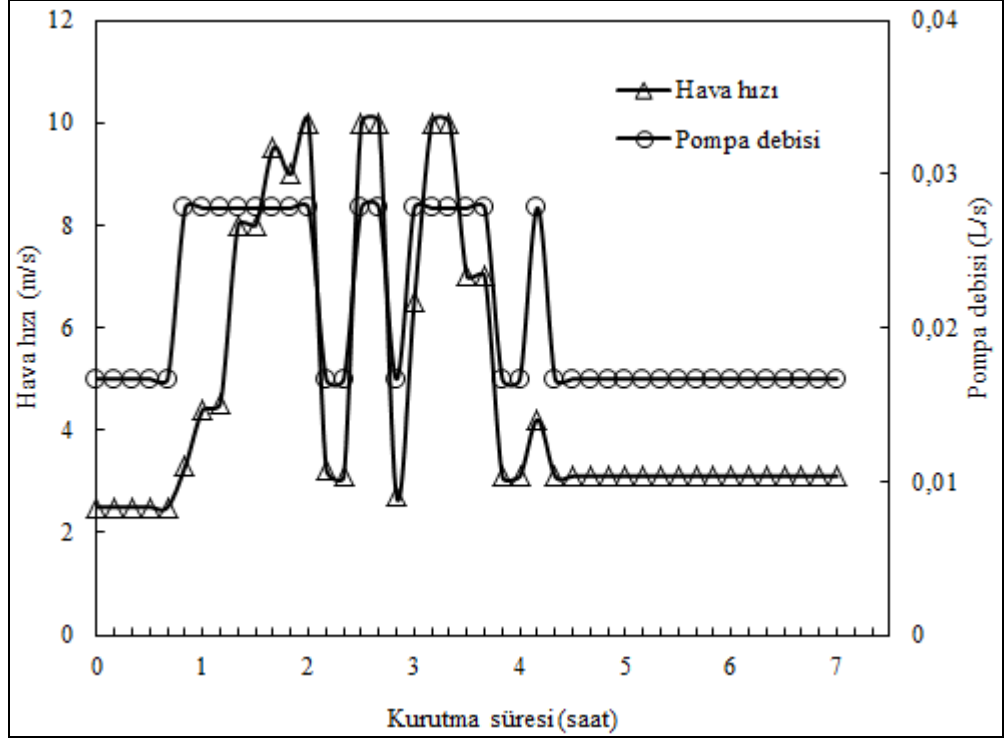
Şekil 7.9’da sistem verimi ve IPK değerlerinin kurutma süresine göre değişimleri verilmiştir.



Şekil 7.9. IPK ve sistem verimi değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.

Sistem verimi ve IPK değerleri sırasıyla Eş. 6.19 ve 6.20 kullanılarak hesaplanmıştır. Özellikle güneş ışınımının arttığı öğle saatlerinde IPK ve sistem verimi değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Grafiklerdeki dalgalanmaların nedeni kurutma havası sıcaklığını set değerinde tutabilmek amacıyla kurutucu fanı ve su pompası debilerindeki değişimlerdir. Deneyler boyunca sistem için ortalama IPK değeri 3 olarak hesaplanmıştır.

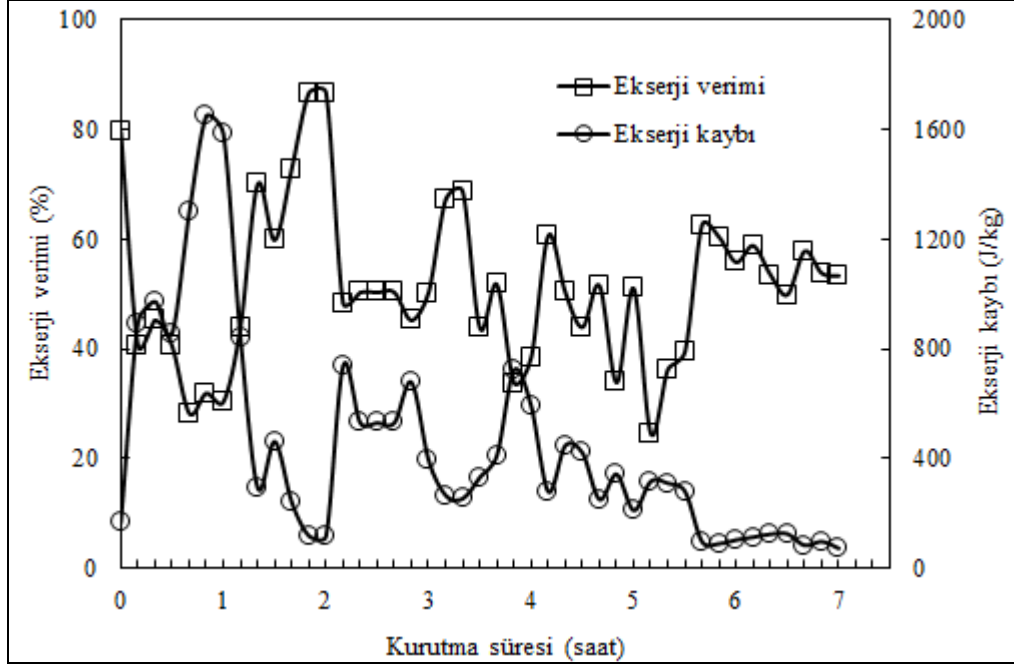
Kurutucu fanına ait hava hızı ve parabolik oluklu güneş kolektörünün su pompasına ait debi değerlerinin kurutma süresine göre değişimleri Şekil 7.10'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.10. Hava hızı ve pompa debisinin kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde kurutma havası sıcaklığı, kurutma havasının hızı ve pompa debisi kontrol edilerek set değerinde tutulmuştur. Bu nedenle, kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak kurutma havasının hızı ve pompa debisi de artmış veya azalmıştır. Sistemde deneyler boyunca ortalama kurutma hava hızı 4,69 m/s olarak ölçülürken, ortalama pompa debisi 0,02 L/s olarak ölçülmüştür.

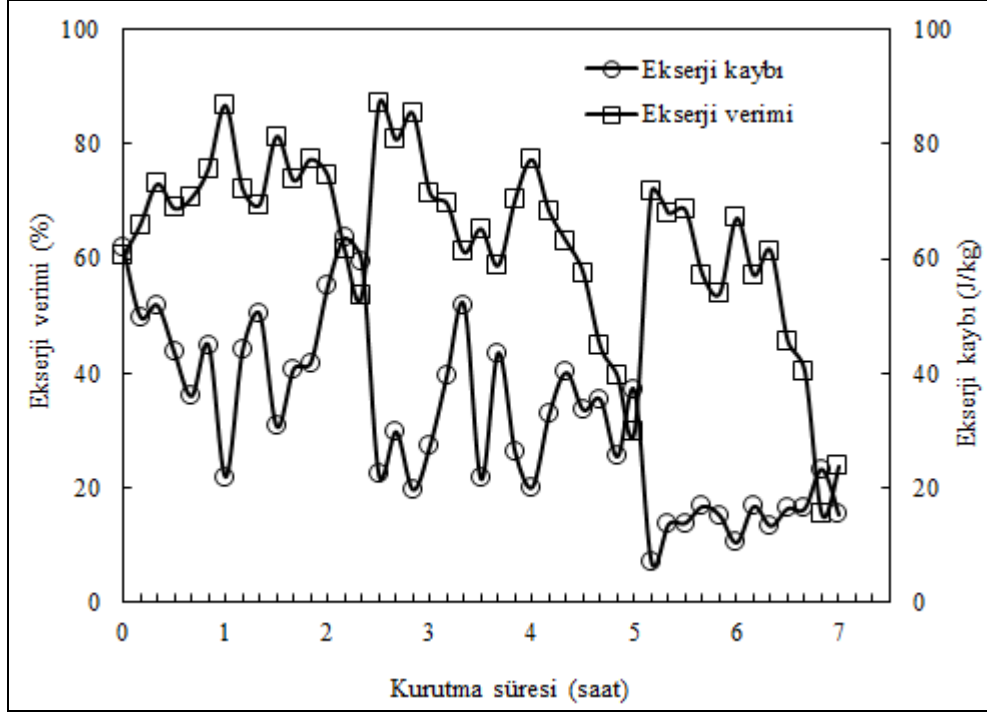
Sistemin ekserji performansının değerlendirilmesinde hem akışkan yatak ekserjisi hem de ısıtma santralının ekserjisi değerlendirilmiştir. Parabolik oluklu güneş kolektörü sisteminin ısıtma santrali için toplam ekserji kaybı ve ekserji verimi Eş. (6.26)-(6.29) kullanılarak hesaplanmış ve kurutma süresine göre değişimleri Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.11. Isıtma santrali için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, parabolik oluklu güneş kolektörlü sistem için ısıtma santrali toplam ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin kurutma süresi boyunca değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Deneyler süresince ortalama toplam ekserji kaybı ve ekserji verimi sırasıyla, 447,88 J/kg ve %52 olarak hesaplanmıştır.

Akışkan yatak için toplam ekserji kaybı ve ekserji veriminin kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.12’de verilmiştir.



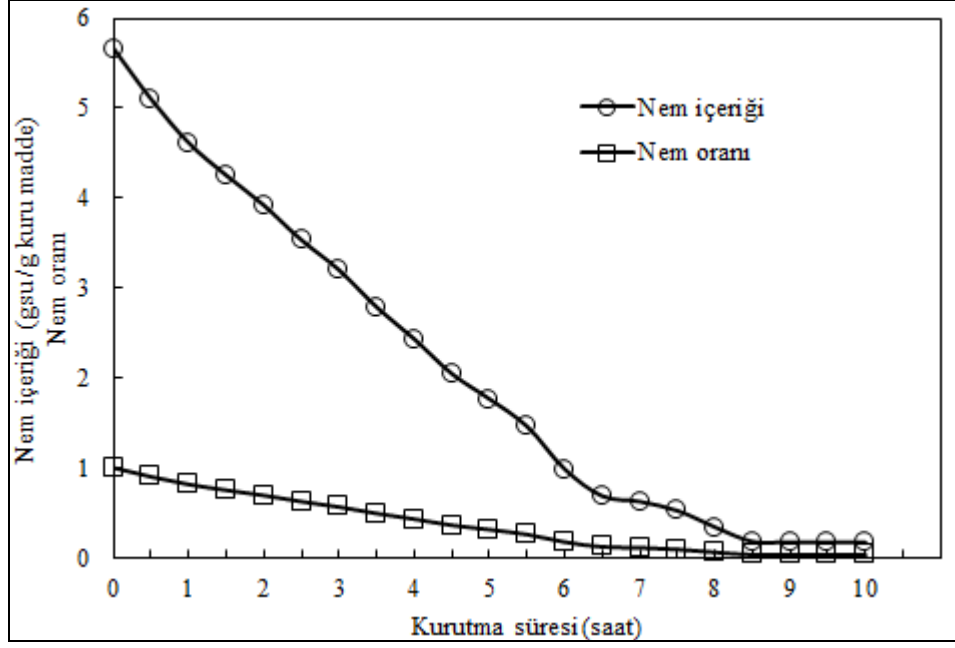
Şekil 7.12. Akışkan yatak için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi.

Akışkan yataklı kurutucu için deneyler süresince ortalama toplam ekserji kaybı 32,07 J/kg olarak hesaplanırken, ortalama ekserji verimi ise % 63,37 olarak hesaplanmıştır.

### 7.3. PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

Bu çalışma modunda nane yapraklarının parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı kurutucuda kurutulması incelenmiştir. Nane yaprakları 5,67 g su/g kuru madde başlangıç nem içeriğinden, 0,17 g su/g kuru madde nem içeriğine kadar on saatte kurutulmuşlardır.

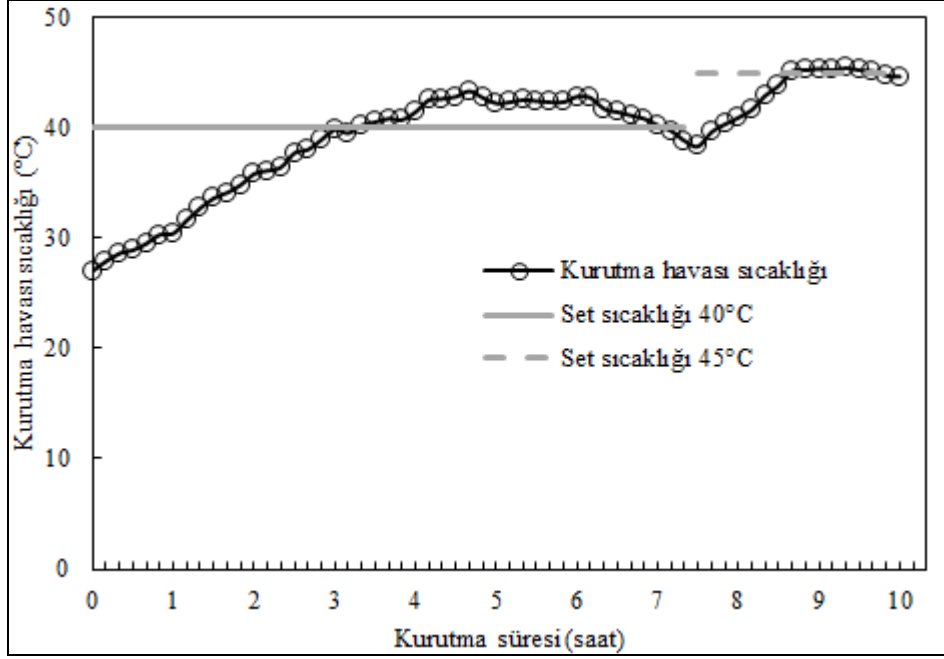
Nane yapraklarının nem içeriklerinin ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7.13. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, nem içerikleri değerlerinin ve nem oranlarının kurutmanın başlamasından itibaren sekiz buçuk saat süresince düşmeye devam ettiği, bu noktadan itibaren ise kurutma işleminin tamamlanmasıyla birlikte stabil hale geldiği görülmektedir.

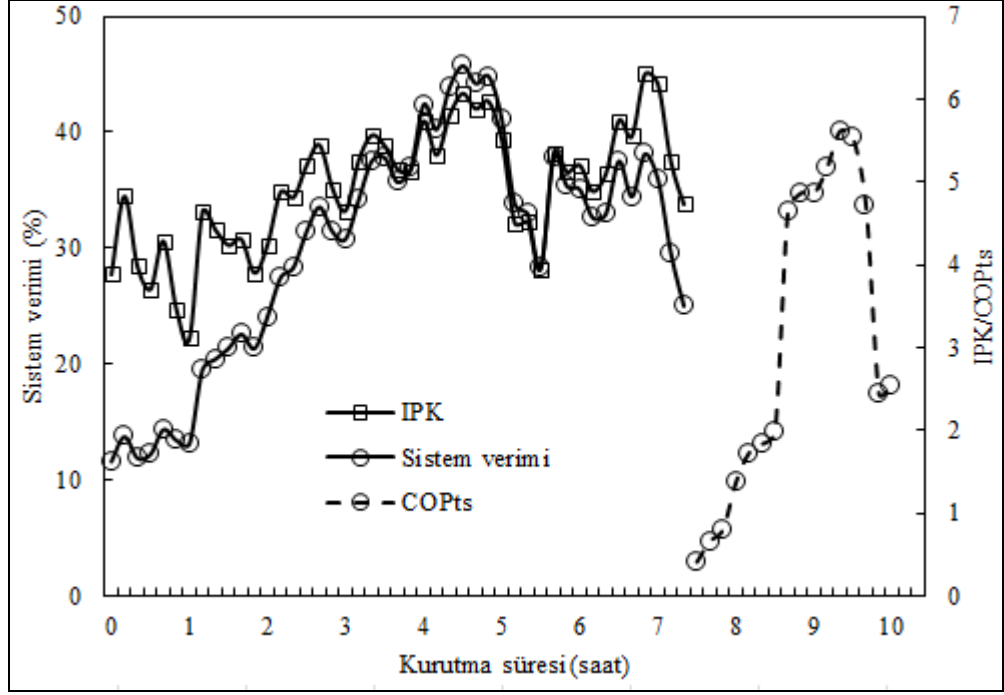
Sistemde kurutma havası sıcaklıklarının kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik Şekil 7.14'te verilmiştir.



Şekil 7.14. Kurutma havası sıcaklıklarının kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde kurutma havası sıcaklığı çalışma moduna göre iki farklı set sıcaklığında kontrol edilmiştir. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için kurutma havası set sıcaklığı 40°C olarak ayarlanırken, ısı pompalı çalışma modu için 45°C olarak ayarlanmıştır. Şekil incelendiğinde parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modunda geçici rejimin uzun sürdüğü görülmektedir. Bu durumun başlıca nedeni, sistemin kontrol edilmek istenen kurutma havası sıcaklığını elde edebilmek için güneş ışınımı değerinin yükselmesine ihtiyaç duymasıdır. Bu nedenle özellikle güneş ışınımının yetersiz olduğu gündüz saatlerinde sistemin geçici rejimi de uzun sürmüştür. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için kurutma havası sıcaklığı  $\pm 0,538^{\circ}\text{C}$  hassasiyette kontrol edilirken, ısı pompalı çalışma modu için bu değer  $\pm 0,468^{\circ}\text{C}$  olmuştur.

Sistem verimi, IPK ve  $\text{COP}_{\text{ts}}$  değerlerinin kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik Şekil 7.15'te verilmiştir.

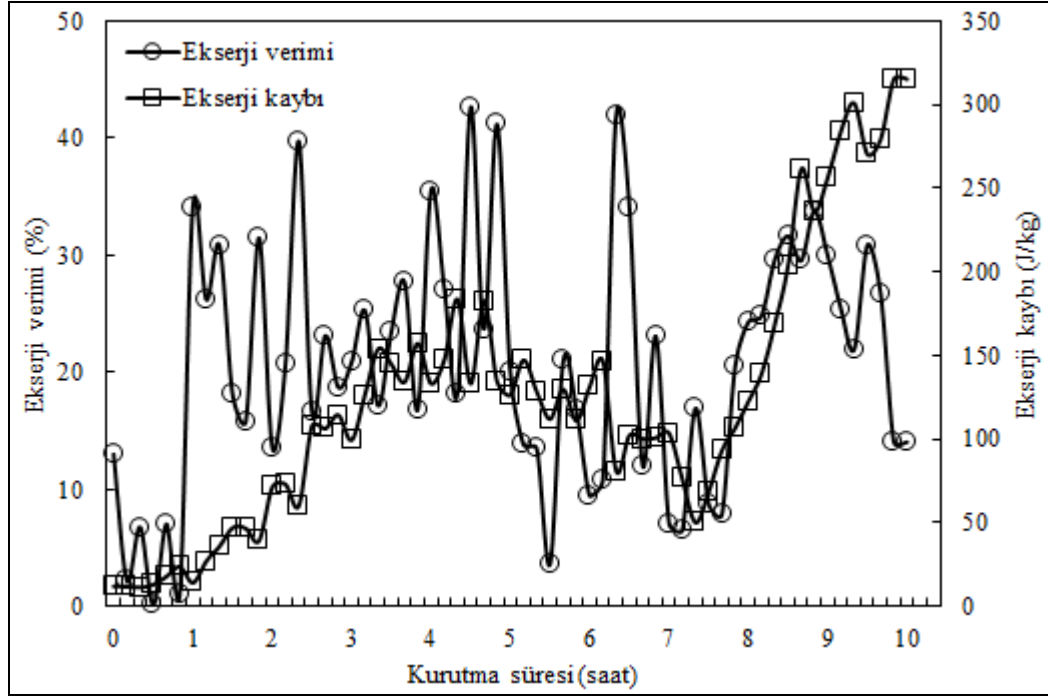


Şekil 7.15. Sistem verimi, IPK ve COPts değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.

Sistem verimi, IPK ve  $COP_{ts}$  değerleri kurutma süresince salınımlı bir değişim süreci göstermişlerdir. Bu durumun nedeni, set edilen kurutma havası sıcaklıklarını sağlayabilmek amacıyla sistem bileşenlerinin üfleme hızı, debi ve dolayısıyla da güç tüketim değerlerinin değişmesidir. Deneyler boyunca parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için ortalama sistem verimi %27,73 olarak hesaplanırken, IPK değeri 4,22 olarak hesaplanmıştır. Isı pompalı çalışma modu için tüm sistem performans katsayısı ( $COP_{ts}$ ) deneyler boyunca ortalama olarak 3,07 olarak hesaplanmıştır.

Akışkan yataklı kurutucu için toplam ekserji kaybı ve ekserji verim değerlerinin kurutma süresine göre değişimlerini gösteren grafik Şekil 7.16'da verilmiştir.





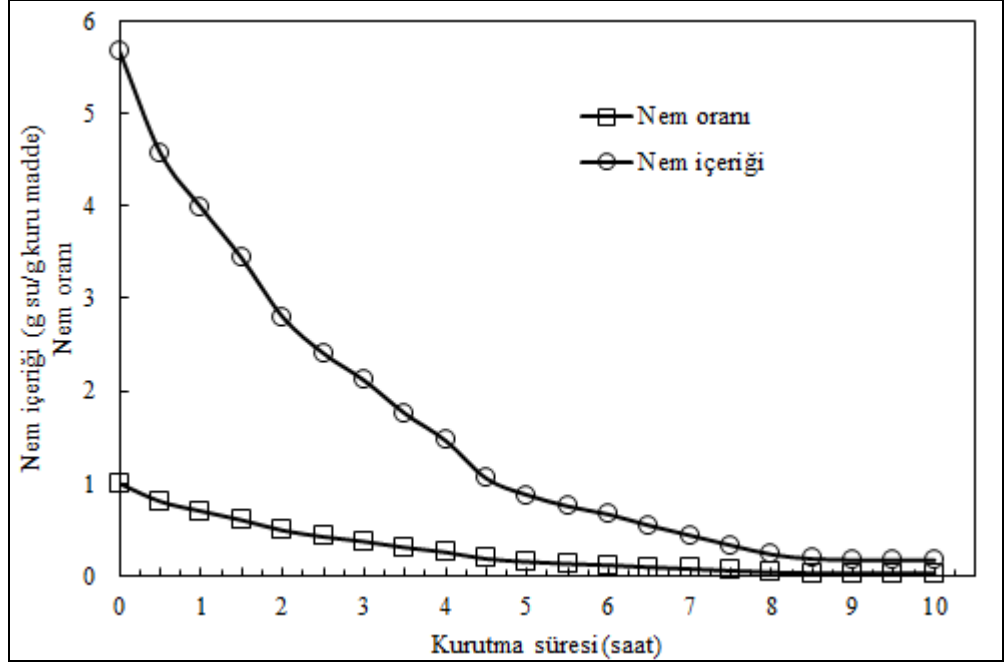
Şekil 7.16. Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için deneyler boyunca ortalama toplam ekserji kaybı 93,02 J/kg olarak hesaplanırken, ekserji verimi ortalama %19,76 olmuştur. Isı pompalı çalışma modu için ortalama toplam ekserji kaybı 213,76 J/kg olurken, ekserji verimi ise %23,36 olmuştur. Sistem için genel toplam ekserji kaybı 125,09 J/kg olarak hesaplanırken, ekserji verimi %20,71 olmuştur.

#### 7.4. HAVALI GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ VE ISI POMPALI ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

Bu çalışma modunda nane yapraklarının kurutulması incelenmiştir. Nane yaprakları 5,67 g su/g kuru madde başlangıç nem içeriğinden, 0,17 g su/g kuru madde nem içeriğine kadar on saatte kurutulmuşlardır.

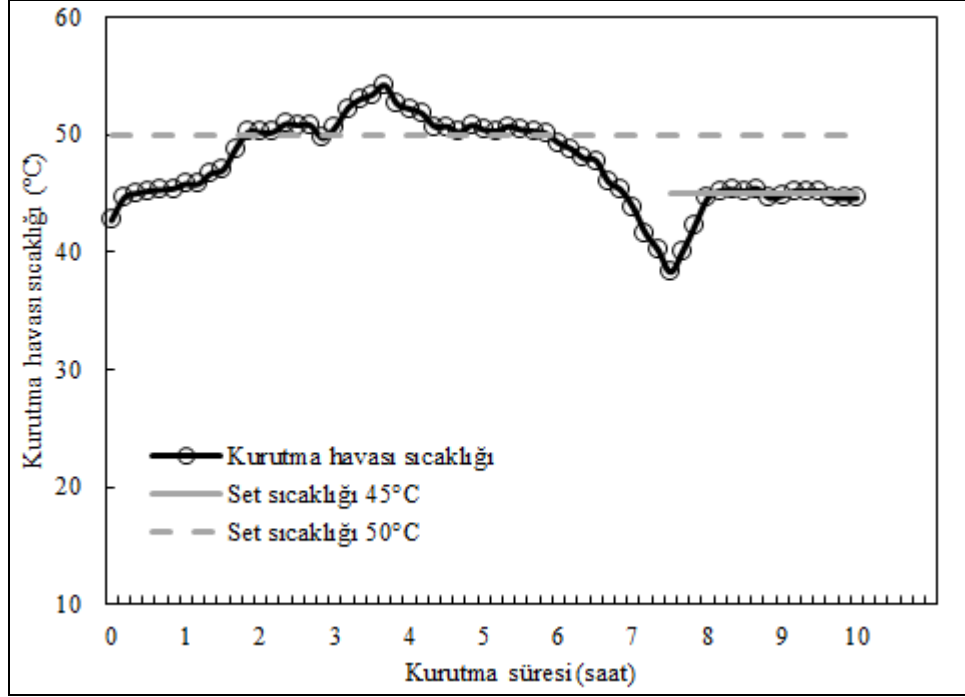
Nane yapraklarının nem içeriklerinin ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.17'de verilmiştir.



Şekil 7.17. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, nem içeriği ve nem oranı değerlerinin kurutma sürecinin başlangıcından itibaren hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Özellikle kurutma sürecinin sekizinci saatinden itibaren nem içeriği değerlerinin stabil bir hale geldiği görülmektedir. Bu durumun nedeni nane yaprakları için kurutma işleminin bu aşamada neredeyse tamamlanmasıdır.

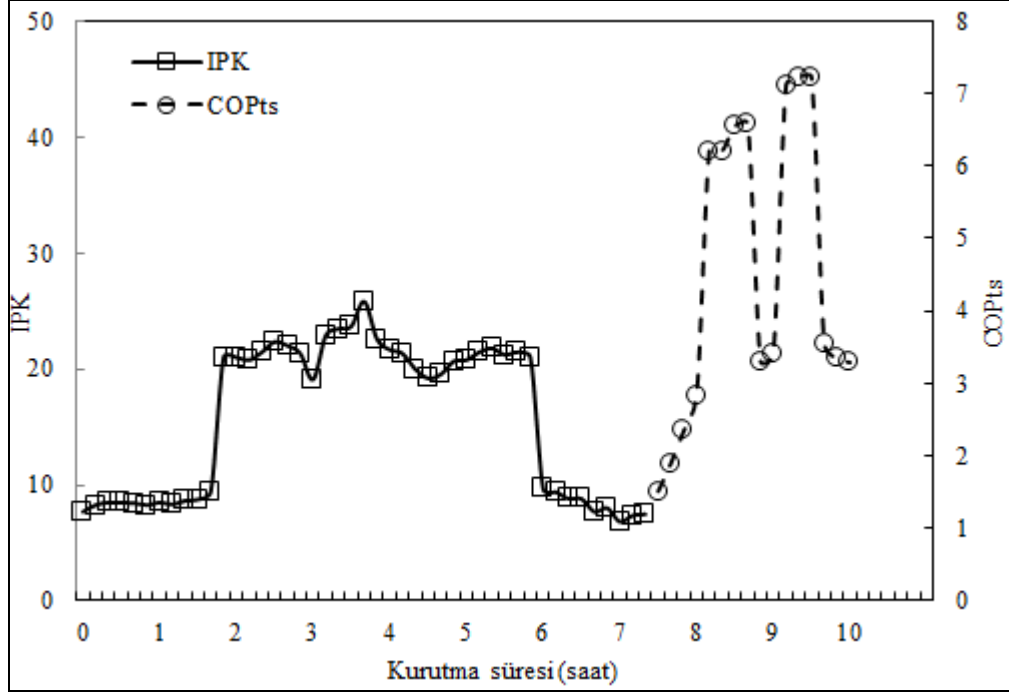
Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.18'de verilmiştir.



Şekil 7.18. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde, kurutma havası sıcaklığı gündüz saatlerinde havalı güneş kolektörlerinden sağlanırken, akşam saatlerinde ısı pompası sisteminden yararlanılmaktadır. Sistemde ısı kaynakları farklı olduğundan set edilen kurutma havası sıcaklıkları da farklıdır. Gündüz saatlerinde kullanılan havalı güneş kolektörlü sistemde set sıcaklığı 50°C olarak ayarlanırken, ısı pompası sisteminde bu değer, çalışma limitleri de göz önüne alınarak, 45°C olarak ayarlanmıştır. Şekil 7.18. incelendiğinde kurutma havasının iki farklı set sıcaklığında kontrol edildiği görülmektedir. Deneylerin ilk yedi buçuk saatlik periyodunda sistemde havalı güneş kolektörlerinden yararlanılırken, bu noktadan itibaren ısı pompası sistemi devreye girmektedir. Kurutma havası sıcaklığı havalı güneş kolektörlü çalışma modu için  $\pm 0,356^{\circ}\text{C}$  hassasiyette kontrol edilirken, ısı pompalı çalışma modunda bu değer  $\pm 0,377^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.

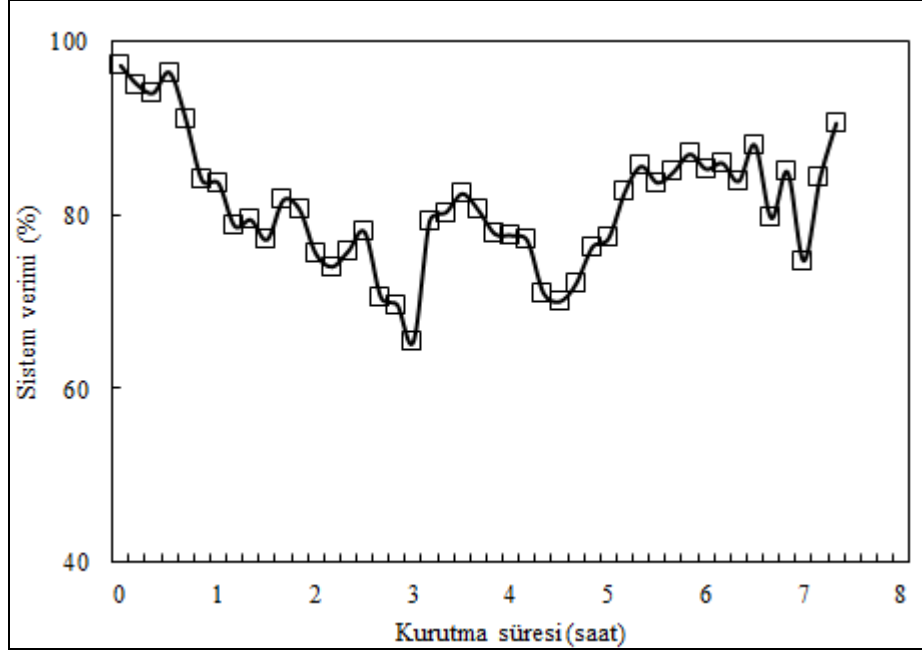
Havalı güneş kolektörlü çalışma modu için hesaplanan IPK değerleri ve ısı pompalı çalışma modu için hesaplanan  $\text{COP}_{\text{ts}}$  değerlerinin kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.19. IPK ve COPts değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde IPK ve  $COP_{ts}$  değerlerinin kurutma süresi boyunca dalgalı bir biçimde değiştiği görülmektedir. Bu dalgalanmaların nedeni, sistem bileşenlerinin güç tüketimlerin kurutma havası sıcaklığını sağlayabilmek amacıyla değişmesidir. Sistemde deneyler boyunca ortalama IPK değeri 15,66 olarak hesaplanırken,  $COP_{ts}$  değeri ortalama 4,54 olarak hesaplanmıştır.

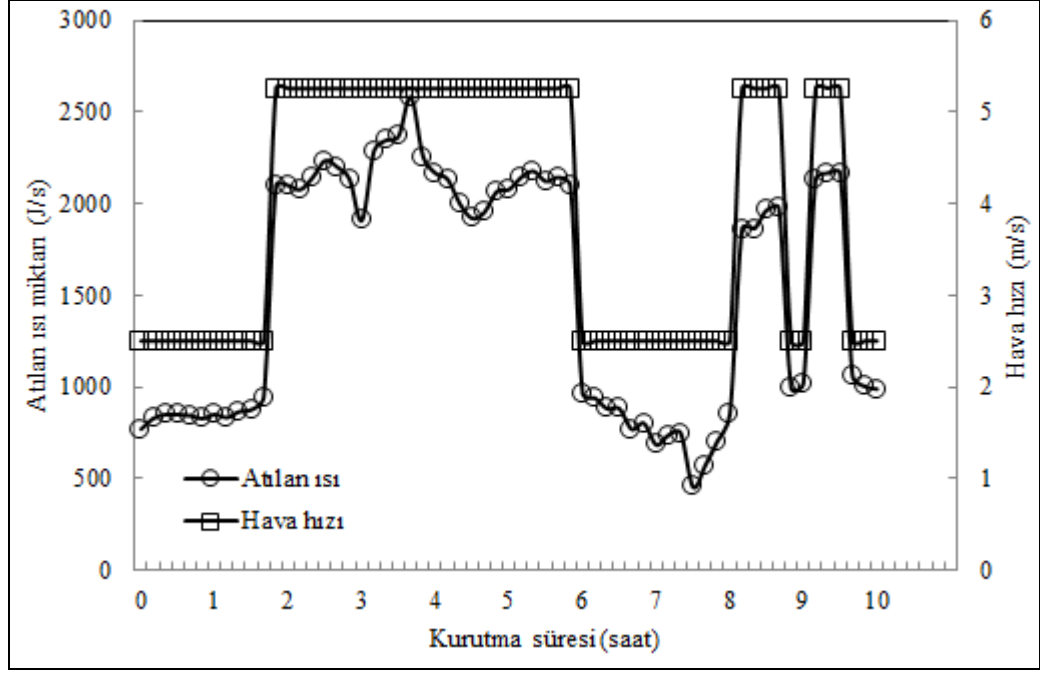
Şekil 7.20’de havalı güneş kolektörlü çalışma modu için sistem verimi değerlerinin kurutma süresine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 7.20. Sistem veriminin kurutma süresine göre değişimi.

Sistem verimi Eş. 6.32 kullanılarak hesaplanmıştır. Deneyler boyunca havalı güneş kolektörlü çalışma modu için sistem verimi ortalama olarak %81,78 olarak hesaplanmıştır.

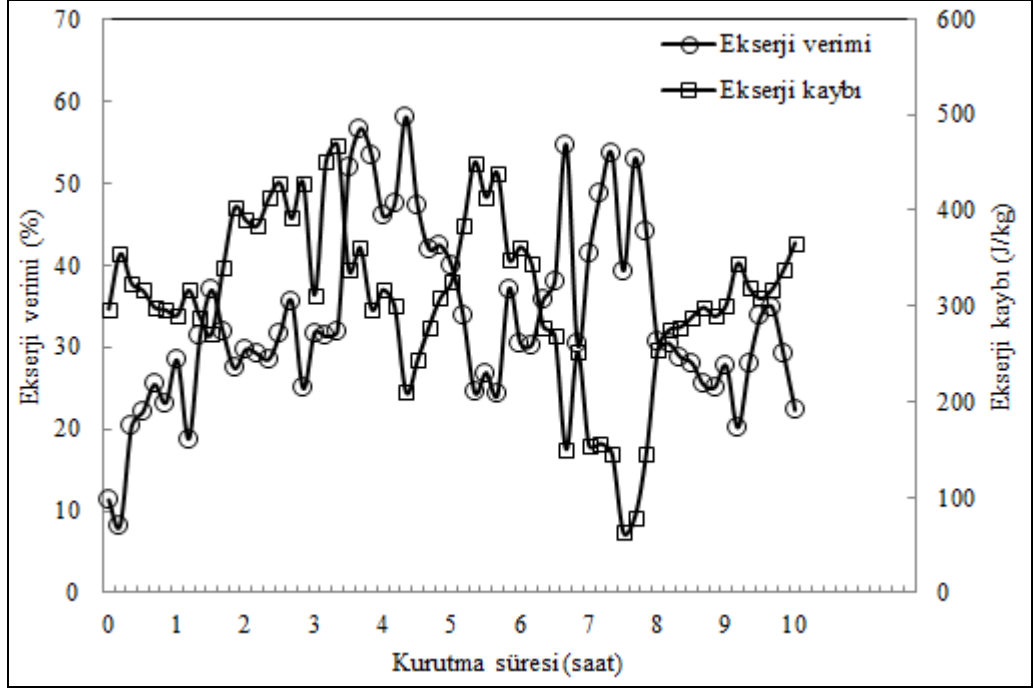
Havalı güneş kolektörlerinden ve ısı pompası sisteminin kondenserinden atılan ısı miktarları ile kurutma havası hızı değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 7.21’de verilmiştir.



Şekil 7.21. Atılan ısı miktarı ve kurutma havası hızının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, kurutma havası hızı ile atılan ısı miktarları arasında doğrusal bir şekilde değiştiği görülmektedir. Deneyler boyunca gerek havalı güneş kolektörlerinden gerekse ısı pompası sistemi kondenserinden atılan ısı miktarı ortalama 1512,41 J/s olarak hesaplanmıştır. Deneyler boyunca ortalama kurutma havası hızı 3,95 m/s olarak ölçülmüştür.

Akışkan yataklı kurutucuda toplam ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.22’de verilmiştir.



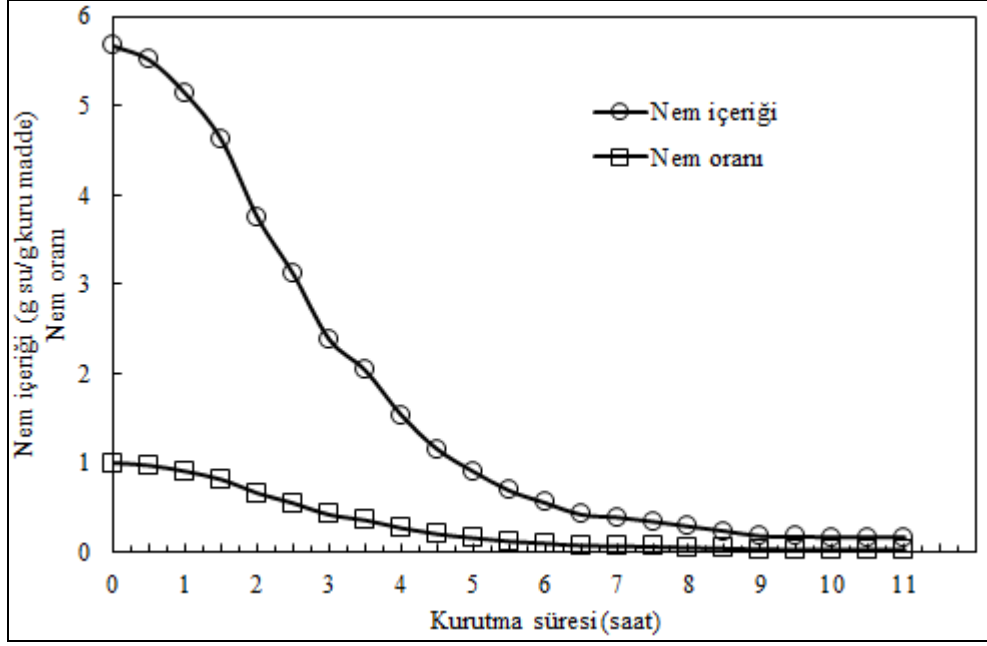
Şekil 7.22. Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde, havalı güneş kolektörlü çalışma modu için toplam ekserji kaybı ortalama olarak 324,05 J/kg olarak hesaplanırken, ısı pompalı çalışma modunda bu değer 266,62 J/kg olarak hesaplanmıştır. Sistemin genel ekserji kaybı ise 308,99 J/kg olarak hesaplanmıştır. Sistemin havalı güneş kolektörlü çalışma modu için ekserji verimi %34,54 olarak hesaplanırken, ısı pompalı çalışma modu için bu değer %31,29 olarak hesaplanmıştır. Sistemin genel ekserji verimi ise %33,69 olarak hesaplanmıştır.

## 7.5. TÜMLEŞİK ÇALIŞMA MODUNA AİT DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

Bu çalışma modunda da nane yapraklarının akışkan yatakta kurutulması analiz edilmiştir. Nane yaprakları 5,67 g su/g kuru madde başlangıç nem içeriğinden, 0,17 g su/g kuru madde nem içeriğine kadar on bir saatte kurutulmuşlardır.

Nane yapraklarının nem içeriklerinin ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.23'te verilmiştir.

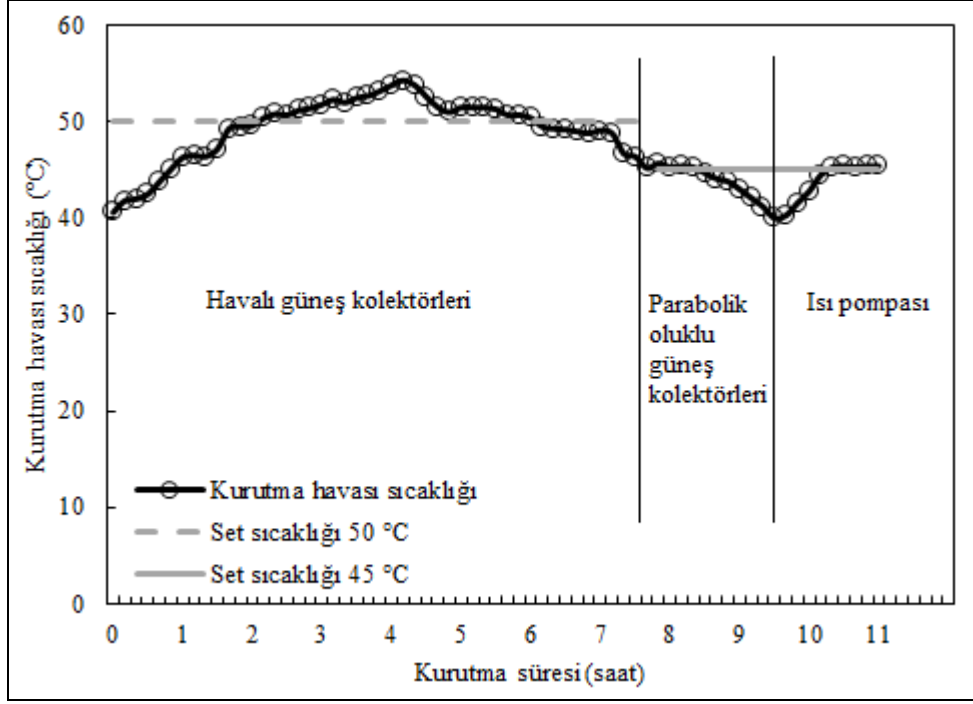


Şekil 7.23. Nem içerikleri ve nem oranlarının kurutma süresine göre değişimi.

Grafik incelendiğinde, nem içeriği ve nem oranı değerlerinin kurutma sürecinin başlangıcından itibaren hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Özellikle kurutma sürecinin sekizinci saatinden itibaren nem içeriği değerlerinin stabil bir hale geldiği görülmektedir. Bu durumun nedeni nane yaprakları için kurutma işleminin bu aşamada neredeyse tamamlanmasıdır.

Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimini gösteren grafik Şekil 7.24'te verilmiştir.

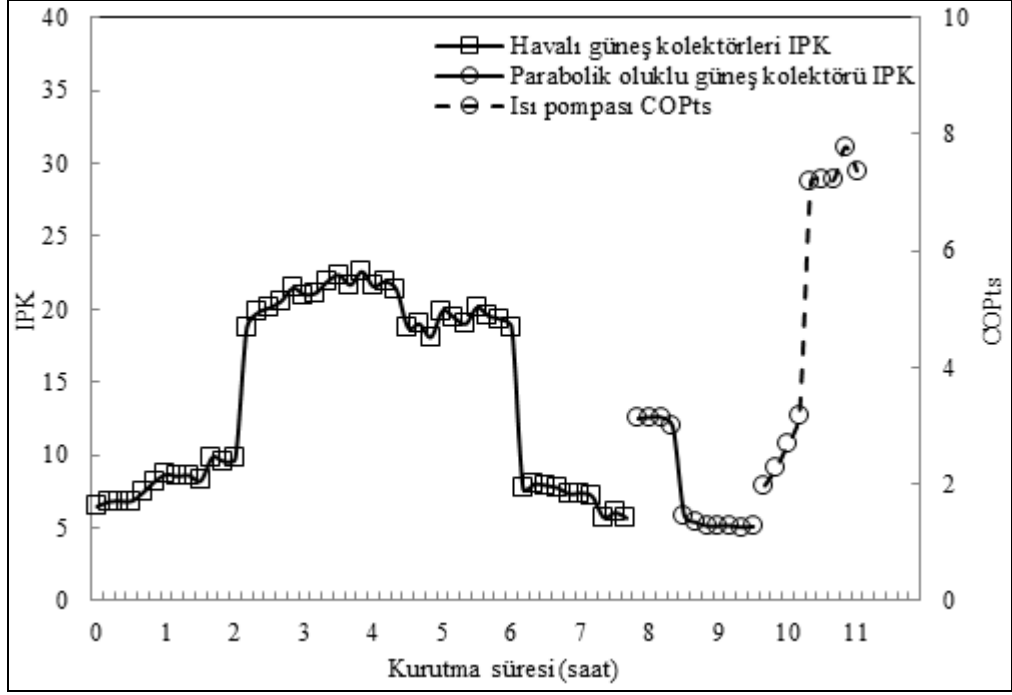




Şekil 7.24. Kurutma havası sıcaklığının kurutma süresine göre değişimi.

Tasarlanan sistem üç farklı çalışma mantığında işletilmektedir. Bunlar sırasıyla; havalı güneş kolektörlü çalışma modu, parabolik oluklu çalışma modu ve ısı pompalı çalışma modu. Sistemde havalı güneş kolektörlü çalışma modu için set sıcaklığı 50°C olarak ayarlanırken, parabolik oluklu güneş kolektörü ve ısı pompası modunda bu değer 45°C olarak ayarlanmıştır. Kurutma havası sıcaklığı, havalı güneş kolektörlü çalışma modu için  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ , parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için  $\pm 0,444^{\circ}\text{C}$  ve ısı pompalı çalışma modu için  $\pm 0,478^{\circ}\text{C}$  hassasiyetlerde kontrol edilmiştir.

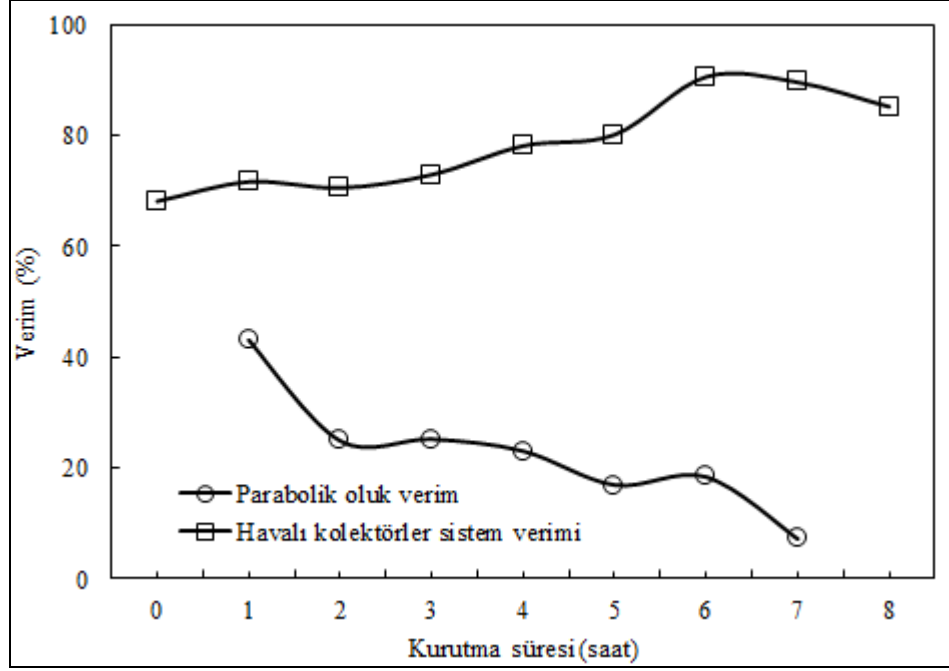
Havalı güneş kolektörleri ve parabolik oluklu güneş kolektörü için hesaplanan IPK değerleri ile ısı pompalı sistem için hesaplanan  $\text{COP}_{\text{ts}}$  değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 7.25'te gösterilmiştir.



Şekil 7.25. IPK ve COPts değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.

Havalı güneş kolektörleri için IPK değeri ortalama olarak 14,13 olarak hesaplanmıştır, bu değer parabolik oluklu güneş kolektörü için 7,84 olarak hesaplanmıştır. Bu değer havalı güneş kolektörlü çalışma modu için yüksek çıkmasının nedeni, düzlemsel ve zigzag yapıları kolektörlerin giriş hava sıcaklığını oldukça yükseltebilmesi olmuştur. Şekilde görüldüğü gibi parabolik oluklu güneş kolektörünün devreye girdiğinde IPK değeri yüksek olarak hesaplanmıştır. Bu durumun nedeni gün içinde parabolik oluklu güneş kolektörünün deposunda depolanan sıcak suyun sisteme dahil edilmesidir. Isı pompası sisteminin  $COP_{ts}$  değeri ortalama olarak 5,21 olarak hesaplanmıştır.

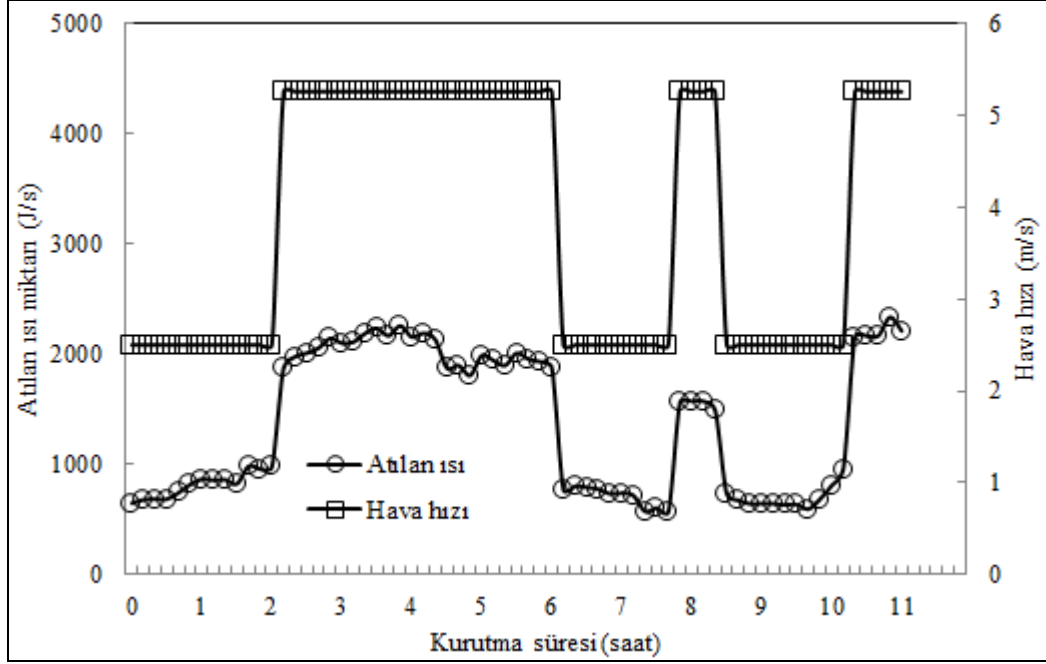
Havalı güneş kolektörlü çalışma modu için sistem veriminin zamana göre değişimi Şekil 7.26'da verilmiştir.



Şekil 7.26. Sistem verimi değerlerinin kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde havalı güneş kolektörlü çalışma modu için sistem verimi değerleri ortalama olarak %78,55 olarak hesaplanmıştır. Parabolik oluklu sistem için verim ise ortalama %22,69 olarak bulunmuştur.

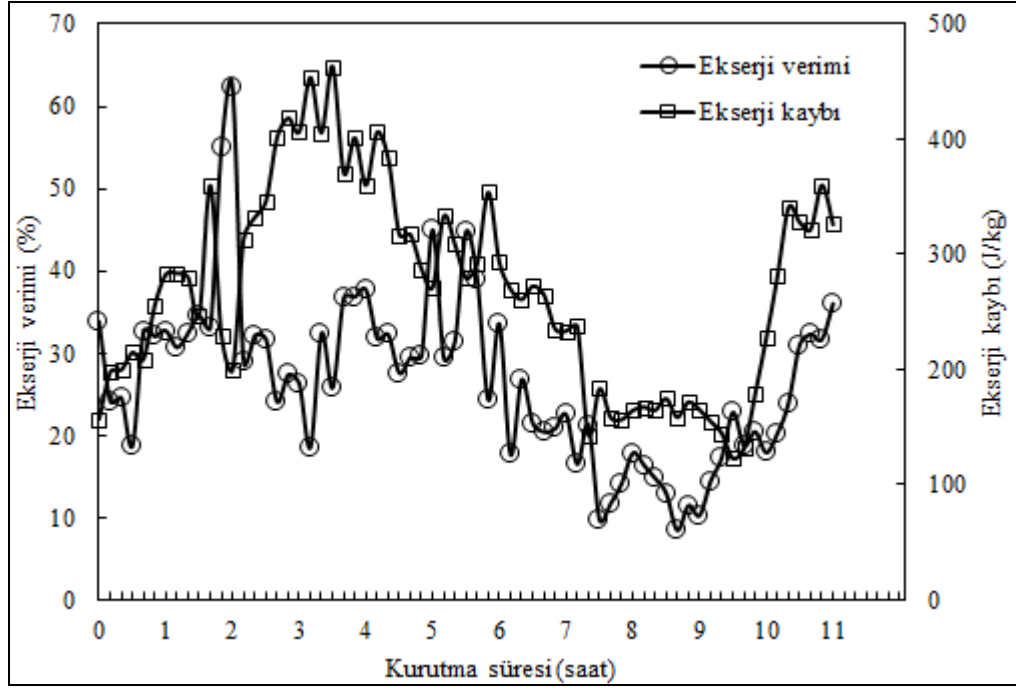
Sisteme atılan ısı miktarı ve kurutma havası hızının kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.27’de verilmiştir.



Şekil 7.27. Atılan ısı miktarı ve kurutma havası hızının kurutma süresine göre değişimi.

Deneyleer boyunca atılan ortalama ısı miktarı 1361,97 J/s olarak hesaplanmıştır. Sistemde kurutma havası hızı, kurutma havası sıcaklığına göre kontrol edilmiştir. Deneyleer süresince ortalama kurutucu fanı hava hızı 3,86 m/s olarak hesaplanmıştır.

Akışkan yataklı kurutucuda toplam ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin kurutma süresine göre değişimi Şekil 7.28’de verilmiştir.



Şekil 7.28. Akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ve toplam ekserji kaybının kurutma süresine göre değişimi.

Sistemde, havalı güneş kolektörlü çalışma modu için toplam ekserji kaybı 295,65 J/kg olurken, parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için bu değer 158,78 J/kg olmuştur. Isı pompalı çalışma modunda ise bu değer 277,35 J/kg olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimleri havalı güneş kolektörlü çalışma modu için %29,63 olurken, parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için bu değer %14,63 olarak hesaplanmıştır. Isı pompalı çalışma modunda ise bu değer %25,81 olmuştur. Sistemin genel ekserji verimi ise %26,66 olarak hesaplanmıştır.

DeneySEL sisteme ait bazı sonuçlar derlenerek Çizelge 7.1’de verilmiştir. Çizelgede ısı pompalı çalışma modu için  $COP_{ts}$  değerinin diğer ısı pompalı çalışma modlarından daha düşük (1,91) olarak bulunmasının nedeni, bu çalışma moduna ait deneylerin kış mevsiminde yapılmasıdır. Diğer deneyler yaz mevsimlerinde yapıldığından, dış hava sıcaklığı arttıkça  $COP_{ts}$  değerleri de artmıştır.

Çizelge 7.1. Sisteme ait bazı analizlerin sonuçları.

Çalışma modu	Kurutulan ürün/ürünler	Kurutma havası sıcaklığı (set)	Hassasiyet	Son nem içeriği (g su/ g kuru madde)	COP <sub>ts</sub>	IPK	SMER <sub>ts</sub> (g/Wh)	Sistem verimi (%)	Genel Toplam ekserji kaybı (J/kg)	Genel Ekserji verimi (%)
Isı pompalı çalışma modu	Nane ve maydanoz yaprakları	40 °C	±0,254 °C	0,167 (Nane) 0,587 (Maydanoz )	1,91	-	0,00916 (Nane) 0,00899 (Maydanoz)	-	203,97	31,1
Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu	Dut taneleri	40 °C	±0,369 °C	2,64	-	3	0,0031	16,64	32,07	63,37
Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu	Nane yaprakları	40 °C (Parabolik) 45 °C (Isı pompası)	±0,538 °C (Parabolik) ± 0,468 °C (Isı pompası)	0,170	3,07	4,22	0,01374	27,73	125,09	20,71
Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu	Nane yaprakları	50 °C (Havalı) 45 °C (ısı pompası)	±0,356 °C (Havalı) ±0,377 °C (Isı pompası)	0,170	4,54	15,66	0,01374	81,78	308,99	33,69
Tümleşik çalışma modu	Nane yaprakları	50 °C (Havalı) 45 °C (Isı pompası ve parabolik)	±0,350 °C (Havalı) ±0,444 °C (Parabolik) ±0,478 °C (Isı pompası)	0,170	5,21	14,13 (Havalı) 7,84 (Parabolik)	0,08814	78,55 (Havalı) 22,69 (Parabolik)	270,72	26,66
Ortalama	-	-	-	-	3,68	14,9 (Havalı) 5,02 (Parabolik)	-	80,17 (Havalı) 22,35 (Parabolik)	188,17	35,11

Çalışma sonucunda, ısı pompalı çalışma modları için hesaplanan performans katsayısı (COP) değerleri literatürdeki bazı çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Tez çalışmasında, tüm ısı pompası çalışma modları için sistem performans katsayısı ( $COP_{ts}$ ) ortalama olarak 3,68 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.2 incelendiğinde, literatürdeki çalışmalarda  $COP_{ts}$  değerinin 1,40 ile 5,28 arasında değiştiği görülmektedir. Tez çalışmasında elde edilen  $COP_{ts}$  değerinin literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu, hatta birçok çalışmadan da yüksek olarak hesaplandığı görülmektedir.

Çizelge 7.2. Literatürdeki bazı COP değerlerinin karşılaştırılması.

Literatür çalışmaları	Kurutucu tipi	$COP_{ts}$	$COP_{ip}$
Ceylan ve Aktaş [17]	Isı pompalı	1,40	-
Aktaş vd. [19]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	2,24	-
Aktaş ve Kara [22]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	2,27	2,90
Oktay ve Hepbaşlı [25]	Isı pompalı	2,47-3,95	-
Aktaş vd. [55]	Isı pompalı	2,22-2,82	2,29-3,81
Şevik vd. [56]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	2,10-3,10	-
Gönen [66]	Isı pompalı	3,02	-
Best vd. [67]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	-	5,30
Chaturvedi [68]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	-	2,50-4
Söylemez [69]	Isı pompalı	2,36	-
Li vd. [70]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	5,19	-
Aktekeli [71]	Isı pompalı	5,28	5,65
Mohanraj [72]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	-	2,54
Ceylan [73]	Isı pompalı	2,41-2,49	-
Soponronarit [74]	Isı pompalı	-	3,71-3,85
Ibrahim vd. [75]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	-	1,42-2
Abuşka ve Doğan [76]	Isı pompalı	2,81	-
Polat vd. [77]	Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı	2,75	-

## 7.6. BELİRSİZLİK ANALİZİNİN SONUÇLARI

Belirsizlik analizi verilen bilgilerin doğruluk sınırlarını belirlemesi açısından oldukça önemlidir. Çalışmada, belirsizlik analizi Eş. (6.37)-(6.41) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm ve kontrol cihazlarının teknik özellikleri ve her bir çalışma modu için hesaplanan belirsizlikleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.



Çizelge 7.3. Çalışmada kullanılan cihazların teknik özellikleri ve belirsizlikleri.

Kullanılan cihaz	Teknik özellikleri	Belirsizlik (Isı pompalı çalışma modu)	Belirsizlik (Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu)	Belirsizlik (Parabolik oluklu ve ısı pompalı çalışma modu)	Belirsizlik (Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modu)	Belirsizlik (Tümleşik çalışma modu)
Termohigrometre	TESTO, NTC sensör. Sıcaklık ölçüm aralığı: -10 ~ + 60 °C. Hassasiyet: ± 0,5 °C. Bağıl nem ölçüm aralığı: % 0~100 RH. Hassasiyet: ± 2,5 % RH (% 0~95 RH).	± 0,36°C ± 0,706 RH (%)	± 0,44°C ± 0,874 RH (%)	± 0,740°C (Parabolik) ± 0,600°C (Isı pomp.) ± 1,70 RH (%) (Parabolik) ± 0,262 RH (%) (Isı pomp.)	± 0,486°C (Havalı) ± 0,516°C (Isı pomp.) ± 0,810 RH (%) (Havalı) ± 0,325 RH (%) (Isı pomp.)	± 0,492°C (Havalı) ± 0,573°C (Parabolik) ± 0,498 °C (Isı pomp.) ± 0,759 RH (%) (Havalı) ± 0,361 RH (%) (Parabolik) ± 0,405 RH (%) (Isı pomp.)
İnvertör	ABB, 200-240 VAC, 0,75 kW, bir fazlı invertör.	-	-	-	-	-
Anemometre	DELTA OHM, Ölçüm aralığı: 0,6 m/s ~ 20 m/s. Hassasiyet: ± 0,2 m/s.	± 0,324 m/s	± 0,322 m/s	± 0,353 m/s (Isı pomp.)	± 0,207 m/s (Havalı) ± 0,353 m/s (Isı pomp.)	± 0,203 m/s (Havalı) ± 0,420 m/s (Parabolik) ± 0,485 m/s (Isı pompalı)
Proses kontrol cihazı	ORDEL, PC440, 4 W, 100–240 VAC. Transmitter Besleme: 24 VDC.	-	-	-	-	-
Dijital solar metre	PCE, Ölçüm aralığı: 0 ~ 2000 W/m <sup>2</sup> . Hassasiyet: ± %5 W/m <sup>2</sup> .	-	± 35,78 W/m <sup>2</sup>	± 25,24 W/m <sup>2</sup>	± 21,68 W/m <sup>2</sup>	± 34,24 W/m <sup>2</sup>
Dijital terazi	METLER TOLEDO, 6100 g kapasite. Hassasiyet: ± 0,01 g.	± 1,498 g	± 0,212 g	± 1,490 g	± 1,335 g	± 1,425 g

## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında güneş enerjisi destekli, ısı pompalı akışkan yataklı bir kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve deneysel olarak analiz edilmiştir. İmal edilen kurutma sistemi farklı çalışma modlarında test edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığındaki öneriler aşağıda verilmiştir.

#### 8.1. SONUÇLAR

1. Isı pompalı çalışma modu için kurutma havası sıcaklığı  $\pm 0,254^{\circ}\text{C}$  hassasiyetle set değerinde tutulmuştur. Bu değer özellikle kurutma sıcaklığı kontrolünün önemli olduğu uygulamalar için bu kurutucu sistemin kullanılabilirliğini göstermektedir.
2. Isı pompalı çalışma modu için tüm sistem performans değeri ( $\text{COP}_{\text{ts}}$ ) ortalama olarak 1,91 olarak hesaplanmıştır. Bu değer diğer ısı pompalı çalışma modlarına göre daha düşük çıkmasının nedeni; sistem deneylerinin kış mevsiminde daha düşük hava sıcaklığında yapılmasıdır.
3. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için ortalama ekserji kaybı 203,97 J/kg olarak hesaplanırken, ortalama ekserji verimi %31,1 olarak hesaplanmıştır.
4. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için tüm sistem özgül nem çekme oranı ( $\text{SMER}_{\text{ts}}$ ) nane kurutma deneyinde 0,00916 g/Wh olarak hesaplanırken, maydanoz kurutma deneyinde bu değer 0,00899 g/Wh olarak hesaplanmıştır.
5. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için kurutma havası sıcaklığı  $\pm 0,369^{\circ}\text{C}$  hassasiyetle kontrol edilmiştir.

6. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için Isıtma Performans Katsayısı (IPK) değeri deneyler boyunca ortalama 3 olarak hesaplanmıştır.
7. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modunda akışkan yataklı kurutucu için deneyler süresince ortalama toplam ekserji kaybı 32,07 J/kg olarak hesaplanırken, ortalama ekserji verimi ise %63,37 olarak hesaplanmıştır.
8. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için kurutma havası sıcaklığı  $\pm 0,538^{\circ}\text{C}$  hassasiyette kontrol edilirken, ısı pompalı çalışma modu için bu değer  $\pm 0,468^{\circ}\text{C}$  olmuştur.
9. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda deneyler boyunca parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için ortalama sistem verimi %27,73 olarak hesaplanırken, IPK değeri 4,22 olarak hesaplanmıştır. Isı pompalı çalışma modu için tüm sistem performans katsayısı ( $\text{COP}_{\text{ts}}$ ) deneyler boyunca ortalama olarak 3,07 olarak hesaplanmıştır.
10. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda genel toplam ekserji kaybı 125,09 J/kg olarak hesaplanırken, ekserji verimi %20,71 olmuştur.
11. Parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda tüm sistem özgül nem çekme oranı ( $\text{SMER}_{\text{ts}}$ ) 0,01374 g/Wh olarak hesaplanmıştır.
12. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda kurutma havası sıcaklığı havalı güneş kolektörlü çalışma modu için  $\pm 0,356^{\circ}\text{C}$  hassasiyette kontrol edilirken, ısı pompalı çalışma modunda bu değer  $\pm 0,377^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.

13. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda deneyler boyunca ortalama IPK değeri 15,66 olarak hesaplanırken,  $COP_{ts}$  değeri ortalama 4,54 olarak hesaplanmıştır.
14. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda tüm sistem özgül nem çekme oranı ( $SMER_{ts}$ ) 0,01374 g/Wh olarak hesaplanmıştır.
15. Havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı çalışma modunda havalı güneş kolektörlü çalışma modu için akışkan yatak için ekserji verimi %34,54 olarak hesaplanırken, ısı pompalı çalışma modu için bu değer %31,29 olarak hesaplanmıştır. Sistemin genel ekserji verimi ise %33,69 olarak hesaplanmıştır.
16. Tümüleşik çalışma modunda kurutma havası sıcaklığı havalı güneş kolektörlü çalışma modu için  $\pm 0,35^{\circ}C$ , parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için  $\pm 0,444^{\circ}C$  ve ısı pompalı çalışma modu için  $\pm 0,478^{\circ}C$  hassasiyetlerde kontrol edilmiştir.
17. Tümüleşik çalışma modunda havalı güneş kolektörleri için IPK değeri ortalama olarak 14,13 olarak hesaplanmıştır, bu değer parabolik oluklu güneş kolektörü için 7,84 olarak hesaplanmıştır. Isı pompası sisteminin  $COP_{ts}$  değeri ortalama olarak 5,21 olarak hesaplanmıştır.
18. Tümüleşik çalışma modunda akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimleri havalı güneş kolektörlü çalışma modu için %29,63 olurken, parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modu için bu değer %14,63 olarak hesaplanmıştır. Isı pompalı çalışma modunda ise bu değer %25,81 olmuştur. Sistemin genel ekserji verimi ise %26,66 olarak hesaplanmıştır.
19. Tümüleşik çalışma modunda tüm sistem özgül nem çekme oranı ( $SMER_{ts}$ ) 0,08814 g/Wh olarak hesaplanmıştır.

20. Sonuçlar değerlendirildiğinde, hem kurutma süresi bakımından hem de yüksek IPK ve COP<sub>ts</sub> değerleri açısından tümleşik çalışma modunun diğer çalışma modlarına göre daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmüştür.

## 8.2. ÖNERİLER

1. Sistemde bütün çalışma modları için kurutma havası sıcaklıkları yüksek hassasiyetlerle kontrol edilebilmiştir. Bu nedenle sistem, kurutma sıcaklıklarının önem taşıdığı hassas kurutma uygulamalarında kullanıma uygundur.
2. Sistemler incelendiğinde, parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modlarında geçici rejim süresinin uzun sürdüğü görülmektedir. Bu süre depodaki su miktarının azaltılması ile kısaltılabilir.
3. Parabolik oluklu güneş kolektörlü çalışma modunda depodaki su miktarı ve kolektör yüzey alanı artırılarak sistemden gece boyunca yararlanılabilir.
4. Isı pompası sisteminde sistem bileşenlerinin kapasiteleri artırılarak daha yüksek kurutma sıcaklıkları elde edilebilir.
5. Isı pompası sisteminde farklı soğutucu akışkanlar kullanılarak, bu akışkanların termodinamik sınırları çerçevesinde, ısı pompası sistemi farklı kurutma uygulamaları için kullanılabilir.
6. Sistemin kurutma havasının filtrelenmesi ile, akışkan yataklı kurutma sistemi hijyenik kurutma uygulamaları için de uygun hale getirilebilir.
7. Sistemde, havalı güneş kolektörleri düzlemsel ve zigzag olmak üzere iki farklı tasarımıdadır. Farklı geometrik yapıya sahip havalı kolektörler sisteme entegre edilerek deneysel olarak analiz edilebilir.

8. Havalı güneş kolektörlerinin yüzey alanları arttırılarak daha yüksek kurutma havası sıcaklıkları elde edilebilir.
9. Parabolik oluklu güneş kolektörlü sistemde sıcak suyun depolandığı deponun yalıtımı, sisteme atılan ısının arttırılması açısından oldukça önemlidir. Bu deponun tasarımı geliştirilip, yalıtımı arttırılırsa sistem performansının da arttırılması söz konusudur.
10. Parabolik oluklu güneş kolektörünün yüzey alanının arttırılması ile kurutma havası sıcaklıkları daha yüksek değerlere ulaşabilir.
11. Havalı güneş kolektörlü çalışma modu için IPK değerlerinin çok yüksek olmasından dolayı kurutma işlemlerinde bu tip kolektörlerin kullanılması yaygınlaşmalıdır.
12. Havalı güneş kolektörlü sistemde hava sıcaklıklarının istenilen değerlerde tutulabilmesinden dolayı, ülkemizde özellikle sıcak hava ihtiyaçlarının giderilmesinde kullanımı yaygınlaşmalıdır. Bazı kullanım alanları; hayvan barınakları, garajlar, otoparklar, spor salonları havuzlar, ısıtma işlemine gece boyunca devam edilmeyen kamu binaları olarak sıralanabilir.
13. Havalı güneş kolektörleri aracılığı ile hava gün boyunca çakıl taşları vb. ısı depoları kullanılarak depolanabilir.

## KAYNAKLAR

1. Ceylan, İ. ve Doğan, H., "Güneş enerjili ve nem kontrollü kondenzasyonlu bir kereste kurutma fırınının modellenmesi", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 150-158 (2004).
2. Ceylan, İ., "Programlanabilir (PLC) ısı pompalı kurutucunun tasarımı, imalatı ve kereste kurutma işleminde deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 19-20 (2007).
3. Nazghelichi, T. Mohammad H. K., and Mortaza, A., "Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes", *Energy*, 35: 4679-4684 (2010).
4. Soponronnarit, S., and Prachayawarakorn, S., "Optimum strategy for fluidized bed paddy drying", *Drying Technology*, 12 (7): 1667-1686 (1994).
5. Ersöz, M. A., "Isı geri kazanımlı akışkan yatak sürekli kurutucu tasarımı, imalatı ve tuz kurutmasında enerji analizi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 77-82 (2008).
6. Güney, M. Ş., "Akışkan yatakta fındık kurutma işleminin deneysel ve teorik incelenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 76-78 (2007).
7. Adamiec, J., "Drying of waste sludges in a fluidized bed dryer with a mixer", *Drying Technology*, 20 (4-5): 839-853 (2002).
8. Erçetin, Ü., "Tanecikli gıda maddelerinin akışkan yatakta kurutulması", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 90-93 (2007).
9. Niamnuy, C., and Devahastin, S., "Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer", *Journal of Food Engineering*, 66 (2): 267-271 (2005).
10. Momenzadeh, L., Zomorodian, A., and Mowla, D., "Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using Artificial Neural Network", *Food and Bioprocess Processing*, 89 (1): 15-21 (2011).
11. Stanisławski, J., "Drying of diced carrot in a combined microwave–fluidized bed dryer", *Drying Technology*, 23 (8): 1711-1721 (2005).

12. Askari, G. R., Emam-Djomeh, Z., and Mousavi, S.M., “Heat and mass transfer in apple cubes in a microwave assisted fluidized bed dryer”, *Food and Bioproducts Processing*, 91: 207-215 (2013).
13. Tasirin, S. M., Kamarudin, S. K., Jaafar, K., and Lee, K. F., “The drying kinetics of bird’s chillies in a fluidized bed dryer”, *Journal of Food Engineering*, 79 (2): 695-705 (2007).
14. Ceylan, İ., Aktaş, M., ve Doğan, H., “Isı pompalı kurutma odasında elma kurutulması”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 25 (2): 9-14 (2005).
15. Aktaş, M., Menlik, T., Boran, K., Aktekeli, B., ve Aktekeli, Z., “Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2 (2): 229-238 (2014).
16. Hawlader, M. N. A., and Jahangeer, K. A., “Solar heat pump drying and water heating in the tropics”, *Solar Energy*, 80 (5), 492-499 (2006).
17. Ceylan, İ., ve Aktaş, M., “Isı pompası destekli bir kurutucuda fındık kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (1): 215-222 (2008).
18. Ameen, A., and Bari, S., “Investigation into the effectiveness of heat pump assisted clothes dryer for humid tropics”, *Energy conversion and Management*, 45 (9): 1397-1405 (2004).
19. Aktaş, M., Ceylan, İ., Doğan, H., ve Aktekeli, Z., “Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı kırmızıbiber kurutucusunun tasarımı, imalatı ve performans deneyleri”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi/Journal of Thermal Science & Technology*, 30 (1): 111-120 (2010).
20. Aktaş, M., Ceylan, İ., ve Doğan, H., “Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesi”, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 8 (4): 329-336 (2005).
21. Şevik, S., Doğan, H., ve Aktaş, M., “Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli ısıtma-kurutma sisteminin modellenmesi”, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 14 (1): 85-91 (2011).
22. Aktaş, M., ve Kara, M. Ç., “Güneş enerjisi ve ısı pompalı kurutucuda dilimlenmiş kivi kurutulması”, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 28 (4): 733-741 (2013).
23. Ceylan, İ., Aktaş, M., ve Doğan, H., “Güneş enerjili kurutma fırınında elma kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 9 (4): 289-294 (2006).
24. Aktaş, M., Şevik, S., Doğan, H., ve Öztürk, M., “Fotovoltaik ve termal güneş enerjili sürekli bir kurutucuda domates kurutulması”, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 18: 287-298 (2012).



25. Oktay, Z., and Hepbasli, A., "Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer", *Energy Conversion and Management*, 44 (8): 1193-1207 (2003)
26. Bannister, P., Carrington, G., Chen, G., and Sun, Z., "Guidelines for operating dehumidifier timber kilns. In energy group's heat pump dehumidifier research programme report", *EGL-RR-OZ*, 471-480 (1999).
27. Kaewkiew, J., Nabnean, S., and Janjai, S., "Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand", *Procedia Engineering*, 32: 433-439 (2012).
28. Mohajer, A., Nematollahi, O., Joybari, M. M., Hashemi, S. A., and Assari, M. R., "Experimental investigation of a hybrid solar drier and water heater system", *Energy Conversion and Management*, 76: 935-944 (2013).
29. Hossain, M. A., and Bala, B. K., "Drying of hot chilli using solar tunnel drier", *Solar Energy*, 81 (1): 85-92 (2007).
30. Saleh, A., and Badran, I., "Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer", *Renewable Energy*, 34 (10): 2239-2245 (2009).
31. Rathore, N. S., and Panwar, N. L., "Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying", *Applied Energy*, 87 (8): 2764-2767 (2010).
32. Amer, B. M. A., Hossain, M. A., and Gottschalk, K., "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana", *Energy Conversion and Management*, 51 (4): 813-820 (2010).
33. Akbulut, A., and Durmuş, A., "Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer", *Energy*, 35 (4): 1754-1763 (2010).
34. Sarsavadia, P. N., "Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion", *Renewable Energy*, 32 (15): 2529-2547. (2007).
35. Sahin, S., Sumnu, G., and Tunaboyu, F., "Usage of solar-assisted spouted bed drier in drying of pea", *Food and Bioprocess Processing*, 91 (3): 271-278 (2013).
36. Şevik, S., "Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products", *Solar Energy*, 105: 190-205 (2014).
37. Fadhel, M. I., Sopian, K., and Daud, W. R. W., "Performance analysis of solar-assisted chemical heat-pump dryer", *Solar Energy*, 84 (11): 1920-1928 (2010).

38. Akpınar, E. K., “Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses”, *Energy Conversion and Management*, 51 (12): 2407-2418 (2010).
39. Bala, B. K., Mondol, M. R. A., Biswas, B. K., Das Chowdury, B. L., and Janjai, S., “Solar drying of pineapple using solar tunnel drier”, *Renewable Energy*, 28 (2): 183-190 (2003).
40. Chen, H. H., Hernandez, C. E., and Huang, T. C., “A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer”, *Solar Energy*, 78 (1): 97-103 (2005).
41. Mancini, F., Minetto, S., and Fornasieri, E., “Thermodynamic analysis and experimental investigation of a CO<sub>2</sub> household heat pump dryer”, *International Journal of Refrigeration*, 34 (4): 851-858 (2011).
42. Fatouh, M., Metwally, M. N., Helali, A. B., and Shedid, M. H., “Herbs drying using a heat pump dryer”, *Energy Conversion and Management*, 47 (15): 2629-2643 (2006).
43. Colak, N., Kuzgunkaya, E., and Hepbasli, A., “Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer”, *Journal of Food Process Engineering*, 31 (3): 281-298 (2008).
44. Aktaş, M., Ceylan, İ., and Yılmaz, S., “Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer”, *Desalination*, 239 (1): 266-275 (2009).
45. Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., Jahangeer, K. A., Rahman, S. M. A., and Lau KW, E., “Solar-assisted heat-pump dryer and water heater”, *Applied Energy*, 74 (1): 185-193 (2003).
46. Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., and Benjapiyaporn, C., “Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli”, *Biosystems Engineering*, 105 (1): 130-138 (2010).
47. Klöcker, K., Schmidt, E. L., and Steimle, F., “A drying heat pump using carbon dioxide as working fluid”, *Drying Technology*, 20 (8): 1659-1671 (2002).
48. Ganjehsarabi, H., Dincer, I., and Gungor, A., “Exergoeconomic analysis of a heat pump tumbler dryer”, *Drying Technology*, 32 (3): 352-360 (2014).
49. Pal, U. S., Khan, M. K., and Mohanty, S. N., “Heat pump drying of green sweet pepper”, *Drying Technology*, 26 (12): 1584-1590 (2008).
50. Queiroz, R., Gabas, A. L., and Telis, V. R. N., “Drying kinetics of tomato by using electric resistance and heat pump dryers”, *Drying Technology*, 22 (7): 1603-1620 (2004).

51. Güngör, A., “Sebze ve meyve kurutmada kullanılan kurutucular ve kurutma teknolojileri”, *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 43-63 (2013).
52. Karagüzel, İ., “Tarım ürünlerinin akışkan yatakta kurutulmasının ekserji analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 12,13 (2009).
53. Law C. L., and Mujumdar, A. S., “Handbook of Industrial Drying, Chapter 8: Fluidized Bed Dryers, Fourth Edition”, *CRC Press*, Florida, USA, 161-191 (2015).
54. Ceylan, İ., Aktaş, M., and Doğan, H., “Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits”, *Applied Thermal Engineering*, 27 (11): 1931-1936 (2007).
55. Aktaş, M., Ceylan, İ., and Gürel, A. E., “Testing of a Condensation-type heat pumps for low-temperature drying applications”, *International Journal of Food Engineering*, 10 (3): 521-531 (2014).
56. Şevik, S., Aktaş, M., Doğan, H., and Koçak, S., “Mushroom drying with solar assisted heat pump system”, *Energy Conversion and Management*, 72: 171-178 (2013).
57. Ceylan, I., Aktaş, M., and Doğan, H., “Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump”, *Applied Thermal Engineering*, 27 (1): 216-222 (2007).
58. Midilli, A., and Kucuk, H., “Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio”, *Energy*, 28 (6): 539-556 (2003).
59. Reddy, K. S., and Kumar, K. R., “Solar collector field design and viability analysis of stand-alone parabolic trough power plants for Indian conditions”, *Energy for Sustainable Development*, 16 (4): 456-470 (2012).
60. He, Y. L., Xiao, J., Cheng, Z. D., and Tao, Y. B., “A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector”, *Renewable Energy*, 36 (3): 976-985 (2011).
61. Valan Arasu, A., and Sornakumar, T., “Design, manufacture and testing of fiberglass reinforced parabola trough for parabolic trough solar collectors”, *Solar Energy*, 81 (10): 1273-1279 (2007).
62. Manuel, R. A., and Eduardo, Z., “Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Concentrating Solar Thermal Power. Unit 21”, *Taylor and Francis Group*, Miami, USA, 21-92 (2007).
63. Gürel, A. E., and Ceylan, İ., “Thermodynamic analysis of PID temperature controlled heat pump system”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2: 42-49 (2014).

64. Adapa, K. P. and Schoenau, J. G., “Re-Circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis”, *International Journal of Energy Research*, 29: 961-972 (2005).
65. Ceylan, İ., Kaya, M., Gürel, A. E. and Ergün, A., “Energy analysis of a new design of a photovoltaic cell-assisted solar dryer”, *Drying Technology: An International Journal*, 31 (9): 1077-1082 (2013).
66. Gönen, E., “Isı pompası destekli PLC kontrollü bir kurutucuda defneyaprağı kurutulması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-85 (2012).
67. Best, R., Soto, W., Pilatowsky, I., and Gutierrez, L. J., “Evaluation of a rice drying system using a solar assisted heat pump”, *Renewable Energy*, 5 (1): 465-468 (1994).
68. Chaturvedi, S. K., Chen, D. T., and Kheireddine, A., “Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump”, *Energy Conversion and Management*, 39 (3): 181-191 (1998).
69. Söylemez, M. S., “Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery”, *Journal of Food Engineering*, 74 (3): 292-298 2006.
70. Li, H., Dai, Y., Dai, J., Wang, X., and Wei, L., “A solar assisted heat pump drying system for grain in-store drying”, *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 4 (3): 386-391 (2010).
71. Aktekeli, B., “Isı pompalı kurutucu ile bayat ekmeğin geri dönüşüm tekniklerinin deneysel analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-85 (2012).
72. Mohanraj, M., “Performance of a solar-ambient hybrid source heat pump drier for copra drying under hot-humid weather conditions”, *Energy for Sustainable Development*, 23: 165-169 (2014).
73. Ceylan, I., “Energy analysis of PID controlled heat pump dryer”, *Engineering*, 1: 188-195 (2009).
74. Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T., and Rukprang, P., “Fruit drying using heat pump”, *RERIC International Energy Journal*, 20: 39-54 (1998).
75. Ibrahim, M., Sopian, K., Daud, W. R. W., and Alghoul, M. A., “An experimental analysis of solar-assisted chemical heat pump dryer”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 1-6 (2009).
76. Abuşka, M., ve Doğan, H., “Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucuda çekirdeksiz üzümün kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 13 (4): 271-279 (2010).

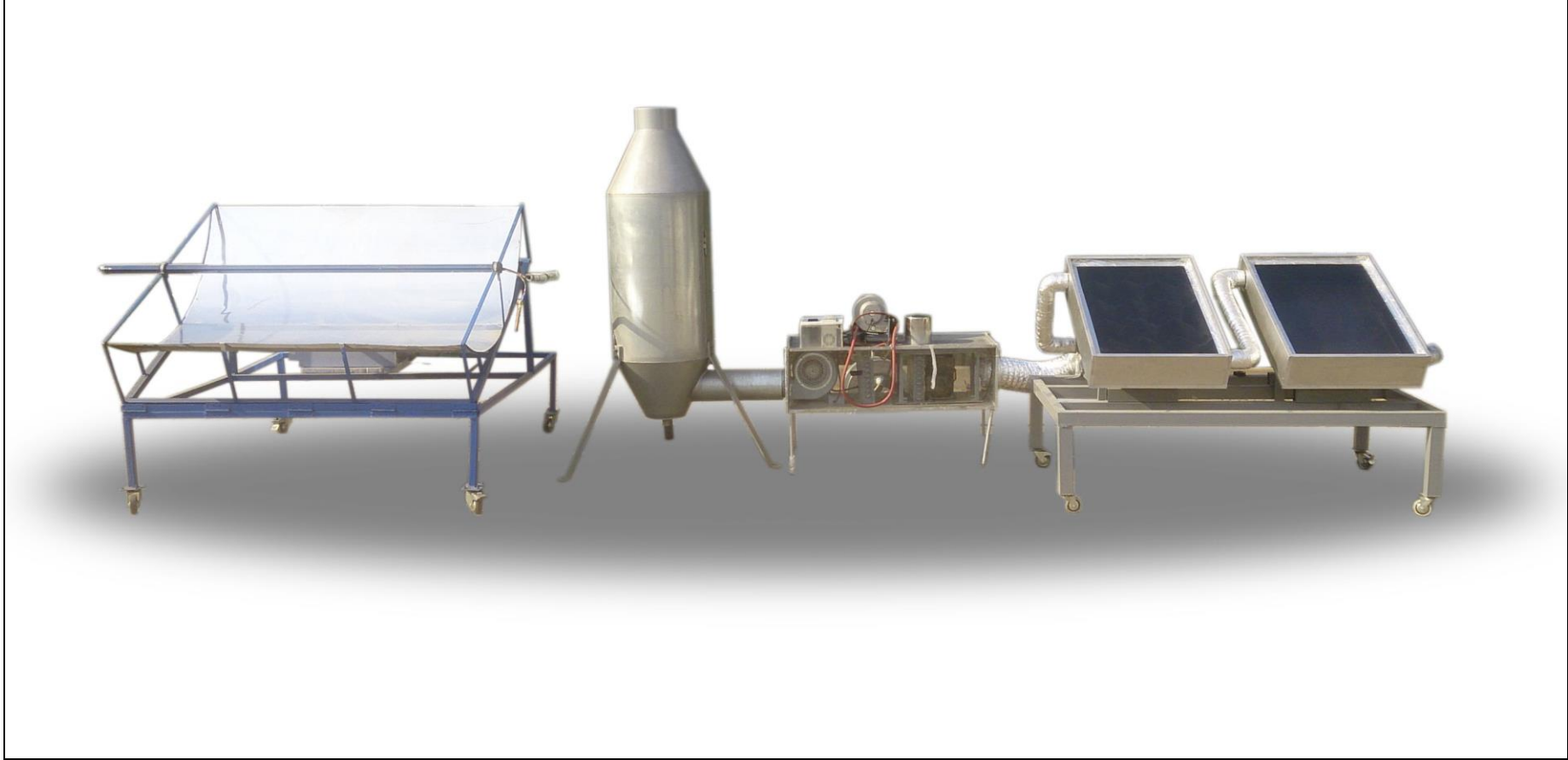
77. Polat, T., Aktaş, M., ve Şahin, H. M., “Güneş enerjisi ve ısı pompalı bir kurutma sistemi ile çam fıstığı kozalağı kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 15 (1): 1-7 (2012).

**EK AÇIKLAMALAR A.**

**DENEYSEL SİSTEMİN FOTOĞRAFLARI**



Şekil Ek A.1. Akışkan yatak imalatı.



Şekil Ek A.2. Deneysel sistem.



## ÖZGEÇMİŞ

Ali Etem GÜREL, 1986 yılında İstanbul’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bahçelievler Kocasinan ilköğretim okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Bağcılar Abdurrahman ve Nermin Bilimli Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünde tamamladı. 2004 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Tesisat Öğretmenliği ABD’da öğrenime başlayıp, 2008 yılında iyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi ABD’da Yüksek Lisans eğitimine başladı ve 2010 yılında mezun oldu. 2010 yılında aynı enstitü altında Doktora eğitimine başladı. Ali Etem Gürel, 2010 yılından bugüne Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

### ADRES BİLGİLERİ

Adres : Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu  
Merkez / DÜZCE

Tel : (532) 162 23 04

E-posta : [etemgurel@gmail.com](mailto:etemgurel@gmail.com)

### YAYIN BİLGİLERİ

Uluslararası hakemli dergilerdeki makaleler:

1. Ceylan, İ., Gürel, A. E., Demircan, H., and Aksu, B. “Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector”, *Energy and Buildings*, 72: 96-101 (2014).
2. Aktaş, M., Ceylan, İ., and Gürel, A. E. “Testing of a Condensation-type Heat Pump System for Low-temperature Drying Applications”, *International Journal of Food Engineering*, 10(3): 521-531 (2014).

3. Ceylan, İ., Gedik, E., ErKaymaz, O., and Gürel, A. E. “The artificial neural network model to estimate the photovoltaic modul efficiency for all regions of the Turkey”, *Energy and Buildings*, 84: 258-267 (2014).
4. Ceylan, İ., ErKaymaz, O., Gedik, E., and Gürel, A. E. “The prediction of photovoltaic module temperature with artificial neural networks”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 3: 11-20 (2014).
5. Gürel, A. E., and Ceylan, İ. “Thermodynamic analysis of PID temperature controlled heat pump system”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2: 42-49 (2014).
6. Çay, Y., and Gürel, A. E. “Determination of Optimum Insulation Thickness, Energy Savings, Environmental Impact for Different Climatic Regions of Turkey”, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 32(2): 365-372 (2013).
7. Ceylan, I., Kaya, M., Gürel, A. E., and Ergun, A. “Energy analysis of a new design of a photovoltaic cell-assisted solar dryer”, *Drying Technology*, 31(9): 1077-1082 (2013).

Ulusal hakemli dergilerdeki makaleler;

1. Gürel, A. E., Çay, Y., Daşdemir, A., ve Küçükkülahlı, E. “Karabük İçin Dış Duvar Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufu Ve Hava Kirliliğine Etkileri”, *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi (Tüketim Toplumu ve Çevre Özel Sayısı), Tüketim Toplumu ve Çevre Sempozyumu*, 1(4): 402-414 (2012).
2. Gürel, A. E., ve Daşdemir A. “Türkiye’nin dört farklı iklim bölgesinde ısıtma ve soğutma yükleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(4): 346-352 (2011).
3. Gürel, A. E., ve Cingiz Z. “Farklı Dış Duvar Yapıları İçin Optimum Isı Yalıtım Kalınlığı Tespitinin Ekonomik Analizi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1): 75-81. (2011).
4. Gürel, A. E., Yılmaz S., ve Ceylan İ. “Güneş Enerjili ve Nem Kontrollü Kurutucunun Deneysel Analizi”, *E-Journal of New World Sciences Academy*, 5(2): 178-187 (2010).

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler;

1. Gürel, A. E., Çay, Y., Daşdemir, A., ve Küçükkülahlı, E. “Karabük İçin Dış Duvar Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufu ve Hava Kirliliğine Etkileri”, *Tüketim Toplumu ve Çevre Sempozyumu*, Karabük. (2012).

2. Gürel, A. E., Çamur, D., ve Akay, A. A. “Karabük Demir-Çelik Fabrikasının Kuruluşundan Günümüze Kent Yaşamına Ekonomik Etkileri”, **Kuruluşundan Bugüne Karabük ve Demir Çelik Sempozyumu**, Karabük. (2010).