T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ENERJİSİ VE ISI POMPASI SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU İLE ÇİNİ KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI

MUSTAFA KEMALETTİN BÜYÜKAKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN DOÇ. DR. SEMİHA ÖZTUNA
II. DANIŞMAN DOÇ. DR. HAKAN DEMİR

EDİRNE 2013

GÜNEŞ ENERJİSİ VE ISI POMPASI SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU İLE ÇİNİ KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI

MUSTAFA KEMALETTİN BÜYÜKAKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2013

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Taner TIMARCI
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımızca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hakan Demir
İkinci Tez Danışmanı

Doç. Dr. Semiha Öztuna
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Yüksek lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad): İmza

Prof. Dr. Ayşegül Öztürk

Doç. Dr. Semiha Öztuna

Doç. Dr. Hakan Demir

Doç. Dr. Özden Ağra

Yrd. Doç. Dr. Berrin Karaçavuş

Tarih: 13 /12/ 2013

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

13 / 12 / 2013

Mustafa Kemalettin Büyükakın

Yüksek Lisans Tezi

Güneş Enerjisi ve Isı Pompası Sistemlerinin Entegrasyonu ile Çini Kurutma Sistemi Tasarımı

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Güneş enerjisi ve ısı pompası sistemlerinin entegrasyonu ile oluşturulan sistemlerin kullanımı birçok endüstriyel kurutma prosesi için enerji tüketimi açısından oldukça faydalı bir durumdadır. Birçok araştırmacı tarafından çalışmaları yürütülen ve tavsiye edilen bu sistemlerin konvansiyonel sistemlere göre enerji maliyetleri ve çevreye olan olumsuz etkileri çok daha azdır. Bu çalışmada günlük kapasitesi 600 kg olan çini kurutma fırını tasarlanmıştır ve %30 (yb) su oranına sahip çini ürünlerin 24 saat içerisinde kurutulması amaçlanmıştır. Fırının elektrikli konvansiyonel ve ısı pompalı olması durumuna göre enerji tüketimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır ve kıyaslanmıştır. Isı pompasının kullanımından önce yalnızca güneş enerjisinin kullanımı ile ön kurutma yapabilmek amacıyla gerekli depo, kolektör ve ısı değiştiricisi boyutlandırılmaları yapılmıştır. Yapılan maliyet analizi ile ısı pompalı kurutma sistemi ile güneş enerjisi destekli kurutma sistemi kıyaslanmıştır ve birbirlerine göre daha avantajlı olabildikleri çalışma şartları belirlenmiştir.

Yıl: 2013

Sayfa Sayısı: 105

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Isı Pompası, Güneş Enerjisi

Master Thesis

Design of Ceramic Drying System Using
Combined Heat Pump and Solar Energy Systems

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

Combining solar energy and heat pump system is a very attractive concept. It is possible to eliminate some disadvantages of conventional drying systems by using a heat pump system and solar energy system as renewable source. These proposed systems by many researchers are able to use solar energy and reduce consumption of fossil fuels which causes environmental contamination. In this thesis, an industrial ceramic drying system is designed and the capacity of system is determined to dry 600 kg ceramic product containing water on %30 (wb) in 24 hours. Energy consumption of the system is evaluated depending on the energy source it uses. A solar system is added into drying system for pre-drying before heat pump starts operating. Heat pump assisted drying systems and solar assisted drying systems are also compared with a cost analysis to find out the feasible operating conditions and parameters.

Year: 2013

Number of Pages: 105

Key Words: Drying, Heat Pump, Solar Energy

ÖNSÖZ

Kurutma endüstride enerji tüketimi bakımından önemli bir paya sahip olan ve birçok alanda uygulaması bulunan bir prosestir. Enerji sıkıntısının baş göstermeye başladığı günümüzde, yüksek enerjiye ihtiyaç duyan bu tarz proseslere yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerin entegrasyonu birçok yönden önem taşımaktadır. Bu sayede mevcut enerji kaynaklarını korumak ve konvansiyonel sistemlerin çevremize her geçen gün daha da artarak verdiği zararları indirgemek mümkün olmaktadır. İşletmelerin enerji maliyetlerinin yüksek değerlerde olduğu günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılması ve bu konuya yönelik çalışmaların arttırılması yüksek önem taşımaktadır.

Bu konuyla ilgili çalışmalarıma yön veren danışmanlarım Doç. Dr. Semiha Öztuna ve Doç. Dr. Hakan Demir'e, değerleri yönlendirmelerinden dolayı Prof. Dr. İsmail Teke'ye ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER DİZİNİ vii
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatür Araştırması 2
2. BUHAR SIKIŞTIRMALI ISI POMPALARI 7
2.1. Ters Carnot Çevrimi 7
2.2.İdeal Buhar Sıkıştırmalı Isı Pompası 9
2.3. Isı Pompalarında Verim Kavramı 11
2.4. Isı Kaynakları 13
2.4.1. Hava Kaynağı 13
2.4.2. Su Kaynağı 14
2.4.3. Toprak Kaynağı 15
2.4.4. Güneş Kaynağı 16
3. KONVEKTİF KURUTMA PROSESİ 17
3.1. Malzemelerin Sınıflandırılması 18
3.1.1. Higroskopik Malzemeler 18
3.1.2. Higroskopik Olmayan Malzemeler 19
3.2. Kuruma Eğrileri 19
3.3. Kuruma Evreleri 21
3.3.1. Artan Hızda Kuruma Evresi 21
3.3.2. Sabit Hızda Kuruma Evresi 21
3.3.3. Birinci Azalan Hızda Kuruma Evresi 21
3.3.4. İkinci Azalan Hızda Kuruma Evresi 22
3.4. Malzeme Nem Oranı ve Denge Nemi 23

3.4.1. Nem Oranı 23
3.4.2. Denge Nemi 23
3.5. Sorpsiyon İzotermi 23
4. ISI POMPASI ve GÜNEŞ ENERJİSİYLE KURUTMA 25
4.1. Isı Pompasıyla Kurutma 25
4.1.1. Isı Pompalı Kurutucuların Sınıflandırılması 29
4.1.2. Isı Pompalı Kurutucu İçin Verim Parametreleri 29
4.1.2.1. SMER 29
4.1.2.2. MER 30
4.1.2.3. Kurutma Verimi 30
4.2. Güneş Enerjisiyle Kurutma 30
4.2.1. Havalı Kolektör Sistemleri 31
4.2.1.1. Pasif Kurutucular 31
4.2.1.2. Aktif Kurutucular 31
4.2.2. Sıvılı Kolektör Sistemleri 32
5. TEORİK ANALİZLER 34
5.1. Fırını Oluşturan ve Kurutulan Malzemelerin Tanımı 35
5.2. Isı Pompalı Kurutma Fırını ile Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Enerji Tüketim Değerleri ve Kıyaslanması 36
5.2.1. Isı Pompalı Kurutma Fırınının Enerji Tüketim Analizi 38
5.2.2. Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Enerji Tüketim Analizi 42
5.3. Güneş Enerjili Kurutma Sistemi Tasarımı 46
5.3.1. İlgili Parametreler ve Denklemler 47
5.3.2. Güneş Enerjili Kurutma Fırınında Elde Edilen Sıcaklık Eğrileri 49
5.3.3. Kolektör Hesapları 67
5.3.3.1. İlgili Denklemler 68
5.3.4. Güneş Işınımı Miktarının Belirlenmesi 73
5.3.4.1. Güneş Işınımı Denklemleri 74
5.3.4.2. İznik İlçesi'ne Ait Işınım Değerleri 76
5.3.5. Sistemde Kullanılan Kolektör Adetlerinin Belirlenmesi 78
5.4. Maliyet Analizi 82
5.4.1. Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinin Maliyet Analizi 82

5.4.2. Güneş Enerjili Kurutma Sistemleriyle Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinin Kıyaslanması 90
6. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME 96
KAYNAKLAR 102
ÖZGEÇMİŞ 105

SİMGELER DİZİNİ

A_k	Kolektör Alanı $[m^2]$
c	Özgül Isı [kJ/kg ℃]
COP	Coefficient of Performance
D	Boru Çapı [m]
F	Kanat Etkenliği
F^*	Kolektör Verimlilik Katsayısı
F_r	Kolektör Etkenlik Katsayısı
G	Güneş Işınım Şiddeti $[W/m^2]$
G_{GS}	Güneş Sabiti $[W/m^2]$
H_0	Atmosfer Dışı Yatay Yüzey İçin Günlük Toplam Işınım $[MJ/m^2gün]$
$\overline{H_D}$	Yatay Yüzey İçin Aylık Ortalama Günlük Yaygın Işınım $[MJ/m^2gün]$
$\overline{H}$	Yatay Yüzey İçin Aylık Ortalama Günlük Toplam Işınım $[MJ/m^2gün]$
$\overline{H_0}$	Atmosfer Dışı Yatay Yüzey İçin Aylık Ortalama Günlük Toplam Işınım $[MJ/m^2gün]$
h_g	Giren Kütle Entalpisi [kJ/kg]
$h_ç$	Çıkan Kütle Entalpisi [kJ/kg]
h_b	Buhar Entalpisi [kJ/kg]
h_i	Boru İçi Taşınım Katsayısı $[W/m^2℃]$
I	Yatay Yüzeye Gelen Saatlik Toplam Işınım $[MJ/m^2]$
I_D	Yatay Yüzeye Gelen Saatlik Yaygın Işınım $[MJ/m^2]$
I_B	Yatay Yüzeye Gelen Saatlik Direkt Işınım $[MJ/m^2]$
I_T	Eğik Yüzeye Gelen Saatlik Toplam Işınım $[MJ/m^2]$
ITK	Isıtma Tesir Katsayısı
i	Faiz Oranı
$\overline{K_T}$	Bulut Endeksi
k	Isı İletim Katsayısı [W/m℃]
KH	Kuruma Hızı [kg/h]
KB	Kuru Baz
L	Kolektör Boru Arası Mesafe [m]

L_{yal}	Yalıtım Kalınlığı [m]
$\dot{m}_g$	Giren Kütle Debisi [kg/s]
$\dot{m}_ç$	Çıkan Kütle Debisi [kg/s]
M_{Depo}	Güneş Enerjisi Depo Kapasitesi [kg]
MER	Moisture Extraction Rate [kg/h]
n	Yıl Sayısı
n	Gün Sayısı
P	Basınç [kPa]
R	Gaz Sabiti [kJ/kg K]
R_B	Eğik Yüzey Dönüşüm Katsayısı
r_d	Saatlik Yaygın Işınımın Günlük Yaygın Işınıma Oranı
r_t	Saatlik Toplam Işınımın Günlük Toplam Işınıma Oranı
S	Absorbe Edilen Işınım [W/m^2]
SMER	Specific Moisture Extraction Rate [kg/kWh]
STK	Soğutma Tesir Katsayısı
T	Sıcaklık [°C]
T_b	Kolektör Boru Sıcaklığı [°C]
t	Zaman [saniye]
U_L	Kolektör Isı Kayıp Katsayısı [$W/m^2°C$]
V	Hacim [m^3]
V_H	Hava Hızı [m/s]
YB	Yaş Baz
YM	Yatırım Maliyeti [TL]
Q	Isı Enerjisi [kJ]
W	İş [kW]
Wb	Wet Base
ε	Isı Değiştiricisi Etkenlik Katsayısı
δ	Kolektör Soğurucu Yüzey Kalınlığı [m]
δ	Denklinasyon Açısı
ϕ	Enlem Açısı
ω_s	Güneş Batış Açısı
ω_{se}	Eğimli Yüzey İçin Güneş Batış Açısı

ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
β	Kolektör Eğim Açısı
ρ_g	Yerin Yansıtma Katsayısı
α	Kolektör Soğurucu Yüzey İçin Soğurma Katsayısı
τ	Kolektör Camı İçin Işık Geçirgenlik Katsayısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Carnot Soğutma Makinesi 8
Şekil 2.2 Ters Carnot Çevrimi T-s Diyagramı 9
Şekil 2.3 Buhar Sıkıştırmalı Isı Pompasının Çalışma Biçimleri 10
Şekil 2.4 İdeal Isı pompası / Soğutma Makinası Çevrimi 11
Şekil 2.5 Hava Kaynaklı Isı Pompası Sistemleri 14
Şekil 2.6 Yatay Toprak Isı Değiştircileri 15
Şekil 2.7 Güneş ve Toprak Kaynaklı Isı Pompası 16
Şekil 3.1 Kurutmada Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferi 18
Şekil 3.2 Kuruma Hızı – Süre Eğrisi 19
Şekil 3.3 Su İçeriği - Süre Eğrisi 20
Şekil 3.4 Kuruma Hızı – Su İçeriği Eğrisi 20
Şekil 3.5 Tek Taraflı Kurumada İkinci Azalan Hızda Kuruma Evresi 22
Şekil 3.6 Bir Kil Malzemesine Ait Kuruma Kinetiği 24
Şekil 3.7 Bir Toprak Malzemesine Ait Sorpsiyon İzotermi 24
Şekil 4.1 Isı Pompalı Kurutucunun Şematik Gösterimi ve Kurutma Havasının İdeal ve Gerçek Durum için Psikorometrik Diyagramdaki Durumları 27
Şekil 4.2 Isı Pompalı Kurutucu 28
Şekil 4.3 Atmosferik Kaynaklı Isı Pompalı Kurutucu 28
Şekil 4.4 Isı Pompalı Kurutucuların Sınıflandırılması 29
Şekil 4.5 Güneş Enerjisiyle Kurutma Sistemleri 32
Şekil 4.6 Cebri Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Sistem 33
Şekil 5.1 Tasarlanan Çini Kurutma Fırını ve Kapıların Açık Olması Durumunda Ürün Yerleşim Görünümü 35
Şekil 5.2 Tasarlanan Çini Kurutma Fırını ve Ön Görünüşü 35
Şekil 5.3 Gerçek Kuruma Eğrisi ve Hesaplamada Kabul Edilen Lineer Kuruma Eğrisi 37
Şekil 5.4 Kuruma Hızı-Süre İlişkisi 37
Şekil 5.5 Isı Pompalı Kurutma Fırınının Şematik Gösterimi 38
Şekil 5.6 Rejime Geçme Süreci İçin Isı Pompalı Kurutma Fırınının Sıcaklık – Zaman Grafiği 40

Şekil 5.7 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Şematik Gösterimi..... 42
Şekil 5.8 Rejime Geçme Süreci İçin Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Sıcaklık Eğrisi 46
Şekil 5.9 Güneş Enerjisiyle Kurutma 47
Şekil 5.10 0.25 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)..... 50
Şekil 5.11 0.25 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)..... 51
Şekil 5.12 0.3 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)..... 52
Şekil 5.13 0.3m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)..... 53
Şekil 5.14 0.35m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)..... 54
Şekil 5.15 0.35m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)..... 55
Şekil 5.16 0.4m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)..... 56
Şekil 5.17 0.4 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)..... 57
Şekil 5.18 0.45 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)..... 58
Şekil 5.19 0.45 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)..... 59
Şekil 5.20 0.5 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)..... 60
Şekil 5.21 0.5 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)..... 61
Şekil 5.22 Kolektör Soğurucu Yüzey ve Taşıyıcı Boru Yerleşimleri 68
Şekil 5.23 Kolektör Etkenlik Katsayısının Akışkan Debisine Göre Değişimi..... 73
Şekil 5.24 Kolektör Adedini Hesaplayan Program İçin Akış Diyagramı..... 80
Şekil 5.25 Paslanmaz Su Deposunun Yatırım Maliyetleri..... 82
Şekil 5.26 Isı Değiştiricisi Yatırım Maliyetleri..... 83
Şekil 5.27 Yıllara Göre Nakit Akışının Şematik Gösterimi..... 84
Şekil 5.28 Güneş Enerjili ve Eş Değer Isı Pompalı Sistemlerin Örnek Sıcaklık Eğrileri 93
Şekil 6.1 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanmasında Sistem Karları..... 100
Şekil 6.2 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanmasında Sistem Karları..... 101
Şekil 6.3 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanmasında Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Isı Pompalı Kurutma Sistemine Karşı Kar-Zarar Durumu 101
Şekil 6.4 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanmasında Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Isı Pompalı Kurutma Sistemine Karşı Kar-Zarar Durumu 101

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1 Fırını Oluşturan Bileşenler ve Özellikleri..... 34
Tablo 5.2 Isı Pompalı Kurutma Fırınının Rejime Geçme Sürecinde Sıcaklık Değişimi .. 40
Tablo 5.3 Isı Pompalı Kurutma Fırınına Rejimde Kalma Sürecinde Verilmesi Gerekli Net Güç Değerleri..... 41
Tablo 5.4 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınına Giren Havaya Ait Parametreler .. 44
Tablo 5.5 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Rejime Geçme Sürecinde Sıcaklık Değişimi..... 44
Tablo 5.6 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınına Rejimde Kalma Sürecinde Verilmesi Gereken Güç Değerleri 45
Tablo 5.7 Hesaplamada Kullanılan Parametreler ve Bu Parametreler İçin Kullanılan Farklı Değerler..... 49
Tablo 5.8 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,25 m/s) 62
Tablo 5.9 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,30 m/s) 63
Tablo 5.10 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,35 m/s)..... 63
Tablo 5.11 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,40 - 0,45 m/s)..... 64
Tablo 5.12 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,50 m/s)..... 65
Tablo 5.13 Depo Başlangıç Sıcaklığının 80℃ Olması Durumunda Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,30-0,35-,40 m/s)..... 66
Tablo 5.14 Depo Başlangıç Sıcaklığının 80℃ Olması Durumunda Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,45-0,50 m/s)..... 67
Tablo 5.15 Kolektör Özellikleri..... 69
Tablo 5.16 Kolektör Parametreleri..... 72
Tablo 5.17 Kolektör Isı Kayıp Katsayıları (Dış Ortam ile Koruyucu Cam Arasında Rüzgardan Kaynaklanan Isı kayıp Katsayısının 5 W/m^2K Olduğu Durum İçin) 72
Tablo 5.18 Kolektör Boru İçi Akışkan Isı Taşınım Katsayıları (75℃ Su İçin) 72
Tablo 5.19 İznik İlçesine Ait Parametreler..... 76
Tablo 5.20 İznik İçin Yatay Yüzey Üzerine Gelen Saatlik Işınım Değerleri..... 77
Tablo 5.21 İznik İçin Açılı Yüzey Üzerine Gelen Saatlik Işınım Değerleri 78
Tablo 5.22 Depo Sıcaklığını 90℃ ve 80℃'ye Çıkaran Sistemler 79

Tablo 5.23 Direkt Işınım İçin Saat Açısına Göre τα Değerleri 81
Tablo 5.24 Güneş Enerjili Kurutma Fırını İçin Maliyet Analizi Parametreleri..... 85
Tablo 5.25 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,25-0,30 m/s) 85
Tablo 5.26 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,35 m/s) 86
Tablo 5.27 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,40 m/s) 87
Tablo 5.28 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,45 m/s) 88
Tablo 5.29 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,50 m/s) 89
Tablo 5.30 Fırının Saatlik Ortalama Kurutma Yükü Değerleri 91
Tablo 5.31 Farklı Koşullar İçin Isı Pompası Boyutları ve Yatırım Maliyetleri..... 92
Tablo 5.32 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanması Durumunda Eşdeğer Güneş Enerjili ve Isı Pompalı Kurutma Sistemleri..... 92
Tablo 5.33 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanması Durumunda Eşdeğer Güneş Enerjili ve Isı Pompalı Kurutma Sistemleri..... 93
Tablo 5.34 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanması Durumunda Güneş Enerjili Kurutma Sistemleriyle Eşdeğer Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinin Maliyet Açısından Kıyaslanması..... 94
Tablo 5.35 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanması Durumunda Güneş Enerjili Kurutma Sistemleriyle Eşdeğer Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinin Maliyet Açısından Kıyaslanması..... 95

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kurutma gazlardan, sıvılardan ve katılardan su veya diğer sıvıların buharlaştırılmasıyla gerçekleşen kütle transferi prosesidir. Herhangi bir kurutma prosesinde temel amaç gerekli optimizasyonlar sayesinde minimum maliyetle ürün kalitesini bozmadan maksimum kurutmayı gerçekleştirmektir.

Kurutma endüstride tüm alanlarda tüketilen enerjinin yaklaşık %15'ini oluşturan, yüksek enerjiye ihtiyaç duyan bir prosestir. Birçok endüstriyel kurutma prosesinde konvansiyonel yöntemler ile önemli miktarda enerji boşa harcanmaktadır. Kurutma içeren endüstriyel proseslerde harcanan toplam enerjinin yaklaşık %60'ı kurutma esnasında kullanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde tüm alanlarda ihtiyaç duyulan toplam enerjinin %9-25 kadarı kurutma kaynaklı olmaktadır. Dolayısıyla enerji sıkıntısının çekildiği günümüz dünyasında enerji tüketimini minimize edecek yeni tekniklere başvurulması gerekmektedir.

Kurutma sistemleri konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerden oluşabilmektedir. Güneş enerjisi ve ısı pompası sistemlerinin kullanımı ve bu sistemlerin birbirleriyle uygun şekilde entegrasyonu ile yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bir ısı pompası ve kurutucu bölümüne sahip bir sistemin kullanımı ile kurutma havasından gizli ve duyarlı ısı geri alınarak sistem verimi oldukça arttırılabilmektedir ve kurutucu girişlerindeki havanın şartları optimum değerlere ayarlanabilmektedir. Bu sayede elektrikli kurutma sistemlerine kıyasla çok büyük enerji tasarrufları sağlanabilmektedir. Isı pompalı sistemlerin yanında güneş enerjisinden de çeşitli yollarla yararlanmak maliyetleri oldukça azaltabilmektedir. Bununla ilgili sıkıntı güneş enerjisinin sürekli olmayışı ve bu doğrultuda gerekli depolama sistemlerine veya yardımcı enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmasıyla birlikte yatırım maliyetlerinin yüksek

olmasıdır. Isı pompalı sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına paralel olarak güneş enerjisinin de ısı pompalı sistemlerle entegrasyonu ve kullanım alanları artmaktadır.

Nem almalı ısı pompalı kurutucuların konvansiyonel elektrikli fırınlarından daha verimli oldukları bilinmektedir. Bedava olan güneş enerjisinin kullanılarak kurutma süresi boyunca ısı pompasının yükünün bir süreliğine alınabilmesiyle elde edilen entegre sistemlerin kullanımı bir miktar daha enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Bu çalışmada konuyla ilgili literatür araştırması ısı pompası ve güneş enerjisi sistemlerinin entegrasyonu, ısı pompası ve güneş enerjisiyle kurutma, seramik malzemelerin kuruma davranışı ve kısaca güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde yapılan çalışmalar hakkında olmuştur. Araştırma sonucu ısı pompası ve güneş enerjisi sistemlerinin entegrasyonuyla ilgili çeşitli alanlarda çalışmaların bulunduğu görülmüştür. Kurutma ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğunu ise gıda ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili olmaktadır. Çini malzemesinin kuruma davranışıyla ilgili olarak herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Atalay (2007) [1] çalışmasında güneş enerjisi destekli ısı pompalı domates kurutma fırınının tasarımını ve termodinamik analizini yapmıştır. Bu çalışmada ısı pompalı ve güneş enerjili kurutma sistemleri ile doğal kurutma yöntemi birçok yönden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan parametreler kuruma zamanı, ürün görüntüsü-geometrisi ve enerji tüketimi olmuştur. Isı pompalı ve güneş enerjili kurutma deneylerinde 2 m/s ortalama kurutma havası hızı kullanılmıştır. En yüksek nem alma oranı (MER) 0,237 kg/h değerinde dörtte bir domateslerin ısı pompalı sistemde kurutulması esnasında elde edilirken en düşük 0.125 kg/h ile dörtte bir domateslerin doğal yöntemle kurutulmasında elde edilmiştir. En yüksek özgül nem alma oranı (SMER) 1.573 kg/kWh değerinde dörtte bir domateslerin güneş enerjisi ile desteklenen sistemde kurutulmasında elde edilirken, en düşük 0.078 kg/kWh ile yarım domateslerin ısı pompası sisteminde kurutulması esnasında elde edilmiştir.

Aktaş (2007) [2] çalışmasında ısı pompası destekli PID kontrollü bir kurutucu tasarlamış ve fındık kurutmada deneysel olarak incelemelerde bulunmuştur. Sistemde kurutma havası sıcaklıkları 50°C, 45°C ve 40°C olarak seçilmiştir. Fındıklar bu

sıcaklıklarda sırasıyla 24, 27 ve 30 saatte kurutulmuşlardır. Hava hızları ise yine bu sıcaklıklar için sırasıyla 0.25 m/s, 0.32 m/s ve 0.38 m/s olarak ayarlanmıştır. Çalışmada ısı pompalı kurutucunın COP değerleri 50°C için 1,70, 45°C için 1,58 ve 40°C için 1,40 olarak hesaplanmıştır.

Yavuz (2004) [3] kondenzasyonlu kurutma fırınının bilgisayar ile kontrolü üzerine çalışma yapmıştır. Fırın içerisindeki havanın sıcaklık, nem miktarı, üründeki ağırlık azalması gibi parametreler uygun ölçüm ekipmanları ile ölçülerek bilgisayara aktarılmıştır. Çalışmada her kurutma periyodu için tasarlanarak imal edilen kondenzasyonlu kurutma sisteminin otomatik olarak kontrol edilebileceği görülmüştür.

Aktaş vd. (2010) [4] çalışmalarında güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutucu kullanarak kırmızıbiber kurutmuşlardır. Kırmızıbiberler 10.81 gr su/gr kuru madde değerinden 0,16 gr su/gr kuru madde değerine kadar kurutulmuşlardır. Kırmızıbiberler 210 dakika boyunca 50°C'de 0.4 m/s hızla kurutulmuşlardır. Deneysel verilere göre tüm sistem için COP değeri 2.24 ve özgül nem çekme oranı SMER 0.209 olarak hesaplanmıştır.

Durmuş vd. (2012) [5] ısı pompalı tekstil kurutma makinelerinde kurutma havası debisinin sistem performansı üzerine olan etkisi hakkında deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde kurutulacak malzeme olarak havlu kullanılmıştır. Deneyler 4 farklı kurutma havası debisinde, 3 farklı kuru tekstil kütlesinde ve 4 farklı nemlendirme oranlarında olmak üzere 36 farklı şekilde yapılmıştır ve deney süreleri 40 dakika olarak tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlarla her bir durum için SMER, MER ve kurutma verimleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda kurutma havası hızının artmasıyla SMER, MER ve kurutma veriminde belirgin artışlar görülmüştür. Belirli bir kurutma havası debisinde ve nemlendirme oranında kuru malzeme miktarının artmasıyla SMER ve MER değerleri artarken, kurutma verimi değeri düşmüştür. Sabit hava hızı ve kuru malzeme miktarı için nemlendirme oranının yükselmesi SMER ve MER değerlerinde çok az bir artışa sebep oluştururken kurutma verimi değeri düşmüştür.

Yamaç (2005) [6] güneş enerjisi destekli ısı pompaları üzerinde teorik bir çalışma yapmıştır. Çalışmada bir işletmenin günlük 50°C'de 5000 kg'lık sıcak su ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada depo suyu 14°C'den başlanarak ısıtılmaktadır ve bu değerlere göre ısıl yük bulunmuştur. Sistemde ısı pompasının buharlaştırıcısı güneş enerjisi

deposundan ısı çekerken, yoğuşturucuyla kullanılacak olan su deposuna ısı atmaktadır. Sistem boyutlandırmaları mart ayı ışınım değeri ve süresine göre yapılmıştır ve ısı pompası ITK değeri 4,39 olarak hesaplanmıştır.

Özgener ve Hepbaşlı (2005) [7] güneş enerjisi ve toprak kaynaklı bir ısı pompası sistemi üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. 50m derinliğinde dikey toprak ısı değiştirici kullanılan bu çalışmada sera ısıtılması amaçlanmıştır. Sistemde ısı pompası toprak ısı değiştirici ve kolektörden geçen antifirizli sudan ısı çekerken, yoğuşturucudan ise bir başka su çevrimine ısı atmaktadır. Bu su çevriminden de sera havasına ısı atılmaktadır. Sistem ocak-mart aylarında çalıştırılmıştır. Isı pompasının COP_H değeri 2-3.13 arası değişirken, tüm sistem için olan COP_S değeri %5-20 arasında daha düşük olmuştur.

Shariah ve Löf (1996) [8] TRNSYS simülasyon programını kullanarak güneş enerjisi depolama tankının yükseklik ve depolama hacmi/kolektör alanı oranı değerlerinin optimum değerlerini çeşitli sıcaklık değerleri için belirlemişlerdir. Depolama tankı içerisindeki termal katmanların oluşturulması sayesinde kolektör verimliliğinin arttırılması ve güneş enerjisi kullanım oranının arttırılması gösterilmiştir.

Çomaklı vd. (2012) [9] sıcak su üretiminde kullanılacak şekilde ekonomik ve verimliliği yüksek güneş enerjisi sistemleri elde etmek adına toplam kolektör alanı ve depolama hacminin optimizasyonu üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada depolama hacmi/kolektör alanı oranının 25–200 l/m^2 arasında olması durumuna göre kolektör verimliliklerinin, depo sıcaklığının ve toplanan termal enerjinin değişimi gösterilmiştir. Bu oran arttıkça kolektör verimliliğinde ve depolanan termal enerji miktarında artış yaşanırken, buna bağlı olarak da depo sıcaklığında düşüş görülmüştür. Depodaki suyun sıcaklığının kullanım için gerekli olan değerin altına düşmemesi kaydı ile en verimli sistemin grafik üzerlerinden seçilebileceği belirtilmiştir.

Sander vd. (2003) [10] kil levhalarının deneysel olarak elde edilmiş kuruma kinetiklerine uyacak şekilde geleneksel ve geleneksel olmayan matematiksel modelleme yapmışlardır ve bu modeller deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda hava sıcaklığının ve kilin başlangıç nem miktarının kuruma kinetiği, malzeme kuruma parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hava sıcaklığının (30°C-70°C) artmasıyla ısı transfer katsayısının ve ürün difüzyon katsayısının arttığı belirlenmiştir.

Lakatos (2011) [11] toprak örneklerinin farklı koşullar altında nem tutma özelliklerini ve sorbsiyon izotermlerini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada 22ºC hava sıcaklığında toprak ürünleri farklı bağıl nem koşullarında farklı sürelerde kurutulmuşlardır ve denge nemine ulaşma süreleri tespit edilmiştir. Ardından nemli toprak ürünlerinin yine 22ºC hava sıcaklığında desorpsiyon izotermleri belirlenmiştir ve histerisiz olayı gözlemlenmiştir.

Belhamri (2003) [12] çalışmalarında gözenekli malzemelerin kurutulması sırasında malzeme yüzey şartlarını deneysel olarak gözlemlemiştir. Optik metrolojiyi kullanarak kuruma evrelerinde yüzey sıcaklığını, yüzey doygunluk oranlarını kiremit benzeri malzemeler için gözlemlemiştir. Kuruma evrelerinin sabit hızda kuruma, birinci azalan hızda kuruma ve ikinci azalan hızda kuruma olmak üzere üç kısımda olduğu ortaya konmuştur. Sabit hızda kurumada yüzey sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına yakın bir değerde kalırken yüzey doygunluğunun azaldığı, birinci azalan kuruma evresinin ise kritik yüzey doygunluğuna gelinince başladığı ve ikinci kuruma evresinin de yüzey doygunluk değerinin kurutma havasıyla dengeye geldiği zaman başladığı belirtilmiştir. Bu üç ayrı evre için matematik modellemeler yapılmıştır.

Chemkhi ve Zagrouba (2005) [13] sıcaklık ve bağıl nem olarak farklı koşullar altında çalışarak kilin kuruma kinetiğini deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada üç farklı kil türü ile deneyler yapılmıştır. Farklı hava sıcaklıkları (40-60ºC) ve farklı bağıl nem değerleri (30,40,60%) kullanılarak kil malzemelerinin difüzyon katsayıları nem oranının polinomal fonksiyonu olacak şekilde çıkarılmıştır.

Kowalski ve Mielniczuk (2007) [14] kaolen malzemesinin konvektif ve mikro dalga yöntemi ile kurutulmasının etkinliğini kuruma zamanı ve malzeme içinde oluşan gerilimlere göre incelemişlerdir. Deneysel yapılan çalışmalar konvektif ve mikro dalga kurutmanın aynı anda uygulanmasıyla malzeme iç gerilimlerinin azaldığını göstermiştir.

Zhang vd. (1999) [15] kiremit benzeri gözenekli malzemelerin kuruma davranışı hakkında deneysel ve teorik olarak araştırma yapmışlardır.

Briscoe vd. (1998) [16] su bazlı seramik süspansiyonların kuruma kinetiği hakkında çalışmışlardır ve hava hızı hariç tüm kuruma parametrelerini içine alan matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada her kuruma evresi için ayrı bir model geliştirilmiştir.

Bu çalışmada da Bursa'nın İznik İlçesi'nde kullanılacak şekilde güneş enerjisi destekli ısı pompalı çini kurutma fırını tasarlanmıştır ve bu sistemle sağlanan enerji tasarrufları hesaplanmıştır. Belirlenen çalışma şartları için güneş ve ısı pompalı kurutma sistemlerinin boyutlandırılmaları yapılmıştır. Güneş enerjili ve ısı pompalı kurutma sistemlerinin birbirlerine göre avantajlı olabilecekleri çalışma şartları maliyet analizi yapılarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

BUHAR SIKIŞTIRMALI ISI POMPALARI

Isı geçişi sıcak ortamdan soğuk ortama gerçekleşen fiziksel bir olgudur. Isı geçişinin sıcak ortamdan soğuk ortama doğru olması doğal bir fiziksel olaydır ve bunun tersi kendiliğinden asla gerçekleşemez. Düşük sıcaklıktaki bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi ancak soğutma makinelerinin veya ısı pompalarının kullanımı ile gerçekleşir [17]. Genel bir tanım olarak; bir miktar enerji harcayarak soğuk ortamdan sıcak ortama enerji naklini sağlayan sistemlere ısı pompaları veya soğutma makinaları denmektedir.

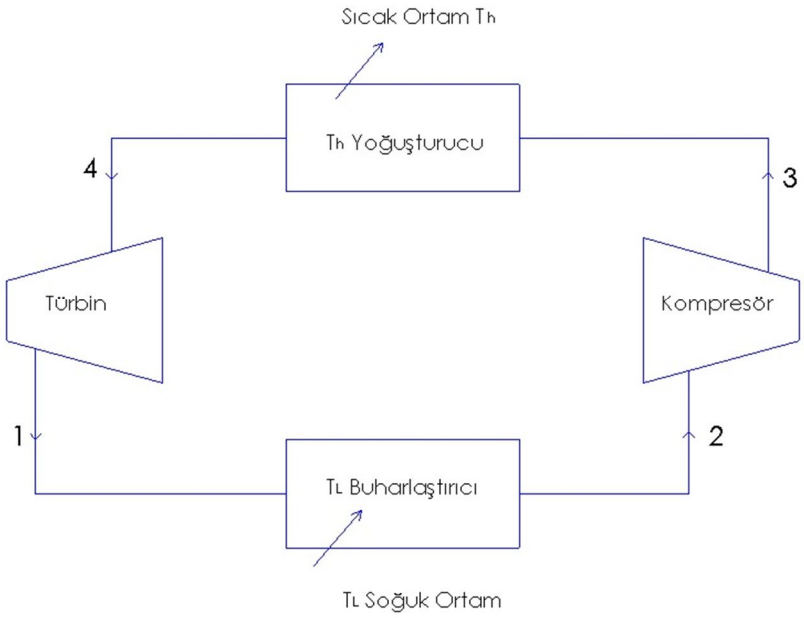
Isı pompaları ve soğutma makinelerinin çalışma prensibi esasen aynıdır. Aralarındaki fark kullanım amaçlarından ileri gelir. Bir ortamı ısıtma amaçlı kullanılan sistemler ısı pompası, soğutma amaçlı kullanılanlar ise soğutma makinesi olarak adlandırılır. Bu sistemler soğuk ortamdan sıcak ortama enerji aktarımı gerçekleştirirken bir miktar elektrik veya yakıt enerjisi harcarlar ve termodinamik yasalara karşı gelmezler.

2.1. Ters Carnot Çevrimi

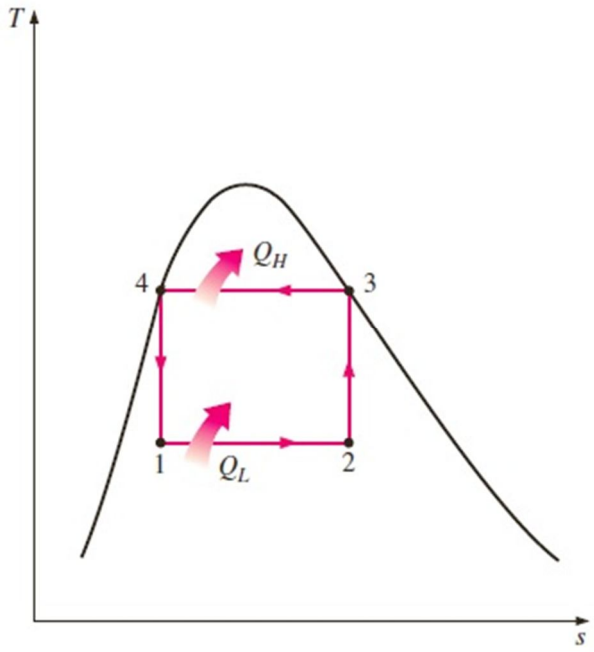
Carnot çevrimi hayali bir ısı makinesi çevrimi olup, çevrimdeki bütün prosesler tersinirdir. Bu çevrimle iki ısı kaynağı arasında çalışan biri ısı makinası için fiziksel sınırlar içerisinde en yüksek verim elde edilir. Carnot çevrimi tersinir bir çevrim olduğundan çevrimdeki bütün prosesler çevreye ve sisteme herhangi bir etkide bulunulmadan ilk haline getirilebilir. Çevrimin bu şekilde ters yönde çalıştırılması sonucu ısı enerjisiyle iş üreten çevrimden, iş tüketimi sonucu soğuk ortamdan sıcak ortama ısı transferi sağlayan çevrime geçiş yapılmış olur. Ters Carnot çevrimi iki ısı

kaynağı arasında çalışan en verimli soğutma çevrimidir. Ters Carnot çevrimi uygulamalarda gerçekleştirilemeyen hayali bir soğutma çevrimidir.

Gerçek uygulamalarda önlenemeyen tersinmezlikler gerçek çevrim veriminin Carnot veriminden aşağıda kalmasına sebep olur. Gerçek bir buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminde izotermal ısı alışverişi belirli ölçüde sağlanırken, izantropik sıkıştırma ve genişleme işlemleri sağlanamaz. Bu sebepten dolayı ters Carnot çevrimi gerçek soğutma çevrimleri için performans açısından kıyaslanabilecek bir referans olabilir. Şekil 2.1'de Carnot soğutma makinesinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.1 Carnot Soğutma Makinesi



Şekil 2.2 Ters Carnot Çevrimi T-s Diyagramı [18]

Ters Carnot çevrimi için T-s diyagramı şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu sistemin performans katsayısı ısı kaynaklarının Kelvin ölçeğindeki sıcaklık değerleriyle ifade edilir. Isıtma performans katsayısı ve soğutma performans katsayısı sırasıyla denklem 2.1 ve 2.2'de verilmiştir.

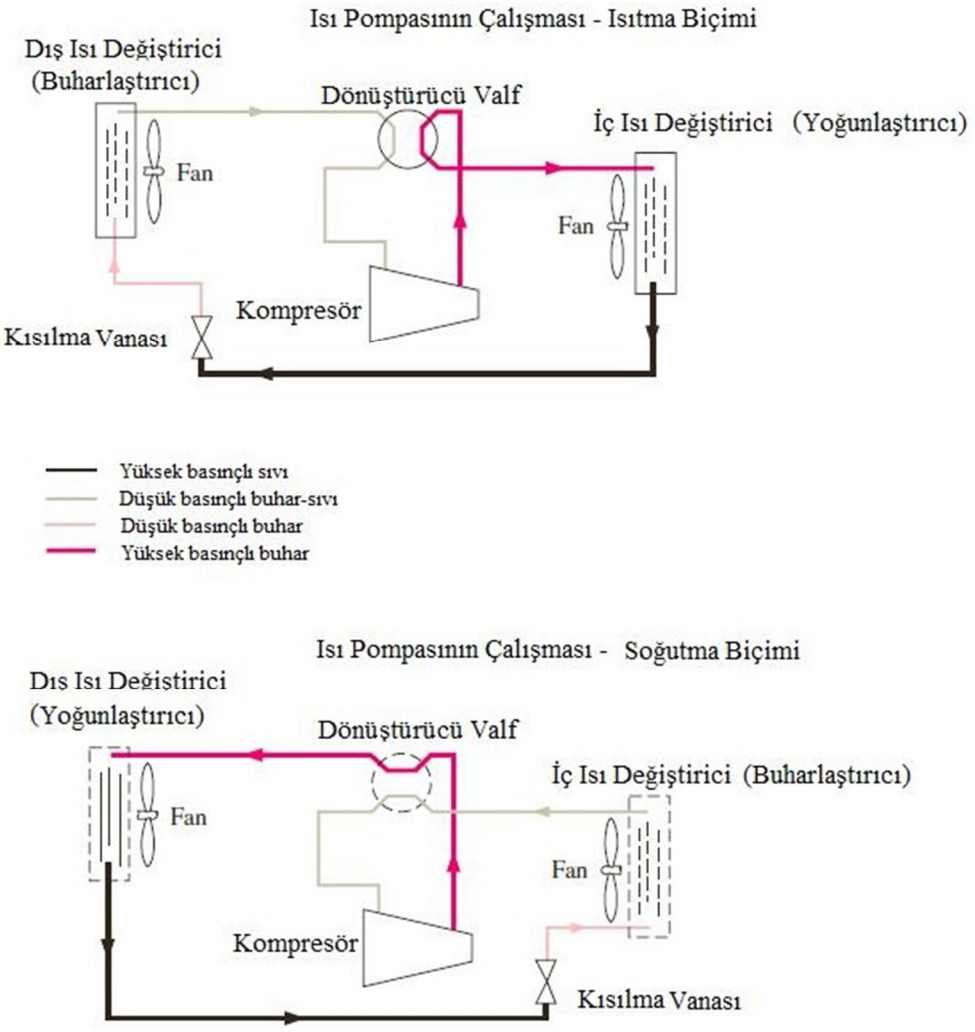
Isıtma performans katsayısı : $\frac{1}{1-\frac{T_L}{T_H}}$ (2.1)

Soğutma performans katsayısı : $\frac{1}{\frac{T_H}{T_L}-1}$ (2.2)

2.2. İdeal Buhar Sıkıştırmalı Isı Pompası

Buhar sıkıştırmalı ısı pompaları temel olarak 4 ana elemandan meydana gelirler. Bunlar kompresör, yoğuşturucu, kısılma elemanı ve buharlaştırıcıdır. Isı pompası sistemleri soğutucu akışkan adı verilen aracı akışkanın bu elemanlar ile şartlandırılıp ısıtılacak veya soğutulacak olan ortamla ısı alışverişine maruz bırakılmasıyla işlevlerini

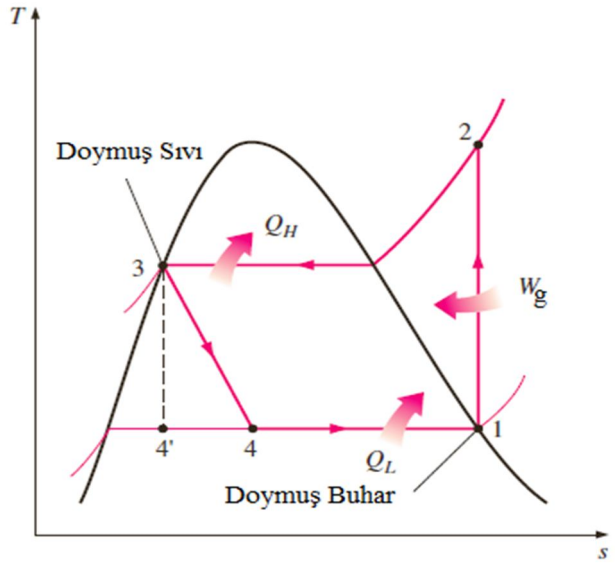
yerine getirmiş olurlar. Şekil 2.3'de bir buhar sıkıştırmalı ısı pompasının ısıtma ve soğutma çalışma biçimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Buhar Sıkıştırmalı Isı Pompasının Çalışma Biçimleri [18]

Kompresör soğutucu akışkanı basınçlandırır ve sıcaklığını arttırır. Kompresör çıkışında soğutucu akışkan yoğuşturucuya girer ve ideal olarak sabit basınçta ısıtılan ortama ısı verir ve yoğunlaşır. Yoğuşturcu ve buharlaştırıcı arasında kısılma elemanı bulunur. Kısılma elemanı iki kısım arasında basınç farkı oluşturur. Soğutucu akışkan kısılma elemanından sabit entalpi değerinde çıkıp buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcı soğutulan ortamda bulunur ve bu ortamdan daha soğuk olan soğutucu akışkan ortamdan ısı çekerek kompresör girişine geri döner. Bu sistem uygulamada ihtiyaca göre

yoğuşturucu ve buharlaştırıcıların bulunacağı ortamların yerleri belirlenerek veya sistem içi valflerin konumları değiştirilerek ısıtma veya soğutma amaçlı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.4 İdeal Isı pompası / Soğutma Makinası Çevrimi [18]

Şekil 2.4'de ideal bir çevrim gösterilmektedir. Numaralarla gösterilen her bir kademede şu işlemler gerçekleşmektedir:

1-2: Kompresörde izantropik adyabatik sıkıştırma
2-3: Sabit basınçta ısıtılan ortama veya çevreye ısı atılması
3-4: Sabit entalpide kısılma
4-1: Çevreden veya soğutulan ortamdan sisteme ısı çekilmesi

2.3. Isı Pompalarında Verim Kavramı

İdeal çevrimde gerçekleşen kademelerin formülasyonları denklem (2.3) ile denklem (2.6) arasında verilmiştir.

İzantropik adyabatik kompresör işi : $\dot{W}_g = \dot{m}(h_2 - h_1)$ (2.3)

Yoğuşturucudan atılan ısı: $\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3)$ (2.4)

Kısılma işlemi: Sabit entalpide basınç düşüşü $h_3 = h_4$ (2.5)

Buharlaştırıcıda Çekilen Isı: $\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$ (2.6)

Bir ısı pompası ve soğutma makinasının verimliliği için ilgili parametre kompresörde harcanan birim enerji başına ısıtılan ortama verilen ya da soğutulan ortamdan çekilen ısı miktarıdır. Uygulama amacı doğrultusunda aktarılan enerji miktarının harcanan enerji miktarı oranına performans katsayısı denir. Isı pompaları için bu katsayı ITK (ısıtma tesir katsayısı), soğutma makineleri için STK'dır (soğutma tesir katsayısı).

$$\text{ITK} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_g} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_3)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \text{Isıtılan ortama verilen ısı / Harcanan enerji} \quad (2.7)$$

$$\text{STK} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_g} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \text{Soğutulan ortama verilen ısı / Harcanan enerji} \quad (2.8)$$

Isı pompası sistemini kapalı bir sistem olarak düşünürsek çevrim sonucunda sistemin net enerji değişimi sıfırdır. Bu yüzden sistem için şu eşitliliğin zorunluluğu vardır:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_g \quad (2.9)$$

Bu durumda ITK ve STK değerleri şu şekilde de ifade edilebilmektedir:

$$\text{ITK} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_g} = \frac{\dot{Q}_L + \dot{W}_g}{\dot{W}_g} = 1 + \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_g} = 1 + \text{STK} \quad (2.10)$$

ITK değerinin bir ısı pompası için 1'den büyük olacağı görülmektedir. Uygulamada ortalama olarak ısı pompalarının ITK değerleri 2-3 arasında değişim göstermektedir. Bu sonuç ısı pompalarının konvansiyonel ısıtma sitemlerine göre daha az enerji tüketen sistemler olduklarını göstermektedir.

2.4. Isı Kaynakları

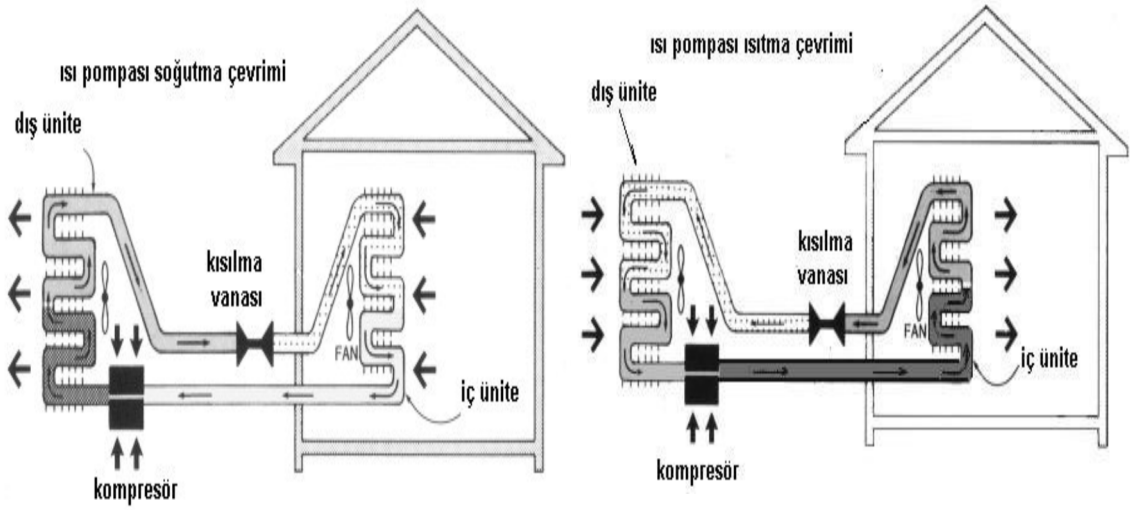
Isı pompalarının ısı transferinde bulundukları ortamlara ısı kaynakları denmektedir. Isı pompaları bu kaynaklara göre sınıflandırılabilmektedir. Isı kaynaklarının önemi ısı pompalarında ortaya çıkarabilecekleri performans değişiklerinden ileri gelmektedir. Buna bağlı olarak da ısı pompası sisteminin yatırım maliyetlerinde önemli farklılıklara yol açmaktadırlar. Isı pompaları için ısı kaynakları genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir.

- Hava
- Su
- Toprak
- Güneş enerjisi

2.4.1. Hava Kaynağı

Isı pompalarında en çok kullanılan ve bol bulunan ısı kaynağı havadır. Ayrıca en ucuz kurulum maliyetine sahip olan sistemler hava kaynaklı ısı pompalarıdır. Evlerde kullanılan buzdolapları ve klimalar hava kaynaklı ısı pompalarına örnek olarak gösterilebilir. Hava kaynaklı ısı pompalarının dezavantajı hava sıcaklığının oldukça değişken olmasıdır. Bu da sistemin ITK ve STK değerlerini oldukça etkilemektedir. Kış aylarında mahal ısıtma amaçlı kullanılan hava kaynaklı bir ısı pompası için çevre sıcaklığının düşmesi sistem performansının düşmesi ve tüketilen enerji miktarının artması anlamına gelmektedir. Zira ısıtılan ortam için istenilen belirli bir sıcaklık değeri varken, buharlaştırıcının bulunduğu dış ortam sıcaklığı sürekli değişmektedir. Dış ortam sıcaklığının düşmesiyle ve buna bağlı olarak ısı pompasının çalıştığı kaynak sıcaklıkları farkının artmasıyla ısı pompasının enerji tüketimi artmaktadır. Hava kaynaklı ısı pompalarının diğer bir dezavantajı ise kışın buharlaştırıcı üzerinde buzlanma meydana gelmesidir. Bu olay buharlaştırıcıda çekilecek ısı miktarını düşüreceği için ısı pompasının ITK değeri düşmektedir. Yaz aylarında ise mahal soğutma amaçlı bir klima düşünülürse dış ünitede yoğuşturucu, iç ünitede ise buharlaştırıcı olacaktır. İç ortam için belirli sıcaklık değeri ve ısıl yük bulunurken, dış kaynağın sıcaklığı değişkendir. Dış kaynak sıcaklığı arttıkça kaynak sıcaklık farkları artacağı için ısı pompasının STK değeri de düşecektir. Bunun anlamı da sistemin daha uzun çalışması ve enerji sarfiyatının artmasıdır. Isı pompalarında buharlaştırıcı ve yoğuşturucunun bulunduğu ısı

kaynaklarının sıcaklık farkı değerleri ne kadar artarsa, ısıtma veya soğutma yükü o oranda artacaktır ve sistem verimi de aynı şekilde düşecektir. Hava kaynaklı ısı pompalarında buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda gerçekleşen ısı transferini arttırmak için ek enerji sarfiyatına sebep olan fanlar kullanılmaktadır ve soğutucu akışkanın dolaştığı borular yüzey arttırmak amaçlı kanatlarla desteklenmektedir. Şekil 2.5'de farklı amaçlar için kullanılan hava kaynaklı ısı pompası sistemlerinin temsili gösterimleri verilmiştir.



Şekil 2.5 Hava Kaynaklı Isı Pompası Sistemleri [19]

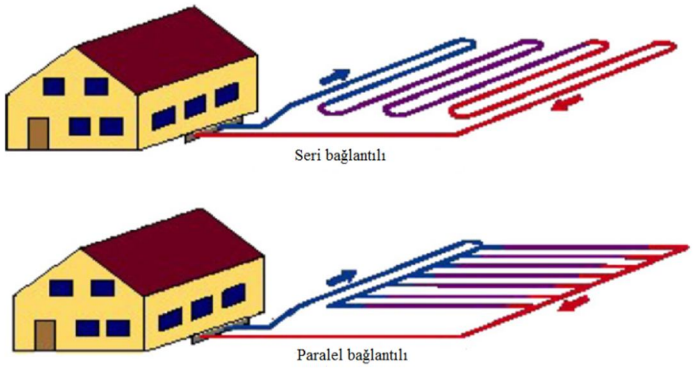
2.4.2. Su Kaynağı

Isı pompalarında su kaynağı olarak göller, nehirler, kuyu suları ve herhangi bir işletmeden elde edilen atık sular kullanılabilir. Bu kaynaklar havaya göre sıcaklık değeri bakımından daha uygundur. Hava sıcaklığı mevsimlere göre çok fazla değişirken, su kaynaklarının sıcaklık değerleri mevsimlere göre çok fazla dalgalanma göstermez. Uygulamada ısı pompasının buharlaştırıcısı veya yoğuşturucusu direkt olarak su kaynağı içine kurulabileceği gibi, su uzak yerlerden ısı pompasının ısı değiştiricilerine borular aracılığıyla da gönderilebilir. Su kaynaklı ısı pompalarının verimleri daha yüksektir. Örnek olarak kış aylarında bir evi ısıtan hava kaynaklı bir ısı pompasının ITK değeri hava sıcaklığının azalması ile birlikte düşecektir. Aynı ısı pompasının buharlaştırıcı kısmının göl, kuyu suyu bir kaynaktan ısı çekmesi durumunda bu kaynakların sıcaklık değerlerinin daha yüksek olmasından dolayı ITK değeri yüksek ve

durağan olacaktır. Ayrıca suyun ısı taşınım katsayısı havadan daha fazla olmasının da ek avantajı olarak, buharlaştırıcı veya yoğuşturucuda kanat kullanımının gereği yoktur. Burada önemli olan su kaynağının kullanıldıkça soğuyup veya ısınıp ölü duruma gelmemesidir. Bu yüzden kuyu suyu kullanılması durumunda, kullanılan suyun kaynaktan uzaklaştırılması gerekebilmektedir. Su kaynaklarının dezavantajı korozyona sebep olabilmeleri ve yatırım maliyetlerinin hava kaynaklı duruma göre fazla olmasıdır.

2.4.3. Toprak Kaynağı

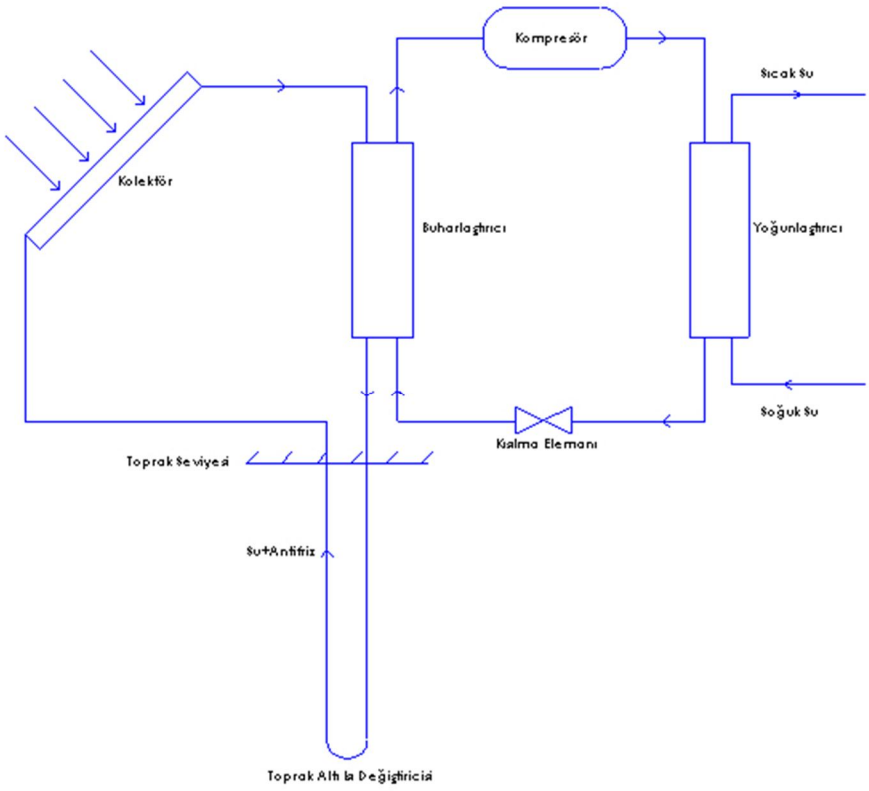
Toprak kaynaklı ısı pompalarında buharlaştırıcı veya yoğuşturucu ısı alışverişini toprakla yaparlar. Şekil 2.6'da seri ve paralel toprak ısı değiştiricileri temsili olarak gösterilmiştir. Toprağın sıcaklığı mevsimlerle birlikte havaya göre daha az değişeceği için toprak kaynaklı ısı pompaları hava kaynaklı ısı pompalarından daha verimli çalışabilmektedir. Toprak bir ısı pompası için yaz aylarında havaya göre yoğuşturucunun ısı atabileceği düşük sıcaklıkta bir kaynak oluştururken, kış ayarında buharlaştırıcının ısı çekebileceği yüksek sıcaklıklı bir kaynak olabilmektedir. Uygulamada ısı pompasının ısı değiştiricileri toprak içine doğrudan koyulabileceği gibi, toprak altında bulunan yatay veya dikey konumlu borulardan su geçirilerek ısı pompasına kaynak oluşturulabilir. Isı pompası kurulumu yapılmadan önce toprak yapısı mutlaka incelenmelidir. Toprak özellikleri toprak altı ısı değiştiricilerin boyutlarını ve derinliklerini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 2.6 Yatay Toprak Isı Değiştiricileri [20]

2.4.4. Güneş Kaynağı

Isı pompası sistemlerinde güneş enerjisinden soğutucu akışkanın kolektörden direkt olarak geçip geçmemesine göre iki farklı şekilde yararlanılır. Sistemlerden birinde soğutucu akışkan kolektörlerden direkt olarak geçerken ısı çeker ve buharlaşma gerçekleşir. Bu sistemlerin verimi kolektörlerin sıcak olmasından dolayı hava kaynaklı ısı pompalarının verimlerinden daha fazladır. Kullanılan ikinci sistemde ise kolektörlerde ısıtılan suyun bir ısı değiştiricisinde soğutucu akışkanla karşı karşıya getirilmesiyle olmaktadır. Bu sistemlerde sıcak su için depo kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de hem toprak hem de güneş kaynaklı ısı pompasının temsili gösterilişi yer almaktadır.



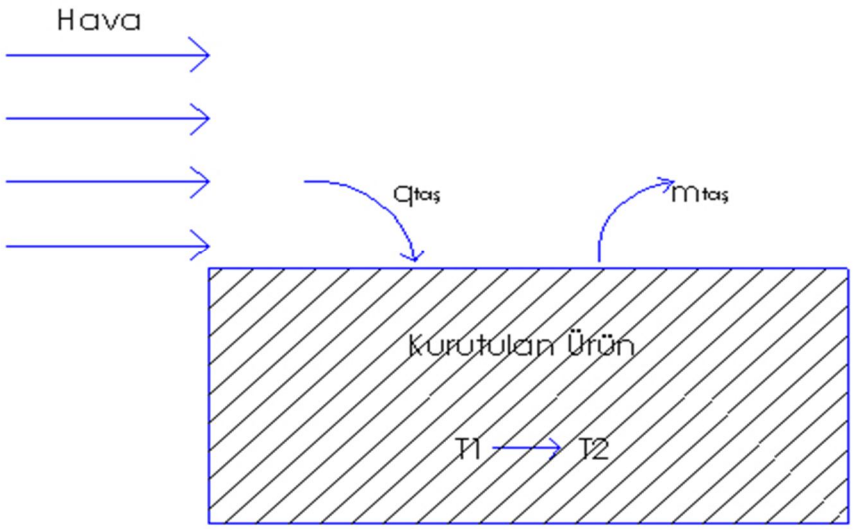
Şekil 2.7 Güneş ve Toprak Kaynaklı Isı Pompası

BÖLÜM 3

KONVEKTİF KURUTMA PROSESİ

Kurutma prosesi genel olarak gazlardan, sıvılardan ve katılardan su veya diğer sıvı maddelerin buharlaştırılıp ortamdan uzaklaştırılması işlemi olarak tanımlanmaktadır. Konvektif kurutma, gazların bir yüzey üzerinden zorlanmış olarak geçirilmesi ile yüzeyden sıvı buharlaştırılması prosesidir. Kurutma endüstride çok farklı ürünlerin elde edilmesinde başvurulan zorunlu bir prosestir. Bunların başında gıda ürünleri gelmektedir ve bu alanda birçok çalışma bulunmaktadır. Kurutmanın uygulandığı diğer alanlar ise seramik, kiremit, odun vb. kurutma olarak sıralanabilir. Kurutma prosesinde suyun buharlaştırılması işlemi olduğu için yüksek enerji gereksinimi bulunmaktadır. Elektrikle veya yakıtla çalışan konvansiyonel sistemlerle uygulanan kurutma proseslerinde önemli miktarlarda enerji israfı yaşanmaktadır. Dolayısıyla konuyla ilgili kullanılabilecek yenilenebilir enerji sistemleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Gerçek proseslerde kurutucu gaz olarak hava kullanılırken, birçok alanda yüzeyden uzaklaştırılan madde sudur. Konvektif kurutma ısı ve kütle transferinin eş zamanlı yer aldığı bir prosestir ve bu eş zamanlı proses şekil 3.1'de gösterilmiştir. Kurutucu havadan kurutulan yüzey üzerine zorlanmış taşınımla ısı transferi gerçekleşirken, yüzeyden havaya su buharı geçişi olur ve suyun buharlaştığı katı maddenin de sıcaklığı artar.



Şekil 3.1 Kurutmada Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferi

Kuruma hızına etki eden iki faktör bulunmaktadır. Bunları kurutma havasının koşulları ve kurutulan ürünün yapısı oluşturmaktadır. Kurutma havasının sıcaklık, bağıl nem ve hız değerleri yüzeyden ayrılan nem miktarının hızını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Hava sıcaklığındaki artış ve bağıl nemindeki düşüş yüzeyden ayrılacak buhar için fazladan potansiyel oluşturur. Hava hızındaki artış ise taşınım etkilerini arttırarak kuruma hızını arttırmaktadır. Bunların yanı sıra malzemenin iç özellikleri de kurutma hızında önemli rol oynar. Yüzeyden ayrılan buhar, malzeme içerisinden su ve buhar olarak difüzyonla geldiği için, difüzyon hızında malzemenin özelliklerinin etkisi oldukça önemlidir. Bu etkilerin tamamı bir malzemenin kurumasını farklı evrelere ayırmaktadır.

3.1. Malzemelerin Sınıflandırılması

Kurutma prosesinde kurutulan malzemeler nem çekme özelliklerine göre higroskopik ve higroskopik olmayan şeklinde 2 kısma ayrılırlar.

3.1.1. Higroskopik Malzemeler

Yapısı gereği bulunduğu ortamdan nem absorbe eden malzemelere higroskopik malzemeler denir. Bu tür malzemeler ortam havasıyla dengede olacak şekilde nem

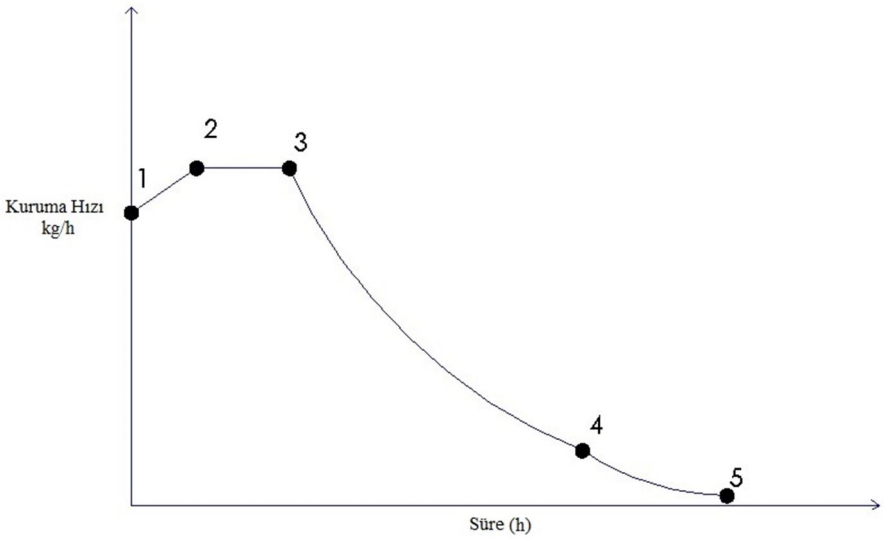
içerirler. Dolayısıyla higroskopik malzemeler en fazla kurutma havasıyla dengede olacak şekilde kurutulabilirler. Örnek olarak toprak higroskopik bir malzemedir.

3.1.2. Higroskopik Olmayan Malzemeler

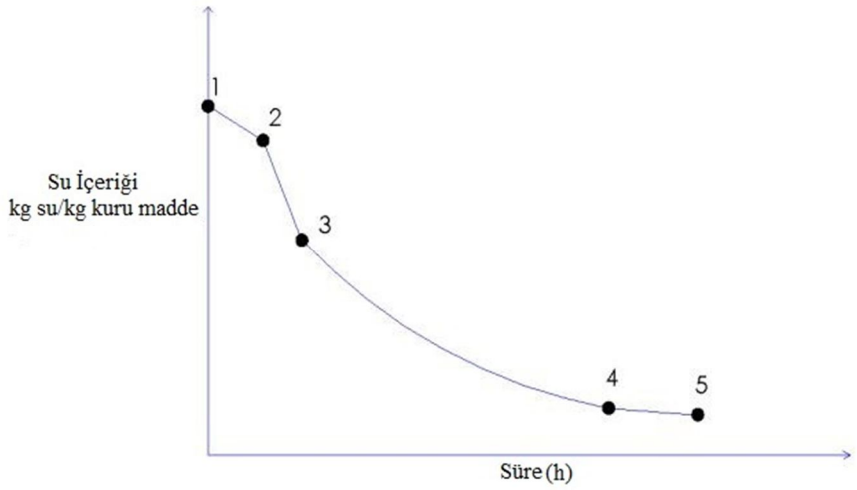
Bulunduğu ortamdan nem çekmeyen malzemeler higroskopik olmayan malzemelerdir. Örnek olarak cam, kum ve seramik verilebilir.

3.2. Kuruma Eğrileri

Kuruma eğrileri kurutulan ürün için kuruma hızı-kuruma süresi, su miktarı-kuruma süresi ve kuruma hızı-su miktarı hakkında bilgi verir ve kurumanın hangi aşamalardan geçtiğini gösterir. Bu eğriler havanın şartları tarafından etkilendiği gibi kurutulan malzeme özelliğine de bağlıdır. İlgili kuruma eğrileri şekil 3.2'den şekil 3.4'e kadar verilmiştir.

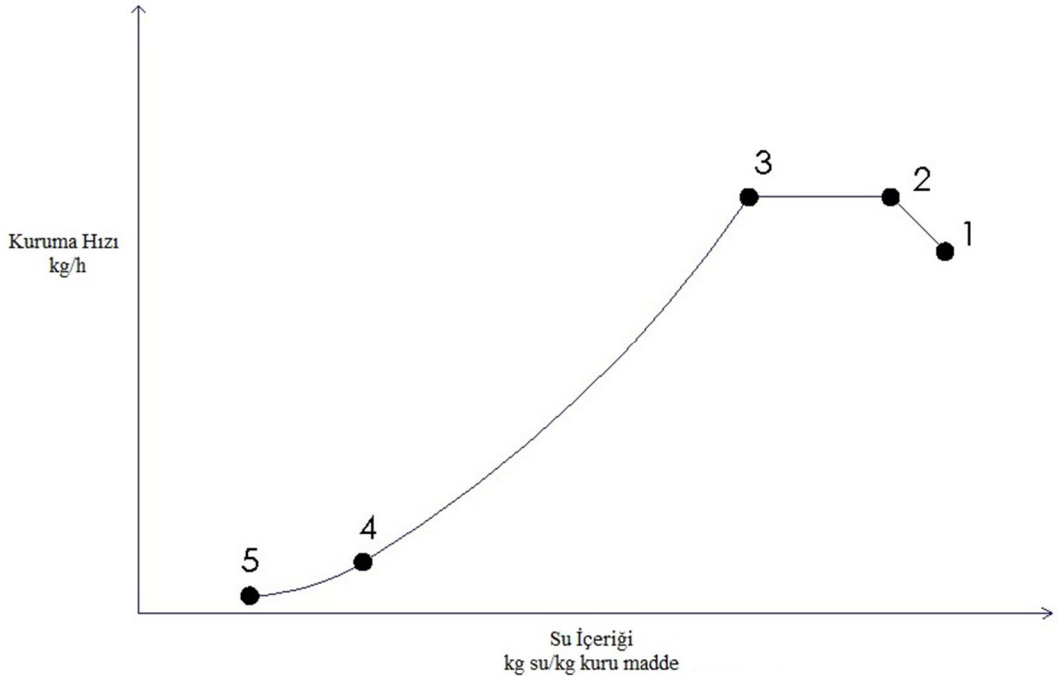


Şekil 3.2 Kuruma Hızı – Süre Eğrisi



Şekil 3.3 Su İçeriği - Süre Eğrisi

Verilen kuruma eğrileri bir malzemenin genel kuruma davranışını yansıtmaktadır. Görüleceği üzere kurutulan malzeme için kuruma 4 evrede gerçekleşmektedir. Her bir kuruma evresinin yer aldığı aralık kurutma havası şartlarına ve malzeme özelliklerine göre değişkenlik gösterir.



Şekil 3.4 Kuruma Hızı – Su İçeriği Eğrisi

3.3. Kuruma Evreleri

Şekil 3.2'den şekil 3.4'e kadar verilen kuruma eğrilerinden anlaşılacağı üzere higroskopik bir malzemede 4 kuruma evresi mevcuttur. Bunlar 1-2 arası artan hızda kuruma evresi, 2-3 arası sabit hızda kuruma evresi, 3-4 arası birinci azalan hızda kuruma evresi ve 4-5 arası ikinci azalan hızda kuruma evresidir.

3.3.1. Artan Hızda Kuruma Evresi

Bu kuruma evresi sabit hızda kuruma evresinden önce meydana gelir. Yüzey sıcaklığıyla hava sıcaklığının dengeye gelmesi sürecini içerir ve çalışmalarda genellikle ihmal edilen bir evredir.

3.3.2. Sabit Hızda Kuruma Evresi

Kurutulan malzeme yüzeyinde sıvı filmi olduğu ve kurutma havası şartlarında herhangi bir değişiklik olmadığı sürece sabit hızda kuruma evresi görülür. Bu evre tamamen kurutma havası koşulları tarafından yönetilir. Etken parametreler hava sıcaklığı, hava hızı ve hava bağıl nem değerleridir. Hava sıcaklığındaki artış kurutulan malzemeye olan ısı geçişini artırırken, buharlaşma hızını da arttırır. Hava bağıl neminin herhangi bir sıcaklıkta az olması malzeme yüzeyinde bulunan su buharının havaya geçişi için ek itiş gücü sağlar. Hava hızındaki artış ise taşınım etkilerini arttırarak hem malzemeye olan ısı transferini hem de kuruma hızını arttırır. Akışın laminer ya da türbülanslı durumda olmasının bunda payı vardır.

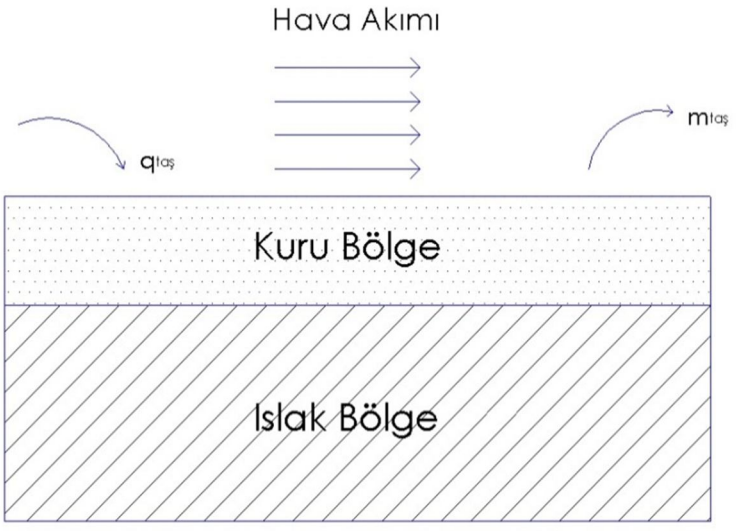
3.3.3. Birinci Azalan Hızda Kuruma Evresi

Yüzeyden olan buharlaşma miktarı malzeme içerisinden yüzeye difüzyon ile çıkan su miktarına eşit olduğu sürece sabit hızda kuruma evresi devam eder. Malzeme içindeki su miktarının azalmasıyla birlikte yüzeye olan su miktarı gradyanında düşüş başlar ve bu da difüzyon hızını yavaşlatır. Belirli bir kritik su içeriği değerinden sonra kuruma hızını malzeme içerisinde ki suyun difüzyon hızı kontrol etmeye başlar. Bu noktada birinci azalan hızda kuruma evresi başlamış demektir. Bu evrede yüzeyde rastgele kuru noktalar oluşmaya başlar ve yüzey sıcaklığında artış meydana gelmeye başlar. Kuruma hızı difüzyon hızına bağlı olduğu için büyük ölçüde kurutulan malzemenin içyapısının özelliklerine bağlıdır. Birinci azalan hızda kuruma evresi

malzeme yüzeyi tamamen kuru hale geçtiği anda sonlanır. Malzeme yüzeyinin kuru halde olması demek, kurutma havasına göre denge nem içeriğine sahip olması anlamına gelmektedir. [12]

3.3.4. İkinci Azalan Hızda Kuruma Evresi

Yüzeyin tamamen kuruması ile birlikte ikinci azalan hızda kuruma evresi başlar. Bu evrede malzeme yüzey sıcaklığı giderek daha da yükselir. Malzeme yüzeyinin altında buharlaşmanın meydana geldiği yeni bir ıslak yüzey ortaya çıkar. Kurumanın devam etmesiyle birlikte bu yüzey giderek malzeme içlerine doğru ilerler. Kuruma hızı tamamen malzemenin iç özelliklerine bağlı olmaktadır. Malzeme içerisinden ıslak buharlaşma yüzeyine kadar sıvı difüzyonu gerçekleşirken, buharlaşma yüzeyinden dış yüzeye de buhar difüzyonu meydana gelir. Bu kuruma evresinde malzeme içerisinden yüzeye buhar ulaştığı sürece kuruma devam eder.[12] Buna bağlı olarak kurutma havası koşullarının kuruma hızına etkisi bulunmadığı için malzeme üzerinde hava dolaşımının periyodik olarak yapılması enerji tasarrufu açısından uygun olabilir. İkinci azalan hızda kuruma evresi şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Tek Taraflı Kurumada İkinci Azalan Hızda Kuruma Evresi

3.4. Malzeme Nem Oranı ve Denge Nemi

3.4.1. Nem Oranı

Su barındıran malzemelerin içerdikleri su miktarları yaş baz (YB) ve kuru baz(KB) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$YB = \frac{m_{su}}{m_{su}+m_{kuru\ madde}} = \frac{\text{Su kütlesi}}{\text{Toplam kütle}} \tag{3.1}$$

$$KB = \frac{m_{su}}{m_{kuru\ madde}} = \frac{\text{Su kütlesi}}{\text{Kuru Madde Kütlesi}} \tag{3.2}$$

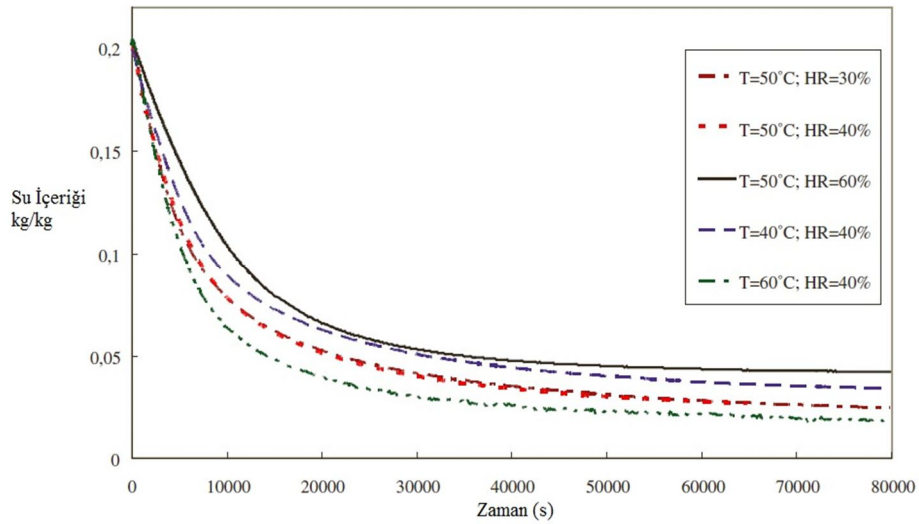
3.4.2. Denge Nemi

Higroskopik ürünler bulunduğu ortamdan nem çeken malzemelerdir. Bu ürünlerin içindeki suyun buharlaştırılması direkt olarak ürün tarafından etkilenir. Kuruma prosesi sırasında ürün içerisindeki buhar basıncı düşer ve bu değer havanın ihtiva ettiği buharın basıncına eşit olduğu vakit kuruma prosesi durur. Bu noktada ürünün içerdiği nem miktarı hava ile denge haldedir ve daha fazla kurutma yapmak mümkün değildir. Hava sıcaklığını arttırarak ve bağıl nem değeri düşürülerek ürün içerisinden daha fazla su çekmek mümkündür.

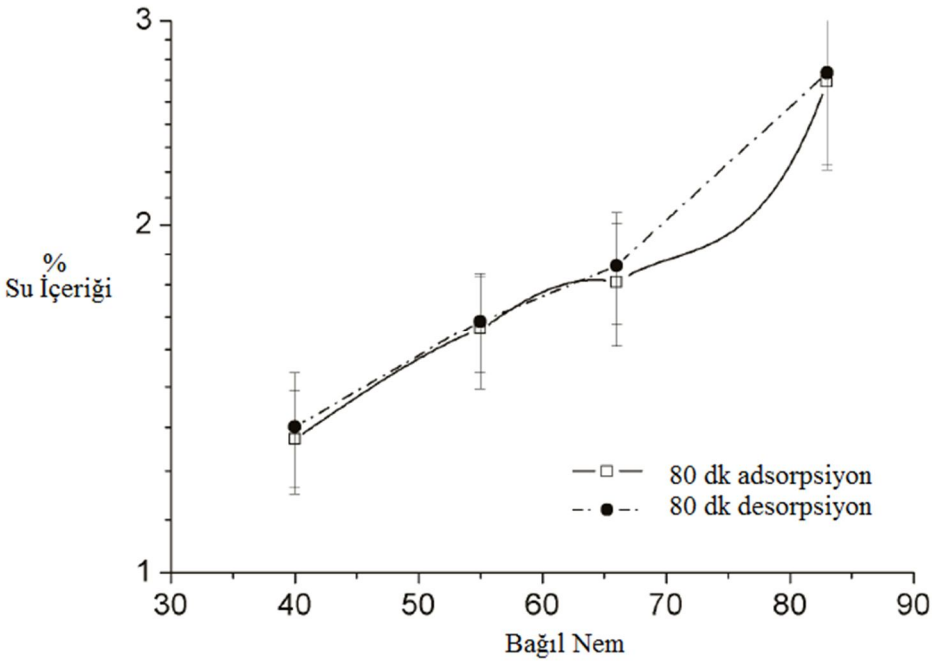
3.5. Sorpsiyon İzotermi

Bir malzeme belirli bir sıcaklıktaki ortamda yeterince süre bekletildiği zaman ortamla dengeye gelinceye kadar nem alır veya dışarıya nem verir. Dolayısıyla bir malzemenin her bir ortam koşulu için bir denge su içeriği değeri vardır. Sıcaklığı sabit tutarak bağıl nem arttırılırsa malzeme yeniden dengeye gelinceye kadar ortamdan nem çekecektir. Böylelikle sabit sıcaklıkta bağıl nem değerleri arttırılarak her koşul için bir denge su içeriği elde edilebilir. Bize bu bilgiyi veren grafiğe adsorpsiyon izotermi adı verilir. Bu işlem belirli bir sıcaklıktaki ortamda denge halinde bulunan bir malzeme için ortamın bağıl neminin azaltılması suretiyle ters bir şekilde de yapılabilir. Bu durumda elimizde ilk yaş durumdan giderek azalacak şekilde elde ettiğimiz denge su içeriği verileri olacaktır. Bu verilerin eğrilerine ise desorpsiyon izotermi denir. Higroskopik bir malzeme için adsorbsiyon ve desorpsiyon eğrileri birbirleriyle çakışmayabilir. Yani

kuru durumdan yaş duruma giderken ve yaş durumdan kuru duruma geri dönülürken belirli bir ortam şartı için denge nem değerlerinde belirli aralıklar için fark görülür. Bu duruma histerisiz adı verilmektedir. Şekil 3.6'da bir kil malzemesine ait farklı kurutma havası şartlarında elde edilmiş deneysel kuruma kinetikleri verilmiştir. Şekil 3.7'de ise bir toprak malzemesine ait sorpsiyon izotermi ve histerisiz durumu verilmiştir.



Şekil 3.6 Bir Kil Malzemesine Ait Kuruma Kinetiği [13]



Şekil 3.7 Bir Toprak Malzemesine Ait Sorpsiyon İzotermi [11]

BÖLÜM 4

ISI POMPASI ve GÜNEŞ ENERJİSİYLE KURUTMA

4.1. Isı Pompasıyla Kurutma

Günümüzde kurutma işlemi endüstride her alanda duyulan bir ihtiyaçtır. Kullandığımız birçok ürün hammaddesinden son haline getirilirken kurutma prosesinden geçmektedir. Buna ek olarak günümüz yaşam koşullarında insanlar üretimin hızlı olması adına kurutma prosesinin de mümkün mertebede hızlı gerçekleşmesine ihtiyaç duymaktadırlar.

Endüstride ve günlük hayatımızda kullandığımız birçok kurutma teknikleri mevcuttur. Bu konuyla ilgili ilk akla gelen açık alanda güneş altında kurutmadır. Bu yöntemde herhangi bir şekilde enerji tüketimi yoktur ancak endüstride gelişen teknolojiler sayesinde geçerliliğini kaybetmeye başlamıştır. Bu yöntemin uzun zamanlar alması üretim kapasitesinin artması yönünde engel oluştururken, açık alanda kurutulan ürünlerin kalitelerinden de ödün verilmektedir. Kullanılan diğer bir yöntem ise kapalı bir kabinde bulunan ürünlerin üzerine zorlanmış şekilde nem alma kapasitesi arttırılmış sıcak hava göndermektir. Bu yöntem endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır ancak bu yöntem de başka sorunlara sebebiyet vermektedir. Endüstride genel olarak bu işlem elektrikli veya fuel-oil kullanan kurutma fırınlarında gerçekleştirilmektedir. Kurutma prosesinde suyun istenilen hızda buharlaştırılması için yüksek enerji miktarlarının harcanması gerekmektedir. Bir elektrikli kurutma fırınında bu enerjinin karşılanması için fırına sürekli olarak taze soğuk hava alınır ve istenilen değere kadar ısıtıldıktan sonra kurutulan ürünlerin üzerlerinden geçirilir. Sıcak hava ürünlere ısı verip belirli miktarda buharlaşma sağladıktan sonra nem alma kapasitesinde düşüş olur. Bu yüzden bu nemli havanın ortamdan uzaklaştırılması gerekir ve tahliye edilir. Sürekli olarak taze havanın alınıp kuruma sıcaklığına kadar ısıtılması ve ardından içerisinde barındırdığı

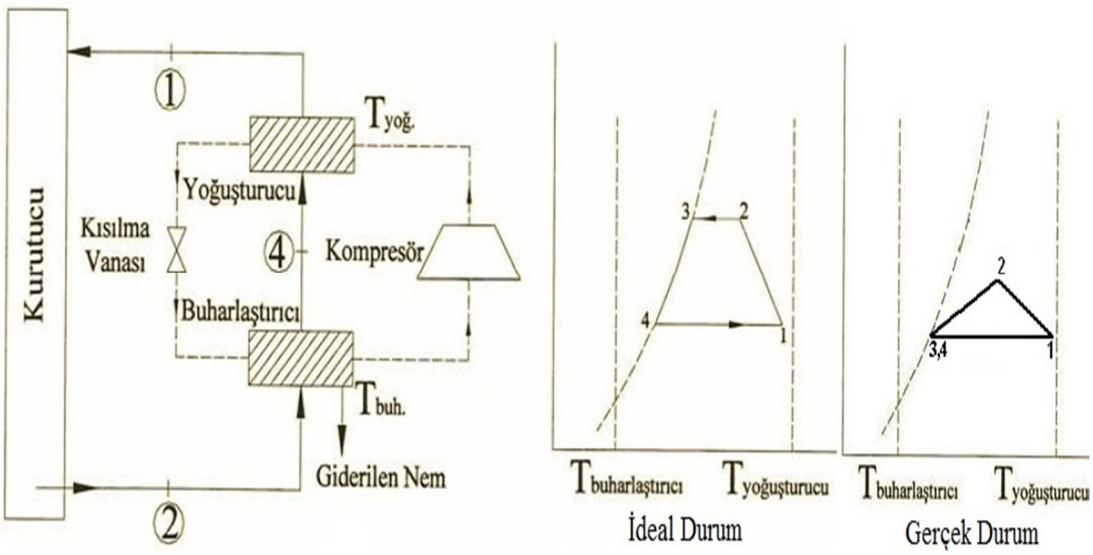
buharın gizli ısısıyla tahliye edilmesi yüksek miktarlarda enerji harcanması anlamına gelmektedir. Enerji talebinin giderek arttığı ve kullanılabilir enerjinin giderek azaldığı günümüz dünyasında bu tarzdaki enerji tüketimi yüksek sistemlere alternatif olabilecek yeni sistemler üzerinde araştırmaların yoğunlaştırılması gerekmektedir.

Günümüzde enerji sarfiyatı yüksek olan ısıtma, soğutma ve kurutma sistemlerine en önemli alternatif ısı pompası sistemleridir. Isı pompaları geleneksel elektrikli veya yakıtlı sistemlere göre tam anlamıyla enerji verimliliği yüksek sistemlerdir. Bu sistemlerde bir kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı, kısılma elemanı ve bu elemanlar içerisinde farklı basınç ve sıcaklıklarda şartlandırılan soğutucu akışkan bulunur. Kompresör soğutucu akışkanı basınçlandırır ve ısıtır. Soğutucu akışkan buradan yoğuşturucuya gaz fazında girer ve bir ısı kaynağına ısı vererek yoğuşturucudan sıvı fazında çıkar. Kısılma elemanı ile basıncı ve sıcaklığı düşer ve buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcıdan geçerken bir ısı kaynağından ısı çekerek tekrar gaz haline geçer ve ilk haliyle kompresöre geri döner. Isı pompaları bu şekilde belirli sıcaklık ve basınç aralıklarında çalışmak için bulundukları ısı kaynaklarının koşullarına göre belirli bir rejim süresine ihtiyaç duyarlar. Soğutucu akışkanın yoğuşturucu ve buharlaştırıcıda faz değiştirmesiyle çevreye attıkları veya çevreden çektikleri ısı miktarları kompresörün yaptığı işten fazla olur. Bu sayede ısı pompaların enerji tüketimleri konvansiyonel sistemlere göre çok daha az seviyelerde olmaktadır.

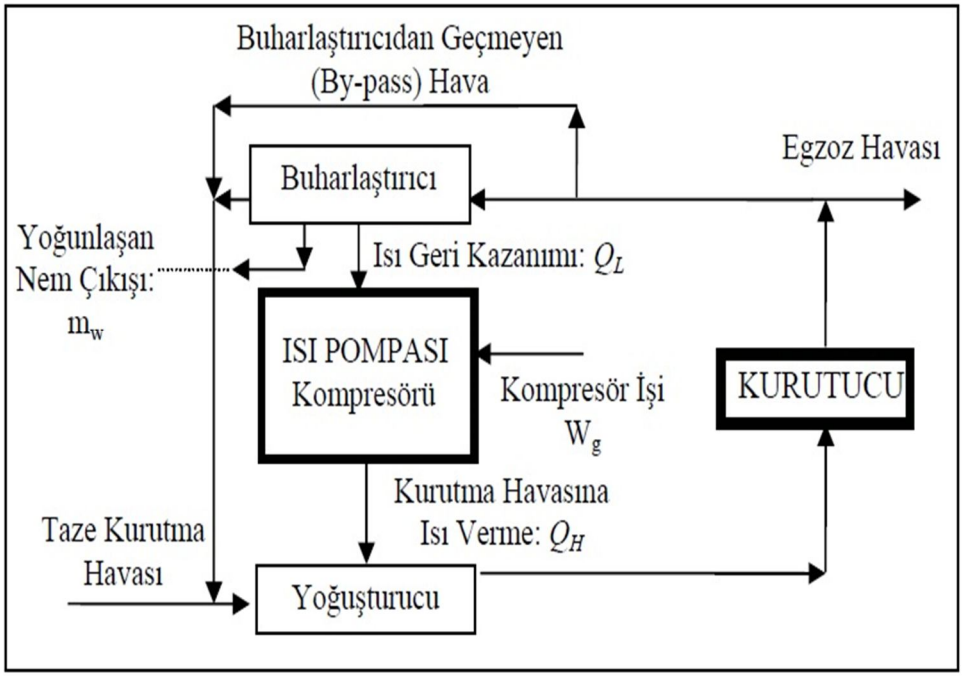
Bir ısı pompasının kurutma işlemini gerçekleştirmek üzere kullanılması enerji tüketiminin azaltılması adına oldukça uygun bir çözümdür. Yapılması gereken işlem ısı pompasının ısı değiştiricileriyle kurutma havasını fırın içerisinde uygun şekilde karşılaştırmaktır. Kurutma havası ısı pompasının yoğuşturucusundan ısı çeker ve sıcaklığı artarken bağıl nemi düşer. Bu şekilde uygun kurutma şartlarına getirilmiş hava kurutma fırınında ürünlerden belirli oranda nem alır. Kurutma fırınından nemli şekilde çıkan kurutma havası ısı pompasının buharlaştırıcısıyla karşılaştırılırsa hava kendi ısısını soğuk buharlaştırıcı yüzeyine verirken, içerisinde bulunan nemin gizli ısısı da buharlaştırıcıya verilir ve ürünlerden çekilen nem buharlaştırıcıda yoğuşturulmuş olur. Bu sayede aslında suyun buharlaştırılması için enerji harcanmamış olunur. Yoğuşturucudan havaya verilen enerjiyle kurutma yapıldıktan sonra buharlaştırıcıda havadaki nemin yoğuşturulmasıyla bu enerji ısı pompası sistemine geri verilmiş olur. Rejim durumu halinde yoğuşturucudan atılan ısı buharlaştırıcıdan çekilen ısıdan

kompresör gücü kadar fazla olur. Bu enerjide kurutma fırını ortamının ısıtılması için kullanılabilir.

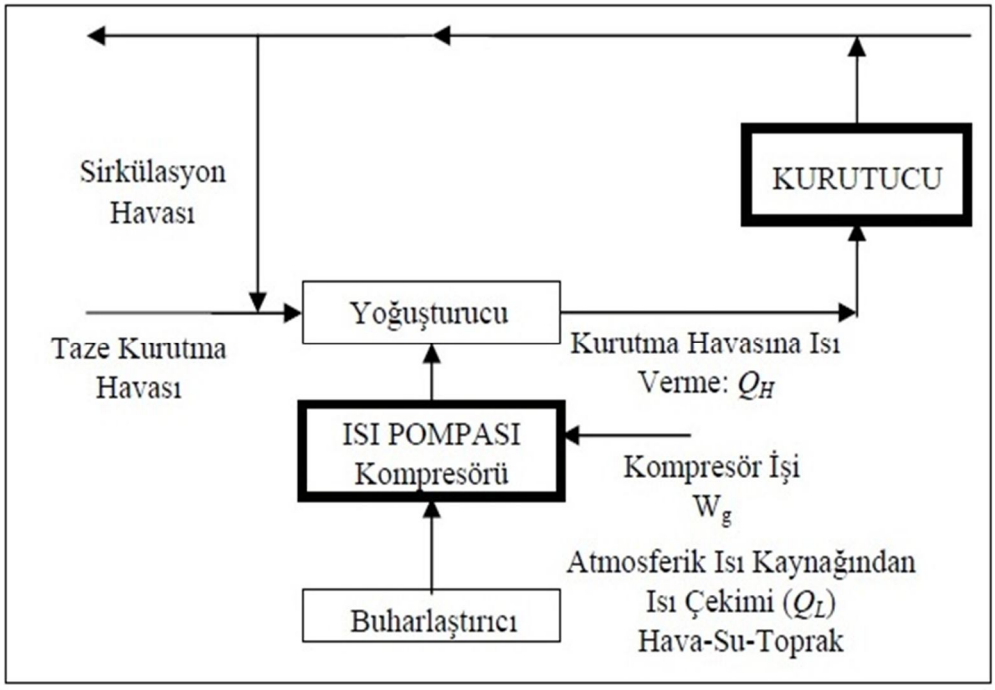
Şekil 4.1'de verilen ısı pompalı kurutucunun çalışma sisteminde kurutma havasının yoluyla oynamalar yapılarak farklı yerleşimler elde edilebilir. Şekil 4.2'de olduğu gibi uygulama ihtiyacına göre kurutma havasının bir kısmı buharlaştırıcıdan geçirilirken kalan kısmı buharlaştırıcının çıkışına direkt olarak yönlendirilebilir. Buharlaştırıcı çıkışında yeniden karışan hava yoğuşturucuya gönderilerek ısıtılır ve kurutma ortamına gönderilir. Buharlaştırıcı çıkışında dışarıya tahliye var ise yoğuşturucu girişinde taze hava alımı yapılmalıdır. Kurutma havası yoğuşturucu ve kurutma ortamından geçtikten sonra buharlaştırıcıya girmeden tamamen tahliye de edilebilmektedir. Bu durumda ısı pompası şekil 4.3'de gösterildiği üzere sadece çevre havasından ısı alıp çalışmak durumunda kalmaktadır.



Şekil 4.1 Isı Pompalı Kurutucunun Şematik Gösterimi ve Kurutma Havasının İdeal ve Gerçek Durum için Psikorometrik Diyagramdaki Durumları [21]



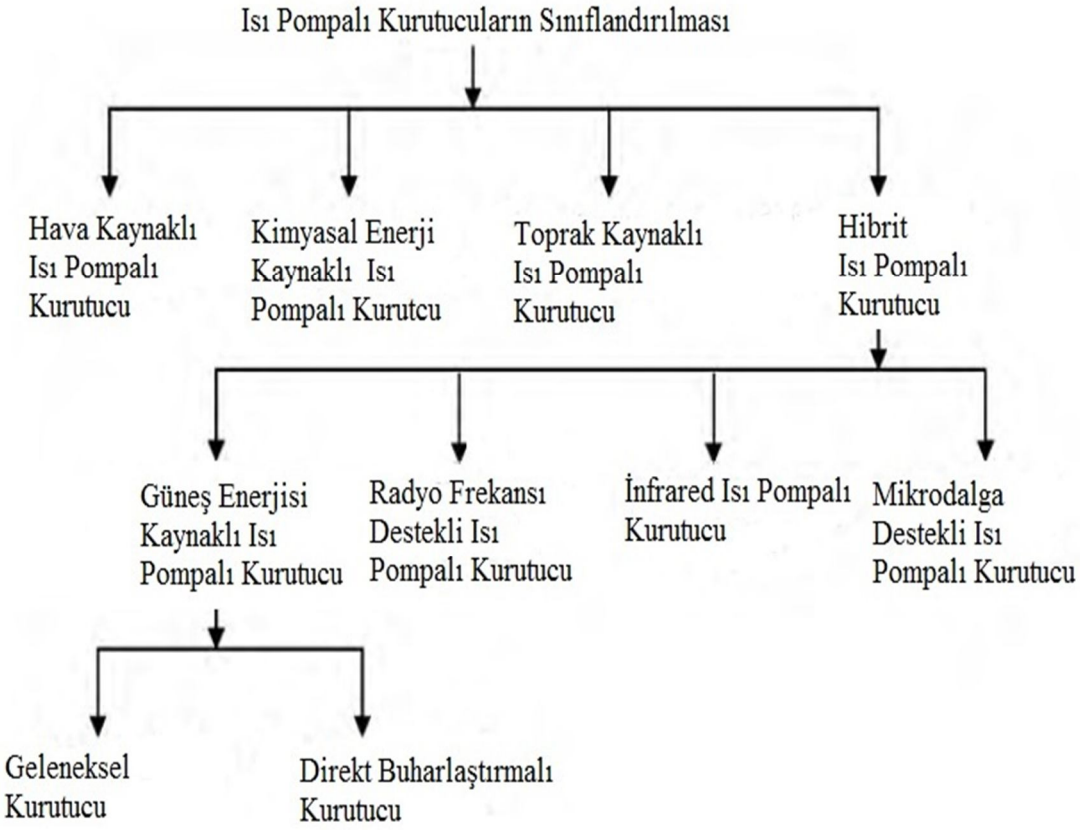
Şekil 4.2 Isı Pompalı Kurutucu [21]



Şekil 4.3 Atmosferik Kaynaklı Isı Pompalı Kurutucu [21]

4.1.1. Isı Pompalı Kurutucuların Sınıflandırılması

Isı pompalı kurutucuların sınıflandırılması ısı pompasının kullandığı ısı kaynaklarına göre yapılabilmektedir. Isı pompalı kurutucuların sınıflandırılması şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Isı Pompalı Kurutucuların Sınıflandırılması [22]

4.1.2. Isı Pompalı Kurutucu İçin Verim Parameterleri

Bir ısı pompalı kurutucu için verim parametreleri SMER, MER, ITK ve nem alma verimi değerleri olabilmektedir.

4.1.2.1. SMER

Bu parametre bir kurutma prosesi için sisteme giren enerji başına buharlaştırılan su miktarını göstermektedir. Bu parametre ne kadar büyükse kurutma sistemi o derecede

enerji verimlidir. Enerji girdisi ısı pompasının kompresör gücü alınabileceği gibi, tüm kurutma sistemin enerji tüketimleri de alınabilir.

$$\text{SMER} = \frac{(\text{Buharlaştırılan su miktarı})\ \text{kg}}{(\text{Enerji girdisi})\ \text{kWh}} \tag{4.1}$$

4.1.2.2. MER

Kurutma sisteminde birim zamanda üründen alınan su miktarını veren ifadedir.

$$\text{MER} = \frac{(\text{Buharlaştırılan su miktarı})\ \text{kg}}{(\text{Kurutma süresi})\ \text{t}} \tag{4.2}$$

4.1.2.3. Kurutma Verimi

Bir kurutma prosesinde kurutma havasının fiziksel sınırlar altında üründen çekebileceği maksimum bir nem değeri vardır. Bu değer kurutma havasının yaş termometre sıcaklığındaki doyma özgül nemi ile kendi özgül nemi arasındaki fark kadardır. Gerçek uygulamalarda havanın kurutma ortamındaki başka malzemelerle ısı transferi yapması gibi bazı sebeplerden dolayı bu oranda nem alımı gerçekleştirilemez. Dolayısıyla kurutma verimi gerçekte alınan nem miktarının maksimum alınabilecek nem miktarına oranıdır [23].

$$\eta = \frac{w_2 - w_1}{w_0 - w_1} \tag{4.3}$$

w_2 = Kurutucu çıkışı havanın özgül nemi (kg su/ kg kuru hava)
w_1 = Kurutucu girişi havanın özgül nemi (kg su/ kg kuru hava)
w_0 = Yaş termometre sıcaklığında doyma özgül nemi (kg su/ kg kuru hava)

4.2. Güneş Enerjisiyle Kurutma

Bu bölüm sistemde kullanılan kolektör tiplerine göre 2 kısımda incelenmiştir.

4.2.1. Havalı Kolektör Sistemleri

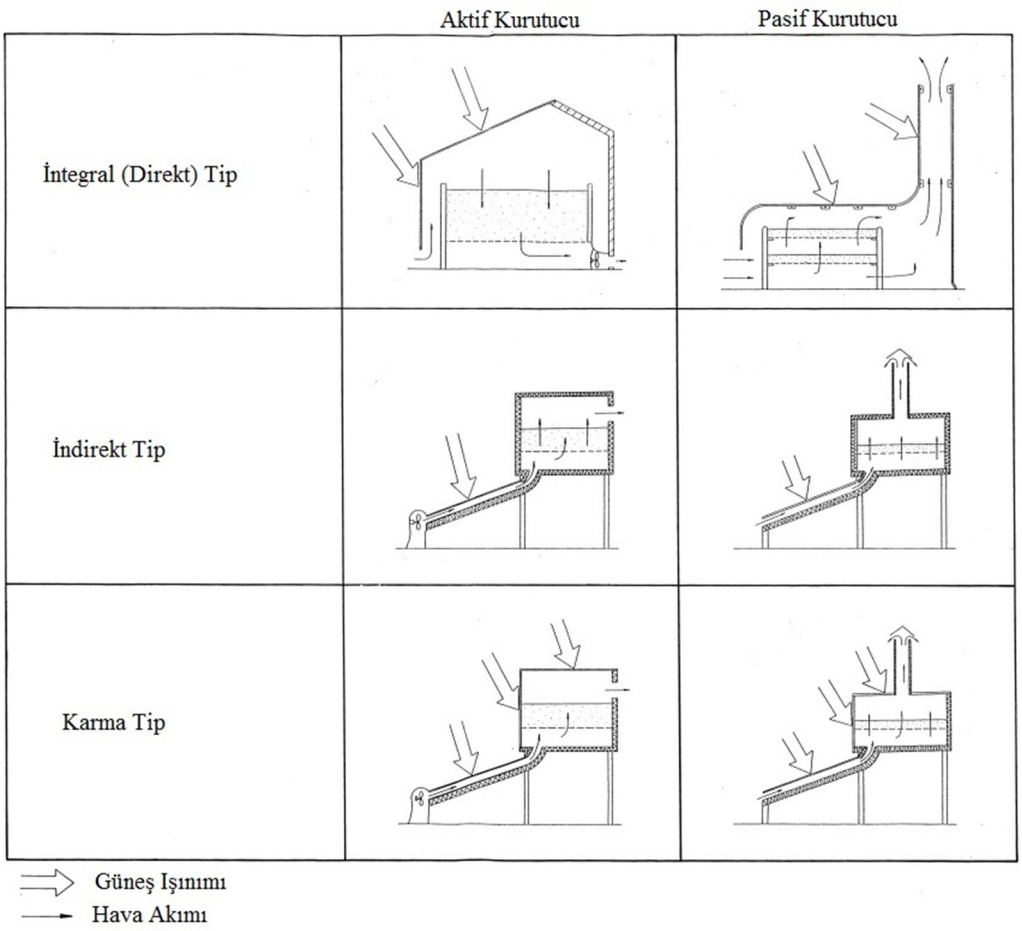
En çok gıda ürünlerinin kurutulmasında kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerde kurutma havası direkt olarak güneş enerjisiyle uygun kolektörler tarafından ısıtılır ve güneş enerjisi kurutmada kullanılacak ısı için direkt kaynak veya yardımcı kaynak olur. Hava akımı doğal ve zorlanmış olarak iki şekilde de sağlanabilir. Kurutma işlemi havanın ilk önce ısıtılıp ürünler üzerinden geçirilmesiyle ya da ürünlerin direkt olarak güneş ışınımına maruz bırakılmasıyla da gerçekleştirilebilir. Bu iki yöntemi bir arada bulunduran karma sistemlerde oluşturulabilir. Havalı kolektörlerle yapılan farklı kurutma sistemleri şekil 4.5'de verilmiştir.

4.2.1.1. Pasif Kurutucular

Pasif kurutuculardа tek kaynak güneş enerjisidir ve hava hareketinin sıcaklık farkından kaynaklanan doğal taşınım ile olması sağlanır. Kurutma kapasiteleri diğer sistemlere göre az olurken yatırım ve işletme maliyetlerinin az olması ve yakıt – elektrik enerjisi gereksinimlerinin olmaması gibi avantajları bulunur.

4.2.1.2. Aktif Kurutucular

Aktif kurutucular uygulamaya göre kısmen veya tamamen güneş enerjisini ısı kaynağı olarak kullanırlar. Zorlanmış hava akımı sağlamak için sistem içinde elektrikli fan bulunur. Büyük çaplı ticari uygulamalarda hava ısıtıcı kolektörler geleneksel kurutuculara destek olarak sistemin enerji tüketimi minimize edilebilmektedir ve uygun kurutma koşulları sağlanabilmektedir. Eğer yeterli sıcaklık sağlanabiliyorsa sistemde sadece güneş kolektörleri de kullanılabilir. Yeterli sıcaklığın olmaması durumunda elektrikli veya yakıt kullanan bir kurutma sistemi devreye girerek uygun kurutma şartları oluşturulabilir ve bu şekilde sistem içerisindeki sıcaklık dalgalanmaları önlenebilir. Bu kurutuculara hibrit güneş enerjisi kurutucuları denmektedir.



Şekil 4.5 Güneş Enerjisiyle Kurutma Sistemleri [24]

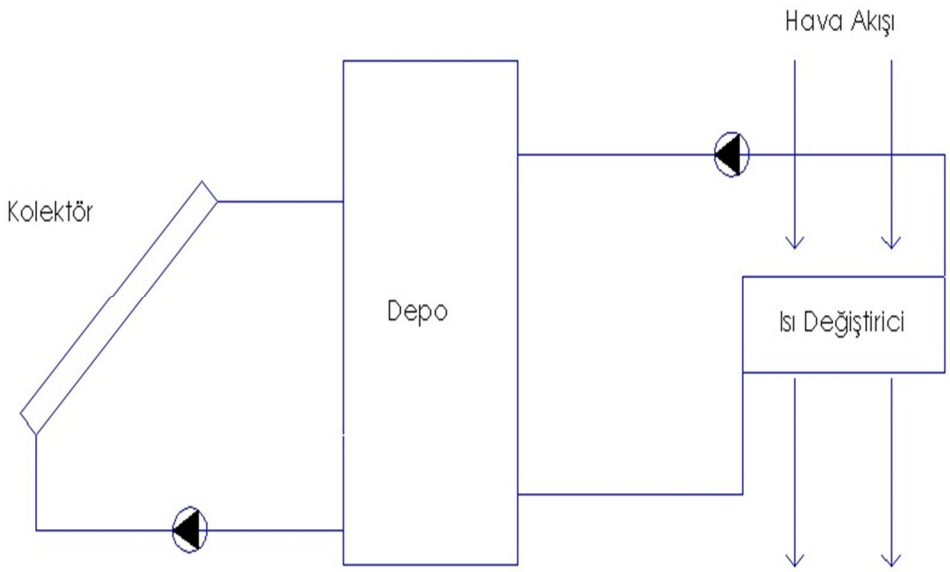
4.2.2. Sıvılı Kolektör Sistemleri

Bu sistemde kolektörlerde dolaşan su veya su-antifiriz karışımı güneş ışınımıyla ısıtılmaktadır ve kurutma için kaynak oluşturulmaktadır. Sistemin başlıca elemanları şu şekildedir:

- Güneş kolektörü
- Depo
- Isı değiştiricisi

Sistemin kurutma yükünü kolektörlerin kaldıramaması durumunda önceden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış depodan ısı çekilir. Deponun kuruma yükünü karşılayabilmesi için hacminin ve sıcaklığının yeterince yüksek olması gerekmektedir ve uygun şekilde

yalıtılmalıdır. Depodaki akışkandan kurutma havasına ısı geçişi uygun şekilde tasarlanmış bir ısı değiştiricisi aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Kurutmanın gece vakitlerinde yapılması gerektiği durumlarda veya güneş ışınımının yeterli olmadığı gündüz saatlerinde de depo kullanımının zorunluluğu vardır. Şekil 4.6'da kurutmada kullanılabilecek cebri sirkülasyonlu örnek bir sistem gösterilmiştir



Şekil 4.6 Cebri Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Sistem

BÖLÜM 5

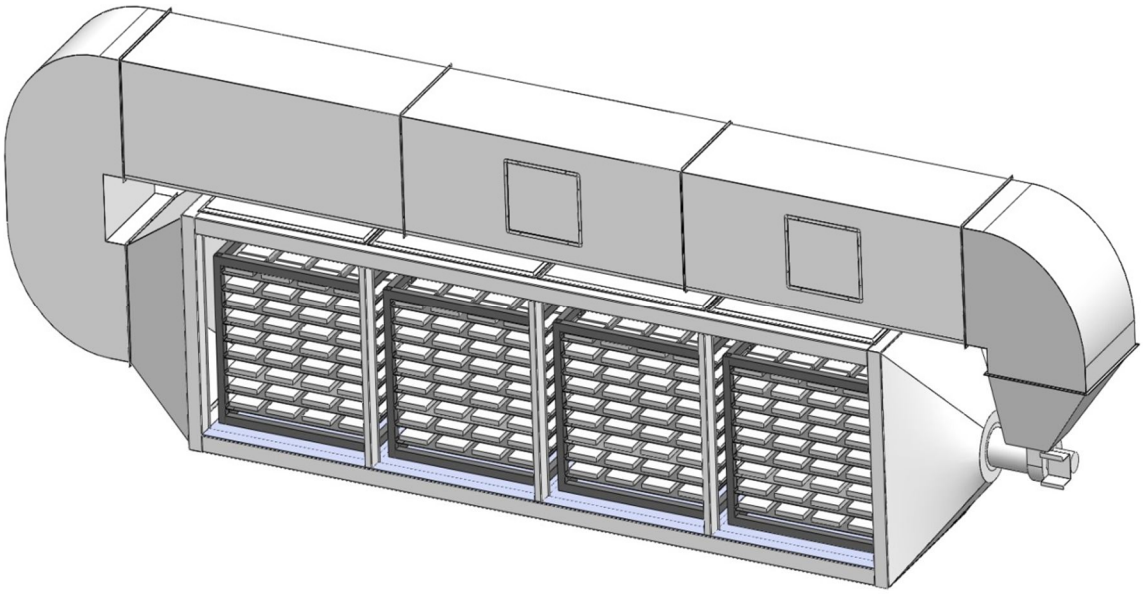
TEORİK ANALİZLER

Bu çalışmada %30 (yb) su oranına sahip 600 kg çini malzemesini 24 saatte kurutacak güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma fırını tasarımı yapılmıştır. Fırının farklı şartlarda çalışma durumuna göre enerji tüketim hesapları çıkarılmıştır. Güneş enerjisi sistemine ait bileşenlerin boyutları ve kapasiteleri fırının sıcaklığını çevre sıcaklığından belirli bir rejim sıcaklığına yükseltecek ve kurutma işlemini belirlenen bir süre kadar devam ettirecek şekilde tasarlanmıştır. Güneş enerjisinden sağlanan enerji yetersiz olmaya başladığı anda devreye buhar sıkıştırmalı ısı pompası devreye girerek kurutma işlemini devam ettirecektir. Tasarlanan fırının çizimleri şekil 5.1 ve şekil 5.2'de verilmiştir.

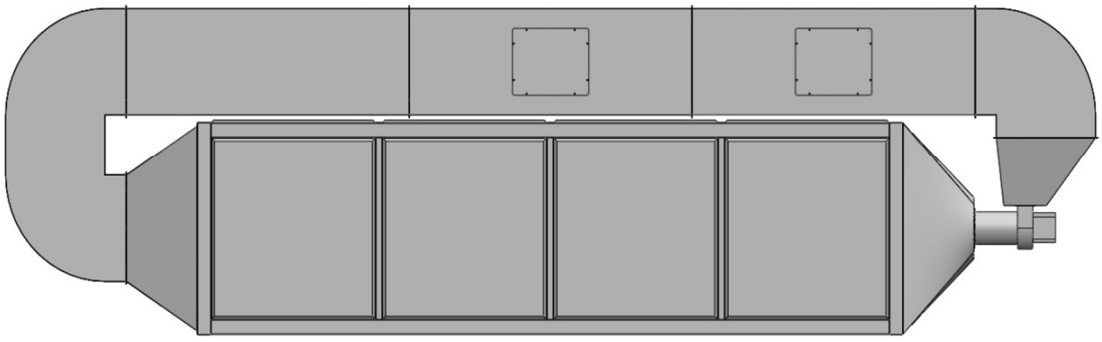
Çalışmanın bu bölümünde mevcut fırının enerji tüketim değerleri çıkarılmıştır ve fırının elektrikli konvansiyonel olarak çalıştırılması durumuna göre enerji tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ısı pompalı fırın- elektrikli fırın, güneş enerjili fırın- elektrikli fırın olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Kurutma fırınını oluşturan bileşenler ve özellikleri tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Fırını Oluşturan Bileşenler ve Özellikleri

Fırında Bulunan Elemanlar	Madde Miktarı kg	C_p kj/kg ℃	ρ kg/m^3
Çini Ürün	420	0,795	2800
Çelik Malzemeler	1140	0,460	7800
Buharlaştırılacak Su	180	4,180	1000
Hava	8	1,005	1,005
Taş Yünü	300	0,840	60



Şekil 5.1 Tasarlanan Çini Kurutma Fırını ve Kapıların Açık Olması Durumunda Ürün Yerleşim Görünümü



Şekil 5.2 Tasarlanan Çini Kurutma Fırını ve Ön Görünüşü

5.1. Fırını Oluşturan ve Kurutulan Malzemelerin Tanımı

Fırın içerisinde bulunan malzemelerin özellikleri ve fırındaki işlevleri şu şekildedir:

Çini: Üzerinde çalışılan sistemde kurutulan malzeme çinidir. Bu malzemeyi diğer seramik ürünlerden ayıran özelliği hammaddesiyle alakalıdır. Bu çalışmadaki çini içerisinde % 85 dolaylarında yarı değerli maden kuvars bulunmaktadır. Çini üretiminde 900°C'de pişirme prosesi yer almaktadır. Bu aşamaya gelmeden önce ürün kaybını önlemek adına ham çini malzemesinin kurutma prosesiyle suyunun buharlaştırılması gerekmektedir. Ham durumda bu malzeme %30 (yb) su içermektedir.

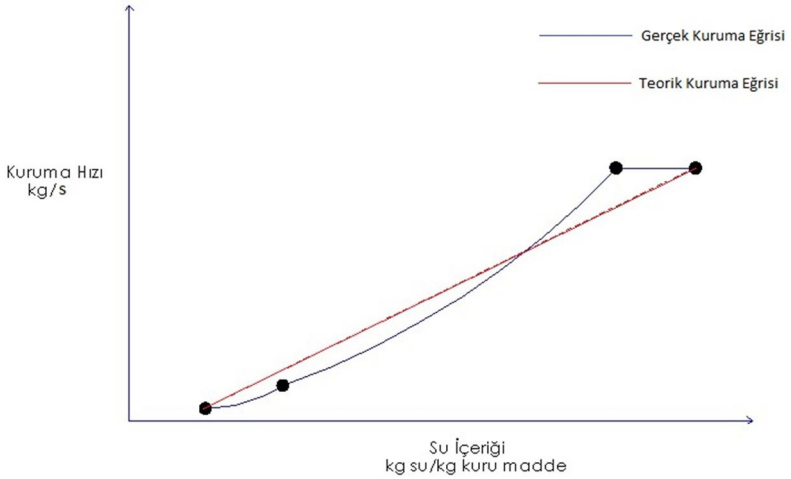
Çelik: Fırında kurutulacak ürünlerin konulduğu arabalar ve fırının dış yüzey malzemeleri çelikten oluşmaktadır.

Taş Yünü: Fırının dış yüzeyi 10 cm kalınlığında taş yünü ile kaplanmıştır.

5.2. Isı Pompalı Kurutma Fırını ile Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Enerji Tüketim Değerleri ve Kıyaslanması

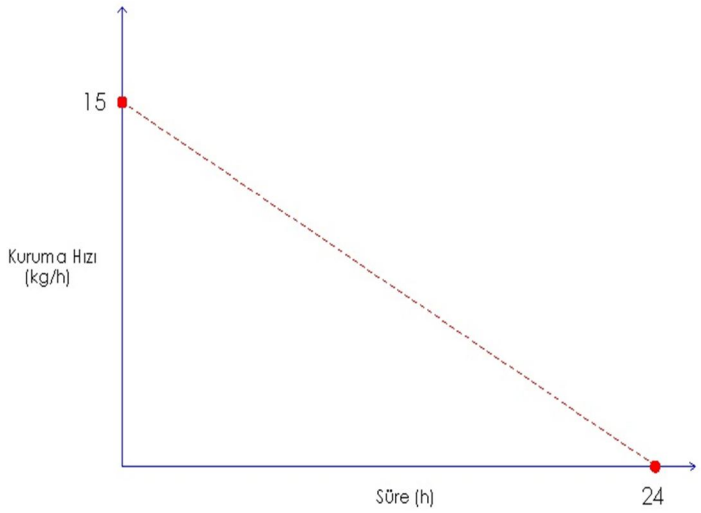
Bu kısımda şekil 5.1'de görülen kurutma fırınında ısı pompası kullanılarak ve elektrik enerjisi kullanılarak kurutma yapılması durumuna göre enerji tüketim değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar için önemli parametreler şu şekildedir:

- Fırında daha önce açıklandığı üzere %30(yb) su oranına sahip 600 kg çini ürün kurutulmaktadır. Bu değere eş gelen su içeriği 180 kg'dır.
- Kurutma her iki durum içinde 24 saatte tamamlanacaktır.
- Kurutma sıcaklığı 60°C'dir. Fırın sıcaklığı belirli bir süre içerisinde bu sıcaklık değerinde rejime girecektir.
- Fırına verilen enerji değerleri suyun buharlaşma enerjisini ve fırın içi elemanların ısıtılmasını sağlayıp, dışarıya olan kayıpları da karşılamalıdır. Hesaplamalar bu esasa dayanmaktadır.
- Ürünlerin 24 saat içerisinde lineer azalan şekilde kuruduğu varsayılmıştır.



Şekil 5.3 Gerçek Kuruma Eğrisi ve Hesaplamada Kabul Edilen Lineer Kuruma Eğrisi

Fırındaki çini ürünlerinin kuruma eğrileri şekil 5.3'de verilen gerçek kuruma eğrisine uygun olacaktır. Bununla birlikte çelik arabalar boyunca havanın sıcaklık değeri azalıp nem değeri artacağından bu kuruma eğrisi bütün ürünler için aynı olmayacaktır. Ön taraftaki ürünler hızlı bir şekilde kururken arkalara doğru kuruma hızı düşecektir. Bu yüzden ürünlerin tamamını kuruma süresi içerisinde temsil edecek kuruma eğrisi olarak şekil 5.3'de ki teorik kuruma eğrisi kabul edilmiştir ve şekil 5.4'de kuruma hızı-süre ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.4 Kuruma Hızı-Süre İlişkisi

Şekil 5.4'deki kuruma eğrisi denklemi:

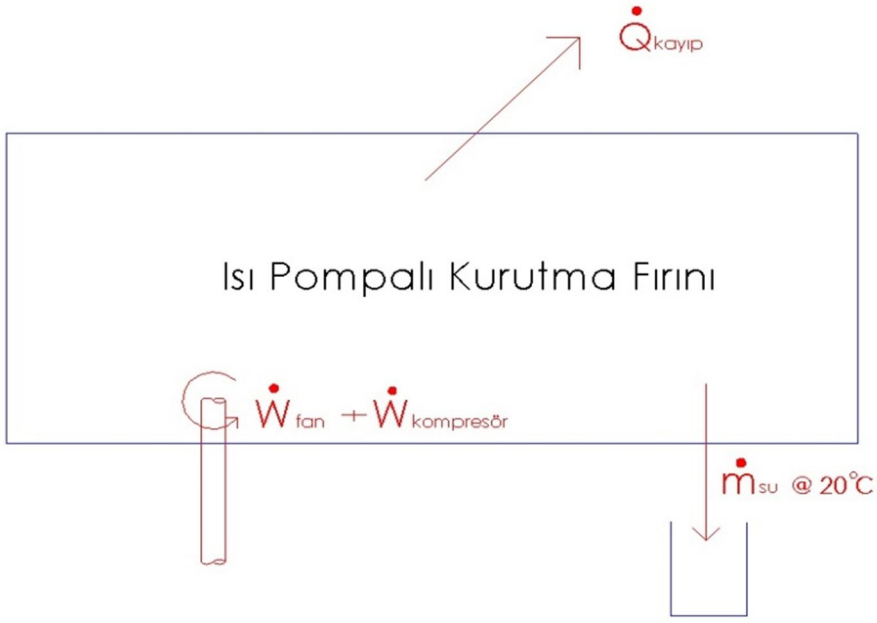
$$KH = 15 - \frac{15}{24}t \tag{5.1}$$

Herhangi bir t zamanına kadar buharlaşan toplam su miktarı:

$$\text{Buharlaşan toplam su miktarı} = \int_0^t KH\,dt = 15t - \frac{15}{48}t^2 \tag{5.2}$$

5.2.1. Isı Pompalı Kurutma Fırınının Enerji Tüketim Analizi

Isı pompalı kurutma fırınının enerji tüketim analizi kurutma fırınına kütle ve enerjinin korunumu denklemleri uygulanarak yapılmıştır. Bu analizde fırın sıcaklığı 15 dakikalık periyotlar sonucunda üniform olarak arttırılırken, denklem 5.2 doğrultusunda her bir periyot aralığı için buharlaştırılan su miktarı hesaba alınmıştır. Analizi yapılan ısı pompalı kurutma fırını ve fırına olan enerji ve kütle giriş çıkışları şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5 Isı Pompalı Kurutma Fırınının Şematik Gösterimi

Kütle Denkliği:

$$\dot{m}_g - \dot{m}_ç = \frac{dM_{sistem}}{dt} \tag{5.3}$$

$$\dot{m}_g = 0 \tag{5.4}$$

$$-\dot{m}_ç = \frac{dM_{sistem}}{dt} \tag{5.5}$$

$$\Sigma m_ç = (15t_2 - \frac{15}{48}{t_2}^2) - (15t_1 - \frac{15}{48}{t_1}^2) \quad (t_2 \text{ ve } t_1 \text{ saatleri arasında}) \tag{5.6}$$

Enerji Denkliği:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \Sigma \dot{m}_g \dot{h}_g - \Sigma \dot{m}_ç \dot{h}_ç = \frac{dE_{sistem}}{dt} \tag{5.7}$$

Bu değerler t_2 ve t_1 saatleri arasında:

$$\Sigma Q = -\dot{Q}_{kayıp}\ 3600\ (t_2 - t_1) \tag{5.8}$$

$$\Sigma W = (\dot{W}_{fan} + \dot{W}_{kompresör})\ 3600\ (t_2 - t_1) \tag{5.9}$$

$$\Sigma m_g h_g = 0 \tag{5.10}$$

$$\Sigma m_ç h_ç = \left[\left(15t_2 - \frac{15}{48}{t_2}^2\right) - (15t_1 - \frac{15}{48}{t_1}^2)\right] h_{su} \tag{5.11}$$

$$\Delta E_{sistem} = (m_{çel}c_{çel} + m_{ürün}c_{ürün} + m_{hava}c_{p_{hava}} + m_{yal}c_{yal})\ (T_2 - T_1) + m_{su2}c_{su}T_2 - m_{su1}c_{su}T_1 \tag{5.12}$$

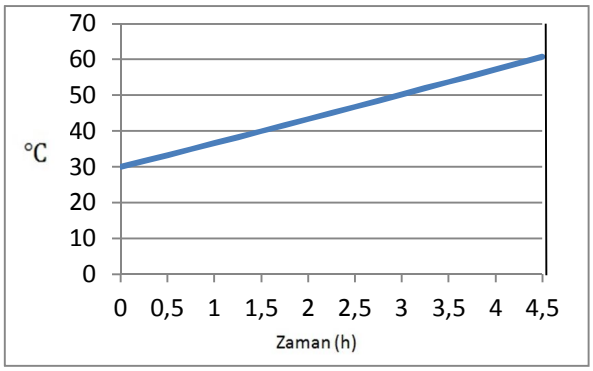
Hesaplamalarda $\dot{Q}_{kayıp}$ için kullanılan denklem:

$$\dot{Q}_{kayıp} = k_{yal}\ A\ \frac{T_{sistem} - T_{çevre}}{L_{yal}} \tag{5.13}$$

İlgili denklemler fırının rejime geçme ve rejimde kalma durumları için tablo 5.1'de ki değerler kullanılarak 15 dakikalık periyotlar için çözülmüştür. Fırının rejime geçme durumu için 15 dakikalık periyotlarla sıcaklık değişimleri çıkarılmıştır. Bu süreçte fırına olan net güç girişleri 1 kW fan ve 2 kW kompresör gücü alınarak toplam 3 kW olmuştur. Rejimde kalma durumu için fırını ilgili rejim sıcaklığında tutup kurutmayı devam ettirmek adına verilmesi gerekli güç miktarları 15'er dakikalık periyotlarla hesaplanmıştır. Fırının rejime geçme sürecinde elde edilen sıcaklık değişimleri tablo 5.2'de verilmiştir. Bu hesaplamalarda çevre sıcaklığı yaz koşulları kabulüyle 30 ℃ alınırken ısı pompasının buharlaştırıcısından çıkan suyun sıcaklığı 20℃ olarak alınmıştır. Fırının rejim halindeki sıcaklığı ise 60 ℃ olarak belirlenmiştir. Tablo 5.2'de görüleceği üzere rejime geçme süresi 4,5 saat olup, bu süreçte harcanan toplam enerji miktarı 13,5 kWh olmaktadır.

Tablo 5.2 Isı Pompalı Kurutma Fırınının Rejime Geçme Sürecinde Sıcaklık Değişimi

Zaman(h)	Sıcaklık ℃	Zaman(h)	Sıcaklık ℃
0	30	2,5	46,75
0,25	31,62	2,75	48,48
0,5	33,26	3	50,21
0,75	34,92	3,25	51,95
1	36,58	3,5	53,70
1,25	38,25	3,75	55,45
1,5	39,93	4	57,21
1,75	41,62	4,25	58,98
2	43,32	4,5	60,75
2,25	45,03	--	--



Şekil 5.6 Rejime Geçme Süreci İçin Isı Pompalı Kurutma Fırınının Sıcaklık - Zaman Grafiği

Tablo 5.3'de ısı pompalı kurutma fırınını 60°C rejim sıcaklığında tutmak için fırına verilmesi gerekli net güç değerleri verilmiştir. Her bir güç değeri eşlendiği zaman dilimiyle bir önceki zaman dilimi arasında fırına verilmesi gereken değerler olmaktadır.

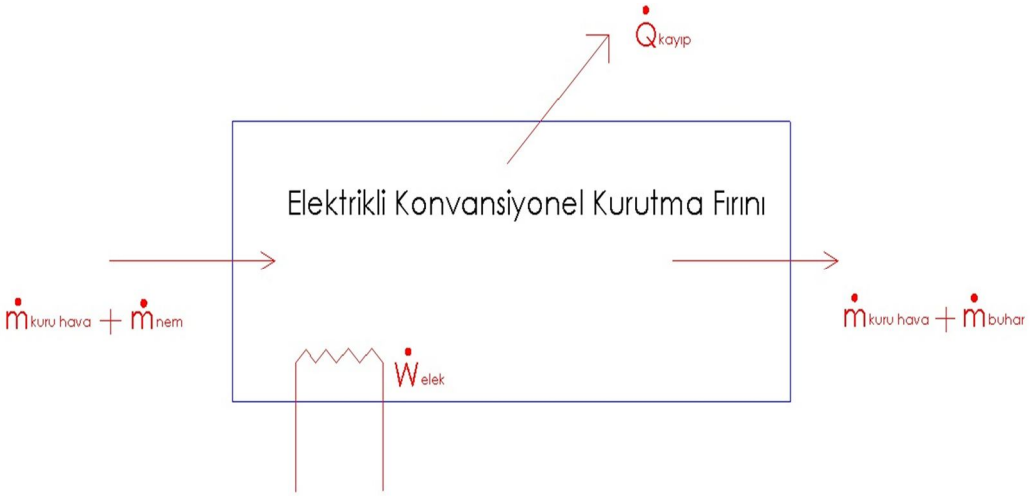
Tablo 5.3 Isı Pompalı Kurutma Fırınına Rejimde Kalma Sürecinde Verilmesi Gerekli Net Güç Değerleri

Zaman (h)	Güç kW	Zaman (h)	Güç kW
4,75	0,052	14,5	0,335
5	0,059	14,75	0,342
5,25	0,067	15	0,350
5,5	0,074	15,25	0,357
5,75	0,081	15,5	0,364
6	0,088	15,75	0,371
6,25	0,096	16	0,379
6,5	0,103	16,25	0,386
6,75	0,110	16,5	0,393
7	0,117	16,75	0,400
7,25	0,125	17	0,408
7,5	0,132	17,25	0,415
7,75	0,139	17,5	0,422
8	0,146	17,75	0,429
8,25	0,154	18	0,437
8,5	0,161	18,25	0,444
8,75	0,168	18,5	0,451
9	0,175	18,75	0,458
9,25	0,183	19	0,466
9,5	0,190	19,25	0,473
9,75	0,197	19,5	0,480
10	0,204	19,75	0,488
10,25	0,212	20	0,495
10,5	0,219	20,25	0,502
10,75	0,226	20,5	0,509
11	0,234	20,75	0,517
11,25	0,241	21	0,524
11,5	0,248	21,25	0,531
11,75	0,255	21,5	0,538
12	0,263	21,75	0,546
12,25	0,270	22	0,553
12,5	0,277	22,25	0,560
12,75	0,284	22,5	0,567
13	0,292	22,75	0,575
13,25	0,299	23	0,582
13,5	0,306	23,25	0,589
13,75	0,313	23,5	0,596
14	0,321	23,75	0,604
14,25	0,328	24	0,611

Tablo 5.3'de ki güç değerlerinin kullanılması sonucunda rejim sürecinde fırına verilmesi gereken net enerji miktarı 6,47 kWh olarak belirlenmiştir. Tablo 5.3'de verilen enerji değerleri sistemin termodinamik analizi sonucunda elde edilmiş olup, kurutma fırınının kompresörden ve hava sirkülasyon fanından çekmesi gereken güç miktarları olarak yorumlanabilir. Isı pompalı kurutma fırınında harcanan toplam enerji miktarı fırının rejime geçme zamanlarında ve rejimde bulunduğu zamanlarda harcadığı toplam enerjidir. Sonuç olarak 0-24 saatleri arasında ısı pompalı kurutma fırınının kullandığı toplam enerji miktarı 19,9725 kWh olmaktadır.

5.2.2. Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Enerji Tüketim Analizi

Isı pompalı kurutma fırınının elektrikli olarak çalıştırılması durumundaki enerji tüketim değerleri de aynı şekilde kütle ve enerjinin korunumu denklemleri uygulanarak 15'er dakikalık periyotlarla hesaplanmıştır. Bu sistemin ısı pompalı sistemden farkı dışarıdan sürekli olarak taze soğuk hava alınması ve dışarıya nemli havanın atılmasıdır.



Şekil 5.7 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Şematik Gösterimi

Kütle Denkliği:

$$\dot{m}_g - \dot{m}_ç = \frac{dM_{sistem}}{dt} \quad (5.14)$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{kuru\ hava} + \dot{m}_{nem} \quad (5.15)$$

$$\dot{m}_{ç} = \dot{m}_{\text{kuru hava}} + \dot{m}_{\text{buhar}} \tag{5.16}$$

$$\Sigma m_{\text{buhar}} = (15t_2 - \frac{15}{48}t_2{}^2) - (15t_1 - \frac{15}{48}t_1{}^2) + \dot{m}_{\text{nem}}\, 3600\, (t_2 - t_1) \tag{5.17}$$

Denklem (5.17) ile t_2 ve t_1 saatleri arasında fırından çıkan toplam buhar miktarı bulunmaktadır.

Enerji Denkliği:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \Sigma \dot{m}_g \dot{h}_g - \Sigma \dot{m}_ç \dot{h}_ç = \frac{dE_{\text{sistem}}}{dt} \tag{5.18}$$

Bu değerler t_2 ve t_1 saatleri arasında:

$$\Sigma Q = -\dot{Q}_{\text{kayıp}}\, 3600\, (t_2 - t_1) \tag{5.19}$$

$$\Sigma W = -\dot{W}_{\text{elek}}\; 3600\, (t_2 - t_1) \tag{5.20}$$

$$\Sigma m_g h_g = (\dot{m}_{\text{kuruhava}}\; c_{p_{\text{hava}}}\; T_{\text{çevre}} + \dot{m}_{\text{nem}} h_b)\; 3600\, (t_2 - t_1) \tag{5.21}$$

$$\Sigma m_ç h_ç = (\dot{m}_{\text{kuru hava}}\; c_{p_{\text{hava}}}\; T_{\text{sistem}} + \dot{m}_{\text{nem}}\, h_b)\, 3600\, (t_2\text{-}t_1) + \left[(15t_2 - \frac{15}{48}t_2{}^2) - (15t_1 - \frac{15}{48}t_1{}^2)\right] h_b \tag{5.22}$$

$$\Delta E_{\text{sistem}} = (m_{\text{çel}} c_{\text{çel}} + m_{\text{ürün}} c_{\text{ürün}} + m_{\text{hava}} c_{p_{\text{hava}}} + m_{\text{yal}} c_{\text{yal}})\, (T_2 - T_1) + m_{su2} c_{su} T_2 - m_{su1} c_{su} T_1 \tag{5.23}$$

Hesaplamada birim zamanda oluşan ısı kayıpları denklem (5.13)'den bulunmuştur ve fırına dışarıdan alınan kuru hava ve nem debileri için denklem (5.24) ve (5.25)'den alınan sonuçlar kullanılmıştır.

$$P_{\text{kuruhava}}\; V = m_{\text{kuruhava}}\; R_{\text{kuruhava}}\; T \tag{5.24}$$

$$P_{\text{nem}}\; V = m_{\text{nem}}\; R_{\text{nem}}\; T \tag{5.25}$$

Denklem (5.24) ve (5.25) 30℃ ve %50 bağıl nem koşullarındaki çevre havasının 1 m^3'lük miktarı için hesaplanmıştır. Kesit alanı 1,25m^2 olan kurutma ortamından geçen kütlesel debiler tablo 5.4'de verilmiştir ve bu değerler enerji ve kütle denkliği formüllerinde kullanılmıştır. Isı pompalı kurutma fırını ile aynı şartların sağlanması doğrultusunda rejime geçme süreci için gerekli güç miktarı 22 kW bulunmuştur.

Tablo 5.4 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınına Giren Havaya Ait Parametreler

$\rho_{kuruhava}$ kg/m^3	ρ_{nem} kg/m^3	V_H m/s	$\dot{m}_{kuruhava}$ kg/s	$\dot{m}_{nem}$ kg/s
1,1255	0,0159	0,3	0,4215	0,0059

Tablo 5.5 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Rejime Geçme Sürecinde Sıcaklık Değişimi

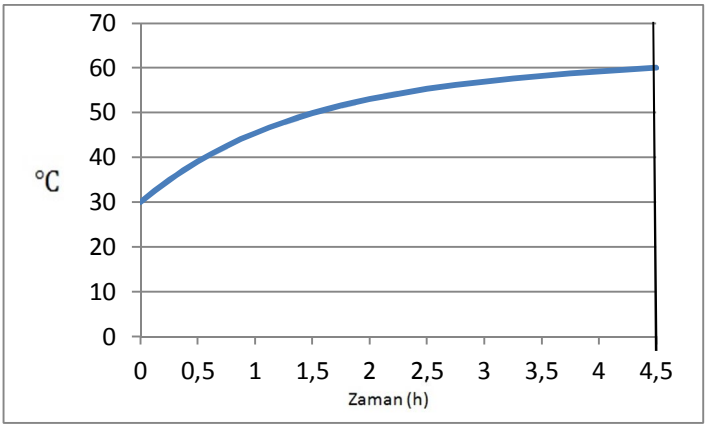
Zaman(h)	Sıcaklık ℃
0	30
0,25	34,95
0,5	39,09
0,75	42,54
1	45,43
1,25	47,85
1,5	49,88
1,75	51,59
2	53,03
2,25	54,25
2,5	55,29
2,75	56,19
3	56,96
3,25	57,63
3,5	58,22
3,75	58,74
4	59,21
4,25	59,63
4,5	60,02

Tablo 5.6 Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınına Rejimde Kalma Sürecinde Verilmesi Gereken Güç Değerleri

Zaman(h)	Güç kW	Zaman(h)	Güç kW
4,75	21,24	14,5	17,30
5	21,14	14,75	17,20
5,25	21,04	15	17,10
5,5	20,94	15,25	17,00
5,75	20,83	15,5	16,90
6	20,73	15,75	16,80
6,25	20,63	16	16,70
6,5	20,53	16,25	16,60
6,75	20,43	16,5	16,50
7	20,33	16,75	16,39
7,25	20,23	17	16,29
7,5	20,13	17,25	16,19
7,75	20,03	17,5	16,09
8	19,93	17,75	15,99
8,25	19,83	18	15,89
8,5	19,73	18,25	15,79
8,75	19,63	18,5	15,69
9	19,52	18,75	15,59
9,25	19,42	19	15,49
9,5	19,32	19,25	15,39
9,75	19,22	19,5	15,29
10	19,12	19,75	15,18
10,25	19,02	20	15,08
10,5	18,92	20,25	14,98
10,75	18,82	20,5	14,88
11	18,72	20,75	14,78
11,25	18,62	21	14,68
11,5	18,52	21,25	14,58
11,75	18,42	21,5	14,48
12	18,31	21,75	14,38
12,25	18,21	22	14,28
12,5	18,11	22,25	14,18
12,75	18,01	22,5	14,08
13	17,91	22,75	13,98
13,25	17,81	23	13,87
13,5	17,71	23,25	13,77
13,75	17,61	23,5	13,67
14	17,51	23,75	13,57
14,25	17,41	24	13,47

Şekil 5.8'de elektrikli konvansiyonel kurutma fırınının rejime geçme sürecinde izlediği sıcaklık eğrisi verilmiştir ve elektrikli konvansiyonel kurutma fırınının rejime geçme ve rejimde kalma sürecinde harcadığı toplam enerji miktarı 437,95 kWh olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar fırının termodinamik analizi açısından, ısı pompalı kurutma fırınının enerji tüketim değerinin elektrikli konvansiyonel kurutma

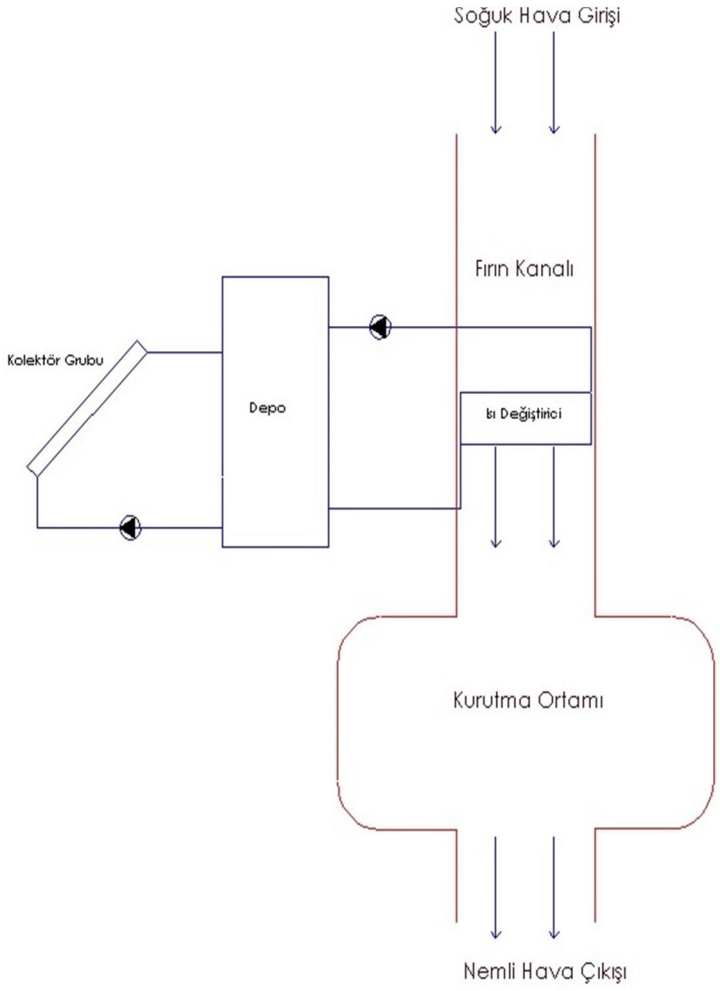
fırınınkinden çok daha düşük olduğunu kanıtlamaktadır. Isı pompalı kurutma fırınında ürünlerden buharlaştırılan su, ısı pompasının buharlaştırıcısında tekrar yoğunlaştırıldığı için suyun buharlaşma enerjisinden tasarruf edilirken, elektrikli konvansiyonel kurutma fırınında nemli hava direkt olarak dışarı atılmaktadır. Ayrıca elektrikli konvansiyonel kurutma fırınında sürekli olarak dışarıdan taze soğuk havanın alınıp ısıtılması ek olarak enerji tüketimini arttırmaktadır.



Şekil 5.8 Rejime Geçme Süreci İçin Elektrikli Konvansiyonel Kurutma Fırınının Sıcaklık Eğrisi

5.3. Güneş Enerjili Kurutma Sistemi Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde şekil 5.1'de gösterilen fırında kurutma prosesini başlatacak ve belirli bir süre devam ettirebilecek güneş enerjisi sisteminin boyutlandırılması yapılmıştır. Bu sistemde gündüz saatlerinde güneş enerjisi deposu kolektörler tarafından istenilen uygun sıcaklığa kadar ısıtılacak, gece saatlerinde ise depodan fırın havasına enerji transferi gerçekleştirilerek kurutma işlemi yapılacaktır. Bu sayede ön kurutma yapılarak fırın belirli bir rejim sıcaklığına çıkarılacaktır. Güneş enerjisi sistemi kurutma için yetersiz kaldığı zaman devreye ısı pompası girerek kurutma prosesi devam ettirilecektir. Güneş enerjisi sistemi açık devre bir sistem olup, devrede dolaşan akışkan sudur. Sistem tasarımının temsili çizimi şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9 Güneş Enerjisiyle Kurutma

5.3.1. İlgili Parametreler ve Denklemler

Bu sistemde kurutma ortamından çıkan nemli havanın dışarıya tahliye edilme zorunluluğu bulunduğundan sistemin çalışma biçimi daha önceki kısımlarda incelenmiş olan elektrikli konvansiyonel kurutma fırınıyla aynı şekilde olacaktır. Dolayısıyla elektrikli konvansiyonel kurutma fırınında kurutmanın sağlanabilmesi için harcanan elektrik enerjisinin eş değerinin güneş enerjisi deposundan kurutma havasına verilmesinin gerekliliği bulunmaktadır. Bunun sağlanabilmesi için üzerinde durulması gereken ilgili parametreler şunlardır:

- Depo sıcaklığı

- Depo kapasitesi
- Kurutma havasının hızı
- Isı değiştiricisinin kapasitesi

Güneş enerjili kurutma sistemi için kullanılan ilgili denklemler (5.14)-(5.23) arası denklemlerdir. Bu denklemlerin kullanımında elektrikli konvansiyonel kurutma fırını için sabit $\dot{W}_{elek}$ değeri alınırken, güneş enerjili kurutma sistemi için değişken $\dot{Q}_{giren}$ değeri alınmaktadır. $\dot{Q}_{giren}$ değeri güneş enerjisi deposundan kurutma havasına verilen ısı enerjisidir ve yukarıda belirtilen parametreler ile deponun soğumasından dolayı zamanın fonksiyonu olmaktadır.

$$\dot{Q}_{giren} = f\,(T_{Depo}, V_{Depo}, \dot{m}_{hava}\ , \varepsilon\ , t) \tag{5.26}$$

(5.26) denkleminde ε parametresi ısı değiştiricisinin etkenlik katsayısı olmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{Q_{gerçek}}{Q_{maks}} \tag{5.27}$$

Isı değiştiricisinde $\dot{m}_{hava}\ c_{p_{hava}} < \dot{m}_{su}\ c_{su}$ durumu için:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{hava}\ c_{p_{hava}}\,(T_{hava_{çıkış}} - T_{çevre})}{\dot{m}_{hava}\ c_{p_{hava}}\,(T_{depo} - T_{çevre})} = \frac{(T_{hava_{çıkış}} - T_{çevre})}{(T_{depo} - T_{çevre})} \tag{5.28}$$

$$T_{hava_{çıkış}} = \varepsilon\ (T_{depo} - T_{çevre}) + T_{çevre} \tag{5.29}$$

Denklem (5.28) için $\dot{m}_{hava}$ değeri çevre şartları için kuru hava ve su buharının karışımıdır. Bu durumda kurutma havasına verilen ısı enerjisi miktarı:

$$\dot{Q}_{giren} = \dot{m}_{hava}\ c_{p_{hava}}\,(T_{hava_{çıkış}} - T_{çevre}) \tag{5.30}$$

Sistemin çalışma süresi boyunca depodan ısı çekileceği için zamanla depo soğuyacaktır. Bu da kurutma havasına verilen ısı enerjisini zamana göre değişken yapmaktadır.

$$M_{depo}\, c_{su}\, \frac{dT_{depo}}{dt} = -\dot{Q}_{giren} - \dot{Q}_{kayıp} \tag{5.31}$$

Depo yarıçapı 1 m olan silindirik paslanmaz çelik depo olup, yüzeyi 5 cm kalınlığında taş yünü malzemesi ile yalıtılmıştır.

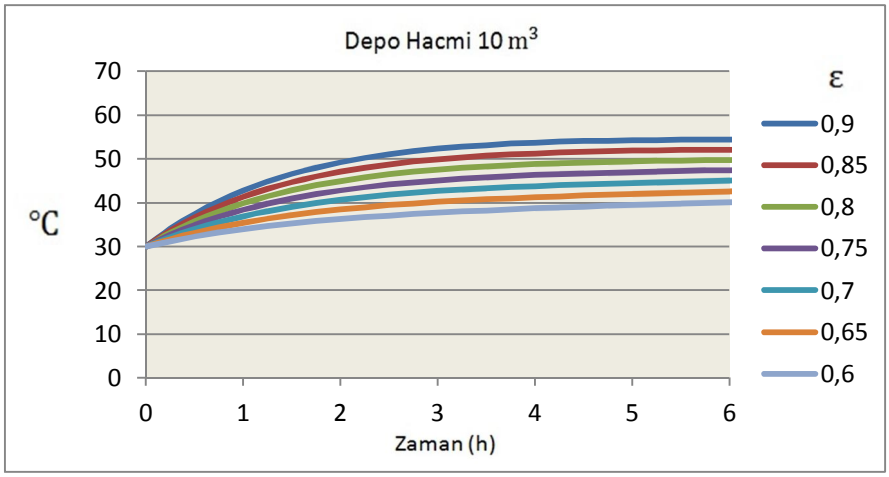
$$M_{depo}\, c_{su}\, \frac{dT_{depo}}{dt} = -\dot{m}_{hava}\, c_{p_{hava}}\, (T_{hava_{çıkış}} - T_{çevre}) - k_{yal}\, A_{Depo}\, \frac{T_{Depo} - T_{çevre}}{L_{yal}} \tag{5.32}$$

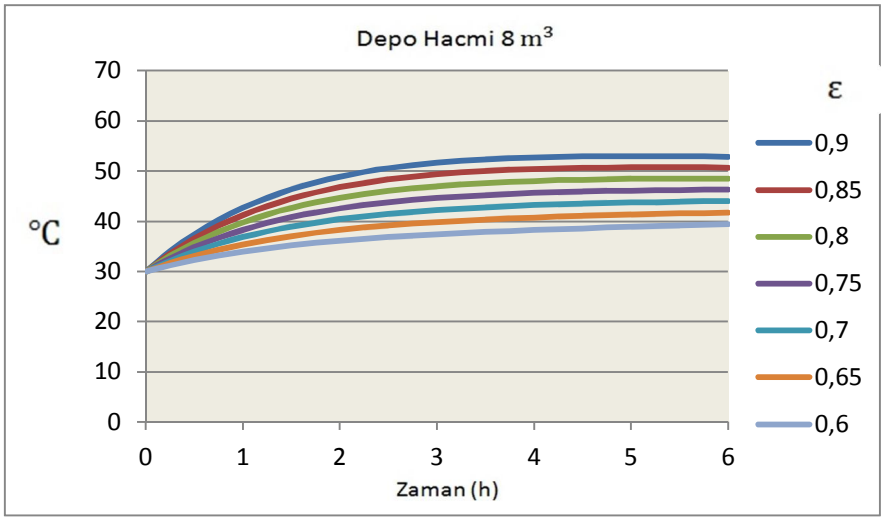
5.3.2. Güneş Enerjili Kurutma Fırınında Elde Edilen Sıcaklık Eğrileri

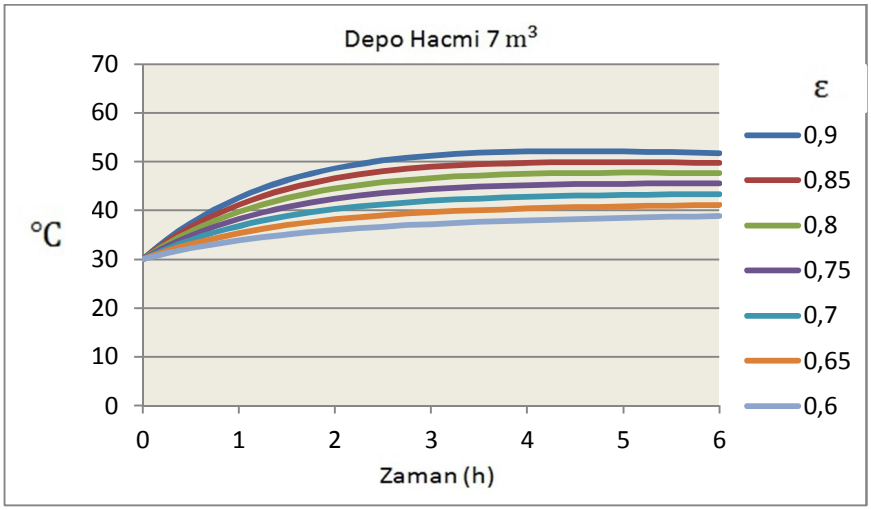
Güneş enerjili kurutma fırınının sıcaklık eğrileri (5.14)-(5.23) ve (5.26)-(5.31) arası denklemler kullanılarak 6 saatlik zaman dilimleri için elde edilmiştir. Bu zaman diliminde %40'lık kurutma yükü karşılanmaktadır. Bu denklemlerde tablo 5.7'de verilen farklı parametre değerleri girdi olarak kullanılmıştır ve sonuçlar çevre sıcaklığının 30 ℃ ve depo başlangıç sıcaklığının 90℃ olduğu durumlar için şekil 5.10'dan şekil 5.21'e kadar verilmiştir.

Tablo 5.7 Hesaplamada Kullanılan Parametreler ve Bu Parametreler İçin Kullanılan Farklı Değerler

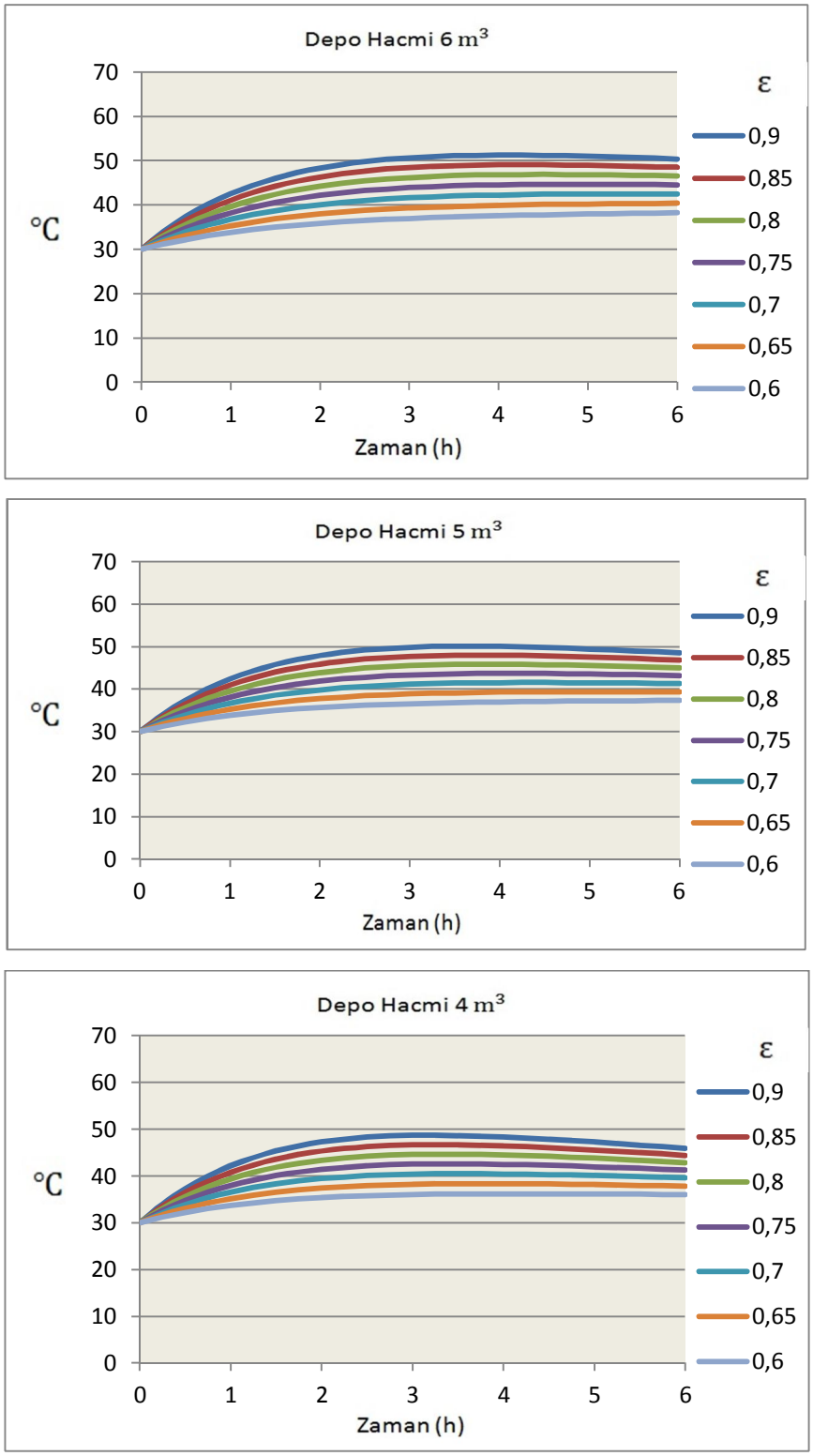
Depo m^3	4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 10
Hava Hızı m/s	0,25 – 0,3 – 0,35 – 0,4 – 0,45 – 0,5
ε	0,6 – 0,65 – 0,7 – 0,75 – 0,8 – 0,85 – 0,9



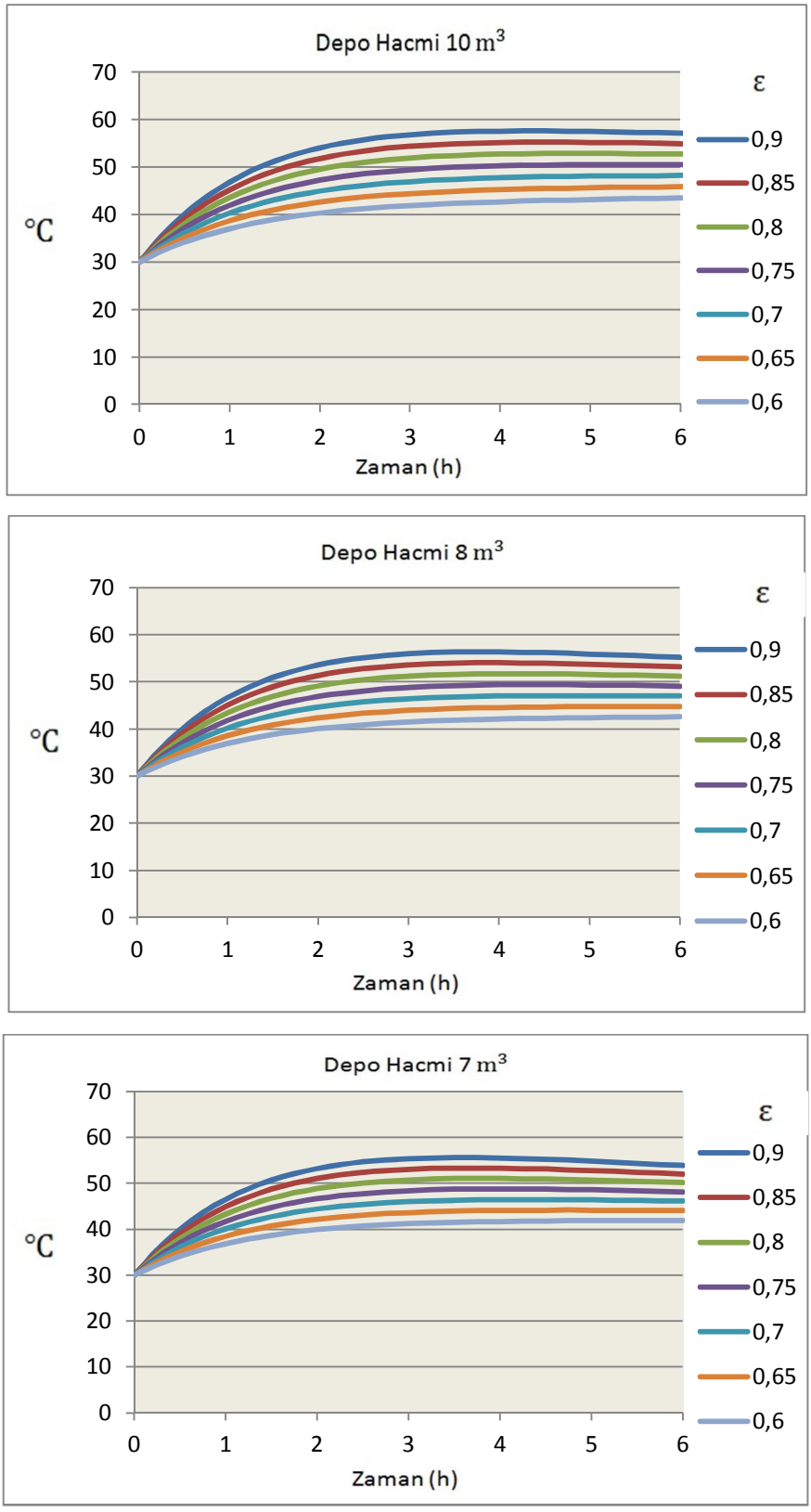




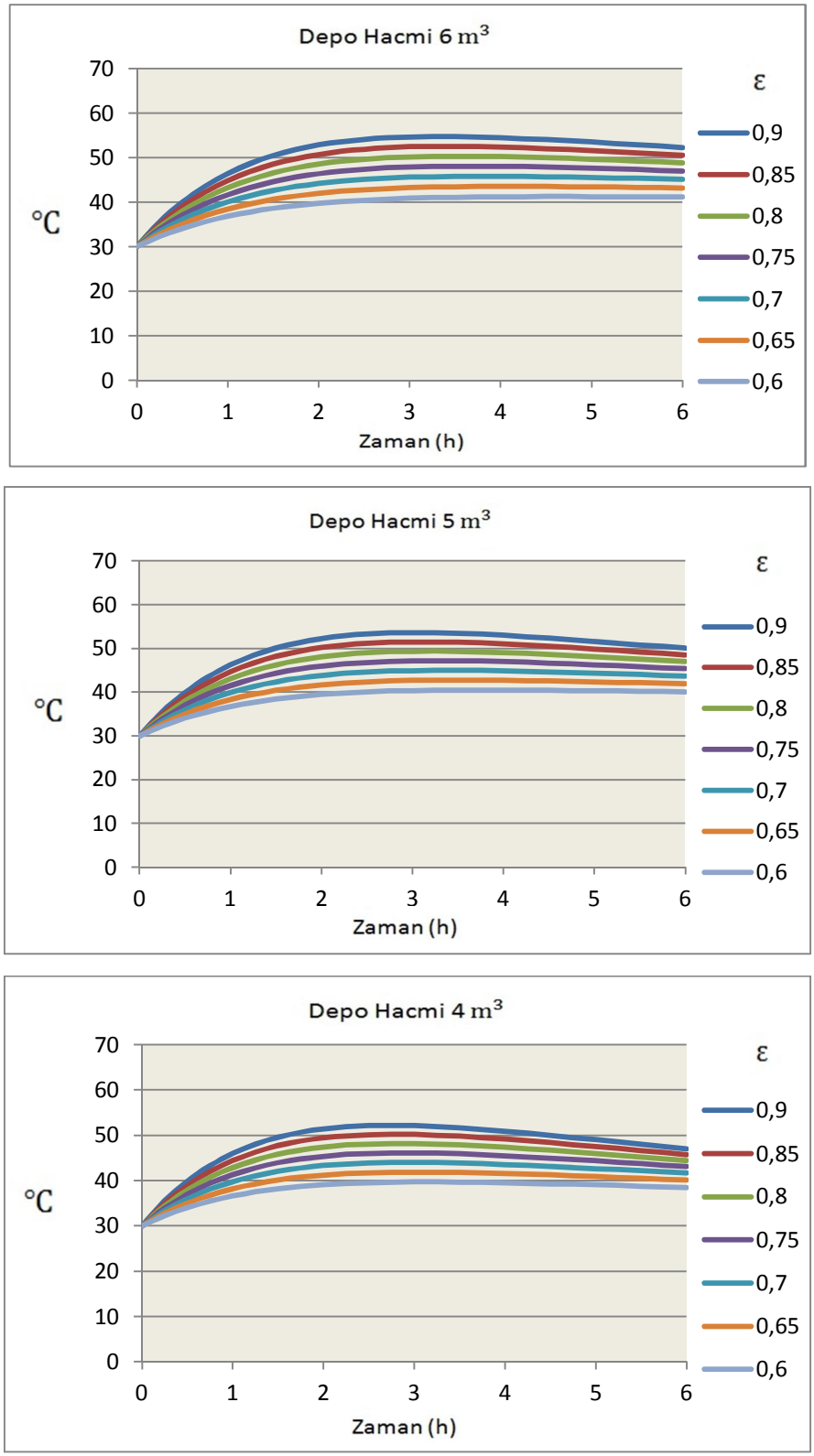
Şekil 5.10 0,25 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)



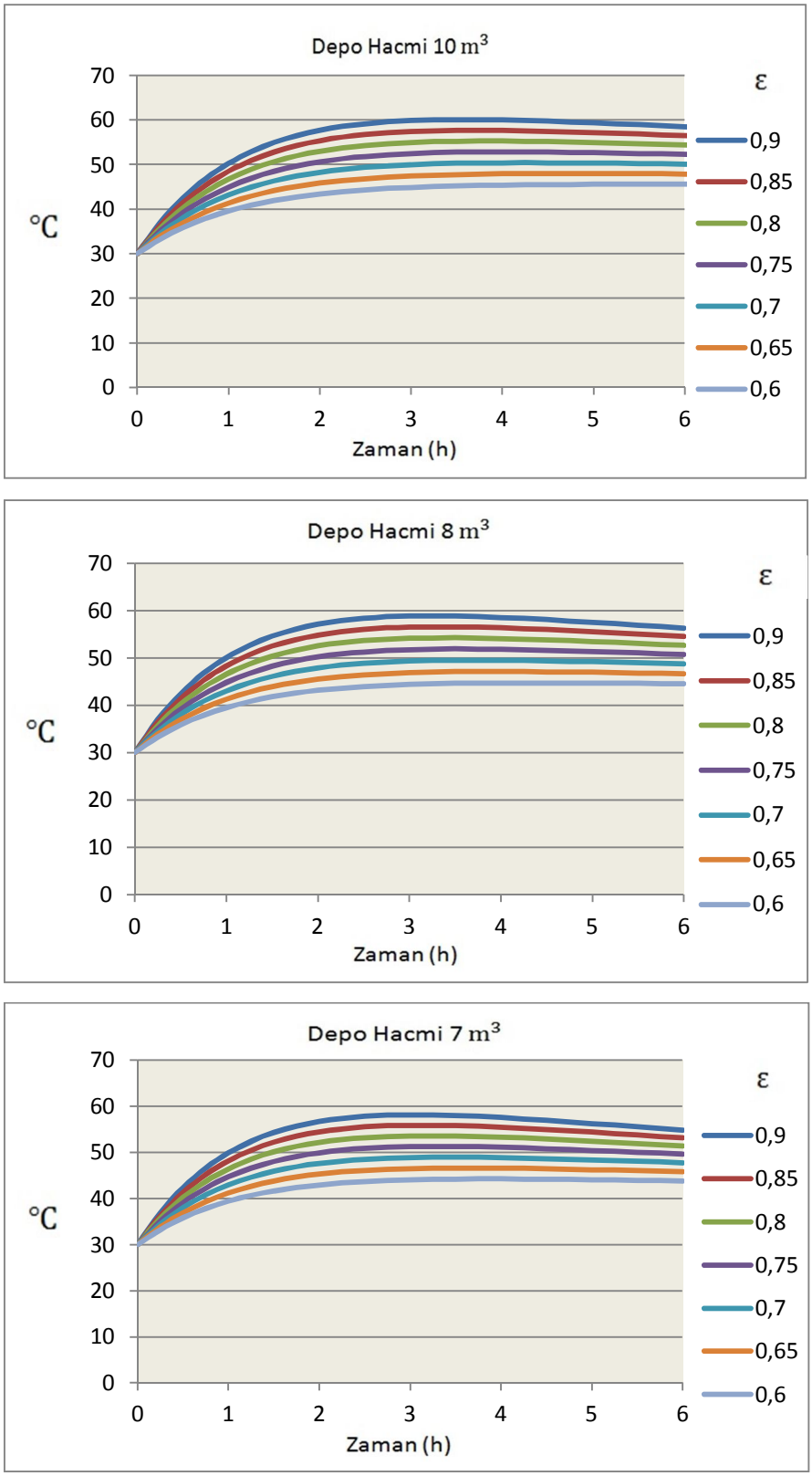
Şekil 5.11 0,25 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)



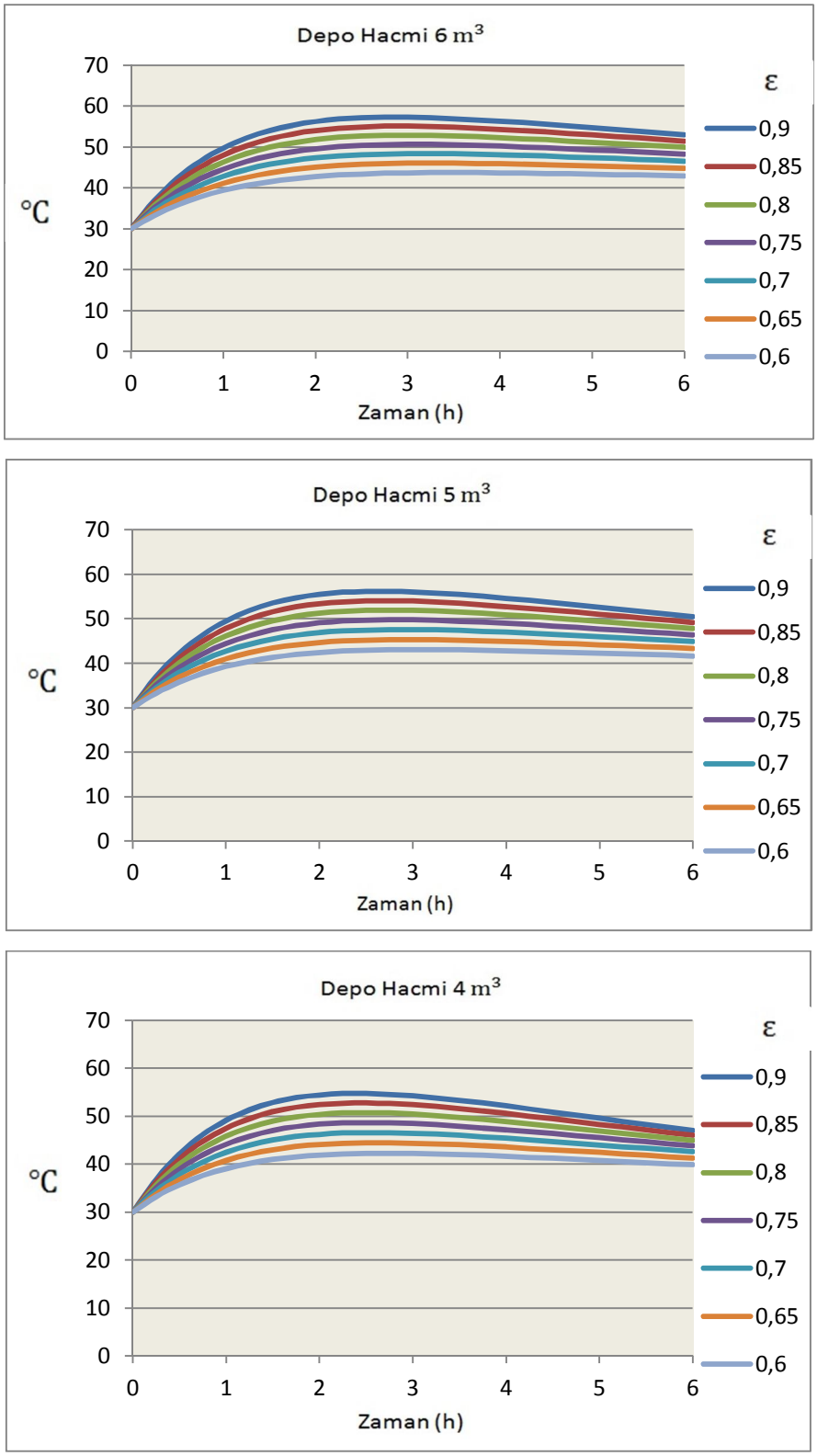
Şekil 5.12 0,3m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)



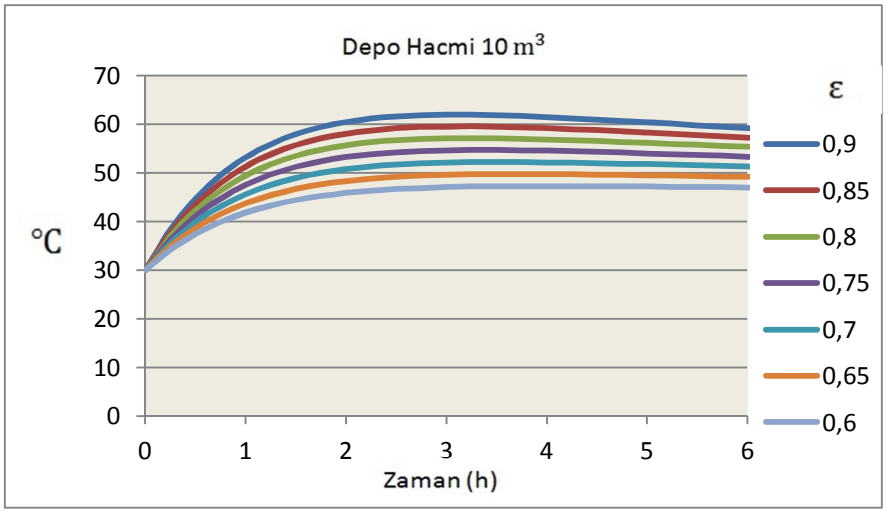
Şekil 5.13 0,3m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)

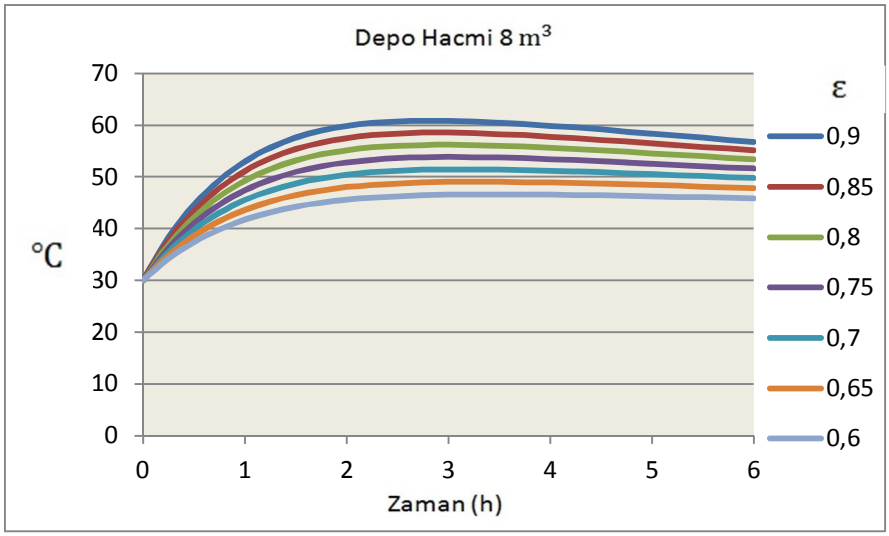


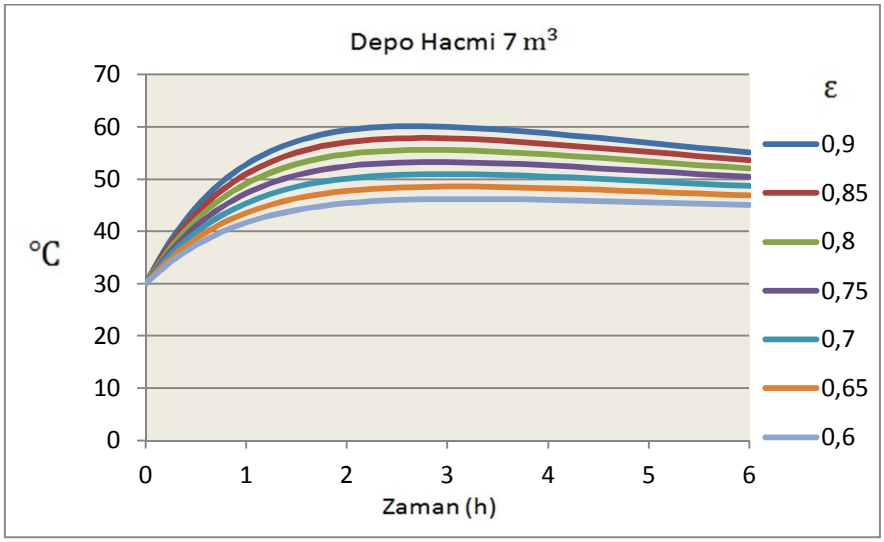
Şekil 5.14 0,35m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)



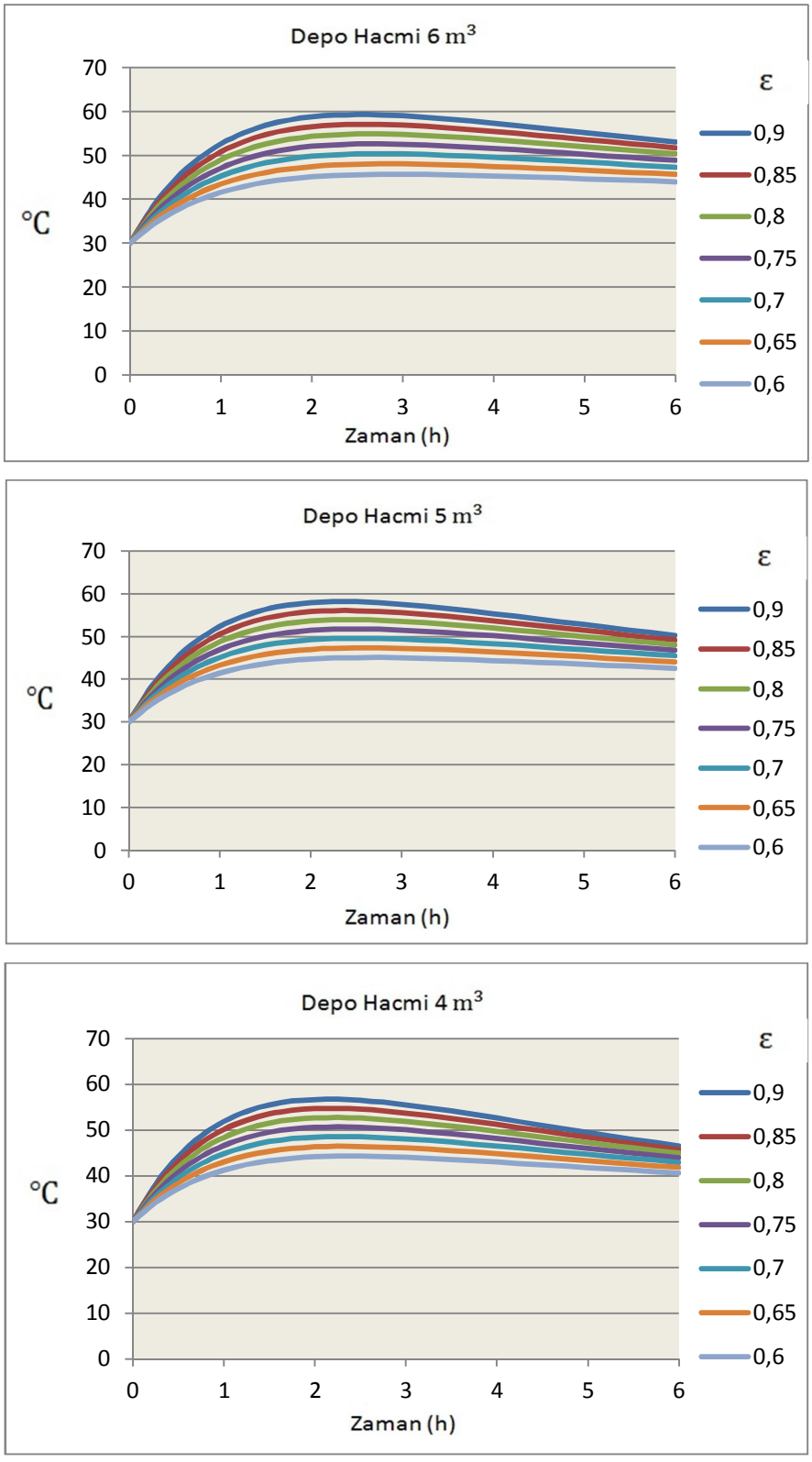
Şekil 5.15 0,35m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)



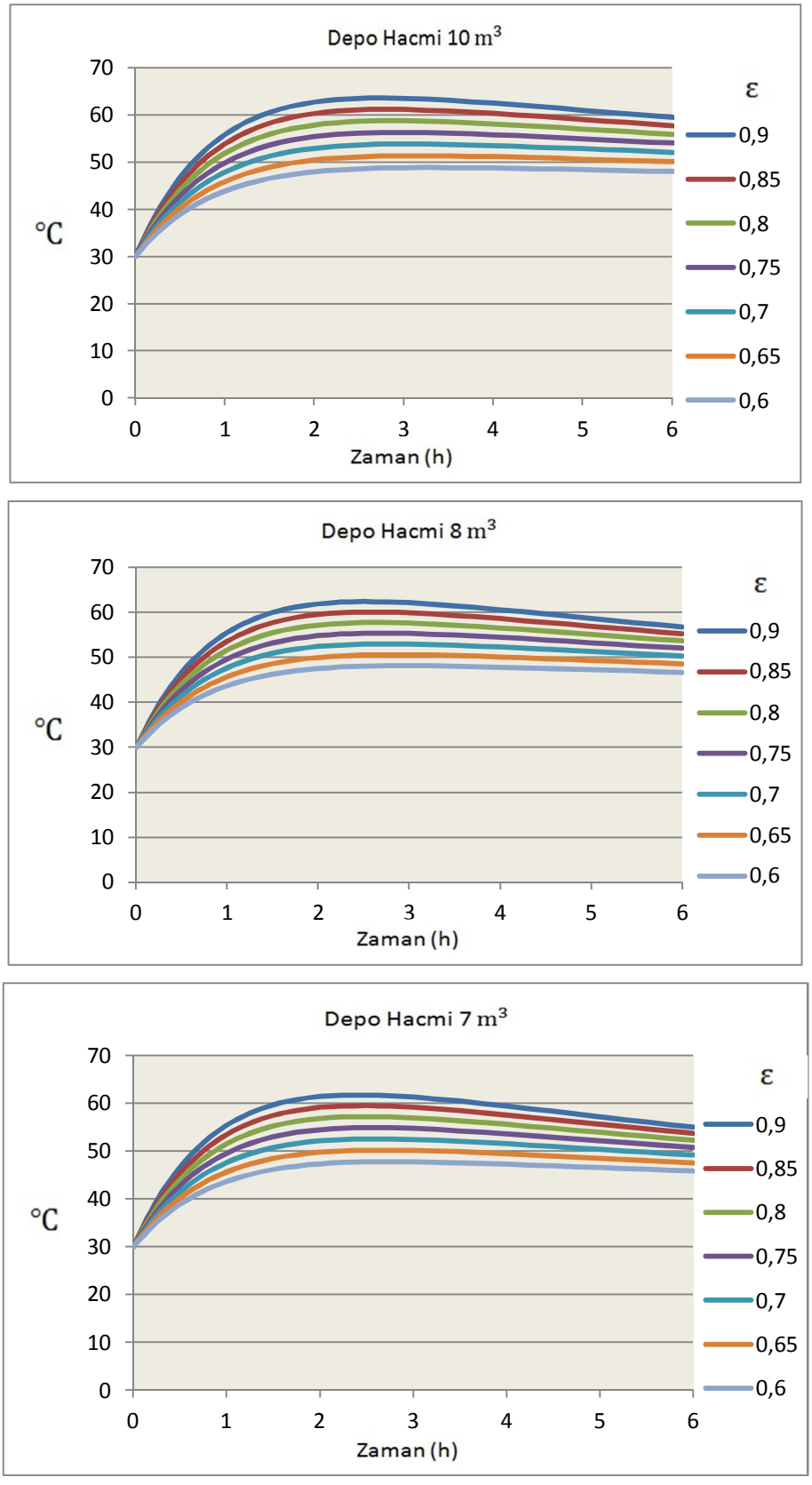




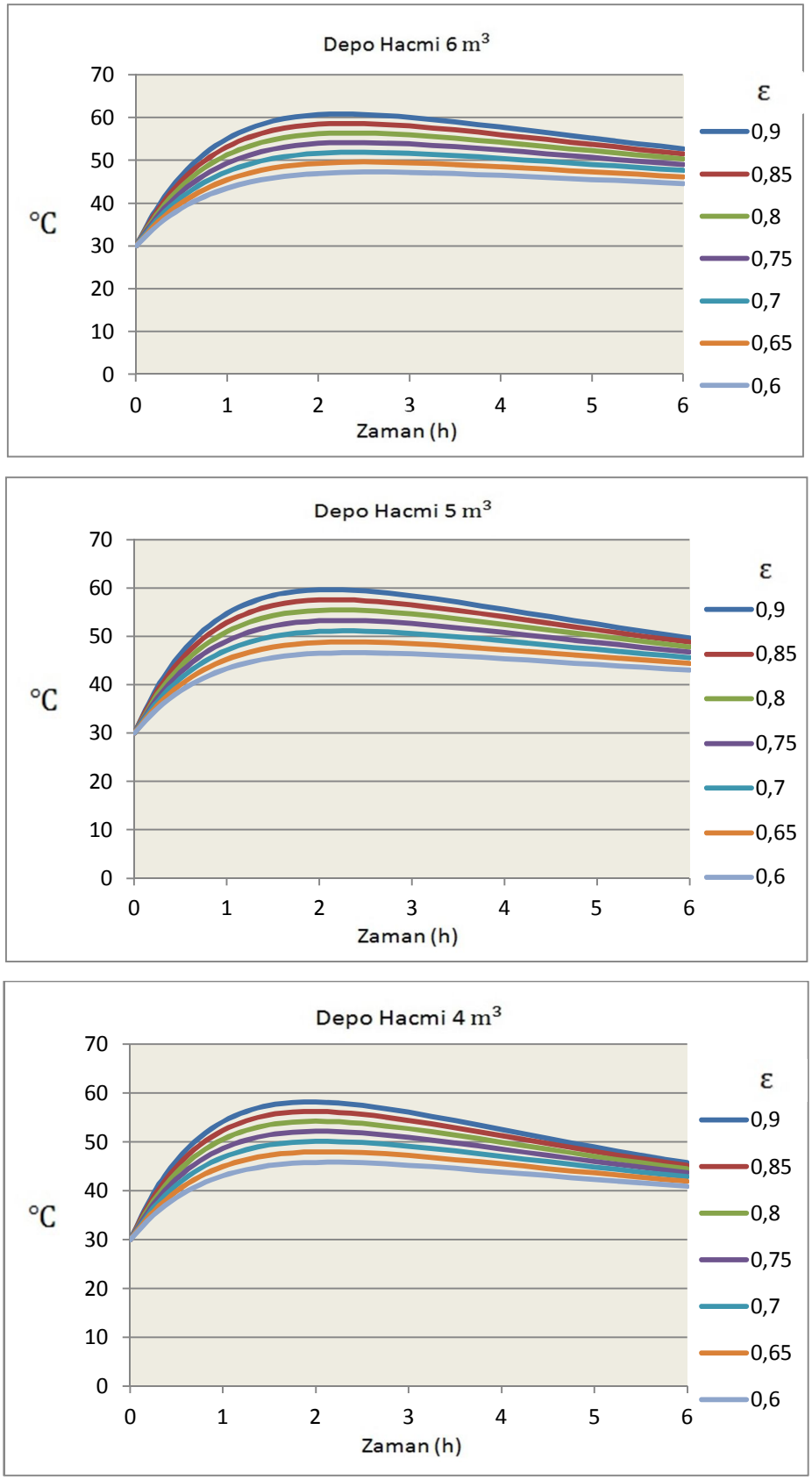
Şekil 5.16 0,4m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)



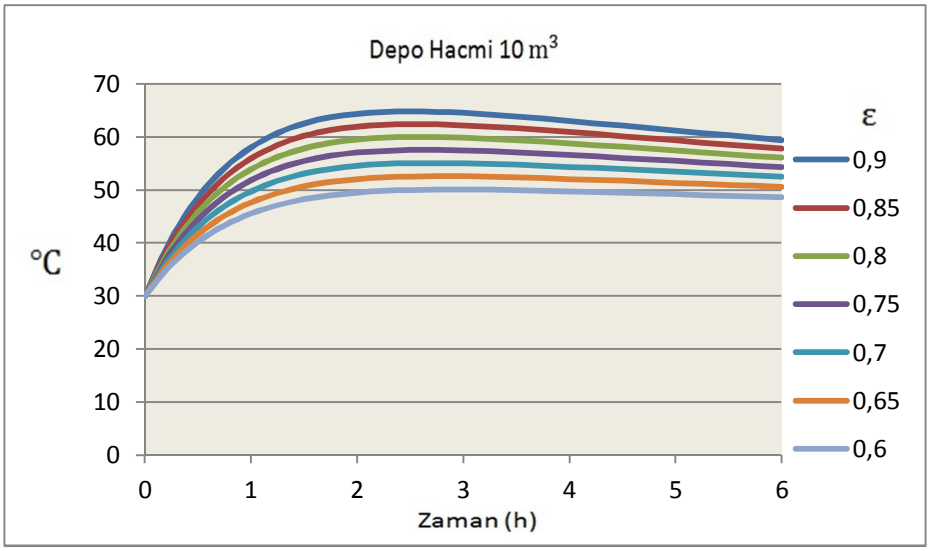
Şekil 5.17 0,4 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)

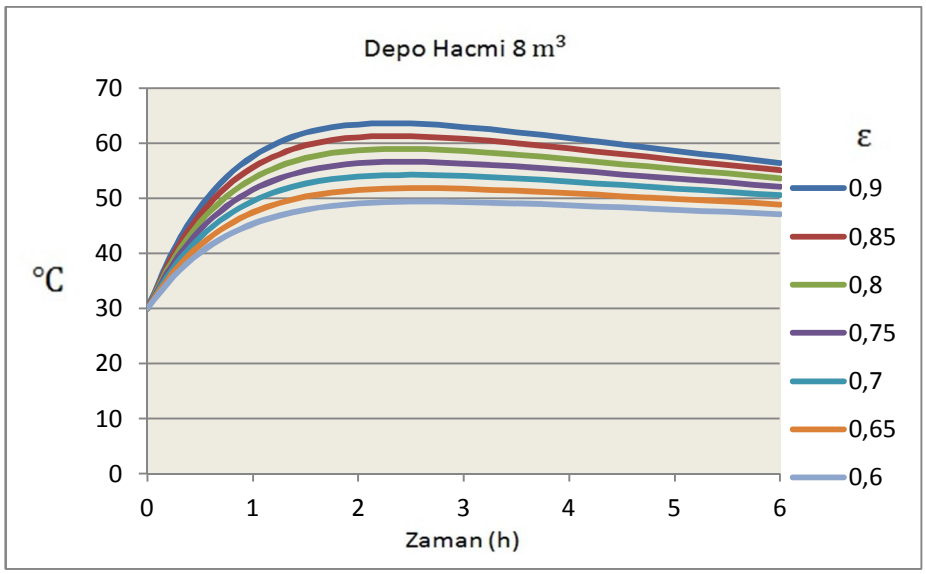


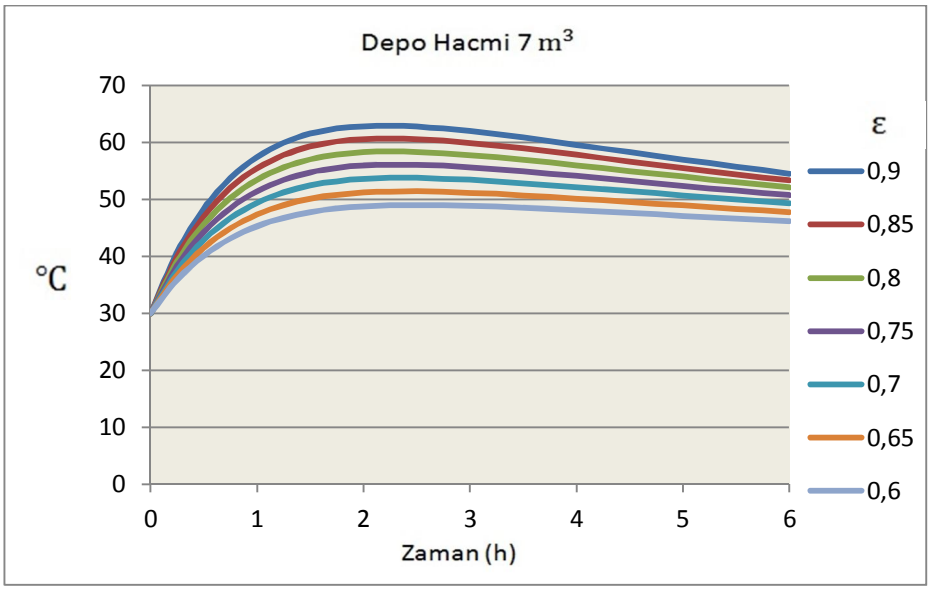
Şekil 5.18 0,45 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)



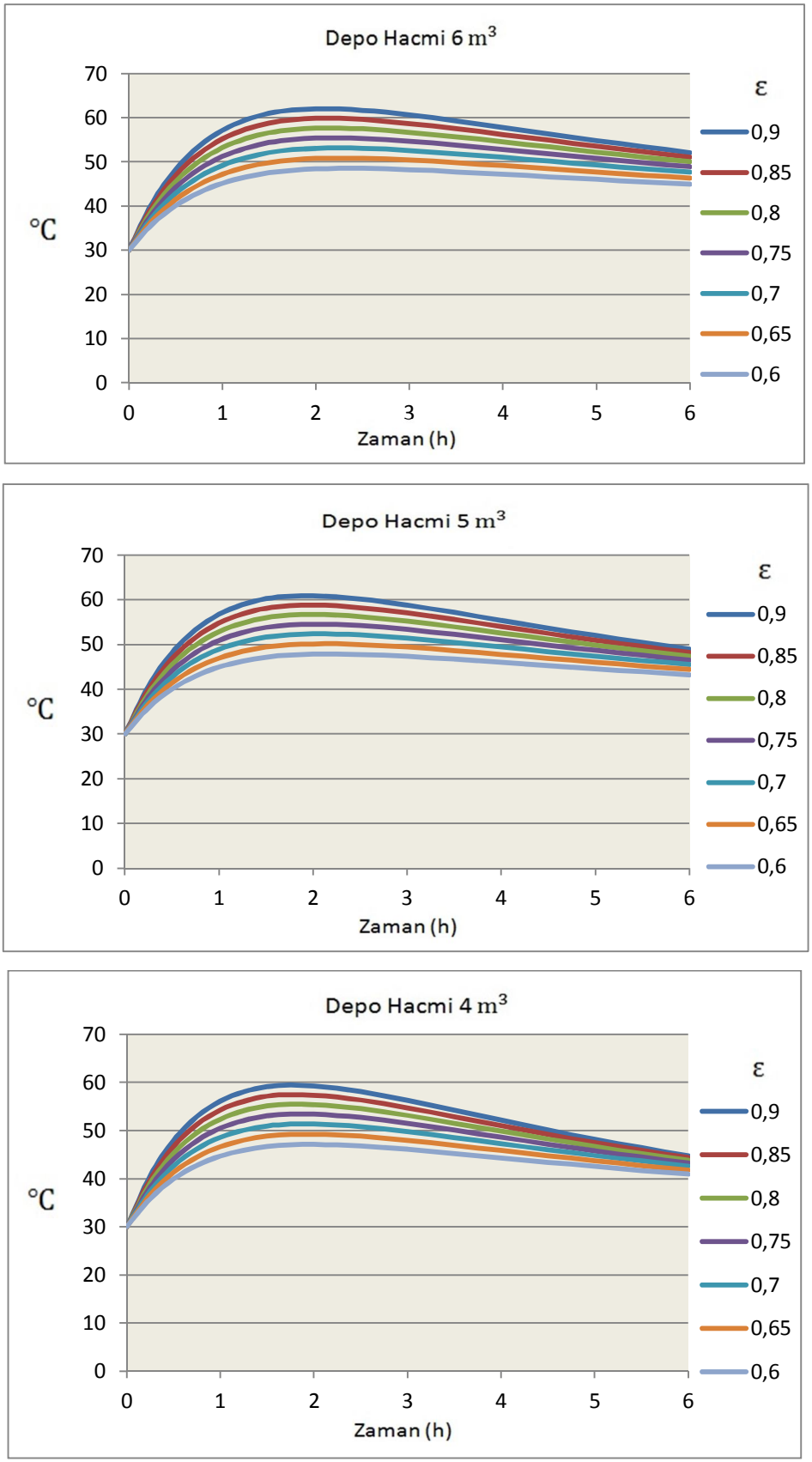
Şekil 5.19 0,45 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)







Şekil 5.20 0,5 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 10, 8, 7 m^3)



Şekil 5.21 0,5 m/s Hava Hızı İçin Fırın Sıcaklık Eğrileri (Depo 6, 5, 4 m^3)

Şekil 5.10 ve 5.21 arasında her bir durum için fırın içerisinde kurutma olurken aynı anda fırında meydana gelen sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Çini malzemesinin kurutulması için fırın sıcaklığının rejim halinde 50°C ve üzerinde olması gerekliliği bilinmektedir. Bu sebeple kullanılan güneş enerjisi sistemi fırın sıcaklığını belirli bir süre içerisinde kurutma sıcaklığına çıkartıp çalışma süresi boyunca 50°C üzerinde tutmalıdır. Bu şartları sağlayan durumlar sıcaklık eğrilerinin incelenmesi ile ortaya çıkarılabilmektedir. Depo başlangıç sıcaklığının 90°C olduğu durum için uygun olan sistemler tablo 5.8'den tablo 5.12'e kadar verilmiştir.

Tablo 5.8 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,25 m/s)

Kurutma Havasının Hızı 0,25 m/s		
Depo m^3	**ε**	**Soğumuş Depo Sıcaklığı °C**
10	0,9	80,6
10	0,85	81,17
10	0,8	81,6
8	0,9	79,6
8	0,85	79,1
7	0,9	77,1
7	0,85	77,7
6	0,9	75,3
5	0,9	72,3

Tablo 5.9 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,30 m/s)

Kurutma Havasının Hızı 0,30 m/s					
Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı °C	Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı °C
10	0,9	79	7	0,9	74,8
10	0,85	79,5	7	0,85	75,6
10	0,8	80,1	7	0,8	76,4
10	0,75	80,6	6	0,9	72,8
8	0,9	76,5	6	0,85	73,6
8	0,85	77,25	6	0,8	74,4
8	0,8	77,9	5	0,9	70
8	0,75	78,6	5	0,85	70,9

Tablo 5.10 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,35 m/s)

Kurutma Havasının Hızı 0,35 m/s					
Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı °C	Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı °C
10	0,9	77,4	7	0,85	73,6
10	0,85	78	7	0,8	74,4
10	0,8	78,6	7	0,75	75,3
10	0,75	79,2	6	0,9	70,4
10	0,7	79,9	6	0,85	71,4
8	0,9	74,6	6	0,8	72,3
8	0,85	75,4	6	0,75	73,2
8	0,8	76,1	5	0,9	67,4
8	0,75	76,9	5	0,85	68,4
8	0,7	77,7	5	0,8	69,4
7	0,9	72,8	--	--	--

Tablo 5.11 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,40 - 0,45 m/s)

Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı ℃	Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı ℃
Kurutma Havasının Hızı 0,40 m/s					
10	0,9	75,8	7	0,85	71,7
10	0,85	76,5	7	0,8	72,6
10	0,8	77,2	7	0,75	73,5
10	0,75	77,9	7	0,7	74,4
10	0,7	78,6	6	0,9	68,2
10	0,65	79,3	6	0,85	69,2
8	0,9	72,8	6	0,8	70,2
8	0,85	73,6	6	0,75	71,2
8	0,8	74,4	6	0,7	72,3
8	0,75	75,3	5	0,9	64,5
8	0,7	76,1	5	0,85	66
7	0,9	70,8	5	0,8	67,2
Kurutma Havasının Hızı 0,45 m/s					
10	0,9	74,3	7	0,85	69,8
10	0,85	75	7	0,8	70,8
10	0,8	75,8	7	0,75	71,8
10	0,75	76,5	7	0,7	72,8
10	0,7	77,4	7	0,65	73,8
10	0,65	78,2	6	0,9	66,2
8	0,9	71	6	0,85	67,2
8	0,85	71,9	6	0,8	68,2
8	0,8	72,8	6	0,75	69,3
8	0,75	73,8	6	0,7	70,5
8	0,7	74,6	5	0,9	62,7
8	0,65	75,6	5	0,85	63,8
7	0,9	68,9	5	0,8	65

Tablo 5.12 Kurutma Fırını İçin Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,50 m/s)

Kurutma Havasının Hızı 0.50 m/s					
Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı ℃	Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı ℃
10	0,9	72,8	7	0,9	67
10	0,85	73,6	7	0,85	68
10	0,8	74,4	7	0,8	69,1
10	0,75	75,3	7	0,75	70,2
10	0,7	76,1	7	0,7	71,2
10	0,65	77	7	0,65	72,4
10	0,6	77,9	6	0,9	64,2
8	0,9	69,3	6	0,85	65,2
8	0,85	70,3	6	0,8	66,4
8	0,8	71,2	6	0,75	67,5
8	0,75	72,2	6	0,7	68,7
8	0,7	73,2	5	0,9	60,5
8	0,65	74,2	5	0,85	61,7
8	0,6	75,3	5	0,8	62,9

Fırın sıcaklıklarında zamanla meydana gelen düşüşlerin sebebi güneş enerjisi deposunun soğumasıyla birlikte fırına verilen enerjinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklık düşüşlerinin şiddeti depo kapasitesinin azalmasıyla birlikte daha fazla olmaktadır. Kurutma havası hızının artmasıyla birlikte sabit ısı değiştiricisi etkenlik katsayısı durumu için kurutma havasına verilen enerji miktarı artmaktadır ve fırın sıcaklık artış miktarı ilk saatlerde oldukça yüksek olmaktadır. Ancak bu durum deponun daha hızlı soğumasına ve ilerleyen saatlerde fırın sıcaklılarında daha hızlı düşüşlerin yaşanmasına sebep olmaktadır. Fırında sabit rejim sıcaklığının elde edilmesi için depo kapasitelerinin oldukça büyük olması gerekmektedir. Bu durum ise hem mali açıdan hem de uygulama kolaylığı açısından problem teşkil etmektedir. Depo başlangıç sıcaklığının 80℃ olması durumunda ise uygun parametrelerin sayısı oldukça

azalmaktadır ve yüksek sıcaklıklara çıkılamamaktadır. Burada altta yatan sebep depodan kurutma fırınına verilen enerji miktarının 90℃'de ki depoya göre başlangıçtan itibaren az olması ve zamanla deponun soğumasıyla daha da azalmasıdır. Bu sebepten dolayı çok farklı parametrelerle çalışılabilmek için depo başlangıç sıcaklığının en az 80℃ olması gerektiği söylenebilir. Depo başlangıç sıcaklığının 80℃ olduğu durumlarda 6 saatlik kurutma yapmaya uygun olan sistemler tablo 5.13 ve tablo 5.14'de verilmiştir.

Tablo 5.13 Depo Başlangıç Sıcaklığının 80℃ Olması Durumunda Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,30-0,35-,40 m/s)

Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı ℃
Kurutma Havasının Hızı 0,30 m/s		
10	0,9	70,8
Kurutma Havasının Hızı 0,35 m/s		
10	0,9	69,5
10	0,85	70
8	0,9	67,2
Kurutma Havasının Hızı 0,40 m/s		
10	0,9	68,2
10	0,85	68,8
10	0,8	69,3
8	0,9	65,6
8	0,85	66,3
7	0,9	64
7	0,85	64,8

Tablo 5.14 Depo Başlangıç Sıcaklığının 80℃ Olması Durumunda Uygun Sistemler (Hava Hızı 0,45-0,50 m/s)

Depo m^3	ε	Soğumuş Depo Sıcaklığı ℃
Kurutma Havasının Hızı 0.45 m/s		
10	0,9	66,9
10	0,85	67,5
10	0,8	68,1
10	0,75	68,8
8	0,9	64,2
8	0,85	65
8	0,8	65,6
7	0,9	62,4
7	0,85	63,2
Kurutma Havasının Hızı 0,50 m/s		
10	0,9	65,7
10	0,85	66,3
10	0,8	67
10	0,75	67,7
8	0,9	62,8
8	0,85	63,5
8	0,8	64,3
7	0,9	60,9
7	0,85	61,7

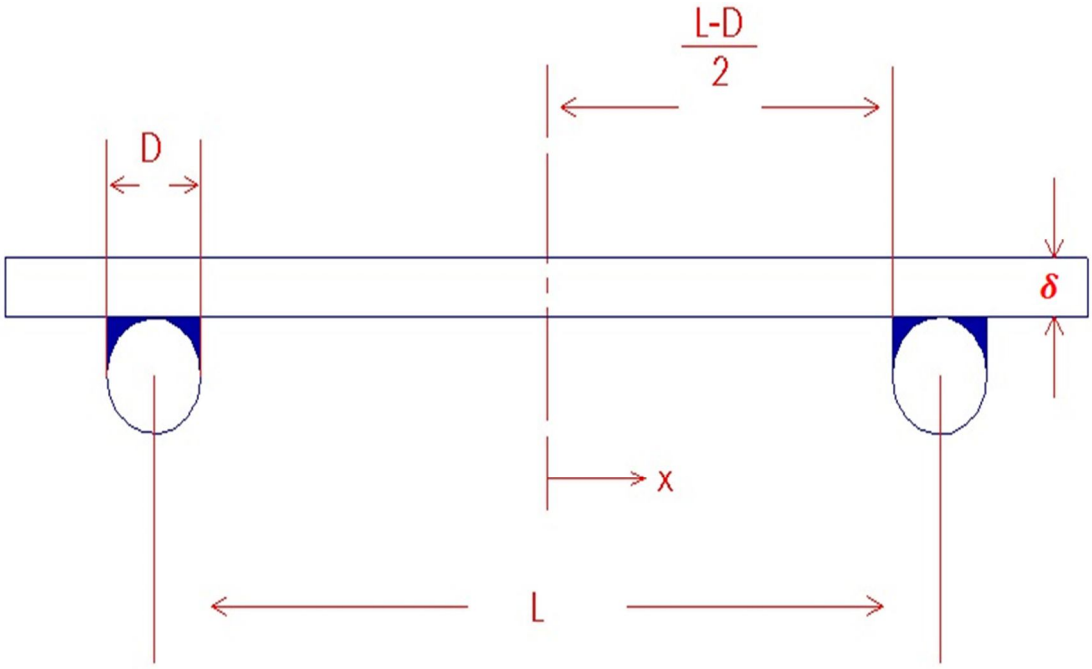
5.3.3. Kolektör Hesapları

Tasarımı yapılan güneş enerjili kurutma fırını sistemi gece saatlerinde çalışmaktadır. Çalışma süresi sona erdiği zaman güneş enerjisi deposu soğumuş durumda olacağı için deponun gündüz saatlerinde kolektörler tarafından tekrar eski sıcaklığına çıkarılması gerekmektedir. Tablo 5.8 ve 5.14 arasında belirlenen her bir sistemin fırına verdiği toplam enerji değerleri farklı olduğu için depoların soğumuş

haldeki sıcaklık değerleri de farklı olacaktır. Bu durumda her bir sistemde kullanılması gereken kolektör sayılarının ayrı ayrı belirlenmesi gerekir. Sistemde kullanılan kolektörlerin özellikleri tablo 5.15'de yer almaktadır.

5.3.3.1. İlgili Denklemler

Kolektör camından belirli oranda geçen güneş ışınları soğurucu plakada da belirli oranda soğurulur ve ısı enerjisi kolektör taşıyıcı borularına doğru iletilir. Bu durum taşıyıcı borular arasındaki soğurucu plaka üzerinde belirli bir sıcaklık profilinin oluşumuyla gerçekleşir. Şekil 5.22'de düzlemsel bir güneş kolektörünün soğurucu yüzey ve taşıyıcı boru yerleşimi görülmektedir.



Şekil 5.22 Kolektör Soğurucu Yüzeyi ve Taşıyıcı Boru Yerleşimleri

Tablo 5.15 Kolektör Özellikleri

Soğurucu Yüzey Alanı	2,35 m^2
Soğurucu Yüzey	Bakır
Soğurucu Yüzey Geçirgenlik Katsayısı (α)	0,95
Soğurucu Yüzey Emisyon Katsayısı	0,1
Işık Geçirgenlik Katsayısı (τ) (Tek Camlı)	0,90
Soğurucu Yüzey Kalınlığı (δ)	0,0002 m
Taşıyıcı Boru Sayısı	12
Taşıyıcı Boru Çapı	0,01m
Uzunluk-Genişlik	2,18 m – 1,18 m

Şekil 5.22'de akış yönünde birim uzunluğa ve x ekseni doğrultusunda diferansiyel miktarda genişliğe sahip soğurucu yüzey elemanına enerjinin korunumunun uygulanmasıyla taşıyıcı borular arasında kalan soğurucu plakaya ait sıcaklık profili elde edilir. Birim alan başına soğurulan ışınım miktarı S, ısı kayıp katsayısı U_L ve soğurucu plakanın ısı iletim katsayısı k olmak üzere denklem (5.33) ile soğurucu yüzey üzerinde enerjinin korunumu ifadesi çıkarılabilir [25].

$$S\,dx - U_L\,dx\,(T-T_{çevre}) + \left(-k\,\delta\frac{dT}{dx}\right)_x - \left(-k\delta\frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} = 0 \tag{5.33}$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta}\left(T - T_{çevre} - \frac{S}{U_L}\right) \tag{5.34}$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \tag{5.35}$$

$$\Psi = \left(T - T_{çevre} - \frac{S}{U_L}\right) \tag{5.36}$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} - m^2\Psi = 0 \tag{5.37}$$

Soğurucu plaka üzerindeki sıcaklık profili iki taşıyıcı boru arasında x=0 noktasına göre simetriktir ve soğurucu plakanın taşıyıcı boruya temas ettiği noktadaki sıcaklığı T_b alınarak sınır şartları:

$$\frac{d\Psi}{dx}_{x=0} = 0 \tag{5.38}$$

$$\Psi_{x=\frac{L-D}{2}} = T_b - T_{çevre} - \frac{S}{U_L} \tag{5.39}$$

Denklem 5.37 için genel çözüm:

$$\Psi = C_1 \sinh(mx) + C_2 \cosh(mx) \tag{5.40}$$

Denklem sabitleri sınır şartlarının kullanılmasıyla bulunabilmektedir. Soğurucu plaka üzerindeki sıcaklık denklemi:

$$T = \frac{\cosh(mx)}{\cosh(m\frac{L-D}{2})}\left(T_b - T_{çevre} - \frac{S}{U_L}\right) + T_{çevre} + \frac{S}{U_L} \tag{5.41}$$

Bir taşıyıcı boruya iki taraftan iletilen toplam ısı miktarı ise şu şekilde bulunabilir:

$$q = -2\,k\,\delta\,\frac{dT}{dx}_{x=\frac{L-D}{2}} \tag{5.42}$$

$$q = (L-D)\left[S - U_L(T_b - T_{çevre})\right]\frac{\tanh(m\frac{L-D}{2})}{m\,(L-D)/2} \tag{5.43}$$

$$F = \frac{\tanh(m\frac{L-D}{2})}{m(L-D)/2} \tag{5.44}$$

$$q = (L-D)\,F\left[S - U_L(T_b - T_{çevre})\right] \tag{5.45}$$

Denklem (5.44) ve (5.45)'de ki F ifadesi soğurucu yüzey için kanat etkenliğidir [25]. Soğurucu plakanın her noktadaki sıcaklığının taşıyıcı boru sıcaklığına eşit olması durumunda kayıplar minimum değerde olacağı için taşıyıcı boruya verilen ısı enerjisi maksimum değerde olacaktır. Gerçek durumda soğurucu plakanın sıcaklığı taşıyıcı borudan yüksek değerde olacağı için bahsedilen maksimum değerden bir sapma olacaktır. F değeri bunun bir ölçüsüdür ve 1'den küçük değerdedir. Taşıyıcı boruya verilen toplam ısı miktarı boru üzerinden soğurulan ışınım miktarının da eklenmesiyle denklem (5.46) ile bulunur [25].

$$q_{boru} = [(L - D)F + D]\left[S - U_L(T_b - T_{çevre})\right] \tag{5.46}$$

Denklem (5.46)'da ki ısı enerjisi aynı zamanda taşıyıcı borudan geçen suya aktarılacağı için q_{boru} değeri aynı zamanda denklem (5.47) ile gösterilir [25].

$$q_{boru} = h_i \ \pi \ D_i \ (T_b - T_{su}) \tag{5.47}$$

Denklem (5.47) denklem (5.46)'da kullanılırsa q_{boru} değeri taşıyıcı borudaki suyun sıcaklığına bağlı olarak elde edilir ve denklem (5.48) ile gösterilir [25].

$$q_{boru} = L \ F^* \ \left[S - U_L(T_{su} - T_{çevre})\right] \tag{5.48}$$

Denklem (5.48)'de ki F^* ifadesi kolektör verimlilik katsayısıdır. Bu ifade suya verilen gerçek ısı miktarının, soğurucu yüzey sıcaklığının su sıcaklığına eşit olması durumunda suya verilebilecek ısı miktarına oranı şeklinde düşünülebilir ve denklem (5.49) ile verilmiştir [25].

$$F^* = \frac{\frac{1}{U_L}}{L\left[\frac{1}{U_L[D+(L-D)F]} + \frac{1}{h_i \ \pi \ D_i}\right]} \tag{5.49}$$

Kolektör verimlilik katsayısı U_L, h_i ve F parametrelerinin fonksiyonu olduğu için ısınan akışkan yönünde artan kayıplarla birlikte değişken değerde olacaktır. Kolektör boyunca ilgili parametrelerin sabit olduğu kabulüyle sabit kolektör verimlilik katsayısı elde

edilir. Bu sayede de tüm kolektör yüzeyi için geçerli kolektör etkenlik katsayısı olan F_r değeri tanımlanabilir ve bu parametre denklem (5.50) ile ifade edilmiştir [25].

$$F_r = \frac{Q_{gerçek}}{Q_{maks}} = \frac{\dot{m}\, c_{su}\,(T_{su\ çıkış} - T_{su\ giriş})}{A_k\,[S - U_L\,(T_{su\ giriş} - T_{çevre})]} \tag{5.50}$$

Denklem (5.50)'de $\dot{m}$ ifadesi kolektörden geçen toplam akışkan debisidir. Akışkana akış yönünde enerjinin korunumunun uygulanmasıyla kolektör etkenlik katsayısı bilinen parametreler cinsinden denklem (5.51) ile verilmiştir [25]. Tablo 5.16'da kolektör parametreleri, tablo 5.17'de kolektör toplam ısı kayıp katsayıları ve tablo 5.18'de kolektör boru içi akışkan için ısı taşınım katsayıları verilmiştir.

$$F_r = \frac{\dot{m}\, c_{su}}{A_k\, U_L}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_k U_L\, F^*}{\dot{m}\, c_{su}}\right)\right] \tag{5.51}$$

Tablo 5.16 Kolektör Parametreleri

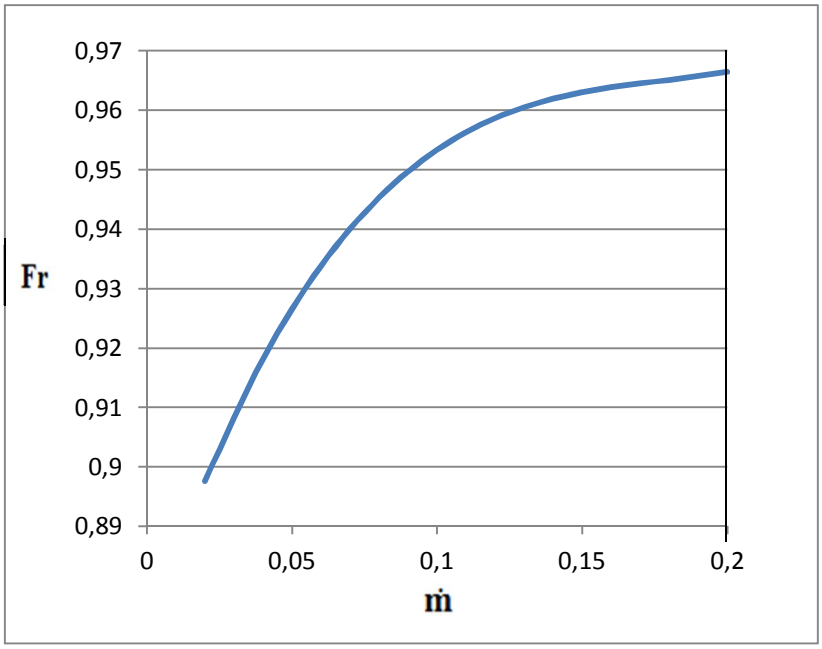
τα	δ	k	L	D
0,855	0,0002 m	400 W/m²K	0,093 m	0,01 m

Tablo 5.17 Kolektör Isı Kayıp Katsayıları (Dış Ortam ile Koruyucu Cam Arasında Rüzgardan Kaynaklanan Isı Kayıp Katsayısının 5 W/m²K Olduğu Durum İçin)

Soğurucu Yüzey Sıcaklığı °C	90	85	80	75	70	65	60
U_L W/m²°C	4	3,95	3,83	3,78	3,73	3,68	3,63

Tablo 5.18 Kolektör Boru İçi Akışkan Isı Taşınım Katsayıları (75°C Su İçin)

Kolektör Su Debisi kg/s	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
h_i W/m²°C	290	338	386	425	949	1186	1408	1625	1832	2033



Şekil 5.23 Kolektör Etkenlik Katsayısının Akışkan Debisine Göre Değişimi

Tanımlanan parametrelerin kullanımıyla bir kolektör için denklem (5.52) ile verim ifadesi oluşturulabilir [25].

$$\eta = \frac{\text{Akışkana verilen enerji}}{\text{Kolektör tarafından soğurulan enerji}} = \frac{F_r A_k \left[S - U_L(T_{\text{su giriş}} - T_{\text{çevre}})\right]}{S\, A_k} \qquad (5.52)$$

Kolektörden taşıyıcı akışkana net enerji transferinin gerçekleşebilmesi için denklem (5.52) ile verilen verim ifadesinin pozitif değerde olması gerekmektedir. Bu durum kolektör tarafından soğurulan enerjinin akışkan giriş şartlarına göre kolektörden olan ısı kayıplarından büyük olması ile sağlanabilir. Bu durumun sağlandığı ışınım değeri ilgili çalışma şartları için kritik radyasyon değeridir. Kritik radyasyon değerinin elde edilemediği durumlarda kolektörlerin çalıştırılması kazanç yerine ısı kaybına sebep olacaktır [25].

5.3.4. Güneş Işınımı Miktarının Belirlenmesi

Üzerinde çalışılan kurutma fırını güneş enerjisi destekli şekilde öncelikli olarak yaz aylarında çalıştırılacağı için ışınım hesapları yaz aylarının ortalaması alınarak

yapılmıştır. İznik için haziran, temmuz ve ağustos aylarının ortalama günlük güneş ışınım değeri EİE'den [26] alınan veriler sonucunda 20,82 MJ/m^2gün olarak belirlenmiştir. Bu ışınım miktarının saatlik olarak güne yayılımı ise temmuz ayı için ortalama gün sayılan 17. gün için yapılmıştır. Günlük toplam güneş ışınımını gün içinde saatlere doğru şekilde yaymak için toplam ışınım içerisindeki direkt ve yaygın ışınım miktarlarının belirlenmesi gerekmektedir.

5.3.4.1. Güneş Işınımı Denklemleri

Atmosfer dışındaki yatay yüzeye gelen günlük toplam ışınım miktarı yıl içerisinde ki herhangi bir gün için denklem (5.53) ile hesaplanmaktadır [25].

$$H_0 = \frac{24*3600*G_{gs}}{\pi}\left[1 + 0{,}033\cos(\frac{360n}{365})\right]\left[\cos(\phi)\cos(\delta)\sin(\omega_s) + \frac{\pi\omega_s}{180}\sin(\phi)\sin(\delta)\right] \quad (5.53)$$

Denklem (5.53) için G_{gs} ifadesi atmosfer dışı güneş sabiti olup 1367 W/m^2 değerindedir. Diğer parametrelerden ϕ enlem açısı, δ deklinasyon açısı, ω_s güneş batış açısı ve n yılbaşından itibaren olan gün sayısıdır.

$$\overline{K_T} = \overline{H}\Big/\overline{H_0} \quad (5.54)$$

Denklem (5.54) bulut endeksini ifade etmektedir [25]. Burada $\overline{H}$ yatay yüzey üzerine gelen aylık ortalama günlük ışınım miktarını, $\overline{H_0}$ ise yatay yüzey üzerine gelen atmosfer dışı aylık ortalama günlük ışınım miktarını belirtmektedir. Aylık ortalama günlük yaygın ışınım miktarı $\overline{H_D}$ bulut endeksinden yararlanılarak denklem (5.55) ve (5.56) ile bulunmaktadır [25].

$$\overline{H_D}\Big/\overline{H} = 1{,}391 - 3{,}560\overline{K_T} + 4.189\overline{K_T}^{\,2} - 2.137\overline{K_T}^{\,3} \quad \omega_s \leq 81{,}4° \text{ ve } 0{,}3 \leq \overline{K_T} \leq 0{,}8 \quad (5.55)$$

$$\overline{H_D}\Big/\overline{H} = 1{,}311 - 3{,}022\overline{K_T} + 3{,}427\overline{K_T}^{\,2} - 1{,}821\overline{K_T}^{\,3} \quad \omega_s > 81{,}4° \text{ ve } 0{,}3 \leq \overline{K_T} \leq 0{,}8 \quad (5.56)$$

Günlük ortalama yaygın ışınım miktarının bilinmesi durumunda saatlik yaygın ışınım miktarı I_D denklem (5.57) ile bulunmaktadır [25].

$$r_d = \frac{I_D}{\overline{H_D}} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(\omega)-\cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s)-\frac{\pi\omega_s}{180}\cos(\omega_s)} \quad (5.57)$$

Denklem (5.57)'de güneş saat açısı ışınım miktarı hesaplanacak iki saatin orta noktası için alınmaktadır. Saatlik yaygın ışınımın bulunmasına benzer olarak, saatlik toplam ışınımda günlük toplam ışınımın bilinmesi durumunda denklem (5.58) ile bulunabilmektedir [25].

$$r_t = \frac{I}{\overline{H}} = \frac{\pi}{24} [a + b\cos(\omega)] \frac{\cos(\omega)-\cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s)-\frac{\pi\omega_s}{180}\cos(\omega_s)} \quad (5.58)$$

$$a = 0{,}409 + 0{,}5016 \sin(\omega_s\text{-}60) \quad (5.59)$$

$$b = 0{,}6609 - 0{,}4767 \sin(\omega_s\text{-}60) \quad (5.60)$$

Bu durumda saatlik direkt ışınım I_B toplam ışınım ile yaygın ışınımın farkına eşit olmaktadır.

$$I_B = I - I_D \quad (5.61)$$

Denklem (5.58)'in kullanımında saat açısı olarak, hesaba alınan saat aralığının orta noktasının değeri kullanılmaktadır. Bu noktaya kadar verilen formüller yatay yüzeye gelen ışınım değerleri içindir. Bu değerlerden yola çıkılarak yatayla belirli bir açı yapmış yüzeyler için ışınım değerleri denklem (5.62) ile bulunabilir [25].

$$I_T = I_B R_B + I_D \left[\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right] + I\,\rho_g \left[\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right] \quad (5.62)$$

Denklem (5.62) yatayla belirli bir açıda duran yüzeye gelen toplam ışınımı vermektedir. Bu ifadede R_B eğik yüzey için dönüşüm katsayısıdır ve direkt ışınıma uygulanmaktadır. Aynı eşitlikte β kolektör eğim açısı olup, ρ_g yerin yansıtma katsayısıdır ve eğimli yüzey üzerindeki yansıyan ışınımı bulmada kullanılmaktadır. Toprak için bu değer 0.2 alınmaktadır. Eğimli yüzey üzerindeki yaygın ışınım, yatay yüzeye gelen yaygın ışınım

olan I_D'nin eğimli yüzeyin göğü görme değeri olan $\frac{1+\cos(\beta)}{2}$ değeri ile çarpılmasıyla bulunmaktadır [25]. Direkt ışınım için kullanılan R_B değeri kuzey yarım kürede güneye bakan yüzeyler için denklem (5.63) ile verilmektedir [25].

$$R_B = \frac{\cos(\phi-\beta)\cos(\delta)\cos(\omega)+\sin(\phi-\beta)\sin(\delta)}{\cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)+\sin(\phi)\sin(\delta)} \quad (5.63)$$

5.3.4.2. İznik İlçesi'ne Ait Işınım Değerleri

İznik coğrafi konum olarak 40° 26′K enlemi ve 29° 44′D boylamı üzerinde bulunmaktadır. Daha önce bahsedilen yaz aylarına ait günlük ortalama ışınım miktarı ve bu konumda yaz ayları için yatayla optimum açıda bulunan yüzey üzerine düşen ışınım miktarları güneş saatine göre belirlenmiştir. Üç aylık yaz dönemine ait optimum eğim açısı şu şekilde hesaba alınmıştır:

$$\text{Eğim Açısı} = \text{Enlem} - °25 \quad (5.64)$$

İznik için hesaplanan bazı değerler tablo 5.19'da sunulmuştur.

Tablo 5.19 İznik İlçesine Ait Parametreler

n (Gün)	198
δ	21,18°
ϕ	40,4°
β	15°
$\overline{H_0}$	40,65 MJ/m^2
$\overline{H}$	20,82 MJ/m^2
$\overline{H_D}$	8,69 MJ/m^2
$\overline{K_T}$	0,512
ω_{se}	100,6°
ω_s	109,25°
N (Gün Uzunluğu)	14,56 saat

Tablo 5.20 ve 5.21'de yatay ve eğimli yüzey üzerine gelen saatlik ışınım değerleri verilmiştir.

Tablo 5.20 İznik İçin Yatay Yüzey Üzerine Gelen Saatlik Işınım Değerleri

Yatay Yüzey İçin						
Güneş Saati	**Saat Açısı (Derece)**	**r_d**	**r_t**	**Yaygın Işınım (MJ/m^2)**	**Direkt Işınım (MJ/m^2)**	**Toplam Işınım (MJ/m^2)**
4.43-5.00	-107	0,00311	0,00219	0,00767	0,00521	0,01289
5.00-6.00	-97,5	0,01658	0,01244	0,14419	0,11474	0,25894
6.00-7.00	-82,5	0,03830	0,03173	0,33307	0,32746	0,66054
7.00-8.00	-67,5	0,05929	0,05359	0,51552	0,60014	1,11566
8.00-9.00	-52,5	0,07810	0,07588	0,67909	0,90076	1,57985
9.00-10.00	-37,5	0,09346	0,09598	0,81265	1,1855	1,99823
10.00-11.00	-22,5	0,10433	0,11121	0,90709	1,40833	2,31542
11.00-12.00	-7,5	0,10995	0,11943	0,95597	1,53059	2,48657
12.00-1.00	7,5	0,10995	0,11943	0,95597	1,53059	2,48657
1.00-2.00	22,5	0,10433	0,11121	0,90709	1,40833	2,31542
2.00-3.00	37,5	0,09346	0,09598	0,81265	1,18558	1,99823
3.00-4.00	52,5	0,07810	0,07588	0,67909	0,90076	1,57985
4.00-5.00	67,5	0,05929	0,05359	0,51552	0,60014	1,11566
5.00-6.00	82,5	0,03830	0,03173	0,33307	0,32746	0,66054
6.00-7.00	97,5	0,01658	0,01244	0,14419	0,11474	0,25894
7.00-7.17	107	0,00311	0,00219	0,00767	0,00521	0,01289

Tablo 5.21 İznik İçin Açılı Yüzey Üzerine Gelen Saatlik Işınım Değerleri

Açılı Yüzey İçin (15°)						
Güneş Saati	**Saat Açısı (Derece)**	**R_b**	**Yaygın Işınım (MJ/m^2)**	**Direkt Işınım (MJ/m^2)**	**Yansıyan Işınım (MJ/m^2)**	**Toplam Işınım (MJ/m^2)**
5.20-6.00	-95°	0,47357	0,11506	0,04583	0,00072	0,16162
6.00-7.00	-82,5°	0,81050	0,32740	0,26541	0,00225	0,59506
7.00-8.00	-67,5°	0,94345	0,50673	0,56620	0,00380	1,07674
8.00-9.00	-52,5°	1,00191	0,66752	0,90248	0,00538	1,57539
9.00-10.00	-37,5°	1,03220	0,79880	1,22375	0,00680	2,02937
10.00-11.00	-22,5°	1,04823	0,89163	1,47626	0,00788	2,37579
11.00-12.00	-7,5°	1,05529	0,93969	1,61521	0,00847	2,56338
12.00-1.00	7,5°	1,05529	0,93969	1,61521	0,00847	2,56338
1.00-2.00	22,5°	1,04823	0,89163	1,47626	0,00788	2,37579
2.00-3.00	37,5°	1,0322	0,79880	1,22375	0,00680	2,02937
3.00-4.00	52,5°	1,00192	0,66752	0,90248	0,00538	1,57539
4.00-5.00	67,5°	0,94345	0,50673	0,56620	0,00380	1,07674
5.00-6.00	82,5°	0,81050	0,32740	0,26541	0,00225	0,59506
6.00-6.40	95°	0,47357	0,11506	0,04583	0,00072	0,16162

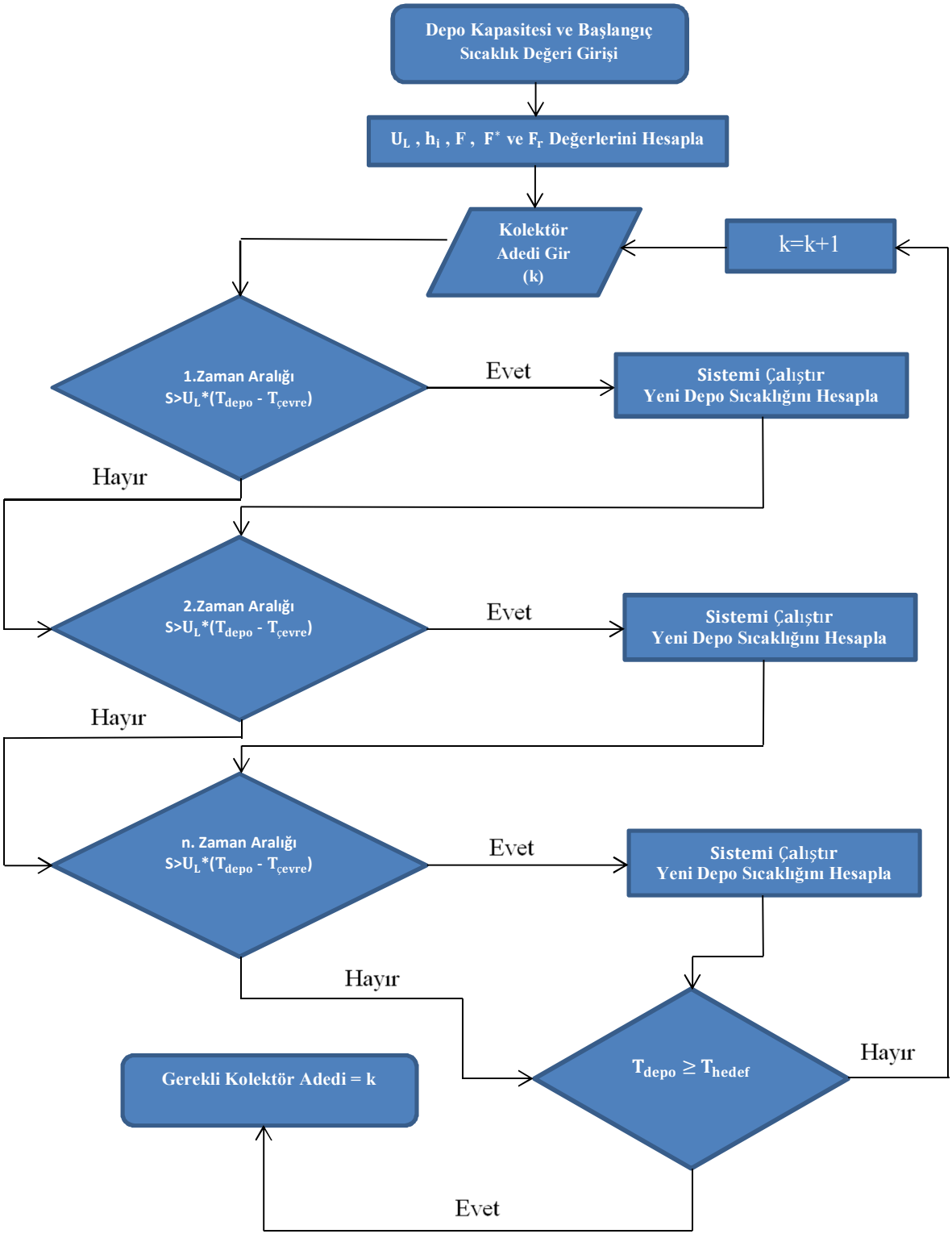
5.3.5. Sistemde Kullanılan Kolektör Adetlerinin Belirlenmesi

Çalışmanın bu kısmında tablo 5.8 - 5.14 arasında verilen sistemlerde soğumuş depo sıcaklıklarının eski değerlerine çıkarılabilmesi için özellikleri tablo 5.15'de verilen kolektörlerin gerekli adetlerini hesaplayan program oluşturulmuştur. Hesaplama için C programlama dili kullanılmıştır. Kolektör adetlerinin C programlama dilindeki hesaplanma yöntemi akış çizelgesi olarak düzenlenmiştir ve şekil 5.24'de verilmiştir.

Çözümleme sonuçlarından birer örnek depo sıcaklığını 90℃' ve 80℃'ye çıkaran iki farklı sistem için tablo 5.22'de verilmiştir.

Tablo 5.22 Depo Sıcaklığını 90℃'ye ve 80℃ Çıkaran Sistemler

Depo Hacmi 7 m^3					
Hedef Depo Sıcaklığı 90℃			**Hedef Depo Sıcaklığı 80℃**		
Kolektör Adedi 30			**Kolektör Adedi 24**		
Zaman	**Kolektör Verimi**	**Depo Sıcaklığı ℃**	**Zaman**	**Kolektör Verimi**	**Depo Sıcaklığı ℃**
5.20-6.00	-	72,8	5.20-6.00	-	64
6.00-7.00	-	72,6	6.00-7.00	-	63,9
7.00-8.00	0,16	73,14	7.00-8.00	0,29	64,53
8.00-9.00	0,37	74,47	8.00-9.00	0,46	65,85
9.00-10.00	0,46	76,46	9.00-10.00	0,53	67,85
10.00-11.00	0,49	79,4	10.00-11.00	0,55	70,32
11.00-12.00	0,50	82,43	11.00-12.00	0,56	73
12.00-1.00	0,48	85,36	12.00-1.00	0,54	75,6
13.00-14.00	0,45	87,83	13.00-14.00	0,51	77,9
14.00-15.00	0,37	89,55	14.00-15.00	0,45	79,6
15.00-16.00	0,24	90,33	15.00-16.00	0,34	80,53
16.00-17.00	-	90,22	16.00-17.00	0,1	80,63
17.00-18.00	-	90,11	17.00-18.00	-	80,5
18.00-18.40	-	90	18.00-18.40	-	80,4



Şekil 5.24 Kolektör Adedini Hesaplayan Program İçin Akış Diyagramı

Hesaplamalarda kolektör başına düşen su debisi 0.06 kg/s alınmıştır. Yapılan denemeler sonucunda kolektör debisinin 0.06 kg/s – 0.12 kg/s aralığında olması durumunda elde edilen kolektör adetlerinde bir değişim olmamıştır. Kolektör debisinin 0.2 kg/s değerine kadar arttırılması durumunda ise kolektör veriminin artmasıyla birlikte sadece 1 kolektör sistemden çıkarılabilmiştir. Tablo 5.22'deki sonuçlardan görüleceği üzere güneşin doğuş ve batış saatlerine yakın zamanlarda sistem çalıştırılmamaktadır. Bunun sebebi bu zamanlarda kritik ışınım seviyesinin elde edilememesidir. Ayrıca depo sıcaklığını 90°C'ye çıkaran sistemin verim değerlerinin depo sıcaklığını 80°C'ye çıkaran sisteminkinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun arkasında yatan sebep yüksek çalışma sıcaklığına sahip sistemde daha yüksek değerlerde ısıl kayıpların meydana gelmesidir. İlgili hesaplamalarda kolektörün ışınım geçirme-soğurma katsayılarının (τα) çarpım değerleri güneş ışınlarının geliş açısına göre değişken olarak alınmıştır ve direkt ışınım için geçerli olan değerler tablo 5.23'de verilmiştir. Tablo 5.22'de verilen örneklerle aynı olacak şekilde tablo 5.8-5.12 arasında verilen ve ilk depo sıcaklığı 90°C olan tüm sistemler için gerekli kolektör adetleri belirlenmiştir ve çalışmanın maliyet analizi kısmında ilgili tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.23 Direkt Işınım İçin Saat Açısına Göre τα Değerleri

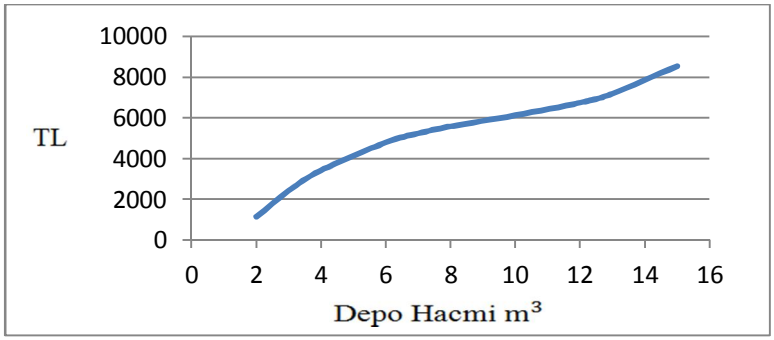
Saat Açısı	τα	Saat Açısı	τα
-95	0,117	7,5	0,862
-82,5	0,441	22,5	0,859
-67,5	0,731	37,5	0,849
-52,5	0,821	52,5	0,821
-37,5	0,849	67,5	0,731
-22,5	0,859	82,5	0,441
-7,5	0,862	95	0,117

5.4. Maliyet Analizi

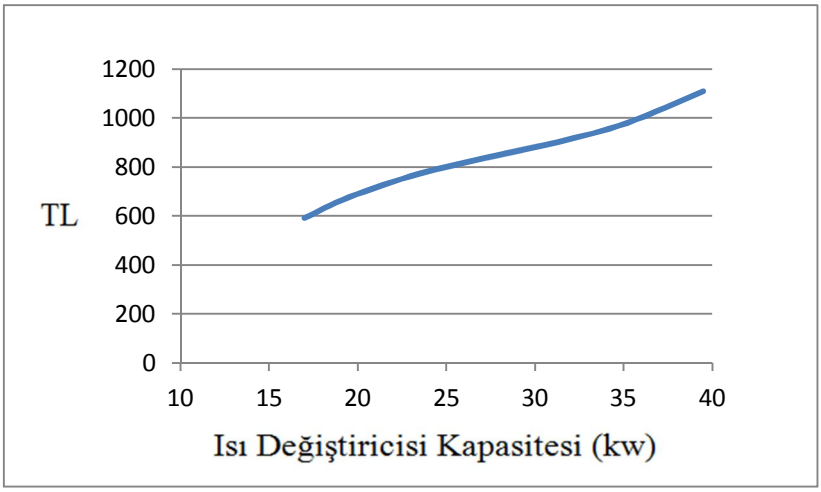
5.4.1. Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinin Maliyet Analizi

Tablo 5.8-5.12 arasında uygun sistemler adı altında verilen farklı kombinasyonların tümü yaz aylarında kurutma fırınına 6 saat boyunca kurutma enerjisini verip, sıcaklığı belirli bir seviyede rejim halinde tutabilmektedir. Bu zaman zarfında fırının kurutma yükünün %40'ı karşılanmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde kurutma için uygun olan bu sistemlerin mali açıdan getirileri hesaplanmıştır ve kurutma yükü yine %40 alınmıştır. Maliyet analizi yapılacak sistemler yaz aylarının dışında da kurutma yükünü belli bir müddet karşılayabilecektir ancak güneş ışınımı değerlerinin azalması ve çevre sıcaklığındaki düşüşler yaz aylarına göre daha kısa süreli ve değişken kurutma yükünün karşılanmasına sebep olacaktır. Bu yüzden maliyet analizi kurutma yükünün sabit şekilde karşılandığı yaz ayları için yapılacaktır ve sistemlerin bu aylar içerisindeki getirileri hesaplanacaktır. Maliyet analizi güneş enerjili kurutma fırınları ile aynı şartları sağlayan konvansiyonel elektrikli kurutma fırınlarının kıyaslanmasıyla yapılmıştır.

Bu çalışmada güneş enerjili kurutma sistemlerinin yatırım maliyetlerini sıcak su deposu, kolektörler, ısı değiştiricisi ve pompaların satın alınma maliyetleri oluşturmaktadır. Sıcak su deposunun ve ısı değiştiricisinin yatırım maliyeti kapasitelerinin fonksiyonu olurken, kolektör yatırım maliyeti birim adet üzerinedir. Bu çalışmada hesaba alınan kolektörlerin yatırım maliyetleri yapılan piyasa araştırması sonucunda 750 TL/adet olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde sıcak su deposunun ve ısı değiştiricisinin yatırım maliyetlerinin şekil 5.25 ve şekil 5.26'da ki değerlerden oluştuğu kabul edilmiştir.



Şekil 5.25 Paslanmaz Su Deposunun Yatırım Maliyetleri



Şekil 5.26 Isı Değiştiricisi Yatırım Maliyetleri

Isı değiştiricisinin yatırım maliyeti hesaplanırken şekil 5.26'dan yararlanmak adına her bir sistemin ısı değiştiricisi kapasitesi 90°C'de ki depodan çekilebilecek ısı miktarına göre belirlenmiştir ve denklem (5.65)'de belirtilmiştir.

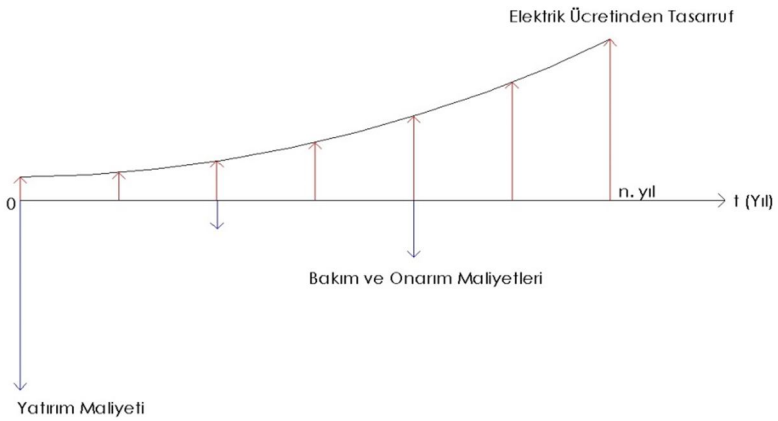
$$\dot{Q}= \varepsilon \left[\dot{m}_{hava}\, c_{p_{hava}}\, (T_{depo} - T_{çevre})\right] \tag{5.65}$$

Sıcak su deposundan kurutma fırınına verilen enerji sistemin çalışma süresince ısı değiştiricisinden kurutma havasına verilen enerjiye eşit olmaktadır. Depo sıcaklığı kullanılan enerji ve ısı kayıplarıyla birlikte sürekli olarak azaldığı için kurutma fırınına verilen enerji de giderek azalacaktır. Depo sıcaklığının zamanın bir fonksiyonu olduğu düşünülürse kurutma fırınına çalışma süresince verilen enerji denklem (5.66) ile ifade edilebilir. Bununla birlikte bu çalışmada bahsedilen denklem çözdürülmemiştir. Onun yerine kurutma fırınının sıcaklığının hesaplandığı programdan direkt olarak toplam enerji miktarı alınmıştır. Güneş enerjili kurutma fırınının elektrikli konvansiyonel kurutma fırınına karşı sağladığı enerji tasarrufu programdan alınan bu değerden sistemin pompalama için harcadığı enerji değerlerinin çıkarılmasıyla bulunabilir.

$$\Sigma Q_{fırın} = \varepsilon\, \dot{m}_{hava}\, c_{p_{hava}} \left[\int_0^t (T_{depo}(t) - T_{çevre})\, dt\right] \tag{5.66}$$

Sistemde depo ile kolektörler arasında ve depo ile ısı değiştiricisi arasında çalışan en az 2 adet pompanın bulunması gerekmektedir. Ancak çalışmanın bu aşamasında sistemde oluşacak basınç kayıpları bilinmemektedir. Maliyet analizine sistemde kullanılabilirliği açısından 2 kW ve 0.5 kW güçlerinde iki adet santrifüj pompanın yatırım maliyeti eklenmiştir. Pompa yatırım maliyetleri sırasıyla 450 TL ve 200 TL alınmıştır.

Bu çalışmada maliyet analizi için şimdiki değer metodu kullanılmıştır. Bu metotla gelecek zaman içerisinde olan bütün nakit akışları şimdiki değerlerine getirilmektedir. Gelecek zaman içerisinde elde edilecek bütün gelirlerin ve giderlerin var olan faiz oranıyla şimdiki zamana taşınmasıyla ilgili yatırımın şimdiki kar veya zarar durumu hesaplanabilir. Bu çalışmada güneş enerjili kurutma fırını için gelecek zaman içerisinde elektrik masrafından elde edilen karlar, bakım masrafları ve şimdiki sistem yatırım maliyetleri değerlendirilmeye alınmıştır. Şekil 5.27'de güneş enerjili kurutma sistemi için örnek olabilecek nakit akış şeması bulunmaktadır. Elektrik ücretinin yıllara göre belirli bir yüzde ile artış göstereceği varsayımıyla elektrik ücretinden elde edilen tasarrufların yıllara göre artışı mümkün olabilir. Güneş enerjisi sistemleri için bakım ve onarım maliyetleri oldukça düşük olsa da, bu maliyetler içinde yıllara göre oluşabilecek bir artış öngörüsünde bulunulabilir. Tablo 5.25'den tablo 5.29'a kadar güneş enerjili kurutma sisteminin maliyet analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.27 Yıllara Göre Nakit Akışının Şematik Gösterimi

$$\text{Şimdiki Kar / Zarar} = [\Sigma\ \text{Gelirler(t)}\ (1+\text{i})^{-\text{t}}] - [\Sigma\ \text{Giderler(t)}\ (1+\text{i})^{-\text{t}}] - \text{YM} \quad (5.67)$$

Tablo 5.24 Güneş Enerjili Kurutma Fırını İçin Maliyet Analizi Parametreleri

Faiz Oranı	Enflasyon Oranı	Şimdiki Zaman Elektrik Ücreti	Bakım Masrafları (Her 10 Yılda)
% 7	% 6	0,25TL/ kWh	Pompa ve Isı Değiştiricisi Değişimi

Tablo 5.25 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,25-0,30 m/s)

	Depo m^3	ε	Kolektör Sayısı	Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Sistem Maliyeti **TL**	Sistemin 15 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 20 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 25 Yıllık Karı **TL**
Kurutma Havası Hızı 0.25 m/s	10	0,9	26	93,045	26951	1437	8676	16634
	10	0,85	25	87,507	26167	490	7261	14745
	10	0,8	24	81,918	25378	-464	5837	12843
	8	0,9	25	90,865	25658	2036	9080	16851
	8	0,85	24	85,549	24874	1160	7756	15072
	7	0,9	24	89,344	24564	2646	9554	17195
	7	0,85	23	84,182	23780	1819	8292	15492
	6	0,9	23	87,362	23366	3214	9944	17416
	5	0,9	22	84,674	22023	3702	10191	17432
Kurutma Havası Hızı 0.30 m/s	Depo m^3	ε	Kolektör Sayısı	Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Sistem Maliyeti **TL**	Sistemin 15 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 20 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 25 Yıllık Karı **TL**
	10	0,9	30	112,555	30045	4462	13372	22998
	10	0,85	29	106,124	29268	3219	11575	20651
	10	0,8	27	99,621	27737	2710	10509	19029
	10	0,75	26	93,045	26951	1437	8676	16634
	8	0,9	28	109,493	28003	5530	14166	23530
	8	0,85	27	103,370	27225	4385	12495	21335
	8	0,8	26	97,161	26444	3220	10799	19108
	8	0,75	25	90,865	25658	2036	9080	16851
	7	0,9	27	107,367	26908	5949	14393	23576
	7	0,85	26	101,455	26131	4871	12808	21485
	7	0,8	25	95,448	25350	3770	11195	19358
	6	0,9	26	104,609	25710	6269	14467	23413
	6	0,85	25	98,967	24933	5277	12992	21456
	6	0,8	24	93,219	24152	4258	11484	19456
	5	0,9	24	100,889	23618	7179	15043	23671
	5	0,85	23	95,604	22840	6300	13713	21890

Tablo 5.26 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,35 m/s)

Kurutma Havası Hızı 0.35 m/s	Depo **m^3**	ε	Kolektör Sayısı	Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Sistem Maliyeti **TL**	Sistemin 15 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 20 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 25 Yıllık Karı **TL**
	10	0,9	33	131,420	32363	8084	18629	29868
	10	0,85	32	124,159	31588	6571	16485	27104
	10	0,8	31	116,802	30812	5031	14308	24298
	10	0,75	29	109,349	29282	4218	12851	22203
	10	0,7	28	101,797	28497	2631	10616	19323
	8	0,9	31	127,354	30320	8833	19013	29905
	8	0,85	30	120,497	29546	7448	17034	27340
	8	0,8	29	113,527	28769	6032	15015	24725
	8	0,75	28	106,443	27990	4586	12958	22062
	8	0,7	26	99,241	26455	3861	11617	20104
	7	0,9	30	124,543	29226	9033	18962	29613
	7	0,85	29	117,962	28451	7736	17095	27184
	7	0,8	28	111,256	27675	6404	15183	24699
	7	0,75	26	104,423	26145	5788	13979	22910
	6	0,9	28	120,914	27278	9827	19430	29771
	6	0,85	27	114,681	26503	8641	17706	27514
	6	0,8	26	108,311	25727	7415	15931	25194
	6	0,75	25	101,801	24947	6152	14108	22815
	5	0,9	26	116,048	25185	10372	19539	29464
	5	0,85	26	110,273	25161	8582	17251	26682
	5	0,8	25	104,346	24384	7497	15657	24581

Tablo 5.27 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,40 m/s)

Kurutma Havası Hızı 0.40 m/s	Depo **m^3**	ε	Kolektör Sayısı	Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Sistem Maliyeti **TL**	Sistemin 15 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 20 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 25 Yıllık Karı **TL**
	10	0,9	36	149,660	34675	11518	23646	36446
	10	0,85	35	141,629	33897	9767	21199	33312
	10	0,8	34	133,477	33120	7976	18699	30115
	10	0,75	32	125,202	31593	6896	16901	27609
	10	0,7	31	116,802	30812	5032	14309	24298
	10	0,65	29	108,276	29278	3886	12427	21687
	8	0,9	34	144,478	32633	11912	23576	35933
	8	0,85	33	136,956	31855	10324	21337	33050
	8	0,8	32	129,292	31078	8687	19036	30093
	8	0,75	30	121,483	29550	7756	17427	27817
	8	0,7	29	113,527	28770	6033	15016	24725
	7	0,9	32	140,913	30788	12623	23967	36019
	7	0,85	31	133,735	30010	11143	21868	33305
	7	0,8	30	126,401	29233	9612	19701	30512
	7	0,75	29	118,909	28456	8032	17472	27642
	7	0,7	28	111,256	27675	6404	15184	24699
	6	0,9	31	136,329	29590	12363	23296	34956
	6	0,85	30	129,584	28812	11021	21373	32456
	6	0,8	29	122,669	28035	9623	19378	29869
	6	0,75	28	115,580	27257	8171	17313	27198
	6	0,7	26	108,311	25727	7416	15932	25195
	5	0,9	29	130,220	27498	12512	22898	34035
	5	0,85	28	124,039	26719	11350	21205	31813
	5	0,8	27	117,670	25942	10125	19432	29496

Tablo 5.28 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,45 m/s)

Kurutma Havası Hızı 0.45 m/s	Depo **m^3**	ε	Kolektör Sayısı	Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Sistem Maliyeti **TL**	Sistemin 15 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 20 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 25 Yıllık Karı **TL**
	10	0,9	39	167,296	37004	14729	28373	42681
	10	0,85	38	158,552	36211	12778	25674	39234
	10	0,8	36	149,660	34675	11518	23646	36446
	10	0,75	35	140,616	33894	9452	20796	32822
	10	0,7	33	131,420	32363	8084	18629	29869
	10	0,65	31	122,067	30832	6670	16402	26842
	8	0,9	37	160,897	34961	14736	27806	41567
	8	0,85	35	152,774	33419	13733	26111	39177
	8	0,8	34	144,478	32633	11912	23576	35933
	8	0,75	32	136,006	31101	10778	21708	33340
	8	0,7	31	127,354	30321	8833	19014	29906
	8	0,65	30	118,517	29539	6833	16248	26384
	7	0,9	35	156,515	33117	15186	27864	41250
	7	0,85	34	148,808	32324	13566	25588	38315
	7	0,8	32	140,913	30788	12623	23967	36019
	7	0,75	31	132,827	30007	10861	21507	32867
	7	0,7	30	124,543	29226	9034	18962	29614
	7	0,65	29	116,058	28445	7145	16340	26266
	6	0,9	33	150,904	31169	15349	27524	40430
	6	0,85	32	143,719	30376	13895	25461	37753
	6	0,8	31	136,329	29590	12363	23296	34956
	6	0,75	30	128,729	28809	10756	21034	32044
	6	0,7	28	120,914	27278	9827	19430	29772
	5	0,9	30	143,469	28326	15827	27336	39606
	5	0,85	30	136,956	28283	13836	24796	36510
	5	0,8	29	130,220	27498	12512	22898	34035

Tablo 5.29 Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri İçin Elde Edilen Maliyet Analizi Sonuçları (Hava Hızı 0,50 m/s)

Kurutma Havası Hızı 0.50 m/s	Depo **m^3**	ε	Kolektör Sayısı	Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Sistem Maliyeti **TL**	Sistemin 15 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 20 Yıllık Karı **TL**	Sistemin 25 Yıllık Karı **TL**
	10	0,9	42	185,687	39370	18107	33304	49185
	10	0,85	41	176,235	38549	15985	30393	45465
	10	0,8	39	166,602	36993	14527	28118	42366
	10	0,75	37	156,785	35449	12990	25738	39147
	10	0,7	36	146,782	34661	10630	22513	35066
	10	0,65	34	136,589	33127	8953	19950	31632
	10	0,6	32	126,201	31593	7214	17308	28102
	8	0,9	39	177,870	36577	18413	32909	48122
	8	0,85	38	169,166	35757	16529	30303	44771
	8	0,8	36	160,254	34201	15300	28322	42028
	8	0,75	35	151,129	33406	13233	25474	38400
	8	0,7	33	141,787	31868	11834	23268	35394
	8	0,65	32	132,221	31084	9606	20211	31520
	8	0,6	30	122,428	29550	8056	17812	28283
	7	0,9	37	172,543	34733	18563	32582	47338
	7	0,85	36	164,336	33912	16837	30178	44233
	7	0,8	35	155,905	33106	15012	27643	40977
	7	0,75	33	147,244	31562	13842	25735	38328
	7	0,7	32	138,347	30774	11834	22960	34792
	7	0,65	30	129,207	29240	10492	20827	31877
	6	0,9	35	165,752	32784	18351	31761	45937
	6	0,85	34	158,165	31964	16822	29610	43137
	6	0,8	33	150,336	31158	15188	27321	40178
	6	0,75	31	142,257	29614	14204	25649	37816
	6	0,7	30	133,920	28826	12374	23103	34557
	5	0,9	32	156,812	29942	18350	30958	44370
	5	0,85	31	150,015	29121	17072	29130	41960
	5	0,8	30	142,956	28316	15683	27154	39381

Tablo 5.25'den tablo 5.29'a kadar verilen verilen maliyet analizi sonuçları farklı güneş enerjili kurutma sistemlerinin kıyaslanması amacıyla kullanılmamalıdır. Sonuçlar farklı güneş enerjili kurutma sistemlerinin kendileriyle eş değer şartları sağlayan elektrikli konvansiyonel kurutma fırınlarına karşı sağlayabileceği kar veya zarar durumunu göstermektedir.

5.4.2. Güneş Enerjili Kurutma Sistemleriyle Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinin Kıyaslanması

Önceki kısımda 6 saat boyunca sadece güneş enerjisiyle kurutma yapma durumunda elektrikli konvansiyonel kurutma fırınlarına kıyas olabilecek maliyet analizi yapılmıştır. Bu süreç fırının kurutma yükünün yaklaşık olarak %40'lık kısmına karşılık gelmektedir. Bu sistemde geriye kalan 18 saat sürelik ve %60'a karşılık gelen kurutma yükü ısı pompasıyla karşılanmak zorundadır. Isı pompasıyla kurutma kapalı ortamda hava sirkülasyonuyla yapılmaktadır. Dolayısıyla bu sistemin termodinamik analiz açısından kullandığı enerji miktarı kurutma havası hızının fonksiyonu olmamaktadır.

Güneş enerjisiyle kurutma yükünün karşılanması sistem boyutlandırılmasının getirdiği kısıtlamalardan dolayı ısı pompasının karşılayabileceği kurutma yükü kadar fazla olamaz. Dolayısıyla bu çalışmada güneş enerjili kurutma sistemleriyle ısı pompalı kurutma sistemlerinin mali yönden kıyaslanması güneş enerjili kurutma sistemlerinin çalışabildiği sürelerle kısıtlı olmuştur. Mevcut fırın için bu süreler 4 ve 6 saat olarak alınmıştır ve bu sürelere karşılık gelen kurutma yükleri sırasıyla %30 ve %40 olmaktadır. Böylelikle bu analizle tam olarak yapılması istenen ilk 4 ve 6 saat boyunca güneş enerjisiyle kurutma yapmanın ısı pompasıyla kurutma yapmaya kıyasla bir avantaj sağlayıp sağlayamayacağının belirlenmesidir. Isı pompalı kurutma sistemiyle güneş enerjili kurutma sisteminin maliyet açısından kıyaslanması daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere sistemlerin yaz aylarında getirdiği getiriler üzerinden yapılmıştır ve maliyet analiz parametreleri için tablo 5.24'de verilen faiz ve enflasyon oranı ile şimdiki zaman elektrik ücreti kullanılmıştır. Isı pompalı sistem için bakım masrafları olarak 10 senede bir olmak üzere kompresör değişim maliyetleri alınmıştır. Bu analiz iki sisteminde kurutma fırınında aynı şartları sağlaması durumunda mantıklı olacaktır. Bu şartlar belirli bir zaman sonra sağlanan sıcaklık değeri ve karşılanan kurutma yükleridir. Isı pompalı sistemle güneş enerjili sistemin ekonomik yönden

kıyaslanmasında güneş enerjili sistem için sabit depo kapasitesi ve ısı değiştiricisi etkenlik katsayısı alınmıştır. Bu şekilde iki sistem arasındaki ekonomik farklılıkların daha açık şekilde ortaya konulabileceği düşünülmüştür. Ortalama 50℃ sıcaklığındaki fırında saat başı ürün kuruma enerjisi yükü tablo 5.30'da verilmiştir. Yoğuşan suyun ve havanın 20℃'de buharlaştırıcıdan ayrıldığı kabulüyle belirli zaman dilimi arasında ısı pompasının buharlaştırıcı yükü denklem (5.68) ile yazılabilir.

$$Q_{buh}=\left[\int_{t1}^{t2}(15\ -0.625t)dt\right](h_g\text{-}h_{su@20℃})+\dot{m}_{hava}\ c_p\ (T_{giriş}-20)\ (t_2-t_1)3600 \quad (5.68)$$

Isı pompasında kullanılan soğutucu akışkan R-407 C'dir. Sistemde kullanılacak kompresörün sağlaması gereken soğutma kapasitesi tablo 5.30'da verilen değerleri ve kurutucu havanın uygun sıcaklık değerine soğutulması için çekilmesi gereken enerji miktarını karşılamalıdır. Kurutma fırını içerisinde sistem boyutlandırılmasını etkileyen parametreler çalışma süresince sabit olmadığından ısı pompasının boyutlandırılması ortalama 50℃ kurutma ortamı koşulları için yapılmıştır ve tablo 5.31'de verilmiştir. Bununla birlikte farklı koşulların elde edilebilmesi adına fırına verilmesi gereken güç değerleri termodinamik analiz ile belirlenmiştir. Bu değerler de tablo 5.32 ve tablo 5.33'de verilmiştir. Yapılması gereken fırında istenen sıcaklık şartlarının sağlanabilmesi için verilmesi gereken gücün ayarlanmasıdır. Isı pompası yoğuşturucusunun fırın içerisindeki kısmi yerleşimiyle istenilen miktarda enerji fırına verilebilir.

Tablo 5.30 Fırının Saatlik Ortalama Kurutma Yükü Değerleri

0-1 Saat Arası	1-2 Saat Arası	2-3 Saat Arası	3-4 Saat Arası	4-5 Saat Arası	5-6 Saat Arası
10,15 kW	9,7 kW	9,3 kW	8,85 kW	8,4 kW	8 Kw

Isı pompalı kurutma sistemlerinin enerji tasarruflarının çıkarılması için eş değer elektrikli konvansiyonel kurutma fırınlarının güç tüketimleri farklı kurutma havası hızları için hesaplanmıştır. Bu hesaplama elektrikli konvansiyonel fırınların sıcaklık eğrilerinin ısı pompalı fırınların sıcaklık eğrileriyle çakıştırılmasıyla elde edilmiştir.

Isı Pompalı Sistemin Enerji Tasarrufu = Eş Değer Elektrikli Fırının Güç Tüketimi – Kompresör Gücü (5.69)

Tablo 5.31 Farklı Koşullar İçin Isı Pompası Boyutları ve Yatırım Maliyetleri

Kurutma Havası Debisi **kg/s**	Kurutma Havası Hızı **m/s**	Kompresör Gücü **kW**	Yoğuşturucu Kapasitesi **kW**	Buharlaştırıcı Kapasitesi **kW**	Kompresör Maliyeti **TL**	Toplam Sistem Maliyeti **TL**
0,35625	0,25	2,5	13	10,5	3190	6400
0,4275	0,3	3,1	15,7	12,6	3330	6700
0,49875	0,35	3,7	18,7	15	4070	7250
0,57	0,40	4,2	21,2	17	4900	8200
0,64125	0,45	4,9	24,7	19,8	5080	8350
0,7125	0,5	5,5	27,8	22,3	5370	8600

Tablo 5.32 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanması Durumunda Eşdeğer Güneş Enerjili ve Isı Pompalı Kurutma Sistemleri

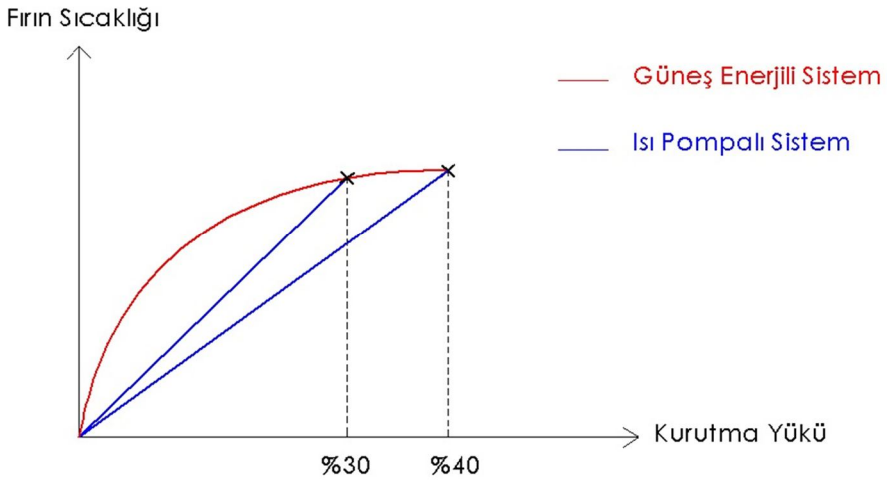
Hava Hızı **m/s**	Ulaşılan Fırın Sıcaklığı °C	Depo **m^3**	**ε**	Kolektör Adedi	Güneş Enerjili Sistemin Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Isı Pompalı Fırına Verilmesi Gereken Net Güç **kW**	I.P. Sistemin Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	I.P. Sistemin 25 Yıllık Kar Durumu **TL**
0,25	54	10	0,9	26	93,045	1.7	70,720	22928
0,3	57	10	0,9	30	112,555	1.9	77,122	25546
0,35	58	10	0,9	33	131,420	2	82,077	26156
0,4	59	10	0,9	36	149,660	2.1	88,272	26786
0,45	60	10	0,9	39	167,296	2.15	92,173	28333
0,5	60	10	0,9	42	185,687	2.15	95,230	29033

Isı pompalı kurutma sistemini güneş enerjili kurutma sistemine belirli zaman aralıkları boyunca eş değer tutabilmek için fırına verilmesi gereken net enerji değerinin ayarlanması gerekir. Güneş enerjili sistemde sıcaklığın ilk saatlerde şiddetli artması ve daha sonra rejime girme eğilimi olmaktadır. Bu durum şekil 5.28'de gösterilmiştir. Dolayısıyla ısı pompalı sistemi %40'dan daha düşük kurutma yüklerinde güneş enerjili

sistemle eş değer kılmak için kısa zamanda sıcaklık artışının daha fazla olması gerekmektedir ki bu da fırına verilmesi gereken net güç değerini arttırmaktadır. Isı pompasının boyutları tablo 5.31'de verilenlerle sabit tutularak yoğuşturucunun fırın içerisindeki konumunun ayarlanmasıyla fırına verilen net güç miktarı ayarlanabilir.

Tablo 5.33 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanması Durumunda Eşdeğer Güneş Enerjili ve Isı Pompalı Kurutma Sistemleri

Hava Hızı **m/s**	Ulaşılan Fırın Sıcaklığı °C	Depo **m^3**	**ε**	Kolektör Adedi	Güneş Enerjili Sistemin Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	Isı Pompalı Fırına Verilmesi Gereken Net Güç **kW**	I.P. Sistemin Günlük Enerji Tasarrufu **kWh**	I.P. Sistemin 25 Yıllık Kar Durumu **TL**
0,25	53	10	0,9	19	64,035	2,5	51,386	13391
0,3	57	10	0,9	22	77,871	3	58,262	16245
0,35	59	10	0,9	25	91,401	3,3	63,822	17153
0,4	61	10	0,9	27	104,630	3,5	69,195	17376
0,45	62	10	0,9	30	117,567	3,6	72,650	18653
0,5	63	10	0,9	32	130,216	3,7	76,747	19916



Şekil 5.28 Güneş Enerjili ve Eş Değer Isı Pompalı Sistemlerin Örnek Sıcaklık Eğrileri

Tablo 5.33'de verildiği üzere %30'luk kurutma yükünün karşılanması durumunda enerji tasarruf değerleri ve kolektör sayıları azalmıştır. Böylelikle güneş enerjili kurutma sistemi için yatırım maliyetleri de azalmıştır. Kolektör sayılarındaki azalmanın sebebi çalışma süresinin azalmasıyla depodaki soğumanın daha az olmasıdır. Tablo 5.32 ve tablo 5.33'de verilen kar değerleri eş değer elektrikli konvansiyonel kurutma fırınlarına karşı elde edilen değerlerdir. Eşdeğer güneş enerjili ve ısı pompalı sistemlerde fırın sıcaklık eğrileri şekil 5.28'de görüleceği üzere farklı yollar üzerinde bulundukları için maliyet açısından kıyaslandıkları elektrikli konvansiyonel kurutma fırınlarının sıcaklık eğrileri de farklı yollar üzerinde bulunmaktadır. Dolayısıyla güneş enerjili kurutma sistemleriyle ısı pompalı kurutma sistemlerinin birbirleriyle doğru şekilde kıyaslanabilmesi için sistemlerden birinin diğerine göre yatırım maliyetinin ve enerji kazancının olmadığı kabulü yapılmıştır. Güneş enerjili kurutma sistemlerinin yatırım maliyetleri ve enerji kazançları daha faza olduğu için, ısı pompalı sistemlerin yatırım maliyetleri ve enerji kazançları sıfır referans değerinde kabul edilebilir. Bu bakış açısıyla yapılan bir hesaplama iki sistemin birbirleriyle kıyaslanmasında sağlıklı fikirler verebilir. Güneş enerjili kurutma sistemlerinin tablo 5.25'den tablo 5.29'a kadar verilen yatırım maliyetleri ve enerji tasarruf değerlerinden yararlanarak, sonuçlar tablo 5.34 ve tablo 5.35'de verilmiştir.

Tablo 5.34 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanması Durumunda Güneş Enerjili Kurutma Sistemleriyle Eşdeğer Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinin Maliyet Açısından Kıyaslanması

Hava Hızı **m/s**	Ulaşılan Fırın Sıcaklığı °C	Depo **m^3**	**ε**	Kolektör Adedi	Güneş Enerjili Sistemin Isı Pompalı Sisteme Göre Günlük Enerji Tasarrufu Fazlalığı **kWh**	Güneş Enerjili Sistemin Eş Değer Isı Pompalı Sisteme Göre Yatırım Maliyeti Fazlalığı (İki Sistemin Bakım Maliyetleri Dahil) **TL**	Güneş Enerjili Sistemin Isı Pompalı Sisteme Karşı Sağlayabileceği 25 Yıllık Kar Durumu **TL**
0,25	54	10	0,9	26	22,325	17306	-6293
0,3	57	10	0,9	30	35,433	20026	-2548
0,35	58	10	0,9	33	49,343	20627	3711
0,4	59	10	0,9	36	61,388	20621	9659
0,45	60	10	0,9	39	75,123	22658	14397
0,5	60	10	0,9	42	90,457	24468	20150

Tablo 5.35 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanması Durumunda Güneş Enerjili Kurutma Sistemleriyle Eşdeğer Isı Pompalı Kurutma Sistemlerinin Maliyet Açısından Kıyaslanması

Hava Hızı **m/s**	Ulaşılan Fırın Sıcaklığı ℃	Depo **m^3**	**ε**	Kolektör Adedi	Güneş Enerjili Sistemin Isı Pompalı Sisteme Göre Günlük Enerji Tasarrufu Fazlalığı **kWh**	Güneş Enerjili Sistemin Eş Değer Isı Pompalı Sisteme Göre Yatırım Maliyeti Fazlalığı (İki Sistemin Bakım Maliyetleri Dahil) **TL**	Güneş Enerjili Sistemin Isı Pompalı Sisteme Karşı Sağlayabileceği 25 Yıllık Kar Durumu **TL**
0,25	53	10	0,9	19	12,649	12056	-5905
0,3	57	10	0,9	22	19,608	14026	-4354
0,35	59	10	0,9	25	27,579	14627	-1023
0,4	61	10	0,9	27	35,435	13871	3607
0,45	62	10	0,9	30	44,917	15908	6247
0,5	63	10	0,9	32	53,469	16968	9899

BÖLÜM 6

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada belirlenen süre içerisinde kurutma yükü belli olan bir kurutma fırınının farklı çalışma sistemlerine göre termodinamik analizi yapılmıştır. Fırının elektrikli, ısı pompalı ve güneş enerjili olarak çalışma biçimleri ayrı ayrı incelenmiştir ve tüm durumlar için enerji tüketim miktarları çıkarılmıştır. Fırının toplam çalışma süresi 24 saat olurken, güneş enerjisi kaynaklı olarak çalıştığı zaman dilimi sistem boyutlandırmasının getirdiği kısıtlamalardan dolayı 6 saat olarak alınmıştır. Bu zaman dilimi kurutma fırını için %40'lık kurutma yüküne karşılık gelmektedir. Kurutma fırınının enerji tüketimiyle ilgili çıkarılabilecek genel sonuç ve değerlendirmeler yapılan kabuller ile şu şekilde sıralanabilir:

1-) Kurutma fırınının termodinamik analizi yapıldığı için tüm sistemlerde (elektrikli, ısı pompalı ve güneş enerjili) sıcaklık kurutma havası, ürün ve fırının diğer bileşenleriyle birlikte üniform olarak arttırılmıştır. Dolayısıyla fırına verilecek enerji değerleri bütün sistemler için olabilecek maksimum değerde bulunmuştur. Bu sayede kurutma yapabilmek için en kötü durumda verilmesi gereken enerji değerlerine ulaşılmıştır.

2-) Elektrikli ve güneş enerjili sistemlerde fırına alınan havanın bir kere ürünler üzerinden geçirildikten sonra tamamen dışarı tahliye edildiği kabulü enerji tüketimini arttırmaktadır. Kurutma havasının belirli oranlarda tahliye edilmeden tekrar kullanılması enerji tüketimini azaltabilir. Bu aynı zamanda güneş enerjili sistem için sistem boyutlarının azaltılabilmesi anlamına gelmektedir. Isı pompalı sistemde hesaplamalar tamamen kapalı çevrime göre yapılmıştır. Kurutma havasının dışarıya tahliye edilmemesi enerji tüketimini minimize etmektedir. Ancak gerçek uygulamada

tamamen kapalı çevrime göre çalışıldığında buharlaştırıcı üzerinde çok fazla nem yağuşabileceğinden sistemin ITK ve STK değerlerinde düşüş olabilir. Bu yüzden nemli havanın bir kısmının buharlaştırıcı ile karşılaştırılmadan direkt olarak dışarı tahliye edilmesi gerekebilir. Bu da sistemde enerji tüketimini arttıracağı için daha büyük bir kompresöre ihtiyaç duyulabilir.

3-) Çini malzemesinin kuruma davranışı ve bunu etkileyen parametreler ile ilgili herhangi bir verinin elde mevcut olmamasından dolayı fırının enerji hesapları farklı parametreler için ayrı ayrı yapılmıştır. Belirli çalışma sıcaklık şartları göz önüne alınarak farklı kurutma havası hızlarında hesaplamalar yapılmıştır. Kurutma havasının hızı elektrikli ve güneş enerjili kurutma fırını için önemli bir parametre olmuştur. Kurutma havasının hızının artmasıyla fırına sağlanması gereken enerji değeri artmaktadır. Bu da güneş enerjisi sistemi boyutlarının arttırılması anlamına gelmektedir. Isı pompalı sistem içinse kurutma havasının hızı fırına verilmesi gereken net enerji miktarı açısından bir parametre olmamaktadır. Bunun temel sebebi sistemde hava tahliyesinin bulunmaması ve dolayısıyla havadaki nemin gizli ısısının ısı pompasına geri kazandırılmasıdır. Ayrıca bu sistemde hava tahliyesinin bulunmayışı ve dışarıdan soğuk hava alma gereksiniminin olmayışı da sisteme ek enerji kazancı sağlamaktadır. Bununla birlikte hava hızının arttırılması ısı pompalı sistem için de yatırım maliyetlerini arttırmaktadır.

4-) Aynı sıcaklık şartlarında çalışan ve kurutma havası hızının 0.3 m/s olduğu bir ısı pompalı kurutma fırınının enerji tüketimi elektrikli konvansiyonel kurutma fırınının enerji tüketiminden termodinamik analiz açısından yaklaşık olarak 20 kat daha az bulunmaktadır. Kurutma havası hızının artması bu değeri daha da arttırmaktadır.

5-) Enerji hesaplamalarının tamamı yaz ayları koşullarına göre yapılmıştır ve çevre hava şartları 30°C, %50 bağıl nem değerlerinde alınmıştır. Dolayısıyla kış ayları için yapılacak hesaplarda sistemin yenmesi gereken sıcaklık farkı artacağından enerji tüketimi artacaktır ve sistem boyutlandırılmasında artış görülecektir. Yaz ayları için tasarlanacak sistemler her zaman yatırım maliyeti en düşük olan sistemler olacaktır.

6-) Termodinamik analize ek olarak ısı ve kütle transferi analizlerinin yapılması gerçeğe daha yakın sonuçlar çıkaracaktır. Böylelikle fırın sıcaklığının üniform olarak arttırılmaması sağlanabilir ve sistem boyutları ile enerji tüketim değerleri daha düşük seviyelerde hesaplanabilir. Yapılan çalışmada kuruma hızı zamanın bir fonksiyonu olarak alınmıştır. Isı ve kütle transferi analizlerinin dahil edilmesiyle, ürün kuruma hızının kurutma havası hızı ve sıcaklığının da fonksiyonu olarak alınması gerçeğe daha yakın sonuçların alınmasına yardımcı olabilir. Bunun için öncelikle çini malzemesinin kuruma davranışının deneyler ile ortaya çıkarılması ve desteklenmesi gerekmektedir.

7-) Güneş enerjisiyle kurutma yapılabilmesi için depo sıcaklığının yüksek değerlerde olması gerekmektedir. Bu da kolektör veriminin düşük çıkmasına sebep olmaktadır ve gereken kolektör alanları da yüksek çıkmaktadır.

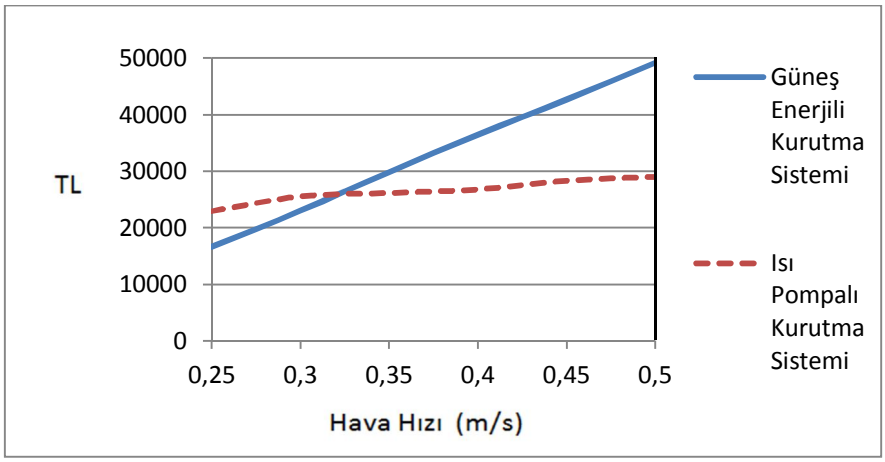
Maliyet analizi için alınan sonuçlar ve değerlendirmeler iki ana madde halinde şu şekilde verilmiştir:

1-) Güneş enerjili kurutma sistemi için yapılan maliyet analizinin sonuçları, kurutma havası hızının ve sıcaklık değerinin artmasıyla yatırım maliyeti ile elektrikli konvansiyonel kurutma fırınına karşı elde edilen kar değerlerinin arttığını göstermiştir. Güneş enerjili kurutma sistemi için yapılan bu maliyet analizinin sonuçları farklı boyutlardaki sistemlerin birbirleriyle kıyaslanması için kullanılmamalıdır. Her bir güneş enerjili sistemin kendine özgü çalışma sıcaklık eğrisi vardır ve yapılan maliyet analizi güneş enerjili sistemin kendi sıcaklık eğrisi üzerinden çalışan bir elektrikli konvansiyonel sisteme karşı elde edilen kar veya zarar durumlarını göstermektedir. Dolayısıyla istenilen kurutma sıcaklık değerleri bilindiği zaman güneş enerjili sistemlere ait sıcaklık eğrilerinden sistem boyutlandırılması seçilebilir ve maliyet analizi tablolarından da sistemin farklı zamanlar içerisinde elde edebileceği kar veya zarar durumları belirlenebilir. Daha öncede belirtildiği gibi maliyet analizi sadece 3 aylık yaz döneminde elde edilen enerji tasarruflarından yola çıkılarak yapılmıştır. Dolayısıyla güneş enerjili sistemlerin gerçek uygulamada diğer aylarda da kısmen çalışması sağlanarak enerji tasarrufları ve kar değerleri arttırılabilir. Düşük hava hızı değerlerinde ve 15 senelik bir ekonomik ömürde sistemlerin kar durumları pek ikna edici seviyede

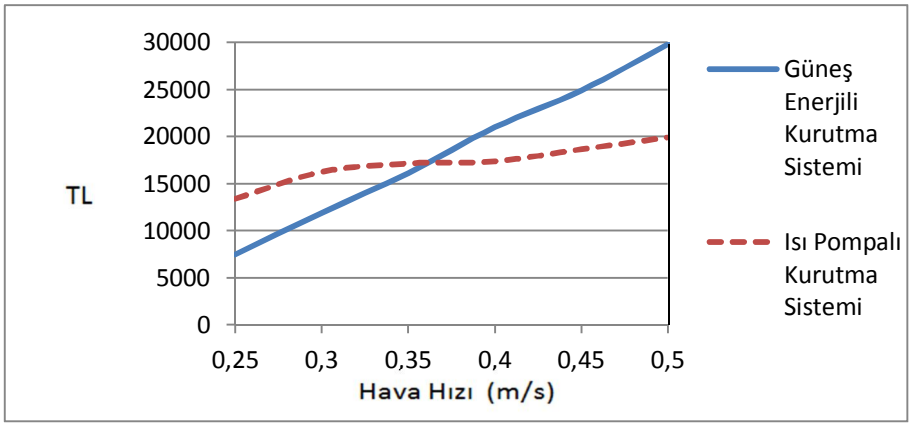
olmamaktadır. Dolayısıyla ilgili kurutma fırınında güneş enerjisinin kullanımı ekonomik ömrün 15 seneden fazla olması durumunda tercih edilebilir. Kurutma havası hızının da yüksek değerlerde belirlenmesi güneş enerjili bir sistemin yatırımı için mantıklı gözükmektedir. Elektrik ücretine gelen yıllık zam miktarları var olan enflasyon oranı yerine daha yüksek bir oran üzerinden hesaplanırsa güneş enerjili kurutma sistemlerinin kar değerleri daha da artacaktır.

2-) Güneş enerjili kurutma sistemleriyle ile ısı pompalı kurutma sistemlerinin maliyet açısından kıyaslanması %30 ve %40 olmak üzere iki farklı kurutma yükünün karşılanması durumuna göre yapılmıştır. Bunun sebebi daha önce bahsedildiği üzere maliyet analizinin güneş enerjili kurutma sistemlerinin çalışabildiği yük değerlerinde yapılmasıdır. Önceki bölümde tablo 5.32 ve tablo 5.33'de ki sıcaklık değerleri güneş enerjili kurutma sistemlerinden elde edilmiştir. Güneş enerjisiyle kurutmada ulaşılan sıcaklık değerleri farklı sistemler için aynı olabilse de, fırın sıcaklık eğrilerinin izlediği yollar farklı olduğundan dolayı enerji tasarruf değerleri farklı olmaktadır. Isı pompalı kurutma sistemlerinde ise aynı sıcaklık değerlerine sadece tek bir sıcaklık eğrisi ile ulaşılabilmektedir. Sadece kurutma fırınına verilen güç miktarı sıcaklık eğrisini ve nihai sıcaklık değerini değiştirebilmektedir. Dolayısıyla farklı güneş enerjili kurutma sistemlerine eş değer kabul edilebilecek tek bir ısı pompalı kurutma sisteminin olması mümkün olabilir. Şekil 5.28'de verilen örnek şemadan görüleceği üzere de güneş enerjisiyle daha yüksek sıcaklıkta kurutma yapılabilmektedir. Güneş enerjili sistemde sıcaklık artışının ilk saatlerde fazla olması ve ısı pompalı sisteminde aynı şartları sağlamasının gerekliliği, ısı pompalı sistemde fırına verilmesi gereken gücü düşük yük karşılanan durumda beklenenden yüksek tutmaktadır. Isı pompalı kurutma sisteminin enerji tasarrufu kendi sıcaklık eğrisi üzerinde çalışan elektrikli konvansiyonel bir fırının enerji tüketiminden kendi enerji tüketiminin çıkarılmasıyla bulunabilmektedir. Güneş enerjili sistemlerle ısı pompalı sistemlerin birbirleriyle maliyet açısından kıyaslanabilmesi için ısı pompalı sistemlerin yatırım maliyetleri ve enerji tasarrufları sıfır değerinde alınarak, güneş enerjili kurutma sistemine ait fazladan olan yatırım maliyetleri ve enerji tasarrufları çıkarılmıştır. İki farklı kurutma yükünde yapılan maliyet analiz sonuçları düşük kurutma hızlarında (0.25 – 0.3 m/s) ısı pompalı kurutma sistemlerinin daha avantajlı olduğunu gösterir niteliktedir. Bu hava hızı değerlerinde

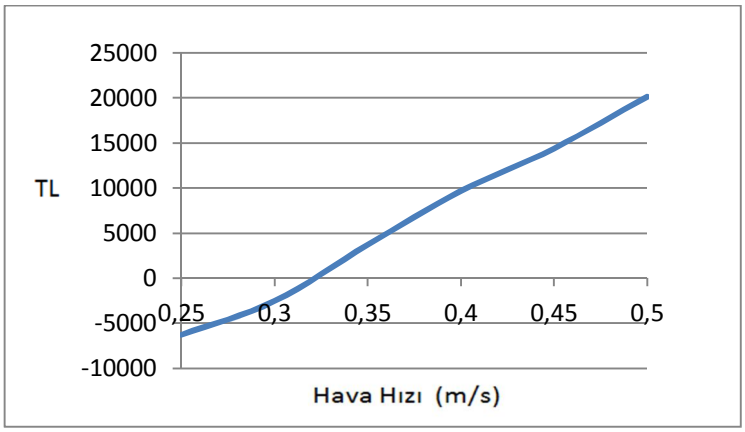
güneş enerjili kurutma sistemleri kendi yatırım maliyeti fazlalıklarını kurtaramamaktadır. Yüksek kurutma havası hızı değerlerinde ise (0.4– 0.5 m/s) fazladan olan yatırım maliyetleri kurtarılabilmektedir. Ancak 25 yıllık bir çalışma süresi göz önüne alınacak olursa çok tatmin edici kar değerleri elde edilememektedir. Şekil 6.1 ve şekil 6.2'de güneş enerjili ve ısı pompalı kurutma sistemlerinin kar değerleri verilirken, şekil 6.3 ve şekil 6.4'de güneş enerjili kurutma sistemlerinin ısı pompalı kurutma sistemlerine kıyasla elde edebildiği kar ve zarar değerleri verilmiştir. Şekil 6.3 ve 6.4'de eğrinin negatif bölgede olduğu şartlar güneş enerjili kurutma sistemlerinin ısı pompalı kurutma sistemlerine kıyasla karlı olmadığı bölgelerdir. Eğrinin pozitif olduğu şartlarda ise güneş enerjili kurutma sistemleri fazladan olan yatırım maliyetlerini kurtarmaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda kurutma yapmak için güneş enerjili kurutma sistemlerinin tercihi uygun olabilir. Ancak güneş enerjisinin her zaman mevcut olmayışı da göz önüne alınarak tüm şartlar için ısı pompalı sistemlerin seçimi mantıklı olabilir. Tüm bunlarla birlikte güneş enerjili sistemler her zaman ısı pompalı sistemlerden daha az enerji tüketmektedir ve fosil enerji kaynaklarının giderek tükenmesi, çevresel faktörler üzerinden bakılmasıyla daha temiz bir kurutma sistemi oluşturmaktadır.



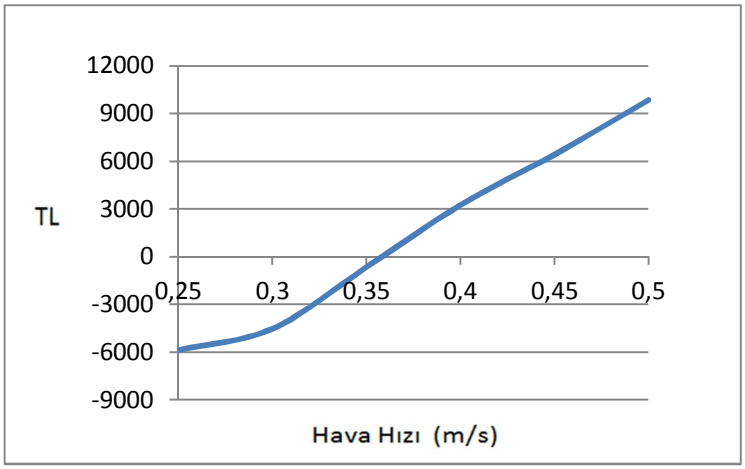
Şekil 6.1 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanmasında Sistem Karları



Şekil 6.2 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanmasında Sistem Karları



Şekil 6.3 % 40'lık Kurutma Yükünün (6 Saatlik) Karşılanmasında Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Isı Pompalı Kurutma Sistemine Karşı Kar-Zarar Durumu



Şekil 6.4 % 30'luk Kurutma Yükünün (4 Saatlik) Karşılanmasında Güneş Enerjili Kurutma Sisteminin Isı Pompalı Kurutma Sistemine Karşı Kar-Zarar Durumu

KAYNAKLAR

[1] Ö. Atalay, ***Güneş Enerjisi Destekli Nem Almalı Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı ve Termodinamik Analizi,*** Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2007

[2] M. Aktaş***, Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi,*** Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2007

[3] C. Yavuz, ***Kondenzasyonlu Kurutma Fırınında Ölçme ve Kontrolün Bilgisayar Ortamında Gerçekleştirilmesi***, Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 2004

[4] M. Aktaş, İ. Ceylan, H. Doğan, Z. Aktekeli, ***Güneş Enerjisi Destekli, Isı Pompalı Kırmızıbiber Kurutucusunun Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneyleri,*** Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 30, 1, 111-120, 2010

[5] M. Durmuş, K. Bilen, İ. Uzun, ***Isı Pompalı Tekstil Kurutma Makinelerinde Kurutma Havası Debisinin Kurutucu Performansına Etkisinin Deneysel Analizi***, Mühendis ve Makina, cilt 53, sayı 635, 40-50

[6] Ö. Yamaç, ***Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalarının Teorik İncelenmesi,*** Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, 2005

[7] Ö. Özgener, A. Hepbaşlı, ***Performance Analysis of a Solar-Assisted Ground-Source Heat Pump System for Greenhouse Heating:an Experimental Study***, Building and Environment 40 ,1040–1050, 2005

[8] A.M. Shariah, G.O.G. Löf, ***The Optimization of Tank Volume To Collector Area Ratio for a Thermosyphon Solar Water Heater***, Renewable Energy, Vol. 7, No.3, 289-300, 1996

[9] K. Çomaklı, U. Çakır, M. Kaya, K. Bakırcı, ***The Relation of Collector and Storage Tank Size in Solar Heating Systems,*** Energy Conversion and Management 63, 112–117, 2012

[10] A. Sander, D. Skansi, N. Bolf, ***Heat and Mass Transfer Models in Convection Drying of Clay Slabs,*** Ceramics International 29, 641–653, 2003

[11] A. Lakatos, ***Sorption Isotherm Measurements Carried Out On Soil Samples,*** Urban Energy Conference, Debrecen – Hungary, 2011

[12] A. Belhamri, ***Characterization of the First Falling Rate Period During Drying of a Porous Material***, Drying Technology,Vol. 21, No. 7, 1235–1252, 2003

[13] S. Chemkhi, F. Zagrouba, ***Water Diffusion Coefficient in Clay Material from Drying Data***, Desalination 185, 491–498, 2005

[14] S.J. Kowalski, B. Mielniczuk, ***Analysis of Effectiveness and Stress Development during Convective and Microwave Drying***, Drying Technology: An International Journal, 26:1,64-77, 2007

[15] Z. Zhang, S. Yang, D. Liu, ***Mechanism and Mathematical Model of Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Materials***, Heat Transfer-Asian Research, 28 (5), 1999

[16] B. J. Briscoe, G. Lo Biundo, N. Özkan, ***Drying Kinetics of Water-Based Ceramic Suspensions for Tape Casting,*** Ceramics International 24, 347-357, 1998

[17] M. Mirza, ***Isı Pompalı Kurutucunun Isıl Tasarımı***, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, 2006

[18] Y.A. Çengel, M.A. Boles, ***Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik***, İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 2011

[19] K. Ünlü, ***Hava ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi,*** Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2005

[20] A.M. Omer, ***Ground-Source Heat Pumps Systems and Applications***, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 344–371, 2008

[21] B. Başaran, B.O. Bitlisli, Ö. Sarı, N. Özbalta, A. Güngör, ***Deri Kurutulmasında Yeni Teknolojiler: Isı Pompalı Kurutucular,*** I.Ulusal Deri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ege Üniversitesi, İzmir, 634-642,644-647, 2004

[22] R. Daghigh, M.H. Ruslan, M.Y. Sulaiman, K. Sopian, ***Review of Solar Assisted Heat Pump Drying Systems for Agricultural and Marine Products,*** Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2564–2579, 2010

[23] A. Güngör, N. Özbalta, ***Endüstriyel Kurutma Sistemleri***, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 737-747, 1997

[24] O.V. Ekechukwu, B. Norton, ***Review of Solar-Energy Drying Systems II: an Overview of Solar Drying Technology,*** Energy Conversion & Management 40, 615–655, 1999

[25] J.A. Duffie, W.A. Beckman, ***Solar Engineering of Thermal Processes***, John Wiley & Sons, New York, 1991

[26] EIE-Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, http://www.eie.gov.tr/

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Konya'da doğdu. İlköğretimini Konya'da tamamladı. 2002 yılında girdiği Üsküdar Anadolu Lisesi'nden 2006 yılında mezun oldu ve aynı yıl girdiği Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2011 yılı Eylül Ayı'ndan beri Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.